

# Cos'è l'universo

Per chi non ha fretta di capire tutto

Pensato, composto e scritto da **Italo Mazzitelli**

Aggiornato l'ultima volta nell'anno **2021**

# Sommario

– Introduzione, ma bisogna leggerla	8
<b>1) – COME FUNZIONA LA SCIENZA?</b>	<b>12</b>
1.1) – I fondamenti del Metodo scientifico	12
1.2) – Di metafisica e altre amenità	14
1.3) – Il “Realismo” e il suo crollo	17
<b>2) – UNA PRIMA OCCHIATA ALL’UNIVERSO</b>	<b>19</b>
2.1) – Premesse e incoraggiamenti	19
2.2) – Il primo inventario	26
2.3) – Uno strano <i>orizzonte</i>	30
<b>3) – ANCORA LO SCATOLONE INFINITO</b>	<b>36</b>
3.1) – La parabola del professore odioso	36
3.2) – Varianti su Cappuccetto rosso	41
3.3) – Quanto è grande l’UC misurato a spanne?	45
<b>4) – UN ATTO DI UMILTÀ</b>	<b>49</b>
4.1) – Un cervello un po’ limitato	49
4.2) – Da uno a infinito	53
4.3) – E adesso, un po’ di zoologia	58
<b>5) – NUVOLETTE PER IL VECCHIO KELVIN</b>	<b>67</b>

5.1) – Qualcosa deve per forza essere relativo	67
5.2) – In balia dei fumi dell'etere	74
<b>SEZIONE II: L'UNIVERSO <i>RELATIVISTICO</i></b>	<b>79</b>
<b>6)– IL TERRIBILE SPAZIOTEMPO</b>	<b>80</b>
6.1) – Bisogna essere giovani?	80
6.2) – Inciampiamo in una radice (quadrata)	84
6.3) – Abitiamo un mondo a quattro dimensioni?	88
<b>7) – LA TEORIA DELL'INVARIANZA</b>	<b>91</b>
7.1) – Non tutto è relativo	91
7.2) – Minkowski e il “cane pigro”	100
7.3) – Il pancarré cosmico	105
<b>8) – L'UNIVERSO IN ESPANSIONE</b>	<b>108</b>
8.1) – Riprendiamo le fila sparse	108
8.2) – Anticipazioni sulla forza di gravità	112
8.3) – Sirene ed esplosioni.	115
8.4) – God save the King. Forever!	120
<b>9) – CURVA, PIEGA E ARROTOLA</b>	<b>124</b>
9.1) – Newton e i suoi dubbi	124
9.2) – E adesso torturiamo un pianimale	128
9.3) – Forze, queste sconosciute	135
9.4) – Cadere senza farsi male (solo per un po')	140

9.5) – Allacciate le cinture in curva	146
9.6) – Un modellino troppo rozzo da raccontare	150
<b>10) – LASCIATE OGNI SPERANZA, ECCETERA</b>	<b>155</b>
10.1) – Riepilogo, e crollo d’una certezza	155
10.2) – Gira che ti rigira...	161
10.3) – “Guardare” i Buchi neri	167
10.4) – Avviciniamoci all’“ <i>orizzonte degli eventi</i> ”	173
10.5) – ...e ora, dentro!	179
10.6) – Non commettere errori già commessi	183
<b>11) – DI NUOVO IL MODELLO D’UNIVERSO</b>	<b>189</b>
11.1) – Il Big Bang è stato come una bomba?	189
11.2) – L’ultimo atto del Big Bang.	192
11.3) – Recuperare qualcosa di <i>assoluto</i> .	197
11.4) – Per prime furono le stelle. Poi le galassie	199
<b>12) – LA “FORMA” DELL’UNIVERSO</b>	<b>203</b>
12.1) – Mappamondi per dritto e per rovescio	203
12.2) – Si gonfia, oppure crolla su se stesso?	207
12.3) – Ha ragione l’inventario o la bilancia?	212
12.4) – Dove avevamo ficcato Euclide?	216
12.5) – L’espansione accelerata	221
12.6) – Passato, presente e futuro.	226

12.7) – E finalmente <i>apriamo</i> l’Universo Causale	230
12.8) – Un telescopio a infiniti ingrandimenti	234
12.9) – Il “ <i>Modello cosmologico di concordanza</i> ”	237
<b>SEZIONE III: L’UNIVERSO <i>QUANTISTICO</i></b>	<b>238</b>
<b>13) – UN PICCOLO, ENORME EDIFICIO</b>	<b>239</b>
13.1) – La seconda nuvoletta di Lord Kelvin.	239
13.2) – Planck deve indossare i “quanti”	246
13.3) – “ <i>Heisenberg 2</i> ”: la vendetta	254
13.4) – Einstein non vuol credere ai fantasmi	259
<b>14)– COSA SIGNIFICA, PERÒ?</b>	<b>267</b>
14.1) – Il Vecchio leone lancia l’ultimo ruggito	267
14.2) – E Schrödinger <i>miagola</i> con efficacia	273
14.3) – Probabilità e ignoranza	276
14.4) – Retrospettiva sulla MQ	279
<b>15) – IL MODELLO STANDARD</b>	<b>281</b>
15.1) – Riassunto sulle forze. Anzi: “Interazioni”	281
15.2) – Incubi al risveglio di Finnegan	287
15.3) – Una tavolozza a tre (sei) colori	293
<b>16) – IL <i>MACCHINARIO</i> DEL MS</b>	<b>297</b>
16.1) – Morte di un fantasma viaggiatore	297
16.2) – Infinito meno infinito uguale...	303

16.3) – Dove si lavora con la colla	309
16.4) – Nell’antro dell’alchimista	312
16.5) – Specchi e altre stramberie	317
<b>17) – PARTICELLE, MA QUANTE?</b>	<b>320</b>
17.1) – Problemi di famiglia	320
17.2) – La natura è matrigna (con l’antimateria)	325
17.3) – Per soli adulti (specie se matematici...)	330
<b>SEZIONE IV: DAL <i>BIG BANG</i> AI <i>MULTIVERSI</i></b>	<b>333</b>
<b>18) – TRA METAFISICA E FISICA</b>	<b>334</b>
18.1) – Prolegomeni a ogni futura scienza...	334
18.2) – Un infinito troppo grande per noi	338
<b>19) – L’ORIZZONTE DELLA CONOSCIBILITÀ</b>	<b>343</b>
19.1) – Tanto, troppo omogeneo!	343
19.2) – Un Big Bang piccolo piccolo	346
<b>20) – TANTA BUONA FISICA</b>	<b>352</b>
20.1) – Poi non succede più nulla...	352
20.2) – La nucleosintesi primordiale	355
20.3) – Due chiacchiere di commiserazione	359
<b>21) – TANTA “<i>MEDIOCRE</i>” FISICA</b>	<b>362</b>
21.1) – Il <i>cosiddetto</i> “Principio Antropico”	362

21.2) – Il “ <i>lato oscuro</i> ” dell’universo	366
22.3) – E quello ancora più “ <i>tenebroso</i> ”	370
21.4) – Eppure, Einstein ha <i>sempre</i> ragione	374
21.5) – Ai confini del plausibile	376
21.6) – E anche un po’ oltre	379
<b>22) – TANTA “<i>DISCUTIBILE</i>” FISICA</b>	<b>381</b>
22.1) – Un <i>Multiverso</i> , finalmente!	381
22.2) – Stringhe a bizzeffe (e <i>superstringhe</i> )	384
<b>Appendice 1: Breve glossario</b>	<b>389</b>
<b>Appendice 2: Testi consigliati</b>	<b>400</b>



## - Introduzione, ma bisogna leggerla

Quando scrissi il libro “Tutti gli universi possibili (e altri ancora)”, dato alle stampe nell’ormai lontano 2002 per tipi dell’editore Liguori (a mia conoscenza ne passarono per le rotative solo 2000 copie, includendo la prima e unica ristampa), cominciai a riflettere sul concetto di “Modello d’universo” e lo sviluppai nel modo più semplice possibile. Chi ebbe la buona o cattiva ventura di leggere l’esito delle mie elucubrazioni ne decretò un ragionevole successo *di nicchia*. Ora, essendo passati diversi anni e poiché nel frattempo sono venute alla luce un bel gruzzolo di informazioni nuove, mi è parso opportuno collazionarle, ordinarle e darne notizia al lettore interessato. Infatti, la cosmologia e la sottostante fisica di base, specie quella delle particelle elementari e la sua saldatura (ancora imperfetta) col Big Bang, hanno continuato a procedere imperterrite e ai nostri giorni abbiamo messo le mani su molti dati non disponibili nel 2002.

Di conseguenza, poiché non valeva più la pena di *aggiornare* il vecchio libro ma occorreva scriverne un altro completamente diverso, includendo interi capitoli dedicati ad argomenti non trattati in precedenza, ho collazionato queste quattro Sezioni che formano, nel loro insieme, un tomo unico rivolto a un pubblico più ristretto e *paziente* nel senso che la trattazione, pur sempre discorsiva e tesa alla costruzione di un Modello mentale d’universo, ha qualche ambizione non dico di *completezza* (la sola idea farebbe ridere), ma almeno di una certa *sostanziosità* nel risultato che desidero raggiungere. In soldoni: oltre alla Relatività (struttura a *grana grossa*) e alla Meccanica Quantistica (struttura a *grana piccola* del cosmo), vorrei rendere edotto il lettore su alcuni risvolti dei cosiddetti “Modelli Standard” (con le maiuscole). Sono due, poiché il primo (meno completo) si riferisce all’universo nel suo insieme, mentre il secondo (più avanzato ma con gravi lacune – almeno mentre scrivo) contempla la forza elettromagnetica e quelle nucleari.

Cosa c’entrano questi due “*Modelli Standard*” col Modello mentale d’universo che vorrei costruire? Perbacco: sono le fondamenta su cui edificare tutto, dal Big Bang alla *materia oscura*, alla distribuzione delle galassie nel cosmo e all’asimmetria tra materia e antimateria, alla fisica dei neutrini e dei raggi cosmici, forse anche all’espansione *accelerata* dell’universo e chi più ne ha più ne metta!

Vorrei essere chiaro fin da subito: non tratterò la *geografia astronomica* mostrandovi belle immagini della superficie di Marte, o di nebulose planetarie o galassie in collisione; ci sono tanti posti (suggerisco gli archivi della NASA e dell’ESA) dove trovare cose del genere. No: io giocherò con i buchi neri e i quark, coi bosoni di Higgs e i gluoni... allacciate le cinture!

Perciò intingo la penna nel calamaio ricominciando da zero. E avviso il lettore: il libro è più *ampio* di quanto il titolo giocoso faccia supporre. Sono un individuo subdolo, e mi piace la politica del fatto compiuto. Il pretesto è di dipingere, in linguaggio ultra-semplificato, un quadro dell’universo così come lo presentano osservazioni secolari e le scoperte più recenti, specie quelle dopo il 1998 – data dalla quale si può affermare che la cosmologia sia diventata una scienza *sperimentale e quantitativa* secondo i requisiti imposti da Galileo. Purtroppo, per giungere a tanto dovrò partire da lontano. Spiegherò anzitutto cosa s’intenda per *scienza*,

illustrando alcune basi del *Metodo scientifico* necessarie quando si vogliono trattare argomenti al limite del conosciuto o, addirittura, del *conoscibile*. Chi non fosse interessato può saltare a piè pari queste puntualizzazioni, ma a me è parso utile avviare il discorso proprio da esse per almeno un paio di buoni motivi. Il primo riguarda le teorie cosmologiche più avanzate e *discutibili*, di cui farò (ampio?) cenno verso la fine della Sezione IV: spesso è difficile districarsi tra cosa è scienza *seria* e cosa, invece, è pura e semplice ipotesi e speculazione intellettuale. Col viatico dei primi capitoli, la distinzione dovrebbe diventare più semplice e addirittura ovvia aiutando il lettore a non partire per la tangente.

Il secondo motivo è il mio desiderio (non ho posizioni ideologiche da difendere) di aiutare il lettore a non cadere in facili trappole mediatiche del tipo: «Il tale o talaltro (e qui un nome famosissimo, lasciato cadere con un tonfo da sisma di nono grado della scala Richter) ha dimostrato *scientificamente* “che Dio non esiste” o, in alternativa, “che Dio c’è, e ci vuol bene”». Sono due affermazioni prive entrambi di contenuto *scientifico*. Non mi pare un risultato disprezzabile fornire al lettore la capacità di saper dismettere, con una scrollata di spalle, vaneggiamenti di questo tipo. *Et de hoc satis*.

Nel seguito di questa sezione spazierò, dunque, sulle basi essenziali della fisica e della cosmologia componendo un primo Modello d’universo così come questo si presentava all’inizio del secolo scorso. Nella Sezione II aggiungerò l’espansione cosmica e attirerò il lettore per i meandri spaziotemporali della Relatività, fino a immergerlo in un Buco nero e lasciandogli solo una vaga speranza di poterne riemergere al termine di un viaggio nel tempo. Nella Sezione III gli farò quindi sorvolare a volo d’aquila il caos apparente che regna nell’immensamente (non ancora *infinitamente*) piccolo, sballottandolo fra particelle elementari, campi di forza e teorie nelle quali s’impatta in nomi esoterici come “*quark*”, “*gluone*”, “*bosone*”, “*Cromodinamica quantistica*”, e chi più ne ha più ne metta. Poi verrà la “*Teoria del quasi tutto*” dei giorni nostri (il Modello Standard delle particelle elementari: un “*colabrodo di precisione*”) e nella Sezione IV dirò delle primissime fasi del Big Bang aggiungendo ben poche idee pescate a tentoni sulla “*Teoria del tutto*” di un futuro non tanto prossimo, forse davvero lontano.

Non mancherò neppure di infilare il lettore nei cunicoli delle sei o sette dimensioni nascoste ipotizzate dagli adepti della setta misterica delle *superstringhe* e, per eccesso di completezza, cercherò di fare il passo più lungo della gamba (ma attenzione a quanto dirò nel prossimo capitolo sulla *scientificità* di questa procedura). Difatti, aprirò uno spiraglio verso una moltitudine di universi; ciascuno sarà libero di scegliersi il proprio, e ritenerlo il migliore tra quelli possibili – solo sulla carta, però – per cui il *Multiverso* non avrà più segreti per chi riuscirà a mandar giù un gruzzoletto di capitoli semplici per quanto possibile, senza però saltare una riga. Ma è bene premettere che il Multiverso è come Dio: chi ci crede per fede, chi no, e io sono tra gli scettici *dalla mentalità aperta*.

Insisto, per spiegare meglio cosa riporterò in questo enciclopedico tomo. Poiché mi è sempre parso un buon metodo euristico basarmi sulle domande che mi vengono poste da entusiasti con poche conoscenze di base, è frequente che io debba portare un primo esempio elementare che, tanto per dire, considera l’universo *statico e immobile* come lo si concepiva dai tempi di Newton e fino al 1929. Ma sappiamo tutti che l’universo non è statico, bensì in espansione: ciò vuol dire che ho introdotto un esempio *sbagliato*? Non necessariamente, ma so che aggiungere l’espansione cosmica – sempre a parole – condurrebbe a una risposta molto

simile a quella raggiunta pensando l'universo statico, ma a prezzo di una complicazione dei concetti che non si può descrivere con quattro chiacchiere. E allora? E allora, sono vecchio e non posso più avere molta pazienza, se voglio campare abbastanza da aggiornare il volume; ci siamo capiti?

Questa Sezione, come ho accennato nel paragrafo precedente, si ferma all'anno 1929, quando vigeva il paradigma dell'*universo statico* e i pochi che lo sfidavano – come l'abate Lemaître, il primo a concepire il Big Bang – erano derisi con sufficienza. La seconda Sezione aggiungerà l'*espansione* come Einstein, forzato dall'evidenza sperimentale, fu costretto a introdurre nella cosmologia, e a tutte le conseguenze della Relatività generale. E siccome l'espansione, rigirata all'indietro nel tempo, inevitabilmente conduce a un qualche concetto di **Big Bang**, sarà giocoforza trattare, nella terza Sezione, ciò che avviene quando materia, energia, spazio e tempo (si: anche *spazio e tempo*), sono costretti in dimensioni così piccole da richiedere l'applicazione delle leggi della Meccanica Quantistica. E poi, nella quarta Sezione, il Big Bang e una cornucopia di ammennicoli.

In tal modo, il lettore giungerà da sé alla constatazione – ovvia, ma solo a posteriori – secondo la quale l'universo non può essere inteso come una pedissequa descrizione delle strutture immani dalle quali siamo circondati, ma esiste anche un universo *piccolissimo* che va indagato, assieme a tante altre curiosità scientifiche di alcune delle quali in genere non si ha sentore, se si desidera costruire un quadro generale completo del cosmo. L'immensamente piccolo e l'immensamente grande sono cuciti a filo doppio per il tramite del Big Bang, e non si può intendere il secondo senza il primo.

Quali sono i requisiti per potersi cimentare in un'impresa titanica come quella appena minacciata? La risposta è semplice: chi è riuscito ad arrivare fin qui, e si sente anche minimamente incuriosito dalle mie premesse, ha le carte in regola per arrivare in fondo. Infatti, basta esser capaci di leggere: saper anche scrivere è opzionale. Magari abbisognano (di rado) le quattro operazioni, queste sì, e poi niente di più. Ah! Una radice quadrata... una sola, però... o sono due?

Infatti, ho deciso di compiere lo sforzo di adattare i concetti a un pubblico assolutamente digiuno di nozioni scientifiche. Non servono neppure quelle apprese sui banchi di scuola, e regolarmente dimenticate. Dalla quinta elementare in su, il testo va bene per tutti: insegnanti e astrofili come obiettivo favorito, ma non solo. Potranno divertirsi a compulsarlo anche i praticanti delle arti del Trivio (grammatica, retorica, dialettica), purché nutrano qualche modesta curiosità scientifica, e abbiano la carità di chiudere un occhio quando, specie scrivendo di getto e rileggendo distrattamente, manifesto la mia poca pratica con l'idioma italico.

L'intento che mi spinge a incitare chiunque a procedere senza tema, capitolo dopo capitolo, è tanto più truffaldino in quanto, ben presto, il lettore si confronterà con l'ovvia percezione secondo la quale questo è un libro di studio e non di evasione. A quel momento, a Lui la scelta: cancellare dal suo *pad* il *file* del quale ha eseguito il *download* (tanto lo potrà sempre recuperare in *cloud*) o procedere nella lettura se non vuole vanificare la spesa intellettuale sostenuta per arrivare fin lì. Siccome il testo è gratuito, mi permetto nientemeno che porre condizioni io stesso: potrò ben scegliermi i Lettori, se costoro non pagano, no? Ebbene: se qualcuno *si vanta* di non saper fare due più due, anàtema su lui; se ne vada fuori dalla mia cerchia, nell'inferno degli "*umanisti con la puzza sotto il naso*" (li metto in corsivo

e tra virgolette, affinché gli umanisti in generale non si sentano offesi – *honi soit qui mal y pense!*).

Come incoraggiamento, affermo ancora di essere convinto di aver prodotto un discreto libro e che valga la pena di dedicargli un minimo di fatica. Sarò un entusiasta ma ogni nuovo giorno tocco con mano la ricchezza di Madre natura. Nessuno di noi sarebbe stato così ingegnoso da cavar fuori dal cappello i meccanismi da essa escogitati per far funzionare le cose, e spesso è difficile farsene capaci anche avendoli sotto il naso. In un modo o nell'altro, dunque, il libro è talmente gremito di bizzarrie che sarebbe un peccato non leggerlo solo per paura di non capirlo. Se non interessa è un altro conto, ma se l'immaginazione viene sia pur minimamente stuzzicata dalla possibilità di impadronirsi, in modo *quasi* indolore, senza anestesia generale, di concetti troppo spesso spacciati per difficili, perché negarsi il gusto di farlo?

E qui, l'introduzione termina con i ringraziamenti di rito. Ovviamente, in prima fila vengono moglie e figli, generi, nuore e nipoti nei modi che loro si addicono. Anche la malefica gatta: mentre lavoro, sembra trovare la tastiera il posto più confortevole di casa. Poi vengono estimatori, amici di primo, secondo, ennesimo livello (spesso non li conosco affatto), avendo cura di non specificare chi più e chi meno. Infine, mi sento pieno di gratitudine verso tanti fisici e matematici del presente e del tempo che fu i quali, avendomi fatto esaltare o a volte imbestialire, mi hanno comunque stimolato a scrivere. Tra i *novissimi*, rivolgo ringraziamenti tiepidi a tutti i miei editori del passato. Tiepidi, quasi freddini, anzi gelidi, ma non credo che perderanno il sonno per così poco...

# 1) – Come funziona la scienza?

## 1.1) – I fondamenti del Metodo scientifico

Tra il Medio evo e il Rinascimento, alcuni pensatori isolati avevano sviluppato il concetto secondo il quale la *filosofia naturale* non dovrebbe essere una faccenda limitata al pensiero, come invece sembravano accettare quasi esplicitamente i filosofi di epoca greca e romana, con poche eccezioni notevoli tra le quali mi piace citare Archimede e – solo in parte – Aristotele. Per gli antichi, infatti, la conoscenza di Madre natura, del funzionamento delle cose, andava trattata a teoremi e dimostrazioni concettuali un po' come Euclide aveva fatto con la geometria. Poche osservazioni di base dovevano bastare a costruire i presupposti fondamentali, proprio come avviene con gli *assiomi* che fondano la geometria euclidea, e tutto il resto sarebbe saltato fuori dal lavoro del cervello.

È un punto di vista che cozza contro ogni semplice esperienza quotidiana, e dunque non c'è da meravigliarsi se molti storici della scienza attribuiscono una prima, *falsa partenza* di quest'ultima, all'imporsi del pensiero di Platone e Aristotele interpretato in modo troppo rigido, disincarnato, malgrado Aristotele raccomandasse il ricorso all'osservazione diretta. Badate bene, però: si parlava di *osservazione* e non *sperimentazione*. Poi, in ogni caso, di certo contò molto pure la mancanza di una tecnologia adeguata che mettesse a disposizione degli studiosi le apparecchiature indispensabili al progresso scientifico. Insomma: già prima della conquista romana, la scienza ellenistica aveva imboccato un binario morto.

Pian pianino, comunque, emerse la necessità di costruire una scienza con la maiuscola, più estensiva, fondata sui reali comportamenti della natura. Volendo buttar là un paio di nomi, tra gli assertori del *metodo sperimentale* in senso lato possiamo citare Ruggero Bacone, e soprattutto Leonardo, di cui è opportuno riportare una massima. Gustatela, centellinatela, per piacere. «*Nessuna umana investigazione si può dimandare vera scienza, se essa non passa per le matematiche dimostrazioni; e se tu dirai che le scienze, che principiano e finiscono nella mente, abbiano verità, questo non si concede, ma si nega per molte ragioni; e prima, che in tali discorsi mentali non accade esperienza, senza la quale nulla dà di sé certezza.*» La troverete nel *corpus* di scritti che sono confluiti nel “Trattato della pittura”.

In ogni caso, c'è ormai un ragionevole accordo tra i professionisti del settore: se volessimo a tutti i costi individuare un atto di nascita della scienza moderna, dovremmo arrivare all'anno di Grazia **1638** (si può litigare un po' sui millesimi, ma comunque non ci si sposta molto) quando a Galileo, trattenuto agli arresti domiciliari nella sua villetta “Il gioiello” ad Arcetri, fu lasciata ampia possibilità di scrivere e pubblicare – specie all'estero. Approfittandone, egli rese alle stampe, nella città di Leida, il suo massimo contributo – e canto del cigno – scientifico: i “*Discorsi e Dimostrazioni Matematiche Intorno a Due Nuove Scienze*”. Mettendo assieme il contenuto di questo libro, e quelli dei suoi scritti precedenti, dal “Nunzio Sidereo” in poi, i fondamenti generali per sviluppare le scienze naturali (d'ora in avanti scriverò solo *scienza*) erano fissati in modo definitivo, e ogni studioso del settore li

applicò allo sviluppo della fisica, poi della chimica e così via. È dunque lecito che il lettore voglia sapere quali sono questi fondamenti, lasciando da parte per semplicità i numerosi contributi specifici di Galileo alla fisica stessa.

La base irrinunciabile su cui il collerico e sfortunato pisano afferma essere necessario edificare ogni successivo sviluppo, è proprio il *Metodo sperimentale* (di qui in avanti, il “*Metodo*” per antonomasia, con l’iniziale maiuscola per evitare equivoci). Detto in un Volgare poco illustre, e con buona pace dei filosofi greci pre e post-socratici, il concetto suona come segue: «Madre natura, nel comporre e far funzionare il mondo, ha scelto le proprie strade fregandosene dei nostri pregiudizi. Di conseguenza, l’unico modo per giungere a scoprire la realtà delle cose è sperimentare. Non può esistere alcuna scienza in assenza di sperimentazione, e questo è un requisito non negoziabile». Tre punti esclamativi, e Totò aggiungerebbe: “*abundantis in abundandum*”.

Il secondo fondamento della scienza, quello che più duole a molti e che per le cosiddette *scienze umane* è interpretato in modo abbastanza elastico (ammesso che sia tenuto in conto del tutto), è la necessità di esprimere i risultati degli esperimenti in termini matematici. Badate: l’esito degli esperimenti deve essere espresso nel linguaggio universale della matematica di modo che chiunque, fatti i propri conti, possa ripetere gli esperimenti o inventarne di nuovi, sapendo sempre cosa aspettarsi. E qui non sarebbe generoso negare a Cartesio un monumento pari quasi a quello da erigere a Galileo. In verità, Cartesio era una mente eccezionale per quanto riguarda il pensiero puro, ed è a buon diritto considerato il creatore della filosofia e, in parte, della matematica moderne. Purtroppo, come fisico non valeva molto perché era uno *sperimentatore inaccurato*, e ci ha lasciato delle “Leggi del moto” che farebbero ridere chiunque abbia giocato a bocce. Ma il suo contributo matematico non può essere disatteso.

Ora, fidatevi di chi ha tribolato anni per apprendere simbologie algebriche dall’apparenza sempre più arcana. È, per l’appunto, un’apparenza poiché, una volta maneggiate con la disinvoltura che sorge dalla pratica quotidiana, queste simbologie dall’aria spaventosa finiscono – sorprendentemente – per semplificare la vita. Per chi non ha dimestichezza con i numeri e i simboli, questo insistere sulla formalizzazione matematica della scienza può sembrare un fardello inutile. In verità non se ne può prescindere, perché solo in tal modo si fa in un battibaleno a mettere in luce le regolarità dei fenomeni, e diventa possibile inserirli in una rete solida e sistematica che li interconnetta stabilmente. Inoltre, questa è l’unica maniera per rendere fattibile – tra le tante cose – la costruzione della tecnologia.

Insomma: dalla metà del ‘600 si era capito cosa vuol dire “scienza”, e la sperimentazione cominciò, assieme alla formulazione matematica dei risultati e alla concorrenza feroce tra scienziati che si occupavano del medesimo argomento. Allora come oggi.

## 1.2) – Di metafisica e altre amenità

Se concordiamo nell'accettare i due presupposti di cui sopra, è lecito e anzi necessario inserire nel discorso una digressione non banalissima per la quale, fortunatamente, non avremo bisogno di matematica. In primo luogo, affronteremo un problema abbastanza semplice da analizzare in termini scientifici nonostante le fumosità di cui alcuni desiderano ammantarlo, e quindi passeremo a un secondo argomento che sembra un po' più controverso, ma in fin dei conti è riducibile a un caso particolare del primo. Abbiate pazienza; quanto sto per raccontarvi tornerà utile specie verso la fine del libro anche se, al momento, ci si può chiedere se io mi sia messo a discutere del *gender* del *bit* (l'ho sempre immaginato *maschio*, ma forse bisognerebbe chiederglielo). Tra l'altro, se volete saltare questa sezione, non sperate di farla franca perché tornerò in dettaglio sull'argomento più avanti, riprendendo alcuni concetti ed espandendoli in un contesto ben preciso.

Accettando di buon animo il prevedibile sarcasmo dei filosofi, parto senza altri indugi dal cuore del problema. Di cosa si occupa la *metafisica*? Non certo del funzionamento del mondo materiale che, guarda caso, è l'unico a ricadere nelle possibilità d'indagine scientifica. "Meta-fisica" vuol dire, infatti: "Sopra la fisica" e perciò, come minimo, "Con strumenti *diversi* da quelli usati dalla fisica". Secondo alcuni, la metafisica è quella scienza in cui "*si cerca in una stanza buia qualcosa che non c'è, e ogni tanto si grida: «Lo sento: è verde!»*", ma sono malelingue. O no? Con questo viatico chiediamoci dunque se la scienza può (o mai potrà) rispondere alla *domanda ultima*, la domanda, per l'appunto, metafisica, rivista e corretta attorno al '700 dal matematico e filosofo Leibniz e qui riportata nei termini semplificati: «*Perché esiste qualcosa anziché il nulla?*».

Ragioniamo: se volessimo procedere scientificamente alla raccolta degli elementi necessari a trovare una risposta, occorrerebbe sperimentare *la transizione tra la condizione di "non esistere" e quella di "esistere"*. Qualcuno dovrebbe però spiegarmi quale *apparato sperimentale* nel senso più estensivo del termine (magari, sarebbe soltanto una *legge di natura*) potrebbe essere collocato in una fase di "*non esistenza*". Come fisico di lunghissimo corso mi riesce difficile immaginarlo. E si badi bene: non mi riferisco solo alle *cose* a noi familiari, come per esempio la *materia*, oppure l'*energia*, o lo *spazio* in quanto tale, e perfino il *tempo*. Ad alcuni scienziati moderni, influenzati dal pensiero di **Mach** (fine '800), piace affermare che, per l'appunto, "nulla esiste se non in quanto relazione", ma appena cercano di discutere il problema di "relazione tra che cosa?" vanno nel pallone.

Porto un esempio banale di apparente transizione dal non-esistere all'esistere. Quando si parla scientificamente di *creazione* (esempio: «Nel grande acceleratore LHC di Ginevra è stata *creata* una nuova particella, alla quale è stato imposto il nome "Bosone di Higgs"»), si presuppone già qualche tipo di *struttura* o, se si preferisce, *substrato* (chi legge riuscirà a escogitare termini ancor più pregnanti) dal quale partire. Perciò, anziché solleticare la metafisica parlando di *creazione*, sarebbe assai più corretto limitarsi a dire: *trasformazione*. Questo è il punto: anche nei casi in cui ci troviamo di fronte a un'apparente *creazione dal nulla*, l'analisi scientifica mostra come, invece, vi sia una *trasformazione da qualcosa di diverso*.

Ad alcuni Lettori, insistere su questi argomenti potrà sembrare l'espressione di mie nevrosi private. In parte questa componente può esistere poiché, vedete: ho dedicato tutta la mia vita alla scienza come astrofisico teorico, e non sopporto che se ne faccia strame. Ma purtroppo, proprio giocando sull'equivoco: *creazione – trasformazione*, alcuni fisici e cosmologi chiudono nel dimenticatoio le basi del *Metodo* pur di *dimostrare scientificamente* la non necessità dell'esistenza di Dio (in *questo arco storico*, poiché in altri avveniva il contrario, ed era ugualmente una violenza al Metodo). Secondo loro, tutto il cosmo si è creato a partire dal nulla in base alle sole Leggi di natura, e di conseguenza sono sufficienti queste ultime a sostituire l'esigenza logica di un creatore (non chiedetemi se con la maiuscola o la minuscola). Già, ma abbiamo appena visto che il problema si limita a spostarsi un gradino più su: da dove vengono le **Leggi di natura**? Anche per il più sprovveduto dei Lettori dovrebbe ormai essere chiaro come proclami del genere nulla abbiano a che spartire con la scienza, anche se Mach le liquidava come “regolarità approssimative inventate dagli scienziati per mettere in ordine le loro osservazioni” e niente di più. Per quanto mi riguarda come scienziato, invece, la risposta alla domanda di Leibniz potrebbe essere: «Perché così è, e tanto mi basta». Al più, si potrà *ipotizzare* (e un domani, forse (*forse*), anche *dimostrare*) che perfino il Big Bang *non è stato la “Creazione ex nihilo”*, ma una fase di “*trasformazione*” nel senso inteso prima.

Attenzione, però. Come ho appena affermato, non si può nemmeno ribaltare la frittata come vorrebbero altri, e affermare: «Se la dimostrazione scientifica della *non* esistenza di Dio non ha senso, ne consegue come *reductio ad absurdum* che è provato il contrario, e dunque Dio c'è» o varianti sul tema. Purtroppo, la domanda posta da Leibniz continua a indirizzarci fuori dal campo della sperimentabilità e pertanto l'unica posizione *scientifica* valida rispetto a questioni di tal genere è quella di prima: «Come fisico (o cosmologo, chimico, biologo ecc.), non ho i mezzi per occuparmi del problema. Punto e basta!».

Perché mi sono soffermato così a lungo sul problema metafisico? Solo perché è attuale e m'induce a forzare in un testo scientifico argomenti che tali non sono? No, tutt'altro. Infatti, qui s'incontra il secondo problema, strettamente scientifico almeno in apparenza. Ma a ben guardare scivola verso la metafisica pure lui, e al pari del precedente a volte fa imbestialire me e molti altri scienziati. Attenzione a quanto sto per spiegarvi: farò del mio meglio, ma è proprio qui il punto *duro da capire* se uno non legge bene e digerisce altrettanto bene.

Quando, specialmente nella Sezione IV, giungeremo a evidenziare i confini della fisica odierna, e ipotizzarne alcuni sviluppi possibili ci troveremo, almeno in qualche caso, in situazioni che ricordano molto da vicino i rapporti tra la scienza e Dio. Vale a dire: circolano tra i fisici alcune teorie, anche molto quotate in campo accademico, che al momento non sono suffragate da alcuna prova sperimentale in positivo o in negativo, né forse mai lo saranno. Infatti, in laboratorio non è possibile produrre le condizioni indispensabili affinché si manifestino gli eventi previsti dalle teorie medesime. Per esempio, occorrerebbero *temperature* miliardi di miliardi di volte superiori a quelle raggiungibili nella più avanzata apparecchiatura sperimentale oggi esistente (il già citato *Large Hadron Collider* europeo LHC, a Ginevra).

In tali casi, si pone il problema se queste teorie siano *scientifiche* o no. Infatti, è possibile rinvenire *ragionamenti* (???) estremi mediante i quali si raggiungono *previsioni a posteriori* su quanto avvenne *prima* del Big Bang, o su quanto accade *fuori* del nostro

universo, o su cosa succederà *dopo* la sua morte. Ora, difficilmente (non chiudiamo del tutto la porta con un *mai*) sarà possibile eseguire esperimenti scientifici su eventi *precedenti* il Big Bang, o in universi *alternativi*, o aspettare la *morte termica* del nostro universo (vedi la Sezione II), quando nessun osservatore potrà sopravvivere. E dunque, la domanda è: per quanto sia enorme l'impalcatura matematica a sostegno di questo genere di teorie, stiamo parlando di *scienza* o di *metafisica*? Se manca *per principio* la possibilità di verificarne le previsioni in maniera sperimentale, una teoria cosmologica, o sulle particelle elementari, o su quanto meglio vi aggrada, non ha lo stesso rango delle questioni metafisiche sull'esistenza di Dio? Forse non del tutto, ma quasi, e ci torneremo al momento giusto. Per ora, chiudiamo questa lunghissima digressione e torniamo alla scienza vera, galileiana, poiché dobbiamo introdurre un altro pezzo importante del Metodo: la cosiddetta "*Modellistica*".

### 1.3) – Il “Realismo” e il suo crollo

Lasciando da parte ogni speculazione filosofica precedente a Galileo, e vedendo le cose solo dal punto di vista di un fisico, torniamo indietro di quattro secoli e mezzo e seguiamo il nostro amico pisano mentre lavora con strumenti molto semplici: piani inclinati sui quali far scorrere biglie di diverso peso, pendoli e così via. Proprio la natura stessa di questi giochini di laboratorio faceva sì che almeno lui non si ponesse, in termini drammatici, il problema della *realtà* della natura. Per quanto di sua competenza, tutto era *reale* in senso stretto, e la scienza si limitava a misurare e descrivere quantitativamente questa realtà. Cartesio, ottimo filosofo ma, come abbiamo detto, mediocre fisico, già sollevava dubbi su questo *Realismo* (vedete? Ho usato la maiuscola) ancora un po' nascosto, ma il problema esplose violentemente – dal punto di vista della fisica, non da quello della filosofia – nelle mani di Newton. Ci torneremo in diverse circostanze, ma enunciamo qui per la prima volta le basi del problema stesso.

Il grande figlio di Albione, com'è noto, intese e quantificò la legge che regola la forza di gravità agente tra due qualsiasi oggetti dotati di massa. Rubacchiandola in parte a Hook e in parte a Huygens, dissero i maligni, e non senza qualche argomento che terrebbe una giuria impegnata a lungo, ma per noi conta Newton. Prendiamo dunque l'esempio del Sole e della Terra. Quest'ultima è attratta dall'astro del giorno, e anch'esso va soggetto all'attrazione del nostro pianeta, donde il moto dell'uno attorno all'altro. Un po' di matematica e, data l'ellitticità dell'orbita terrestre, i conti rendono ragione fino all'ultima cifra decimale misurabile dei rapporti tra distanze e periodo di rivoluzione terrestre (anno). Sin qui ci siamo, no?

«Col cavolo, che ci siamo!» esclama – in termini più moderati, ma non meno pregnanti – lo stesso Newton (e non solo lui, ma pure Huygens, Hook e altri). «La legge matematica che regola la forza di gravità è quella da me ricavata, e su questo non ci piove. Io, però, voglio capire *come* si possa esercitare una forza tra due oggetti non a contatto fra loro e addirittura *separati dal vuoto*. In un modo o nell'altro è come se esistesse una specie di *elastico cosmico* che li tira, ma io non riesco a renderlo percepibile in alcun modo.» Per chiarezza, qui cito le parole testuali di Newton: «...*che un corpo possa agire sopra un altro a distanza attraverso un vuoto, senza la mediazione di nient'altro per, e attraverso il quale, la loro azione e forza possa essere trasferita dall'uno all'altro, è per me una tale assurdità, che io credo che nessun uomo dotato di una competente facoltà di pensare in maniere filosofiche, possa mai cadere in essa*».

Col senno di poi, sappiamo che Einstein fece un passo avanti verso una migliore comprensione dei meccanismi fisici in azione nella gravità, e lo vedremo a suo tempo, nella Sezione II. In fin dei conti, però, anche lui si limitò a spostare altrove il problema sollevato da Newton lasciandolo in buona misura irrisolto nonostante gli squilli di tante fanfare.

Insomma: Newton fu costretto a evidenziare una prima dicotomia *scientifica* (non solo *filosofica*, dunque) tra la *realtà* che, comprendendo questo invisibile elastico cosmico, è destinata a sfuggirci a lungo o per sempre, e una sua *descrizione* quantitativa per mezzo della legge di gravitazione universale. Da allora in poi, gli sforzi per inseguire questa fantomatica *realtà* sono stati sempre più fallimentari, per cui molti scienziati – non tutti – si sono adattati

all'idea di essere costretti a rinunciare a un *realismo* ingenuo e doversi, in sua vece, contentare di **Modelli della realtà**. Per il momento mi basta aver introdotto in questo modo surrettizio, quasi indolore, il concetto di *Modellistica*, ma è chiaro che non può finire qui. Nel prossimo capitolo comincerò a raccontare qualcosa sull'universo poiché ho già tergiversato troppo, ma la Modellistica seguirà a far capocella lungo tutta la strada, e dovremo farci attenzione. Non lavoreremo con la *realtà*, dunque, ma con sue *rappresentazioni intuitive* e *matematiche* che prendono il nome di **Modelli**. E non c'è da preoccuparsi: via via capirete sempre meglio.

## 2) – Una prima occhiata all’universo

### 2.1) – Premesse e incoraggiamenti

Parlando di universo, ciascuno di noi corre subito con la mente all’immagine personalizzata che se n’è costruita, e questo vale anche se il discorso è limitato all’universo *degli oggetti e delle forze agenti tra loro*, quello studiato dalla cosmologia classica e niente di più. Un universo *povero* in cui, accanto all’aspetto strettamente materiale, non si prendono in considerazione i temi della filosofia, dell’arte, dell’etica e via di questo passo. Lo dico per lunga esperienza: vengo spesso a contatto col pubblico, durante le conferenze, e mi accorgo subito dei differenti approcci individuali al “*sistema universo*”. D’altronde basta rifletterci un attimo: anche volendo definire il cosmo nel modo più semplice possibile – come stiamo per fare di seguito – i problemi concettuali finiscono per moltiplicarsi da ogni parte.

Cercherò di spiegare cosa intendo. Come punto di partenza *apparentemente esaustivo*, affermo quanto segue: l’universo *fisico* è, banalmente, la somma di tutte le cose... già, ma qual è il nostro concetto di “*cose*”? Forse solo *oggetti tangibili* in senso lato come le particelle elementari (quark, elettroni e bosoni, come vedremo assai più avanti) e i loro composti (atomi, molecole, corpi solidi, rocce, pianeti, stelle, galassie)? È una definizione che appare immediatamente restrittiva. Infatti, oltre alla materia, già sappiamo di dover tenere in conto anche l’energia... cos’è l’energia? E le forze? No, così non va, rischiamo di partire subito per la tangente. Tagliamo la testa al toro e limitiamoci alla *materia* pura e semplice, tenendo nel retrobottega della mente, pronti a ficcarle dentro quando giungerà il momento opportuno, almeno le forze gravitazionali ed elettriche con le quali abbiamo familiarità.

In questa prima fase, dunque, stiamo considerando solo *oggetti* che possiamo, almeno in linea di principio, classificare poiché ne sappiamo enumerare sia le *qualità* (stelle, pianeti, satelliti...), sia le corrispondenti *quantità* (tanti di questo, tanti di quest’altro, ciascuno con proprie caratteristiche ben specifiche). Di conseguenza lasciamo da parte derive filosofiche verso forme estreme d’*idealismo* come quello del “primo” Wittgenstein il quale, per nulla interessato alla materia, affermava che l’Universo (per lui con la maiuscola) è solo la somma di tutte le idee. Non sto scrivendo queste righe per criticarlo: non ne ho i mezzi intellettuali e culturali, ma in questa prima fase di costruzione di un Modello d’universo non è per noi di alcun interesse. E attenzione; ho introdotto surrettiziamente la dizione: “*Modello d’universo*”.

Breve inciso: già nei paragrafi precedenti il lettore ha incontrato vocaboli come *quark* e altri, assai prima che sia stato possibile definirli. Purtroppo, in questa Sezione talvolta sarà necessario cimentarsi in qualche brevissima fuga in avanti laddove il discorso lo imporrà. In fin dei conti, tutto avverrà a beneficio del lettore il quale, non essendo completamente digiuno di queste faccende, sarà in tal modo rassicurato: sì, sta capendo giusto; le cose sono come lui già le conosce. Terminata la fuga, però, il ragionamento dovrà riprendere la sua sistematicità. L’approfondimento non mancherà (non lascerò fili pendenti, tranne quelli che noterò io stesso, poiché alcuni non possono essere trattati in un testo divulgativo che non prenda più di

quattro Sezioni, e altri ci sono perché... perché ci sono!), ma sarà posposto. E badate: ciò non contrasta coll'imperativo di **dimenticare tutto**; una *conditio sine qua non* che v'imporrò tra breve. Percorrendo sistematicamente il libro bisognerà ragionare **come se** si fosse dimenticato, ma siccome non ci si riesce completamente ecco che, ogni tanto, s'incontrerà un'indicazione stradale appropriata.

Fine dell'inciso, e torniamo al discorso generale. Riusciremo forse a procedere a passo di marcia, su un terreno abbastanza solido, se metteremo le cose come suggerito nel penultimo paragrafo? No, magari fosse! Getto immediatamente un sasso per intorbidare le acque: noi esseri umani non siamo forse composti di materia? Se la risposta è affermativa, e ci sembra ragionevole, dobbiamo per forza aggiungerci all'inventario. Allora, ecco subito un nuovo, bel problema: l'**autocoscienza** di cui tanto ci vantiamo; magari pure il **libero arbitrio**. È *materia* pure questa roba?

Vogliamo rispondere di sì a tutti i costi, e dunque non ci perdiamo d'animo troppo presto. Proviamo a semplificare pure l'autocoscienza, magari a colpi d'ascia di pietra: accettiamo l'atteggiamento **riduzionista**, il cui nome contiene un buon indizio per spiegarne il significato. Affermiamo, cioè, che tutto, ma proprio tutto, si *riduce* a un gioco tra particelle elementari. Magari si tratterà di un gioco complicatissimo, però non esiste nulla di più. Anche l'autocoscienza, quindi, si *riduce* a questo gioco, un po' come i programmi per un computer, per quanto siano tanti, diversi e usati per compiere le più varie operazioni (dal lavoro di ricerca scientifica allo spara – e – fuggi), in ultima analisi si **riducono** sempre e soltanto a *bit* che vengono accesi e spenti all'interno della macchina.

Questo concetto contiene la chiave generale di lettura: applichiamo all'intero universo lo stesso tipo di **riduzionismo** che vale, senza dubbio alcuno, per il computer da me usato in questo momento. Nell'interpretazione *riduzionistica*, l'autocoscienza è solo una "**app**" **dell'universo**, così come il programma di videoscrittura, con cui scrivo le parole che leggete, è una "**app**" *del computer*.

Con quest'affermazione forse un po' fideistica – ma a questo mondo bisogna pure fidarsi ogni tanto – ci pare di aver riportato le acque, prima intorbidate, a un minimo di chiarezza e trasparenza. Pure se, come conseguenza immediata, comincia a ronzarci per la mente un problema difficile da esorcizzare: **una parte non può essere maggiore del tutto!** Anche l'universo, in qualche maniera che ci sfugge totalmente e addirittura ci trascende, dovrà essere *autocosciente*? O la somma di tutto ciò che esiste si amalgama in qualcosa del tutto **impersonale**, come si ritrova nel "Tao" delle filosofie orientali, o in un panteismo occidentale alla Spinoza o alla Giordano Bruno? Non so rispondere a questa domanda, almeno se mi limito all'ambito scientifico, e quindi cerco d'individuare un percorso alternativo.

Riflettiamo: per giungere a una definizione dell'universo, stiamo percorrendo strade di tipo filosofico o fisico? Ebbene: siamo partiti da concetti fisici (numero e tipo di oggetti), ma abbiamo fatto presto a scivolare sul piano intermedio tra scienza e filosofia quando abbiamo parlato di autocoscienza. Forse c'è stato un errore di metodo: limitiamo il nostro intento ad apprendere qualcosa sull'universo **astrofisico** in senso lato, e consideriamo questi ultimi paragrafi come la prova di quanto sia insidioso il sentiero da seguire, d'accordo?

Gira che ti rigira, arriviamo finalmente a una conclusione: pensavamo di poter *definire* a priori l'universo, ma non ci riusciamo. Il punto importante, però, è un altro: come ci accorgeremo, **non è necessario definirlo**. Infatti, esiste un modo di parlarne interessante,

approfondito, senza nessuna pretesa di arrivare a una vera e propria *definizione*: un tipo di ragionamento che costituisce una parte integrante del Metodo scientifico. Quello di costruirne un **Modello** inizialmente molto grezzo, poco dettagliato, per poi arricchire questo Modello con aggiunte e correzioni ogni volta che se ne presenti la necessità. Così come Newton aveva un Modello molto rudimentale per la forza di gravità (un elastico cosmico invisibile, ma con la formula matematica giusta per calcolarne gli effetti), e poi Einstein l'ha migliorato liberandosi dall'elastico e sostituendolo con un altro Modello... vedremo.

Insomma: bisogna applicare la cosiddetta *Modellistica*, per mezzo della quale non avremo più bisogno di chiederci cosa sia la **Realtà** con la maiuscola a patto di saperne costruire Modelli che ne colgano aspetti sempre più riposti. Di conseguenza partiremo da lontano e, per approssimazioni successive, vedremo come il discorso finirà per condurci da qualche parte interessante. Ecco la chiave di volta dell'intero edificio della scienza; il ritornello, che in pratica funziona bene, recita: «Non chiediamoci mai “**Perché** questo o quest'altro?”. Le domande giuste cominciano piuttosto con un: “**In che modo** costruire un Modello efficace di questo e quest'altro?”».

In quest'ordine d'idee, ripartiamo da zero e pensiamo a un trenino giocattolo con la sua locomotiva a vapore. Si può comprare in negozio, ma ci sono amatori ai quali piace costruirsi tutto in casa lavorando con tornio, saldatore, lima, seghetto, lamierino, fil di ferro e non so più cos'altro ci si debba aggiungere. Se il trenino modello, specie la locomotiva, è buono e funziona, è addirittura possibile usarlo per studiare le leggi della Meccanica newtoniana e della termodinamica. Solo, non dobbiamo commettere l'errore di scambiare il giocattolo per la realtà: il piccolo oggetto acquistato o fabbricato in casa non sarà mai in grado di trascinare migliaia di tonnellate a un centinaio di km/h, come invece farebbe una locomotiva vera.

Fin qui la distinzione sembra ovvia, ma badate: se ne parlo esplicitamente non è perché io sia stupido o pensi che lo siate voi. Infatti, quando si passa a entità non direttamente maneggiabili o visualizzabili con l'intuizione, c'è sempre il rischio di **confondere il Modello con la realtà**. Per esempio, non dovremo pensare che il *Modello d'universo*, nel quale pian piano aggiungeremo e fonderemo col resto un pezzo per volta, sia tutt'uno con l'*universo reale*. Il nostro **universo giocattolo** sarà una costruzione mentale, a sua volta basata su Modelli-giocattolo delle Leggi di natura: esso ci permetterà di acquisire un'idea generale di come vanno le cose nell'universo fisico in cui siamo immersi, ma resteremo comunque ben lontani dal poterne comprendere appieno la profondità. Pensateci: non vi sembra un sistema pulito ed economico per cominciare a parlare di cosmologia, senza telescopi, supercomputer, lavagne e tutti i parafernali di un grande Istituto di ricerca? Basta ragionare, purché si faccia sotto la supervisione di qualcuno che, per l'Istituto di ricerca, sia passato a sua volta trascorrendovi molto tempo (dal 1968 al 2004, nel mio caso), e abbia già costruito per conto proprio un Modello in grado di funzionare. E scusatemi per l'eccesso di maiuscole usato in tutto il libro, ma le ho trovate tipograficamente utili per evitare equivoci.

Allora tenetevi forte, perché stiamo per cominciare. Come primo passo, **vi consiglio vivamente** – è un ordine tassativo, ma mi piace il parlare *morbido* – di eliminare tutte le vostre opinioni preconcepite (l'universo dovrebbe essere infinito, anzi no, meglio se finito, e anche sferico o magari iperbolico, curvato nella quarta o quinta dimensione, contenuto in un Buco nero, e amenità del genere. Via, via tutto!). Proprio come vi avevo accennato poc'anzi.

Secondo afferma il Compagno Mao, bisogna disegnare su un foglio di carta pulito: lui si riferisce alla Rivoluzione; io, in quanto vecchio reazionario, mi contento più modestamente di un Modello d'universo.

Mi rendo conto che questo processo di cancellazione è tanto più oneroso quanto più già ne sapete, ma è uno sforzo imprescindibile. Infatti, il susseguirsi dei capitoli di questo libro è studiato per partire da zero e introdurre via via una lunga serie di approssimazioni, le prime delle quali potrebbero far storcere il naso fino al più inesperto dei dilettanti; figuriamoci a uno specialista! Nella *scatola di montaggio* che vi sottopongo, però, ci sono anche le istruzioni (molto più chiare di quelle di IKEA®) per mettere insieme un Modello sempre più ricercato, paragrafo dopo paragrafo, capitolo dopo capitolo, Sezione dopo Sezione, con i pezzi indicati di volta in volta. Non mettetevi a sobbalzare sulla sedia a ogni piè sospinto, esclamando: «Cosa diavolo mi racconta costui? Non solo la faccenda non va così, ma ci mancano pure un sacco di concetti basilari!».

Soprattutto, non aggiungete per conto vostro gli altri pezzi di cui già siete in possesso, altrimenti ne verrebbe fuori uno stufato irlandese. Abbiate l'umiltà intellettuale di stivarli in un magazzino di cui mettere la chiave nel cassetto, come ho fatto io stesso tante volte con le idee brillanti che mi folgoravano di volta in volta. Pazientate: alla fine, sollevando gli strati di polistirolo e tirando fuori gli involucri di plastica nello scatolone a voi recapitato assieme a questo libro (uno scatolone virtuale, ovviamente), troverete anche l'equivalente dei pezzi che già possedevate oltre a tanti altri dei quali non sospettavate l'esistenza, e solo a quel momento li aggiungerete al Modello accorgendovi di come s'incastano senza attrito nel posto giusto. Vedrete: l'esito finale supererà le vostre attese. E fidatevi una buona volta, diamine!

Devo anche premettere come, in alcune (pochissime) circostanze, bisognerà tornare indietro di un passo, smontando e gettando senza rimpianti nella pattumiera alcuni pezzi del Modello che all'inizio erano parsi utili e magari carini, per sostituirli con altri dall'aria più sinistra. Andranno a posto anche questi ultimi, e vi renderete conto di quanto il Modello stia diventando più raffinato – pur sempre nei limiti del comprensibile – e perciò di maggior soddisfazione. Prometto formalmente, e in questa nuova scrittura posso farlo con cognizione di causa giacché una prima scrittura rudimentale me l'ha già dimostrato: chi si adatterà a seguire le istruzioni, alla fine giungerà a possedere un Modello d'universo che, sia pure con alcune inevitabili approssimazioni, sarà giudicato favorevolmente anche dal più esigente dei cosmologi *non professionisti*.

Voglio giustificare il motivo di una costruzione per approssimazioni successive. Fermo restando che solo chi avrà la pazienza di seguire il procedimento sino alla fine capirà davvero le motivazioni dalle quali sono stato guidato, già qui posso accennare, almeno per sommi capi, la sostanza del gioco seguente.

Detto in parole povere, gli scienziati hanno capito perché sarebbe poco vantaggioso considerare l'universo come la brutale somma delle sue parti costitutive (questo rimane comunque il Modellino di livello zero, il più semplice). Infatti, tanto per dirne una, ogni singola parte interagisce e interferisce con tutte le altre, modificandole ed essendone modificata a sua volta. Inoltre, e qui viene il punto più dolente, se cerchiamo d'incolonnare gli addendi che, per restare nell'analogia del Modello, dovrebbero condurre al totale, ci accorgeremo subito come soltanto pochi, tra i tanti da tenere in conto, abbiano un aspetto sia pur vagamente familiare.

Insomma: i pezzi che già ora crediamo di poter maneggiare senza troppi problemi, rappresentano una minima parte dell'insieme. A tempo debito, le istruzioni ci spiegheranno come funzionano e come s'inseriscono pure gli altri elementi che a prima vista non sapremmo neppure riconoscere, ma per questo ci vorrà pazienza. E cosa ne direste se vi promettessi di poter arrivare, alla fine, non solo alla locomotiva funzionante, ma a un intero plastico con tanto di stazione, scambi, segnaletica, gallerie, ponti, montagne e città, alberi e fiumi, erbetta, farfalle e maggiolini, batteri e...? Sarebbe bello e poi, sempre per citare Totò a proposito della procedura un po' contorta appena proposta, state tranquilli perché, mai come in questo caso: «**È il totale che fa la somma!**».

Non posso negare che, pur se avrete seguito questo manuale con diligenza, finirete per incontrare concetti da manipolare con le pinze, se vorrete evitare di farvi male. Purtroppo, così è fatta Madre natura: chi ha mai detto che debba sottomettersi alle nostre categorie mentali, nel momento in cui compone il cosmo? Il modo d'inserire qualche pezzo fondamentale, dunque, ripugnerà un po' all'intuizione, ma bisognerà fare di necessità virtù e accettare che, nel Modello d'universo finale, ci sia qualche *scatola grigia* (non del tutto *nera*, per nostra fortuna) il cui funzionamento va preso per quello che è.

Il lettore più esperto già sa che mi riferisco non solo alla Relatività, ma soprattutto alla stramaledettissima Meccanica Quantistica. Però non se ne può fare a meno. E infine, giungendo ai limiti delle attuali conoscenze scientifiche, incontreremo altri pezzi, gli ultimi, che a volte vi chiederò di tenere in considerazione solo per bellezza, ma in alcune circostanze saranno importanti nel definire i veri e propri fondamenti del Modello più completo (dall'erbetta in giù, nell'analogia di poco fa). Diversi di questi ultimi pezzi, purtroppo, sono ancora nel limbo della scienza, molto di là da venire, e saranno argomento per la fisica dei prossimi decenni e secoli. Oggi come oggi, possiamo discuterli solo come se disquisissimo sul sapore dei trilobiti panati e fritti. Trattandosi di bestie (dall'aspetto schifosissimo) estinte da 250 milioni di anni, possiamo solo procedere per analogia con gli artropodi attuali (ragni, scorpioni e millepiedi, per esempio), ma la consapevolezza di quanto possa essere divino un boccone di trilobite accompagnato da un vino bianco d'annata (del Triassico superiore) ci sfuggirà per sempre.

Di argomenti del genere (non i trilobiti; adesso torniamo alla fisica più teorica e – direi quasi – ipotetica) sappiamo così poco che, secondo il Metodo scientifico, sarebbe opportuno non parlarne per niente. E molti scienziati si attengono a questo criterio, mentre ad altri piace partire per la tangente. Tenendomi nel mezzo, poiché vorrei tentare di dare al Modello d'universo un'apertura verso le future scoperte scientifiche, qualche accenno lo farò. Dove mancano le osservazioni cercherò di appoggiarmi a solide teorie, sperimentate con successo su una varietà enorme di casi. È comunque una scommessa su cui non mi sentirei di puntare troppo, e sarà mia cura far presente al lettore i casi nei quali ci troveremo in queste condizioni.

Con questi richiami sulla maggiore o minore solidità delle teorie scientifiche, posso finalmente annunciare il percorso che intendo seguire. Se il lettore vuole davvero capire come si costruisce un Modello d'universo aggiornato e funzionante, in cui non ci siano pezzi in collisione appena si mette in moto, sarà necessario introdurre, prima della conclusione, la teoria più funzionale ed efficiente mai elaborata nel corso della storia della fisica, ancorché già mostri le prime crepe. Intendo parlare dell'ormai citato **Modello Standard** delle particelle elementari, in auge tra la fine del XX secolo e i primi due decenni del XXI. Esso nasce con

una rivoluzione scientifica senza pari tra il 1900 e il 1930, compie un passo da gigante attorno al 1950, cresce lentamente ma sicuramente fino al 1980, non si studia a scuola neppure nel 2020 (e poi ci s'è messo di mezzo pure 'sto maledetto COVID-19), ma è l'ingrediente fondamentale usato da Madre natura nel comporre e far funzionare l'universo, almeno fin dove riusciamo a capire oggi. Di conseguenza, siate pronti a doverlo affrontare nei capitoli centrali della Sezione III, e non dite che ve lo rivelo solo adesso: quando avevo affermato che l'Introduzione era da leggere, avevo già fornito indizi sufficienti per chi volesse intendere.

E qui, contestualmente ai problemi del Modello Standard e della cosmologia moderna, sono costretto a buttare subito le mani avanti: signori miei, questo non è un libro di evasione da sfogliare distrattamente sotto l'ombrellone mentre si sorvegliano i pargoli affinché non si affoghino a vicenda, ma è un testo da *studiare*, almeno in senso lato. Garantisco di essermi sforzato molto per renderlo semplice e, nei limiti del possibile, interessante, e ho già detto che le reazioni ricevute quando ne circolò un primo canovaccio (il testo che avete tra le mani è assai diverso, ma ho cercato di mantenerne lo spirito e la forma colloquiale) sono state favorevoli. Leggendolo, ci si può divertire e informare al tempo stesso. Non c'è quasi matematica, a parte qualche formuletta qua e là, ma si tratta di cosucce da quinta elementare a dir tanto. Roba da ridere, per chiunque abbia provato a compilarsi da solo la dichiarazione dei redditi.

Nonostante tutto, però, la lettura e la comprensione richiedono un minimo di attenzione. Quanta? Un po' più di quella necessaria a riempire un sudoku, ma meno di quanta ne serva per indovinare l'assassino in un giallo psicologico. Se ce ne volesse di più, Jeffery Deaver, P. D. James, ma che dico? perfino Agatha Christie, non avrebbero venduto una copia! Infatti, ecco un buon suggerimento per godersi il libro e uscirne con qualche idea utile in testa: trattarlo come se fosse un giallo con una ventina di personaggi. Tutte le definizioni che verranno, di solito saranno banali o quasi, però è molto utile ricordarsele via via che si procede, altrimenti non ci si raccapezza più. Un po' come, nella lettura del giallo, occorre memorizzare nomi e luoghi se non si vuole, dopo un giorno d'interruzione nella lettura, trovare il nuovo capitolo che inizia con: «Quel mercoledì mattina, Preston tornò in aereo da Chicago portandosi appresso, come bagaglio a mano, la valigetta dal contenuto scottante» e chiedersi (come capita spesso a me) chi accidenti fosse questo Preston, per quale motivo fosse andato a Chicago, dove tornasse, e cosa diavolo contenesse la valigetta.

Ammetterete con me che non sarebbe un buon modo di leggere un giallo, e altrettanto succedrebbe con questo libro se non ci metteste un po' d'impegno. Alcune spiegazioni di meccanismi fisici importanti, magari, a prima vista possono sembrare poco intuitive, però avrò sempre cura di aggiungere un paio di esempi pratici, e così diventeranno più digeribili. D'altra parte, in un giallo che si rispetti, anche l'assassino deve far uso di una logica un po' contorta per fuorviare l'ispettore e, ovviamente, il lettore...

Già vedo facce ingrunate. Non fate così, insomma, cercate di essere rilassati nel leggere il seguito! Infatti, l'esperienza insegna che una comprensione – almeno intuitiva – dei percorsi scelti da Madre natura non richiede uno sforzo intellettuale impossibile, anche se, molto spesso, mugugnerete a denti stretti che voi avreste scelto una strada più semplice, per comporre l'universo. È un concetto attribuito ad Alfonso di Castiglia (XIII secolo) per il Sistema Tolemaico, e quindi siete in buona compagnia, però vi prego di accettare il mio punto di vista: non esiste alibi per chi *non vuole*, perché *chiunque può*. Purtroppo, a me capita

spesso di sentire qualcuno che se la cava con un: «Io ho una formazione umanistica e non scientifica; queste faccende non le posso capire!» e magari se ne vanta pure! Vi ho già fatto capire nell'Introduzione che è una scusa patetica, è davvero come cercare di nascondersi dietro un dito. Se qualcuno, già a questo punto, provasse la tentazione di pensare, solo pensare, badate, qualcosa del genere, costui è pregato d'interrompere qui la lettura. Non perché io sia convinto che non ce la farebbe ad arrivare fino in fondo, ma perché non lo voglio tra il mio pubblico.

## 2.2) – Il primo inventario

Avendo messo i puntini sulle ‘i’, e sapendo che chi va avanti con la lettura non si farà condizionare dalla paura dell’ignoto, torniamo al nostro universo. Come farebbe, un fisico, a costruirne il primo e più rudimentale Modellino? Anzitutto stilerebbe una lista dei materiali necessari, quelli che gli vengono in mente senza sforzarsi, e senza pretese di completezza. Con ogni probabilità, per primo ingrediente scriverebbe subito: «**Lo spazio**». Infatti, nell’universo se ne trova proprio tanto, di spazio. Odo rumoreggiare. Infatti, anziché *spazio*, qualcuno preferirebbe dire *vuoto*, ed entro certi limiti non me la sentirei di dargli torto, però gli chiedo di avere pazienza: per ora, preferirei conservare il concetto di *vuoto* in un cassetto a parte, perché ci tornerà buono in un capitolo successivo.

Di conseguenza, in approssimazione di ordine zero, pensiamo l’universo come uno scatolone enorme in cui ci sia tanto spazio da poter contenere ogni *cosa* tra quelle che elencherò più avanti, e ne avanzi ancora in gran quantità. Anzi: facciamo subito il passo lungo. Siccome, in questa prima fase, non ci viene ancora in mente alcun limite all’estensione dell’universo, la cosa più semplice è pensarlo *infinito* in ogni direzione. Attenzione: non *illimitato*, come vorrebbe affermare qualche saccente che non ha ancora gettato via nel sacchetto giallo dei non riciclabili tutte le nozioni che aveva in mente, ma *infinito* e basta! Scusate se insisto, in questi primi momenti in cui si comincia a costruire il Modello, nel chiedervi di rinunciare *provvisoriamente* a nozioni che ritenete importanti, ma lo considero necessario. Se poi verrà fuori che l’universo potrebbe non essere infinito, cercheremo d’imporgli i limiti del caso, ma per il momento non è ancora così.

Ora, il fisico ha in mano uno scatolone di cui non vede i limiti. Dovrà cominciare a riempirlo. È il momento di aggiungerci qualcosa di palpabile. La Terra, per esempio. E, giacché ci siamo, tutto il Sistema solare, con l’astro del giorno e quelli della notte: Luna, Mercurio, Venere, Marte, Giove e tutto il gran codazzo di satelliti, Saturno e i suoi anelli, i pianeti esterni e altri oggetti di nomenclatura controversa, come Plutone e i suoi cugini maggiori o minori nella fascia di detriti che circonda il Sole a grande distanza... forse anche il *Pianeta X*... vedete? Già c’è una gran varietà di oggetti. Poi, giù a casaccio, comete, asteroidi e meteoriti vaganti nello spazio, specie avendo saputo come questi oggetti potrebbero essere pericolosi per la biosfera terrestre (fecero un brutto scherzo ai dinosauri sessantacinque milioni di anni fa). E dopo?

Bene: bisogna sapere che talvolta i fisici chiedono aiuto agli astronomi, e viceversa. E gli astronomi si recano spesso lontano dalle città, dove il cielo notturno è sempre buio e si vede a occhio nudo qualche migliaio di puntini luminosi sparsi qua e là: sono le stelle, e non mi meraviglierei se alcuni dei miei Lettori non le avessero mai viste o quasi. Dobbiamo riempire questo Modello d’universo pure con le stelle, a distanze tali per cui la luce, nell’attraversare la distesa di spazio che le separa da noi, impiega da un minimo di quattro anni e rotti a un tempo davvero lunghissimo, se le stelle sono distribuite per ogni dove. Ora, senza tirare troppo per le lunghe, permetteremo al lettore di frugare *una tantum* nel proprio cassetto di nozioni da buttare, e recuperare nebulose, galassie e ammassi di galassie. Cose che conosciamo tutti per averne viste bellissime foto da terra e da satellite.

Ecco: fermiamoci un momento e guardiamo nello scatolone. A parte lo spazio, tutto quello che vi abbiamo riversato dentro finora, ricade sotto la denominazione di **materia**, cominciando da noi stessi (facciamo parte di quel che c'è sul nostro pianeta). Ragioniamo: non resterà altro da aggiungere, magari qualcosa di molto ovvio, ma che ci sfugge? Sembra un po' troppo facile aver già finito coll'inventario, non vi pare? Infatti, al fisico – ma non solo a lui – basta una frazione di secondo, ed ecco che salta fuori dal cappello pure l'**energia**, sebbene il concetto non sia stato ancora definito con precisione per i profani.

Allora, ecco un modellino semplice e rudimentale anche per l'energia: è un qualcosa di **accumulato** sotto forme diverse, per esempio come se fosse denaro in un deposito bancario, e quando è **liberato** serve a **mettere in moto** gli oggetti o **far cambiare** loro il modo in cui si muovono, a **riscaldare** le cose, ma anche a **raffreddarle**... insomma, a dare uno scossone a un'economia cosmica un po' statica. Ci torneremo, state tranquilli; per il momento pensiamo (impropriamente) all'energia come a un agente **propulsivo**, a qualcosa che **dà vita** a ciò che, altrimenti, sarebbe **morto**. Ebbene: l'universo è pieno d'energia. Lo **spazio** (o, se si preferisce, il **vuoto**, ma già mettendoci dentro l'energia, il concetto di **vuoto** comincia a sfaldarsi nelle nostre mani) è **pieno** di energia in ogni suo angolino. C'è luce, per esempio, ma anche altro – e lo vedremo – che si estende in ogni luogo.

E dedico un trafiletto all'idea di **vuoto**, associata a quella di **nulla**, perché suscita nella nostra mente immagini controverse. Infatti, per definizione, il **nulla** è il *non esistente*, e riesce difficile raffigurarci qualcosa che non c'è. Questa tensione tra **vuoto** e **nulla** convinse Aristotele, tanti secoli fa, a negare l'esistenza del vuoto stesso. Più modernamente noi concepiamo il **vuoto** come una **struttura** in cui trovano posto un'infinità di **cose** in senso lato, di molte delle quali discuteremo via via, perfezionando il nostro Modello.

Restiamo dunque all'inventario: vogliamo metterci dentro pure i raggi cosmici? Questa radiazione che piove sulla Terra da ogni dove, contiene anzitutto **fotoni** e cioè, più semplicemente, raggi di luce. C'è poi una gran quantità di **protoni** ed **elettroni**, un po' di nuclei atomici di elio e, meno frequentemente, di altri elementi più pesanti. Questi ultimi sono sparati via da stelle in fase di esplosione, come avviene nelle famigerate **supernove** di cui dovremo riparlare in un capitolo successivo, ma la sorgente principale di raggi cosmici è il Sole, e il campo magnetico terrestre riesce in buona parte a schermarli e defletterli. In ogni caso esistono, nella nostra Galassia (e anche fuori), altre sorgenti di raggi cosmici, e i campi elettromagnetici galattici li accelerano secondo meccanismi ancora non del tutto compresi. E scusate se ho insistito sui raggi cosmici, che **pesano** poco sulla bilancia dell'universo ma, per l'appunto, ci aiutano a concepire il **vuoto** come un luogo, per la verità, molto **pieno**. Ancora non ho parlato di **neutrini**; pensateli in questo modo: sono particelle evanescenti, sì, certo, ma sono talmente tanti da **pesare**, sulla bilancia cosmica, altrettanto quanto le stelle!

Ecco dunque il primo passo: il Modello d'universo, che state costruendo con l'aiuto di un astrofisico (io), è quello di uno spazio sconfinato gremito di oggettini microscopici, e di **qualità** invisibili (come per esempio i campi gravitazionali, elettrici e magnetici) che contribuiscono a mantenere un contatto, un vincolo, tra gli oggetti più grossi e distanti tra loro, quelli già buttati dentro con la palata iniziale.

Qui sollevo il velo su un primo, piccolissimo inganno per mezzo del quale ho condotto il lettore a focalizzarsi esclusivamente sullo spazio e sui suoi contenuti. Infatti, c'è ben altro da aggiungere al Modello, pur nella sua forma così grezza. Forse, per farselo venire in mente,

occorrerebbe rifletterci almeno una decina di secondi. Onde evitare a chiunque di dover condurre il cervello a ebollizione, lo dico subito io: il **tempo**. E ora le cose cominciano a farsi più complicate, pur se manterrò la promessa di farvi uscire senza ammaccature dal budello tortuoso per il quale ci stiamo incamminando.

Di primo acchito, ci verrebbe da pensare che il tempo sia una cosa a sé stante, la cui esistenza abbia caratteristiche diverse da tutto il resto. In quest'ottica, l'universo sarebbe semplicemente la somma di oggetti materiali ed energia che abbiamo appena visto, e tutto quest'accumulo di roba viaggia assieme al tempo, nel senso di essere trasportato dal tempo medesimo dal passato verso il futuro. Avverto subito: un tale modo di vedere non può condurci lontano. In questa fase ancora rudimentale della costruzione del Modello, ci conviene cominciare a pensare al tempo come a un'altra delle parti, delle *qualità* costituenti l'universo alla pari dello spazio. Siamo ancora alle prime battute e occorre pazienza: tutto sarà spiegato al momento opportuno (nella Sezione II, dove si parlerà di **spaziotempo**), ma può essere utile ricordare questa difficoltà concettuale e segnlarla nell'elenco di quelle inevase, un inventario parallelo la cui costruzione procede di pari passo a quella del Modello stesso.

Attenzione, dunque: se il lettore si rende conto di avere in mente l'idea radicata dell'**universo degli oggetti** da un lato, e del **tempo** dall'altro, come se si trattasse di due realtà distinte – molto dipende dal suo primo impatto con queste categorie, e da quanto sia succube dell'idea di spazio e tempo come se fossero entità *a priori* di Kantiana memoria – forse non sarebbe male se interrompesse la lettura per cinque minuti. Non gli suggerisco di piantare tutto e basta, s'intende; pian pianino le cose si chiariranno, ma gli farebbe bene riflettere un po'. Così: tanto per convincersi che il **tempo** puro e semplice è un concetto vuoto se non lo leghiamo a qualche struttura spaziale o materiale soggetta a **cambiamento**, alla quale agganciarci per misurare o, portando il discorso al limite, a determinare *tout court* il *trascorrere del tempo* medesimo.

E se poi il lettore non riesce a svincolarsi da questa dicotomia, pazienza: gli chiederò solo un piccolo atto di fede momentaneo, promettendogli di fornirgli più avanti gli strumenti intellettuali necessari a comprendere la profonda unità esistente tra spazio e tempo, quali fossero due facce di una sola medaglia. Per chi volesse persistere nell'errore, e negare con forza la possibilità che gli si è appena prospettata, ebbene; ricada sul suo capo la minaccia, popolarmente attribuita a S. Agostino, nei confronti di coloro che abusavano del concetto di tempo trastullandosi (e cioè perdendo, per l'appunto, *tempo*) con domande del tipo: «Cosa faceva Dio *prima* di creare il mondo?» Risposta (ipotetica) del grande filosofo: «Creava l'inferno per chi fa domande del genere!». In verità Agostino argomentava in termini molto diversi, notando che il tempo è una *creatura*, e quindi non ha senso parlare di **prima della Creazione**, ma è difficile convincersi che, per lo meno, non *pensasse* a una rispostaccia del genere!

Ricapitoliamo perciò l'inventario dell'universo: spazio, materia, energia e tempo. Diamoci un primo taglio anche se, a chi ha salito il gradino della scuola secondaria, potrebbe venire in mente altro. Tutto al momento giusto, però: per ora seguitate a tenere i dubbi nel retrobottega del cervello come vi avevo chiesto prima. Infatti, giostrando con quello che già si trova nello scatolone, siamo in grado di percorrere un primo passo, di enorme importanza, al quale non si pensa mai. Eppure, è alla base di quasi tutto il resto.

Visualizziamo l'universo come un luogo enormemente ampio in cui il trascorrere del tempo è scandito dal muoversi e trasformarsi di materia ed energia sotto diverse forme. Poiché stiamo pensando all'universo su grandi scale di distanza, le galassie possiamo immaginarle, sempre in prima approssimazione grossolana, come **punti di riferimento** fissi e luminosi: una specie di rete trigonometrica come quelle costruite sulla Terra per misurare le distanze, ma estesa a tutto il cosmo. Lo so; le cose non stanno in questo modo e qualcuno mi rinfaccia che l'universo è in espansione, e dunque le galassie non sono ferme. Tranquilli: venni a sapere dell'espansione già negli anni '50 del secolo scorso, appena una ventina d'anni dopo la sua scoperta, e perciò nessuno si spaventi; ho ben avvisato il lettore che procederò migliorando il Modello via via. A questo livello di esposizione ci troviamo già abbastanza vicini all'idea di universo alla fine del XIX secolo. Di conseguenza è ancora molto comodo ignorare un sacco di proprietà cosmologiche importanti, e concentrarci su una domanda apparentemente stupida – ma che non lo è per niente – poiché già possiamo ricavare una prima risposta. Su questo punto, di solito, l'equivoco regna sovrano, e perciò tentiamo di dissiparlo.

La domanda è: in quest'universo che potrebbe perfino essere infinito (almeno se ci limitiamo a considerare lo spazio), esiste un qualche genere di limite? Un **bordo** oltre il quale *non si può andare* in senso lato? Nel prossimo capitolo c'è una prima risposta ancora grossolana.

## 2.3) – Uno strano orizzonte

Il titolo può apparire fuorviante, ma al termine del capitolo tutto sarà chiaro (o almeno spero). Parto da una considerazione ormai nota a tutti e che, stavolta, grazie al cielo non sarà necessario modificare: l'universo come lo conosciamo è venuto fuori da un'immensa esplosione. Tutto ciò che oggi possiamo vedere con i più potenti telescopi era, un tempo, racchiuso in un volume così minuscolo da non valer la pena di darne la misura (anche perché non la sappiamo con certezza).

Secondo i conteggi più elaborati, la deflagrazione che ha scagliato per ogni dove non solo la materia e l'energia, ma soprattutto lo spazio (ci torneremo sopra e spiegheremo meglio) ha avuto luogo **13,75** miliardi di anni fa più o meno una ventina di milioni ma, per comodità, facendo i primi conti a spanne parleremo spesso di **quattordici miliardi di anni** come cifra tonda. A questo grande scoppio, l'astrofisico Fred Hoyle attribuì, attorno alla metà del secolo passato, il nome di "**Big Bang**". Lui non ci credeva e questa dizione voleva essere una presa in giro, una definizione sarcastica perché, in inglese è spesso usata nel senso di: "Una balla gigantesca", ma suonava bene, ed è rimasta nell'uso.

Più avanti, nelle Sezioni III e IV, dedicherò alcuni capitoli a spiegare quanto già rientra nelle nostre conoscenze ragionevolmente consolidate, quanto non sappiamo ancora ma ci aspettiamo di conoscere un giorno o l'altro, e quanto non sapremo mai, di quest'avvenimento cruciale. Al momento mi basta specificare che, se c'è stato un "**prima**" del Big Bang, al livello attuale di sviluppo della scienza è impraticabile cercare riscontri sperimentali di questa eventuale fase. Certo: teorie se ne possono sempre fare, ma la scienza vera si deve comunque basare sull'osservazione di qualcosa di concreto.

Il problema sperimentale si può riassumere così: al *tempo zero* del Big Bang, la densità e la temperatura erano così alte da **bruciare** in modo totale e assoluto ogni memoria di una ipotetica fase antecedente. Di conseguenza, senza perderci in ipotesi che sfiorano il metafisico, tanto vale far partire la storia dell'universo dal Big Bang, ponendo a zero la sua età nell'istante dell'esplosione. Tornando perciò al Modello in costruzione del **nostro** universo, concludiamo subito che gli si può imporre almeno un limite temporale. Prima di quattordici miliardi di anni fa, l'universo non esisteva e basta. O, comunque, a tutti gli effetti pratici era come se non esistesse. Il resto è speculazione intellettuale.

Attenzione: non sto giocando con le parole, e neppure sto approfittando dell'attuale livello della nostra conoscenza o ignoranza scientifica per sparare una guasconata. Se paragono eventuali fasi pre – Big Bang alle orme lasciate sulla spiaggia prima di una mareggiata, tutto ciò ha un senso preciso. Infatti, supponiamo di voler risalire, proprio contando le impronte, al numero di persone transitate su un tratto di spiaggia. Il risultato ci dirà solo quante ne sono passate dall'ultima mareggiata in poi. Su quanto è successo prima, non c'è proprio nulla da misurare, perché la furia del mare ha rivoltato e rimescolato la sabbia. E dunque, pure in un caso del genere, sarebbe lecito azzerare i tempi del conteggio dalla fine della mareggiata; disquisire sul "**prima**" sarebbe tempo perso. Magari la spiaggia era chiusa al pubblico, oppure c'era un villaggio turistico affollatissimo. Se la nostra unica fonte d'informazione sono le impronte che si possono ancora contare, enumeriamo quelle e basta.

Se volete, l'idea richiama quella dell'ubriaco che ha perso le chiavi di casa e le cerca solo sotto il lampione, perché sarebbe inutile cercare dove non c'è luce, e così sia. Per giunta, giacché il problema dell'eventuale esistenza di qualcosa *prima* del Big Bang non può essere posto in termini scientifici (almeno per ora, insisto, perché non è impossibile a priori che un giorno si possano individuare eventuali tracce sperimentali di una fase precedente – anche se io ci credo poco, ma posso sbagliarmi), i fisici preferiscono evitare discorsi sul *tempo zero* in senso stretto. È meglio discutere di quanto avvenne da una frazione minuscola di secondo, che quantificheremo sempre nella Sezione IV, dopo il Big Bang. Per le esigenze del Modello d'universo a questo primo livello, contentiamoci di dire che esso ha un'età finita di circa quattordici miliardi di anni, che è un'ottima approssimazione, migliore del 2%.

Da questo limite temporale, ne discende immediatamente uno spaziale come corollario inevitabile, ma per capire bene il perché bisogna presentare il protagonista del nostro racconto. Protagonista, lo rammento, significa "*personaggio principale*". Tutti gli altri che incontreremo in seguito sono al massimo  *comprimari*, nel senso che possono avere parti importanti nel dramma cosmico, ma non al livello di protagonisti anche loro. Di chi stiamo parlando? Della velocità della luce che, in fisica, ha un posto speciale e un nome proprio: *c*. E anche il suo valore numerico non sarà una gran novità per nessuno: **300.000** km/s o, se c'è qualche pignolo col fucile puntato per abbattermi alla prima castroneria, **299.792,458** km/s.

Il concetto importante, e questo sì che bisogna ricordarselo perché rappresenta la chiave di lettura per molto di quel che segue (quasi tutto, anzi), lo esprimeremo così: di ciò che esiste, nulla può muoversi attraverso lo spazio a velocità superiore a *c*. La materia, l'energia, la forza elettrica e quella di gravità e, insomma, ogni cosa. Sì, attenzione: questo vale anche per le *forze* stesse! Visivamente, pensiamo come segue: in ogni punto dello spazio c'è un cartello rotondo, bianco dal bordo rosso, con scritto dentro *c*. Neanche si può dire: «Guai a chi sgarra!». La Polizia galattica non ha bisogno di appostarsi dietro un asteroide per cogliere in fallo chi supera la velocità della luce: neppure truccando il motore ci si può riuscire!

Inciso. Esiste un'unica eccezione, ed è lo spazio stesso, che può espandersi e contrarsi a qualsiasi velocità, anche infinita, ma qui lo dico e qui lo nego, e spiegherò tutto nella Sezione II. Per il lettore: altro dubbio da segnarsi sul taccuino, perché alla fine troverà soluzione. E l'inciso termina.

Al momento, accontentiamoci di un'analogia culinaria: *c* è come il prezzemolo, perché bisogna metterne un po' in ogni teoria fisica, specialmente quando si fa cosmologia, pure a livello dilettantistico. Ingolliamo *c* senza eccedere (in grandi quantità il prezzemolo è velenoso), e potremo capire *quanto è grande l'universo*, o almeno *la frazione di universo a noi accessibile*, che prende il nome di "*Universo Causale*" con le maiuscole. Altro concetto da intendere bene e subito, così come sto per spiegarlo, lasciando per un momento nella scatola dei dubbi irrisolti il motivo della dicitura: "causale". Ne riparlerò tra breve.

Il nostro Modello d'universo, per il momento, somiglia un po' a quello del sesto giorno biblico, affrescato da Michelangelo sul soffitto della Cappella Sistina. Ovviamente non scomoderemo Dio, perché nella catena logico-deduttiva usata dalle scienze naturali abbiamo già visto che non è possibile tirarlo in ballo, né tampoco espellerlo. Di conseguenza, immaginiamo il puro e semplice risveglio all'esistenza di un universo già infinito nello spazio,

con galassie, stelle, pianeti eccetera, così come Adamo si sveglia già bello che fatto, senza chiederci quale sia l'eventuale "*Causa prima*" di un evento del genere.

Un lettore saccente scalpita, perché vuole dimostrare a tutti che lui la sa più lunga, e la stessa idea di Big Bang comporta un universo dinamico, in espansione, diverso da quello statico di cui ho appena parlato. C'è sempre qualcuno in agguato, ci sono abituato; non dategli la soddisfazione di averlo notato. Almeno in questa prima fase, deve restarsene zitto. All'espansione ci arriveremo, l'ho già promesso, e vedremo come il quadro che stiamo tracciando dovrà essere modificato. Radicalmente, certo, introducendo pure qualche apparente difficoltà. Al momento giusto, però, scioglieremo in modo elegante ogni presunta complicazione, e il Modello si abbellirà moltissimo anche sul piano estetico.

Andiamo avanti in modo ordinato, perciò, e per gli scopi del momento è ancora più comodo lavorare sul modello di un universo statico, immobile, eterno e infinito come lo pensavano astronomi e fisici dall'epoca di Newton fino al 1929, quando Edwin Hubble pubblicò la legge di espansione che porta (anche) il suo nome. Lemaitre ne aveva discusso con Einstein tre anni prima, sulle basi di osservazioni grossolane, e ne era stato strapazzato; l'Unione Astronomica Internazionale (IAU) ha fatto giustizia introducendo la dicitura: "Legge di Hubble-Lemaitre". Ma torniamo al limite spaziale, all'Universo Causale di cui abbiamo accennato prima, e chiediamoci quanta parte di quest'universo statico possiamo vedere dalla Terra. Tutto, fino all'infinito? No, certo! E perché?

È così semplice che mi sembra un affronto all'intelletto del lettore dirlo esplicitamente, ma per completezza lo farò lo stesso. Sappiamo che la "*creazione*" ebbe luogo quattordici miliardi di anni fa. Ora bisogna rispondere alla seguente domanda: «Che distanza ha potuto coprire, viaggiando fino a oggi, un ipotetico raggio di luce emesso nel primo istante di esistenza dell'universo?»

Siccome la luce si muove, per definizione, a velocità  $c$  nel vuoto cosmico, questo raggio avrà percorso *quattordici miliardi di anni-luce*, essendo un anno-luce la distanza percorsa dalla luce in un anno: in termini di lunghezza circa **9.500** miliardi di km, una cifra che esula completamente dalla nostra intuizione. Moltiplichiamola ancora per quattordici miliardi, e... vedete un po' voi. Proviamo a pronunciare il risultato: cento trentatremila miliardi di miliardi di chilometri. Non rende l'idea, è un numero troppo grosso, tanto vero che, ormai, anche i cosmologi ragionano in termini di anni-luce. Per lo meno, non si superano i quattordici miliardi...

Sto divagando. Chiudiamo la digressione, e immaginiamo una galassia che cominciò a emettere luce appena ricevuto l'ordine: "*Fiat lux!*", e scusatemi se parlo in modo biblico, figurato; non mi propongo d'introdurre surrettiziamente elementi teologici. A quell'epoca, il Sistema solare era ancora di là da venire, ma se, in quel preciso istante, la galassia che emise il primo raggio di luce si fosse trovata a una distanza di soli *dieci* miliardi di anni-luce dal punto in cui oggi si trova il nostro pianeta, quel neonato raggio di luce o *fone* avrebbe avuto un tempo sufficiente a raggiungerci qui e oggi. Di conseguenza, se qualcuno avesse potuto puntare nella sua direzione un telescopio già quattro miliardi di anni fa, sarebbe riuscito a rivelare il primo bagliore della galassia, che stava appena cominciando ad arrivare, e tanto più seguitiamo oggi a vedere quella galassia in cielo. Ci siamo, fino a questo punto? Altrimenti, vi prego di rileggere gli ultimi due o tre paragrafi, e di sicuro capirete il concetto. Ci vuole solo un minimo di pazienza, e poca, pochissima attenzione, perché le cose sono semplici.

Adesso facciamo un esempio un po' diverso, e prendiamo come punto di origine della luce una galassia molto più lontana, tanto l'universo è infinito, no? O, per lo meno, tale è ancora il Modello con cui stiamo lavorando in questa fase. E allora supponiamo che la nuova galassia di cui ci occupiamo ora si trovasse (e si trovi a tutt'oggi) a venti miliardi di anni-luce da noi. Pure lei, nell'istante in cui cominciò a esistere (sempre quattordici miliardi di anni fa), avrà emesso luce in tutte le direzioni, e perciò anche verso di noi. Questa sua prima luce, però, al momento presente sarà ancora per strada, avendo percorso solo *quattordici* miliardi di anni-luce da confrontare con i *venti* necessari per raggiungerci, e dovrà impiegare altri *sei* miliardi di anni di viaggio per arrivare fino ai nostri telescopi. Di conseguenza, pure se puntassimo in quella direzione il più potente dei super telescopi del futuro, qualcosa di così enorme che non riesco neanche a immaginarlo, in ogni caso lo strumento non rivelerebbe un bel nulla. Ecco: è chiaro questo contro-esempio?

Come caso limite, soffermiamoci su una galassia che, al "*Fiat lux!*", si fosse trovata a quattordici miliardi di anni-luce da noi, (**13,75**, se proprio ci tenete). Dopo tanto tempo e tanta strada, proprio stasera alle **20,00** Central European Time il suo primo raggio di luce giungerebbe finalmente alla Terra. Avendo puntato il telescopio ieri, ancora non avremmo visto nulla; da stasera in poi (dopo le **20,00**), potremo aggiungere quella galassia all'elenco "*delle nostre masserizie*", secondo la dizione usata da Giacomo Leopardi nel "Dialogo di un folletto e di uno gnomo".

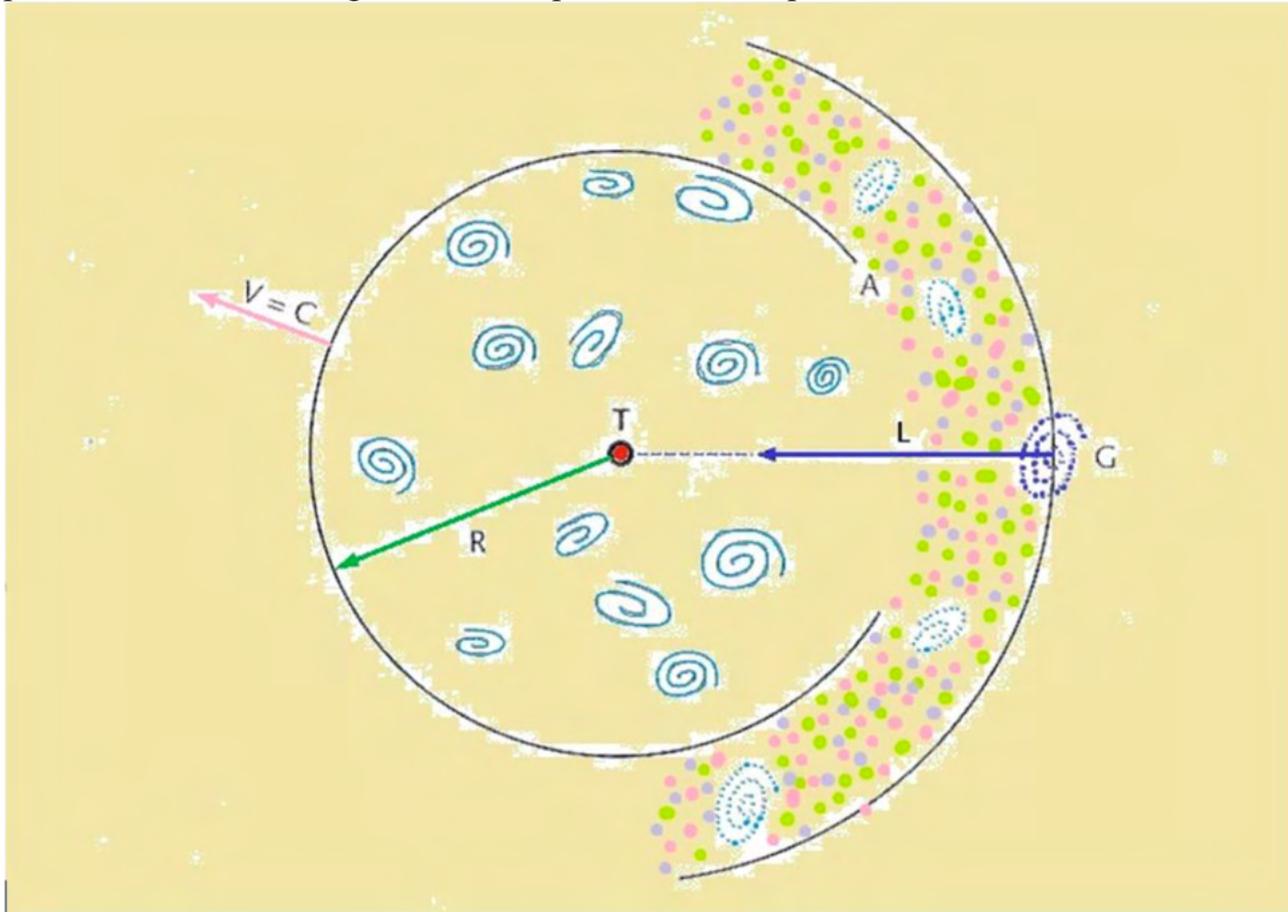
Sintetizziamo tutto il discorso precedente: in qualsiasi direzione decidessimo di puntare il telescopio, potremo vedere solo oggetti la cui distanza da noi non supera quattordici miliardi di anni-luce. Quelli più lontani, anche se esistono, non riusciremo ancora vederli, poiché la loro luce, prima di arrivare a noi, deve ancora percorrere un tratto di strada, e dunque ci metterà del tempo. E adesso aggiungiamo un concetto nuovo, pure se era già implicito in ciò che abbiamo imparato finora.

Se oggi, che l'universo ha quattordici miliardi d'anni di età, il limite fino al quale possiamo vedere oggetti è quattordici miliardi di anni-luce, è facile arguire che tra un miliardo d'anni, se ci saremo ancora (non mettiamo limiti alla Provvidenza), riusciremo a vedere oggetti fino a quindici miliardi d'anni-luce. Siamo d'accordo? Ebbene: ciò è equivalente ad affermare che, nel Modello d'universo *infinito e statico* proveniente dal Big Bang, è *come se* la sfera di universo a noi accessibile si espandesse col tempo, e a quale velocità? Quella della luce, ovviamente! In sintesi: ***il nostro Universo Causale ha una dimensione, espressa in anni-luce, pari all'età dell'universo espressa in anni.*** Una regola semplice, in fin dei conti, no? In Figura 2.1 ho cercato di riportare in termini grafici tutta la discussione precedente. Spero di esserci riuscito.

In essa, **T** rappresenta la Terra, **A** è la *superficie della frazione di universo a noi accessibile* e, manco a dirlo, il raggio di questa sfera (dovete pensare il disegno in **3D**) è proprio **R = 14 miliardi di anni-luce**. Ovviamente, le spirali a distanza minore di **R** sono le galassie che riusciamo a vedere. A distanza maggiore, oltre la sfera **A**, sono disegnate altre spirali, ma punteggiate. Queste sono le galassie al di fuori del nostro Universo Causale, e la loro luce è ancora per strada verso la Terra. La raggiungerà un giorno giacché ***le cose funzionano come se*** il raggio **R** si espandesse a  $V = c$ .

Cercando di chiarire meglio, ho disegnato una galassia **G** – tratteggiata – a distanza dalla Terra pari a venti miliardi di anni-luce. Da essa parte la freccia **L**, che indica quanto ha

percorso la luce della galassia **G** a partire dal suo primo istante di vita. Poiché l'età



**Figura 2.1**

dell'universo è quattordici miliardi di anni, **L** avrà percorso quattordici miliardi di anni-luce, e perciò mancano ancora sei miliardi di anni prima che la luce raggiunga la Terra e noi riusciamo a vederla. Quindi, tra sei miliardi di anni, quando per la prima volta vedremo anche **G**, il raggio dell'Universo Causale si sarà espanso fino a **venti miliardi di anni-luce**, ed è per questo che affermo che *le cose funzionano come se* il raggio **R** si espandesse alla velocità della luce, lasciando alla Sezione II la spiegazione dettagliata di quel “*come se*”. Ci siamo capiti?

E veniamo alla nave e all'**orizzonte** nel titolo di questa sezione. In primo luogo: qual è il centro dell'Universo Causale? Risposta immediata: chi lo sta osservando. Il mio Universo Causale è leggermente diverso da quello di mia moglie, che ora sta chattando al computer con mia figlia in salotto. Per me si estende sette o otto metri in più dal mio lato, e il contrario avviene per lei. Certo: la luce impiega un tempo così breve a percorrere questi pochi metri di distanza tra i centri dei nostri due Universi Causali, che in pratica essi coincidono e non riusciamo a misurarne la differenza.

Se, però, ci fosse consentito di saltare in un istante sull'ipotetica galassia **G** in Figura 2.1, a venti miliardi di anni-luce da noi, la Terra sarebbe fuori dal **suo** Universo Causale, che

si sovrapporrebbe solo in parte col nostro. Se ne evince che, da ciascun punto dell'infinito universo, possiamo definire un bordo o *orizzonte*, che si espande al passare del tempo, oltre il quale non si può vedere nulla *per principio*. Ecco: il concetto di *orizzonte* si applica spesso, specie in astrofisica e in cosmologia, per indicare *luoghi o tempi* oltre i quali è impossibile osservare alcunché, per analogia coll'orizzonte terrestre che impedisce di vedere, sia pure col più potente cannocchiale da marina, una nave che si trovi oltre l'orizzonte stesso. Prendiamo familiarità con questo concetto di *orizzonte* in senso lato, poiché sarà per noi molto importante nel seguito della costruzione di un Modello d'universo sempre più ricercato.

Abbiamo lasciato appeso un quesito: perché parliamo sempre di “Universo Causale”? Cosa diamine significa “causale”? Moltissimo e, nel prossimo capitolo un apologo ci aiuterà a capirlo.

### 3) – Ancora lo scatolone infinito

#### 3.1) – La parabola del professore odioso

Un'università qualsiasi: siamo nell'Istituto di astronomia. Uno studente ansioso, di quelli che non fanno altro che rivoltarsi nel letto tutta la notte sognando esami falliti, appuntamenti mancati, oggetti smarriti e via discorrendo, si sta preparando per uno degli esami del corso di laurea, tenuto da un Professorone (uno Scienziato Pieno Di Maiuscole) del quale ogni studente ha il terrore: uno di quelli che prendono sul serio tutti e tutto, a cominciare da se stessi.

L'esame non sarebbe neanche troppo difficile, ma... Il nostro studente, per controllare l'ansia, non si affida solo al Benzodiazepam, all'Alprazolam e derivati, aggiungendoci del Pregabalin per potenziarne gli effetti e rintronarsi un poco: vuole essere certo di farcela e dunque, per conquistarsi una tranquillità relativa, studia capillarmente ogni argomento imparando a memoria diagrammi, formule e fenomenologie. Almeno, il giorno in cui sarà interrogato saprà di andare sul sicuro.

Finalmente, dopo un'attesa angosciata, inizia l'esame. E purtroppo, fin dal principio, le cose non si mettono bene. O meglio: non quadrano. Il ragazzo risponde alle domande senza perdere una battuta, o almeno a lui così sembra. Il Professorone, però, mastica amaro, ed esibisce il proprio disappunto con manifestazioni d'insofferenza. Parla in gergo stretto usando abbreviazioni e sigle, pretende che lo studente discuta in dettaglio problemi non pertinenti al programma, inquadramenti generali che saranno introdotti solo nei corsi dell'anno successivo, s'impunta sulle formule e chiede che siano ricavate passo dopo passo, risolvendo equazioni che lo studente non ha mai sentito nominare, e insomma, senza tirare troppo per le lunghe, il ragazzo è bocciato.

Comprensibilmente depresso, lo studente cerca di attutire il colpo annegando la delusione in discoteca e, neanche a dirlo, prende una pasticca qua e una là, poi uno spinello, fa un tiro di coca e beve alcolici scordandosi che la mattina si era già strafatto di Xanax. Verso le due di notte collassa, e si sveglia al Pronto Soccorso mentre gli stanno praticando una lavanda gastrica (e speriamo che basti, perché qui lo abbandoniamo al suo fato e non ne sapremo altro).

Ora, il lettore presti molta attenzione. Gli si chiede: quali sia state le cause per cui il ragazzo è finito all'ospedale? Stiamo parlando di *cause*, badate bene!

Se ne possono enumerare molte senza troppo spremersi le meningi: infatti, il nostro avrebbe fatto meglio a non ingurgitare alcol e altre porcherie (e nemmeno Pregabalin e Clonazepam, a quell'età), ma un'altra causa, forse la principale, tende a restare sullo sfondo. Il comportamento del Professorone, e ora lo declassiamo subito al rango che si merita: quello di *professorucolo*. Infatti, adesso vi racconto la sua storia partendo dalla bocciatura e risalendo all'indietro per... beh, per un bel po' di anni.

Il professorucolo ha bocciato lo studente (non ero io: ai miei tempi non credo esistesse ancora neanche il banale Diazepam, e i più arditi si contentavano di una pasticca di Simpamina; l'effetto di tre caffè) non per la sua presunta impreparazione ma perché, seguendo un preciso criterio, aveva già deciso di bocciarlo prima ancora di sapere chi fosse. Come mai? Ebbene: sappiate che questo insegnante è un mediocre assoluto, anzi; un medio-basso meschino, di scarissimo valore culturale e intellettuale. Di solito i suoi studenti se ne rendono conto dopo i primi cinque minuti di lezione, ma egli vuole comunque farsi rispettare da loro, e perciò usa l'unico stratagemma disponibile a una persona come lui: cerca d'incutere timore.

A parte l'uso di un linguaggio volutamente imperscrutabile, quando è ora dell'esame ficca una mano in tasca e ne tira fuori un dado tenendolo nascosto sotto il tavolo, e poi lo lancia nel palmo dell'altra mano. Se l'esito del lancio è un cinque o un sei, lo studente sarà bocciato pure se si chiamasse Enrico Fermi (non per una banale omonimia, badate). Insomma: statisticamente uno su tre non supera l'esame.

Mi chiederete: «È mai possibile che un individuo del genere riesca a vincere una cattedra universitaria?». Bene, le cose sono... come dire... complesse; è... possibile: non sempre, certo, ma a volte... Ma qui siamo di fronte a un caso particolare. Il professorucolo ebbe, diversi anni prima, un colpo di fortuna sfacciata in conformità a un corso di eventi preordinato da molto, molto tempo, senza che nessuno potesse saperne nulla. Infatti – e qui chiedo di nuovo tutta l'attenzione del lettore – bisogna sapere quanto segue.

Circa quattordici miliardi di anni fa, pochissimo dopo il Big Bang, accadde un evento astronomico importante (non vi racconto quale, non è pertinente) a una distanza di circa quattordici miliardi di anni-luce da noi. Così avvenne che, una notte in cui un giovane astronomo di scarse capacità stava al telescopio per eseguire osservazioni coordinate da altri, la luce di quel fenomeno giunse finalmente al nostro pianeta e lui, per puro caso, registrò l'evento. Poi, nei mesi e anni successivi, lo studiò in dettaglio, e non gli riuscì difficile far accettare a riviste prestigiose i suoi articoli poiché, in effetti, riguardavano un evento astronomico rilevante. E così maturò i titoli scientifici necessari per guadagnarsi una cattedra.

Lasciamo da parte ogni considerazione filosofica sulla fortuna “che i ben del mondo ha sì tra branche”, e a noi dispensa solo guai mentre gli altri non fanno che vincere terni al lotto. Invece, proviamo a domandarci (questo è il punto preciso in cui dovrete anticipare voi stessi la risposta): ci sarebbe stata la lavanda gastrica, se l'evento astronomico, anziché a **quattordici**, fosse avvenuto a **venti** miliardi di anni-luce di distanza?

Sto aspettando la risposta.

No, niente lavanda gastrica. Se si fosse verificato l'ultimo caso da me prospettato, prima che la luce dell'evento potesse giungere a noi avremmo dovuto aspettare altri sei miliardi d'anni. L'astronomo di scarse capacità non l'avrebbe osservata, non avrebbe pubblicato nulla d'importante, e avrebbe seguito a passare notti al telescopio in conto terzi. Magari sarebbe passato a fare il sindacalista, ma non sarebbe comunque andato in cattedra diventando il professorucolo che sappiamo. E tutti (tranne lui) sarebbero stati più contenti. La cattedra di quel corso di laurea sarebbe andata a un astronomo più competente (o almeno si spera), il ragazzo sarebbe stato promosso con trenta e lode e, pure se fosse andato in discoteca a festeggiare, l'euforia per l'ottimo voto avrebbe sostituito in buona misura l'esigenza d'ingerire roba per tirarsi su.

Ora dovrete aver capito la connessione tra questa piccola cronaca nera quotidiana, e l'aggettivo "*causale*" che attribuiamo all'universo a noi accessibile. Infatti, nella sfera d'universo che si trova all'interno dell'*orizzonte* di visibilità, possono esistere *cause* suscettibili di produrre *effetti* sul nostro pianeta, perfino sulla nostra vita. Nell'esempio limite del professorucolo, il prodigioso evento astronomico è stato una delle *concause* per cui lo studente, come *effetto*, si è buscato la lavanda gastrica.

«Una causa molto indiretta», potreste obiettare. Certo: cause più dirette sono state le assunzioni di varie sostanze tossiche, ma l'evento astronomico ha in ogni caso contribuito a determinare l'andamento delle cose. Se questo famigerato evento si fosse verificato a distanza maggiore di quattordici miliardi di anni-luce, alla fin fine il dipanarsi degli avvenimenti qui sulla Terra si sarebbe svolto in modo differente.

Il gioco di causa-effetto cosmico, in sostanza, ha pur esso un limite spaziale, un *orizzonte*, ed esso coincide con quello dell'universo visibile. Di qui: "Universo Causale", e l'esistenza di questo confine invalicabile è ancora una volta dovuta alla finitezza della velocità della luce. Poiché nulla (la correttezza scientifica assoluta vorrebbe la dizione: "nessuna informazione") può propagarsi più velocemente di *c*, tutto ciò che avviene *dentro* la sfera *causale*, potenzialmente, è in grado d'influire su noi e sul nostro ambiente; se qualcosa avviene *all'esterno*, non c'interessa. Non *esiste* in senso stretto, anzi: comincerà a esistere (per noi) solo quando sarà passato abbastanza tempo da consentire alla luce proveniente da quell'evento di giungere fino alla Terra. Speriamo che, a quel punto, ci sia un astronomo più in gamba a osservare...

Abbandoniamo lo studente e il professorucolo ai loro destini, e riflettiamo un momento su questi ultimi concetti, per renderci conto di quanto siano importanti in generale, e non solo nella definizione di "Universo Causale" (d'ora in poi abbrevierò la definizione con le sole iniziali UC; quando incontrerete queste due maiuscole in grassetto cercate di ricordare a cosa si riferiscono, poiché sono uno dei personaggi importantissimi del libro giallo, come Preston e la sua valigetta dal contenuto scottante).

Le scienze naturali, che vanno dalla fisica alla medicina nelle sue varie espressioni, e con l'esclusione della matematica poiché essa *dovrebbe* richiedere solo ragionamento puro su entità astratte, si basano irrevocabilmente su un Metodo precisato molto tempo fa da quel Professorone dell'Università di Pisa che meritava pienamente la maiuscola e anche più. Aveva pure lui un carattere impossibile, ma gli si poteva perdonare (almeno dopo morto). Ovviamente sto parlando di Galileo Galilei e, se dovessi esprimere di nuovo il suo pensiero in parole correnti, potrei dire così: «La scienza studia la natura com'è, non come a noi piacerebbe che fosse». (Ho sintetizzato molto, rispetto alla precedente dizione.) Da cui il corollario inevitabile valido oggi, domani e sempre: per studiare la natura bisogna eseguire esperimenti; non basta limitarsi a ipotesi. Gli: «E se... ma io penso che... però, forse, può darsi...» lasciamoli a filosofi, politici, economisti e, purtroppo, talvolta anche medici (quanti nemici mi sto facendo!). Un concetto da memorizzare e interiorizzare in modo profondo, poiché lo incontreremo di nuovo in futuro, e anche molto spesso.

Proprio per i motivi finora discussi, il concetto di UC pone *orizzonti* di conoscibilità invalicabili. Infatti, torniamo alla cosmologia. Tenendo conto della premessa galileiana, ci domandiamo: «Si può sperimentare, anche in *senso lato*, sull'eventuale frazione d'universo dalla quale non ci arrivano informazioni?» Non si può, per definizione! E perciò, i limiti nei

quali c'è dato di conoscere il gioco di Madre natura, si fermano ai bordi dell'UC. Se al di fuori di esso ci sono realtà diverse da quelle a noi note, esse restano nel limbo dell'inconoscibile. Con una precisazione importantissima da discutere nelle Sezioni successive.

E qui piazzo una premessa che ci tornerà buona verso la fine del libro: molti fisici moderni si trastullano con ipotesi (superstringhe e derivati, come il “Modello *M*” ma non solo) al momento prive di qualsiasi riscontro sperimentale ma che, un giorno, potrebbero averne. Qualora ciò avvenisse (attenzione, lettore: ti sto predisponendo una domanda a trabocchetto), le suddette ipotesi diverrebbero vere e proprie teorie, entrando nel patrimonio della fisica.

Mettiamoci dunque in quest'ordine d'idee e accettiamo (sempre dopo le eventuali verifiche sperimentali, ovviamente) la validità di tali nuove teorie. Ora: alcuni dei loro corollari prevedono l'esistenza di una moltitudine di universi, forse addirittura infiniti, differenti l'uno dall'altro, nel senso che le vere e proprie leggi fisiche a noi conosciute sia, in quegli altri luoghi, diverse. Poiché queste teorie funzionano all'interno dell'UC, dove le possiamo sperimentare direttamente, è scientificamente corretto dare per scontato che *esista* anche tutta quest'altra profusione di universi? Non rispondere subito, lettore. Rimuginaci sopra mentre vai avanti da un capitolo all'altro; alla fine della narrazione, dopo aver discusso in maggior dettaglio queste ipotesi, ne ripareremo.

E ora un piccolo avvertimento, perché bisogna stare attenti a come si ragiona. È vero in senso assoluto che non è possibile sapere con certezza cosa ci sia oltre i bordi dell'UC. D'altronde, se invece di pretendere *certezze* ci contentiamo di *possibilità*, non tutto è perduto: è lecito portare avanti ipotesi che abbiano, per lo meno, una *ragionevole probabilità* di essere vere. Faccio un esempio di come bisognerebbe ragionare per formulare ipotesi condivisibili da molti, se non da tutti, cominciando con un errore, e poi correggendolo.

Il Sole, col suo codazzo di pianeti (e dunque pure la Terra), si è condensato da una nebulosa circa 4,6 miliardi di anni fa. A quell'epoca, dunque, l'età dell'universo superava di poco i nove miliardi di anni e, di conseguenza, il raggio dell'UC era pur esso nove miliardi e rotti di anni-luce. Se, in brevissimo tempo, si fossero evoluti sul nostro pianeta (o altrove; il discorso fila lo stesso) esseri intelligenti in grado di studiare il cosmo, essi avrebbero dedotto quest'ultimo valore numerico come raggio del loro UC.

Sempre ricordando che il Modello d'universo con cui stiamo giocando in questo momento è di dimensioni infinite, e poiché lo ipotizziamo ancora *statico* e *immutabile* nel tempo, ci chiediamo quanto segue. Avrebbe avuto ragione, un ipotetico astronomo di quei tempi remoti, se avesse pontificato: «Essendo il raggio dell'UC pari a poco meno di dieci miliardi di anni-luce, possiamo concludere che, oltre questa distanza, non esiste più nulla»?

Col senno di poi sappiamo che, nonostante un'applicazione rigorosa del Metodo galileiano (almeno in apparenza), la suddetta affermazione sarebbe stata errata. Infatti, il *nostro* UC è più grande. Qual è lo sbaglio commesso? Semplice: decidere che tutto ciò che non possiamo misurare direttamente o indirettamente, solido, liquido, gassoso, plasma, energia, fisico o addirittura metafisico, *non esista in senso stretto*. Un'affermazione più corretta sarebbe stata: «Non sappiamo se, oltre i bordi del nostro UC, ci sia ancora qualcosa. *Probabilmente* sì, ma può anche darsi di no; la scienza non è in grado di trattare questo tipo di problemi». Vedete che ho messo in corsivo il “*Probabilmente*”?

Veniamo, infatti, alle affermazioni basate su una *ragionevole probabilità*, come avevo promesso, e stavolta vi racconto la versione giusta. Le osservazioni astronomiche mostrano che l'UC possiede un'omogeneità piuttosto marcata per quanto riguarda la densità di materia visibile, cioè quella che illumina ed è illuminata, e anche per la luce stessa. Più avanti dovremo confrontarci con forme più esoteriche di materia ed energia, e quindi restiamo sul semplice, d'accordo?

Ora, quest'omogeneità ci fa sospettare che, sempre in approssimazione di ordine zero, in nessuna direzione ci si stia avvicinando a qualche *bordo cosmico* laddove, per esempio, la materia finisca o, al contrario, ne esista un accumulo eccezionale. È chiaro come, sperimentalmente, non ci siano prove che le cose debbano andare proprio in questo modo, ma immagino che il lettore non solleverà obiezioni se mi limiterò a dire, senza essere troppo specifico: «C'è una *ragionevole probabilità* che oltre il bordo, oltre l'orizzonte dell'UC, l'universo continui per *grandi distanze* a *somigliare* a quello che vediamo all'interno del bordo». Questo modo di ragionare, di tipo *probabilistico*, è abbastanza accettato in ambito scientifico.

## 3.2) – Varianti su Cappuccetto rosso

Newton, attorno al '700, era convinto dell'infinità dell'universo. E altresì della sua *staticità*. Poteva esserci qualche movimento *ripetitivo* qua e là come quello dei pianeti attorno al Sole o, sappiamo col senno di poi, del Sole stesso attorno al baricentro della Galassia, ma doveva trattarsi di semplici moti *locali*, che non interessavano l'universo nella sua interezza.

In questa visione restava un punto debole, e cioè: se la forza di gravità è sempre attrattiva, come fanno tutti gli oggetti a non subire, al passare del tempo, una lenta deriva gli uni verso gli altri e, alla fine, collassare in un oggetto unico? La risposta del genio britannico era un po' traballante: «Siccome, in ogni regione dell'universo, la distribuzione degli oggetti è sostanzialmente simmetrica, pure la somma delle forze di gravità su ogni singolo oggetto è simmetrica, e dunque esse forzese annullano a vicenda perché l'oggetto è tirato in ugual modo da tutte le parti. Ne consegue la staticità dell'universo».

Sbagliato! Anche supponendo di poter fissare una configurazione di partenza in equilibrio secondo i criteri di Newton, cifre alla mano si dimostra che qualsiasi minima perturbazione (i moti planetari, per esempio) basterebbe a distruggerla e a far collassare ogni cosa. Eppure, a questa balla ci hanno creduto tutti fino a Einstein incluso.

Lui aveva trovato la nuova legge di gravità che sostituisce quella Newtoniana, e cioè la Relatività generale di cui parleremo nella Sezione II, e aveva provato ad applicare le sue equazioni all'universo intero. Catastrofe! O quest'ultimo crollava su se stesso, o si espandeva, ma non poteva restare fermo. Turbato, Einstein provò a pasticciare con le equazioni, e aggiunse un termine da lui definito "Costante cosmologica", da quel momento in poi associato alla lettera greca  $\Lambda$ . Grazie a  $\Lambda$ , era possibile trovare soluzioni *statiche* come quelle assunte a priori da Newton.

Altro errore madornale: non perché non potesse esistere una qualche  $\Lambda$ , giacché nelle equazioni c'era davvero un posto in cui inserirla in modo naturale, come se fosse prevista dalla teoria ma, all'inizio, Einstein si fosse dimenticato di scriverla. Il problema, invece, era analogo a quello Newtoniano: pure con  $\Lambda$ , la stazionarietà così faticosamente ottenuta era, in ogni caso, temporanea. Magari, un universo *quasi fermo* durava a lungo, miliardi di anni, ma poi si tornava a una delle due: o contrazione, o espansione. Eppure, l'idea di un cosmo infinito e statico nel tempo e nello spazio era così diffusa, che nessuno pensava a metterla in dubbio.

Noi abbiamo già fatto un passetto in più cominciando a parlare di Big Bang, e ricordiamo che questo evento esplosivo era stato previsto inizialmente nel **1926** dall'abate Lemaitre, docente all'Università di Lovanio, poiché lui si fidava delle equazioni della Relatività che volevano, per l'universo, un'età finita, e aveva perfino pasticciato un po' con dati sperimentali incerti, precorrendo Hubble. Lemaitre pensava all'esistenza di un "Atomo primigenio" la cui esplosione avesse dato luogo all'universo, ma Einstein non voleva sentirne manco l'odore e maltrattò il povero gesuita. Eppure, già tanti astronomi del passato, tra i quali spicca Olbers con un suo scritto del **1823**, avevano mostrato come l'idea di un cosmo statico, infinito nello spazio e nel tempo, conduca irrevocabilmente a un paradosso privo di soluzione. Lo illustrerò, afferrando per mano il lettore e conducendolo con me in un bosco. Senza secondi fini, giuro! All'età mia, poi, si potrebbe fidare anche la più avvenente lettrice...

Finché stiamo appena entrando nel fitto degli alberi, è sufficiente che diamo un'occhiata dietro di noi e vediamo, fra i tronchi, l'esterno del bosco, i prati e le case. Vale a dire: i tronchi degli alberi sono pochi, lasciano ampie zone libere e non riescono a occultare quel che c'è fuori del bosco. Adesso, però, andiamo avanti e infiliamoci un po' di più nella selva oscura. Ecco: l'immagine in Figura 3.1 è stata scattata d'inverno, in modo che ci fossero poche foglie a dar fastidio alla visuale.



**Figura 3.1**

È un bosco appenninico. Osserviamo bene: riusciamo a distinguere qualcosa che si trovi al suo esterno? No. I tronchi più lontani sono sempre più *stretti* (in linguaggio tecnico si dice che *sottendono un angolo visuale minore*) *linearmente con la distanza*, ma il loro numero aumenta in proporzione al *quadrato della distanza* e alla fine si distinguono solo tronchi in qualsiasi direzione si guardi. Il cosiddetto “**Paradosso di Olbers**” è contenuto in questa foto, e ora stiamo per applicarlo all’universo nella sua interezza.

Perché, di notte, il cielo è buio? Sembra una domanda idiota, e ci pare di poter rispondere: «Perché non c'è il sole», ma non è così banale. Infatti, seguite il ragionamento. Esiste una filastrocca molto popolare (io la imparai a memoria in quinta elementare): «Della sfera il volume qual è? / Quattro terzi pigreco erre tre». Vale a dire: il volume di una sfera di raggio  $R$  è proporzionale al cubo del raggio stesso (“erre tre” significa  $R$  elevato alla terza potenza, e per favore non saltate i pochi paragrafi che seguono, perché non parlo di metafisica trascendentale ma solo delle quattro operazioni).

Ora: se in quella sfera c'è "qualcosa", la *quantità* di questo "qualcosa" cresce in proporzione al raggio della sfera elevato al cubo. Lo stesso criterio vale per qualsiasi contenitore. Una damigiana larga due volte un fiasco, una volta riempita di un liquido qualsiasi, non pesa due volte il fiasco, ma otto volte di più, poiché due elevato al cubo fa, per l'appunto, otto. E badate: fiaschi o universo, il giochino è sempre lo stesso.

Allora, proviamo ad applicarlo subito al cosmo vicino a noi. Quante stelle ci sono in una sfera centrata sul Sole e avente  $R = 10$  anni-luce? Se ne scoprono sempre di più, ma per comodità facciamo cifra tonda e diciamo che sono **10**. La domanda per il lettore è: quante stelle ci aspettiamo di trovare in una sfera avente raggio *doppio*, e cioè  $R = 20$  anni-luce? Non è difficile rispondere: siccome il contenuto della sfera va col cubo del raggio, ne troveremo  $2^3$  volte tante e, siccome  $2^3 = 8$ , siamo a  $8 \times 10 = 80$  stelle. E, sempre scusandomi per il modo di procedere pedante, quante ne troveremo se  $R = 30$  anni-luce? Facile: se il raggio è **3** volte maggiore, ce ne sono  $3^3 \times 10 = 27 \times 10 = 270$ . Insomma, se ci allontaniamo anche di poco dal nostro pianeta, il numero di stelle che incontriamo aumenta in modo impressionante.

D'altra parte, parlando di stelle, più queste sono lontane, più la loro luminosità ci appare fioca (per analogia: nel bosco, i tronchi lontani li vediamo sempre più sottili). Non vi faccio i conti, ma arrivo direttamente ai numeri, e fidatevi: la luminosità di una stella diminuisce come *la sua distanza elevata al quadrato*, e cioè alla *seconda* potenza.

Siamo già al paradosso di Olbers. Infatti, se da *ogni stella* entro  $R = 10$  anni-luce (ricordo che vi trovano **10** stelle) ci giunge una luminosità pari a **L**, dalla sfera arriverà a noi una luminosità complessiva pari a **10 L**. Allora, proviamo a calcolare quanta luminosità riceveremo dalle stelle che si trovano fino a **20** anni-luce. Possiamo approssimare il ragionamento così: giacché la distanza di ogni stella nella seconda sfera è, mediamente, doppia rispetto a quelle della prima sfera, la luminosità di questa stella sarà solo  $(1/2)^2$ , e cioè  $1/4$  di **L**. Però, di stelle ce ne sono **8** volte di più. E quindi, la luminosità totale che ci proviene da questa seconda sfera sarà  $1/4$  di **L**, ma moltiplicato per **80** volte, e dunque otterremo **20 L**.

Di conseguenza, passando alla sfera avente  $R = 30$  anni-luce, giungerà a noi  $1/9$  di **L** da ogni stella, ma moltiplicato per **270** volte, e cioè **30 L**. Non vado avanti con i calcoli, perché ormai il lettore avrà capito il trucco: dalla sfera con  $R = 40$  anni-luce avremo **40 L** e così via. Insomma: la luminosità che proviene da ogni successiva sfera cresce linearmente con la distanza. Ne consegue che, se le stelle fossero disposte nello spazio in modo casuale ma all'incirca uniforme proprio come gli alberi in un bosco, e potendo osservare fino a distanza infinita, sul nostro pianeta giungerebbe una luminosità infinita notte e giorno. Altro che cielo notturno oscuro!

Non c'è trucco, non c'è inganno. Il ragionamento vale ugualmente se invece che di stelle parliamo di galassie, e si dimostra che l'eventuale presenza di nubi opache di gas e polvere non cambia nulla, perché anche queste ultime, ricevendo infinita luce, finirebbero per riscaldarsi ed emettere altra luce a loro volta.

E allora, come facevano gli astronomi dell'universo infinito (nello spazio e nel tempo) e omogeneo a risolvere il paradosso? Niente: lo ignoravano sperando che alla fine qualcuno venisse fuori con una spiegazione. Gli astronomi, i fisici, i matematici, gli scienziati di ogni tempo e paese sono come tutti gli altri esseri umani. Credono nei luoghi comuni della loro epoca (che, per eleganza, chiamano *paradigmi*), anche se alcuni di loro (pochi) lavorano nel

tentativo di superarli. Quando le cose non tornano, e non si capisce perché, i fisici aspettano cercando nel frattempo di elencare possibili soluzioni al problema, senza però saper individuare quale sia quella giusta – se c'è, perché spesso i termini del problema cambiano col progredire delle conoscenze. E non crediate che la nostra epoca vada esente da *paradigmi*: i nostri luoghi comuni ci sembrano più *civilizzati* e *razionali* di quelli del passato, ma non oso pensare cosa ne diranno i posteri!

Vediamo, allora, a che punto è il nostro Modellino d'universo. Funzionicchia e, nel paragone con la locomotiva giocattolo, sbuffa e rumoreggia, fa qualche scatto in avanti e s'inceppe, riparte ma poi si ferma di nuovo pochi centimetri dopo... non è propriamente un gioiello ma, tutto sommato, siamo ancora nelle prime, poche decine di pagine, e non ci possiamo lamentare. Infatti, avendo posto un termine temporale all'origine dell'universo, e potendo ricevere luce solo dalla sfera dell'UC, che è finita, sembra ragionevole tranquillizzarsi sul cielo notturno: è buio perché non possiamo vedere fino a distanza infinita. È un po' come se fossimo appena entrati nel bosco e, guardandoci dietro le spalle, riuscissimo ancora a scorgere il cielo, i prati, le case e così via, chiaro?

E poi: perché le cose non ci precipitano addosso come farebbero nell'universo di Newton o, pur se in modo differente, in quello di Einstein? Anche qui la risposta potrebbe essere nella finitezza dell'età dell'universo: un giorno o l'altro succederà, ma è ancora troppo presto... va tutto bene, allora? Nemmeno per sogno! Il Modellino si deve arricchire di ben altro, prima di poter affermare che il paradosso di Olbers è risolto davvero. Questo, però, lo vedremo in un'altra Sezione. Qui, piuttosto, vorrei cercare di farvi toccare con mano (non si può, ma almeno è lecito giocarci un po' sopra) l'enormità delle dimensioni dell'UC.

### 3.3) – Quanto è grande l’UC misurato a spanne?

Tantissimo, questo lo abbiamo già capito, ma ora proveremo a farcene un’idea un poco intuitiva, che non sia solo un numero – troppo lungo da scrivere – di chilometri, e uso quest’unità di misura invece degli anni–luce solo perché la nostra immaginazione riesce ancora a raffigurarsi un chilometro, forse due, ma poi comincia ad avere difficoltà.

Punto di partenza: il lettore si strappi un capello (se ne ha) dalla testa, e proprio quel capello rappresenterà il primo passo per la nostra comprensione delle distanze cosmiche. Poi, come secondo ingrediente, tiri fuori dalla tasca il mazzo delle chiavi di casa, e ne estraiga una di tipo Yale o di misura equivalente. Ora, senza soffiare o agitare troppo l’aria, appoggi capello e chiave su un foglio di carta bianca, in modo che il capello stia fermo e si distingua bene, magari con una lente o con gli occhiali. Il terzo e ultimo ingrediente... vedremo tra un attimo, e dipenderà da dove abita il lettore stesso.

Adesso, sempre senza perdere di vista il capello, ragioniamo assieme sulla distanza tra il nostro pianeta e la Luna: in media **380.000 km**. Dal punto di vista cosmico la Luna è dietro l’angolo (astronomicamente siamo un “pianeta doppio”, e sarebbe ora che popolassimo anche la Luna stessa), eppure già sono così tanti chilometri che cominciano a sfuggire all’intuizione. Un modo per farceli rientrare dalla porta di servizio potrebbe essere quello di ricordare quanto tempo impiegavano – mezzo secolo fa – i primi astronauti, quelli del progetto Apollo, a raggiungere la Luna, essendo stati spinti verso di essa dal potentissimo razzo “Saturno V”. Solo tre giorni. Non è poco, ma neanche tantissimo. Tre giorni sono un tempo che riusciamo a comprendere, non vi pare? Questo esercizio mentale è un modo semplice per ridurre uno sproposito di distanza (pensate quanti anni ci vogliono, a meno di essere camionisti, a percorrere con un’auto **360.000 km**: almeno una trentina) a cifre più *umane*.

Sempre il capello: impostiamo mentalmente una scala di distanze in cui il suo spessore (circa un decimo di millimetro, ma la cifra esatta non conta) **rappresenti l’enorme intervallo di spazio tra la Terra e la Luna**. Chiediamoci qual è, nella stessa scala, la distanza tra Terra e Marte. Scelgo come riferimento il pianeta rosso perché, oggi, la tecnologia spinta all’estremo e a costi economici proibitivi, renderebbe possibile la costruzione di un insieme di strutture dalle quali lanciare verso Marte un veicolo abitato da esseri umani.

Il lettore avrà già capito a cosa sto mirando: nella scala appena impostata sul foglio di carta davanti a noi, la lunghezza della chiave Yale corrisponde alla distanza minima tra Terra e Marte. Mettiamola a confronto con lo spessore del capello: si capisce subito, a occhio, la difficoltà dell’impresa marziana. Che, tra l’altro, ha una durata prevista dell’ordine di alcuni mesi di sola andata, senza scalo intermedio. Diciamo sei mesi, per tagliare la testa al toro. Altro che i tre giorni per la Luna!

Cosa sto facendo? Un tentativo per passare da distanze troppo grandi perché siano visualizzate in modo intuitivo, a tempi necessari a percorrerle poiché, almeno finora, questo modo di rigirare la frittata è un po’ *pagante*. Infatti, sei mesi riusciamo ancora a immaginarli: entro sei mesi bisogna versare la seconda rata delle imposte; ricordarsi di pagare l’assicurazione della macchina e anche la tassa di circolazione, poi scade la rata del fondo pensione integrativo, arriveranno tre bollette della luce e della televisione via cavo, e pure quella del gas... vedete come il rincorrersi delle scadenze economiche ci aiuta a comprendere

la scala delle distanze nella minuscola frazione di universo (Terra – Luna – Marte) che possiamo sopporre **a nostra disposizione** per mezzo di tecnologie non troppo spinte?

Il lettore volenteroso sarà tentato di estendere questo criterio a tutto il Sistema solare, ma le cose non funzioneranno più altrettanto bene. Infatti, le sonde Voyager hanno impiegato una trentina d'anni per oltrepassare appena la fascia dei pianeti maggiori, e trent'anni sono proprio tanti. Accipicchia: trent'anni fa, io ero... ero giovane, almeno rispetto a ora! E la distanza di Nettuno (o Plutone) dal Sole è un tiro di sasso rispetto alla fascia di Kuiper e alla nube di Oort, residui della formazione della nostra stella e del codazzo di pianeti. La sonda New Horizons è stata più veloce: ha raggiunto Plutone in poco meno di dieci anni, ma per arrivare alla stella più vicina impiegherebbe lo stesso decine di migliaia di anni, ed ecco di nuovo numeri troppo grandi per dire qualcosa alla nostra fantasia.

No, bisogna lavorare come segue. Mantenendo sempre lo stesso rapporto di scala: capello – chiave, cercheremo di visualizzare in altro modo quanto sarebbe grande il Sistema solare. Il quale ha un confine **fisico** alla distanza in cui l'attrazione della nostra stella comincia a diventare confrontabile con quella delle altre, e dunque un qualsiasi oggetto non sarebbe più legato al Sole, ma se ne potrebbe andare libero in giro per la Galassia. Ecco: il Sistema solare si estende fino a circa un anno–luce, che già sappiamo essere **9.500** miliardi di km. Una cifra enorme: per ridurre un numero del genere a qualcosa di più intuitivo ci serve il terzo passo preannunciato poco fa, e a questo scopo ci serviremo di un atlante stradale.

Le maggiori città italiane, da Milano a Palermo, sono circondate da sistemi di tangenziali o da anelli autostradali (esempio: il “Grande Raccordo Anulare”, o “**GRA**”, nel caso di Roma). Siccome le dimensioni di questi budelli d'incanalamento degli ingorghi quotidiani sono pressappoco equivalenti, il lettore cerchi di visualizzare intuitivamente, mentre è in coda e sta imprecaando contro il sindaco, il sistema di tangenziali con cui ha maggior pratica (non dovrebbe essergli difficile). Io, per comodità, userò il **GRA** di Roma, semplicemente perché la sigla è di soli tre caratteri e mi torna più comoda tipograficamente. Ebbene: se lo spessore del capello rappresenta la distanza Terra–Luna, e la lunghezza della chiave quella Terra–Marte, la dimensione del **GRA** è una stima dell'anno–luce nella stessa scala.

Questo, però, mi pare ancora un concetto astratto. Di fronte a un passaggio di dimensioni così enorme l'intuizione già comincia a perdersi. Allora cercherò un altro modo per rendere palpabili, intuitive, le distanze in gioco.

Supponiamo di dire all'amico più fidato: «Ascolta; ho perso la chiave di casa, ma per fortuna so con precisione dove. Mi potresti aiutare a cercarla?». In un buon numero di casi, la reazione sarà del tipo: «Volentieri, dove bisogna cercare?», e la nostra risposta sarà: «L'ho persa all'interno del **GRA** (o delle Tangenziali); basta guardare lì».

Poiché mi piace mantenere la decenza, evito di dilungarmi sulle intemperanze verbali dell'amico. E comunque, gli amici che scegliete sono fatti vostri. Pensateci bene, però: se non esistesse il Sole, pesante e brillante, a guidare la ricerca, il tentativo d'individuare l'orbita dei pianeti interni frugando a caso nell'anno–luce (**sferico**, non semplicemente **piatto** come il **GRA**) del Sistema solare, sarebbe meno remunerativo che cercare una chiave all'interno del **GRA**, perché, come ho appena notato sopra ma voglio ribadire il concetto, nel **GRA** basterebbe esaminare una **superficie**, nel Sistema solare un **volume**! Ho reso più **palpabile** la situazione suggerendo questa piccola sceneggiata?

Siamo dunque arrivati al Sistema solare tutto intero. Già sappiamo come, appena fuori, ci troviamo nel grande fiume di stelle che è la Galassia. Quanto è grande la Via Lattea? Pensiamo: assieme al Sole, ospita altri due-trecento miliardi di stelle, più polveri e gas a non finire. Non possiamo continuare con la scala: “capello = Terra-Luna”; occorre saltare. Stavolta, la chiave Yale non corrisponderà più a Terra-Marte, ma *all'intero Sistema solare* (o, se preferite, a un anno-luce). Ebbene: la Galassia, in proporzione, è grande quanto il **GRA**. Lo so che ci stiamo perdendo, ma più di tanto non si riesce a fare. E comunque, pure qui ricordiamo (dovrebbe essere superfluo) che *cercare il Sistema solare* nella Galassia sarebbe assai peggio che cercare una chiave all'interno del **GRA**, poiché si avrebbe a che fare, anche qui, con un *volume* e non con una *superficie*.

Ultimo salto, anche se ormai il senso delle proporzioni sta svanendo: stavolta l'intera Galassia, in altre parole **100.000** anni – luce circa, è rappresentata dalla chiave Yale. Quant'è, in proporzione, il raggio dell'UC? Immagino che il lettore sia in grado d'indovinare la risposta da solo: quanto il **GRA**.

Mi dispiace: ci ho provato e, almeno fino a un certo punto, spero di essere riuscito a farvi partecipare *emotivamente* della dimensione del cosmo accessibile a noi, ma alla fin fine esso è troppo grande perché si riesca a visualizzarlo, sia pure servendoci di trucchi intuitivi.

Per completare questo capitolo, compiamo un primo passo verso quel che ci attenderà nei prossimi. Abbiamo introdotto – e compreso – il concetto di UC. Senza ancora parlare dell'espansione cosmica, poiché questa richiederà una discussione ben più dettagliata chiedendoci di limare abbondantemente alcuni aspetti del nostro Modellino, possiamo raffinare quest'ultimo con un altro *pezzo* destinato a restarci in modo permanente.

Qualche volta, alla televisione, specie nel caso di trasmissioni intercontinentali in diretta, ci rendiamo conto di un leggero sfasamento tra l'immagine e il parlato. Infatti, il video può passare attraverso satellite, mentre la voce utilizza un cavo transoceanico, o comunque la combinazione più vantaggiosa al momento. Come risultato, un segnale percorre poche migliaia di chilometri, mentre l'altro ottantamila o più, rimbalzando tra satelliti geostazionari per telecomunicazioni. Viaggiando per ottantamila chilometri, la luce impiega un quarto di secondo e rotti, e i nostri sensi sono in grado di percepire con fastidio uno sfasamento pur così modesto tra audio e video.

Quando si passa a distanze astronomiche, il ritardo si dilata a un ritmo elevato via via che consideriamo oggetti sempre più lontani. Il Sole è a otto minuti-luce di distanza dalla Terra. Se esplodesse in questo momento (ma non succederà: tutti i calcoli dicono che è uno degli astri più stabili della Galassia), noi non ne sapremmo nulla e continueremmo a vederlo come sempre per altri otto minuti; solo al loro scadere l'esplosione ci spazzerebbe via.

E questo mi porge il destro per ricordare come il ritardo nella ricezione dei segnali radio sia una delle maggiori difficoltà incontrate dall'esplorazione spaziale, quando ci si allontana molto dal nostro pianeta. Per questo motivo, si stanno elaborando e lanciando sonde sempre più *intelligenti*, in grado di prendere decisioni *autonome* in circostanze inattese poiché, quando ci accorgiamo da terra che si stanno verificando guai, è ormai troppo tardi per inviare istruzioni.

Allontaniamoci dal Sole e, dopo un anno-luce, usciamo dal Sistema solare. A circa **4,2** anni-luce di distanza incontriamo la stella più vicina a noi: Proxima centauri, col suo codazzo di pianeti. Un cosino piccolo piccolo, ed è riuscita ad accendersi come stella per un pelo,

sennò sarebbe morta come Nana bruna prima ancora di nascere. Sirio, stella di ben altro peso (in senso letterale: la sua massa è **2,4** volte quella solare) si trova a **8,6** anni–luce, mentre ne dobbiamo percorrere **37** per giungere ad Arturo. Betelgeuse è molto più lontana, circa **420** anni–luce e, insomma, acceleriamo un po' il passo.

La galassia M31, sorella maggiore (ma non di troppo) della Via Lattea, che s'intravede a occhio nudo nel cielo invernale (se abbiamo la fortuna di trovarci lontano dalle luci delle città), dista da noi due milioni e mezzo di anni–luce. Se là ci fossero astronomi, e in questo preciso momento puntassero un telescopio verso la Terra, cosa vedrebbero: noi? No: solo i nostri antenati di due milioni e mezzo di anni fa, gli australopiteci, mentre gironzolavano (su due gambe) per l'Africa orientale, forse portandosi appresso un randello.

Estendiamo lo stesso tipo di argomentazione all'intero UC. Ciò che i telescopi riescono a catturare quando scandagliano lo spazio profondo, è luce emessa verso di noi in tempi sempre più remoti, e dunque vediamo anche oggetti sempre più *giovani* come età cosmica, e diversi da quelli nei nostri dintorni. Spingendoci verso il limite, incontriamo galassie ancora nella loro infanzia, mentre si stavano formando. Fin qui lo abbiamo sempre saputo tutti, e non ci costa fatica aggiungere al nostro Modello d'universo questo snodo importante.

A volte, invece, ci resta difficile spingere lo stesso ragionamento fino alle estreme conclusioni logiche. Avendo strumenti in grado di captare la luce emessa quattordici miliardi di anni fa, cosa vedremmo? Sì, proprio il Big Bang. È vero? È possibile tutto ciò? In prima approssimazione, e con le debite distinzioni che discuteremo più avanti, la risposta è affermativa. Noi, oggi, *vediamo* il Big Bang, o qualcosa di molto vicino.

Qui, le cose cominciano a *sembrare* difficili, pur restando *formalmente* semplici. Dover aggiungere questo *ritardo temporale* risulta, alla fine, causa di un certo numero di equivoci che dovremo chiarire con calma, uno per uno. State tranquilli perché, prima di aver capito come funzionano le cose, io stesso mi sono imbattuto in tutti questi equivoci, e a volte li ho accettati con pervicacia prima di liberarmene, perciò mi sono tutti familiari. Difficilmente riuscirete a inventarvi castronerie che non abbia già pensato io, e questo dovrebbe incoraggiarvi.

Nei prossimi capitoli, volendo raffinare un po' il Modello d'universo che ci stiamo costruendo, e sempre ignorando l'espansione perché in questa Sezione abbiamo tra le mani l'universo *classico*, e cioè quello fino all'inizio del '900, farà mestieri tornare a due, tra i grossi dubbi che avevamo lasciato in sospeso nel secondo capitolo, per risolverli. Il primo riguarda la commistione di tempo e spazio, per cui non può esserci l'uno senza l'altro. E poi, resta da chiarire il ruolo della forza di gravità perché abbiamo già visto che, da Newton a Einstein, tutti lo avevano frainteso. A entrambi i problemi ha risposto lo stesso Einstein, nel **1905** con la teoria della Relatività *speciale* e poi, nel **1916**, con la Relatività *generale*, anche se capire come andavano davvero le cose ha preso molto tempo anche a lui. In modo superficiale, e con umiltà intellettuale, dobbiamo almeno sfiorare questi due baluardi della fisica e della cosmologia nella Sezione II. Verremo a contatto con idee del tutto nuove, che potrebbero farci venire il capogiro. È il prezzo da pagare; cercheremo di frantumarlo in rate modeste, in modo da favorire anche le scarselle meno capienti...

## 4) – Un atto di umiltà

### 4.1) – Un cervello un po' limitato

Parlando della galassia M31 in Andromeda, abbiamo appena detto che la luce partita dalla Terra due milioni e mezzo di anni fa le sta portando oggi le immagini degli australopithecini di quel tempo. Bisogna risalire a loro, e anzi molto prima, per capire come mai il nostro cervello funzioni in un certo modo. Sarà allora possibile intuire le sue risorse, ma anche i suoi limiti. Perché ne esistono sebbene, a volte, ci sembri di essere potenzialmente onniscienti (è un errore in cui cadono molto spesso gli scienziati, ma purtroppo non soltanto loro). E non ce ne dobbiamo dolere: già la frazione del cosmo alla portata dell'intelletto umano è immensa e bellissima.

Basta volgere attorno lo sguardo per renderci conto della nostra capacità di manipolare il mondo circostante. Non voglio dare giudizi etici, e perciò mi limito ad affermare che, nel bene e nel male, siamo in grado di modificare atmosfera, biosfera e oceani su scala planetaria. Il supercomputer che alberghiamo nel cranio è commisurato al compito: possiamo intervenire sull'ambiente e farlo ballare al suono della musica che gli vogliamo imporre, quindi siamo di sicuro in grado di comprendere com'è regolato quest'ambiente. Non dico che, oggi come oggi, ci siamo già riusciti al **100%**, ma abbiamo pochi dubbi che i nostri cervelli siano adeguati a scoprire almeno le linee essenziali delle leggi di natura.

Esiste, però, un problema filosofico da non sottovalutare: i nostri successi ci fanno assumere come scontato – senza nemmeno rendercene conto – una sorta di *realismo* quasi perfetto, sul tipo di quello galileiano. Ovvero: che l'*immagine* del mondo da noi elaborata sia così vicina alla *realtà* da confondersi con essa o quasi. In sostanza, siamo convinti che il progresso della conoscenza scientifica continui a rendere sempre più somiglianti la realtà e la sua raffigurazione nella nostra mente, ignorando tutte le cautele che i filosofi suggeriscono, a volte vendendo fumo, in qualche caso cogliendo nel segno.

Ora, riflettiamo: questa sensazione (di tendere al *realismo perfetto*, voglio dire) si basa su dati di tipo *empirico*. Chiediamoci però se, a prescindere dalle nostre realizzazioni tecnologiche – poiché alla fine di questo si tratta – ragionando più in profondità troveremo suffragio alla nostra percezione di poter padroneggiare tutto. A me pare di no e, se ci penso bene, scopro con grande scorno che, semmai, ci sono fondati presupposti perché avvenga il contrario. Provo a rendervi partecipi di queste mie cogitazioni (e non solo mie; si tratta di roba vecchia come il cucco).

Parto da un riassunto in due righe sui fondamenti della teoria dell'evoluzione biologica (non oso immaginare i commenti dei biologi nel leggere le affermazioni che seguiranno). Che Darwin e Mendel abbiano colto tutta la verità, o che ci siano ancora aspetti un po' oscuri e non del tutto trascurabili, è dibattuto che lascio volentieri agli specialisti del settore. Un esempio: Dawkins sostiene a spada tratta l'onniscienza della teoria darwiniana, mentre i seguaci di Jay Gould (lui, purtroppo, ci ha lasciati nel 2002) portano l'evidenza di alcune

transizioni troppo rapide perché siano spiegabili senza introdurre nuovi concetti fondamentali. Nel contesto che ci riguarda, comunque, importano solo la continuità e le mutazioni nel DNA di un essere vivente. Queste ultime, ci è stato insegnato, hanno tanta maggior probabilità di diffondersi tra le generazioni successive, quanto più siano in grado di aumentare la sopravvivenza e la capacità riproduttiva dell'essere medesimo. Esiste un termine preciso per indicare il vantaggio che una mutazione fornisce al suo portatore: in lingua inglese "*fitness*", in italiano "*valenza evolutiva*".

Scusandomi per come ho compendiato l'evoluzionismo, aggiungo ora un'altra informazione biologica molto importante. Il cervello ha, rispetto al resto del corpo, un consumo metabolico sproporzionato. E non chiedetemi perché; non lo so. Per gli esseri umani, in particolare, la massa cerebrale è circa 1,3 – 1,4 kg, a fronte dei settantacinque chili (in media; io non conto, peso troppo) dell'intero organismo. Ebbene: questo 2% scarso del nostro corpo consuma ben il 25 – 30% delle calorie del metabolismo di base.

Traiamo una conclusione immediata da queste cifre: un aumento, anche modesto, di capacità cerebrale tende a sovraccaricare (*inutilmente?*) tutte le altre funzioni corporee. In termini evolutivi classici: se la dimensione media del cervello è cresciuta di quasi tre volte passando dagli australopithecini a noi, le *valenze evolutive* corrispondenti devono essere state enormi, e *da subito*. Ora, non ditemi che l'intelligenza ci fornisce una supremazia indiscussa; questo lo so pure io, ma le cose non sono così semplici. Infatti, da una certa dimensione cerebrale in su l'intelligenza comincia a essere di sicuro un grosso vantaggio, ma questo traguardo non sembra immediato e automatico e, prima di arrivarci, il cervello deve essere già cresciuto un bel po', succhiando energie alle capacità di sviluppare strumenti di offesa o difesa dei nostri antenati.

Spazziamo via ogni possibile dubbio: non sto propugnando varianti del cosiddetto "Disegno intelligente", che è definito tale solo quando risponde ai canoni che sembrano intelligenti a noi. Voglio invece affermare quanto segue: questa rapida crescita del *nostro* cervello durante l'evoluzione (lo definisco *nostro*, anche se apparteneva ad antenati remoti), deve aver comportato sempre un reale, concreto aumento di valenza evolutiva, pure se ancora non siamo in grado di capire esattamente i dettagli del processo. C'è però un corollario a questo ragionamento. Ci sembra ragionevole (ma cos'è *ragionevole* in un terreno così minato?) escludere che ne siano cresciute regioni prive di utilità immediata, poiché altrimenti il costo biologico relativo si sarebbe espresso come un peso morto per gli altri sistemi vitali, comportando una diminuzione complessiva della valenza evolutiva.

Con queste premesse, concentriamoci ora sui concetti di spazio e tempo, e domandiamoci quali mutazioni cerebrali finalizzate alla loro comprensione sarebbero state utili, e quindi da fissare, quali inutili, e da eliminare. Cominciamo dallo spazio, ricordando che non dobbiamo focalizzarci tanto sulla capacità di *vedere* in senso stretto (lì possono anche esistere problemi connessi alla struttura dell'occhio), quanto piuttosto a quella di *raffigurarci intellettualmente* ciò che vediamo.

Partiamo dagli oggetti di piccole dimensioni: tra i nostri parenti scimmieschi, la reciproca cura del pelo è un importante elemento di socializzazione. Sarà stato così anche per i nostri antenati, specie considerando che socializzare è senz'altro un'attività che genera grande valenza evolutiva, come provano innumerevoli casi nel mondo animale. Ora: su cosa ci si sofferma durante l'esame di una pelliccia? Sui peli stessi, tanto per cominciare, e su

oggetti di piccola dimensione ad essi attaccati. Granellini, pagliuzze, parassiti e così via. Roba delle dimensioni di un capello o giù di lì.

Per i nostri antenati, insomma, sarebbe stato assolutamente inutile raffigurarsi eventuali “cose” in senso lato aventi dimensioni inferiori, pure supponendo che l’occhio l’avesse consentito. Di conseguenza, poniamo un limite inferiore attorno al decimo di millimetro alle distanze che è evolutivamente utile *comprendere*. Più piccolo di così non serve, e mettiamoci il punto.

Allora, però – ed ecco che sorge la prima domanda –: qualora Madre natura si comportasse, a scale di lunghezza molto più piccole, in modo radicalmente diverso rispetto a ciò che vediamo e comprendiamo dal capello in su (e lo fa, siete avvisati, come vedremo nella Sezione III), il nostro cervello sarebbe ancora adeguato a formarsi una raffigurazione intuitiva, magari basata sui canoni del *realismo assoluto* che sembrano suggerirci i nostri sensi? Non lo sappiamo, e non possiamo escludere a priori un’eventuale difficoltà, magari anche insormontabile, nel trattare questi ipotetici fenomeni microscopici. Forse il cervello ce la farebbe, forse no; semplicemente, non possiamo dirlo a priori.

E adesso passiamo all’altro opposto, ciò che è spazialmente molto grande. Parlando delle dimensioni dell’UC, mi sono lasciato già scappare un concetto: la distanza maggiore che siamo in grado di raffigurarci intellettualmente è all’incirca di qualche chilometro. Ripresentando questo punto fermo, immagino di sollevare un mare di proteste: la nostra esperienza è tale per cui ci basta salire su una montagna neanche tanto alta e, in una giornata limpida, possiamo vedere un orizzonte molto lontano; 10, 20 km, fino al centinaio e più. Dall’Aguille du Midi, raggiungibile con la funivia del Monte Bianco, si scorgono le montagne del Giura e molto oltre, fino alle pianure della Francia centrale. E siamo convinti di *comprendere* questa distanza, non vi pare?

Ebbene: permettetemi di dubitarne. Correndo, un chilometro è nelle nostre gambe in pochi minuti, e non abbiamo difficoltà a ricordare eventuali marcatori di percorso (oggetti qualsiasi), con la loro posizione e distanza relative. Oltre il chilometro, il gioco si fa più duro. In primo luogo, non tutti sono capaci di partecipare a una maratona senza allenamento specifico, e quindi ci vuole più tempo, a percorrere i chilometri successivi, fino a cadere spossati dopo cinque o sei...

Qui torno ai tempi remoti: di sicuro, per i nostri antenati, un panorama esteso fino a grandi distanze era intelligibile più facilmente pensando al tempo necessario per percorrerlo, che non alla pura e semplice lunghezza del tragitto. Loro – come potenzialmente pure noi – erano buoni camminatori, non si spaventavano di fronte a diversi giorni di peregrinazione se avevano in mente un obiettivo concreto, come un pascolo di animali da preda e così via. Vedendo una foresta dall’alto del monte, tendevano a valutarla in termini di numero di giorni necessari ad attraversarla, e perfino gli *escursionisti estremi* di adesso fanno la stessa cosa.

Ora che ve ne ho parlato, provate anche voi a ripensarci: non è vero che tendiamo a pensare alle lunghe distanze in termini di tempi necessari a percorrerle? Da Milano a Roma, per autostrada, sono cinque ore, mentre il treno ad alta velocità riduce i tempi a due ore o poco più. Quaranta minuti di aereo, ma poi bisogna aggiungere i tempi da e per l’aeroporto. In fin dei conti, se non ci fossero i cartelli sull’autostrada, ci sarebbe mai venuto in mente di pensare in termini di 550 km, se non per tradurli in ore di viaggio data la nostra velocità di guida? Se

le cose non andassero in questo modo, perché ci siamo trovati più a nostro agio nel misurare le distanze nel Sistema solare (interno) in termini di tempi di percorrenza?

Comunque, se proprio ci tenete a mantenere il punto, vi concedo senza difficoltà che il nostro cervello sappia gestire il concetto di *lunghezza* in senso lato fino a un centinaio di chilometri, qualcosa in più, qualcosa in meno. E oltre questo valore? Sarebbe stato di qualche utilità ai nostri antenati raffigurarsi anni-luce a miliardi? Suppongo di no. Ecco, infatti, il limite superiore: se Madre natura fosse così maliziosa da deviare, su scale di distanza grandi, molto maggiori del centinaio di chilometri, rispetto al consueto realismo assoluto dei nostri sensi (fa pure questo, come vedremo nella Sezione II), perché mai il cervello dovrebbe aver sviluppato meccanismi in grado di gestire queste deviazioni rispetto al puro e semplice responso dell'occhio?

Ci stiamo avviando per una brutta strada! In sostanza, l'intervallo spaziale che possiamo considerare alla portata della nostra intuizione immediata non supera le nove decadi (vale a dire un miliardo di volte, poiché  $10^9$  è, per l'appunto, un miliardo), dallo spessore di un capello ai **100** km. Le dimensioni di un nucleo atomico, però, sono undici decadi (cento miliardi di volte, e cioè  $10^{11}$ ) più piccole dello spessore del capello, e la dimensione del solo Sistema solare è, a sua volta, undici decadi (circa **10.000** miliardi di km, ovvero  $10^{11}$  volte i famigerati cento chilometri) maggiore della massima distanza ancora da noi visualizzabile in termini pratici. Che dire, poi, del raggio dell'intero UC? Esso supera di  $10^{21}$  volte i limiti di comprensione intuitiva che le leggi di natura hanno imposto alla nostra evoluzione cerebrale.

In sintesi: qualora esistessero fenomeni diversi da quelli da noi percepiti a distanze mostruosamente piccole e spaventosamente grandi, sarebbe *davvero* possibile comprenderli? Forse sì, forse no. E, soprattutto, questi fenomeni esistono sul serio, o sto solo menando il can per l'aia? Esistono, purtroppo o per fortuna. Purtroppo, perché non sono per niente intuitivi, e per fortuna, perché ampliano enormemente la ricchezza di Madre natura. Oltre a rendere possibile la nostra esistenza, per quanto ciò possa sembrarci strano.

Resta da dire qualcosa sui tempi, ma qui ci aiuteremo con le velocità, che sono in stretta relazione con i tempi stessi. Di quali velocità devono preoccuparsi i nostri cervelli? Se io vivessi nella savana, avrei il terrore dei leopardi e dei ghepardi, perché possono giungere, nel momento dello scatto, a oltre **100** km/h. Mi metterei a ragionare sui **300.000** km/s della velocità della luce, che sono **10** milioni di volte tanto? Difficilmente, credo. E badate: non ho parlato di *forze di gravità*, ma solo per pura compassione. Ne vedremo delle belle, nella Sezione II. *Et de hoc satis*. Ci siamo immersi in un bagno d'umiltà, riconoscendo la limitatezza delle nostre capacità cerebrali.

Adesso, però, non stiamo a piangerci addosso. Sarà pure vero che l'evoluzione non ci ha dotato di un *hardware* adeguato a intendere la *realtà* sottostante l'enormemente piccolo, grande, veloce, ma che dire del *software*? Molti esperti di computer sanno bene che, a volte, dove l'hardware non arriva, può giungere un software particolarmente furbo. Niente niente, il nostro cervello...

## 4.2) – Da uno a infinito

Questa sezione vi sarà di conforto o, per lo meno, dovrebbe esserlo. Desidero, infatti, correggere in parte la sensazione d'impotenza che potrebbe aver suscitato nel lettore la sezione precedente, nella quale gli sono stati forniti buoni motivi per sospettare che gli esseri umani non saranno mai in grado di capire come funziona l'universo *in realtà*, qualunque sia il significato che vogliamo assegnare a questa dicitura così controversa.

Dovremmo dedurre che il nostro Modello giocattolo non sarà mai in grado di correre sui binari? Tranquilli: correrà, eccome! Vedremo, anzi, in che modo, specie con l'aiuto di quella specie di super microscopio che, come già sappiamo, si chiama **LHC** e si trova a Ginevra, sta diventando possibile sbirciare situazioni che hanno avuto luogo immediatamente dopo il Big Bang, nell'epoca in cui tutto ciò che oggi è contenuto nell'UC era compresso in un volume piccolissimo.

Come dite? Volete una cifra almeno approssimativa per questo volumetto? Datemi retta, evitiamo di pretendere troppa precisione e diciamo piuttosto così: se expandessimo un atomo – sto parlando di un atomo solo, che ha una dimensione di un decimiliardesimo di cm – fino alle dimensioni del nostro UC di oggi, il volumetto cui facevo prima cenno si gonfierebbe, in proporzione, fino alle dimensioni di... di... ebbene, lo ammetto; anche i cosmologi litigano sui numeri. C'è chi dice che diventerebbe non più grande di un elefante, chi ritiene più ragionevole fargli assumere le dimensioni della Terra, chi spara molto grosso e arriva – ma si tratta proprio di un limite superiore – all'orbita della Luna. Il che, se pure fosse, resta infinitesimo rispetto all'UC, e ne abbiamo ben discusso nel capitolo precedente. Sono tutte considerazioni preliminari alla promessa di aprire uno spiraglio, ma uno spiraglio solo, intendiamoci, sui primissimi istanti di vita dell'universo, da trattare nelle Sezioni III e specialmente IV. Contenti?

Il lettore potrebbe giustamente cominciare a essere confuso. Non avevamo appena insistito sulla probabile, anzi quasi certa, incapacità del cervello umano, per ovvi motivi di evoluzione biologica, a raffigurarsi intuitivamente gli eventi che si collocano nei regni del grandissimo, del piccolissimo, del velocissimo e, fatemi aggiungere, del *pesantissimo*, che sarà necessario esplorare se vorremo vedere la locomotiva giocattolo cominciare a marciare più spedita?

Ebbene: già sapendo come va a finire la storia, io non mi preoccuperei più di tanto. Questo manuale per il montaggio del Modello d'universo guiderà passo passo il cosmologo amatoriale. Se egli avrà la pazienza di seguire un corollario della popolarissima legge di Murphy (“Quando tutto il resto fallisce, leggere le istruzioni”) senza saltare da una parte all'altra, otterrà risultati eccellenti, in barba all'evoluzione e a Darwin (il quale, giustappunto, esibiva una barba considerevole e molto vittoriana).

Una prima ragione per non doverci spaventare nell'affrontare l'enormemente piccolo potrebbe essere di natura filosofica, e a me pare abbastanza convincente. Si tratta di questo: la natura non dà l'impressione di comportarsi come un insieme infinito di *matrioske* per cui, aperta una se ne troverà dentro sempre un'altra, e poi un'altra ancora. Ci sono i corpi solidi, e sappiamo che sono costituiti di molecole, le quali sono composte di atomi, dove troviamo elettroni e nuclei, nei quali ultimi ci sono protoni e neutroni, che a loro volta... per decenni è

stato in voga pensare in questo modo ma, da un po' di tempo, i fisici sembrano aver maturato la convinzione, basata su argomenti piuttosto concreti, di aver raggiunto le unità fondamentali componendo le quali Madre natura costruisce tutto il cosmo.

Va da sé che questo è un discorso da prendersi con le pinze: si potrebbe riempire una biblioteca con i “*distinguo*”, e alcuni ne tratteremo anche noi, ma la sensazione di riuscire a intravedere un brandello del *livello ultimo* è forte. Per ora non aggiungo altre considerazioni sull'argomento, ma a questo punto, per lo meno, il lettore ha capito che non dovrà affrontare una vertiginosa discesa verso l'*infinitamente* piccolo. Verso il *molto* piccolo sì, certo, ma penso siamo tutti convinti che tra *molto* e *infinito* ci sia una bella differenza, diamine!

Di tipo completamente diverso è il secondo motivo che mi spinge a esortare il lettore a non spaventarsi più di tanto. È vero: dovrà cimentarsi con idee che gli parranno strambe, e dal prossimo capitolo cominceremo a sfiorare uno degli oceani più esoterici in cui sguazza la natura (e le altre Sezioni scenderanno nelle profondità di questo oceano), ma non bisogna dimenticarsi che è passato oltre un secolo da quando i pionieri cominciarono a esplorare la *terra incognita* o, se si preferisce, a pescare nel torbido.

I primi tentativi di divulgazione scientifica delle nuove idee furono catastrofici, perfino quando ci si misero nientemeno che Albert Einstein e Bertrand Russell, ma anche la divulgazione rientra a buon diritto nella scienza, e ogni generazione costruisce sui successi e sugli errori di quelle precedenti. Non siamo più all'epoca in cui l'astrofisico Arthur Eddington rimaneva sorpreso quando gli chiedevano se lui fosse una delle tre sole persone in grado di capire la Relatività generale e, la sua risposta era: «A parte me stesso e Einstein, non mi viene in mente nessun altro in grado di capirla!». Oggi, almeno a livello d'intuizione, chiunque è in grado di rifletterci e...

Un momento: “Rifletterci e...” entro certi limiti. Cos'è un Modello mentale? Ne abbiamo parlato fino alla nausea: è l'equivalente di una locomotiva giocattolo. Funziona, ma non la possiamo far correre sulla Transiberiana. Il Modello mentale è niente meno e niente più di quanto afferma di essere: un'immagine semplificata della natura, costruita allo scopo di cogliere un singolo aspetto del problema, e solo quello. Non va confuso con la *realtà*, senno si frantuma in pezzi. Il lettore ci si potrà divertire e giocare d'intuito fin dove possibile, senza pretendere di aver inteso tutto, e senza cominciare a strepitare che, perciò, «Einstein non ha capito niente! So io come vanno le cose, ah!».

Sto arrivando con cautela alla terza, e fondamentale, delle ragioni per cui il “Gran libro della natura” di galileiana memoria potrebbe non essere del tutto inintelligibile a noi, poveri mortali. La cautela è d'obbligo per non spaventare il lettore, ma anche per un altro motivo. Infatti, questo famigerato Gran libro, scritto in una lingua a noi sconosciuta e parzialmente incomprensibile, in caratteri altrettanto ostici, sta pian piano rivelando le sue meraviglie, laddove ci si sarebbe potuti – e forse anche dovuti – aspettare che esso rimanesse per sempre precluso alla nostra comprensione.

Per me, questa semplice constatazione ha sempre contenuto un po' di mistero. E badate: l'aura arcana cui sto accennando si manifesta sia con non addetti ai lavori, sia quando si tratta di esperti. Sto così introducendo la regina della festa, la matematica. Ve la presento con una frase scritta verso la metà dell'800 dal matematico tedesco Kronecker: «*Dio ha creato i numeri naturali, tutto il resto è opera dell'uomo*».

In effetti, la matematica parte dal semplice conteggio degli oggetti reali, sassolini, conchiglie, cinghiali uccisi, anfore vendute, sicli d'oro pagati, colpi di frusta comminati, voti favorevoli e contrari, colonne e cattedrali innalzate, fanti e balestrieri, cannoni e così via, fino a tempi più moderni e civili. Tempi nei quali si discute di *migliaia* di euro (arrotondati) pretesi ingiustamente dall'Ufficio delle Imposte, e modulo di *settantaquattro* pagine con Supplica Alla Soave Benignità Di Codesto Magnanimo Ufficio affinché annulli l'intimazione di pagamento, corredata di *cinquantadue* firme e *diciassette* marche da bollo irreperibili dal tabaccaio – tutti numeri *naturali*, cioè interi positivi. Il rimanente, fino alle astrusità della matematica contemporanea, lo abbiamo inventato noi, esseri umani. E sono bruscolini rispetto a quello che riesce a inventarsi l'Ufficio delle Imposte col quale – il lettore l'avrà forse intuito – l'Autore non ha un buon rapporto, da quando l'Ufficio suddetto ha cominciato a pretendere di recuperare tutta l'evasione fiscale sulla pelle dei pensionati della Previdenza Sociale (!?!?!?).

Di conseguenza, la matematica rientra nelle capacità dei nostri cervelli, qualunque siano i limiti evolutivi di cui questi ultimi soffrono. Ed ecco qui, meraviglia delle meraviglie, che avviene il miracolo. Per quanto esoteriche e ripugnanti all'intuizione possano presentarsi le leggi di natura ai livelli estremi, la matematica le padroneggia, le mette in riga e le fa giostrare a proprio piacimento. Ammettetelo: è strano. Un parto della mente umana, che dovrebbe soffrire di tutte le limitazioni dell'intuizione, riesce (almeno finora) a imbrigliare ogni machiavello che la grande manipolatrice, Madre natura, sia stata in grado di escogitare. Il “mistero” che meravigliava Einstein e molti altri scienziati: il fatto che la natura sia *comprensibile*, almeno in senso lato.

Insisto, perché mi farebbe piacere che il lettore si chiedesse (a suo esclusivo vantaggio) come può avvenire che la matematica, nata dall'esigenza utilitaristica di prendere atto che quattro mele sono meglio di tre, sia ormai giunta alla descrizione di universi *differenti dal nostro*. Luoghi in cui le curve si allungano quando si accorciano, le figure geometriche possono avere quattro, cinque, dieci, ventiquattro, infinite dimensioni (provate a immaginarle intuitivamente e, se ci riuscite, telefonate al Centro d'igiene mentale perché vengano a prendervi prima che combinate qualche sproposito), e altre bazzecole del genere.

Forse, il nostro cervello possiede una “marcia in più” rispetto alla natura? Sta di fatto che riesce a manipolarla in modo efficace anche nel momento in cui non la *comprende* fino in fondo, perché ci costruisce la tecnologia. Un esempio. Feynman, uno dei più importanti fisici del XX secolo, all'inizio del corso di Meccanica quantistica avvertiva i propri studenti: «Attenzione; se un giorno, approfondendo gli argomenti trattati nel corso, cominciate a rendervi conto che capite la Meccanica quantistica, correte ad avvertirmi perché vuol dire che qualcosa non va. Infatti, non la capisco neanche io perché non è possibile».

Eppure, tutta l'elettronica moderna (e il computer per mezzo del quale avete scaricato questo libro), è basata sulla *coesistenza in due luoghi differenti di un unico oggetto* (un elettrone, nella fattispecie). Si dice che Sant'Antonio da Padova avesse il dono dell'ubiquità; al livello quantistico tutte le particelle lo possiedono, ma sappiamo lo stesso farci sopra i conti giusti, e utilizzarlo per i nostri scopi.

Simpatizzo col lettore, poco versato nell'alchimia dei simboli, quando vede questa scienza come un mistero da tenere il più possibile relegato nelle aule universitarie. Ma il problema non è affatto nella matematica, bensì nella logica e spero, con la mia breve

prolusione, di avergli messo una pulce nell'orecchio per quanto riguarda la *vera natura* del lato arcano del cosmo.

Esso non è celato ad arte dai geroglifici e dagli orpelli matematici di cui si ammanta (quelli, come vi dissi prima, s'imparano con un po' di pratica, e alla fine si leggono di corsa, così come un musicista scorre velocemente uno spartito), ma da una domanda fondamentale cui non sanno rispondere neppure i più esperti manipolatori algebrici. E la domanda è semplicissima da intendere, così come ve la metto qui di seguito: "Per quale motivo, grazie alla matematica, è possibile costruire *Modelli apparentemente esatti* anche per il meno intuitivo dei giochi di natura, al punto di riuscire a prevedere l'esito di un esperimento prima ancora di averlo eseguito e, soprattutto, *senza aver capito davvero come funziona il gioco?*".

Inciso. S'intende: tutta una scuola di fisici, nella scia di Mach, urla e strepita quando sente cose del genere, ma mi assumo la responsabilità di affermare che possono urlare quanto vogliono; hanno torto marcio e basta. Fine dell'inciso.

Quando ci penso seriamente mi vengono i brividi, e non ho una risposta. Questa benedetta matematica è davvero solo un parto del nostro cervello e nulla di più? Forse, ma in questo caso perché riesce a trattare senza difficoltà anche ciò che il cervello medesimo non riesce neppure a intuire? Oppure dobbiamo concludere, con un certo gruzzoletto di matematici moderni, che il mondo delle idee e delle forme perfette di cui disquisiva Platone sia davvero una *realtà*, e la matematica rappresenti l'interfaccia tra noi e questo fantomatico mondo? Affermazione che a me non piace e che non capisco: se così fosse, *dov'è* questo mondo delle idee, poiché non lo vediamo, ma riusciamo lo stesso ad attingervi a piene mani?

Posta in questi termini, la questione mi ricorda, alla lontana, il dilemma dell'interazione tra corpo e anima dell'epoca di Cartesio. Interrogato su quale fosse il canale attraverso il quale il mondo materiale riesce a comunicare con quello spirituale, il filosofo-scienziato se la cavava con una risposta sibillina: «Attraverso la ghiandola pineale». È un modo di procedere errato che sottopongo all'attenzione del lettore, affinché egli abbia uno strumento di ragionamento in più: Cartesio tentava di spiegare un mistero con un altro. A quei tempi, infatti, nulla si sapeva ancora del funzionamento della ghiandola pineale; se ne conosceva appena l'esistenza. Oggi il funzionamento della ghiandola pineale è ben chiarito, e vi assicuro: non ha nulla a che fare con fenomeni metafisici.

Lettore, permettimi d'insistere ancora un po'. Pensa a quella disciplina esoterica, meravigliosa e onnicomprensiva che risponde al mirifico nome di *fantarcheologia*. Come funziona? Semplice: si prendono due fatti del tutto eterogenei, non ancora ben compresi o intrinsecamente privi di significato (un ghirigoro in un geroglifico Maya e la dislocazione geografica di un certo numero di cime nella catena del Karakorum), e si pretende che ciascuno rappresenti la *spiegazione* dell'altro, facendo passare il tutto per Atlantide, le Piramidi, un vaso ateniese trovato in Cina, i canti popolari dell'uomo di Neanderthal e chi più ne ha più ne metta. Questo modo di procedere non è scientifico, eppure la straordinaria potenza della matematica spinge perfino gli scienziati più smaliziati a istituire, ogni tanto, paralleli che esorbitano dai limiti della scienza.

Ecco: ho parlato di matematica e tra i miei diciannove lettori (uno se n'è già perso per strada) c'è il fuggi fuggi generale. No: non si pretende che comincino a manipolare la matematica per andare avanti nei prossimi capitoli. Anzi, c'è da stare ancora più tranquilli perché altri l'hanno già usata, e si può beneficiare dei loro risultati senza alcuno sforzo. Al

massimo, questo *sfasamento* apparente nelle nostre capacità di comprensione potrà considerarsi una prima apertura verso il mistero. In ogni caso, per capire quanto vado a raccontarvi basterà l'aritmetica delle elementari, sul tipo di quella usata nel capitolo precedente per illustrare il paradosso di Olbers; niente di più.

## 4.3) – E adesso, un po' di zoologia

Nel 1882, il rev. Edwin Abbott pubblicò (sotto anonimato) un libriccino dal titolo “**Flatlandia**”. In esso s’ipotizzava un mondo strettamente bidimensionale, popolato da esseri *umani* aventi forma poligonale. Il protagonista, dal nome “A. Square” è, neanche a dirlo, un quadrato. Poiché il racconto voleva essere una satira sociale dei tempi di allora, Abbott immaginò che il livello sociale di ogni membro di questa società fosse proporzionale al numero dei suoi lati. Le donne erano tutte triangolari, e a volte con angoli molto aguzzi e pungenti mentre, all’estremo opposto, i membri del clero erano circonferenze, e quindi possedevano infiniti lati. Il nostro A. Square si applicava per diventare pentagono, e così via. Ne vennero fuori innumerevoli esegesi matematiche e socioeconomiche ma non sono queste a interessarci. Dirò solo che una delle definizioni per questi ipotetici abitanti del mondo *piano* di Flatlandia è: “**Pianimali**”.

Perché ne parlo? I motivi sono molti e questo primo incontro ci verrà buono più avanti, ma ora me ne servirò per mostrare al lettore, con un esempio concreto, cosa intendo dire quando affermo che potrà capire, ma non del tutto. Altrimenti una minaccia del genere, nel migliore dei casi, lascia il tempo che trova e, per alcuni, potrebbe addirittura essere indisponente anzi che no. Di conseguenza, prima di addentrarmi nei meandri del *quasi incomprensibile, ma non del tutto*, giocherò un po’ con i pianimali, partendo da zero come di solito, per lasciare a ciascuno l’agio di prendere confidenza con i concetti.

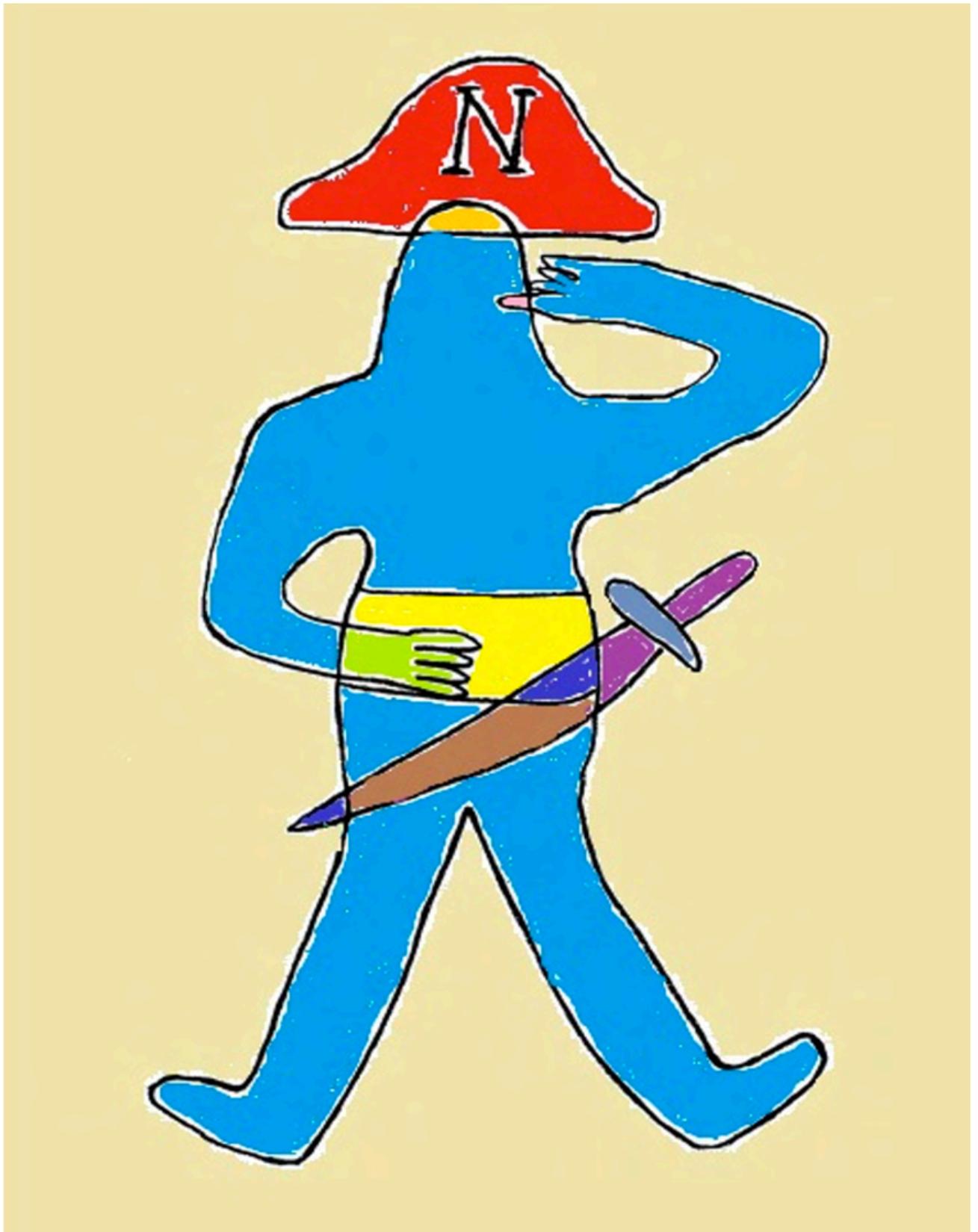
Il nostro mondo, l’unico che conosciamo, è a tre dimensioni. Sulla superficie terrestre possiamo spostarci verso Nord e verso Sud; verso Est e verso Ovest e, con un po’ di fatica, verso l’alto e verso il basso. Ancora: non occorre aver studiato geometria per aver chiaro in mente il concetto di *solido geometrico* dotato di larghezza, lunghezza e profondità. Bisogna, però, fissare un attimo le idee, se vogliamo trattare senza errori concettuali il mondo a due sole dimensioni. Infatti, non esistono in natura oggetti bidimensionali in senso stretto. La più sottile lamina d’oro (una cinquantina d’atomi di spessore, tanto vero che è quasi trasparente) possiede comunque una sua modesta profondità; impilandone abbastanza – e ne servono proprio tante – se ne forma un bel lingotto a tre dimensioni. Meglio si riesce a fare con il “*Grafene*” e, al momento, pochissimi altri composti che nel breve volgere di qualche decennio dovrebbero costituire la base della nuovissima generazione di computer; spessore: una molecola sola!

Invece, noi vogliamo supporre che un normale foglio di carta su cui disegnare sia veramente *liscio*, senza spessore, bidimensionale e basta, e qui si richiede un minimo di astrazione. In ogni caso, ora ci abbiamo fatto mente locale e abbiamo capito che bisogna trascurare lo spessore, foss’anche di una sola pellicola atomica. Se abbiamo accettato questo presupposto il gioco è fatto, e possiamo cominciare a ragionare sul mondo dei pianimali.



**Figura 4.1**

Prendiamo un foglio formato **A4** (ipoteticamente senza spessore), una matita e una gomma. Non serve altro per lavorare, perché il foglio rappresenta l'intero universo per i pianimali che ci vivono sopra. In Figura 4.1 abbiamo il nostro *pianimale di riferimento*, quello con cui interagiranno a varie riprese. È stortignaccolo, ma non è colpa sua, poveretto. L'unica cosa importante da notare è che, in lui, non ci sono linee che s'incrociano. Vale a dire: si trova tutto su un medesimo piano, e non sporge dal foglio neanche per una quantità infinitesima. Chiaro, fin qui?



**Figura 4.2**

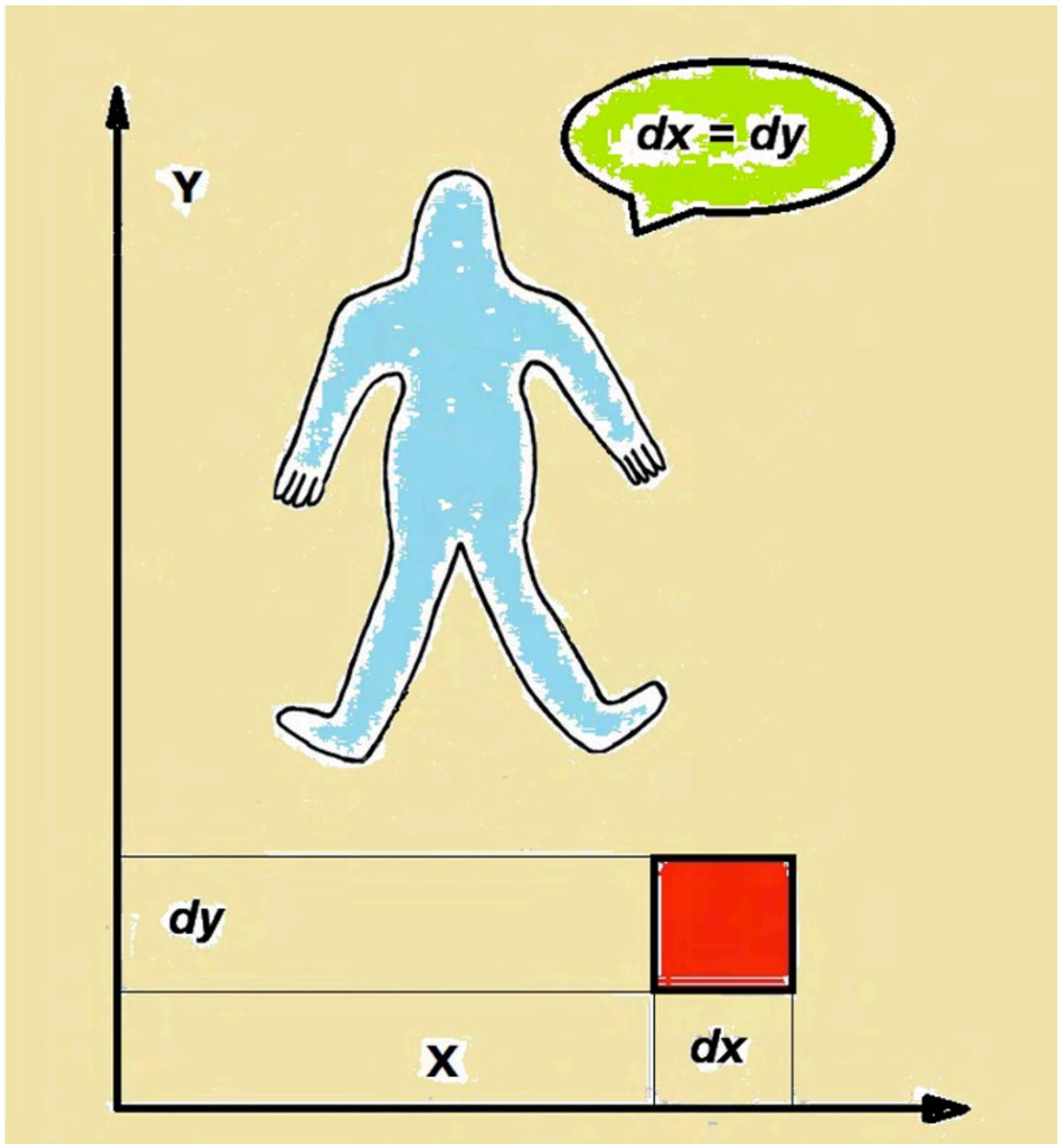
Come controprova, e nel tentativo di capirci davvero bene una volta per tutte, disegno, in Figura 4.2, uno strano “*Pianimperatore*” con feluca e sciabola. Attenzione: è un pianimale vero? No!

La necessità di tenere la mano sul duodeno e il mignolo nell’orecchio, più il bordo della feluca che si sovrappone alla testa e la sciabola che passa davanti al corpo, fa intuire che l’animale in questione deve svolgersi su diversi piani, magari sottilissimi, ma comunque sporgendo un po’ nella terza dimensione. Di conseguenza, non è un pianimale, e questi ultimi possono continuare a mantenersi repubblicani. Ora soffiemo sullo scarabocchio di Figura 4.1 per infondergli vita (lavorare con la fantasia non è impegnativo) ed ecco il nostro “*pianimale domestico*”.

Essendo curioso come noi, comincia subito a interessarsi di cosmologia, ed esplora il suo universo fino ai bordi del foglio, senza però poterne uscire. Giunge alla conclusione di abitare in uno spazio finito e limitato, e che bisogna studiare la geometria di questo spazio. E qui torno sulla caratteristica fondamentale del pianimale: essendo bidimensionale, non può in alcun modo sollevarsi dal foglio di carta e uscire nel nostro spazio tridimensionale. Noi possiamo accartocciare il foglio, sbandierarlo fuori del finestrino dell’auto in corsa, ma dal punto di vista di chi ci vive sopra, tutto ciò si tradurrà solo nell’improvvisa apparsa di *orizzonti* variabili che impediscono a tratti la visuale dell’intero universo, e di conseguenza complicano pure lo studio della geometria cosmica, perché altro è lavorare su un piano, altro se il mondo è appallottolato. Per il resto, pure se il foglio è sbandierato nella terza dimensione, il pianimale seguita a muoversi sempre e solo sulla superficie, e non percepisce *fisicamente* le sue eventuali spigolosità se non come... vedremo.

Domanda: allora possiamo pensarlo come un vecchio cartone animato bidimensionale? Neanche questo. Il pianimale possiede più vincoli, è più limitato. In un cartone, anche in quelli antichi, il mondo si supponeva comunque a tre dimensioni: c’era una profondità simulata per mezzo di prospettiva e ombreggiatura, e un oggetto poteva passare davanti a un altro senza problemi. Nell’universo bidimensionale ai cui misteri stiamo introducendo il lettore, questa possibilità è preclusa.

Ragioniamo: due pianimali sullo stesso foglio possono passarsi uno di fronte all’altro? No, perché per riuscirci, uno di essi dovrebbe sollevarsi, magari di una quantità infinitesima, ma comunque nella terza dimensione che invece, sul piano, non esiste. Ogni sovrapposizione di linee si tradurrebbe in un’evasione nella terza dimensione, e dunque i due pianimali potranno solo *girarsi attorno*. L’analogia col mondo tridimensionale è ovvia, se ci pensiamo un attimo: due persone non possono attraversarsi a vicenda. Solo i fantasmi ci riescono, ma i nostri pianimali li vogliamo vivi e vegeti.



**Figura 4.3**

Ora il lettore ha capito il concetto, ma forse non è ancora chiaro per lui il motivo che mi ha condotto a introdurre questa strana specie zoologica. Arrivo al punto, cominciando a chiedermi se un pianimale sarebbe in grado di capire la geometria euclidea. La risposta è affermativa, specie mantenendo il foglio liscio, appiccicato a una bacheca su una delle pareti

del nostro studio, tanto per farci rallegrare dal fischiettare della bestiola mentre... non divaghiamo.

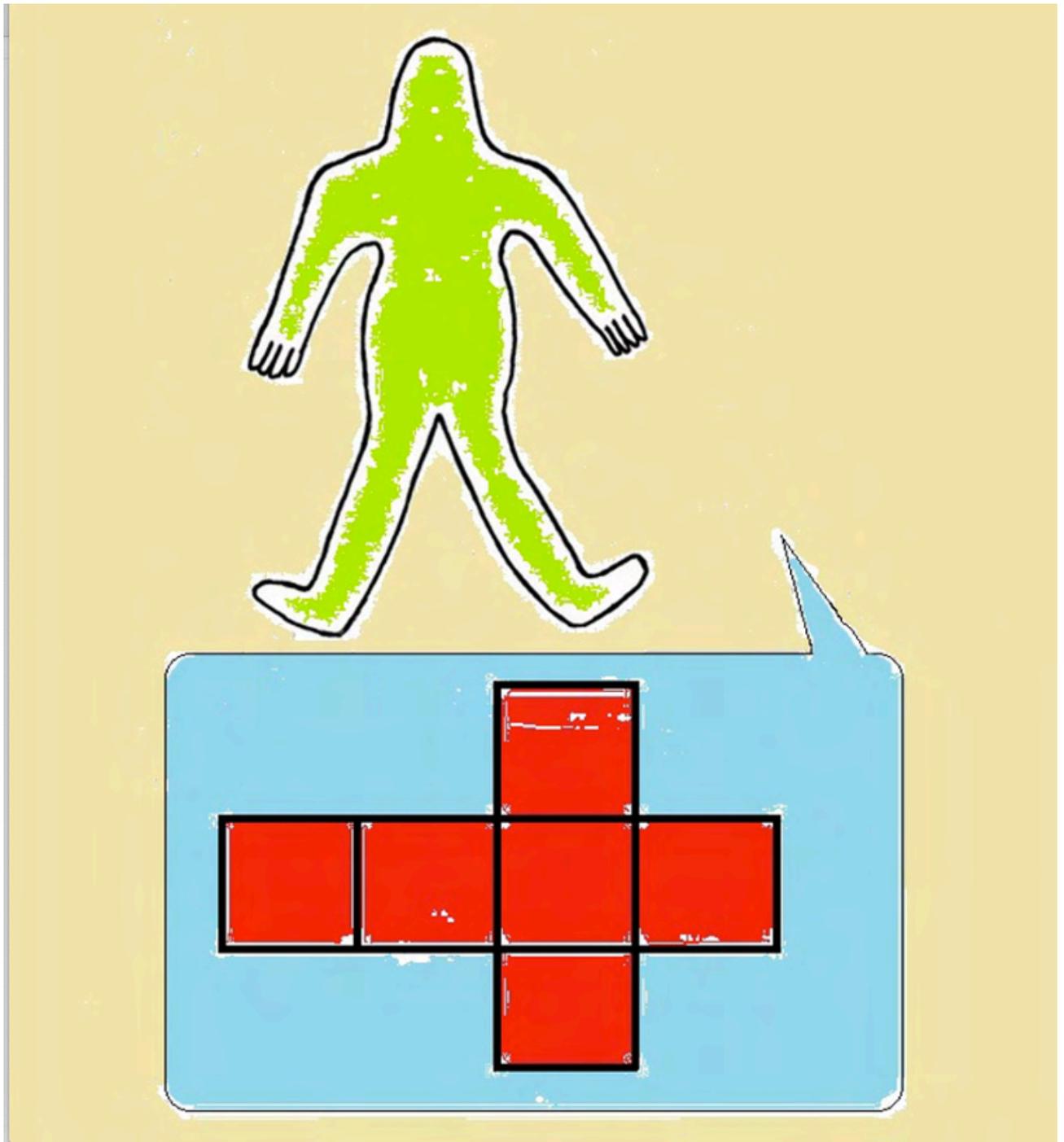
Suppongo che un pianimale curioso disegnerebbe quante figure vuole, anche se, una volta tracciata una poligonale chiusa, non riuscirebbe più a entrarvi, così come noi non possiamo ficcarci in un cubo solido. In Figura 4.3, per esempio, il pianimale osserva un quadrato, ma qui introduciamo il salto importante e ci chiediamo: la nostra bestiola potrebbe interessarsi anche di geometria a tre dimensioni, solida? La risposta è semplice: se ci fosse un *pianimatemat*ico, egli non troverebbe alcuna difficoltà a generalizzare, in uno spazio a più di due dimensioni, tutti i teoremi già in suo possesso.

Certo: non riuscirebbe in nessun modo a cogliere una semplice immagine mentale dei suoi costrutti algebrici, ma potrebbe sempre aggiungere un terzo, un quarto... infiniti assi al suo *iperspazio* (si chiama così) e calcolare le proprietà geometriche delle figure a più dimensioni.

Attenzione, lettore: così come il pianimale non può intuire le caratteristiche visuali di un oggetto a tre dimensioni, ma può lavorarci sopra per analogia, e dedurre con precisione assoluta le sue proprietà per mezzo della geometria, la comprensione intuitiva di un mondo a quattro dimensioni è a noi preclusa, ma nessuno ci impedisce di procedere sempre per analogia, e dedurre le proprietà. In fin dei conti, se il pianimale giungesse a concludere che non può esistere una geometria (e un mondo) a tre dimensioni solo perché lui non riesce a immaginarla chiaramente, sarebbe una sciocchezza, no?

E allora, perché noi non possiamo provare a sforzare un po' la nostra intuizione per *sfiurare* un mondo a quattro dimensioni? E qui portiamo un esempio: torniamo al *pianimatemat*ico che studia il cubo. Non può disegnarlo, ma sa che il suo volume (forse, anziché parlare di "volume", lui dirà: "*ipersuperficie*" perché, dal suo punto di vista, tutto ciò che va oltre la seconda dimensione è "*iper*", e la parola "volume" neanche lo sfiorerebbe) è uguale alla lunghezza dello spigolo elevata al cubo. Poi, sa pure che il cubo ha sei facce quadrate, a due dimensioni, per cui gli è possibile *aprirlo* e svilupparne la superficie totale sul suo piano come in Figura 4.4.

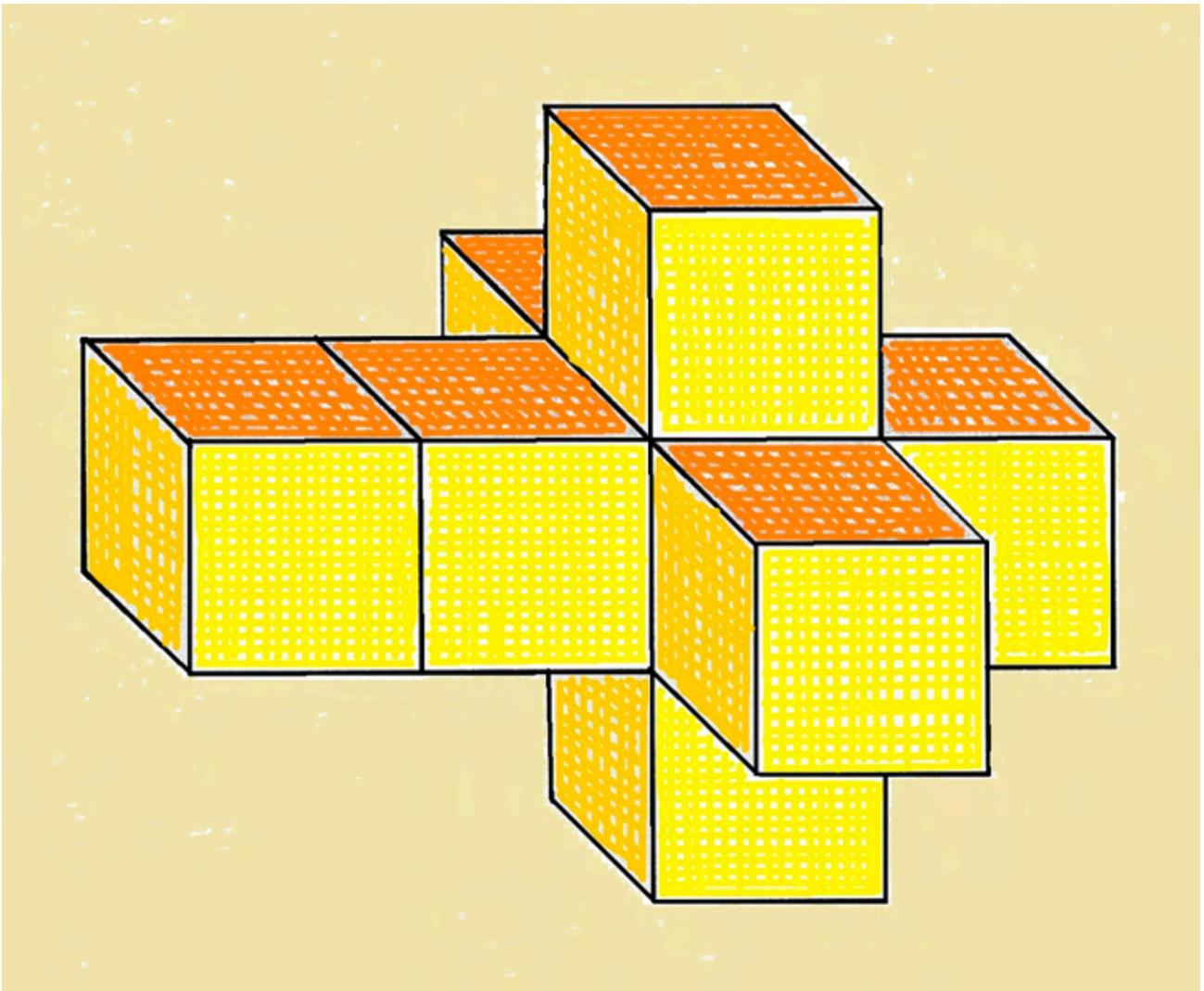
Ammettiamo pure: una rappresentazione del genere è ancora ben lontana dal poter *vedere* il cubo come lo vedremmo noi, pieno di ombre e luci (che il pianimale sa pure calcolare, ma non intuire), in tutta la sua ricchezza, magari su uno sfondo che possiamo immaginare a nostro piacimento. Però, il matematico bidimensionale potrebbe dedurre alcune proprietà geometriche del suo iperquadrato, che sono di certo molto diverse rispetto al povero quadrato che gli è familiare, e che sembrano contro intuitive. Non mi soffermo sulle proprietà del cubo, poiché ciascuno di noi le conosce (per esempio, uscendo da una superficie senza staccare il dito dal cubo, non si esce dal cubo ma si passa su una superficie adiacente, e così via). Volevo piuttosto notare che, seguitando con quest'analogia, per noi esseri tridimensionali



**Figura 4.4**

è lecito ragionare su un *ipercubo* a quattro dimensioni. Gli abbiamo perfino assegnato un nome: si chiama **tesseratto**. Non siamo in grado di vederlo col pensiero, ma la geometria ci dice quant'è il suo *ipervolume* (nient'altro che lo spigolo alla quarta potenza, e ciò non ci dovrebbe far meraviglia). Per di più, le sue *iperfacce* sono semplicemente otto cubi, e possiamo anche provare a *distenderle* in tre dimensioni, in analogia a come il pianimatemático

aveva *disteso* il cubo su due sole dimensioni. Il risultato di questa procedura un po' strana, ma che non è per nulla esoterica e ci pare poco canonica solo perché ancora non ci siamo abituati, è raffigurato in Figura 4.5.



**Figura 4.5**

E un bel raccontino di fantascienza ce lo ha scritto Robert Heinlein. S'intitola: "**La casa nuova**", dove s'immaginano le peripezie degli inquilini di una casa a forma di "*tesseratto disteso in tre dimensioni*" che, in seguito a un terremoto, collassa su se stesso e si compatta in un vero tesseratto a quattro dimensioni. È un po' angosciante ma divertente, e fa ragionare sulle proprietà di questo strano oggetto. Se vi capita di recuperarlo, magari su Internet, leggetelo senz'altro cercando di seguire bene le descrizioni, e vi accorgete di aver fatto un passetto in più nella comprensione di qualcosa che, in precedenza, vi sembrava del tutto inaccessibile.

Insomma: a questo punto il lettore dovrebbe aver capito cosa intendevo quando affermavo che, pur se una completa intuizione modellistica di alcune realtà ultime dell'universo gli sarà sempre preclusa, uno spiraglio attraverso il quale sbirciare qualcosa riuscirà comunque ad aprirlo. Il nostro cervello, magari, non è abituato a manipolare alcuni concetti ma, specie se qualcun altro l'ha già fatto per noi attraverso matematica e geometria, riusciremo comunque a dire qualcosina in più del semplice e brutale: «*Hic sunt æquationes!*».

Ora, prima di perfezionare il Modello di UC aggiungendo l'espansione, è indispensabile introdurre le due teorie della Relatività. Nel prossimo capitolo illustrerò le basi sperimentali – ancora ottocentesche – sulle quali Einstein poggiò la prima pietra e quindi, per l'espansione, arriverci alla Sezione II. In questa prima Sezione ci resta da aggiungere alcune considerazioni importanti sul progresso scientifico. Preghiamo il lettore di non trascurarle, anche perché da esse viene a noi il viatico per tutto il resto del libro.

## 5) – Nuvolette per il vecchio Kelvin

### 5.1) – Qualcosa deve per forza essere relativo

La Relatività, questa sconosciuta sulla bocca di tutti! Sapete come mi duole sentirla citare a sproposito a sostegno delle idee più strampalate, e non solo nel campo scientifico, ma in quello sociale e perfino etico! Vediamo un po' qual è stata la sua lunga gestazione. Di solito si pensa a Einstein, ma la Relatività è ben altro, e fu scoperta trecento anni prima, da quel Professorone pisano che abbiamo già tirato in ballo: Galileo Galilei. Infatti, la fisica nasce con la Relatività: senza di questa, non potrebbe esistere e basta; ve ne convincerete.

Galileo enunciò il concetto nel “Dialogo Sopra i Massimi Sistemi”, portando l'esempio di quanto avviene nella stiva di una nave che si muova di moto rettilineo uniforme e, dunque, senza scossoni. È una delle pagine più belle della letteratura italiana, e ogni libro di fisica che si rispetti la riporta, di solito tradotta in Inglese e, di qui, ritradotta in Italiano senza che il curatore del testo abbia avuto il buon senso di riprendere la fonte originale... Ora la proporrò, ripetendo le parole di Galileo stesso (il copyright è scaduto), e poi la trasporrò in termini più moderni e familiari.

*«Rinserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto in basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parete che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina oppure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo sull'orlo del vaso; e finalmente le*

*farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferente verso tutte le parti, né mai accadrà che si riduchino verso la parte che riguarda la poppa, quasi che fussino stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugoletta trattenersi, e indifferente muoversi non più verso questa che quella parte.»*

È bellissimo, no? Adesso ve la racconto io, ma non riuscirò a essere puntuale e chiaro come Galileo. Ci provo lo stesso.

Supponiamo, dunque, di giocare a biliardo su un tavolo liscio nei limiti del possibile, con le sponde perfettamente rigide e dritte e le biglie elastiche. In queste condizioni, un buon giocatore (non io) sa prevedere in modo ragionevole i primi tre o quattro rimbalzi. Affinché ciò sia possibile, ovviamente, il tavolo dovrà restare *fermissimo*, altrimenti non si riuscirà più a prevedere un bel nulla, e anche il più smaliziato campione mondiale butterà la stecca sul panno verde protestando a viva voce. Per questo motivo i tavoli da biliardo sono pesanti e gli astanti, di solito, evitano di dar loro scossoni – al contrario di quanto si usava con gli antichi *flipper* meccanici a palline. Di conseguenza, mentre si gioca il tavolo è immobile. Ci siamo fin qui? Oppure, poiché ci sto insistendo sopra oltre quel che il buon gusto sembrerebbe richiedere, ci viene in mente qualche motivo per cui il tavolo dovrebbe muoversi?

Accidenti se c'è! Abbiamo appena detto che il tavolo è poggiato sul suolo, magari inchiodato al pavimento. Stando così le cose, seguirà ogni movimento della superficie del nostro pianeta. Tanto per cominciare, la Terra ruota attorno al proprio asse in circa ventiquattro ore, e perciò la superficie cui il tavolo è vincolato si sposta a una velocità di circa mille km/h (varia con la latitudine, raggiungendo il massimo all'equatore dove è la bellezza di **1667** km/h). A noi sembra tutto fermo, perché ogni cosa si sposta solidalmente: non solo il tavolo, ma anche noi stessi, l'edificio, e perfino l'aria nella stanza e fuori. È l'equivoco su cui si giocò una parte del processo a Galileo: se la Terra ruota, come si spiega che non ci sia un vento che porta via tutto? La domanda era ben posta, in termini pre – relativistici, e Galileo non riuscì a convincere il Sant'ufficio della relatività del moto rettilineo uniforme, anche perché il processo si spostò su altri argomenti. Tra i quali spiccava la pretesa di Galileo d'interpretare liberamente le Scritture (in particolare il passo: “Fermati, o sole!”) in un'epoca in cui la Controriforma si accaniva contro questa procedura. Peccato: magari, se Galileo, invece di beffeggiare Urbano VIII trattandolo da “Simplicio”, lo avesse convinto della sua tesi sulla Relatività, la storia della scienza sarebbe stata diversa. O magari no, chissà?

Tornando a bomba, elenchiamo altri movimenti del tavolo da biliardo perché ce ne sono. La Terra ruota attorno al Sole, a circa **150** milioni di km di distanza, e impiega un anno per compiere un giro completo. A conti fatti, e tagliando i decimali, la velocità orbitale della Terra è circa **30** km/s. Un numero da ricordare, perché lo ritroveremo più avanti. E pure il tavolo da biliardo si muove a questa velocità fantastica. Già è tanto, ma non è ancora finita.

Anche il Sole, trascinandosi appresso l'intero Sistema solare, ruota attorno al centro della Galassia compiendo una rotazione completa in circa **225** milioni d'anni. A spanne, la sua velocità rispetto al centro della Via Lattea è circa **220** km/s. E la nostra stessa Galassia? Se prendiamo come *fermo* un particolare sistema di riferimento definito dalla radiazione di fondo emessa dal Big Bang (ne parleremo in abbondanza più avanti; per ora accontentatevi di quest'anticipazione), la Via Lattea si muove a circa **580** km/s rispetto a questo sistema.

Qui, però, stiamo entrando in un campo in cui bisogna ragionare più di fino; quanto possiamo dire con certezza, è che, rispetto a ciò che in prima battuta potremmo considerare lo “*spazio assoluto*” (pure se la definizione è impropria), il nostro tavolo si muove a una velocità di centinaia di km/s, enormemente superiore a quella di qualsiasi proiettile di arma da fuoco, e anche di qualsiasi sonda spaziale mai lanciata dalla NASA, dall’ESA, dalla Russia, dalla Cina e da chiunque altro. Eppure, a noi il tavolo sembra fermo. Pensandoci bene, non vi pare un po’ strano?

Se, in effetti, incontrate qualche difficoltà a credere che la vostra poltrona si muova a una velocità che, componendo in intensità, direzione e verso tutte quelle riportate sopra, va un po’ oltre i **580** km/s, vuol dire che vi trovate nella mentalità del Sant’ufficio di quei tempi, e che pure voi condannereste Galileo. Bisogna stare molto attenti a giudicare gli antichi con l’occhio smalzato dei posteri; la domanda giusta è: cos’avremmo fatto noi in quelle condizioni? Probabilmente, avremmo vissuto i *paradigmi* dell’epoca, mentre Galileo cercava di farci fare un passo avanti.

Abbiamo introdotto una prima *relatività* delle velocità delle biglie rispetto al tavolo da biliardo. Insistiamo sul concetto, spostandoci all’interno di un aereo in volo (l’equivalente moderno della nave di Galileo). Quest’ultimo è *fermo* rispetto a noi, e la tazzina di caffè posata sul tavolino ribaltabile non si rovescia, almeno finché non s’incontra turbolenza. Se dobbiamo dirigerci verso la *toilette* anteriore o verso quella posteriore, facciamo la stessa fatica, che l’aereo viaggi a **900** km/h, o che si trovi ancora immobile sulla pista.

Finché il volo è tranquillo (insisto sul: “*rettilineo uniforme*”, e cioè senza accelerazioni da nessun lato), possiamo costruire sul tavolino un castello di carte che andrebbe giù con un soffio, perché tutto ciò che si trova dentro l’aereo viaggia in modo *inerziale* rispetto all’aereo stesso. Se non siamo durante fasi di accelerazione (vale a dire alla partenza, all’arrivo, durante le virate, e ovviamente se interviene la stramaledetta turbolenza) c’è un solo modo per sapere se l’aereo è in volo o no: guardare fuori. Infatti, finché restiamo all’interno, qualsiasi esperimento di fisica pensabile fornirebbe lo stesso risultato, sia con l’aereo in volo rettilineo uniforme, sia con l’aereo immobile sulla pista, e sarebbe impossibile a priori ricavarne informazioni sullo stato di moto dell’aereo stesso.

Abbiamo introdotto il termine *inerziale*. Il “Principio d’inerzia” fu la grande intuizione di Galileo, sebbene in modo ancora un po’ primitivo. Ogni oggetto è dotato d’*inerzia* (oggi noi diciamo *massa inerziale*, e la ritroveremo in Relatività generale), e proprio l’inerzia si oppone a deviazioni dal moto rettilineo uniforme. Da questo principio consegue immediatamente la Relatività (o, se preferite, potete girare le cose a rovescio, che è lo stesso). Finché restiamo in condizioni di moto inerziale, una vera e propria velocità *assoluta* non può essere definita e perciò, in ultima analisi, *non esiste*. Contano solo le velocità *relative*, e ogni esperimento eseguito su un oggetto in moto rettilineo uniforme darà gli stessi risultati che si sarebbero ottenuti, se il medesimo esperimento fosse stato eseguito su un qualsiasi altro oggetto pur esso in moto inerziale, ma a velocità diversa.

Volendo studiare le Leggi di natura, questa è una semplificazione indispensabile. Pensate a cosa sarebbe stato il mondo, se le Leggi di natura fossero dipese dalla velocità! Per questo motivo la “Relatività galileiana” fu il primo passo, il fondamento per poterci poi costruire sopra tutta la fisica.

La situazione diventa completamente diversa se la velocità non è più rettilinea e uniforme, ma varia sia come direzione (non è più rettilinea) sia come quantità (non è più uniforme). Quando ciò avviene, vuol dire che il corpo è soggetto a una forza esterna che causa un'accelerazione. Badate bene: quest'ultima non deve necessariamente far *aumentare* (o *diminuire*) la velocità, ma può semplicemente far *cambiare la direzione* del moto. Ricordatevi perciò; anche un corpo che viaggia sempre alla stessa velocità, ma cambiando direzione, è soggetto a una forza esterna e sta *accelerando*.

Restiamo all'esempio dell'aereo: alla partenza, mentre i motori aumentano di potenza e spingono il velivolo in avanti lungo la pista o mentre siamo in aria da pochi secondi, si accelera e, per reazione, percepiamo una forza che ci spinge all'indietro schiacciandoci sul sedile. Il contrario avviene all'atterraggio, quando il pilota "*butta i motori all'indietro*": bisogna tenere le cinghie agganciate perché rallentiamo, e il nostro corpo, lasciato a se stesso, tenderebbe a mantenere uniforme la propria velocità. Per reazione, dunque, percepiamo una forza che ci spinge in avanti e ci farebbe sbattere il muso contro il sedile anteriore.

Può succedere, però, che anche durante il volo a velocità costante, e in assenza di turbolenza, percepiamo all'improvviso una forza che ci spinge lateralmente. Questo succede mentre l'aereo sta virando, e cioè: non cambia il valore numerico della velocità, ma cambia la sua direzione. In questi casi, di solito, non intervengono i motori, ma il pilota modifica la posizione degli alettoni e la forza agente sull'aereo è la resistenza dell'aria sfruttata in modo *asimmetrico*. Ora dovrebbe esservi chiaro perché insisto tanto sulla dizione: "*moto rettilineo uniforme*". Non basta che sia uniforme, deve essere anche rettilineo, sennò ci sono forze esterne e gli esperimenti proposti da Galileo non funzionano più.

A questo punto, potreste obiettarmi che alcuni dei moti cui è soggetta la Terra non sono rettilinei perché implicano rotazioni, e avreste ragione da vendere. Infatti, piccolissime irregolarità si potrebbero misurare per mezzo di esperimenti di grande precisione, che seguissero il moto delle biglie su un lungo tavolo liscio e rigido. Queste irregolarità sarebbero causate proprio dalla rotazione terrestre ma, per fortuna dei giocatori di biliardo, le forze che si generano in tal modo sono microscopiche e, per vincere una partita, non è necessario tenerne conto. Se dunque volessimo sintetizzare il principio d'inerzia galileiano, e la conseguente Relatività, potremmo dire: «Se non ci sono forze esterne non c'è neppure accelerazione, e qualunque esperimento fisico fornisce sempre lo stesso risultato.»

Via via che questi concetti si chiarivano nella mente di Galileo, lui studiava palline che rotolavano lungo piani inclinati. Era un primo passo per cominciare a occuparsi anche di forze e accelerazioni. Purtroppo, al Professorone mancava una certa sistematicità a causa dei troppi interessi che lo chiamavano in tutte le direzioni (e per forza! ancora c'era tutto da scoprire), per cui non giunse mai a terminare le sue ricerche enunciando anche le altre leggi della dinamica. Solo la Relatività, e una forma embrionale del principio d'inerzia, furono trasmessi ai posteri.

Su questi fondamenti, e in base ai propri esperimenti molto accurati che coinvolgevano essenzialmente pendoli, Newton giunse infine alla prima sintesi della fisica, enunciando in modo completo le tre leggi generali della Dinamica, e cioè del movimento dei corpi quando sono presenti forze e accelerazioni accreditando (un po' generosamente, specie considerando il suo carattere) le prime due a Galileo. Quest'ultimo, tutto sommato, aveva misurato che eventuali oggetti in accelerazione uniforme percorrono spazi proporzionali al quadrato dei

tempi. Forse, questo era stato un buon viatico per Newton. Chissà? E poi il britannico scoprì la legge di gravità, e perfino un sistema ancora grossolano ma efficace di calcolo differenziale. Dopo aver parlato tanto di Galileo, sia reso il debito omaggio pure “all’Anglo che tanta ala vi stese” (non avete riconosciuto “I Sepolcri” di Foscolo? In che mondo vivete signori miei? O, forse, in che mondo vivevo io, quando s’imparava tutto a memoria...)

Fin qui ho mantenuto il discorso su fatti semplici, su esperienze comuni a chiunque sia stato sballottato in macchina o in un mezzo pubblico. Adesso interviene un primo, per il momento ancora semplice, approfondimento logico. Il concetto di velocità relativa tra due oggetti in moto (tra due auto durante un sorpasso) è facile da capire; vediamo però cosa comporta come conseguenze. Torniamo alla fisica del liceo: com’è definita una velocità? Come il rapporto tra lo spazio percorso e il tempo impiegato a percorrerlo, e si misura in km/h, o in cm/s, o in unità di misura congruenti con queste. Ecco la chiave di lettura di tutto quel che segue, e dobbiamo tenerla a mente: velocità, come rapporto tra spazi e tempi.

Abbiamo illustrato il concetto di Relatività galileiana (le leggi di natura sono le stesse per ogni sistema in moto rettilineo uniforme) e il suo corollario: le velocità sono *relative*, e non esiste una velocità *assoluta*. Ora prendiamo per il bavero il nostro più profondo modo di sentire, e domandiamoci: *il tempo* ci sembra qualcosa di relativo, oppure lo percepiamo come un’entità *assoluta*?

In linea di massima, l’intuizione ci suggerisce (o per lo meno lo fa con me) che le lancette di un orologio seguirebbero a girare alla stessa velocità, sia che lo portassimo al polso senza sbatacchiarlo troppo, sia che fosse depositato da un astronauta sulla superficie lunare, sia che si trovasse a bordo di una sonda spaziale, lanciato oltre i limiti del Sistema solare alla massima velocità possibile. Non è una domanda a trabocchetto (almeno per ora): se abbiamo la sensazione che il tempo trascorra allo stesso ritmo in ogni condizione, siamo in buona compagnia. Galileo e Newton, e tutti i fisici fino al *primo* Einstein, la pensavano proprio in questo modo.

Allora, per il momento accettiamo quello che l’intuito ci suggerisce, e traiamone una prima conseguenza. Essendo le velocità relative, ed essendo queste null’altro che rapporti tra spazio e tempo, se quest’ultimo è assoluto, non sarebbe forse ragionevole concludere che deve essere relativo lo spazio? Altrimenti, come si fa a tirar fuori qualcosa di relativo (la velocità) come rapporto tra due assoluti (spazio e tempo)?

Il ragionamento fila e, infatti, nella Relatività galileiana lo spazio è relativo. O, per meglio dire, è relativo il modo di misurarlo. Non c’è niente di difficile da capire, basta salire di nuovo sull’aereo di prima, mentre un nostro amico resta in aeroporto a vederci decollare. È un esperimento ideale, senza bisogno di far nulla se non pensare: un *gedankenexperiment* (*esperimento pensato*) come dicono i fisici, ed eseguiamolo restando seduti in poltrona.

Prima di separarci dall’amico, come si fa nei film d’azione, abbiamo sincronizzato gli orologi e ci siamo messi d’accordo sulle nostre azioni nell’immediato futuro: misureremo ogni dieci secondi le nostre rispettive distanze rispetto al muso dell’aereo. Non difficile, specie ora che ci sono sistemi **GPS** molto precisi. Sediamoci sulla poltroncina, agganciamo la cintura, spegniamo la sigaretta (vergogna! fumate ancora? smettete subito) e il cellulare, e cominciamo il nostro lavoro.

Allo scoccare dei dieci secondi, per mezzo di qualche marchingegno (magari un laser e specchietti fissati sulle ali del velivolo), misuriamo la nostra distanza rispetto all’estremità

della fusoliera. Supponiamo di trovare come risultato **12 m e 48 cm**. Nello stesso istante il nostro amico a terra, che dispone pure lui di qualche apparecchiatura su cui non indaghiamo, ottiene un valore pari a **135 m, 17 cm e 7 mm** dal muso del nostro aereo. Le due misure sono diverse, ma questo non ci turba per niente, vero? Ora seguitiamo a ripetere il procedimento con regolarità cronometrica.

Finché l'aereo è immobile, troviamo sempre gli stessi due risultati. Poi l'aereo comincia a rullare sulla pista con la solita mezz'ora di ritardo. Per noi, la distanza misurata continua a restare fissa: i dodici metri e rotti di prima, ma per il nostro amico a terra, la velocità che ci separa comporta che la distanza da lui misurata debba per forza variare al passare del tempo. Appena ci siamo mossi un po' è salita, diciamo, a **140 m**; dopo dieci secondi è diventata **350 m**, e così via. Seguita ad aumentare e infine, quando l'aereo raggiunge la velocità di crociera di **900 km/h**, la distanza tra il nostro amico e il muso dell'aereo cresce di due chilometri e mezzo ogni dieci secondi, mentre noi misuriamo sempre i soliti dodici metri e rotti.

Questa è, per l'appunto, la relatività della misurazione dello spazio: per osservatori in moto a diverse velocità, le misure di distanza cambiano in modo diverso secondo le velocità reciproche. D'altronde, tutto ciò ci pare assolutamente ovvio e intuitivo. Se c'è di mezzo una velocità, per forza lo spazio è relativo!

A questo punto ho una formuletta proprio sulla punta della tastiera, e non ce la faccio a trattenerla. Una cosa talmente banale che uno scolaro di quinta elementare la disdegnerebbe, facendo spallucce. Stavolta non c'è nessun aereo, ma sto pensando alla velocità relativa  $V_{rel}$  di due auto che corrono direttamente l'una verso l'altra. La velocità della prima è pari a  $V_1$ , quella della seconda è, invece,  $V_2$ , e rispetto a chi? Semplice: rispetto ai poliziotti con l'autoveloce, nascosti dietro due cespugli. Loro sì che se ne stanno *fermi* in agguato!

Sperando che all'ultimo istante almeno uno dei guidatori sterzi per evitare lo scontro frontale, sappiamo senza neanche bisogno di passare per concetti matematici astrusi che la velocità relativa  $V_{rel}$  è la somma:  $V_{rel} = V_1 + V_2$ .

Ecco, la formuletta mi è scappata.

Ora, invece, arriva del tutto inaspettata un'altra formula tra capo e collo: è banale, ma bisogna leggerla con un minimo di pazienza. Abbiamo detto che la velocità è il rapporto tra spazi percorsi e tempi impiegati a percorrerli. Sapendo che, in un intervallo temporale fissato che chiameremo  $\underline{t}$  (il quale, conformemente alla nostra intuizione, a quella di Galileo ecc. ha lo stesso valore per tutti, vuoi che lo misurino i due guidatori, vuoi i poliziotti), la prima auto percorre una distanza  $S_1$  e la seconda  $S_2$ , ecco che possiamo scrivere:

$$V_{rel} = V_1 + V_2 = S_1 / \underline{t} + S_2 / \underline{t} = (S_1 + S_2) / \underline{t}$$

Questo è il punto in cui vi prego di fare molta attenzione. Per quale motivo le due velocità si possono sommare? Perché, se esaminiamo un attimo la formula, ci accorgiamo subito che, nelle prime due frazioni, il denominatore  $\underline{t}$ , e cioè il tempo trascorso da quando cominciamo a misurare  $S_1$  ed  $S_2$ , è lo stesso. La caratteristica delle frazioni su cui, a scuola, s'insiste di più, no? Per sommare i numeratori, bisogna per prima cosa accertarsi che siano uguali i denominatori. Nel caso in esame, poiché il tempo è *assoluto* almeno fino a questo livello di spiegazione, i denominatori delle due velocità sono uguali per definizione.

Sembra un discorso inutile: è così intuitivo che ciascuno lo capisce senza bisogno di tante chiacchiere aritmetiche, ma tra poco ci renderemo conto di aver fatto bene a insistere su

una formuletta così stupida. Infatti, nella prossima sezione porremo le fondamenta per troncarle le gambe, e farla cadere con gran fragore, povera espressione matematica *apparentemente intuitiva!*

## 5.2) – In balia dei fumi dell'etere

*Vigesimo saeculo ineunte*, la Royal Society di Londra dette mandato a Lord Kelvin (al secolo William Thompson, nominato baronetto per meriti scientifici), il più prestigioso rappresentante di quella scienza ritenuta *britannica* (parzialmente a ragione) che era la fisica, di esporre in una conferenza *epocale* le opinioni sue e della stragrande maggioranza dei fisici del tempo, in merito al presente e al futuro della ricerca scientifica nel campo della fisica stessa. Ciò che ne saltò fuori pare a noi posteri un'uscita da capo balzano. Attenti, però, a non giudicare dall'alto dei secoli trascorsi; già una volta vi ho pizzicati mentre stavate per mandare al rogo Galileo!

Kelvin, in piena onestà intellettuale, affermò che secondo lui la fisica aveva raggiunto i propri limiti naturali grazie alle sintesi operate nella Meccanica da Newton all'inizio del '700 e da Maxwell per l'elettromagnetismo alla fine dell'800. La Meccanica razionale, la teoria della Gravitazione universale e quella dell'elettromagnetismo esaurivano ogni aspetto del mondo. E badate: entro certi limiti, questo modo di pensare non era del tutto privo di senso.

La cosiddetta “*Statica*”, e cioè la teoria fisica dei corpi immobili, ci era stata regalata circa 23 secoli fa da Archimede. La meccanica era stata preannunciata da Galileo e partorita già adulta e funzionante dalla mente di Newton. Dopo le importanti chiose matematiche di Lagrange, Laplace e Hamilton, non valeva più la pena di perdervi altro tempo.

Quanto alla termodinamica, o scienza del calore, dopo i lavori pionieristici di Carnot, di Watt, di Celsius e altri, lo stesso Kelvin ne aveva codificati i principi fondamentali, mentre Boltzmann aveva finalmente dimostrato come questo ramo della fisica fosse riconducibile alla meccanica newtoniana.

L'elettromagnetismo aveva beneficiato del lavoro empirico di Galvani, Volta, Ampère, Ohm, Faraday più in generale, e altri ancora, e alla fine Maxwell era riuscito a descriverlo in modo completo e corretto in un insieme di equazioni dalle quali era possibile calcolarne con precisione ogni dettaglio.

Dalla forza di gravità alla luce, non esistevano fenomeni noti che non fossero anche spiegabili in base alle teorie correnti, pur se la fisica non era poi così del tutto britannica. Per i fisici delle generazioni future, dunque, non si prospettava un avvenire brillante, e gli studenti interessati a questa disciplina erano caldamente incoraggiati a rivolgersi alla matematica, o a diventare concertisti, letterati e così via, poiché tutto ciò che restava era la misurazione con qualche cifra decimale in più dei valori esatti di un po' di *costanti naturali* (tipo quella di Gravitazione universale, che compare nella legge di Newton, oppure la velocità della luce), e minuzie del genere.

Non era la prima volta che Kelvin esprimeva queste opinioni, e come lui tutta una generazione di fisici, tra i quali anche un certo Michelson con cui faremo conoscenza più approfondita fra breve.

Per dire il vero, bisogna dare atto a Kelvin di aver posseduto un buon intuito da fisico. Infatti, all'orizzonte di questo cielo ormai completamente sereno, egli individuava *due nuvolette*, essendo però certo che queste si sarebbero dissipate in breve, poiché le soluzioni a tutti i problemi erano ormai da cercarsi in aspetti un po' riposti di equazioni già note.

Bastarono solo cinque anni a stravolgere brutalmente le idee di Kelvin e anzi: se proprio vogliamo essere precisi, negli stessi mesi in cui il nostro pontificava a Londra, un oscuro fisico di mezza età, certo Max Planck, già stava facendo esplodere a Berlino un candelotto di dinamite sotto le fondamenta della fisica *classica*, e cioè quella newtoniana e maxwelliana. Come se non bastasse, nel 1905, un altro tedesco, stavolta un giovanotto che correva molto appresso alle gonnelle, fece scoppiare sotto l'ormai traballante edificio una bomba atomica, e tutto saltò per aria.

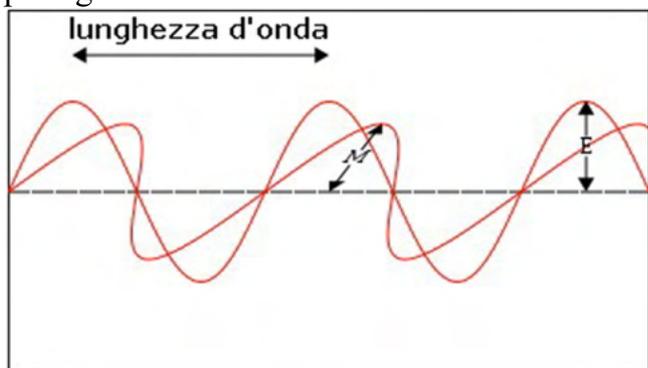
Kelvin era ancora vivo, ma passò a miglior vita l'anno successivo: forse era un po' rimbambito per capire cosa stesse accadendo; in retrospettiva glielo auguriamo. Veder distrutta la sua bella fisica britannica, e poi da *tedeschi!*

Dicevo poc'anzi che le due nuvolette erano state individuate con grande acume; fu proprio dai risultati sperimentali riguardanti queste nuvolette, non ancora del tutto chiarificati, che esplosero le rivoluzioni della Relatività einsteiniana e della Meccanica Quantistica.

Il vecchio barone (di nome e di fatto) della fisica britannica del XIX secolo trovava infatti un po' *inquietanti*, nell'ordine, i due *dettagli* seguenti. Anzitutto, il risultato dell'esperimento compiuto nel 1887 da quel Michelson di cui avevo prima fatto cenno, e che mostrava uno strano comportamento della velocità della luce. Poi, il fatto che la luce emessa da un oggetto riscaldato (sempre la luce, ma in un contesto diverso), si rifiutasse, con caparbia e *continentale* ostinazione, di conformarsi alla legge enunciata dai due fisici (britannici) Rayleigh e Jeans.

Di questa seconda nuvoletta tratteremo nella Sezione III, quando torneremo su Planck e introdurremo la Meccanica Quantistica. In questo capitolo contentiamoci di occuparci Michelson e del suo *inquietante risultato* che, per essere sinceri, già suonava la campana a morto per la vecchia fisica.

Il fenomeno naturale che si definisce *luce* è ben spiegato dalle equazioni dell'elettromagnetismo scritte da Maxwell: si tratta di due onde (Figura 5.1) che si propagano lungo due piani perpendicolari tra loro, intersecandosi. La prima onda è di campo elettrico  $E$ , la seconda di campo magnetico  $M$  e, nel senso letterale del termine, si nutrono l'una della *variazione* dell'altra. Infatti, un campo magnetico variabile ne produce uno elettrico sempre variabile, e viceversa. Così, l'onda procede verso destra (o verso sinistra) lungo la retta individuata dall'intersezione dei due piani, e la sua velocità è ben precisa: appunto  $c$ , la protagonista del nostro racconto.



**Figura 5.1**

Fin qui non c'era ancora nulla che i fisici non avessero già capito alla fine del XIX secolo, tranne un dettaglio che emerge con grande evidenza a chiunque osservi le equazioni di Maxwell con un minimo di attenzione. E molti lo avevano fatto. La velocità  $c$  è presente, in queste formule, come un *valore assoluto*, quello che già conosciamo, e cioè i famosi **300.000** km/s. Fin dall'inizio di questo capitolo, però, abbiamo insistito sull'impossibilità che, nella Relatività galileiana, esistano *velocità*

*assolute*; tutte sono *relative a qualcosa*. Allora: a cosa è relativa  $c$ ? Ovvero: la velocità della luce è  $c$ , sicuro, però lo è rispetto a quale supporto, a quale punto di riferimento?

Questa domanda non poteva non imbarazzare i signori fisici i quali, comunque, non tardarono a metterci una toppa, anche se un falegname ebreo vissuto tanto tempo fa ci ammonisce di non mettere toppe nuove su un vestito vecchio, altrimenti si strappa tutto. E così avvenne. La nuova invenzione fu l'*etere* e, al momento, sembrò prendere due piccioni con una fava, ma col passare del tempo li avvelenò entrambi.

Abbiate dunque un altro po' di pazienza, e provate a seguire con me i ragionamenti dei fisici dell'epoca (infatti, con ogni probabilità, avrei ragionato così anch'io, e anche voi). Ebbene: se la luce è un'onda elettromagnetica – è lo è senza alcun dubbio –, quest'onda si dovrà ben propagare in qualche *mezzo* o *fluido*. Mi spiego: se gettiamo un sasso in una distesa d'acqua immobile, si formeranno onde. Onde *di cosa*? Semplice: di acqua. Passando invece alle onde sonore, queste si trasmettono per compressione e rarefazione dell'aria, e, infatti, non si propagano nel vuoto. La luce, però, lo fa, e viaggia tra pianeti e stelle. Cosa ci sarà a *riempire il vuoto* e vibrare, in modo da permettere alla luce di esistere? La risposta dell'epoca fu: l'etere, che è *sottilissimo* e pervade ogni spazio.

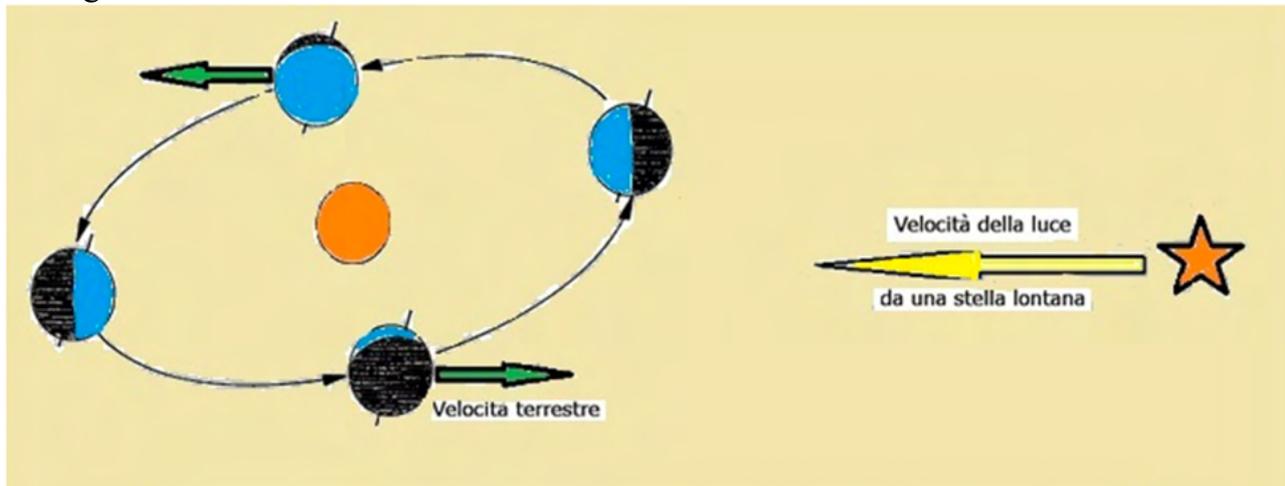
Ragionando in questi termini, sembrava risolversi anche il problema dell'*apparente assolutezza* di  $c$ . Infatti, la velocità della luce non doveva per forza essere *assoluta in sé*; nelle equazioni di Maxwell essa sarebbe comparsa come valore assoluto solo perché le formule stesse avrebbero specificato la *velocità rispetto all'etere* e, nei confronti di questo fluido un po' esoterico,  $c$  sarebbe stata costante, analogamente alla velocità del suono che è costante rispetto all'aria. Magari, poi, l'etere avrebbe anche potuto muoversi di moto relativo rispetto agli altri oggetti, ma questo sarebbe stato già un problema diverso.

Fin qui, e senza ancora avere sperimentato in laboratorio un bel nulla in merito all'etere, sembrerebbe semplice e ovvio, non vi pare? Purtroppo, però, non funziona così. Già sulla carta, questa interpretazione fa immediatamente sorgere alcuni problemi che dovrebbero bastare a renderla un po' *critica*.

Vi propongo un esempio solo: in fisica è possibile calcolare la velocità di un'onda in ogni materiale e, in generale, l'onda è tanto più veloce quanto più il materiale è *rigido*. Se il capo indiano “Bisonte di ottobre” vuol sapere quanto è lontano il 7° Cavalleggeri per tendergli un'imboscata con i suoi guerrieri, poggia l'orecchio al suolo per ascoltare lo scalpitare dei cavalli ancora lontani. Se, invece, desidera capire a che distanza si trova il Grande Cavallo di Ferro, dovrà poggiare l'orecchio sul binario bollente, e sarà in grado d'individuare il treno ancora prima che arrivi alla stazione di Santa Fé, poiché la velocità del suono nell'acciaio è molto superiore non solo a quella nell'aria, ma anche nella terra. O, quantomeno, questo è ciò che ho imparato da piccolo divorando i film di John Wayne, e in teoria funziona.

Ora, per tornare all'etere, a conti fatti, se esso deve sostenere una velocità della luce così elevata, la sua *rigidità* deve essere migliaia di volte superiore a quella dell'acciaio; una cosa che non è lontanamente possibile neanche con la più progredita tecnologia dei materiali di oggi. Il che non sarebbe un problema per Madre natura, poiché essa ha più frecce al suo arco di quante ce ne siano nelle farette di Bisonte di ottobre e della sua tribù. Il guaio sorge altrove, e l'avrete già intuito: come fa l'etere, così rigido, a non perturbare per nulla il moto degli oggetti celesti che lo attraversano senza neanche rendersene conto? Indovinala grillo!

Ignorando temporaneamente quest'ultimo problema (noi fisici siamo maestri nell'ignorare i problemi che non sappiamo risolvere), Michelson pensò che, se fosse riuscito a misurare la velocità della luce *rispetto alla Terra* (Figura 5.2), applicando poi la formuletta galileiana che abbiamo visto prima, quella concernente la somma delle velocità, avrebbe potuto dedurre la velocità della Terra rispetto all'etere, e cioè quanto di più vicino si possa immaginare a una velocità *assoluta* della Terra attraverso il cosmo.



**Figura 5.2**

A quell'epoca, costruire un'apparecchiatura che consentisse l'esecuzione di una misura talmente delicata, rappresentava un problema enorme, sia sul piano tecnologico, sia dal punto di vista finanziario. Occorreva come minimo un monolito di granito lungo oltre un metro, galleggiante su una superficie di mercurio per smorzare ogni vibrazione spuria, e per consentire alla piattaforma stessa di ruotare in modo fluido e senza scosse. Sulla piattaforma sarebbero poi state imbullonate le apparecchiature ottiche necessarie a misurare la differenza tra la velocità della luce, rispetto a due direzioni tra loro perpendicolari, sfruttando il fenomeno noto come *interferenza* la cui descrizione è qui bello tacere, perché verrà nella Sezione III. Per ora basti dire che, con l'aiuto del chimico Morley, Michelson riuscì a realizzare, in uno scantinato dell'Università di Cleveland, un esperimento così sensibile da individuare differenze di velocità tra una misura e l'altra di **1 km/s** circa (sto semplificando la struttura dell'apparato e i modi di esecuzione delle misure fino a limiti veramente estremi, ma il concetto resta).

Ciò sarebbe stato più che sufficiente a determinare con gran precisione come si compone il moto della Terra con la velocità della luce proveniente da una stella lontana. Infatti, sapendo che la Terra si sposta nella sua orbita (e quindi, presumibilmente, rispetto all'etere), ruotando attorno al Sole, a circa **30 km/s**, due misure eseguite a sei mesi di distanza avrebbero dovuto trovare due risultati diversi quando si fosse eseguita la somma  $V_{Terra} + V_{luce}$ , come si capisce dando una seconda occhiata alla Figura 5.2.

Nonostante l'enorme spesa in granito, mercurio, specchi di molatura raffinata eccetera, il povero Michelson si accorse che la velocità della luce restava identica, entro la precisione delle misure, in qualsiasi momento dell'anno. Perfino ruotando un po' la piattaforma i risultati non cambiarono di nulla.

Avendo già semplificato la descrizione dell'esperimento, non sto qui a dettagliare il kamasutra d'ipotesi che moltissimi avanzarono per spiegare la costanza della somma  $V_{Terra} + V_{luce} = V_{luce}$ , supponendo geometrie e moti particolarissimi. Per fortuna, Michelson aveva previsto un po' tutte le possibilità, e la sua apparecchiatura era abbastanza versatile da esplorarle una per una.

Fu un lavoro lungo e difficoltoso ma, alla fine, non rimase dubbio alcuno. Gli esperimenti erano stati condotti con tutta la cura necessaria, ed esaurivano lo spettro delle eventualità anche più remote. La precisione dei risultati ottenibili per mezzo dell'apparecchiatura era più che sufficiente a individuare ogni minimo scarto (entro 1 km/s, come vi dicevo poc'anzi, e la Terra si muove ad almeno 30 km/s, pur volendo ignorare la velocità del Sole attorno al centro galattico il cui valore, a quell'epoca, ancora non era noto con precisione) rispetto al sorprendente esito:  $V + c = c$  per ogni possibile valore di  $V$ .

Per la verità, restava una soluzione un po' troppo tirata per i capelli: che la Terra fosse ferma rispetto all'etere e quindi, in qualche modo del tutto incomprensibile, anche rispetto a tutto il resto dell'universo. Siccome ogni corpo celeste si muove, avremmo forse dovuto concludere che il nostro pianeta è il centro attorno al quale girano Sole, Luna e ogni altra cosa. Aveva ragione Claudio Tolomeo? Sembrava davvero eccessivo, e non c'è da meravigliarsi se il vecchio Kelvin percepisse questo risultato come una spina nel fianco, e ne parlasse come di una *nuvoletta*.

Qualcuno cominciò subito a correre ai ripari. Il fisico irlandese FitzGerald ipotizzò che, viaggiando *contro l'etere*, tutti gli oggetti si *accorciassero* di quella piccola quantità necessaria a spiegare i risultati di Michelson.

Dal punto di vista formale, se la piattaforma di granito si fosse accorciata di un certo valore – bastava assai poco – nella direzione da cui proveniva il cosiddetto “vento d'etere”, ecco che non sarebbe stato più possibile misurare la pura e semplice composizione  $V_{Terra} + V_{luce}$ . Perché la piattaforma si sarebbe dovuta accorciare, però?

L'olandese Lorentz andò più avanti e, ipotizzando che l'etere producesse *attrito* con le cariche elettriche presenti negli atomi (non impossibile in linea di principio, essendo l'etere proprio il *medium* elettromagnetico), calcolò delle *trasformazioni* tra spazi, tempi e velocità, che rendevano ragione dell'apparente costanza di  $c$  misurata da Michelson. Si trattava di pezze appiccicate col nastro adesivo, come potete ben capire perché, sebbene i risultati numerici fossero corretti, nessuno, nemmeno Lorentz riusciva a capire *cosa diavolo significassero e che senso avessero* quelle formulette, a prima vista abbastanza semplici.

Dell'altra *nuvoletta* di Kelvin accennerò soltanto, e ne parleremo nella Sezione III. In termini rudimentali, dirò che le stesse Equazioni di Maxwell, studiate con cura, prevedevano che ogni oggetto, qualunque fosse la sua temperatura, irradiasse una quantità *infinita* di luce. E qui, solo Max Planck stava scavando un pertugio che avrebbe condotto alla spiegazione del perché non avvenisse quanto previsto dalla teoria, e condotto Einstein, cinque anni dopo, a dimostrare *sperimentalmente* (esperimenti di altri) perché la neonata Meccanica Quantistica spiegasse tutto. Ma il XIX secolo si chiudeva così, con la *morte della fisica* a parte le due *nuvolette*.

## Sezione II: l'universo relativistico

## 6)– Il terribile spaziotempo

### 6.1) – Bisogna essere giovani?

A cavallo del '900 Einstein era poco più di un ragazzo, ma già ragionava in termini non tradizionali. Approfitto di questa circostanza per notare come i suoi risultati scientifici importanti li ottenne attorno alla trentina; poi continuò a lavorare accanitamente, ma giunse a poco o nulla. Le buone idee vengono dai giovani? Molti scienziati ne sembrano convinti. E allora, Planck che, al momento della sua grande scoperta, era sulla quarantina? Via: restiamo alla velocità della luce.

Probabilmente, Einstein non tenne conto dei risultati di Michelson e Morley posto che li conoscesse: lui lavorava sulla carta, sulle formule, e soprattutto sulle idee. E già all'età di diciassette anni gliene era balenata in mente una, d'importanza fondamentale. La racconto con parole mie, ma state tranquilli: non ne traviso il significato.

«Supponiamo» si diceva il nostro «di salire su un razzo che sta inseguendo un raggio di luce, e accelerare fino a velocità  $c$ . Osservando la *testa* del raggio di luce ci dovremmo trovare alla presenza di un campo elettrico e uno magnetico che, ***fermi nello spazio rispetto a noi*** (perché ci stiamo muovendo assieme a loro), variano nel tempo aumentando e diminuendo ma, comunque, insisto: *fermi* sul posto, ed è questo il punto chiave almeno ragionando in base alla Relatività galileiana. Pensandoci bene, però, la configurazione appena ipotizzata per i due campi non dovrebbe essere realizzabile in natura, poiché le equazioni di Maxwell non contemplano soluzioni di questo tipo. Vale a dire: comunque io mi stia muovendo rispetto al raggio di luce, le equazioni hanno sempre una e una sola soluzione. Paradossalmente, nei miei confronti questa variazione incrociata dei campi elettrici e magnetici si muove sempre e soltanto a velocità  $c$ . Come conclusione, sempre le stesse equazioni mi conducono all'idea (*gedankenexperiment*, ricordate) che sia sempre  $V + c = c$  per ogni valore di  $V$ ; fosse anche  $V = c$ . Sembra assurdo, ma è proprio  $c + c = c$  e, se le equazioni così m'impongono, io l'accetto senza tante storie». E perciò, Einstein prese questo dato di fatto così come si presentava, senza aggiungere fronzoli, e lo elevò addirittura a Principio fondamentale della fisica (con la "P" maiuscola)!

Ovviamente, non bastava tutto ciò a costruire una teoria, poiché l'intera faccenda, proprio l'assunto principale, violava quella Relatività galileiana che abbiamo digerito nella Sezione I: le velocità avrebbero dovuto sommarsi come quelle tra due auto su strada, e bisognava capire perché, nel caso della luce, le cose andassero in modo diverso. Non sto qui a raccontarvi i processi logici che si svolsero nella mente di Einstein: in primo luogo ne sappiamo pochissimo (raccontando ai posteri, anche lui ha sicuramente ripulito e abbellito molto, come facciamo tutti), e in ogni caso sarebbe troppo complicato. Proviamo invece a capire assieme, semplificando al massimo, alcuni concetti di base sui quali si costruisce la nuova Relatività einsteiniana.

Ragioniamo sulla somma delle velocità. È chiaro che, a causa della costanza di  $c$ , le velocità relative non possono sommarsi tra loro *tout court*, ma esisterà una formula un po' più complicata che ne regola la **composizione** in senso lato. Lorentz l'aveva già trovata, ma se la rigirava tra le mani da un anno senza capire cosa volesse dire. Per cominciare sappiamo di sicuro che, quando le velocità sono basse, questa composizione deve produrre una correzione minuscola alla pura e semplice somma; una differenza così piccola che, se riferita alle velocità nel **mondo normale** degli Autovelox di cui abbiamo esperienza diretta, non riusciamo ad accorgercene altrimenti avremmo scoperto tutto da chissà quando. Nel caso opposto, quando ci avviciniamo a  $c$ , la composizione dovrà tendere proprio a quei risultati appena visti sopra ( $V + c = c$  eccetera) che, a prima vista, ci paiono almeno strani. In particolare, se una delle due velocità in gioco è proprio  $c$ , applicando questa composizione troveremo comunque  $c$  come esito finale. Insomma: la formuletta di somma delle velocità che abbiamo visto al termine della sezione 6.1, e ci pareva ovvia, (la riporto qui sotto per comodità, sostituendo tutti gli "uguale" con dei "**non uguale**"), va ripensata, e scopriremo come.

$$V_{relativa} \neq V_1 + V_2 \neq S_1/\underline{t} + S_2/\underline{t} \neq (S_1+S_2)/\underline{t}$$

Dove ricordo che il simbolo  $\neq$  vuol dire: "non è uguale a...". In altri termini, è il simbolo di "**disuguaglianza**".

Ora fate bene attenzione e non svicolate col pensiero: possiamo anche tollerare le prime due disuguaglianze in virtù di quanto afferma Einstein, ma l'aritmetica elementare ci dice che almeno la terza disuguaglianza, quella che si riferisce alla somma di due frazioni, dovrebbe essere un'uguaglianza e basta, no? Altrimenti, dovremmo rivedere anche tutta l'aritmetica cominciando da zero, e non è questo che ci richiede la Relatività. E allora? E allora, proprio a questo punto il lettore più accorto potrebbe aver già intuito una possibile via d'uscita. Se le velocità non si possono sommare *sic et simpliciter*, la risposta deve essere nel **denominatore** della somma di frazioni che abbiamo visto, e cioè nel **tempo!**

Le velocità, infatti, si sommano in modo intuitivo, galileiano, proprio se il tempo  $\underline{t}$  al denominatore è **assoluto**, e cioè la lancetta dell'orologio scatta **con lo stesso ritmo per qualsiasi osservatore**, mentre solo lo spazio, al numeratore, è relativo. Stando così le cose, proviamo a ragionare a rovescio: se le velocità non possono *sommarsi in modo semplice*, ciò deve per forza significare che c'è qualche grana col denominatore delle frazioni, e cioè col **tempo**. Ecco, dunque, il rospo da ingoiare vivo e senza far tante storie: il tempo **non è assoluto** come pensava Newton, e la sua misura dipende dallo stato di moto (dalla velocità, per capirci) di chi lo misura.

Di conseguenza, la somma di frazioni non può funzionare perché, nella formuletta qui sopra, al posto di  $\underline{t}$  uguale per tutti, dovremmo scrivere due denominatori diversi:  $\underline{t}_1$  dove  $c$  è al numeratore  $S_1$ , e  $\underline{t}_2$  dove  $c$  è al numeratore  $S_2$ . All'atto pratico, scopriremo che perfino gli stessi spazi al numeratore vanno misurati in modo un po' diverso da come avviene nella Relatività galileiana, ma già questo ci sorprenderà di meno se abbiamo accettato la relatività del tempo, non è vero? Ripeto: ho semplificato all'estremo, ma il nucleo della Relatività è proprio questo; se  $c$  è costante per tutti, non solo le misure di spazio, ma anche quelle di tempo devono per forza essere relative, e diverse per osservatori in moto l'uno rispetto all'altro.

Sperimentiamo, sennò non ci capiamo più nulla. Le lancette del nostro orologio ruoterebbero a velocità diversa, se lo spedissimo su una sonda spaziale? O, più semplicemente, su un treno? Il punto è questo: farebbero proprio così, pure se ciò urta contro il nostro buon senso. Torniamo, dunque, all'esempio dell'aereo con noi dentro e l'amico fuori. Nel nuovo mondo relativistico vaticinato da Einstein, misurando le distanze rispetto al muso dell'aereo, il nostro risultato rimarrà costante, mentre quello dell'amico continuerà a cambiare, e lo farà in modo appena un po' diverso da come previsto nella Relatività galileiana. In questo momento, però, non è la misura di distanza che c'interessa. Ricordiamo invece un'altra caratteristica dell'esperimento ideale: avevamo deciso di valutare le distanze rispetto al muso dell'aereo ogni dieci secondi esatti e, come condizione necessaria, avevamo sincronizzato i nostri orologi prima della partenza. Per pignoleria aggiungo: ci eravamo perfino premurati di controllare che andassero allo stesso ritmo.

Ebbene: se le misure di tempo sono accuratissime (poi vedremo quanto), al trascorrere dei minuti e delle ore, ci renderemo conto che l'orologio del nostro amico *rallenta*. Cosa ancor più strana, lui dedurrà che, invece, è il *nostro* orologio a rallentare, e ciò non ha nulla a che vedere col normale ritardo temporale dovuto alla distanza (vi ricordate dello sfasamento tra video e voce di cui abbiamo discusso prima?). Pure correggendo le misure per ogni effetto *tradizionale*, resterà un rallentamento che dipende solo dalla velocità alla quale viaggia il nostro aereo, e dalla distanza sempre crescente che separa noi dal nostro amico. Il tutto ci disturba non poco: tra l'altro, se noi vediamo il suo orologio rallentare, ci aspetteremmo che lui vedesse il *nostro orologio accelerare*. Invece no: ciascuno dei due vede rallentare l'orologio dell'altro.

Permettetemi d'insistere, supponendo che qualcuno salti su immediatamente con una spiegazione che gli pare semplice: «È un problema di distanza che sta aumentando. Siccome ci spediamo a vicenda i segnali per mezzo di onde radio, e cioè alla velocità della luce – che è finita, anche se molto grande – ogni volta queste onde dovranno percorrere un pezzo di strada in più, e quindi ci *sembra* che i due orologi rallentino allo stesso ritmo».

Davvero, quel lettore pensa che Einstein fosse così stupido? Ovviamente, ricevendo i segnali, operiamo la correzione dovuta a questo semplice effetto. E, anche al netto della correzione, l'intervallo rimane sempre superiore ai dieci secondi, e cresce tanto di più, quanto maggiore è la velocità dell'aereo, e cioè quella di allontanamento tra noi e l'amico. Noi vediamo il suo mondo che decelera, e lui vede rallentare i ritmi vitali all'interno del nostro aereo. E non serve chiedersi chi dei due abbia ragione, perché – ecco il cuore della Relatività – *siamo entrambi nel giusto*. Vediamo cose diverse ma abbiamo ragione entrambi. Il tempo e lo spazio *si comportano* in modo differente, secondo le velocità relative. È inutile cercare di spiegarlo intuitivamente: su un buon libro divulgativo di Relatività troverete spesso l'esempio della “contemporaneità in un treno in corsa, vista da dentro e da fuori del treno stesso”; aiuta a capire qualcosa, ma la difficoltà concettuale di base non si può esorcizzare.

Fatemi alleggerire il discorso con una considerazione di carattere filosofico. La definizione di “Relatività” deriva proprio da questa differenza di vedere le cose in funzione delle velocità relative. Si può dire: «Ma anche con Galileo si aveva una relatività delle misure spaziali!». Sì, certo, ma la faccenda non ci turbava per nulla, poiché la nostra intuizione rendeva subito giustizia delle *differenze di tipo galileiano* nell'eseguire queste misure. Con Einstein, invece, il paradosso non è apparente ma reale, e va accettato per quello che è: i

risultati di misure di spazi e tempi per osservatori che si muovano con una velocità relativa qualsiasi sono diversi tra loro (anche se occorre avvicinarsi un po' a  $c$  prima di rendersene conto), e sono *veri* comunque; nessun osservatore ha il diritto di reclamare la propria *superiorità*. Da qui il modo di dire secondo il quale: «Tutto è relativo».

Frase che, al di fuori della Relatività einsteiniana, non significa un bel nulla, ma è stata presa come la *prova scientifica* che ogni cosa sopra e sotto la Luna, persino l'arte, la cultura, i valori etici e sociali e così via, siano relativi e quindi, in ultima analisi, chiunque abbia ragione qualsiasi cosa dica e faccia. Mentre noi abbiamo capito che il concetto andrebbe *limitato alle misure separate di spazio e di tempo*, e poche altre quantità fisiche. E torniamo alla scienza, riassumendo. Se due osservatori si muovono a velocità diverse, e si scambiano segnali per dire: «Quando quella lampadina si accende, facciamo partire i cronometri e misuriamo le nostre distanze nei confronti di un certo punto prefissato; quando poi la lampadina si spegnerà, fermiamo i cronometri e misuriamo di nuovo le distanze», cosa avverrà a misure eseguite? Che non solo i due troveranno distanze diverse (e fin qui sembra intuitivo), ma anche i tempi cronometrati saranno diversi. E questo non è intuitivo per niente. Accettare il fatto, poiché è un dato sperimentale misurato, e *misurabile con una precisione spaventosa* con le tecnologie d'oggi, fa parte di quell'insieme di piccoli atti d'umiltà che dobbiamo compiere se vogliamo cominciare a penetrare oltre la scorza delle leggi di natura.

Possiamo forse consolarci pensando che, se in un futuro remoto riuscissimo a costruire *intelligenze artificiali* in grado di spostarsi con velocità non troppo inferiori a  $c$ , gli effetti di rallentamento del tempo sarebbero perfettamente *familiari* a queste creature, poiché i loro cervelli sarebbero stati *cablati* apposta. Di conseguenza, tali ipotetiche macchine percepirebbero la Relatività come intuitiva, e non saprebbero darsi ragione del motivo per cui a noi sembra così impenetrabile. Magari, cercherebbero pure di spiegarcela con quelli che a loro parrebbero esempi intuitivi, ma fallirebbero. Noi siamo lenti e, di conseguenza, l'evoluzione ci ha selezionato per percepire il tempo come assoluto, e non c'è nulla da fare. E tutto questo, come conseguenza dell'inquietante risultato di Michelson. Altro che nuvoletta all'orizzonte! Onore al merito a Kelvin, comunque, perché almeno aveva individuato con chiarezza il punto di difficoltà della sua fisica ottocentesca.

## 6.2) – Inciampiamo in una radice (quadrata)

Insomma, questa benedetta relatività delle misure di tempo non ci va proprio giù. È lo scoglio su cui cadono molti cultori di fisica non professionisti. A onor del vero va detto che, quando Einstein se ne venne fuori con la sua prima Relatività, avevano borbottato anche molti fisici di mestiere. Abituati come Kelvin a indossare il grembiule e sporcarsi le mani di olio da macchina in laboratorio, le equazioni astruse scritte sulle lavagne li spaventavano. Non che le rifiutassero per principio: le prove sperimentali diventavano sempre più convincenti e, per un fisico, un conto sono le ipotesi e le chiacchiere, un altro i dati di fatto. Di fronte a questi ultimi ci si fa tanto di cappello e si manda giù tutto, che piaccia o no, ma in una certa misura la prima Relatività (e più ancora la seconda) contribuì ad allontanare dalla fisica alcuni scienziati vecchio stile, perché odorava troppo di gesso e poco di olio.

Noi cercheremo d'intuire meglio il reale stato delle cose ma, per giungere a tanto, farà mestieri rendere il discorso più quantitativo. E cioè: non basta dire che l'orologio dell'amico rimasto a terra rallenta; vogliamo sapere di **quanto**, in secondi, ore eccetera. La Relatività consente di calcolarlo. Purtroppo, dovrò introdurre un'altra formula, contenente addirittura una **radice quadrata!** Orribile, no? D'altra parte, sono il **referee** di me stesso e mi autoassolvo senza indugio. Anche perché la formula mi servirà solo a far entrare in scena un nuovo personaggio della teoria, che spesso affianca il protagonista (e cioè  $c$ ); la sua *spalla*, si direbbe in gergo teatrale. È il cosiddetto “Fattore  $\gamma$ ” o “Fattore di Lorentz” perché, se ben ricordate, quest'ultimo signore lo avevamo incontrato alla fine del capitolo 5, ed era l'olandese che, un anno prima di Einstein, era già riuscito a scrivere – attraverso ragionamenti contorti – le equazioni principali della Relatività, e poi le aveva covate inutilmente non riuscendo a capire cosa volessero dire. È un riconoscimento postumo dovuto, ma non per questo Einstein copiò qualcosa: senza neppure conoscere il lavoro del collega aveva impostato le cose in conformità a una logica ferrea, e ricavato per conto proprio le stesse formule.

Eccovi, dunque, il fattore  $\gamma$ : ve lo presento e gli chiedo di fare un inchino. Si tratta di una *variabile* il cui valore numerico, quando abbiamo a che fare con velocità molto minori di  $c$  (e cioè nel nostro mondo quotidiano) è uguale a **1**. Al crescere della velocità, aumenta dapprima pochissimo ma, quando cominciamo ad avvicinarci a  $c$ , s'impenna e, per  $V = c$ , sale senza limite, perché finisce per diventare:  $\gamma = 1 / 0 = \infty$ . Guardate bene la formuletta, e calcolate voi stessi cosa succede se  $V = c$ ; è di una semplicità disarmante.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Formuletta digerita (bell'ablativo assoluto!), proviamo a ragionare come segue. Se questo coefficiente numerico  $\gamma$  è **maggiore di 1**, allo scopo di far **diminuire** qualcosa, dovrà trovarsi al **denominatore**, perché solo in questo modo riuscirà a svolgere le mansioni che gli sono richieste. Effettivamente, se vogliamo sapere cosa succede all'orologio di un amico molto veloce dopo che il nostro orologio ha misurato un tempo  $t_0$ , dobbiamo per l'appunto

dividere  $t_0$  per il fattore  $\gamma$  relativo alla sua velocità, e troveremo il tempo  $t_1$  misurato dall'amico:

$$t_1 = t_0 / \gamma$$

La matematica non sembra ancora impossibile da maneggiare, non vi sembra? Lasciando da parte il *significato fisico* di  $\gamma$  (quello sì che ci farebbe venire il mal di pancia), proviamo ad applicare la formula a qualche caso concreto. Per esempio: se ci troviamo in un aereo che vola, in piena crociera, a **900** km/h, a conti fatti troviamo all'incirca  $\gamma = 1,0000000000014$ . È questo il motivo per cui, anche se la velocità relativa è così elevata rispetto a quelle che sperimentiamo nella vita di tutti i giorni (un aereo ci sembra veloce oltre misura, no?), la differenza con cui scorre il tempo tra il nostro orologio e quello dell'amico a terra sarà una miserrima parte su mille miliardi. Difficile accorgersene con un normale cronometro anche super-elettronico: per accumulare un secondo di ritardo bisognerebbe volare per ventitremila anni!

D'altra parte, gli orologi da laboratorio dei tempi nostri sono perfettamente in grado di misurare con precisione differenze temporali così minuscole e, in effetti, queste sono state rilevate puntualmente. Su tali basi sperimentali, già ora potremmo dare per confermata la *Relatività speciale*, quella che stiamo introducendo. Per un fisico, un risultato sperimentale in accordo con la teoria per una parte su mille miliardi basta e avanza, ma gli scettici possono chiedere che si faccia di più.

Allora, vediamo cosa succede con un satellite artificiale. Questo viaggia a una velocità di circa otto chilometri al secondo. Ne viene fuori  $\gamma = 1,0000000014$ : un secondo di differenza in vent'anni. Non è tantissimo, ma neanche poco; perfino il segnale orario dovrebbe essere più preciso. Infatti, parlando di satelliti, vi faccio un solo esempio: il sistema **GPS**. Affinché possa garantire una precisione di misura tale da informarci in che luogo ci troviamo in modo soddisfacente per i nostri spostamenti quotidiani, chi gestisce la baracca deve tener conto anche della velocità relativa tra il satellite che misura la posizione e noi (oltre ad altre differenze, più sottili ma egualmente importanti, che dipendono dal campo gravitazionale, e che vedremo *en passant* in un altro capitolo), altrimenti sbaglierebbe la posizione di diverse decine di metri. Suppongo che, se così fosse, la sua utilità come navigatore sarebbe gravemente compromessa (pensateci: una voce gentile che vi consiglia «Dovevate girare a destra due traverse fa all'incirca»).

Dite che queste velocità sono ancora troppo *basse* rispetto a  $c$ , e serve qualche riscontro più *veloce*? Bene: nei vecchi televisori a tubo catodico, le tensioni in gioco giungevano fino a trentamila volt. Transitando dal catodo allo schermo, gli elettroni acceleravano a una velocità tale che, per loro, si poteva giungere fino a  $\gamma = 1,06$ . Vale a dire: tra il *nostro* tempo e quello *visto dall'elettrone*, c'era una differenza di circa il **6%**. Non del tutto trascurabile, no? Uno scettico di ferro potrebbe insistere: «Forse qualcuno ha mai controllato l'orologio che un elettrone si porta *al polso*?» La risposta è *a suo modo* affermativa, ma approfitto per introdurre anche un nuovo aspetto della Relatività, uno di quelli che bisogna apprendere e memorizzare.

Intuitivamente, la massa di un qualsiasi oggetto dovrebbe essere indipendente dal suo stato di moto, o così ci dice la logica galileiana. La *quantità di materia* è sempre la stessa: non cambia il numero di atomi, e su questo non ci sono dubbi. Le cose, però, funzionano in modo ingannevole: la massa aumenta in proporzione a  $\gamma$ . Infatti, sempre indicando col pedice

$0$  le grandezze fisiche relative a noi, e col pedice  $1$  quelle per l'oggetto in movimento rispetto a noi, viene fuori:

$$m_1 = \gamma \times m_0$$

Stavolta c'è un prodotto e non una divisione, diversamente che per il tempo. Attenzione: non aumenta il numero di atomi, ma proprio **la massa di ciascun atomo**, di ciascuna particella elementare. Di conseguenza, per noi che stiamo fuori del tubo catodico, la massa dell'elettrone quando esso urta contro lo schermo è aumentata del sei per cento rispetto a quando l'elettrone è partito.

E qui lasciatemi elaborare sul concetto. La formazione dell'immagine sullo schermo è guidata da campi elettrici e magnetici che deflettono la traiettoria degli elettroni, in modo che essi cadano nel posto giusto. Ma la deflessione della traiettoria dipende anche dalla carica e dalla **massa** dell'elettrone. Se quest'ultima aumenta in corsa all'interno del tubo, il progettista dovrà tenerne conto, altrimenti l'elettrone finirebbe in un punto sbagliato dello schermo, e nemmeno di poco! Anche con un tubo catodico di soli **25** cm di lunghezza, l'errore di posizione sarebbe di qualche millimetro: la differenza tra un'immagine perfettamente a fuoco e un guazzabuglio informe. La tecnologia che ha condotto allo sviluppo di televisori a tubo catodico ad altissima definizione, anche se questi ultimi sono ormai obsoleti, conferma come la Relatività giochi un ruolo importante perfino in apparecchiature di uso domestico. Se, prima degli schermi piatti, i televisori ad alta risoluzione si vendevano, vuol dire che la Relatività è giusta, e descrive correttamente il funzionamento della natura.

Soddisfatti, ora? Qualcuno dice di no. Succede; come affermava Kennedy parlando di politica: «C'è sempre un 20% che è pregiudizialmente contrario a tutto» e, per quanto possa sembrare strano, qualcosa del genere avviene anche in campo scientifico. Va bene: diamo spago al nostro scettico, e passiamo all'estremo della scala delle velocità, vicinissimo a  $c$ . Nei laboratori di fisica nucleare esistono *acceleratori di particelle* che portano elettroni e protoni poco distanti dalla velocità della luce. Per esempio, in **LHC** (il Large Hadron Collider, se ve lo foste scordato), i protoni giungono a **0.999999991**  $c$ , solo 3 metri al secondo meno della velocità della luce. Questi protoni velocissimi, urtando tra loro o contro opportuni bersagli, in qualche modo funzionano come *super-microscopi* che permettono di **vedere** (il concetto è più complesso, ovviamente, e ci torneremo nella Sezione III) le particelle elementari. Per riuscire nell'intento, occorre far funzionare (bene) apparecchiature enormi, a forma di tubi piegati ad anello, le cui circonferenze sono lunghe decine di chilometri (ben **ventisette**, per **LHC**), e queste macchine costano quanto una manovra finanziaria annuale. Per costruire i più potenti e moderni acceleratori, spesso diverse nazioni formano consorzi e mettono assieme i soldi. Sarebbe piuttosto **seccante**, per usare un eufemismo, se questi bestioni, una volta costruiti, non funzionassero secondo le previsioni.

Chiediamoci, allora, quanto vale il fattore di Lorentz per particelle così veloci come quelle che vi ruotano all'interno. Il calcolo è semplice:  $\gamma \sim 10000$ . Le particelle, accelerate a velocità così immense, **pesano** migliaia di volte più che da ferme. Ora, analogamente a quanto avveniva nei vecchi tubi catodici, la deviazione e l'accelerazione delle particelle per farle girare in circolo e giungere a queste velocità enormi dipende anche dalla loro massa. Di conseguenza, bisogna tener conto di questo pazzesco aumento di  $\gamma$  cui vanno incontro le particelle, dal momento in cui sono immesse nell'anello a bassa velocità, fino a quando sono pronte per le collisioni, altrimenti nessun acceleratore funzionerebbe.

Immagino che, a questo punto, la maggioranza dei lettori (più dell'ottanta per cento sperato da Kennedy...) sia d'accordo con me: un fattore  $\gamma$  pari a **10000** non è uno scherzo, non è un punto percentuale che si può quasi ignorare. Ricordiamo perciò quanto segue: ogni volta che, nel mondo, si mette in funzione un acceleratore (e ce ne sono di quelli che girano giorno e notte), le equazioni della Relatività einsteiniana sono confermate con una precisione enorme, di dodici, tredici cifre decimali dopo la virgola come minimo. Punto e basta.

Di conseguenza, la relatività del tempo (e della massa, e di altre quantità) è una realtà di fatto, ineludibile. Einstein non era uno sciocco, né lo sono gli scienziati e i tecnici che sono venuti dopo. Ora, se ci pensate, passando dal satellite al tubo catodico all'acceleratore di particelle, cosa vediamo all'opera? Si potrebbe dire che ci limitiamo ad applicare la matematica. Noi non riusciamo a intuire cosa significhi la *relatività del tempo*, ma *la sappiamo calcolare* e, una volta calcolata, possiamo addirittura *usarla per scopi pratici*; magari, perfino casalinghi.

Prima di terminare questo capitolo è opportuno accennare in modo intuitivo alla ragione per cui nulla può viaggiare più veloce di  $c$  (a parte Superman), e addirittura al perché un oggetto dotato di massa non può neppure *raggiungere* questo traguardo. Ci si può avvicinare, ma non ci arriva mai, come per le particelle negli acceleratori. Se quelli di oggi portano i protoni fino al  $\gamma \sim 10000$ , quelli della prossima generazione (se mai esisteranno, perché ormai costano troppo) li porteranno a valori di  $\gamma > 100000$ , e così via; mai a  $\gamma = \infty$ , però. Il motivo per questa impossibilità va ricercato nell'aumento relativistico della massa. Che cosa dicono leggi di Newton (*oddio, un'altra formula*)? Che, per far accelerare un oggetto dotato di massa  $m$ , bisogna applicargli una forza  $F$ . Così facendo, l'accelerazione  $a$  viene fuori:  $a = F/m$ .

Ebbene: cosa succede se la massa  $m$ , via via che l'oggetto accelera fin quasi a  $c$ , tende all'infinito? Semplice: che qualunque sia la forza  $F$  applicata, l'accelerazione  $a$  tenderà a zero, e quindi la velocità non potrà aumentare oltre. Per accelerare un oggetto dotato di massa fino a  $c$  servirebbe una forza infinita, ma ciò non è realizzabile in alcun modo. Fine del discorso!

Curiosità: e se, per uno scherzo di Madre natura, la velocità della luce fosse infinita? Ebbene, il fattore  $\gamma$  avrebbe un valore costante:  $\gamma = 1$ , e tutto sarebbe più semplice, no? La Relatività galileiana regnerebbe dovunque, e non avremmo difficoltà a capire come si compongono le velocità dei corpi in moto. Peccato che, se così stessero le cose, neppure la vita avrebbe alcuna *chance* di esistere, come vedremo verso la fine del libro.

## 6.3) – Abitiamo un mondo a quattro dimensioni?

A volte, qualcuno domanda agli scienziati: «Ma allora, il tempo è la quarta dimensione?». È una domanda *mal posta* poiché, di solito, chi chiede ha in mente una cosa, chi risponde un'altra. D'altronde, questo concetto contiene anche un barlume di verità, e quindi cercherò di chiarirlo un po' meglio.

Ci telefona un amico, e prendiamo appuntamento per incontrarci nel suo ufficio. Lui lavora in Corso Tizio, ma questa informazione non è sufficiente, perché la strada è molto lunga. Per sapere dove dobbiamo recarci, occorre conoscere il numero civico, che è il 192, l'ultimo portone prima dell'incrocio con Viale Caio. L'esigenza di avere *due informazioni* rispecchia la geometria della superficie terrestre, che è a *due dimensioni*, e perciò servono *due* coordinate geografiche, *spaziali*, per individuarne un punto preciso. L'ufficio del nostro amico, però, è situato in un palazzo di trenta piani, e quindi occorre anche una *terza* informazione: nell'ascensore, quale bottone pigiare? E cioè: a quale *altezza* rispetto al suolo dobbiamo arrivare? Ecco da dove sorge la necessità di una *terza* coordinata, anch'essa *di tipo spaziale*. Adesso il conto torna, poiché noi viviamo in un mondo a *tre* dimensioni spaziali, e per individuare un punto nello spazio dobbiamo averne le *tre* coordinate.

Domanda: ora possiamo recarci all'appuntamento in quattro e quattr'otto, certi di non fallire l'incontro? Un accidente, che possiamo! Se non decidiamo anche *quando* vederci con l'amico, seguita a mancare una delle informazioni fondamentali. Possiamo cercare di generalizzare l'idea dell'appuntamento con il termine "evento" – rileggete l'ultima parola –: *tre* coordinate spaziali determinano *dove* in senso geometrico, e *una* temporale ci dice *quando*. Di conseguenza, ci servono *quattro coordinate* in tutto. In questo senso, il tempo potrebbe essere pensato come la famigerata quarta dimensione, o meglio: coordinata; viviamo immersi nello spazio, ma anche nel tempo. E badate: ho appena usato il termine evento in senso molto tecnico, per definire un avvenimento in un certo luogo e a un certo tempo.

Cerchiamo di memorizzare quest'ultimo concetto, perché è ancor più importante del contenuto scottante della valigetta di Preston, e torniamo al discorso sul tempo. Stranamente, esiste un metodo poco ovvio, ma scientificamente molto preciso, per mezzo del quale possiamo giostrare col tempo fino ad assimilarlo a una *dimensione di tipo spaziale nel senso stretto del termine*, proprio come la strada, il numero civico e il piano nell'esempio precedente. E perfino *sommarlo* a una distanza. Non c'è trucco, non c'è inganno, e vediamo come si fa. Scusate: il trucco c'è; l'*inganno*, però, no.

Anzitutto bisogna risolvere la prima, e la più importante, tra le difficoltà che s'incontrano in questo percorso: spazio e tempo sono due *entità* diverse tra loro, e alle scuole elementari ci hanno insegnato che non si possono sommare mele e pere. Come facciamo a *gestire* spazio e tempo allo stesso modo? La risposta è semplice, una volta che qualcuno l'abbia suggerita: il tramite fra i due è la *velocità della luce*.

Se ben ricordate, infatti, Einstein comprese per primo che *c* è il cardine attorno al quale ruotano tutte le leggi dell'universo. Per esempio, il valore numerico di *c* (nel vuoto: scusate, ma avevo dimenticato di precisarlo) è sempre costante, non importa come esso sia misurato e quale sia la velocità del misuratore rispetto a chiunque altro. Ora, noi sappiamo bene cos'è una velocità, anche se lo ripeterò perché sono prolisso per natura: è il rapporto tra uno spazio

e un tempo. Ciò dovrebbe permetterci d'intravedere la strada da imboccare: cosa si ottiene se *si moltiplica un tempo per una velocità*? Scriviamolo su un pezzetto di carta:

$$t \times V = t \times \frac{S}{t} = S$$

Vale a dire: dopo il primo segno di uguaglianza, il tempo che moltiplica (e quindi *si trova al numeratore*), e quello *al denominatore* della frazione, si elidono a vicenda, e il risultato è uno spazio  $S$  puro e semplice. Ora, immagino che il lettore, ragionando su questo banalissimo trucco dell'aritmetica di quarta elementare, sia già arrivato alla conclusione: poiché tutte le velocità sono relative tranne quella della luce, che è *assoluta*, il sistema suggerito da Madre natura per ragguagliare il tempo allo spazio, e trattarlo come quarta coordinata geometrica, è quello di moltiplicare  $t$  per  $c$ . In questo modo, anziché dire: «Un secondo», affermeremo «Trecentomila chilometri», e non potranno esistere equivoci sul valore di questa quarta coordinata poiché, essendo  $c$  uguale per tutti, anche il tempo  $t$  così trasformato avrà lo stesso valore per chiunque.

Operando in questo modo, la Relatività giunge a trattare spazio e tempo come due facce della stessa medaglia. Le tre coordinate spaziali ortogonali tra loro, che già da prima di Cartesio erano utilizzate per rappresentare lo spazio a tre dimensioni, e molto spesso prendono la definizione di asse delle  $X$ , delle  $Y$  e delle  $Z$ , vanno associate all'asse  $c \times t$  (d'ora in poi semplicemente  $ct$ ), che scandisce il tempo.

Attenzione, però, perché ho parlato di *due facce*, e non di una faccia sola. Sulla prima faccia ci sono le tre coordinate spaziali tradizionali, sull'altra  $ct$ . Questo avvertimento ci fa pensare a qualche difficoltà aggiuntiva. Infatti, difficoltà ce ne sono e adesso le vedremo con calma; a volte potremo disinnescarle, a volte non del tutto.

La prima difficoltà concettuale è piuttosto grave. Per noi non è un problema immaginare tre assi ortogonali  $X$ ,  $Y$  e  $Z$ , o addirittura comporli nello spazio: si prendono tre stuzzicadenti, si dispongono perpendicolari uno rispetto all'altro come se costituissero il vertice di un cubo, e basta una goccia di super colla a fissare in primo luogo le nostre dita e poi, se ci riusciamo, anche i tre stuzzicadenti dove si uniscono. Fin qui è tutto semplice ma ora come si fa ad aggiungere l'asse  $ct$ ?

Infatti, se decidiamo di trattare quest'asse come una vera e propria coordinata spaziale, e rappresentarlo nel modellino di colla, legno e pelle umana, servirebbe aggiungere un quarto stuzzicadenti, contemporaneamente perpendicolare a tutti e tre gli altri. Pensateci quanto volete, ma non si può fare. Ora: spazio e tempo riescono a viaggiare assieme nelle formule senza che il fatto debba necessariamente recarci disturbo. Anzi: una volta mandato giù il fatto – incomprensibile a sua volta – che la velocità della luce sia la stessa per chiunque, la procedura utilizzata poc'anzi per trattare il tempo come quarta dimensione *tout court* ci potrebbe sembrare addirittura una furbizia. Resta però che noi siamo creature a *tre dimensioni spaziali*, e non riusciamo a costruirci un modello mentale della quarta, più di quanto il pianimale con cui abbiamo fatto conoscenza nella Sezione I possa riuscirci con la terza dimensione.

Incontriamo qui un esempio importante di come la matematica sia abituata a trattare *entità* non meglio specificate a quattro, cinque, dieci, persino *infinite* dimensioni (uno spazio

inventato dal matematico Hilbert e molto usato in Meccanica Quantistica, ma state tranquilli: l'ho citato per esemplificare, e d'ora in poi non ne parleremo più). Si applicano in modo pedissequo le leggi della geometria, pur se la nostra intuizione, limitata, mai e poi mai riuscirà a raffigurarsi questo tipo di entità. È prassi scientifica comune, e perfino il *pianimatematico* in Sezione 4.3) lo sa fare.

Per restare al tempo, se accettiamo l'idea che la quarta dimensione spaziale possa essere "tempo moltiplicato per  $c$ ", è finalmente giunta l'ora d'introdurre il concetto di *spaziotempo*. Di conseguenza, seguitiamo a ragionare, per il momento, in termini della normale geometria euclidea che abbiamo imparato a scuola: tutte le proprietà dello spazio, non importa a quante dimensioni, sono descrivibili dalla geometria; non occorre altro. In sostanza, siccome tutte le leggi della fisica si risolvono in relazioni tra spazi e tempi, trattando anche il tempo come coordinata spaziale secondo quanto abbiamo appena imparato può darsi che dette leggi finiscano, in qualche modo, per essere esprimibili sotto forma di teoremi geometrici.

Questa intuizione, e cioè che la fisica possa essere una branca della geometria, fu evocata inizialmente da grandi matematici dell'800 come Gauss e Riemann, e divenne una realtà (parziale) grazie al lavoro di Einstein. Usando come quarta coordinata geometrica *un qualcosa* correlato a  $ct$ , e che vedremo tra breve, la geometria a quattro dimensioni che ne potremo ricavare conterrà tutta la fisica precedente all'elettromagnetismo. La realtà, come il solito, è un po' più complicata e lo scopriremo nei prossimi capitoli, ma il concetto di base è corretto. La fisica, almeno per quanto riguarda la Relatività, non è altro che la geometria dello spaziotempo.

## 7) – La Teoria dell’Invarianza

### 7.1) – Non tutto è relativo

Fermo restando che, sempre allo scopo di migliorare il Modello d’universo che sto via via costruendo a beneficio del lettore, non posso evitare di rifilargli la Relatività (quella *speciale* in primo luogo, mentre quella *generale* la vedremo nei capitoli successivi), mi piace aggiungere una serie di considerazioni tra lo scientifico e il filosofico. Parto dal pensiero di Einstein.

La sua prima definizione della nuova Teoria fu: *Invariantentheorie* ovvero, come ciascuno avrà senza dubbio compreso senza bisogno di studiare Tedesco per quattro ore al giorno come Kafka, “Teoria dell’*invarianza*”. E infatti chiunque si sarà ormai reso conto di come l’invarianza di  $c$  sia un elemento niente affatto secondario in questo modello; anzi vi debba giocare il ruolo di primo piano già preannunciato. Inoltre, l’invarianza delle leggi della fisica in ogni situazione era proprio l’obiettivo cui tendeva(no) la/e teoria/e di Einstein (ricordo che bisognerà passare attraverso la Relatività generale).

Andiamo avanti: stiamo cominciando a capire in che senso le due *categorie fisiche* in base alle quali siamo abituati a descrivere il mondo, e cioè lo spazio e il tempo, prese singolarmente debbano corrispondere a *entità relative*. Badate: ho ancora scritto *entità*, ma è meglio se cominciamo a ragionare in termini di *oggetti* perché, pur se l’esito della loro misura dipende dalla velocità di chi la esegue, il risultato che ogni misuratore ottiene è *vero*, e non esiste alcun osservatore privilegiato per il quale le cui misure siano *più vere delle altre*. Di conseguenza, non si tratta più di *entità vagamente eteree*, ma di *oggetti concreti*.

Procediamo ancora: ricordate lo scatolone del nostro primo Modello d’universo? Oltre a spazio e tempo, qual è l’altra *qualità* che ci avevamo ficcato dentro? La materia, ovviamente e, per essere più precisi e utilizzare la terminologia dei fisici, la *massa*. Ebbene: poc’anzi, parlando delle verifiche sperimentali della Relatività, ho già premesso che anche la massa è una variabile, una funzione del moto del misuratore. Per capire meglio di cosa sto parlando, torniamo al nostro esperimento ideale che vede noi sull’aereo, e il nostro amico a terra. Vuoi che siamo noi a osservare l’amico fermo all’aeroporto, vuoi che sia lui a osservarci mentre ce ne allontaniamo a gran velocità, qualora fosse possibile a entrambi misurare le nostre masse reciproche ci renderemmo conto che, per ciascuno dei due, l’altro sembra *ingrassare* sempre in proporzione allo stesso coefficiente  $\gamma$ . Di conseguenza è vero che, se non tutto, almeno quasi tutto è relativo. Eppure, noi abbiamo già cominciato a usare spazio, tempo e materia, e cioè *oggetti relativi*, nella costruzione del Modello d’universo: ha ancora senso procedere in questo modo? Sì, con le opportune precauzioni che ora vedremo.

Almeno finora, abbiamo incontrato solo una quantità davvero invariante:  $c$ . Cui vanno sommate, ovviamente, tutte le leggi della fisica, e mi concederete che non è poco! Esisterà forse, nascosto nelle pieghe della Relatività, qualche altro *invariante* cui appellarci per inalare ossigeno e perfezionare il Modello d’universo? Per nostra fortuna sì, e si tratta di un

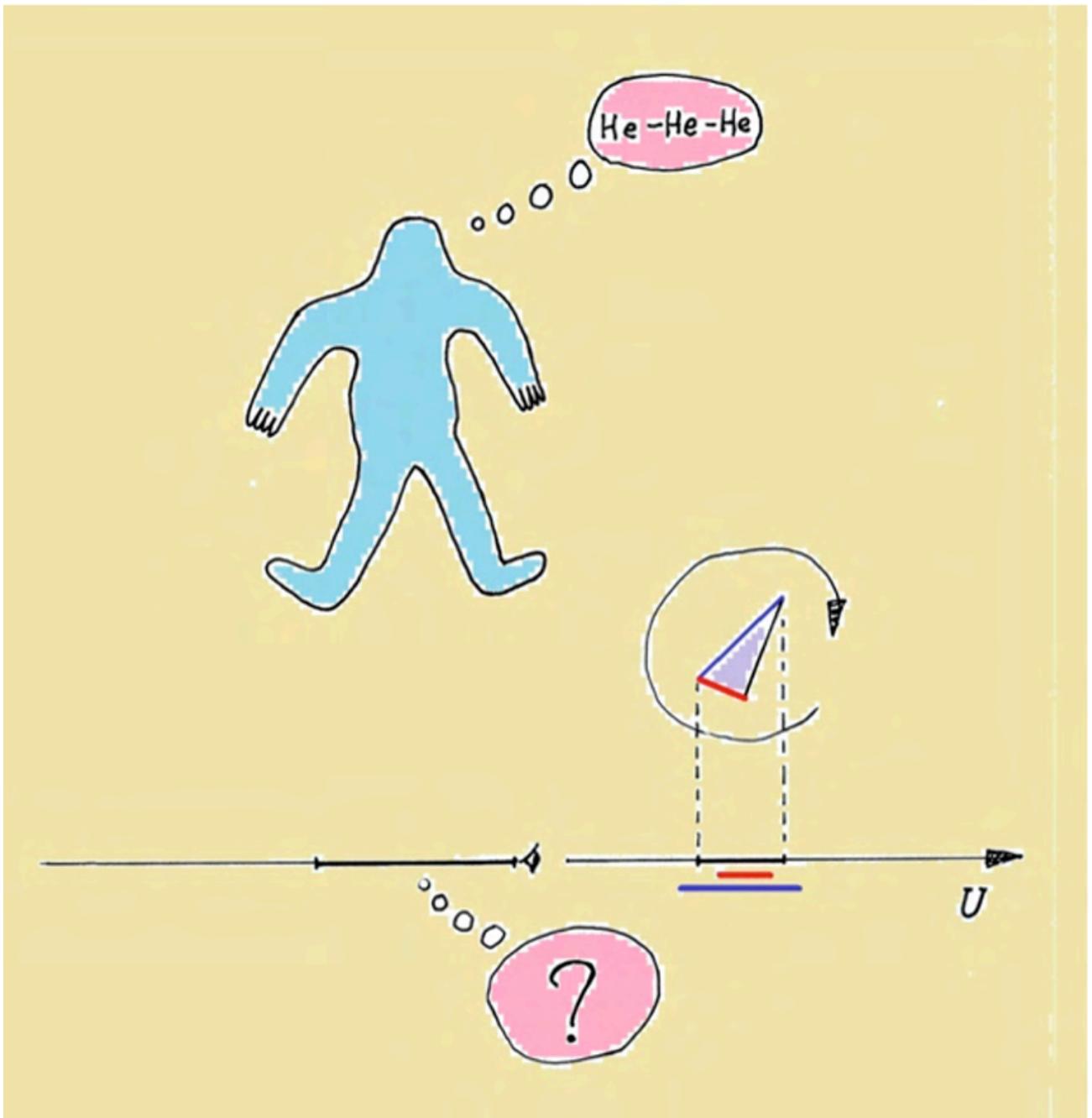
*invariante* di portata fondamentale. Purtroppo, anche questo va un po' contro l'intuizione: è il prezzo che ormai abbiamo capito di dover pagare. Pazienza; per intendere i concetti che ci porteranno a ripescarlo senza troppe formule, chiederemo nuovamente l'aiuto di un pianimale.

Suppongo che ciascuno di noi possieda, in casa, qualche simil-pianimale appeso alla parete in cornice. Può essere la bisnonna, lo zio Ilario che era tanto buono, il Duce, Stalin, Vittorio Emanuele II, Carlo Marx, il solito Kennedy, il Papa, e via scorrendo. Sto parlando di foto e dipinti, ovviamente, ma il pianimale *vero* è solo un disegno, una figura un po' particolare senza sovrapposizioni di linee, come abbiamo visto in un capitolo apposito della Sezione I. Il suo foglio di carta, limitato dalla cornice, rappresenta per lui l'intero universo, liscio, spianato. Se abbiamo assimilato bene questi concetti, possiamo proseguire col racconto delle disavventure del nostro.

La bestiola è vivace, e in qualche occasione abbiamo avuto il sospetto che sia anche un po' dispettosa. Come quella volta in cui abbiamo scarabocchiato un numero di telefono al volo proprio sul suo foglio di carta. Il mascalzone si è messo a giocare con le cifre, spostandole in modo casuale, tanto per divertirsi alle nostre spalle. Cosa che si può fare benissimo senza bisogno di uscire dal piano. Da allora ci siamo dovuti rassegnare a controllarlo spesso; specie da quando ha preteso anche lui un *suo* animale domestico minacciando, se non avessimo esaudito un desiderio così peregrino, di scrivere parolacce sul foglio alla presenza di ospiti.

Si è contentato di un *pianicane* o di un *pianigatto*? Nulla di così semplice. Così come noi, per impostare semplici analogie geometriche a più dimensioni, non abbiamo saputo far di meglio che rinunciare a una delle tre dimensioni del nostro spazio normale e limitarci al caso bidimensionale (per questo ci serviamo di un pianimale), lui ha portato l'analogia un passo oltre, e si è fatto regalare una bestia a una sola dimensione. Si tratta di un *animale* e, dal nostro punto di vista, è un essere noiosissimo: un banale segmento che trascorre la sua vita lungo una retta. Questa retta, infatti, rappresenta il suo intero universo che d'ora in poi, per comodità di discorso, chiameremo soltanto *U* (l'animale, per la verità, non sappiamo come sia stato battezzato; per motivi che vedremo, provvediamo noi a completare la sua scheda di Stato civile: il suo nome è "*Unitagora*"). In ogni caso il pianimale sembra divertirsi lo stesso, e gioca tiri mancini al povero Unitagora, che di certo non può reagire. Seguiamo il dipanarsi dei giochetti malvagi, pronti a intervenire se le cose vanno oltre il limite del tollerabile.

Che cosa sta facendo ora, per esempio, il pianimale? Ha tracciato un triangolo rettangolo nel piano in cui vive, e si diverte a ruotarlo (figura 7.1). A forza di girare, la proiezione del triangolo su *U* è una linea di lunghezza sempre diversa. Quando si tratta dell'ipotenusa, la lunghezza è massima; scende invece al minimo quando tocca al cateto più corto. Il perfido scopo del nostro pianimale è evidente; sta cercando di far impazzire l'animale: vuole convincerlo che *tutto è relativo*!



**Figura 7.1**

Bisogna ammettere che, in un primo tempo, l'animale non si capacita: perché quell'altro segmento, che si trova sempre nel suo universo  $U$ , si stringe e si allarga fra due estremi? Lui aveva sempre creduto che il suo mondo a una sola dimensione fosse un luogo tranquillo e forse anche troppo prevedibile, ma ora sembra che tutto sia diventato caotico, e gli oggetti non abbiano più una lunghezza fissa.

In effetti, se ancora non ci aveste pensato, dovrete convenire che, dal punto di vista dell'animale, la proiezione lungo  $U$  di qualcosa che si trova nel mondo a due dimensioni del pianimale, rappresenta un *oggetto fisico* strettamente parlando.

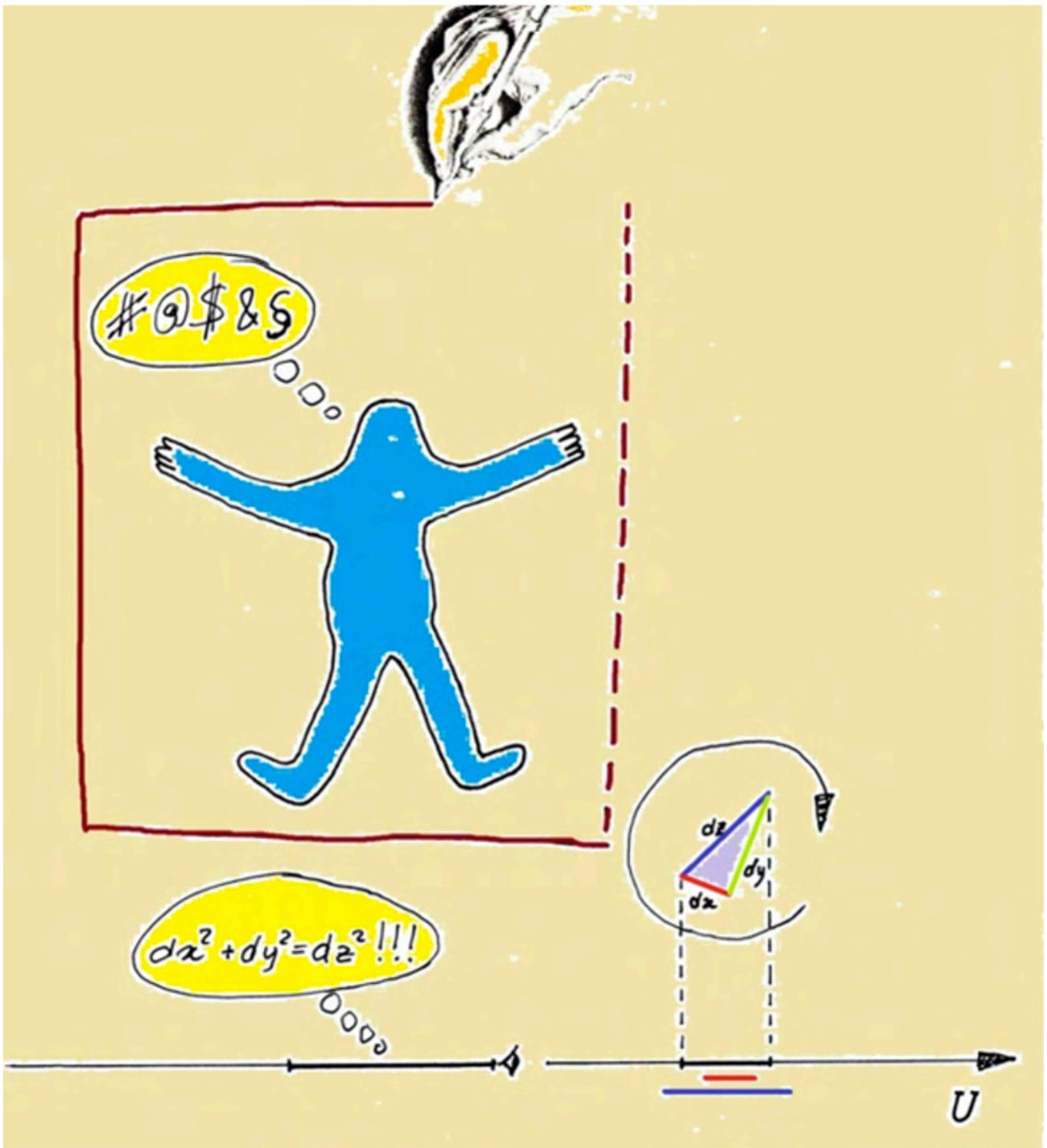


Figura 7.2

L'unimale, però, si rivela molto più intelligente di quanto ci si aspetterebbe da una bestiola così elementare, e intuisce il trucco. Ragiona a lungo e, pur non essendo in grado di visualizzare in *modo intuitivo* un'altra retta che sia perpendicolare a  $U$ , che per lui è tutto il mondo, si rende conto di poterla descrivere per mezzo della matematica.

Il nostro *Unitagora* – a questo punto è chiaro perché lo abbiamo battezzato così – scopre perciò il teorema di Pitagora (Figura 7.2). Quello strano oggetto, che a lui sembra dover cambiare in continuazione, è soltanto la proiezione su  $U$  di un oggetto a due dimensioni che sta ruotando in un piano. Pure quest'ultimo è un concetto che sfugge alla sua intuizione e forse, invece di “*piano*”, userà la dizione: “*Iperlinea*”, così come noi diciamo spesso *iperspazio* per indicare uno spazio con dimensione superiore a tre, ma quel che conta è che Unitagora abbia colto nel segno.

Seguiamolo nei suoi ragionamenti. Tanto per iniziare, definisce  $dx$  la lunghezza minima dello strano oggetto. La massima, invece, la chiama  $dz$ . Ora, con un ardito sforzo di fantasia, che è il vero colpo di genio, intuisce che, nel momento in cui la lunghezza da lui misurata è  $dx$ , ci sarà anche una proiezione dell'oggetto ruotante su una retta che, però, è *perpendicolare* al suo universo  $U$  (badate bene: anche se per lui non è possibile, per mezzo dell'intuizione, *visualizzare* la retta *perpendicolare*, la sa trattare matematicamente), e questa proiezione sarà lunga  $dy$ .

A questo punto, il gioco è fatto: la formuletta è  $dx^2 + dy^2 = dz^2$ . Non c'è più nulla di *relativo*; le lunghezze  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  sono *assolute*, ed è solo il ruotare della figura geometrica rispetto al suo universo  $U$  che gli dà l'impressione di trovarsi di fronte a un oggetto di lunghezza variabile.

Il pianimale è furioso perché la sua burla non è riuscita, e grida infamie. Bisogna punirlo: prendiamo una matita e disegniamo attorno a lui un rettangolo, con un lato tratteggiato. Ecco, ora è in gabbia, e il tratteggio simula le sbarre. Non ne potrà uscire finché non decideremo di cancellare almeno un lato della cella. Infatti, la dispettosa bestiola non è in grado di *scavalcare* il contorno che lo circonda. Per riuscirci, lo ricordo sempre per evitare equivoci, si dovrebbe sporgere un po' in fuori, nella terza dimensione, ma lui non sa neppure immaginarla perché, a differenza di Unitagora, ha studiato la geometria poco e male. Peggio per lui, brutto ignorante!

In questo esempio uni e bidimensionale, un po' tirato per i capelli, abbiamo trovato qualcosa di *invariante*, laddove sembravano esserci solo quantità *relative*, e cioè le proiezioni su  $U$  del triangolo. Allora ci viene in mente una pensata peregrina: noi viviamo in un mondo a tre dimensioni spaziali e una temporale, tutte e quattro rigorosamente *relative* come Einstein ci insegna; siamo d'accordo? Ebbene: prendendo lezione da Unitagora, non sarà possibile anche per noi ritrovare qualcosa d'invariante scrivendo un *teorema di Pitagora a quattro dimensioni*, e cioè mettendo assieme spazio e tempo? La risposta è affermativa pur con una distinzione di non poca importanza, e ora vedremo come.

Abbiamo già definito un *evento*, come un avvenimento che ha luogo in un qualsiasi punto dello spazio, e in un momento a piacere. L'esempio classico di evento, che si trova in ogni libro sulla Relatività, è quello di una lampadina che si accende “*qui e ora*”. Lo definiremo  $A$ . Lo spegnersi della stessa lampadina “*lì e dopo*” è un altro evento  $B$ . Fin qui non dovrebbero esserci problemi, no?

Ebbene: misuriamo le distanze nello spazio e nel tempo tra i due eventi  $A$  e  $B$ . Sappiamo già come lavorare con le coordinate spaziali; disegniamo i tre assi cartesiani, annotiamo su di essi le tre proiezioni della distanza tra “*qui*” e “*lì*”, e definiamo queste proiezioni, rispettivamente,  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$ . Invece, l’intervallo di tempo misurato tra “*ora*” e “*dopo*” sarà per noi  $dt$ . In analogia a quanto appreso da Unitagora, costruiamo un **teorema di Pitagora a quattro dimensioni** ricordando che, per ragguagliare il tempo a una distanza, bisogna moltiplicarlo per  $c$ .

Se chiamiamo  $ds$  l’**ipotenusa a quattro dimensioni**, che sarebbe la **distanza spaziotemporale tra i due eventi  $A$  e  $B$**  – e non importa se non riusciamo a visualizzarla col pensiero purché possiamo trattarla per mezzo della matematica – abbiamo la formuletta (7.1):

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + c^2 dt^2$$

L’intuizione suggerisce che, in analogia al risultato ottenuto da Unitagora, la quantità  $ds^2$  (o  $ds$ , che è la sua radice quadrata) dovrebbe rimanere **invariante** per qualunque osservatore. In che senso? Ecco: se un viaggiatore si trovasse in moto relativo rispetto a noi, già sappiamo che misurerebbe distanze spaziali tra  $A'$  e  $B'$  diverse dalle nostre (per ricordare che sono quelle misurate dal viaggiatore in moto le scriveremo coll’apice)  $dx'$ ,  $dy'$  e  $dz'$ , e anche una distanza temporale differente  $dt'$ . Ora: se il viaggiatore utilizzasse pure lui la formula qui sopra, adottando però le **sue** coordinate (quelle con l’apice), dovrebbe trovare lo stesso valore  $ds'^2 = ds^2$  che abbiamo trovato noi.

L’idea, insomma, è che tempo e spazio non siano altro che **proiezioni** di un’entità a quattro dimensioni, che **ruota** nello spaziotempo. Secondo questo modo di vedere, suggeritoci sempre da Unitagora, la **distanza spaziotemporale** tra  $A$  e  $B$  rimarrebbe **invariante**, ma noi la scomporremo in **spazio** e **tempo** in un certo modo, e un osservatore in movimento rispetto a noi lo farebbe in un altro modo. Il teorema di Pitagora a quattro dimensioni, in sintesi, sarebbe la maniera per mettere d’accordo tutti gli osservatori indipendentemente dalla loro velocità, e ci permetterebbe di recuperare qualcosa d’**invariante** e cioè, e scusate se mi ripeto, la distanza spaziotemporale tra i due eventi  $A$  e  $B$ . Abbiamo colto nel segno?

Quasi, ma non del tutto. Madre natura ha le sue vie imperscrutabili e, poiché già non ci sembra per nulla intuitivo che  $c$  abbia lo stesso valore numerico per qualunque osservatore indipendentemente dalla sua velocità nei confronti della sorgente luminosa, neppure ci dovremo meravigliare troppo se anche il teorema di Pitagora, riveduto e corretto, si presenterà in un modo un po’ sconcertante. Di conseguenza, fermo restando che  $ds^2$  è davvero la quantità invariante che cerchiamo, il cui calcolo fornisce lo stesso risultato per ogni osservatore qualunque sia la sua velocità rispetto ai due eventi  $A$  e  $B$ , dovremo modificare la formuletta precedente come sopra (7.2)

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$

Guardatela bene, perché non è identica alla precedente: davanti all’addendo che si riferisce alla distanza temporale, troviamo un segno negativo anziché positivo! In questo

modo, mettendo a confronto le misure dei due osservatori, ci accorgeremo che, veramente,  $ds'^2 = ds^2$  come speravamo di ottenere.

Un momento: cosa diavolo può significare quel segno negativo? Dal punto di vista matematico, e in una maniera per noi un po' contorta e poco intuitiva, è come se, tra i due osservatori che viaggiano a velocità diversa, esistesse una certa **rotazione** dello spaziotempo, per cui **un po' di spazio si trasforma in un po' di tempo, o viceversa**. I fisici deducono che, se così non si fosse modificato il teorema di Pitagora, l'universo avrebbe presentato caratteristiche tali per cui non ci sarebbe stata alcuna possibilità di esistenza per la vita, e meno che mai per una vita complessa e autocosciente come la nostra, ma la spiegazione del perché dettagliato va oltre le mie capacità di esposizione e ne farò solo un breve cenno nella Sezione IV. Questa, infatti, è una constatazione **a posteriori**, del tutto matematica, e non è possibile inquadrala in uno schema semplice, visualizzabile con facilità. Per addolcire la pillola, possiamo considerare quanto segue: lo spazio e il tempo, per quanto possano (e debbano) essere trattati assieme sotto forma di *spaziotempo*, in qualche modo restano sempre differenti tra loro sul piano **qualitativo**. Come mi propongo di spiegarvi qui di seguito, per esempio.

Nello *spazio*, abbiamo agio di muoverci a nostro piacimento, non vi pare? A parte la fatica di salire le scale quando siamo in un campo di gravità (perché, se ne fossimo fuori o potessimo bilanciare l'attrazione terrestre in qualche modo, *salire* non costerebbe più fatica di *spostarsi lateralmente*, così come avviene per gli astronauti in caduta libera), possiamo stare fermi oppure muoverci a velocità differente in qualunque direzione. Domandiamoci, però, se è realizzabile qualcosa di analogo nel **tempo**. No di certo, e spero di riscuotere il vostro assenso su quest'ultima affermazione.

Nel tempo, la sensazione generale è che si vada **sempre in avanti**, e per giunta **tutti alla stessa velocità**, a parte i rallentamenti relativistici di cui ho fatto cenno poc'anzi. Ne consegue che spazio e tempo restano comunque due **oggetti** diversi e non immediatamente conciliabili, per cui non ci dobbiamo meravigliare tanto se, a conti fatti, dovremo trattarli in modo non del tutto simmetrico tra loro. In particolare, e questo è il punto da tenere bene a memoria ora e nel futuro, non possiamo pensare al prodotto **ct** come se fosse una quarta dimensione **spaziale** in senso stretto. Invece, prendendo nell'ultima formuletta la radice quadrata del termine  $-c^2dt^2$  con tutto il suo segno negativo, troveremo: **icdt**, dove "i" rappresenta la cosiddetta **unità immaginaria** dei matematici, che sarebbe la radice quadrata di -1.

In questo modo possiamo arrivare all'equazione seguente, la (7.3) che, forse, ha **apparenze** leggermente più familiari, ma per essere sinceri si limita solo a spostare il punto in cui l'intuizione fallisce.

$$\text{Equazione 7.3: il fondamento di tutto. } ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + (icdt)^2$$

Così ci sono tutti segni positivi come nel teorema di Pitagora, no? Ed è la stessa cosa della precedente equazione, quella col segno negativo davanti al termine temporale perché, elevando al quadrato **icdt**, bisogna eseguire la sostituzione:  $i^2 = -1$ .

Che cosa suggerisce quest'ultima equazione al nostro intuito? Che la **vera** quarta coordinata spaziale non sia il tempo moltiplicato per **c**, ma il **tempo immaginario** moltiplicato

per  $c$ , e cioè *ict*. A questo punto, però, ci rendiamo conto che stiamo solo giocando al gioco delle tre carte. Anzi: delle *quattro* carte, quante sono le dimensioni di cui si discute. Qualunque sia lo sforzo matematico che ci adattiamo a compiere, la difficoltà concettuale non fa che spostarsi da una parte all'altra, e non sparisce per nulla.

Infatti, cosa diamine significa: *tempo immaginario*? Personalmente, ammetto di non saperlo, e nessuno sembra in grado di spiegarlo, nonostante il fisico–matematico Hawking ci abbia giocato molto (ma senza giungere a qualcosa di definitivo). Solo questo si può dire: se accettiamo il concetto un po' esoterico che la quarta dimensione spaziale sia il *tempo immaginario* moltiplicato per  $c$ , il teorema di Pitagora espresso dall'equazione (7.3) vale incontrastato, e  $ds^2$  rappresenta un nuovo *invariante*. Ci aiuta tutto ciò? Mah! Forse un pochino sul piano estetico, perché recuperiamo qualche somiglianza nella scrittura del Teorema di Pitagora, non vi pare?

Breve inciso, giusto per raccontare una curiosità: nei primi decenni del secolo scorso, quando ci si riferiva alla Relatività e alla strana modifica richiesta per il teorema più famoso del mondo, si usava un linguaggio ampolloso e difficile per descrivere cose che, invece, si possono trattare (pur se non capire del tutto) con le parole molto più semplici che ho cercato di usare finora. Si parlava di "*Cronotopo Relativistico Pseudeuclideo*". Dirlo in faccia a qualcuno, sembrerebbe un insulto criptico e ci sarebbe il rischio di buscarsi un cazzotto (pensateci: «Lo sai cosa sei tu? Sei un cronotopo eccetera»), ma significa solo che la Relatività descrive lo spaziotempo (alla greca, "*kronos*" sta per "tempo" e "*topos*" per "spazio") come non obbediente del tutto alla geometria euclidea, (e perciò "pseudo–euclideo").

Vale a dire: se Euclide regnasse incontrastato, così come l'abbiamo imparato a scuola, dovremmo scrivere la prima uguaglianza (7.1), in cui anche il termine temporale avrebbe un segno positivo. Ora, Euclide regna ancora, ma qualcosa gli sfugge di mano, ed ecco la seconda uguaglianza (7.2) nella quale, a parte il segno negativo del termine temporale, tutto il resto va come ci saremmo aspettati. Chi leggeva paroloni del genere finiva per sentirsi un genio o, almeno, una persona molto importante, che le capisse o no. Questo paragrafo, per spiegare al lettore quanto poco rispetto si avesse, all'epoca, per i non addetti ai lavori, i quali erano trattati quasi come se fossero una razza inferiore, da tenere alla larga. In parte come oggi... io non lo faccio, vero? Comunque, l'inciso termina qui, e riassumiamo: cos'abbiamo imparato finora?

Bene: abbiamo imparato alcuni elementi fondamentali, dei quali non sarà possibile fare a meno nel momento in cui daremo la prima sgrossata al nostro Modello d'universo, passando dalla visione statica che ne abbiamo fornito finora a una visione dinamica che, per altre vie, già sappiamo essere più adeguata. E vediamoli uno per volta, questi elementi.

In primo luogo, la velocità della luce è un cardine della natura, e non è superabile da alcun oggetto materiale. In secondo luogo, tempo e spazio, e non solo spazio, sono misurati in modo diverso da osservatori che si muovano a velocità differente l'uno rispetto all'altro. In terzo luogo, la geometria dello spaziotempo – ormai sappiamo che spazio e tempo vanno trattati assieme, anche se in maniera non del tutto simmetrica – è correlata in un modo che stiamo appena cominciando a scoprire alle leggi della natura. In effetti, proprio a causa della costanza di  $c$  viene fuori il nuovo Teorema di Pitagora modificato (7.2), e ne discendono in modo univoco le *trasformazioni di Lorentz-Fitzgerald*, che servono a calcolare come due osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro possano ragguagliare tra loro le rispettive misure di spazio e tempo, e trovarsi alla fine in accordo sul valore di  $ds^2$ .

La relatività della massa, il fattore  $\gamma$  e tutto il resto, si riescono a costruire su queste basi e, sempre come conseguenza univoca, ne discende la più famosa formula di tutta la fisica:  $E = mc^2$ . Pur se mi guardo bene dal tentare una sua dimostrazione matematica a beneficio del lettore: non è complicatissima, ma bisognerebbe introdurre nuovi concetti e allungare una strada già estenuante e un po' tortuosa per conto suo. Il significato intuitivo della formula, comunque, è semplice: dove c'è massa  $m$ , c'è un accumulo di energia  $E$ , anche se non è detto che sia facile liberarla. E comunque, si può leggere anche a rovescio: dovunque ci sia energia  $E$ , è come se ci fosse anche massa  $m$ , con tutto quel che ne consegue anche tenendo in considerazione l'inerzia e la forza di gravità, come vedremo in un capitolo successivo.

Dunque, se vorremo aggiungere al nostro Modello anche le informazioni sulla *forma* dell'universo, sarà necessario insistere un po' sulla strana geometria quasi, ma non del tutto, euclidea. È ben vero che, finora, questa geometria ci ha richiesto un minimo di pazienza, perché non è per nulla intuitiva ma, aiutandoci con pianimali e unimali, siamo riusciti almeno ad accettare l'idea di come sia possibile scrivere teoremi geometrici a più dimensioni.

*Spazio e tempo immaginario moltiplicato per c* (7.3) rappresentano le quattro coordinate dell'universo, anche se non possiamo raffigurarci mentalmente l'ultima. E qui preannuncio il passo successivo, che cercheremo di compiere un po' più avanti, quando sarà chiamata in causa la forza di gravità: queste quattro coordinate si afflosceranno come se fossero spaghetti bolliti. Infatti, per colmo di perfidia, Madre natura non ha voluto uno spaziotempo *liscio* così come lo immaginava Euclide (e noi), pure se in questo momento tendiamo a pensare solo allo spazio: "A qualcuno piace *curvo*", è il motto della natura. Niente paura; per intuire almeno alla lontana come funzionano le cose, ci basterà architettare un brutto scherzo al nostro pianimale. Stavolta sarà lui la vittima designata, ma per fortuna non dovremo fare i conti con la Società per la Protezione dei Pianimali. Come già avvisato, non esiste (almeno per ora).

Prima di passare ad altro, però, vorrei cercare di farvi toccare con mano come le trasformazioni di Lorentz, e l'equazione che consente il calcolo di  $ds^2$ , possiedano implicazioni *filosofiche*, pur se queste non sono evidenti di primo acchito. Se volete potete passare direttamente al capitolo successivo, poiché quanto sto per raccontare è un po' complicato e, in fin dei conti, poco significativo per il nostro scopo fondamentale, che è la costruzione di un Modello d'universo sempre più realistico, ma per i curiosi sta per arrivare una chicca, sempre che abbiano il coraggio di giocare un po' assieme a tale professor Hermann Minkowski nella costruzione di diagrammi spaziotemporali.

## 7.2) – Minkowski e il “cane pigro”

Questo Hermann Minkowski di cui si diceva, era un professore di Einstein all’università, a Zurigo. Temibile quanto il suo stesso nome suggerisce, considerava il povero Albert “un cane pigro”. Badate bene: la traduzione in italiano suggerisce contenuti eccessivamente negativi, che non sono presenti nella dizione tedesca o inglese. Un *lazy dog* è semplicemente un tipo che se la prende un po’ comoda, e niente di più: l’enfasi è sull’aggettivo, e non sul sostantivo. Esempio: se abbiamo fame, non ci verrebbe in mente di mettere il cane nel forno a microonde, dargli una scaldata e mangiarlo, no? Invece, non avremmo difficoltà a mangiare un *hot dog*, magari con la senape. Insomma, in queste frasi idiomatiche il *dog* è *qualcosa* o *qualcuno* e basta. Capito il paragone?

Ebbene: il nostro Hermann era un individuo intellettualmente onesto. Appena seppe della Relatività speciale, fu tra i primi a comprenderne il valore, e proprio a lui dobbiamo il concetto di *spaziotempo*, esposto per la prima volta nel 1908 a un congresso scientifico tedesco. Quando Einstein ne ebbe notizia, il Grande uomo si comportò da *piccolo uomo*, forse memore della disistima espressa nei suoi confronti da Minkowski al tempo dell’università. Infatti, bollò il lavoro del suo ex – professore come “inutile erudizione”.

Solo dal 1912 in poi, anche lui cominciò a prendere sul serio il concetto e a lavorarci sopra, ma Herr Professor Hermann non poté godersi la rivincita, poiché se ne era già andato all’altro mondo (dove vige la più assoluta geometria euclidea, mi dicono) nel 1909, per una banale appendicite non presa in tempo. Noi renderemo tardivo omaggio a Minkowski introducendo qui il suo diagramma spaziotemporale. Per farlo in termini almeno vagamente comprensibili, perfino il pianimale sarebbe di troppo, e dovremo servirci dell’umilissimo, ma stavolta comodissimo, animale. Seguiamo a chiamarlo per nome: Unitagora.

Il suo intero universo, come sappiamo, è rappresentato da una linea retta  $U$ , e su di esso si muove il povero Unitagora, verso destra o verso sinistra alla velocità che preferisce, basta che non superi  $c$  perché questo limite vale anche per lui. Lo vediamo nella figura 7.3, e supponiamo di muoverci assieme a lui in modo da essere fermi l’uno rispetto all’altro.

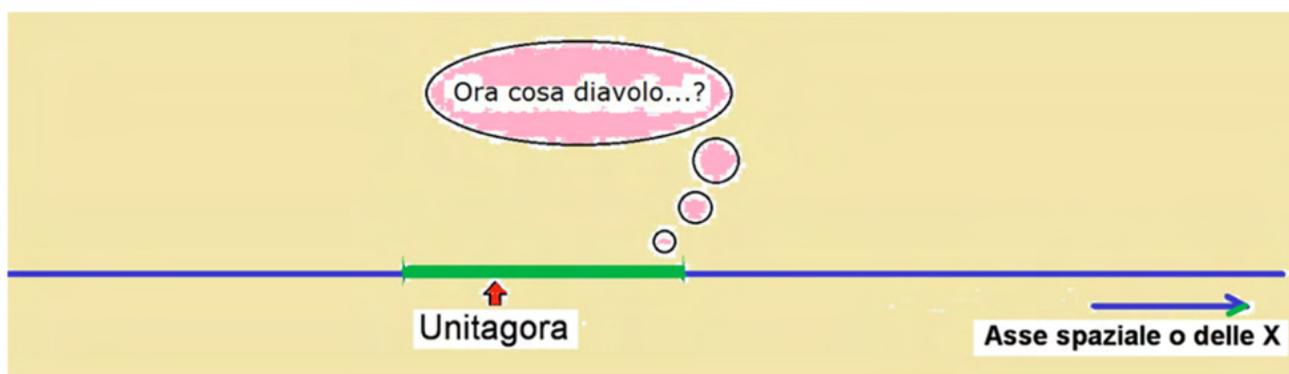
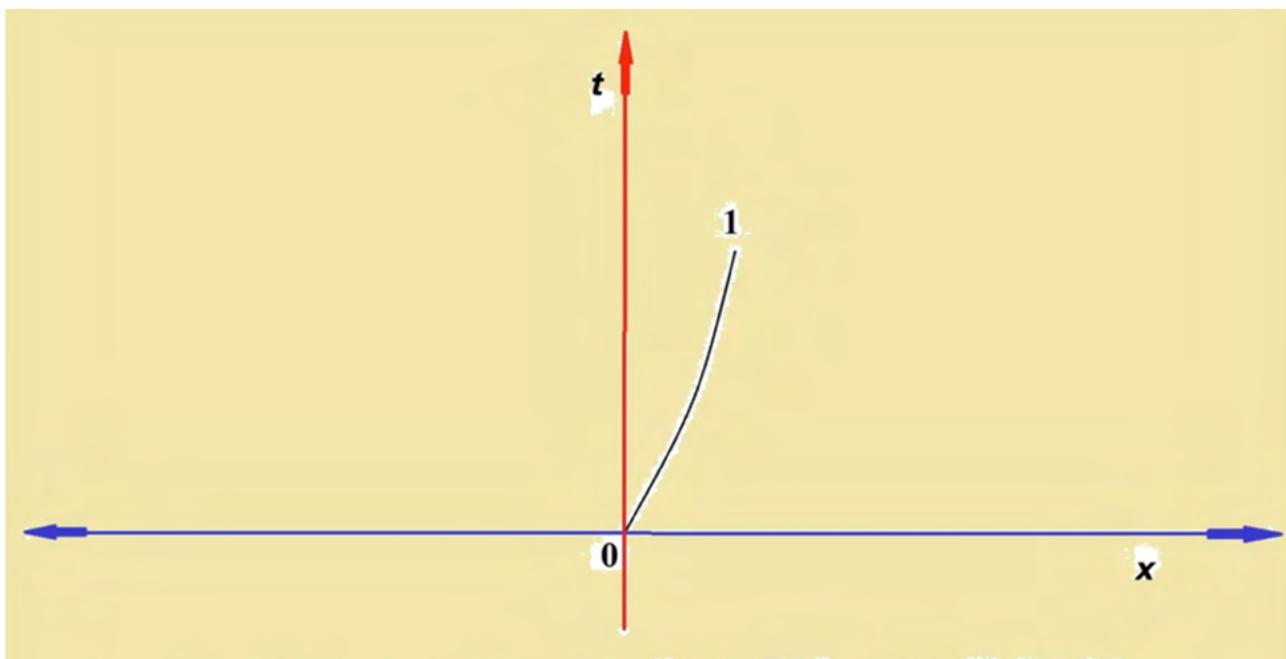


Figura 7.3

Attenzione: la bestiola è furba, e ha inteso che stiamo per giocargli un brutto tiro. Nel frattempo, per procedere alla costruzione del diagramma, occorre aggiungere un secondo asse

perpendicolare a  $x$ , che rappresenta il tempo. Il tempo puro e semplice, nessuno si spaventi, pur se abbiamo imparato che *la quarta dimensione spaziale* è il *tempo immaginario*. Tracciamo, dunque, quest'asse, perpendicolare a quello del mondo in cui vive Unitagora, e sarà il banale asse del tempo. Al trascorrere di quest'ultimo, di conseguenza, tutti gli oggetti che sono contenuti sull'asse dello spazio  $x$  si sposteranno via via verso l'alto, e anche questo dovrebbe essere facile da intendere, no? Si sposteranno assieme all'asse spaziale stesso, ovviamente, ma se disegnassimo pure quest'ultimo ci sarebbe solo una gran confusione, e di conseguenza disegneremo solo le traiettorie degli oggetti.

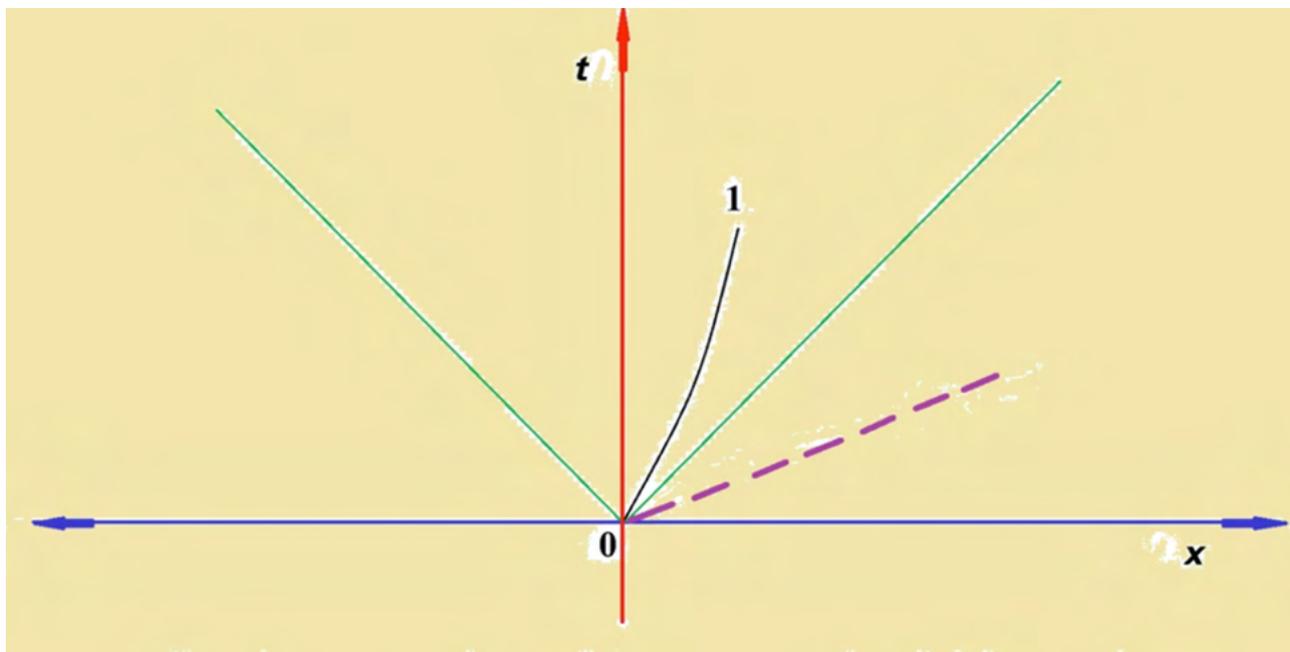
E quindi, se Unitagora cominciasse a muoversi anziché stare fermo, la sua posizione (per rendere le cose più semplici possibile, segniamo soltanto quella del suo centro geometrico), si sposterebbe non solo nel tempo, ma anche nello spazio. In Figura 7.4, la curva che va da **0** a **1** mostra Unitagora che decide di muoversi verso destra. Prima con una velocità più alta, e poi più lentamente, perché la curva cambia inclinazione. Attenzione: lascio a voi il compito di riflettere bene su quanto ho appena affermato in merito alle velocità, esaminando la curva stessa.



**Figura 7.4**

E manca poco al vero e proprio diagramma spaziotemporale di Minkowski. Per arrivarci decidiamo che, se i tempi sono indicati in secondi, e cioè tra due tacche successive sull'asse  $t$  è passato un secondo, sull'asse  $x$ , e cioè quello dello spazio, tra due tacche successive ci sia una distanza pari a un *secondo-luce*, e cioè la distanza percorsa dalla luce in un secondo: **300.000** km. Sembra una scelta strana perché non siamo abituati a muoverci per distanze così grandi, ma anche stavolta è Madre natura che suggerisce come operare. Infatti, con queste scelte, *il percorso spaziotemporale di due raggi di luce che partono da 0 in direzioni opposte, sarà rappresentato da due rette inclinate a  $45^\circ$  a destra e a sinistra*

dell'asse  $t$ , denominate usualmente *rette-luce*, come mostrato nella figura 7.5, dove sono state disegnate in verde. Oh, badate: finché possibile non mi metto a disegnare le tacche sugli assi; sporcherebbero il disegno e basta. Verrà anche il momento...



**Figura 7.5**

Con questo viatico saremo in grado di trarre conclusioni sorprendenti, ma prima dobbiamo capire alcune caratteristiche basilari del diagramma. Anzitutto, nulla potrà spostarsi dall'origine 0 degli assi secondo un angolo (rispetto a  $x$ ) inferiore a  $45^\circ$ , come invece succede per la linea tratteggiata in viola su cui vi chiedo di soffermarvi un momento. Infatti, ciò significherebbe viaggiare a velocità superiore a quella della luce. Ora, Unitagora è ben conscio di questa limitazione, per cui si è mosso sempre a  $v < c$ . Al contrario, la tratteggiata viola rappresenta un moto che non può avvenire in natura, e proprio per questo è stata disegnata in modo così balzano. Se fin qui siamo d'accordo, questa benedetta tratteggiata ha esaurito la sua ragion d'essere, e finalmente possiamo lasciarla stare.

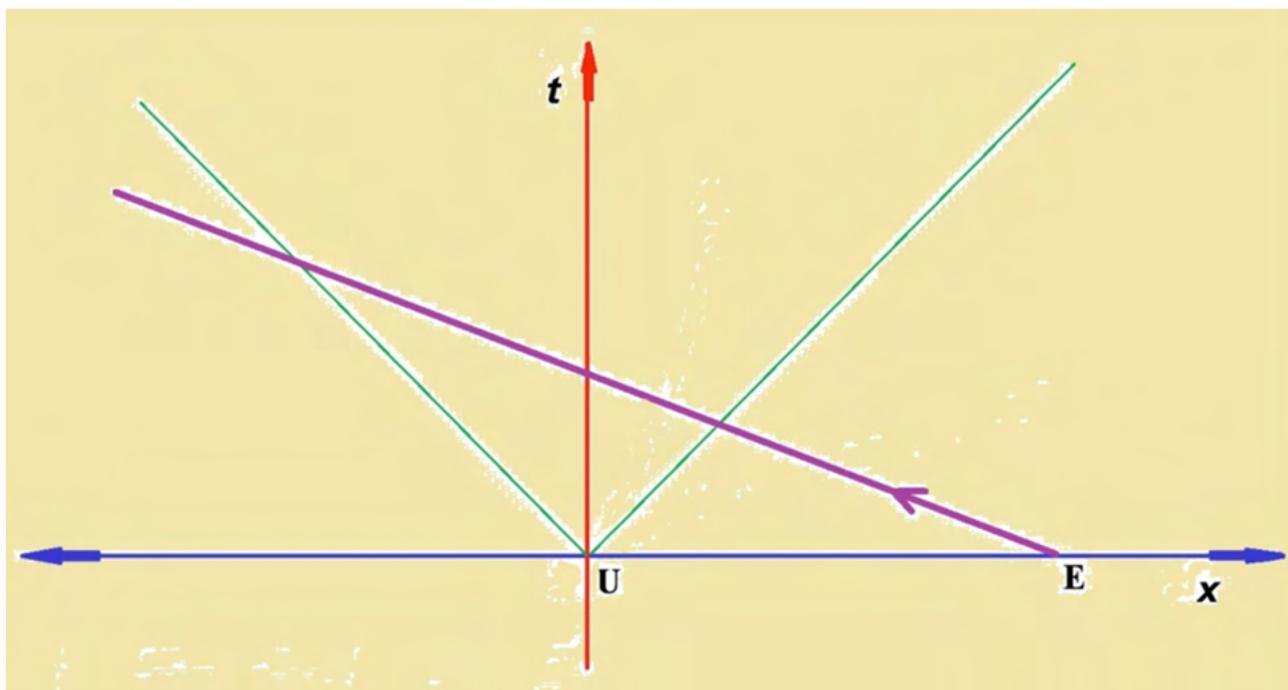
Come conseguenza di quanto appena affermato, torniamo al concetto di *causalità* e deduciamo che Unitagora, trovandosi inizialmente nel punto 0, può *influenzare*, muovendosi direttamente o inviando disposizioni via radio, solo gli eventi situati nella regione sovrastante 0 e *compresa tra le due rette-luce*. Questa regione, infatti, rappresenta il vero e proprio *futuro causale* del nostro unimale. Di converso, il suo *passato causale* è contenuto all'interno del triangolo che si ottiene prolungando all'indietro, verso tempi negativi, le due rette-luce che si congiungono in 0 e vanno in giù, ma ora è inutile scervellarsi con questo: per capire il seguito è sufficiente ragionare sul futuro che Unitagora può *causare*.

Ora facciamo conoscenza con un secondo unimale il cui nome, per fortuna, non comincia con U. Si tratta di un altro famoso geometra dell'antichità: toglietevi il cappello di fronte a *Eunclide* in persona, accidenti!

Lui si muove a velocità molto elevata verso Unitagora. E spero non vi dispiaccia se, d'ora in poi, li chiameremo semplicemente **U** ed **E**, seguitando a indicarli entrambi come punti, invece di disegnare gli *unimaletti* come due segmenti. Per essere più precisi: la velocità di **E** rispetto a **U** è nientemeno che *metà della velocità della luce* e, nel momento in cui cominciamo a tenere conto anche degli accadimenti della sua vita, **E** si trova a una certa distanza da **U**, alla sua destra.

Ora viene la domanda da un miliardo di €: attenzione perché i concetti si fanno sottili, pur se il lettore ha già abbastanza nozioni da poterli seguire. Come potremo raffigurare l'*asse spaziale* (attenzione: solo quello spaziale!) di **E**, vale a dire quello del suo *presente*, volendo tracciare anche per lui il diagramma di Minkowski *suo personale*? Il buon senso direbbe: «Ho vinto il miliardo di €, perché la domanda è stupida! Infatti, se **E** vive nello stesso universo di **U**, e stiamo parlando di un universo unidimensionale, allora c'è uno e un solo universo per entrambi, ed è sempre la stessa linea lungo la quale si muove **U**. Dunque, fuori i soldi!»

Mi dispiace, ma i soldi restano qui, e comunque l'offerta era retorica perché non li avrei. Però vi sgrido: possibile che seguitiate ad abbarbicarvi al *buon senso*? Lo stesso buon senso che suggeriva di mettere un segno *positivo* davanti a  $c^2 dt^2$  nel teorema di Pitagora a quattro dimensioni, e che s'ingannava? Infatti, s'inganna anche stavolta. Quel maledetto segno negativo sconvolge il diagramma di Minkowski di **E** in una maniera che non ci sarebbe mai venuta in mente.



**Figura 7.6**

Ed ecco mostrato in che modo nella Figura 7.6. Fissiamoci ancora un momento su **U** e ricordiamo: la retta orizzontale  $x$  è il suo *presente*, e la zona compresa tra le due rette-luce in colore verde è il suo *futuro*, d'accordo? Ora puntiamo la nostra attenzione su **E**, il quale si

muove a velocità  $c/2$  in direzione di **U**. Ci credereste se vi dicessi che il *presente* di **E**, ovvero il suo *asse spaziale*, è niente meno che la linea inclinata spessa, di colore viola, che parte proprio da **E**? Vale a dire che, che per Unitagora ed Euniclide, la visione dello stesso universo unidimensionale non coincide per nulla, ma è come se l'universo stesso fosse *ruotato nello spaziotempo*?

Scherzi della geometria *quasi euclidea, ma non del tutto*. Tenendo pure conto del fatto che, alle dimensioni spaziali, dobbiamo comunque sommare (comporre, se preferite) anche una dimensione temporale, e quindi gli universi di **E** ed **U** si estendono, secondo le regole trovate a suo tempo da Lorentz, *a tutto il piano*. Di conseguenza, non c'è alcun motivo per imporre che entrambi i *presenti* dei due unimali coincidano con una e una sola linea spaziale, posto che essi si muovano l'uno rispetto all'altro. Essi non vivono, separatamente, nello spazio e nel tempo, ma nello *spaziotempo*, che nel loro caso ha due dimensioni. E perciò, sono possibili *invasioni di campo* come quella appena descritta.

Si può dimostrare matematicamente, certo, ma non voglio perdere proprio qui alcuni Lettori già vacillanti. Dunque, diamolo per dimostrato e non cerchiamo di spremerci le meningi più di tanto: già da qualche tempo abbiamo capito che la Relatività ci costringe a buttare il buon senso alle ortiche. E allora, accetteremo *obtorto collo* questa situazione che ci sembra surreale, e invece tenteremo di trarne delle conseguenze. Esaminiamo quindi la Figura 7.6.

C'è un tratto del *presente* di **E** che interseca il *futuro* di **U**. Inoltre, se spostassimo **E** sempre più lontano da **U**, il presente di **E** andrebbe a invadere regioni del futuro di **U** via via sempre più in avanti nel tempo. D'altro canto, ormai sappiamo che né Unitagora, né tanto meno Euniclide, hanno il diritto di reclamare il proprio punto di vista come quello *giusto*. Tutt'e due *hanno ragione* e basta. E perciò, in qualche modo paradossale, *il futuro di U è già in atto per E*, giacché coincide col suo presente (il suo *asse spaziale*).

Qui non vorrei complicare ulteriormente la faccenda, ma è necessario che io faccia anche notare al lettore quanto segue: se **E** si fosse *allontanato* da **U** anziché *avvicinarsi*, la retta del suo presente sarebbe stata ribaltata *sotto* l'asse delle  $x$ , e dunque, in quel caso, **E** avrebbe trovato il *suo presente* nientemeno che nel *passato* di **U**! Perciò, i concetti di presente, passato e futuro, sono pur essi *relativi a chi sta eseguendo la misura*. Vogliamo trarre, da queste considerazioni, alcune conseguenze filosofiche pressoché inevitabili? Lo faremo nel prossimo capitolo.

## 7.3) – Il pancarré cosmico

Lasciamo per un attimo la Relatività sulla soglia dell'uscio: incombe sempre, ma per il momento non la utilizzeremo. Torniamo alla vecchia fisica di Galileo e Newton, in cui la distinzione tra passato, presente e futuro era ovvia a priori. Nell'universo esiste un grande orologio, e l'ora da esso segnata è la stessa per chiunque, in qualsiasi luogo si trovi e per ogni velocità alla quale possa muoversi.

Scomodando di nuovo il mondo pianimale, si può pensare l'universo newtoniano come un pancarré di enormi dimensioni, letteralmente cosmiche, le cui fette sono estese in ogni direzione. Per di più, il pancarré è *affettato* come in figura 7.7. Ogni fetta (dovrebbero essere sottilissime, infinitesime, ma il lettore avrà capito che non sono un granché come disegnatore, e basta così) rappresenta un istante di tempo, e l'unica fetta *reale* è quella del momento presente.



Figura 7.7

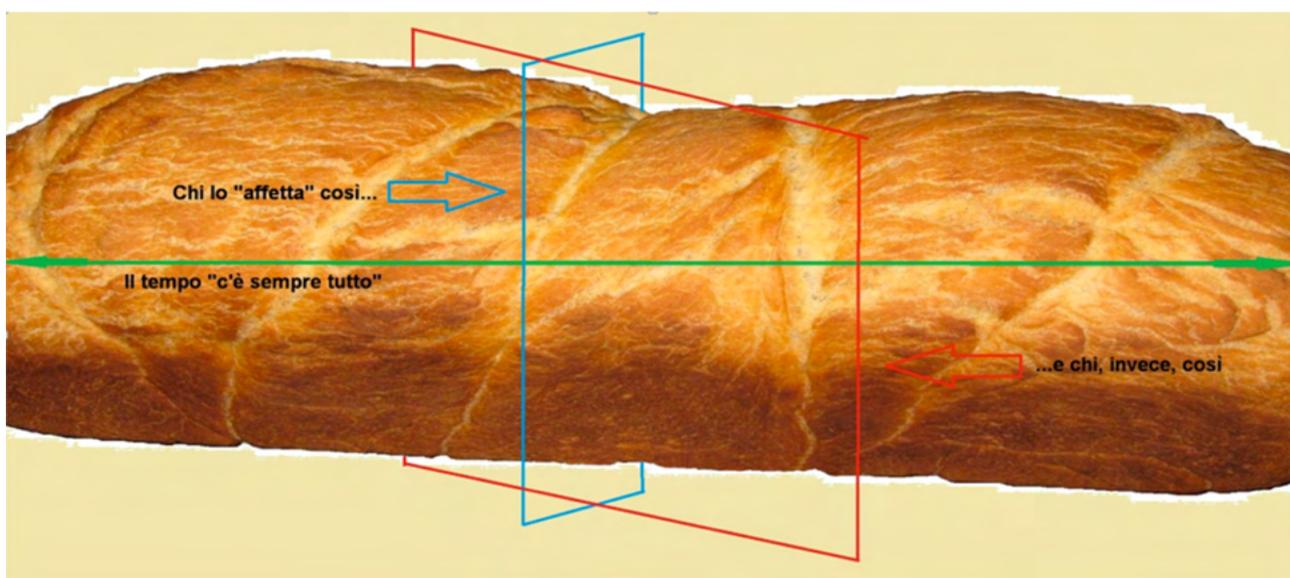
Dietro di essa c'è il passato, che è abbastanza *solido* per quanto riguarda quello prossimo (linea continua o tratteggio grosso), poiché sono gli avvenimenti di quest'ultimo a dominare il presente in modo facilmente percepibile. Quando ci allontaniamo verso il passato remoto, però, questo diventa più sfumato (tratteggio fine) perché si dimentica pian piano, finché il ricordo svanisce totalmente.

E per il futuro? Ebbene: le sue fettine arriveranno una per volta e, secondo Newton, che era un credente al calor bianco al punto di essere eretico e dover tenere per sé le proprie idee religiose, ciò che ognuna di esse porterà sarà determinato dal gioco tra il volere di Madre

natura espresso dalle sue leggi, e quello di Dio. Un futuro che ancora non esiste per la sua valenza teologica, quindi, e si precisa sempre meglio (notate il diverso tratteggio) al suo avvicinarsi.

Curiosità: perché il nostro doveva segretare le sue idee da eretico ariano, che cioè riconosceva in Cristo la sola natura divina e non anche quella umana? Perché sennò l'inquisizione della chiesa Anglicana (c'era pure quella, ed era ben nota per bruciare le streghe) gli avrebbe fatto passare qualche brutto minuto col cappio al collo.

La Relatività, però, è stanca di sentir blaterare di un residuo dei secoli andati come Newton, e per giunta dover aspettare all'uscio, per cui entra di prepotenza cambiando radicalmente le carte in tavola. Infatti, se il mio passato e futuro (ovvero ciò che non è più e ciò che non è ancora) possono essere il presente (e quindi ciò che è in atto proprio in questo momento) di qualcun altro, secondo quanto siamo distanti e come ci muoviamo l'uno rispetto all'altro, ne dobbiamo dedurre che *il pancarré cosmico è già tutto presente, non solo come spazio, ma anche come tempo*. Tutte le infinite fettine in Figura 7.8 sono lì, assieme, coesistenti, in attesa che qualcuno prenda un coltello e...



**Figura 7.8**

Stiamo arrivando a una conclusione sconvolgente: ogni evento esistente, esistito o che esisterà, è *già in atto da sempre e per sempre*, come il pancarré tutto intero, e osservatori in moto l'uno rispetto all'altro lo stanno solo affettando in modo diverso, come avviene coi piani in blu e in rosso di Figura 7.8.

In sostanza, mentre l'universo newtoniano è “*temporale*”, vale a dire “*con il tempo che passa*”, quello di Einstein è “*atemporale*”: un blocco solido di spazio e tempo completo da tutte le parti. Il trascorrere del tempo come lo percepiamo noi umani è soltanto un'illusione dei nostri sensi, e *tutto* il futuro è già predeterminato. Per un osservatore “*esterno*” (ma chi? Dio? Al contrario di Newton, Einstein non credeva in una divinità che fosse anche “*Persona*”,

ma era piuttosto un panteista alla Spinoza), tutto il tempo che passa dal Big Bang in poi è *visibile nella sua interezza*. Una sorta di *baguette* infinita? Forse.

Spero siate d'accordo con me nell'ammettere che, per i filosofi del primo '900, questo cambiamento radicale nel modo di concepire l'essere e il divenire, avrebbe dovuto condurre a un riesame globale delle tradizionali categorie filosofiche. In realtà, oltre alla solita solfa del «Tutto è relativo» (che mandava in bestia il povero Einstein, il quale insisteva che la Relatività si applica solo alla fisica e non alla società), non pare si sia mosso molto.

Domanda spontanea: stando così le cose, sarebbe possibile metterci d'accordo con un amico molto veloce il quale, recandosi nel nostro futuro, assista all'estrazione del Lotto e ci rimandi indietro nel tempo la cinquina secca da giocare? Purtroppo, non si può fare: date le limitazioni dovute all'impossibilità di superare la velocità della luce, con un po' di conti si può dimostrare come la comunicazione della cinquina ci giungerebbe comunque a estrazione già avvenuta. Peccato!

Breve inciso: all'inizio del 1955 morì un amico fraterno di Einstein, l'ingegnere svizzero Michele Besso. Scrivendo alla famiglia, Einstein affermava che: «...Lui si è dipartito da questo strano mondo un po' prima di me. Questo non vuol dire nulla. Per noi fisici convinti, la distinzione tra passato, presente e futuro è solo un'illusione tenace...». Insomma: il povero Michele si trovava poco distante da lui nel segmento spaziotemporale, e lui stesso lo avrebbe raggiunto presto (verissimo; dopo pochi mesi). Era un modo di vedere *atemporale* che costituiva una sorta di minuscola *immortalità* poiché, nell'universo relativistico, ciascuno di noi è vivo per alcuni osservatori, anche se per altri deve ancora nascere o è già morto. Per me, come immortalità, devo dire che, francamente, vale poco.

## 8) – L’universo in espansione

### 8.1) – Riprendiamo le fila sparse

Ricordate ancora il modello rudimentale di UC lasciato in sospeso qualche capitolo fa? Più di tanto non potevamo procedere, perché ci mancavano alcuni strumenti intellettuali. Qualcuno ne abbiamo acquisito parlando di Relatività speciale; ne enuncio due, selezionandoli tra quelli che a me paiono fondamentali:

1 - la nostra intuizione non è in grado di accettare, e men che meno raffigurare, concetti spaziali e temporali su scale di grandezza troppo più grandi rispetto a quelle cui siamo abituati a livello *umano*. Di conseguenza, già i prossimi approfondimenti del modello di universo saranno per forza basati su schematizzazioni e analogie, e la *realtà in quanto tale* sarà per sempre destinata a sfuggirci;

2 - la Relatività speciale, con la sua “*atemporalità*”, mostra come le misure di spazio e tempo siano relative all’osservatore che le esegue. Ciò che è *presente* per un osservatore, può essere *passato* o *futuro* per un altro. Solo la velocità della luce è *assoluta* per ogni osservatore (oltre al famigerato  $ds^2$  che ci è stato utile per capire la strana geometria dell’universo, e poche altre quantità fisiche delle quali non è necessario discutere qui).

Con questi strumenti sottomano, riprendiamo il Modello così come lo avevamo lasciato, dopodiché cominceremo ad aggiungere altri *pezzi* in senso lato.

L’universo è uno spazio enorme, la cui dimensione ci sfugge. Esso è *nato* (nella Sezione IV parleremo anche del concetto di *nascita*) dal Big Bang, **13** miliardi e **750** milioni di anni fa, minuto più, minuto meno. Lo spazio è scandito dagli *ammassi di galassie*, contenenti da poche decine, fino a migliaia di membri, e ciascuna galassia, a sua volta, ha al proprio interno miliardi, o centinaia, se non addirittura migliaia di miliardi di stelle. Al centro di ogni galassia esiste un *bucò nero* la cui massa può andare dai pochi milioni di volte quella del Sole, a diversi miliardi di volte. Quando sono molto grandi, mangiano materia in continuazione e bombardano l’intera galassia di radiazioni (ed ecco un altro *pezzo* aggiunto).

Tra gli ammassi di galassie ci sono spazi enormi *quasi* vuoti anche se, andando a fare i conti, la quantità totale d’idrogeno ed elio contenuti in questi spazi supera quella che si è condensata in stelle o galassie. Il *vuoto*, poi, non può essere considerato tale in senso assoluto, sia perché è gremito di luce e particelle di ogni tipo, sia perché – come vedremo – possiede nientemeno che una *struttura*!

Siccome l’universo ha un’età finita, e la velocità della luce è finita anch’essa, da qualsiasi punto dell’universo ne possiamo vedere solo una frazione che ci *sembra* crescere col tempo (finalmente posso preannunciare che alcuni dei pezzi più vecchi del Modello stanno per essere buttati via). Per la precisione, una sfera il cui raggio, espresso in anni–luce, è pari all’età dell’universo espressa in anni. Questa sfera, come già sappiamo, prende il nome di Universo Causale (UC). Ciò sembra risolvere il paradosso di Olbers che, invece, si

applicherebbe a un universo in cui l'orizzonte si estendesse sino all'infinito. Vedremo, però, che le cose non stanno proprio così.

In quest'universo, più un oggetto è lontano, più tempo impiega la sua luce a giungere fino a noi. Di conseguenza, non vediamo gli oggetti lontani come sono in questo momento (per quanto possa significare la *contemporaneità* in un universo relativistico in cui *tutto coesiste*), ma com'erano quando emisero la luce che giunge ora ai nostri strumenti astronomici. È questo il motivo per cui, più guardiamo lontano, più vediamo un universo *giovane*.

Fin qui eravamo arrivati. Poc'anzi, però, ho aggiunto un'informazione di tipo fenomenologico quando ho parlato di *ammassi di galassie*. Possiamo migliorare il nostro Modello prima di parlare di *espansione*, poiché il discorso sugli ammassi è ancora visualizzabile in modo intuitivo.

Le galassie sono i *mattoni* del LEGO™ cosmico. Se non si specifica altro, si potrebbe pensare a una loro distribuzione grossolanamente omogenea nello spazio, magari sparpagliate un po' a caso, più o meno come le molecole di un gas in un contenitore. Invece, non funziona in questo modo. Le gerarchie di aggregazione della materia non si fermano alle galassie, ma vanno almeno un gradino oltre, agli *ammassi* di galassie. La Via Lattea, la galassia di Andromeda favorita dagli astrofili, le due Nubi di Magellano che giganteggiano nel cielo meridionale (sono piccole galassie satelliti della nostra), l'altrettanto famosa spirale **M33** nella costellazione del Triangolo, che s'intravede *di piatto* con un buon binocolo, e un numero ancora imprecisato (una cinquantina? un centinaio?) di altre galassie molto più piccole e meno brillanti, formano il cosiddetto *Gruppo locale*. Sono tutte legate tra loro dalla forza di gravità, e dunque orbitano attorno al comune baricentro del gruppo, che si trova non molto distante dall'asse che congiunge la Via Lattea e Andromeda, circa a metà strada fra le due, un po' spostato verso la seconda.

Poiché le dimensioni di una galassia raggiungono e talvolta superano i centomila anni-luce, mentre le distanze tra galassie sono *solo* qualche milione di anni-luce (e quindi non troppo maggiori), può succedere che, ogni tanto, una galassia ne attraversi un'altra. In tali casi non ha senso pensare a collisioni tra le stelle, poiché queste ultime sono veramente minuscole rispetto alle distanze che le separano. Invece, essendo lo spazio interstellare pieno di enormi nubi di polvere e gas, sono proprio le nubi a collidere tra loro, e durante il loro scontro la materia si addensa, per cui nascono nuove stelle in gran quantità.

Poi, non bisogna trascurare gli effetti gravitazionali. Una galassia piccola che ne attraversi un'altra molto grande ne esce sconvolta e impoverita, ammesso che ne esca del tutto e non sia invece inglobata nella galassia più grande. Anzi: questo fenomeno di *cannibalismo* sembra essere alla base della crescita, nel tempo, di galassie sempre più grandi, e della sparizione delle galassie piccole che erano presenti in grande quantità nei primi tempi di vita dell'universo, come suggeriscono le osservazioni nello spazio molto, molto lontano. E poi, gli scontri tra galassie sono *morbidi* e lenti: durano decine o centinaia di milioni d'anni.

Il Gruppo locale non è un ammasso tipico, perché è piuttosto piccolo. A distanza di alcune decine di milioni d'anni-luce ne esistono altri, composti di migliaia di galassie. L'esempio tipico è l'ammasso (più che un semplice gruppo) nella costellazione della Vergine, per osservare il quale occorre almeno un piccolo telescopio e la capacità di fotografare con pose abbastanza lunghe. E qui occorre una precisazione.

A questo livello della gerarchia, infatti, il tenue legame gravitazionale è così debole che due ammassi diversi non sono più legati tra loro. Certo, in linea teorica la gravità si estende all'infinito, ma tra un ammasso e l'altro è scesa a un livello tale per cui l'espansione dell'universo rende gli ammassi troppo veloci, e perciò essi superano la *velocità di fuga* l'uno rispetto all'altro. E, comunque, la gerarchia di raggruppamento cosmico non si arresta a questo gradino: alcuni ammassi di galassie sembrano riuniti in “*Super-ammassi*”. Qui le cose cominciano a mutare natura, e il nostro Modello d'universo sta per arricchirsi di caratteristiche qualitativamente un po' diverse, molto interessanti. Vediamo come.

Da bambini, tutti (immagino) abbiamo giocato con le bolle di sapone. Senza arrivare alle bolle vere e proprie, se prendiamo una soluzione di acqua e sapone e ci soffiamo dentro con una cannuccia, produciamo una schiuma composta di poche bolle di grandi dimensioni, saldate tra loro da una miriade di bollicine medie e piccole. Adesso, domandiamoci quanto sarà il rapporto tra i *pieni* (ovvero le pellicole di acqua saponata) e i *vuoti* (ovvero l'aria dentro e tra le bolle) in questa schiuma. Gli esperti dicono – e noi ci crediamo perché sembra verosimile – che la maggior parte del volume sarà vuoto, e cioè troveremo soltanto l'aria all'interno delle bolle. Poi ci saranno zone a densità maggiore, specie dove le pellicole di due o più bolle s'incontrano; lì si formano membrane e filamenti nei quali si aggrega la maggior parte delle bollicine e dell'acqua saponata.

La distribuzione della materia cosmica su scala veramente enorme, di centinaia di milioni o addirittura miliardi di anni-luce, somiglia molto a una *schiuma*. Gli ammassi e i super-ammassi non sono distribuiti a caso, ma ci sono enormi spazi vuoti di forma grossolanamente sferica, e quasi tutta la materia si addensa in *bolle* e, soprattutto, *filamenti* di super-ammassi, dove le bolle si toccano, proprio come se il Big Bang avesse generato una specie di *schiuma primordiale*.

Andando poi a volumi di spazio ancora maggiori, che cominciano ad avvicinarsi alle dimensioni dell'intero UC, questa schiuma tende a diventare sempre più omogenea. Se  $N$  sono le bolle contenute in un certo volume, più o meno  $N$  ce ne saranno in un altro volume uguale, posizionato a caso. Insomma, l'UC nel suo insieme è all'incirca uniforme (vedremo molto più avanti strani effetti – anticipo di molto: le “onde acustiche” – che ne modificano un pochino l'omogeneità), e questo ci fa sospettare che, mancando tracce di una tendenza sistematica all'aumento o diminuzione di materia in qualsiasi direzione, l'universo *vero* sia almeno molto, ma molto più grande di quello causale. Per mettere un numero, al **2020** le misure danno *l'intero UC nel suo complesso* omogeneo all'incirca per *una parte su centomila*. Anche qui, però, incontreremo più avanti dei fili ancora pendenti.

Questa gerarchia di distribuzione della materia dovrà far parte d'ora in poi del nostro Modello d'universo. Anch'essa è solo una prima approssimazione, ma per lo meno potremo tranquillizzarci su quanto segue: le aggiunte non saranno più troppo rudimentali e provvisorie, ma destinate a durare. Magari precisandole e perfezionandole, ma non rimescoleremo più le carte in tavola.

Possiamo chiudere qui il riassunto del Modello d'UC costruito finora, e procediamo introducendovi i primi elementi di Relatività generale, che sarà perciò l'argomento del capitolo successivo. Osando molto, parliamo finalmente dell'espansione dell'universo in modo più *serio*.

Prima, però, dobbiamo tornare un momento su Einstein. Completata la Relatività speciale, egli aveva costruito lo strumento adatto a sostituire la vecchia relatività galileiana che, implicitamente, non teneva conto di eventuali velocità–limite. A quel punto, però, gli mancava l'applicazione della Relatività al lavoro di Newton, e cioè alle Leggi della dinamica e a quella di gravitazione universale. Il nostro si mise al lavoro, ma non fu una passeggiata. Gli ci vollero altri dieci anni, e l'aiuto di amici matematici, per condurre in porto l'impresa. Ne parleremo dal capitolo 9 in poi; per il momento ci sarà una specie di “marcia di avvicinamento”.

## 8.2) – Anticipazioni sulla forza di gravità

Ricordate quanto già discusso nella sezione 3.2 quando ci perdemmo nel bosco? Siccome l'argomento è importante, permettetemi di tornarci sopra e ripensarlo in termini relativistici, cominciando da lontano. Tenete sempre ben presente il “*paradosso di Olbers*”, però.

Come vedremo, e come possiamo annunciare senza tema di creare troppi problemi di comprensione per il lettore, la Relatività generale, che associamo di solito ai Buchi neri e amenità del genere, è una teoria che riguarda la forza di gravità. Di conseguenza, pur essa deve rendere ragione dell'attrazione reciproca tra tutte le masse dell'universo e, almeno finché ci limitiamo a situazioni tipiche del Sistema solare, deve anche fornire con ottima approssimazione gli stessi risultati dell'antica teoria di Newton.

Ebbene: appena completata la nuova Relatività, Einstein si rese conto che, per mezzo di essa, si poteva rinchiudere perfino l'intero universo in un'equazione sola! O meglio: che sarebbe stato possibile ricavare la *geometria dello spaziotempo* (cosa significa? Pazienza e ci arriviamo) per tutto il cosmo, a patto di semplificare qua e là per mezzo di *ragionevoli* ipotesi. Detto fatto, giunse a una conclusione che lo turbava anzi che no. Ne abbiamo già accennato in sezione 3.2, ma adesso dobbiamo espandere il discorso.

A posteriori, le fonti di questo turbamento ci sembrano una grossa baggianata, ma il povero Albert era vittima dei *pregiudizi* (dovremmo dire: “*paradigmi*”, ma non ci compliciamo la vita) dei suoi tempi, e ci mise più di un decennio per capire che le cose non potevano andare diversamente da quanto descritto dalla Relatività generale. Senza girarci troppo attorno, e detto papale papale, la teoria era molto precisa e puntuale, e offriva solo due possibilità. O l'universo si stava espandendo, o si contraeva. Non c'era posto per un universo in equilibrio, sostanzialmente fermo a parte moti locali, come nel modellino che ce ne eravamo costruiti finora e come assumeva a priori (e perché mai? solo per un banale errore concettuale risalente allo stesso Newton) l'astronomia all'inizio del secolo scorso. E lo stesso Einstein accettava implicitamente, in modo passivo, quest'errore.

Qual era il grosso sbaglio di Newton? Anche di questo abbiamo accennato, e ripetiamo con qualche dettaglio in più: lui si era chiesto come mai, essendo la gravità sempre attrattiva, gli astri non precipitassero gli uni sugli altri. La sua risposta era stata: «Essendo l'universo infinito e omogeneo, qualunque sia il punto che ne selezioniamo, tutta la materia che sta da una parte esercita una forza bilanciata esattamente dalla materia che si trova dalla parte opposta, e quindi la forza risultante è nulla. Grazie a questo equilibrio le stelle se ne stanno al loro posto da sempre e per sempre.».

In realtà, Newton fece qualche prova matematica perturbando un po' i suoi conti e ottenendo risultati che non lo soddisfacevano, ma poi si fidò dell'amico Halley il quale, osservati alcuni moti stellari, concluse che anche le stelle orbitavano le une attorno alle altre, e in tal modo si assicurava un equilibrio *dinamico* stabile. Alla fine, e la cosa trapela dai suoi scritti, Newton si rifugiò nella fede in un Dio che, di tanto in tanto, rimette a posto le cose.

Così, per secoli, gli astronomi non si posero il problema nei termini corretti, e perfino Einstein, da giovane, credeva in un universo eterno e statico. Così, quando si rese conto che le sue nuove equazioni portavano all'ineluttabile necessità di una contrazione o di

un'espansione, piuttosto che rinunciare al *paradigma*, riformulò le equazioni di conseguenza. Che vergogna!

Oggi come oggi, a noi sembra ovvio che, se lanciamo in aria una pietra, questa continui a salire finché dura l'impulso iniziale, poi ricada giù, e perfino l'universo nel suo insieme non possa sfuggire a questo tipo di ragionamento, sia pure con le debite precauzioni, precisazioni, puntualizzazioni e tutto quel che volete. Ora lo ripeto con parole (poco) diverse.

Se l'universo è passato attraverso una fase esplosiva ancora non ben chiarita (noi sappiamo che c'è stato il Big Bang, ma a quell'epoca ne parlava solo Lemaitre), lo spaziotempo e tutto il suo contenuto sono stati scaraventati *verso l'esterno*. Poiché la gravità è sempre attrattiva fino a qualsiasi distanza, possiamo pensare a due casi (ce n'è un terzo, ma lo vedremo più avanti).

Se l'impulso iniziale è stato modesto, presto o tardi la gravità vincerà, e l'universo rallenterà il suo moto di espansione fino a fermarsi, dopodiché ricadrà su se stesso proprio come accade al sasso dell'esempio precedente.

Se, al contrario, l'impulso iniziale è stato enorme, l'universo seguirà a espandersi all'infinito nonostante il suo moto sia soggetto a progressivo rallentamento a causa della gravità, e la velocità tenderà via via a divenire costante, poiché la gravità sarà sempre più debole. Stando così le cose, o avremo un universo in espansione, o uno in contrazione. Non c'è via di mezzo, a parte quella di cui discuteremo più avanti, e che per il momento non c'interessa ancora.

Per Einstein, invece...

Come fare? Un cervello come il suo non poteva incontrare difficoltà a risolvere il problema, e lo fece a cavolo (ma Einstein era un genio, e perfino i suoi errori sono degni di nota). Ora: come succede spesso anche con i più grandi intelletti, anziché accettare l'ovvio cominciò a seguire una linea di ragionamento contorta. Per la precisione: se la gravità è sempre attrattiva, aggiungiamo nelle equazioni della Relatività generale un termine che produca anche una forza repulsiva. Come dovrete ricordare, per salvaguardare l'ipotetica immobilità dell'universo Einstein pasticciò con i propri conti, e v'introdusse a calci nel sedere la cosiddetta "*Costante cosmologica*", con effetto repulsivo, che da lui ricevette come simbolo la lettera greca  $\Lambda$ .

In questo modo, la Relatività generale diventava ancor più *generale* rispetto a prima, perché finiva per descrivere due forze differenti: la gravitazione attrattiva tra *massa e massa*, e un'interazione repulsiva non meglio specificata tra *spazio e spazio*. Insomma: si potrebbe dire che vi era stato aggiunto il "lato oscuro della forza". Pazientate un po': è chiaro che torneremo su questi concetti dopo aver studiato, per l'appunto, anche la Relatività generale.

È curioso sapere che, al tempo in cui Einstein introduceva  $\Lambda$  nelle equazioni, l'astronomo Vesto Slipher stava già scoprendo l'espansione dell'universo, ma questa non fu resa nota al pubblico finché un astronomo – atleta di cui abbiamo già fatto cenno, tale Edwin Hubble dalla personalità carismatica e dal fisico di acciaio, lavorando al più grande telescopio esistente a quei tempi presso l'osservatorio di Monte Wilson, si decise a pubblicare questo risultato nel 1929, acquisendo (non del tutto meritatamente) la fama di essere stato lo scopritore dell'espansione dell'universo. In realtà, noi già sappiamo come, nel 1926, il gesuita Georges Lemaître avesse addirittura proposto il primo modello di Big Bang, definendolo

“*Atomo primigenio*”. Eppure, Einstein resistette, finché l’evidenza dell’espansione cosmica non divenne schiacciante.

A quel punto, il nostro accettò il nuovo paradigma e cancellò  $\Lambda$  dalle sue equazioni, affermando che l’aver introdotto la costante cosmologica era stato il suo più grande errore scientifico. Aveva ragione quando la introdusse o quando la cassò? A tanto tempo di distanza ancora non sappiamo rispondere in modo definitivo a questa domanda, pur avendo il forte sospetto che sia opportuno ripristinare, nelle equazioni della Relatività generale, un termine che abbia la stessa funzione, e quindi lo stesso simbolo, e manco a dirlo lo stesso nome, ma non la stessa intensità di quello originario. Questa, però, è storia recente, che vedremo più avanti: avendo richiamato alcuni concetti riguardanti l’espansione generale dell’universo, per ora dobbiamo includerla in modo chiaro e coerente nel modello in costruzione.

## 8.3) – Sirene ed esplosioni.

Bisogna anzitutto spiegare come fece Hubble (o Slipher, o Lemaître prima di lui) a rendersi conto della legge di natura che presiede all'allontanamento reciproco tra gli ammassi di galassie. Per la verità, le ricerche di questi astronomi non erano dedicate, almeno all'inizio, allo studio dell'espansione dell'universo. Il problema dell'epoca risaliva a tanto tempo prima, e finalmente poteva trovare una risposta. Cos'erano le galassie?

Queste nebulosità che s'intravedono appena con un telescopio di dimensioni medie, facevano discutere gli esperti da almeno un secolo. C'era chi pensava che la nostra Galassia comprendesse tutto lo spazio, tutto l'universo, e che le altre galassie, viste allora come nubi un po' luminose, fossero solo alcune tra le tante nebulosità della Galassia, al pari della grande nebulosa di Orione, o delle nebulose planetarie e così via, magari di un tipo diverso. Altri erano invece convinti che si trattasse di oggetti extragalattici: i cosiddetti “*universi – isola*” del tempo.

I primi, grandi strumenti dell'inizio del '900, con specchi che culminavano nei due metri e mezzo del telescopio di Monte Wilson, e le nuove tecniche di fotografia astronomica, dovevano essere in grado di sciogliere il dilemma. Che, in effetti, fu risolto accertando l'esistenza della molteplicità delle galassie. Scoperta fondamentale ma, nell'espansione dell'universo, ci s'imbatté per caso inventariando e classificando galassie lontane. In particolare, se ne misuravano le dimensioni apparenti, le luminosità, e dove possibile si cercava di ottenere spettri della luce da loro emessa.

La prima discriminazione tra galassie vicine e lontane fu molto grossolana: a parte dettagli, s'ipotizzava che tutte fossero delle stesse dimensioni della nostra e, di conseguenza, le più piccole e deboli dovessero per forza essere le più lontane. Siccome si scoprì presto che le forme di alcuni tipi di galassie (non tutte sono a spirale come la Via Lattea) sono grossolanamente correlate con le loro dimensioni intrinseche, come passo successivo e selezionando in modo opportuno, divenne possibile costruire una progressione di galassie sempre più lontane e stimarne, almeno in modo *molto rudimentale*, la distanza.

Come s'intuisce bene, però, non si giunge all'espansione dell'universo, e cioè a una legge di natura che correli la distanza con la velocità di allontanamento, conoscendo solo le distanze delle galassie. Bisogna misurare, per l'appunto, anche le loro velocità rispetto a noi. Per strano che possa sembrare, questa è la parte più semplice del lavoro. Tanto semplice che, se fino al giorno d'oggi ci sono discussioni anche aspre sul valore numerico esatto del ritmo di espansione dell'universo, ciò dipende (forse?) da problemi che riguardano la misura delle distanze, e non delle velocità. Infatti, il moto di avvicinamento o di allontanamento di un qualsiasi oggetto celeste si ricava direttamente dallo spettro luminoso per mezzo del cosiddetto “*Effetto Doppler*”, dal nome del suo scopritore.

Devo parlare dell'automezzo dei pompieri a sirene spiegate? È in ogni libro, ma raramente sono riuscito a percepire l'effetto Doppler quando sono stato doppiato da uno di questi veicoli, tranne che in autostrada, se l'ambulanza viene dalla direzione opposta. Forse la difficoltà dipende dall'ingorgo permanente, per cui la velocità dell'auto rossa è troppo inferiore a quella del suono affinché l'effetto di cui si parla assuma proporzioni sufficienti da renderlo rivelabile da un orecchio ottuso come il mio.

Va meglio con un treno a grande velocità che si dirige nella nostra direzione, a 300 km/h o più. Che cosa succede alle onde acustiche lanciate verso le nostre orecchie? Sono ovviamente *spinte in avanti e compresse* di un buon 30% rispetto a quanto sarebbero se il treno fosse fermo, poiché la velocità del suono nell'aria è di circa 1000 km/h, e quella del treno è quasi un terzo di tale valore. Questo è semplice e intuitivo da capire, e sappiamo pure che onde sonore di lunghezza minore (quelle *comprese*, per l'appunto) corrispondono, dal punto di vista acustico, a note acute.

Ora il treno passa davanti a noi e si allontana sempre alla stessa velocità. Il timbro del suono si fa all'improvviso più basso. Stavolta, la velocità gioca in modo opposto a prima, per quanto riguarda le onde sonore che ci raggiungono: le allunga rispetto al loro valore nominale, perché il treno *se le porta via con sé*. Onde più lunghe: suono più grave. Dieci secondi di riflessione sono sufficienti a chiunque per comprendere l'effetto Doppler. Se poi volete, troverete una quantità di raffigurazioni grafiche dell'effetto Doppler su Wikipedia; può essere utile ma secondo me non è necessario. Io, comunque, non ci spreco una figura.

Ebbene: lo stesso effetto non funziona soltanto con le onde acustiche, ma con qualsiasi tipo di onda, comprese quelle del mare. Chi pratica il *surf* cerca di viaggiare sempre sulla cresta della stessa onda e, di conseguenza, alla velocità dell'onda medesima. Per lui, è quasi come se le altre onde non esistessero e, difatti, non gli cominciano ad arrivare addosso finché non è giunto sulla spiaggia e smonta dalla tavola. Caso estremo di effetto Doppler. Chi, al contrario, affronta il mare in verso opposto con un motoscafo veloce, incontra via via un'onda appresso all'altra, con un ritmo più frequente di quello con cui le onde stesse si susseguono per un osservatore fermo sulla spiaggia. Ancora effetto Doppler.

La luce è, come abbiamo visto, un'onda elettromagnetica. E perciò cosa fa la luce emessa da una sorgente in movimento? Se la sorgente si allontana da noi, la lunghezza d'onda della luce che ci giunge è *allentata*, e perciò la vedremo spostata “verso il rosso” in senso lato. Può trattarsi di uno spostamento quasi impercettibile per una sorgente lenta, mentre si può arrivare all'infrarosso e addirittura al radio se la velocità della sorgente comincia ad avvicinarsi a quella della luce. Al contrario, quando la sorgente si avvicina, le onde luminose si susseguono a ritmo più frequente, e la luce tende verso il blu. Attenzione: il valore di  $c$  non cambia, ricordiamocelo. La velocità dell'onda luminosa rimane costante; si modifica solo la distanza tra due creste successive dell'onda.

Di conseguenza quando, nella luce di una stella o di una galassia, osserviamo una certa riga spettrale emessa da un ben definito elemento chimico, e ne misuriamo la lunghezza d'onda  $\lambda_I$ , basta confrontare quest'ultimo valore con quello,  $\lambda_0$ , della luce che lo stesso elemento emette in laboratorio, quando sta fermo rispetto a noi. Dalla differenza  $\lambda_I - \lambda_0$  si può allora calcolare esattamente la velocità con cui la stella o la galassia si allontana o si avvicina. Per i puristi, aggiungo che i cosmologi lavorano col cosiddetto “spostamento verso il rosso  $z$ ”, dove:

$$z = (\lambda_I - \lambda_0) / \lambda_0$$

È una misura semplice, che già Hubble poteva eseguire con discreta precisione, e che fornisce una risposta univoca. La galassia “tal dei tali” si trova a una distanza che, purtroppo, può essere definita solo con una certa approssimazione (intendiamoci: oggi le misure di

distanza sono diventate molto precise, pur restando sempre un po' laboriose), ma la sua velocità di allontanamento si misura senza problemi.

Alla fine, Hubble se ne venne fuori con la novità che l'universo è in espansione. Il ritmo da lui calcolato era pari a circa **150** km/s per ogni milione di anni-luce di distanza: una galassia distante dieci milioni di anni-luce si sarebbe allontanata da noi a **1500** km/s; una distante il doppio a velocità doppia, e così via. La cifra era grossolanamente sbagliata, tanto vero che in queste condizioni il Big Bang si sarebbe dovuto verificare solo due miliardi di anni fa, mentre le prime stime dell'età della Terra basate sull'analisi di rocce radioattive già parlavano di almeno quattro miliardi di anni, ma in linea di massima l'espansione fu considerata come un trionfo per la Relatività generale.

A beneficio del lettore, lascio correre le dispute anche piuttosto ruvide tra astronomi, che ebbero termine solo tra il 1998 e il 2000, quando molti pezzi della complicata macchina intellettuale e osservativa per mezzo della quale si riescono a misurare le distanze galattiche andarono a posto più o meno contemporaneamente. Oggi sono venute fuori nuove complicazioni, di carattere ancora sconosciuto (uno dei fili che lascerò appesi) ma conosciamo il valore numerico del ritmo di espansione (che prende il nome di "Costante di Hubble-Lemaître" o, in simboli,  $H_0$ ) con una precisione dell'ordine del **10%**, e sappiamo che  $H_0$  è molto inferiore al valore stimato inizialmente da Hubble. E, di conseguenza, ecco che l'età dell'universo sale ai famosi quattordici miliardi di anni circa.

Ancora un po' e dovrò per forza trascinare il lettore sull'orlo del baratro, costringendolo a prendere coscienza della Relatività generale e dei Buchi neri, che rappresentano per l'appunto il pozzo senza fondo, poiché abbiamo capito che, senza parlare dell'*espansione dello spaziotempo* (argomento di esclusiva pertinenza general-relativistica), il Modello d'universo resta troppo zoppicante. Per il momento lascerò ancora qualche paragrafo di riposo (relativo, ma tutto è relativo) spiegando quale sia il metodo di misura delle distanze cosmiche, e propinando quindi al lettore un breve interludio su un'amenità che, ormai, ha solo interesse storico, ma è allo stesso tempo divertente e istruttiva. Le distanze, infatti, sono un argomento sempre importante e attuale in astrofisica. Un *metro* molto usato per misurare quanto spazio c'è tra noi e una galassia lontana passa per le cosiddette "*supernove di tipo Ia*". Che cosa sono?

Le supernove in genere, come ognuno sa, sono stelle giunte al termine della loro vita, che muoiono esplodendo e liberando un'enorme quantità di energia. Di solito si pensa a stelle di massa molto grande, decine di volte quella del Sole, e spesso è proprio così. Nel caso che c'interessa, però, dobbiamo seguire le ultime fasi di esistenza per una stella sul tipo del nostro Sole, la cui fine è molto meno spettacolare, poiché la sua regione esterna di gas si diparte da essa espellendo uno di quegli sbuffi di materiale che compaiono sotto forma di *nebulose planetarie*. Niente di esplosivo: l'astro si adagia tranquillamente nella fase di *nana bianca*, con una struttura interna molto stabile che ricorda un po' quella di una cipolla, e cioè a strati concentrici. In superficie resta qualche traccia d'idrogeno, che a poca profondità cede il posto a uno strato sottile di elio, cui segue una specie di *mantello* di carbonio e ossigeno, e alla fine – così dicono i calcoli teorici – si giunge a un nucleo di neon, magnesio e silicio.

La stella contrae su se stessa finché può, e alla fine riesce a stabilizzarsi per l'eternità con un raggio paragonabile a quello terrestre. Pesante come una stella, dunque, ma piccola come un pianeta. Sempre in base alla teoria, si può dimostrare che questa fine è riservata alle

stelle che, *al termine della loro esistenza*, si ritrovano con una massa che non supera **1,44** volte la massa del Sole, e questo valore prende il nome di “*Massa di Chandrasekhar*”, dallo scopritore di tale peculiarità.

Una morte dolce e, di fronte, una prospettiva di un raffreddamento eterno o, per lo meno, finché non suoneranno le trombe del Giudizio. E allora perché ne parliamo? Perché, come nei film dell’orrore, *a volte ritornano*...

Infatti, c’è l’inghippo. Trattandosi di stelle singole come il Sole la loro sorte è quella appena descritta, ma la maggior parte delle stelle (oltre il **60%**) vive in sistemi binari o multipli, in cui diversi astri ruotano attorno al comune centro di massa essendo legati tra loro dalla gravità reciproca. In questo caso, le cose cambiano.

Supponiamo, dunque, di trovarci di fronte a una nana bianca un po’ grandicella, molto prossima alla massa di Chandrasekhar, e un’altra stella: di solito una nana bianca pure lei, ma di minore massa. Poiché le stelle ruotano una attorno all’altra, sono costrette a perdere energia per motivi che vedremo più avanti. Nel corso di questo lento processo, si avvicinano tra loro e la seconda nana bianca può cominciare a travasare parte della propria materia sulla compagna più massiccia. In sostanza, la prima nana bianca aumenta la propria massa progressivamente, vampirizzando la stella compagna. Quando la massa supera il valore critico individuato dall’astrofisico indiano, premio Nobel nel 1983, non può più restare in equilibrio su se stessa, e *implode* liberando una quantità imponente di luce: per qualche giorno diventa cento miliardi di volte più brillante del Sole, poi comincia ad assestarsi e a raffreddarsi di nuovo come *stella di neutroni*, ma questa è un’altra storia e non ci riguarda.

Le supernove di tipo *Ia* sono proprio questi oggetti: nane bianche abbastanza grosse in un sistema binario che, mangiandosi pian piano la compagna, ingrassano abbastanza da esplodere. Morale: ingrassare fa male perfino alle stelle!

Domanda: perché questi oggetti servono a misurare le distanze cosmiche? Semplice: perché l’esplosione di una stella come quella sopra descritta, avvenendo a *massa prefissata* e, di conseguenza, *quasi* secondo le stesse modalità dovunque essa si trovi, raggiunge sempre la stessa luminosità, *quasi* identica per tutte. Entro certi limiti (e gli astronomi hanno imparato a tener conto anche di piccole differenze), le supernove di tipo *Ia* sono fatte con la fotocopiatrice: una vale l’altra, una è luminosa come l’altra.

Sapete cos’è una *candela campione*? Una lampadina di luminosità prefissata, costruita in modo tale che si sappia con precisione quanta luce emette. Le lampadine usate in casa sono un po’ diverse le une dalle altre, anche se sulla scatola c’è scritto lo stesso numero di watt; quelle campione costano molto di più e si usano solo in laboratorio. Ecco: abbiamo trovato le *candele campione* per il laboratorio che si chiama *universo*. Siccome ormai conosciamo bene la *luminosità intrinseca* di ogni supernova *Ia* al momento dell’esplosione – e c’è voluto un bel po’ di lavoro per riuscirci – basta misurare la *luminosità apparente* appena ne compare una, e un semplice calcolo ci permette di dedurre con ottima precisione quanto è lontana la galassia che la ospita.

Queste deflagrazioni sono così luminose che, a volte, sembrano accendersi nel nulla, e solo dopo ci si rende conto che, attorno a loro, c’è una debolissima galassia fino a quel momento sfuggita agli astronomi. A questo punto, nota la distanza, ed essendo la velocità di allontanamento misurabile con precisione grazie all’effetto Doppler, siamo in grado di calcolare il valore  $H_0$  della costante di Hubble–Lemaître.

Abbiamo raffinato un po' il nostro Modello d'universo, no? Infatti, proprio sapendo con che ritmo si espande, si può valutare a circa quattordici miliardi di anni fa l'età del botto iniziale. E adesso, un breve interludio giocoso che avevo promesso.

## 8.4) – God save the King. Forever!

Al suo primo apparire, l'idea di un universo nato dal Big Bang sembrò, ad alcuni scienziati, poco appetibile per motivi filosofici. La grande esplosione con cui ebbe inizio lo spaziotempo sapeva troppo di teologia biblica. Specie considerando che il suo primo proponente era nientemeno che un gesuita e dunque, secondo le categorie **WASP** (White Anglo Saxon Protestant) imperanti all'epoca (e anche oggi, ve lo assicuro...), un *papista!*

Sto scherzando un po', ma non troppo. Nonostante il modello fosse stato immediatamente sponsorizzato dal grande astrofisico russo Gamov, che si dichiarava pubblicamente ateo e derideva i colleghi che ci sentivano puzza di *creazionismo*, qualche resistenza ci fu. E il capofila di chi cercò modelli alternativi, possiamo individuarlo in un altro grandissimo: Fred Hoyle il quale, malgrado fosse uno scienziato di enorme merito, è forse rimasto più famoso per i suoi (mediocri) romanzi di fantascienza.

Il problema si poneva in questi termini: bisognava far salva l'espansione dell'universo, poiché era un dato osservativo su cui non si poteva discutere. Era possibile trovare alternative al Big Bang? Hoyle ritenne di aggirare l'ostacolo ipotizzando qualcosa di molto, molto drastico: la *creazione dal nulla* di nuova materia, da sempre e per sempre.

Semplificando al massimo, il suo ragionamento filava come segue: «Le galassie contengono stelle e gas, e si allontanano tra loro con velocità crescente all'aumentare della distanza. Di conseguenza, si formano spazi sempre più grandi del tutto spopolati. Inoltre, all'interno delle stesse galassie, le stelle non godono di vita eterna, ma nascono, vivono e muoiono. Si formano nuove stelle, certo, poiché il gas è in grado di condensarsi, ma in ogni caso è un processo che non può andare avanti all'infinito. Presto o tardi, le galassie sono destinate a diventare nubi oscure di materia totalmente inerte. Per sostenere in vita l'universo, bisogna ipotizzare che, mentre le galassie si allontanano e invecchiano, nuova materia sia creata dal nulla negli spazi vuoti intermedi, cosicché si possano formare nuove galassie da questa materia *giovane*, e così via all'infinito. In tal caso l'universo sarebbe consistente (in prima approssimazione) con quello che le osservazioni ci mostrano.». Un'astuta variante dell'universo *statico* di Newton e Einstein, con l'aggiunta dell'espansione.

Erano gli anni '50 del secolo scorso, e a quell'epoca era ancora impossibile fornire conferme o smentite sperimentali a questa teoria, che trovò dunque fautori e detrattori. Il più potente strumento astronomico era diventato il telescopio di Monte Palomar, con uno specchio da cinque metri di diametro, le cui immagini erano registrate su pellicola fotografica, e in tal modo si potevano forse intravedere le galassie più mastodontiche entro un miliardo di anni-luce attorno a noi; ciò non era sufficiente a dirimere le disputa fra i due modelli d'universo, come vedremo dopo una breve digressione che, a questo punto, cade a proposito.

Infatti, è necessario chiarire un dubbio perfettamente legittimo che si può essere annidato nella mente del lettore. Dubbio che – badate bene – si applica pure al caso del Big Bang, ma emerge ancor più evidente nel modello della *creazione continua* di materia proposto da Hoyle. Buttiamolo giù così: se l'universo esiste da sempre e per sempre, e si espande da un tempo infinito mentre si crea nuova materia, come fa a esserci ancora spazio affinché l'universo stesso possa espandersi ulteriormente? *Dove* si espande, insomma?

Ancora non riusciamo a far tacere il buon senso, vero? Eppure, dovremmo essere abituati a zittirlo! Il problema intellettuale è il seguente: noi tendiamo a trattare l'*infinito* come se fosse **un numero molto grande**, e quindi seguiamo inconsciamente ad attribuirgli le categorie mentali che applichiamo ai numeri finiti. Concepiamo uno spazio infinito come lo scatolone del nostro Modello iniziale (ve lo ricordate?) di cui non riusciamo a vedere i bordi, ma non importa se questi ultimi sono a distanza infinita; dovranno pur sempre obbedire alle leggi che vincolano uno scatolone finito.

Invece non è così. Già nella seconda metà dell'800, il matematico Cantor cominciò a costruire un'algebra dei numeri transfiniti, che sarebbe a dire **più grandi dell'infinito** e, poveretto, ne restò col senno compromesso. Fu lui a spendere, in manicomio, una ventina d'anni cercando di dimostrare che Shakespeare non era mai esistito, senza neppure possedere una buona conoscenza dell'idioma britannico.

D'altronde, perfino senza ricorrere ai transfiniti, si può dimostrare in termini matematici che il vincolo imposto dalla nostra intuizione è fallace. Trattando opportunamente il problema, si giunge a concludere che (i matematici mi perdonino per la semplificazione grossolana, ma tanto lo so che i matematici *non perdonano*) un certo tipo d'infinito non può essere mai riempito da un altro tipo d'infinito. Il lettore vuole una traccia del ragionamento? Va bene, ma solo una traccia, mi raccomando! Ricordate certo Galileo Galilei?

Nella sua vecchiaia, agli arresti domiciliari nella villetta di Arcetri e ormai quasi cieco, trovò un curioso paradosso. È quello che segue.

Proviamo a scrivere su una riga *tutti* i numeri interi. Ovviamente la riga avrà lunghezza infinita, ma a noi basta scriverne i primi dieci per capire cosa succede. Immediatamente sotto, scriviamo un'altra riga contenente ciascun numero della prima riga elevato al quadrato. E adesso paragoniamo le due righe, stando pronti a imbatteci in un paradosso irrisolvibile per il nostro buon senso.

<b>Prima riga</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Seconda riga</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>16</b>	<b>25</b>	<b>36</b>	<b>49</b>	<b>64</b>	<b>81</b>	<b>100</b>

Bene: le due righe continueranno all'infinito entrambe, poiché ogni numero intero può essere elevato al quadrato. Attenzione ora: nella seconda riga **mancano alcuni numeri!** Non ci sono **2, 3, 5, 6, 7, 8, 10...** Cosa diavolo significa tutto ciò? Forse nella prima riga ci sono **più numeri** che nella seconda? Sicuro: lo abbiamo appena visto. Allora, però, la lunghezza **infinita** della seconda riga è **più corta** di quella della prima? No di certo: a ciascun numero della prima riga ne corrisponde uno della seconda, per cui vanno all'infinito nello stesso modo. D'altra parte, nell'infinità di numeri della seconda riga, si fa via via spazio per inserirvi un'infinità di numeri della prima che non vi sono presenti. Insomma, i due infiniti sono **uguali per definizione**, ma **il primo può contenere il secondo, e avanza ancora spazio per infiniti numeri.**

Galileo si fermava a questo punto, limitandosi a notare il paradosso e affermare che non si può applicare agli infiniti la stessa matematica che presiede ai numeri finiti. Anche noi dovremo fermarci qui, accontentandoci di percepire solo alla lontana il **sapore** che ha la matematica degli infiniti, e lascio al lettore testardo l'incombenza di usare il ragionamento qui sopra per capire come faccia uno spazio infinito a potersi ancora espandere indefinitamente. Ma stia attento: potrebbe succedergli come a Cantor...

Esaurita questa digressione con un parziale atto di fede, possiamo finalmente tornare all'universo di Hoyle. E capire se le ipotesi su cui si fonda si possano *falsificare* (cioè, in gergo scientifico, “dimostrare false”) in qualche modo.

La prima confutazione che ci viene in mente potrebbe basarsi sull'ovvia considerazione che, in natura, nulla si crea e nulla si distrugge. Ne siamo proprio sicuri, però? Restiamo ancora per un attimo al fianco del Metodo sperimentale con la maiuscola, sulla base del quale si costruiscono tutte le scienze. Vale a dire: le leggi di natura devono avere carattere sperimentale. Ora, come si fa a dimostrare, in laboratorio, che non si crea dal nulla neppure un atomo d'idrogeno al metro cubo ogni milione di anni circa, e cioè tutto quel che servirebbe a Hoyle (sembra pochissimo, ma è sufficiente)? Non si può, neppure con le apparecchiature più moderne e sofisticate. O, se volete essere davvero pignoli, il principio di conservazione della materia-energia è una legge che si è chiarita pian piano nella mente dei fisici costruendo con fatica la scienza moderna, e non è per niente un *dogma* scientifico. Di conseguenza, le eventuali conferme o confutazioni del modello di Hoyle devono essere cercate altrove, nell'osservazione del cosmo.

La più seria delle obiezioni, e anche la prima a essere sollevata in ambiente scientifico fu che, se le cose andassero come ipotizzato da Hoyle, nello spazio dovrebbero essere rimescolate un po' alla rinfusa galassie giovani e vecchie. Vero, ma a quell'epoca nessuno era ancora in grado di prevedere quale avrebbe dovuto essere l'aspetto di una galassia vecchia, e ci volle molto tempo, molto lavoro sulla teoria dell'evoluzione stellare, e lo sviluppo di calcolatori di grande potenza, prima di poter giungere ad affermazioni sensate in proposito. Come spesso accade nella corsa a ostacoli della scienza, però, queste ultime giunsero in ritardo, perché già altre osservazioni astronomiche avevano cominciato a corrodere il costruito di Hoyle. Vediamo quali.

Col progredire delle tecnologie, e con l'avvento dell'elettronica – inizialmente solo nella scansione delle lastre fotografiche, e poi anche nella misurazione diretta della luce delle sorgenti astronomiche –, ci si accorse che, riuscendo finalmente a misurare immagini di galassie fino a circa due miliardi di anni-luce di distanza, e quindi com'erano due miliardi di anni fa, l'universo appariva un po' differente da come lo vediamo nelle vicinanze. Indizio di un'evoluzione nel tempo, e non di stazionarietà. Infatti, le cosiddette “quasar”, che sono galassie dall'aspetto quasi stellare perché molto dense, e nel cui nucleo esiste un Buco nero affamato colto nell'atto di divorare grandi quantità di materia, non s'incontrano spesso nei nostri dintorni, ma diventano frequenti solo quando ci si comincia ad allontanare di quel paio di miliardi di anni-luce che, all'epoca, rappresentava il limite di visibilità. Questo risultato osservativo, almeno all'inizio, non fu compreso pienamente nel contesto dell'evoluzione cosmica, ma almeno s'intuì subito che, al posto di una miscela di galassie giovani e vecchie, nell'universo si nota una certa evoluzione temporale: qualche miliardo di anni fa esistevano ancora oggetti che oggi non ci sono più.

Poi, nel 1967, ci fu il colpo di scena. Vale a dire, la scoperta della radiazione *fossile*, vera e propria *eco* del Big Bang. Essa venne fuori per caso nel lavoro di Penzias e Wilson, due ricercatori della Bell Telephone, che cercavano di eliminare ogni disturbo residuo da un'antenna per telecomunicazioni ricevente onde radio riflesse da una certa famiglia di satelliti. Per quanto i due facessero, restava sempre un rumore di fondo elettromagnetico costante, in qualunque direzione del cielo l'antenna fosse rivolta.

Messi in comunicazione da amici comuni con l'astrofisico Dicke, il quale aveva previsto teoricamente l'esistenza di questa eco, i due capirono che quel disturbo non era altro che *monsieur Big Bang* in persona! Più avanti parleremo abbondantemente delle caratteristiche di questa radiazione; per ora basti sapere che affossò per sempre l'ipotesi della creazione continua. Il Big Bang era stato *osservato* direttamente o, per meglio dire, era stato osservato un proto-universo dell'età di soli **380.000** anni! Il povero Hoyle, fino alla sua morte avvenuta nel 2001, non accettò mai del tutto l'idea del Big Bang, ma permettetemi di essere un po' malignetto. Basta leggere i suoi romanzi di fantascienza per cogliervi una vena *patriottica* molto marcata. Fedele all'*Union Jack*, inventava trame letterarie complesse il cui esito era la restituzione di una sovranità britannica sul mondo e oltre. Che la sua passione per un universo infinito nello spazio e nel tempo fosse un riverbero del suo desiderio di vedere un'espansione senza limiti dell'Impero britannico?

Sta di fatto che oggi, sempre nel contesto del Big Bang, i fisici hanno escogitato una serie d'ipotesi, forse verificabili e forse no (almeno per lunghi anni), allo scopo d'inserire il ciclo vitale del nostro universo in una moltitudine senza inizio e senza fine nel tempo; una moltitudine per la quale è stato coniato, a torto o a ragione, il termine "**Multiverso**", e che copre diverse possibilità. Di alcune di queste dovremo parlare, poiché appartengono all'attualità scientifica. Avremo però gli strumenti intellettuali per farlo in modo efficiente solo molto più avanti, affrontando (per chi ce la farà) l'ultima parte della Sezione IV. A questo punto, piuttosto, il lettore si sarà reso conto che l'universo nel suo insieme si può trattare solo aggiungendo agli ingredienti di base anche la forza di gravità e, perché no, anche la famigerata *costante cosmologica*  $\Lambda$ . È tempo di metter mano – nessuno si spaventi – alla teoria della Relatività generale. O, se preferite, tremate come foglie al vento...

## 9) – Curva, piega e arrotola

### 9.1) – Newton e i suoi dubbi

Il '600 e l'inizio del '700 furono un'epoca d'oro per la fisica. All'inizio, Galileo edificò le fondamenta sulle quali costruire ogni scienza da allora e per sempre: alcuni ne avevano disquisito anche prima, come per esempio Francis Bacon, ma un conto sono le chiacchiere, altro i fatti. E sempre a Galileo, come abbiamo visto, risale il Principio di relatività che va di pari passo con una formulazione ragionevolmente completa del primo Principio della dinamica. Diversi altri pensatori, tra i quali è doveroso citare Keplero, Descartes, Huygens, Hooke, e bisognerebbe nominarne ancora molti, posero malta e mattoni indispensabili sulle fondamenta galileiane. Poi venne Newton, e la fisica classica sembrò sgorgare dalla sua mente quasi completa, con la dinamica, la gravitazione, e includendo perfino una forma un po' imprecisa – ma funzionante – di calcolo differenziale, sebbene un'analisi accorta dei suoi scritti apra l'uscio sui molti debiti nei confronti dei suoi predecessori e colleghi.

Qui, proprio di Newton parleremo. Che Newton sia colui che dette forma matematica alla legge che regola la forza di gravità lo sappiamo, no? Egli conosceva bene i risultati degli esperimenti di Galileo con le biglie che rotolavano giù per i piani inclinati, e ne eseguì molti lui stesso, insistendo su quelli con pendoli di estrema precisione. Costruì pure sulle leggi di Keplero, riguardanti le orbite dei pianeti attorno al Sole, e su suggerimenti di Hooke e Huygens in merito a una “forza attrattiva” non meglio specificata, ma gli occorre comunque uno sforzo d'ingegno enorme per arrivare a comprendere in qual modo tutta una serie di fenomeni, dalla caduta dei corpi alla sfericità della Terra e alle maree, fino alla rotazione dei pianeti e satelliti, non fossero altro che sfaccettature diverse di un'unica legge di natura. Per disperazione del lettore scriverò questa legge:

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{r^2}$$

La formula va letta e interpretata come segue. La forza di attrazione gravitazionale  $F$  che due masse  $m_1$  e  $m_2$  esercitano l'una sull'altra, è proporzionale al prodotto delle masse medesime, e inversamente proporzionale alla distanza  $r$  che separa i loro centri di massa (i fisici dicono: *baricentri*) elevata al quadrato. Il fattore di proporzionalità  $G$  è una costante che Madre natura ha deciso di mettere lì, il cui valore può essere misurato in laboratorio per mezzo di esperimenti davvero delicatissimi. Su questa costante bisognerà tornare prima o poi; qui cerco solo di rendere il suo significato più intuitivo: poiché noi, esseri umani, definiamo le forze, le masse e le distanze secondo il Sistema metrico, la costante  $G$  rappresenta un *coefficiente di ragguglio* che serve a passare dalle unità di misura scelte dalla natura, a quelle scelte da noi. Non è solo questo, ma per ora ci basti, e torniamo alla formula.

La forza è quindi tanto maggiore quanto sono maggiori le masse in gioco, e diventa sempre minore al crescere della distanza reciproca tra le masse. E fate attenzione a come ho interpretato questa legge all'inizio del paragrafo precedente: ciascuno dei due oggetti esercita **esattamente** la stessa forza sull'altro; non solo il più grosso (come per esempio il Sole) sul più piccolo (la Terra), ma anche a rovescio. Ciò è vero in ogni possibile circostanza; se urtiamo un vaso da fiori sul davanzale e lo facciamo cadere di sotto, anche la Terra, proprio il pianeta tutto intero, comincia a cadere verso il vaso. La differenza fondamentale è nella sproporzione di massa tra i due oggetti. Ricordando che, tanto maggiore è la massa, tanto minore è l'accelerazione sotto l'effetto della stessa forza (ricordate la formuletta  $a = F/m$ , vero?), è ovvio che l'accelerazione del vaso possa renderlo pericoloso per chi si trovi giù in strada. Al contrario, l'accelerazione del nostro pianeta non rappresenta certo un rischio per chi resta a guardare giù, e anzi è talmente piccola che neanche si riesce a misurarla.

Il pianeta Giove, però, possiede una massa talmente grande, che sposta il baricentro del Sistema solare verso la **superficie del Sole**, per cui anche il Sole ruota attorno a questo punto via via che Giove percorre la propria orbita. Capito come va?

La formula fu pubblicata nel **1687**. A tanta distanza di tempo possiamo chiederci: siamo sicuri che una legge di natura esprimibile matematicamente in modo così semplice come quella di Newton, e ricavata ormai da trecentocinquanta anni, si dimostri assolutamente corretta anche oggi nel rendere conto del moto del Sole attorno al centro della Via Lattea, e addirittura della galassia di Andromeda o delle Nubi di Magellano le une rispetto alle altre? Ebbene: c'è ovviamente una riserva mentale nella risposta ma, almeno in prima approssimazione, possiamo dire di sì. Le varie agenzie spaziali usano quasi sempre la sola legge di Newton nel calcolo delle orbite di satelliti e sonde interplanetarie, e tanto più possiamo affidarci a Newton, quanto minori sono la forza di gravità e la velocità degli oggetti ai quali applicare la formula.

L'ultima frase ci fa sospettare qualcosa: abbiamo parlato di velocità e, dal capitolo 5 in poi, sappiamo che le velocità molto elevate sono bestie difficili da trattare. Non dovremo anche qui fare i conti con quella benedetta  $c$  che tanto ci disturba il sonno? Ovviamente sì, ma ci sono anche altre complicazioni. Manco a dirlo, la faccenda è così intricata, almeno a un primo approccio (noi sapremo come aggirare gli ostacoli), che lo stesso Einstein, dopo aver scoperto la Relatività speciale, impiegò un decennio tondo tondo, e dovette chiedere aiuto ad amici matematici prima di riuscire a chiarirsi le idee sulla gravità.

Abbiamo già notato in precedenza come la prima difficoltà concettuale risalisse allo stesso Newton e ai suoi coetanei (Huygens e i cartesiani in prima fila). Anche prima che astronomi e fisici accertassero la validità delle sue formule oltre ogni possibile dubbio, il genio britannico bollò di **assurdità** l'idea della forza a distanza da lui stesso scoperta. Il ragionamento che, peraltro, nei termini da lui proposti fila ancor oggi, si può espandere come segue.

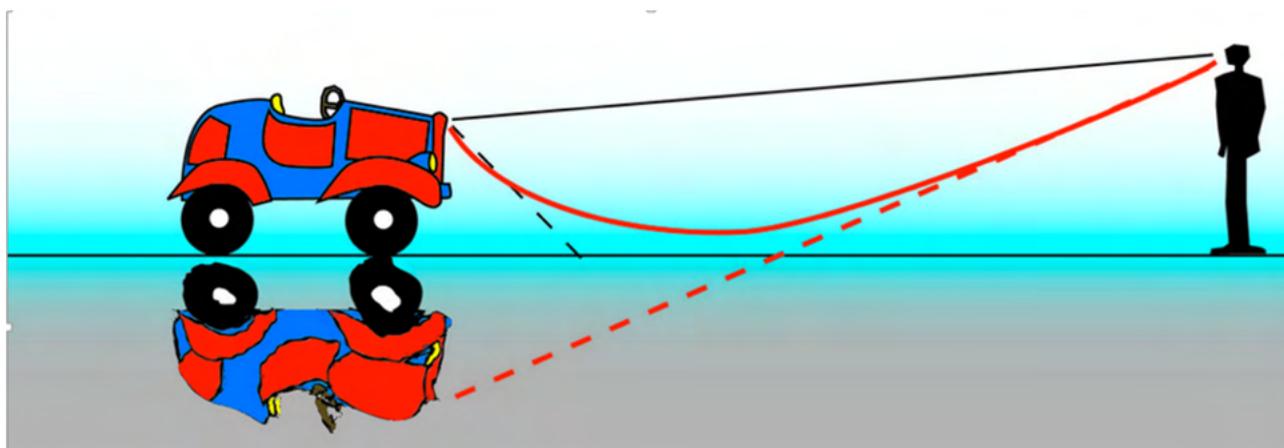
Nel momento in cui afferriamo un qualsiasi oggetto e lo spingiamo, il **mediatore** della forza che lo costringe ad accelerare è ovvio: la nostra mano è **a contatto** con l'oggetto, e dunque la forza passa direttamente dalla nostra muscolatura alla mano, e quindi all'oggetto stesso. Così come ragionamenti dello stesso tipo si applicano a tutte le altre forze di tipo **meccanico** che ci sono familiari, vedi il motore dell'auto, la lavatrice e così via. Il caso estremo che può venirci in mente è un'esplosione che, senza contatto apparente, faccia

crollare un muro a una certa distanza. Le scene di guerra cui siamo purtroppo abituati mostrano come, anche se i frammenti della bomba non arrivano direttamente sul muro, questo può crollare. Basta pensarci un attimo, però: in un caso così disgraziato è stata la compressione dell'aria a esercitare la forza fatale. Comunque vadano le cose, nel momento in cui si trasferisce una forza da *qui* a *là*, un qualche **mediatore** c'è sempre.

Un lettore furbo obietta: «Un momento; e allora come fa una calamita?» Bravissimo. Focherello! Pensava, infatti, Newton: «Cosa c'è tra la Terra e il Sole? Spazio vuoto. E come si fa, allora, a trasmettere la forza di gravità tra i corpi celesti senza che ci sia un qualche **mediatore a contatto**? Attraverso quale meccanismo misterioso questi si *passano l'azione* (attrattiva) a vicenda? È assurdo a dir poco!»,

Già: proprio come una calamita, che funziona anche nel vuoto. E Newton non ritenne mai risolto questo problema, benché le sue formule fossero verificate dalla nascente Meccanica celeste, e con precisione sempre maggiore. Essendo un vero genio, negli ultimi anni della sua vita, aveva imboccato una linea di ragionamento che, forse, lo avrebbe potuto condurre lontano, se in quell'epoca fossero stati disponibili strumenti matematici che, purtroppo, ancora non esistevano.

Accorciando molto, il filo dei suoi ultimi pensieri, lui partiva dalla **rifrazione** della luce, di cui facciamo esperienza comune quando un cucchiaino, immerso in una bacinella d'acqua, sembra piegato. Perché la luce si comporta così? Perché, passando da un mezzo rarefatto come l'aria, a uno più denso come l'acqua, rallenta.



**Figura 9.1**

Un esempio ancora più clamoroso lo abbiamo nei miraggi: un raggio di luce che proviene dall'alto, attraversando strati d'aria a densità sempre diversa, devia progressivamente come nella Figura 9.1 (sempre adattata Per Grazia Ricevuta da Santa Wikipedia), e finisce per tornare dal basso verso l'alto. Quando giunge ai nostri occhi, vediamo un oggetto che non esisterebbe se la luce si propagasse sempre in modo rettilineo, perché il nostro cervello assume a priori che tale debba essere il percorso della luce.

Attenzione, dunque: la rifrazione è un fenomeno fisico che non dipende solo dalla luce, ma anche, e soprattutto, dal *mezzo* attraversato dalla luce. In questo contesto, la cosa che conta di più è proprio il *mezzo*.

In sostanza, nell'estrema fase della sua vita, il vecchio Newton, per analogia con la deviazione della luce causata dalla rifrazione, aveva cominciato a ragionare non solo in termini di attrazione gravitazionale pura e semplice. Rifletteva, invece, in termini di *geometria*, come se fossero le caratteristiche del mezzo attraversato dai corpi celesti, e cioè lo spazio, a *curvarne la traiettoria*. La forza di gravità in sé, cosa diventava in una situazione del genere? Il genio della fisica non giunse mai a conclusione, e lasciò ai posteri l'incombenza di risolvere l'assurdità di una forza che si trasmette attraverso il vuoto. La sua intuizione, però, e cioè quella di una dipendenza del moto dei corpi celesti dal mezzo in cui si muovono, era poderosa, e proponeva due secoli prima di Einstein il problema della natura geometrica della gravitazione. Non è poco, almeno a me pare.

## 9.2) – E adesso torturiamo un pianimale

Geometria, dunque. Il lettore ha già tribolato per digerire le quattro dimensioni dello spaziotempo nella Relatività speciale, ma qui bisogna fare un nuovo salto di qualità. Già ne abbiamo accennato: attorno alla metà dell'800, un giovane matematico di nome Riemann, allievo del famosissimo Gauss, cominciò a ipotizzare che, forse, le Leggi di natura potessero essere un risvolto della geometria, essere *formate* di geometria. In un certo senso, secondo Riemann, usare matematica e geometria solo come supporto per scrivere le leggi fisiche in modo quantitativo, come d'uso ai suoi tempi, era riduttivo. Purtroppo, il precursore di Einstein era cagionevole di salute e morì prima di compiere i quarant'anni.

L'idea finì con lui, anche perché, con ogni probabilità, il progresso della fisica non era ancora sufficiente per prendere in seria considerazione l'ipotesi. E poi abbiamo visto come, alla fine dell'800, Lord Kelvin stesse già passando alla recita del Requiem – lordato di olio da macchina – per la fisica britannica. Il povero Riemann, comunque, prima di tirare le cuoia aveva già predisposto lo scenario matematico indispensabile a trattare *qualsiasi struttura geometrica* in senso lato, non importa a quante dimensioni, e se piane o curve.

Curvatura: ecco il nocciolo del problema. Per comprendere i rudimenti della Relatività generale, essenziali alla costruzione di un Modello d'universo che stia in piedi da solo, le cose non sono così semplici come le abbiamo descritte nei capitoli precedenti, ma possiamo appigliarci per comodità, ancora per poco, all'intuizione newtoniana: una *curvatura* delle traiettorie dei corpi celesti, come l'esito di una ancora non meglio specificata *rifrazione* dello spazio(*tempo*). È un'immagine mentale impropria, ma serve all'intuizione.

«Già, come se finora avessimo passeggiato sul velluto, e non ci fossimo invece inerpicati per un sentiero di montagna che perfino un mulo farebbe fatica a seguire!» obietta a gran voce un lettore. E non posso dargli torto, ma purtroppo non basta ancora. Dobbiamo lasciarci dietro il mulo, e cominciare ad addentrarci per sentieri ancora più impervi. Addirittura, saliremo abbrancati a una parete di roccia buia e *curva*! Comunque, lo faremo sempre usando un modellino intuitivo per quanto possibile, e vedrete che usciremo a riveder le stelle con qualche sbucciatura sulle ginocchia e nulla di peggio. In questa sezione, per esempio, avremo il nostro primo impatto con le geometrie non euclidee. Quelle studiate da Riemann, per l'appunto.

Avevamo un pianimale da qualche parte, vero? Sta ancora in gabbia, e pare contrito per essere esploso in escandescenze. Al mascalzone, però, resta qualcosa da pagare: a nostro giudizio non ha ancora espiato abbastanza, e gli giocheremo un tiro mancino. Gomma alla mano, cancelliamo le sbarre dalla sua cella. Eccolo che esce, allegro, e voglioso d'imparare anche lui la geometria. Non vuole fare più brutte figure nel confronto coll'animale il quale, al momento, se ne resta tranquillo nella sua retta meditando sulle disavventure spaziotemporali che gli sono occorse nel diagramma di Minkowski.

Noi, però, in questa fase siamo interessati solo al pianimale; sarà lui l'oggetto delle nostre attenzioni. Lo osserviamo mentre traccia sul suo piano i primi segmenti, le parallele tagliate da una trasversale, i poligoni e così via. Il teorema di Pitagora già lo conosceva... lasciamo che prenda pratica con gli altri teoremi principali della geometria euclidea. Che fosse intelligente, oltre che discolo, lo sapevamo, e ora gli chiediamo quale sia la somma degli

angoli interni di un triangolo qualsiasi. Sghignazza (è sempre sgarbato e sussiegoso) e afferma che è pari a  $180^\circ$ . «Attenzione: per *ogni* triangolo?» insistiamo. «Come fai a esserne certo, finché non li hai misurati tutti?» La bestiaccia ci squadra dall'alto in basso, o per meglio dire: squadra i contorni della nostra ombra che cadono sul suo piano. Con la boria di un barone universitario, afferma che lui ha dimostrato un teorema sull'argomento, e quindi non c'è bisogno di misurare nulla. Rivolgendosi a me in persona (i lettori non sono toccati da quanto segue), borbotta qualche infamità sui fisici che hanno sempre bisogno di sperimentare, mentre la sublime matematica ne è esentata. Che mi piaccia o no le cose stanno come dice lui, e se non ci credo sono ignorante e presuntuoso.

Sarà lui, un ignorante presuntuoso! Al punto da non capire che, comportandosi in questo modo, finirà per indispettire chiunque. Vogliamo punirlo di nuovo con una sottile pena psicologica che, auspicabilmente, gli insegnerà un po' d'umiltà? Magari, addirittura, potremmo riuscire a riabilitarlo e a fargli comprendere i suoi limiti e le buone maniere.

In soffitta, dove il nonno aveva ricavato il suo piccolo studio, c'è quel grosso mappamondo dell'800. In un impeto distruttivo, con lo smalto spray rendiamo la sua superficie liscia, verde uniforme, perfettamente levigata. Giostrando con un po' di calamite, riusciamo perfino a tenerlo fermo grazie a sospensioni magnetiche, in modo che non abbia bisogno di essere imperniato ai poli. Meglio non sapere cos'avrebbe detto il nonno vedendo il mappamondo di famiglia ridotto così... insomma, abbiamo creato una sfera perfetta, e quel che ci interessa d'ora in poi è la sua superficie. La *superficie*, ricordate: **non l'intero volume**, non quello che sta *dentro* il mappamondo, ci siamo capiti? Proseguiamo nel nostro esperimento afferrando il pianimale e poggiandolo sulla sfera. Poi gli domandiamo...

Come dite? In che modo siamo riusciti a tirare fuori il pianimale dal suo piano? Dal punto di vista concettuale, la cosa non presenta difficoltà per animali a tre dimensioni, o *trianimali* come noi: infiliamo le dita nel piano, le stringiamo attorno alla bestiola e lo trasciniamo fuori. Da solo, lui non potrebbe mai uscirne ma, sempre restando una figura piana, un *pianimale* può essere trascinato da un *trianimale* dovunque paia a quest'ultimo, no? Pensateci un po' e, sia pure sbuffando, mi darete ragione.

Qual è stata l'esperienza da lui vissuta? Bene: è facile immaginare il suo spavento nel vedere che, all'improvviso, hanno preso forma attorno a lui cinque ellissoidi irregolari, in altre parole le sezioni delle nostre dita che attraversavano il suo piano. Infatti, ricordiamo che lui può vedere solo *sezioni bidimensionali* di oggetti a tre dimensioni. Dopodiché, questi ellissoidi si sono avvicinati a lui, l'hanno afferrato, e l'hanno letteralmente strappato dal suo mondo verso... verso cosa? Ovviamente, non ha potuto capirlo; nei suoi ricordi è rimasta solo una gran confusione: forse un'esperienza mistica? Sta di fatto che, nel giro di pochi secondi, gli ellissoidi l'hanno poggiato su un nuovo piano, e sono spariti senza lasciare traccia. E questa descrizione serve di avviso al lettore: qualora egli vedesse gonfiarsi dal nulla cinque *sferoidi* irregolari che lo agguantano, non si spaventi. Sono soltanto le sezioni tridimensionali delle dita di un *quadrimale* (animale a quattro dimensioni) che vuole spostarło dal nostro universo a un altro. Ma non gli succederà, si rilassi.

Comunque sia, il pianimale si trova di nuovo su una superficie, e gli ci vuole poco per tranquillizzarsi. Certo, si tratta di una superficie curva, ma il suo raggio di curvatura è molto grande rispetto alle dimensioni della bestiaccia, la quale non percepisce immediatamente la differenza rispetto alla superficie piana sulla quale scorrazzava prima. Presto o tardi si

accorgerà che qualcosa non gli torna (la vedrà, il mascalzone!), ma la sua vita seguirà a scorrere secondo canoni rigorosamente bidimensionali.

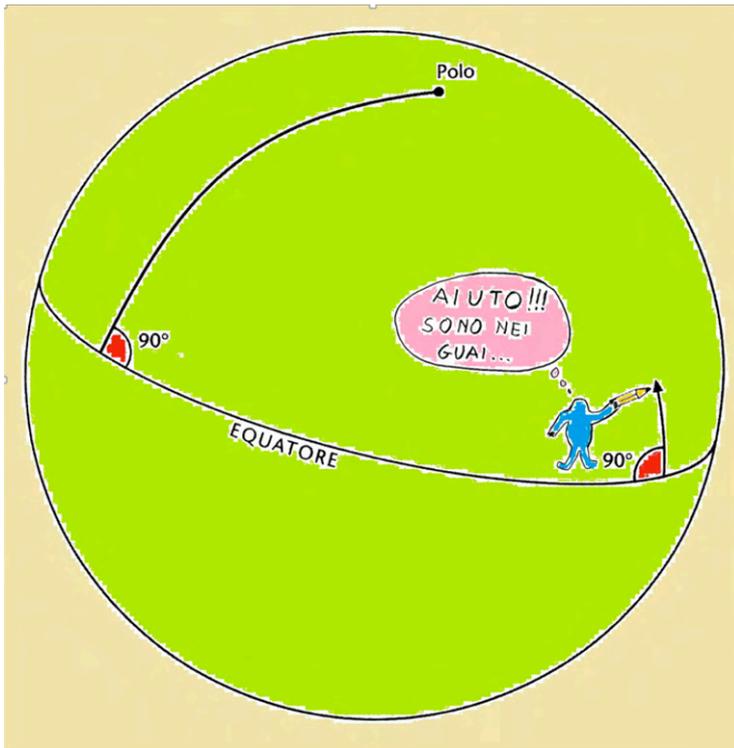
Il problema che si trova ad affrontare è il seguente: a causa della curvatura, la sfera possiede proprietà geometriche del tutto differenti rispetto a quelle del piano. L'essenza del gioco a cui stiamo giocando per avviarci a prendere familiarità con la Relatività generale è tutta qui: geometria curva, ma a **quattro dimensioni**: tre spaziali, e la quarta *temporale* come già dovrebbe essergli familiare dal Capitolo 7.3. Purtroppo, non siamo in grado di visualizzare mentalmente un **volume curvo** (e se ci riuscite, avete sbagliato qualcosa o, come al solito, dovete rivolgervi al più prossimo Centro d'igiene mentale), e l'unica analogia che possiamo comprendere è quella di una **superficie curva**, ossia una struttura bidimensionale immersa nello spazio tridimensionale, come nel caso della sfera. In questo modo, guardando dall'esterno, o in altre parole dalla terza dimensione, per noi non è un problema afferrare tutto con un'occhiata, e capire intuitivamente quello che, per il povero pianimale, rappresenta una sfida intellettuale gravosissima. Infatti, lui non sa visualizzare una **superficie curva**, ovviamente.

Torniamo al pianimale che abbiamo appena spiattellato sulla sfera. Adesso è il nostro turno di ridere del suo teorema, fare un po' i gradassi e ordinargli di provare le sue affermazioni, non con una dimostrazione teorica, ma tracciando un vero triangolo e misurandone la somma degli angoli interni. Il signorino sembra ancora un po' scosso dal trattamento subito di recente, e forse pensa che sia meglio per lui non cominciare a fare le bizze. Obbedisce, tanto sa che troverà sempre i fatidici **180°**.

«Scegli questo punto come primo vertice del triangolo» gli intimiamo e, con la matita, segniamo un punto su quello che, per il nonno che si sta ancora rivoltando nella tomba, era il Polo nord del mappamondo. Il pianimale si assoggetta, e comincia a tracciare un segmento di retta – o per lo meno a lui così sembra – in una direzione qualsiasi. Siccome sta lavorando su una sfera, però, ed essendo partito dal Polo, noi sappiamo benissimo che, invece di un segmento di retta, lui sta tracciando un **segmento di meridiano** diretto verso sud.

E qui mi fermo un attimo per far notare al lettore un elemento importante: su una superficie sferica non esistono *rette* nel senso euclideo, ma solo archi di cerchio. In particolare, gli **archi di cerchio massimo** sono concettualmente la cosa più simile a una retta, in questa nuova geometria. Basta pensarci un attimo, ed è intuitivo: qual è la linea di distanza minima tra due punti qualsiasi? Bravi! Un segmento di cerchio massimo. Vedendo il mappamondo, questa constatazione non ci stupisce, ma il pianimale non vede se non la superficie nei suoi dintorni, e la sua intuizione non arriva così lontano come la nostra.

Così, quando la linea da lui tracciata arriva a quello che, prima di smaltare tutto di verde, era l'equatore terrestre, interveniamo di nuovo: «Ferma, siamo arrivati al secondo vertice del triangolo. Adesso ruota di un angolo retto in senso orario, e poi comincia a disegnare il secondo lato». La bestiola, forte della sua esperienza in geometria euclidea, si convince che vogliamo fargli disegnare un triangolo rettangolo, e anche stavolta obbedisce. Percorre – senza saperlo – un tratto di equatore, e quando ne ha disegnato un quarto (Figura 9.2) gli ordiniamo: «Ferma di nuovo; siamo all'ultimo vertice. Ora disegna un nuovo angolo



**Figura 9.2**

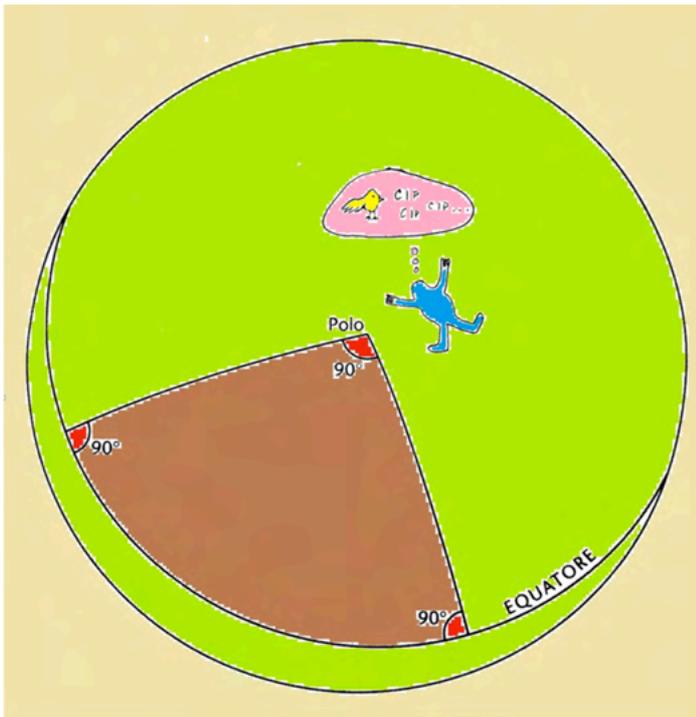
D'altra parte, è ancora spaventato, e non si azzarda a disobbedire. Traccia l'angolo retto e, rassegnandosi ad attaccare l'asino dove vuole il padrone, comincia a disegnare un nuovo segmento di cerchio massimo (che lui ancora crede un segmento di retta) inerpicandosi su per quello che, nel mappamondo, rappresenta un altro meridiano.

Disegna che ti disegna, arriva... c'è qualche stregoneria in giro, oppure è impazzito anche lui? Eccolo lì, il solito punto di partenza, eppure il triangolo si chiude! Com'è possibile tutto ciò? Di sicuro ci sarà qualche errore, ma no, lui ripercorre il triangolo intero e tutto è stato realizzato alla perfezione! Per di più, come se non bastasse, la somma dei due angoli alla base, quelli da noi commissionati, è già uguale a **180°**; ora, al vertice, si trova di fronte un altro angolo retto (Figura 9.3), e la somma degli angoli interni di questo maledetto triangolo, perché di una figura geometrica del genere si tratta con certezza assoluta, considerando che l'ha disegnato lui stesso, è **nientemeno che 270°**!

Lo lasciamo intontito, mentre gli uccelletti gli cantano la canzoncina. Tra un po' si riprenderà e comincerà a disegnare nuovi triangoli, misurandone con cura i lati e gli angoli interni. Alla fine, si accorgerà che, lavorando di fino, per avere una somma degli angoli interni vicina a **180°** il triangolo deve essere sempre più piccolo, addirittura infinitesimo. Tutta la geometria euclidea è andata a pallino, e occorre sostituirla con una nuova geometria ancora da scoprire, e che pure avrà le sue regole altrettanto inflessibili di quelle che si avevano nel piano, ma diverse.

retto, stavolta in senso antiorario, e poi traccia l'ultimo lato del triangolo fino a chiuderlo al vertice iniziale».

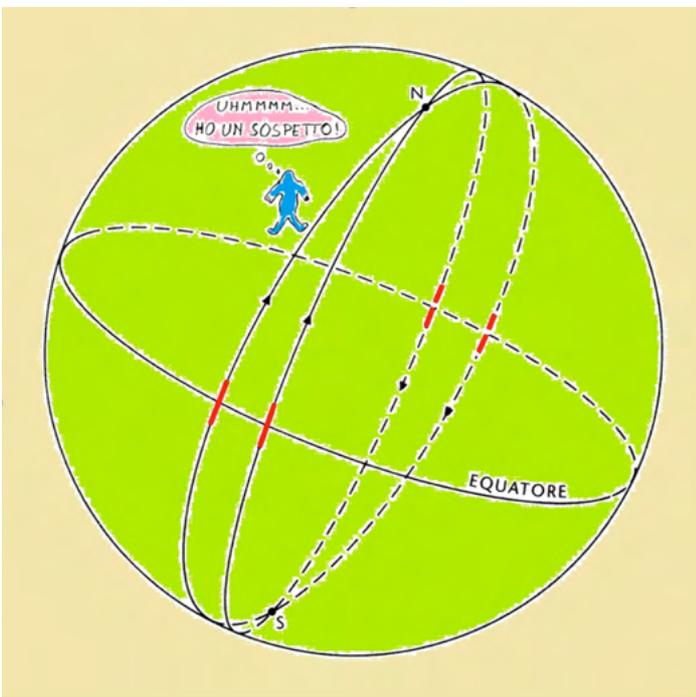
Il pianimale comincia a essere seriamente preoccupato per la propria sorte. Gliene stanno capitando di tutti i colori: prima quel viaggio esoterico attraverso chissà che, e adesso, come se non bastasse, il suo padrone è impazzito all'improvviso e gli sta ordinando di compiere azioni impossibili. Ben conoscendo la geometria euclidea, lui sa che una figura che abbia due angoli retti alla base non può certo essere un triangolo, ma solo un quadrilatero, e quindi non riuscirà mai a tracciare un terzo lato che lo riporti al punto di partenza.



Penosamente, il pianimale si mette a costruirla. E si accorge di un'altra cosa che non quadra, lavorando con due rette parallele. Come faceva nel piano, ha cominciato disegnando due segmenti paralleli, e ora li prolunga da un lato. Quando sguazzava nel suo quadretto appeso alla parete, prolungando le parallele fino ai bordi del suo (piccolo) universo, la distanza tra le linee rimaneva costante. Qui invece, malgrado ogni sforzo per prolungare in modo *rettilineo* i segmenti, le rette (ma forse perfino lui ha capito che non si possono più definire "rette") si avvicinano e finiscono per incrociarsi, e poi scavalcarsi addirittura.

**Figura 9.3**

Per noi, che guardiamo da fuori, la cosa è ovvia: che altro dovrebbero fare, due meridiani, se non incrociarsi ai Poli? Per il pianimale, invece, è una sorpresa



costatare che le *rette* ricominciano ad allontanarsi fino a raggiungere una distanza massima tra loro, peraltro identica a quella che lui aveva scelto all'inizio, poi si avvicinano di nuovo, s'incrociano e si scavalcano. Dopodiché divergono ancora e alla fine, invece di andarsene in qualche modo all'infinito, il pianimale si ritrova al punto di partenza, con le due rette che, arrivando dall'altra parte, si fondono con quelle da cui aveva cominciato (Figura 9.4).

Ricordate che avevamo detto che la bestiola è intelligente? Alla fine delle sue peripezie geometriche, sta iniziando a seguire una linea di pensiero analoga a

**Figura 9.4**

quella che fece disperare tanto Einstein. Tutto l'insieme di circostanze gli ricorda in qualche modo un cerchio... focherello... fuoco... focone... Ci siamo! Ecco la soluzione!

Ha capito di trovarsi sulla superficie di una sfera, nonostante la sua intuizione non gli consenta di visualizzarla mentalmente. Anzi: come abbiamo accennato in un capitolo precedente, non ha neppure il nome per “*sfera*”, e la definisce “*Ipercerchio*”. D'altronde, la solita matematica gli consente di trattare la geometria sferica, e non ci mette molto a individuarne i primi teoremi. Così, trova una relazione teorica tra l'area dei triangoli e la somma dei loro angoli interni, prova a misurare, *et voilà*, il teorema funziona. Il suo sbigottimento iniziale si traduce in frenesia di scoprire tutto su questa nuova geometria che lo affascina, e adesso ci ride in faccia.

Ci rimorde un po' la coscienza per il brutto tiro, ma per fortuna non c'è stato bisogno di aiutarlo nell'interpretare la sua nuova situazione. Non esiste solo la geometria euclidea che si applica al piano, infinito in ogni direzione e *liscio*. Intendiamoci: Euclide aveva ragione in tutto e per tutto; finché non si esce dal piano, ogni suo teorema è vero e basta. D'altronde, per costruire la sua geometria, il greco si servì di alcuni assiomi di base che sembravano troppo scontati perché ne fosse necessaria una dimostrazione. Ebbene: nei secoli e nei millenni i matematici si sono accorti che, di questi assiomi, uno lascia un po' perplessi, perché non è del tutto vero che sia così ovvio a priori. È il postulato che definisce due rette parallele.

Così, fin da epoche remote, alcuni matematici si sono chiesti: «È proprio necessario, per costruire la geometria, aggiungere quel postulato? E se provassimo a costruirla, prescindendo dalla necessità di definire *parallele* tra loro due rette, e solo due per volta, che non s'incontrano mai?».

Per rispondere a questa domanda c'è voluto molto tempo, anche perché nel **1733**, il primo a costruire una geometria che prescindesse dal postulato delle parallele, il gesuita Girolamo Saccheri, fu sconvolto dai propri risultati, e li ritenne *ovviamente sbagliati* in quanto *ripugnanti all'intelletto*. Giudicò, dunque, di aver fornito la dimostrazione indiretta che l'ultimo postulato di Euclide è *vero*.

Purtroppo, i risultati di Saccheri erano tutto meno che *ovviamente sbagliati*. Infatti, tanto per dirne una, non contenevano alcuna contraddizione logica. Poiché la nostra intuizione si è formata su millenni di Euclide, Saccheri non riuscì a cogliere la piena consistenza interna della geometria che aveva costruito: la prima della storia che fosse non-euclidea. Ci vollero due secoli prima che Lobacevskij la riscoprisse.

Un po' come il nostro pianimale: euclideo com'è sempre stato, ha incontrato non poche difficoltà a concepire un mondo in cui le rette parallele non esistono affatto, ma sono sostituite da archi di cerchio massimo che, in qualche modo, ne fanno le veci. D'altronde, è pur vero che solo la nostra abitudine a giocare con i mappamondi ci permette di cogliere a colpo d'occhio, e risolvere intuitivamente, l'assenza di rette parallele su una superficie sferica. Sebbene – confessatelo – ci lasci sempre un po' dubbiosi la rotta aerea *polare* come quella di minor distanza tra Londra e New York. In ogni caso, per restare al pianimale, non possiamo biasimarlo se il concetto di un *piano curvo*, all'inizio, gli era estraneo a livello intuitivo almeno quanto a noi, esseri tridimensionali, sarebbe estraneo il concetto di uno *spazio(tempo) curvo*.

Non cominciate a lagnarvi se vi ripeto che tutte queste chiacchiere sul pianimale e la superficie sferica erano intese come puro e semplice aperitivo. Pretendevate forse di

trascinarvi per alcune pagine solo per spirito di sadismo nei confronti di quella povera bestia? Adesso tocca a noi, d'immergerci in uno *spaziotempo curvo*. Vedrete, però, che l'analogia del pianimale aiuterà molto.

## 9.3) – Forze, queste sconosciute

Torniamo ancora una volta indietro nel tempo. Eravamo rimasti al matematico tedesco Gauss, col suo allievo Riemann. Come già detto, costoro posero le basi delle Geometrie curvilinee e non solo: cominciarono addirittura – specialmente Riemann – a gettare i semi di un'idea sconvolgente per i loro tempi, e che dovette restare in sospenso quasi un secolo prima di germogliare. Ve la ripeto per la terza volta, perché è davvero importante: la fisica, come siamo abituati a pensare, è la scienza che studia le leggi di natura, ma la fisica stessa non sarà, alla fine, una delle tante sfaccettature della geometria? Forse, la vera chiave per la comprensione della natura passa proprio attraverso la geometria, e non sto parlando di vecchie idee platoniche, ma di qualcosa di molto più moderno e concreto. Solo che, detto così, ancora non si capisce nulla, e bisogna arrivare alla Relatività generale con le sue raffigurazioni di tipo geometrico, per capire di cosa sto parlando.

Purtroppo, Gauss ebbe gran da fare per tutta la vita, essendosi dedicato a costruire un edificio matematico così complesso partendo quasi da zero. Di Riemann, su cui Gauss aveva posto le speranze come suo logico successore, abbiamo già detto che morì troppo giovane, prima di poter coronare il sogno di entrambi, ma per lo meno creò lo schema per poter trattare **ogni possibile geometria** (che – vi faccio notare – non è poco). Seguirono altri, fra i quali meritano una menzione speciale Lobacevskij, contemporaneo un po' più giovane di Riemann, e infine molti italiani tra i quali Ricci, Levi-Civita, e Beltrami. Giungiamo infine al francese Poincaré, la cui opera si sovrappone almeno all'inizio a quella di Einstein, al punto che alcuni francesi rivendicano la Relatività come un edificio di Poincaré-Einstein, vagamente nello stesso spirito in cui ogni rovina romana in Francia viene definita "Gallo-romana" *...irréductible Asterix!*

È comunque vero che il suo lavoro (di Poincaré, non di Asterix) aiutò lo stesso Einstein, almeno all'inizio e per il tramite dell'amico Marcel Grossmann, a districarsi fra concetti geometrici che non erano per niente familiari alla sua formazione di fisico. Questo, per spiegare al lettore che, quando si trova di fronte a un'equazione compatta e matematicamente elegante, non deve pensare che sia stata "inventata" così come la vediamo oggi, dopo decenni di levigatura. Lo scopritore ci è arrivato scavando con la zappa, poi martellando qua e là, e infine rimuovendo le asperità con lo scalpello. I posteri gli hanno poi passato la carta vetrata e il lucido.

Finalmente possiamo tornare a Einstein. Con la sua Relatività speciale, in fin dei conti non si era ancora discostato molto da Galileo, viaggiando assieme a lui nella stiva di una nave in moto rettilineo uniforme. Dettaglio non insignificante: la nave di Einstein viaggiava a velocità prossima a quella della luce, e in quel caso le cose cambiano in maniera considerevole rispetto a quanto teorizzato quattro secoli fa dal padre della scienza moderna.

Poi, una volta che l'edificio dell'*Invariantentheorie* fu completato risolvendo in maniera chiara e consistente il problema della costanza di  $c$ , il genio di Ulma decise di seguire le orme di Newton e aggiungere il pezzo mancante. Seguiamo il percorso logico da lui seguito. La Relatività speciale presupponeva l'assenza di **forze**, e in questo modo era stato possibile ricondurre a geometria dello spaziotempo la prima frazione della fisica, la cosiddetta "cinematica": lo studio del moto dei corpi in assenza di forze che li facciano deviare da quello

rettilineo uniforme. Vale a dire la base su cui aveva costruito il bistrattato Minkowski (che, però, se l'era cercata, con quel "lazy dog").

Ora, invece, non si poteva più prescindere dalle forze, e bisognava capire se fosse possibile ricondurre anche la "dinamica", e cioè lo studio del moto dei corpi in presenza di forze esterne, a geometria spaziotemporale e basta. L'idea che, confusamente, si aggirava nella testa del povero Riemann poco prima che morisse, insomma.

Chi ricorda un po' la fisica delle scuole superiori avrà pure memoria di aver incontrato spesso "*forze*" in senso generico, ma nella costruzione del seguito del nostro Modello d'universo (almeno per tutta la Sezione II) ce n'è una e una sola che conti davvero: quella di gravità. Ne abbiamo parlato molto, e nel capitolo 9.1, abbiamo anche riportato la formula che lega la forza gravitazionale alla presenza di masse. Nella stessa sezione, se tornate indietro a guardare, c'è anche un'altra formuletta (messa tra parentesi) la quale afferma semplicemente che, applicando una forza a una massa, quest'ultima è accelerata. Robetta già incontrata nel capitolo 6.2, tra l'altro.

In questo rimpallare le forze tra Newton ed Einstein, probabilmente ci semplifica un po' le cose tornare un momento a Galileo; non solo è più facile da capire, ma è anche una buona premessa a quanto vedremo nel seguito. Veniamo perciò al famigerato esperimento di gettare una palla di cannone e una di legno, di peso molto inferiore, giù dall'ultima balconata della Torre di Pisa, per mostrare che entrambe giungono a terra contemporaneamente. Con ogni probabilità, questo esperimento è solo tarda agiografia al pari della storia riguardante la lampada oscillante nella cattedrale di Pisa, e per fortuna non ebbe mai luogo altrimenti la resistenza dell'aria avrebbe giocato un brutto scherzo al Professorone. Però è un buon modo per illustrare i problemi concettuali in cui si dibatteva la scienza dell'epoca, e che Galileo riuscì a superare cancellando i vecchi paradigmi.

A quei tempi, un cattedratico di fisica doveva insegnare la "fisica aristotelica". Ora, il grande filosofo greco, basandosi su esperimenti (inaccurati) suoi e altrui, aveva affermato quanto segue: «Causa del moto è una forza a contatto. Cessando la forza, anche il moto cesserà». O, in termini più moderni: «Affinché un oggetto si continui a muovere a velocità invariata, è necessario applicargli una forza costante» e cioè, se proprio volessimo tradurlo in formule, qualcosa del tipo:

$$\underline{F = m \times v}$$

e non, come dice Newton,

$$\underline{F = m \times a.}$$

Galileo, grazie agli esperimenti da lui stesso condotti, e a una loro interpretazione corretta, anticipava Newton di quasi un secolo affermando che, al contrario, per mantenere un oggetto in moto rettilineo uniforme non è necessario applicargli forze esterne. Anche se lui, con ogni probabilità, non pensava a un moto inerziale veramente rettilineo, ma aveva in mente archi di cerchio di raggio enorme. Questa, però, è una storia che non ci interessa.

«Se consideriamo la caduta dei gravi verso il suolo», aggiungeva Galileo, «tutti gli oggetti accelerano in modo uguale, e perciò la palla di cannone e quella di legno giungono a

terra contemporaneamente». Ora si domanda al lettore: aveva ragione Aristotele o Galileo? E non basta rispondere: «Il secondo, ovviamente!» solo perché sappiamo che, alla fine, l'esperienza e i posteri hanno sentenziato così. Bisogna pure capire i motivi, perché l'intuizione suggerisce qualcosa di diverso.

Eseguiamo dunque un esperimento reale, non concettuale: il lettore deponga il proprio telefonino cellulare sul tavolo, e poi cominci a spingerlo con la mano in modo lento e costante. Che cosa fa l'oggetto? Accelera, oppure si sposta a velocità costante? La risposta *sperimentale* è: «Spingendolo con forza costante si sposta a velocità costante». Il che fa pensare che avesse ragione Aristotele, e Galileo dovesse essere mandato al rogo (di nuovo? Volete piantarla una volta per tutte?).

In realtà vince Galileo, perché l'esperimento appena eseguito contiene in sé una trappola concettuale, un fattore di cui non abbiamo tenuto conto: l'*attrito* fra l'oggetto e il piano del tavolo. Infatti, appena l'attrezzo comincia a muoversi, ecco sorgere immediatamente una forza di attrito che in una frazione di secondo diventa uguale e contraria a quella da noi applicata. E quindi, se seguitiamo a spingere con forza costante, non facciamo che bilanciare l'attrito, per cui la forza complessiva cui è sottoposto il marchingegno è nulla: *zero via zero*. Con questo chiarimento, ci chiediamo di nuovo: qual è la reazione del nostro cellulare a una forza complessiva nulla? Risposta: «Continua a viaggiare a velocità costante».

Prova ne sia che, spingendo fino al bordo del tavolo e oltre (seguitate a sperimentare, non preoccupatevi delle conseguenze), svaniscono sia la forza da noi applicata, sia quella d'attrito, e prende il sopravvento la gravità. Quest'ultima, se trascuriamo il debole attrito con l'aria, fa accelerare l'oggetto in modo costante, tanto vero che esso giunge al suolo con gran velocità e va in pezzi. Con mia soddisfazione, perché odio quegli aggeggi.

Oh, scusate. Non ve l'avevo detto prima!

Restiamo in tema: la differenza sostanziale tra Galileo e gli aristotelici del suo tempo era che il primo aveva considerato pure l'attrito, mentre "il maestro di color che sanno" manco se n'era reso conto. Infatti, Galileo sperimentava per mezzo di piani inclinati, levigatissimi e di pendenza variabile, sui quali faceva rotolare palline di acciaio quasi perfettamente sferiche minimizzando l'attrito. Sapeva, perciò, che una pallina messa in moto su un piano orizzontale tende a continuare a muoversi senza bisogno di ulteriori spinte, mentre occorre l'attrazione terrestre, vale a dire una forza, per farla accelerare. E, proprio grazie ai piani inclinati, non aveva nessun bisogno di salire sulla Torre di Pisa per sapere che, per qualsiasi oggetto, l'accelerazione durante la caduta sarebbe stata identica (sempre in assenza dell'aria...). In sostanza, anche se Galileo non formalizzò mai questi risultati con precise equazioni matematiche, nel suo lavoro erano già scritti *in nuce* i primi due Principi della dinamica, risistemati, quantificati e spiegati poi in modo chiaro e definitivo da Newton.

Breve inciso: Newton ammetteva francamente che era riuscito a realizzare cose grandiose, solo perché era «...salito sulle spalle di giganti...» il principale dei quali era proprio Galileo. Lo scriveva forse provocatoriamente, in una lettera al collega Robert Hooke il quale, poverino, era di piccola statura e se ne vergognava. Newton, sul piano umano, era una carogna! Ma pure Galileo, intendiamoci.

Adesso la ricreazione è finita. Devo chiedere al lettore di rivestire i panni dei suoi giorni di scuola, quando gli fu insegnato che, se si moltiplicano tra loro due frazioni, quel che c'è al denominatore della prima si può cancellare con quel che c'è al numeratore della

seconda, purché si tratti della stessa quantità. Che sia un numero, oppure anche un simbolo che, però, identifichi *oggetti* uguali, d'accordo? Pronti?

Senza neanche bisogno di sapere quanto sia la massa della Terra, indichiamola con la lettera  $M$ . Invece, con la minuscola  $m$  definiremo la massa dell'oggetto che abbiamo deciso di far cadere dall'alto della Torre di Pisa: non importa se una palla di piombo o di legno (ovviamente, nei due casi, i valori numerici di  $m$  saranno diversi) o il vostro cellulare. Infine,  $R$  sarà il raggio terrestre che coincide, con ottima approssimazione, con la distanza tra il centro del pianeta e la balconata superiore della Torre. Con questo viatico siamo decisi a calcolare il quanto vale l'accelerazione di gravità che agisce sugli oggetti sui quali stiamo sperimentando. È banalissimo, state tranquilli, purché teniate d'occhio le formule.

La forza di gravità  $F$  che si esercita tra la Terra di massa  $M$ , e un generico oggetto di massa  $m$ , si ricava dalla legge di Newton che abbiamo già visto in precedenza. E, poiché la forza  $F$ , applicata a un oggetto di massa  $m$ , gli imprime un'accelerazione  $a$ , potremo scrivere

$$F = G \frac{M \times m}{R^2} = m \times a \Rightarrow a = G \frac{M \times \cancel{m}}{\cancel{m} \times R^2} = G \frac{M}{R^2}$$

**Newton**                      **Dinamica**                      | **Semplificazione**                      **Accelerazione**

tutto d'un fiato l'equazione che, dalla legge di Newton, conduce al calcolo dell'accelerazione di gravità.

Partiamo, a sinistra, da “**Newton**”: riconoscerete la formula della forza di gravità newtoniana fra la Terra e un generico oggetto. “**Dinamica**” è, banalmente, forza di gravità moltiplicata per la l'accelerazione dell'oggetto medesimo. “**Semplificazione**” è quello che abbiamo detto: le due masse  $m$  al numeratore e al denominatore sono la stessa cosa, e si semplificano tra loro. “**Accelerazione**” è l'accelerazione di gravità risultante. E qui state bene attenti.

Il risultato che troviamo è il seguente: che la massa  $m$  sia grande o piccola, essa non compare più nell'accelerazione di gravità, e arriviamo al concetto che sorprese i colleghi di Galileo: due corpi di *peso* diverso (il concetto di *massa*, legato al *peso*, richiese un certo tempo prima di essere chiarito) cadono con la stessa accelerazione.

Forse qualcuno ne ricorda perfino il valore: **9,81** metri al secondo, per ogni secondo di caduta, e arrotondiamo a **dieci** per semplificare. Di conseguenza, se potessimo ignorare l'attrito dell'aria (in pratica non si può a meno di eseguire esperimenti nel vuoto), un oggetto in caduta libera, dopo un secondo raggiungerebbe una velocità di dieci metri il secondo, dopo due secondi viaggerebbe a venti metri il secondo, e così via.

Attenzione: non che Galileo avesse fatto i conti di cui sopra; a lui mancava del tutto la legge di gravità, anzi nemmeno ci credeva, e aveva anche un'idea piuttosto grossolana del secondo principio della dinamica. Per il momento sperimentava, e lasciava i risultati alla riflessione successiva. Aveva però compreso che ciò che confondeva Aristotele era proprio l'attrito; per esempio, quello con l'aria.

A conti fatti, quest'ultimo è molto importante ad alte velocità. Per esempio, una persona che si gettasse da un aereo ad alta quota, continuerebbe ad accelerare solo fino a **150** km/h circa. A quel punto, la forza di attrito del suo corpo con l'aria crescerebbe al punto di bilanciare quella di gravità. Stando così le cose, anche se cadete da un aereo, tranquillizzatevi: più di tanto non potete accelerare. Come dite? Che **150** km/h sono troppi? Beh, sì, insomma, sono un po' tanti... meglio non rischiare senza paracadute (che aumenta in modo enorme l'attrito con l'aria).

Certo, l'intuizione seguita a reclamare con forza che una piuma non potrà mai cadere con la stessa accelerazione di un pallino di piombo. Per farla tacere, basta recarsi a un buon museo della scienza e della tecnica (quello di Milano va bene, ma quello di Monaco di Baviera ve lo raccomando caldamente). Troverete da qualche parte un tubo trasparente (collegato a una pompa da vuoto) che contiene piuma e pallina. Si mette il tubo in verticale aspettando che la piuma fluttui fino in fondo, poi si spinge il pulsante di avvio della pompa. Dopo pochi secondi, l'aria è stata aspirata tutta dal tubo o, per meglio dire, ne resta così poca da non influenzare l'esperimento. Che consiste nel rovesciare di scatto il tubo e, meraviglia: la piuma accelera quanto la pallina, e arrivano in fondo contemporaneamente. *Quot erat demonstrandum*. E poi, l'esperimento fu eseguito sulla superficie lunare con un martello e una piuma, e filmato.

## 9.4) – Cadere senza farsi male (solo per un po')

Stiamo saltando avanti e indietro nel tempo, tra Galileo, Newton ed Einstein, poiché sono questi i caposaldi per quanto riguarda il concetto di *forza*. Come primo risultato, abbiamo appena visto per quale motivo l'accelerazione gravitazionale esercitata dalla Terra su qualsiasi oggetto deve essere la stessa, indipendentemente dalla massa dell'oggetto, come trovato sperimentalmente da Galileo e spiegato da Newton. Infatti, uguagliando la forza di gravità a quella che permette di calcolare l'accelerazione, sparisce la massa  $m$  dell'oggetto in esame, poiché essa compare due volte: la prima al numeratore, la seconda al denominatore, e il gioco è fatto; l'accelerazione non dipende più da  $m$ . In questo passaggio aritmetico elementare, Einstein (e altri prima di lui, ma solo lui andò avanti sul serio) individuò un problema fondamentale: è proprio lecita questa semplificazione di  $m$ ? Le due  $m$  significano *davvero* la stessa cosa?

Per noi, lontani posteri, un problema del genere può sembrare una disquisizione erudita, ma non è così. Cerchiamo di vedere la cosa sotto la prospettiva giusta e chiediamoci cosa rappresenti, da un punto di vista *reale*, la massa che compare nella formula newtoniana per la forza di gravità. Fermo restando che la *realtà in sé* è destinata a sfuggirci per sempre come afferma Kant, *questa* massa è una certa *qualità* della natura che ha la capacità di generare, nei propri dintorni, un *qualcosa* tale per cui (come vedete seguito a restare molto sulle generali), se un altro oggetto dotato anche lui di massa transita da quelle parti, percepisce questo *qualcosa* e reagisce di conseguenza. Per il momento, non serve entrare in dettaglio maggiore, se non per dire che, con queste specifiche in mente, ci conviene definire “*Massa gravitazionale*”  $m_g$  la famigerata  $m$  che compare nella legge di gravitazione universale di Newton.

Adesso passiamo invece a considerare la massa che compare nel secondo Principio della dinamica:  $F = m \times a$ . In questo caso,  $m$  si può interpretare come la *resistenza* opposta dall'oggetto a cambiare velocità. Vale a dire: se applichiamo una forza a qualsiasi oggetto, quello reagirà accelerando, ma se la sua massa  $m$  è grande accelererà poco, se invece è piccola, accelererà molto. Sia nel linguaggio scientifico, sia in quello di tutti i giorni, il concetto associato a questa *resistenza* è “*Inerzia*”, e perciò questa seconda massa  $m$  sarà definita più propriamente: “*Massa inerziale*”  $m_i$ .

Eccoci, dunque, al problema che Einstein risolse tagliando il nodo di Gordio con un colpo di spada, e stiamo per vedere come fece. Esiste qualche motivo a priori per cui la *massa gravitazionale* debba possedere qualche relazione con la *massa inerziale*? La prima si riferisce alla forza di gravità, la seconda è una resistenza all'accelerazione, e non contiene nulla che possa far pensare alla gravità. Allora, chi ci permette di semplificarle tra loro nei passaggi che abbiamo visto nella sezione precedente?

Ponendo la domanda in questi termini, la risposta non è più ovvia; tutt'altro! Anzi: ci viene il sospetto che potremmo essere stati vittima di un trucco matematico perpetrato secoli fa, quando Newton utilizzò lo stesso simbolo per indicare due *qualità* di natura che nulla hanno a che fare tra loro. Lui scrisse esplicitamente di essersi accertato della validità sperimentale di quest'assunzione trafficando con pendoli e piani inclinati, ma se si fosse sbagliato?

D'altronde, è mai possibile che generazioni di fisici, pur ponendosi anche loro il problema, abbiano seguito a trattare massa gravitazionale e inerziale come se le due fossero la stessa cosa, e non entità intrinsecamente differenti e non correlate fra loro, solo perché Newton commise un errore assegnando il simbolo  $m$  a entrambe (lui, per la verità, più che assegnare simboli si preoccupava di chiarire bene i concetti)? La risposta va sempre cercata sul piano sperimentale, ripetendo con estrema cura i giochini di Galileo con biglie e palle di piombo o legno, e specialmente pendoli, migliorando la precisione degli esperimenti iniziati con Newton. Se ogni volta, tenendo conto di tutte le possibili variabili in gioco, si ottiene lo stesso risultato, quella è la *verità* che interessa i fisici, e basta.

Ora, poiché secoli di prove in laboratorio hanno dimostrato che l'accelerazione di gravità è la stessa per qualsiasi oggetto, grande, piccolo, denso, rarefatto e così via – un chilo di piombo pesa quanto un chilo di piume –, ciò vuol dire che la massa gravitazionale e quella inerziale si possono semplificare davvero tra loro nelle formule, e rappresentano *qualità identiche*, non solo come valore numerico ma pure come significato. Einstein ne prese atto definitivamente, e compì il grande passo: istituì il cosiddetto “*Principio di equivalenza*” in base al quale la massa gravitazionale e quella inerziale sono la stessa entità fisica. Per definizione:  $m_g = m_i$ .

Naturalmente, questo fu solo il punto di partenza nella costruzione della nuova teoria della gravitazione o Relatività generale, così come il Principio della costanza di  $c$  lo era stato per la Relatività speciale. Il secondo passo fu più complicato: è la chiave per capire tutto, e fate attenzione al ragionamento descritto nei paragrafi seguenti. Magari, leggendoli un paio di volte o anche più.

Analogamente all'esperimento di Galileo nella stiva di una nave (lì si trattava di moto rettilineo uniforme), non si potrebbe costruire una situazione somigliante anche in un campo di gravità? Vale a dire: ci viene in mente qualche trucco affinché si possa dotare un osservatore di qualche “stiva di una nave” un po' speciale, all'interno della quale si possa prescindere dalla gravità come se questa non fosse presente? La risposta è, in prima approssimazione, affermativa, e tra un attimo vedremo come; intanto ipotizziamolo, e traiamo alcune conseguenze da questa ipotetica possibilità.

Se così fosse, l'osservatore sarebbe in grado di eseguire esperimenti e ricavare le stesse leggi fisiche vuoi in presenza, vuoi in assenza di gravità. Proprio come se la forza di gravità non esistesse. Allora, però, rigirando la frittata, ci chiediamo: la gravità è una forza *reale*, o è solo *apparente*? A noi sembra più che reale, certo, ma riflettiamo: qualora un osservatore si lasciasse trasportare da essa in *caduta libera* (ecco il trucco!), racchiuso in una scatola senza aperture, non la percepirebbe. Come che – a parte gli oblò – succede agli astronauti sulle varie Stazioni spaziali. E di conseguenza, non sarebbe in grado di dire se fosse fermo e lontano da ogni massa, o in accelerazione costante verso un corpo celeste, finché non guardasse *fuori*. Proprio come l'osservatore di Galileo doveva guardare *fuori* per sapere se la nave era in porto o andava a gonfie vele.

Badate a non fare confusione: nel caso galileiano non c'erano forze in azione, mentre in quello che stiamo considerando ora c'è la gravità, e solo col trucco di eseguire esperimenti in caduta libera ce ne siamo liberati. Sono due situazioni fisicamente molto diverse, e non vanno confuse tra loro.

Seguiamo Einstein nei suoi ragionamenti. In un *gedankenexperiment* o esperimento ideale, egli sostituì la nave di Galileo, con una cabina chiusa che potrebbe trovarsi in una qualsiasi delle due situazioni che seguono: in una regione priva di gravità, nel vuoto interstellare, mentre un razzo silenziosissimo la spinge con forza costante verso una direzione che definiremo arbitrariamente *alto*, oppure appoggiata tranquillamente sulla superficie di un pianeta. All'interno c'è uno sperimentatore che cerca di costruire le leggi della fisica.

Tanto per fare un esempio, costui usa una bilancia per pesare un oggetto qualsiasi. Ci si domanda: in base all'esito di un test così semplice, sarebbe possibile capire se la cabina è spinta da un razzo o poggiata al suolo? La risposta è "no", proprio a causa dell'uguaglianza assoluta tra la massa gravitazionale e quella inerziale. Infatti, se l'oggetto si trova nel vuoto interstellare, ed è accelerato uniformemente assieme alla cabina, la sua *inerzia*, che si oppone all'accelerazione, si manifesta esercitando una *forza* sul piatto della bilancia, e questo si abbassa. Se, invece, l'oggetto sulla bilancia si trova in un campo di gravità, la forza di attrazione – che di solito chiamiamo impropriamente il *peso* – lo attrae verso il centro del pianeta, e anche stavolta il piatto della bilancia si abbassa. Per farla breve: i risultati di ogni esperimento di fisica sarebbero identici nei due casi; di conseguenza, un laboratorio non soggetto alla gravità ma spinto con una forza costante che produca accelerazione uniforme, è indistinguibile, se visto solo dall'interno, da un laboratorio appoggiato sulla superficie di un pianeta.

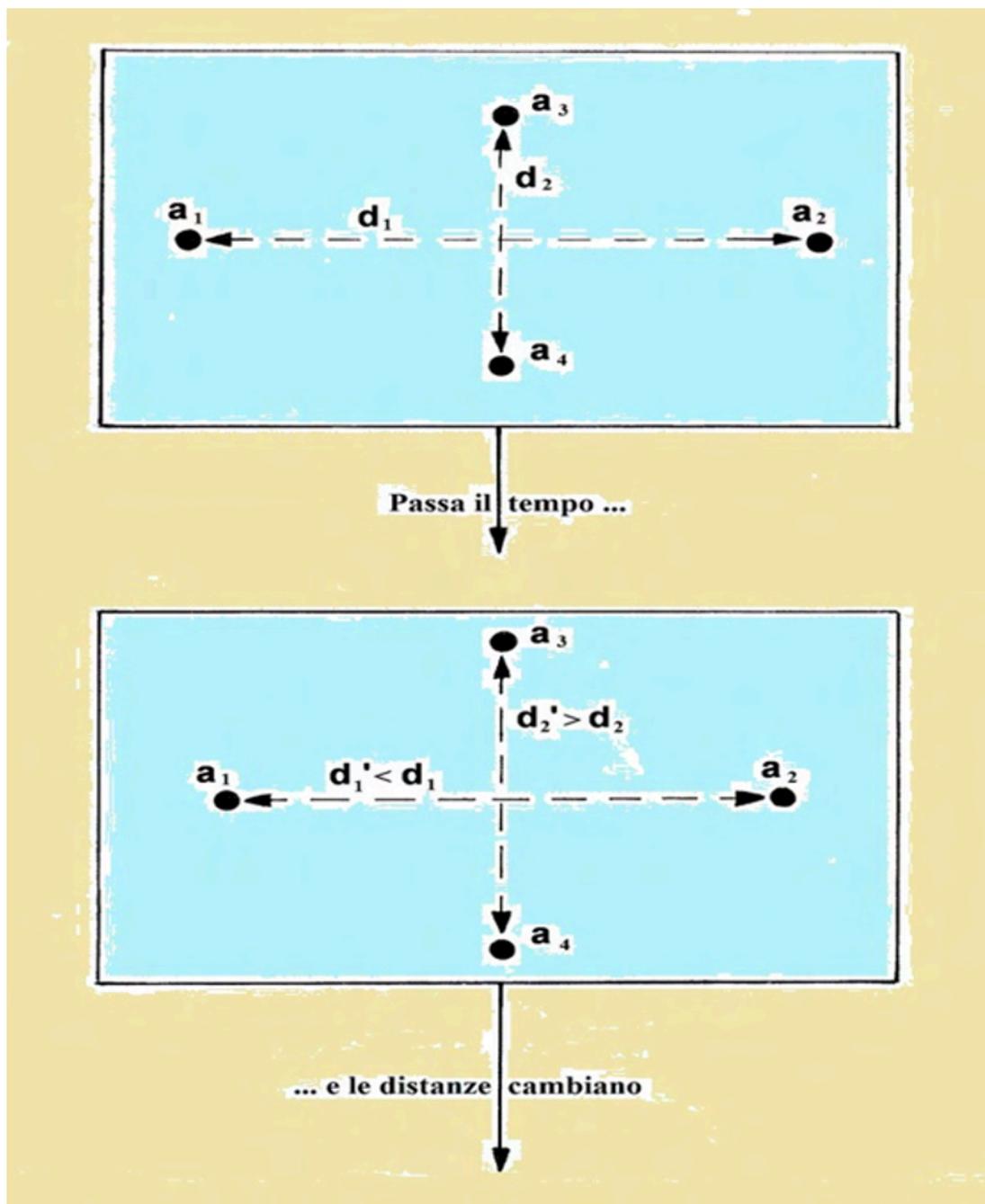
D'altra parte, è proprio del tutto vero? Lo sperimentatore non ha alcun modo – se non guardando fuori – per rendersi conto di quale sia la sua situazione? Sì e no, come siamo per toccare con mano. Infatti, ora seguiremo Einstein nel secondo passo del suo *gedankenexperiment*. Qui le cose si fanno un po' più sottili, anche se restano ben comprensibili a chi si sobbarchi un minimo di fatica intellettuale.

Cambiamo i termini dell'esperimento con la cabina, e immaginiamola sempre nello spazio, *lontanissimo da ogni sorgente di gravità*, ma stavolta spegniamo il razzo cosicché non rimanga più nessuna forza a spingerla. Che cosa avverrà degli oggetti nella cabina, sperimentatore incluso? Bene: non essendoci gravità ogni cosa si troverà senza peso e galleggerà nell'aria, per cui la bilancia segnerà zero qualunque sia l'oggetto che decida di posare sul suo piatto. Memorizzando la situazione appena descritta, modifichiamo di nuovo la configurazione sperimentale, e riportiamo la cabina all'interno del campo gravitazionale di un pianeta. In questo caso, però, la cabina non sarà poggiata a terra, ma si troverà in caduta libera da grande altezza. Così distante che potremo eseguire un sacco di esperimenti prima che l'osservatore debba riaccendere i razzi per non schiantarsi al suolo. Che cosa succederà dentro la cabina?

Ci basta tornare a Galileo per saperlo: tutti gli oggetti saranno soggetti alla stessa accelerazione gravitazionale, e quindi "*cadranno assieme*". Di conseguenza, per chi li guarda dall'interno della cabina, resteranno immobili l'uno rispetto all'altro. Attenzione: lo faranno, anche se sono "*appoggiati*" a mezz'aria e quindi, pure se si trova in questa situazione, lo sperimentatore non noterà alcuna forza. Di nuovo, senza guardare fuori, non saprà distinguere tra i due casi: trovarsi al sicuro nello spazio interstellare senza gravità, oppure cadere sempre più veloce verso la superficie del pianeta in attesa di dover riaccendere i razzi.

Però... però qui c'è il trucco: Con molta attenzione, sarebbe possibile discriminare tra i due casi. Mi chiedete come? Intuitivamente è semplice, anche se l'esperimento è molto

delicato: bisogna determinare con cura estrema le posizioni degli oggetti sospesi in aria, via via che il tempo passa. Seguiamo questo ragionamento aiutandoci con la Figura 9.5.



**Figura 9.5**

Lo sperimentatore prende due biglie  $a_1$  e  $a_2$ , e le sistema in aria, ai lati opposti della cabina. Diciamo a destra e a sinistra rispetto al suo piano di lavoro. Poi ne sistema altre due,  $a_3$  e  $a_4$ , in alto e in basso sempre rispetto al piano. Come nella parte superiore della figura. Da

ultimo, misura le distanze  $d_1$  e  $d_2$  tra le coppie di biglie. Adesso serve che il lettore aguzzi l'ingegno per un momento, ma non deve preoccuparsi: è semplice.

Se la cabina si trova al di fuori della forza di gravità, le biglie resteranno *davvero* dove sono state disposte, e le loro distanze non cambieranno mai. Se, al contrario, la cabina si trova in caduta libera verso un pianeta, cosa avverrà della distanza tra le biglie? Resterà immutata al passare del tempo? No, e ora ne capiremo il motivo.

Immaginiamo per un istante di trovarci sulla superficie del pianeta, e di avere due fili a piombo. Appendiamone uno a un appiglio qualsiasi, poi spostiamoci di qualche passo e appendiamo anche l'altro. Ci si chiede: i fili a piombo saranno *esattamente paralleli* tra loro?

Pensandoci un attimo, ci balza in mente l'ovvietà della situazione: a priori non possono esserlo, poiché entrambi puntano verso il centro del pianeta e, non trovandosi nella stessa posizione, tenderanno a convergere verso il baricentro. Infatti, due segmenti che partano dal centro del pianeta e proseguano fino a sovrapporsi ai due fili a piombo, non potranno mai essere rigorosamente paralleli, ma saranno convergenti verso il centro. È chiaro, no?

Di conseguenza, se lasciamo cadere due oggetti, uno accanto a ciascuno dei due fili a piombo, anche la loro caduta non sarà del tutto parallela, ma un po' convergente. Ragion per cui, tornando alla cabina in caduta libera, le biglie deposte in aria, cadendo assieme al resto, finiranno per seguire traiettorie che convergono lentamente in direzione del centro del pianeta. E perciò, se consideriamo le due biglie  $a_1$  e  $a_2$ , più la cabina si avvicinerà al pianeta, più queste si *avvicineranno* tra loro, pur rimanendo sospese a mezz'aria.

Un po' più delicato è il ragionamento per l'altra coppia di biglie  $a_3$  e  $a_4$ , una *sopra* e una *sotto* il tavolo. Rispetto alla prima, la seconda sarà leggermente più vicino al baricentro del pianeta, non è vero? E ricordate la formula per mezzo della quale si calcola l'accelerazione gravitazionale? Al denominatore, c'è proprio la distanza  $R$  dal baricentro del pianeta, elevata al quadrato. Dunque, la biglia  $a_3$ , appena un po' più lontano dal pianeta rispetto alla biglia  $a_4$ , subirà un'accelerazione un tantino *minore* rispetto all'altra. Al passare del tempo, le due biglie tenderanno ad *allontanarsi* tra loro. Unendo con linee immaginarie le quattro biglie, otterremo un *rombo* che, pian pianino, diventa sempre più *stretto* e più *alto*.

Ecco svelato il machiavello! Infatti, lo sperimentatore in caduta libera verso un pianeta si accorgerà che, al trascorrere di minuti e ore, le quattro biglie non resteranno esattamente al loro posto e, senza bisogno di guardare fuori dal finestrino, capirà di non essere in uno spazio privo di gravità ma, al contrario, di star precipitando verso un corpo celeste. E poiché si tratta di un *gedankenexperiment*, senza sperimentatore in carne e ossa, è meglio che lasciamo qui il discorso senza bisogno di descrivere il triste, prevedibile finale.

Insomma: mentre possiamo liberarci (temporaneamente) dalla *maggior parte* della forza di gravità con la semplice avvertenza di assestarci in caduta libera, restano comunque piccoli effetti residui dai quali non è possibile prescindere. Tra l'altro, riflettendoci abbastanza (non lo faremo, ma chiedo al lettore di credermi sul mio onore, posto che io ne possieda ancora un briciolo), si capisce che questi effetti residui sono le *forze apparenti* alle quali assegniamo il nome di *maree*. Questa considerazione fu la chiave di volta che consentì a Einstein di costruire l'edificio della Relatività generale.

In sintesi: per la cabina accelerata, ma lontano da ogni campo gravitazionale, l'accelerazione è identica ovunque, e le "*superfici di uguale accelerazione*" sono piani paralleli. Pavimento e soffitto accelerano in ogni punto nello stesso modo, e le due coppie di

biglie  $\mathbf{a}_1 - \mathbf{a}_2$  e  $\mathbf{a}_3 - \mathbf{a}_4$  (destra e sinistra, sopra e sotto) si mantengono a distanze relative  $\mathbf{d}_1$  e  $\mathbf{d}_2$  costanti. Al contrario, per la cabina in caduta libera, poiché il campo gravitazionale è a simmetria sferica, le “*superfici di uguale accelerazione*” non sono piani paralleli, ma *calotte sferiche*. Il pavimento, il soffitto, e qualsiasi altro piano parallelo intermedio non sono superfici di uguale accelerazione, e le quattro biglie si spostano al passare del tempo, per cui le loro distanze iniziali  $\mathbf{d}_1$  e  $\mathbf{d}_2$  mutano, col tempo, fino a  $\mathbf{d}_1'$  e  $\mathbf{d}_2'$ . Quali conseguenze ne possiamo trarre? Calotte sferiche... il pianimale sul mappamondo... vuoi vedere che...

## 9.5) – Allacciate le cinture in curva

Cos'avremmo fatto noi, senza l'ausilio dei pianimali! Neppure saremmo riusciti a formarci un'immagine intuitiva della curvatura dello spazio. Anche se il solito lettore saccente borbotta, e a mezza voce si lamenta perché diciamo solo *spazio* e non *spaziotempo*, come dovremmo a stretto rigore scientifico. Purtroppo, ha ragione; ma se vogliamo costruire un modellino facile della Relatività generale che non faccia a pugni con la realtà, e che possa tornarci utile a supporto del nostro scopo iniziale – e cioè elaborare un Modello d'universo intelligibile ma non troppo raffazzonato – sarà indispensabile trattare separatamente la curvatura dello spazio e quella del tempo. Poi, lavorando con gli unimali, capiremo perfino come la curvatura del tempo simuli la normale gravità newtoniana, ma ogni cosa a suo... spaziotempo. Per ora, saltando il resto dei ragionamenti di Einstein perché, da un certo punto in poi, diventano troppo matematici per i nostri gusti, giungiamo subito alle conclusioni esemplificandole, come sempre, per mezzo di scherzi da caserma giocati al solito pianimale.

Lasciando da parte la forza di *marea* che tende a stringere e allungare una configurazione di oggetti, perché ne discuteremo quel tanto che serve nel capitolo successivo dedicato ai Buchi neri e allo *spaziotempo* vero e proprio, limitiamoci a ricordare d'ora in poi che la gravità è una forza *apparente*, poiché è possibile ignorare i suoi effetti a patto di scegliere in modo oculato il laboratorio in cui sperimentare: nella fattispecie, una cabina in caduta libera. In quest'ordine d'idee, come sarà mai possibile *simulare* la forza di gravità, ma anche forze di tipo repulsivo (l'*energia oscura*, da affrontare più avanti, è un aspetto della gravità che si presenta *repulsivo*) per un pianimale, in modo che noi possiamo vedere bene che c'è solo un trucco geometrico senza alcuna forza in azione, mentre il pianimale finisce per credere che il suo mondo sia pieno di forze? Col seguente esperimento.

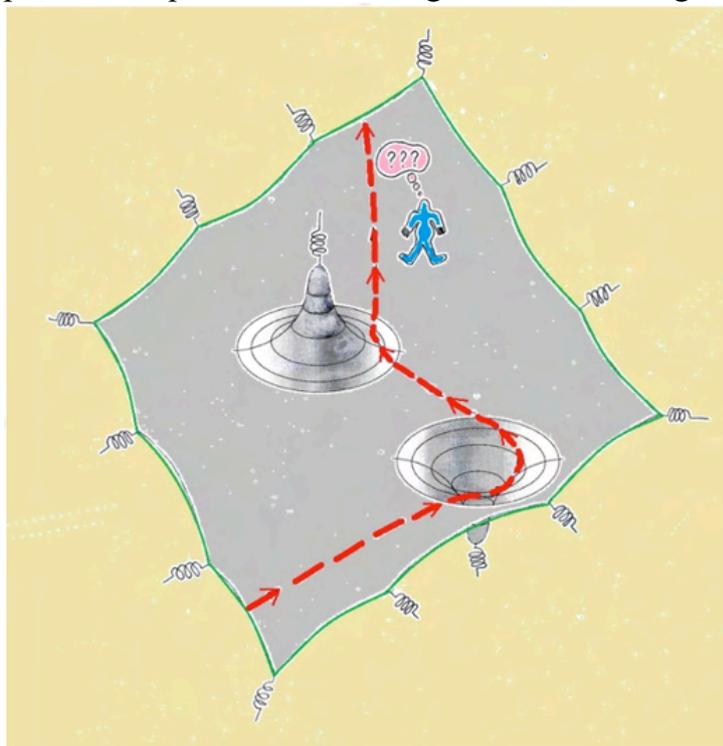
Avevamo lasciato la nostra bestiola sulla superficie di un mappamondo. Misurando triangoli e altre figure piane, lui ha finalmente capito che, oltre alla geometria euclidea, ne esistono molte altre con diverse caratteristiche, e ora si sta dedicando freneticamente allo studio di quella sferica. Gli chiediamo se può aiutarci, dall'alto della sua ormai rinomata competenza geometrica, a risolvere un dubbio che ci attanaglia e lui, solleticato nella vanagloria, si offre di farci da guida esplorando i territori, per noi ancora incogniti, delle geometrie curve. Noi, però, abbiamo in mente per lui un nuovo tiro mancino: ci tornerà utile una pedana elastica di quelle che si trovano nelle palestre di ginnastica e nei parchi giochi, ma tirata ai bordi fino allo spasimo da molle fittissime, in modo da renderla assolutamente liscia, piana, euclidea insomma. Ora afferriamo di nuovo la bestiola e la adagiamo sulla superficie della pedana: un nuovo mondo bidimensionale in cui egli può vivere ed esplorare.

In primo luogo, gli chiediamo quale sia la geometria del suo nuovo universo e lui, con un regolo e un goniometro, disegna immediatamente una serie di triangoli tutti diversi tra loro per forma e dimensione. Poi verifica la somma degli angoli interni di ciascuno e conclude che, entro gli errori di misura, tale somma non si discosta mai da  $180^\circ$ .

Lasciando stare bizantinismi che non interessano nessuno, il pianimale ci comunica, soddisfatto, di trovarsi su una superficie euclidea. Il che è verissimo, almeno fino a questo momento. Adesso, però, chiediamo il suo aiuto per un esperimento di fisica, e non più solo di geometria. E lanciamo una pallina di acciaio intinta nell'inchiostro rosso, predisponendo i

giochi affinché questa possa rotolare con attrito quasi nullo per tutta la pedana da un bordo all'altro, ma lasciando sopra una traccia visibile dal pianimale. Dopodiché chiediamo a costui di verificare se, a suo avviso, lungo tutto il percorso della pallina essa sia stata soggetta a forze esterne. La bestiola verifica che la linea inchiostrata sia un segmento di retta e, avendo anche temporizzato con suo cronometro il procedere della traccia verificando che essa si sia sviluppata secondo un moto rettilineo uniforme, attinge al primo Principio della dinamica e afferma con professorale competenza: no, non ci sono state forze esterne agenti sull'oggetto che ha attraversato il suo mondo. Verissimo anche questo, ma a noi quei modi accademici non piacciono.

Quando abbiamo acquistato le molle necessarie a tendere allo spasimo la pedana, abbiamo abbondato e adesso ce ne avanzano un paio. Le utilizzeremo come mostrato in Figura 9.6, per creare un picco e un avvallamento nella terza dimensione, quella verticale, per cui la pedana, in questa nuova configurazione, non segue più i canoni della geometria euclidea. Il



pianimale, però, non lo sa. E perciò, gli chiediamo di nuovo ausilio perché vogliamo ripetere l'esperimento con la pallina tinta nell'inchiostro.

Lui sbuffa, ma acconsente e stavolta – meraviglia! – il percorso è ben diverso da un segmento di retta a velocità costante, ma è un girovagare pieno di curve. La nostra domanda è: cos'è successo, secondo lui? La bestiola si gratta la testa, poi conclude che, durante il percorso, l'oggetto da noi lanciato ha incontrato un paio di campi di forza che l'hanno deviato, e individua nei punti di attacco delle molle verticali, sopra e sotto la pedana, i due luoghi dai quali si sono sprigionate queste forze. E adesso, attenzione.

**Figura 9.6**

Vorrei anzitutto sgomberare la mente del lettore da un equivoco molto diffuso, e cioè che il responsabile ultimo delle deviazioni nel percorso sia la forza di gravità che attira verso il basso gli oggetti che si trovano sulla pedana, dato che quest'ultima è ancorata sulla superficie terrestre. No: la gravità è solo un aiuto a tenere la pallina aderente al piano. Se la pedana si fosse trovata nello spazio, lontano da ogni sorgente di gravitazione, e la pallina avesse comunque aderito al piano, ne sarebbe venuto fuori il medesimo percorso curvo.

E a ben ragione: il piano tirato su e giù da molle non è più euclideo, e le traiettorie, pur *in assenza di qualsiasi forza esterna*, non possono essere segmenti di retta, ma solo curve

attorno alle zone di sollevamento o sprofondamento. Il punto rimarchevole è proprio questo: **in assenza di qualsiasi forza esterna!** Le deviazioni rispetto al moto rettilineo uniforme non sono dovute a forze, che non ci sono proprio, ma **solo alla struttura geometrica del piano.**

Il pianimale, che non si capacita, ricomincia a costruire triangoli e stavolta si accorge, con sorpresa, che la somma dei loro angoli interni non è più  $180^\circ$ , ma varia da regione a regione, ed è tanto più diversa quanto più ci si avvicina ai punti che, in base alla sua prima valutazione, erano le sorgenti della forza. È furbo, ormai lo sappiamo, e sta subodorando qualcosa. La struttura del suo nuovo universo è ancor più complicata, rispetto alla superficie sferica del mappamondo, ma è comunque riducibile a geometria.

Stavolta, la descrizione matematica di questa geometria è molto complessa, e i punti di aggancio delle molle verticali agiscono come *sorgenti della deformazione*, ma alla fine l'astuta bestiola riesce comunque a *mappare* il suo piano giungendo a dimostrare in qual modo le forze, che avevano condotto a un percorso così articolato della pallina lanciata da uno dei bordi, fossero *apparenti*, mentre la vera causa delle deviazioni andasse cercata **solo nella geometria.**

Lo possiamo lasciare qui, novello Einstein a due dimensioni, per tornare al nostro Einstein tridimensionale. Dal 1905 al 1915 egli lavorò molto e si spremé le meningi a lungo, perché intuiva qualcosa, ma l'insieme gli sfuggiva.

...Qual è 'l geomètra che tutto s'affige  
per misurar lo cerchio, e non ritrova,  
pensando, quel principio ond'elli indige...

Per fortuna, il problema di Einstein aveva soluzione, al contrario di quello di cui fa cenno Dante, la *quadratura del cerchio*, che è stata dimostrata impossibile. Sta di fatto che, nel 1915-1916, il caro Albert riuscì finalmente a dare alla luce le sue nuove equazioni. Esse consentono di calcolare i modi secondo i quali, in prossimità di una massa (ed energia, perché ricordiamo che  $E = m c^2$  e cioè: se esiste un'equivalenza tra la massa e l'energia, inevitabilmente anche la seconda *pesa*), lo spaziotempo si deforma e costringe i corpi che, per conto loro, si muoverebbero di moto rettilineo uniforme, a deviare da una traiettoria rettilinea e a essere incanalati nei nuovi binari curvi determinati dalla presenza di materia. Quest'ultima, dunque, assume nella Relatività generale un ruolo **somigliante** alla molla verticale attaccata alla pedana elastica: un punto dal quale si propaga la deformazione dello spaziotempo.

Perché solo **somigliante** e non decisamente **analogo**? Perché in questa fase stiamo studiando solo la curvatura dello spazio, e vedendo le palline vagabondare nei buchi e nei pieni ci potrebbe sembrare di aver capito tutto. Cosa non vera, perché nella stragrande maggioranza dei casi di interesse quotidiano è la **curvatura del tempo** a simulare la gravità. Ma vedremo meglio al momento opportuno. Per ora procediamo con la nostra bestiola da laboratorio.

Insomma, ciò che avviene in due dimensioni al pianimale è una traccia per intuire cosa avviene a noi in tre dimensioni. La differenza sostanziale è che, come al solito, dall'alto della nostra terza dimensione non abbiamo alcuna difficoltà a visualizzare gli accadimenti nel mondo curvo del pianimale, mentre ci resta molto più difficile capire cosa diavolo voglia dire una deformazione dello spazio tridimensionale nel quale siamo immersi, per non parlare della

deformazione del tempo. Ovviamente si tratta di una sfida intellettuale, e molti hanno cercato di visualizzare mentalmente questo tipo di curvatura. Pochissimi affermano di godere di brevi istanti in cui sembra loro di percepire una momentanea immagine, un *flash* seppur vago, della deformazione dello spazio (mai del tempo). Chissà se affermano la verità o se, come il geometra di Dante, se la sognano soltanto.

Insomma: il succo della Relatività generale è esprimibile in modo al contempo semplice e sibillino. Ogni oggetto dotato di massa (energia) *curva* lo spaziotempo nei suoi dintorni, e costringe gli altri oggetti circostanti a adattare le loro traiettorie alla nuova geometria *spaziotemporale* locale.

La Terra, per intenderci (e scusate l'antropomorfismo), *non sa* di muoversi secondo un'ellisse, ma *crede* di muoversi di moto rettilineo uniforme, perché non percepisce alcuna forza, ma si limita a seguire i binari dello spaziotempo nei suoi dintorni. Principalmente del tempo, poiché la curvatura spaziale dovuta al Sole è minuscola, e comincia a farsi sentire un briciolo solo per il pianeta Mercurio, ma lo vedremo

Comunque, un risultato importante l'abbiamo raggiunto: dov'è finita la **forza a distanza** che tanto angustiava Newton? Non c'è più. Esiste solo geometria curva dello spaziotempo. Questo risolve tutto, non vi pare? Oppure... ci si potrebbe forse chiedere *perché* una massa curva lo spazio anche a distanza, o addirittura *cos'è* lo spazio, così reificato dalla Relatività generale da potersi addirittura curvare. Domande senza risposta, almeno per il momento. Il problema di Newton è solo spostato, non risolto.

Piuttosto, vorrei terminare questo capitolo presentandovi un rudimentale modellino intuitivo di cosa potrebbe essere la curvatura del tempo. Badate: non raccontatelo a un fisico e, soprattutto, a un matematico, ma sono sicuro che qualche idea ve la potrà fornire.

## 9.6) – Un modellino troppo rozzo da raccontare

Però, se non fate la spia, ve lo dico lo stesso. Con l'aiuto del pianimale siamo riusciti almeno a intuire grossolanamente cosa sia la curvatura dello spazio. Badate bene: solo dello spazio, perché i nostri cervelli sono troppo inadeguati affinché possano *visualizzare* (si fa per dire...) quella dello *spaziotempo* tutta assieme. D'altronde, questo passa il convento: il cervello così com'è l'ha costruito l'evoluzione biologica, e dobbiamo contentarci. Di conseguenza, ora ci occuperemo solo della curvatura del tempo come se fosse separabile da quella dello spazio. In linea teorica non lo è, ma se entrambe le curvature sono molto lievi, o anche quella del solo spazio è irrisoria, in prima approssimazione si può fare.

Stavolta, perfino le due dimensioni del pianimale ci sono d'impiccio, e dobbiamo tornare all'unimale, anzi: ai due unimali, Unitagora ed Euniclide, che ci sono stati di aiuto per capire come funziona il seguente diagramma di Minkowski. Come già abbiamo fatto prima, anche qui abbrevieremo i loro nomi in  $U$  ed  $E$ . Supponiamo che  $E$  si trovi immerso nel campo gravitazionale di una massa  $M$  alla sua destra, come nella Figura 9.7, mentre  $U$  se ne sta molto lontano, tanto che in pratica non percepisce alcuna gravità e si limita a osservare con un potentissimo telescopio quello che succede a  $E$ .

Ora attenzione: la Figura 9.7 rappresenta un ipotetico diagramma di Minkowski per i due osservatori, nel quale ho disegnato un asse spaziale orizzontale a tratto pieno, verde, che si presume passi per la massa  $M$ , e un asse dei tempi verticale, rettilineo, tratteggiato, verde, anch'esso, chiamato  $T_U$ , così come lo vede  $U$ . Infatti, se  $U$  è lontano da ogni sorgente di forza di gravità, per lui il tempo non si curva. Ho disegnato anche un secondo asse dei tempi, stavolta *curvo*, tratteggiato in rosso, chiamato  $T_E$  che, a sua volta, è invece l'asse dei tempi (curvato dalla massa  $M$ ) percepito da  $E$ .

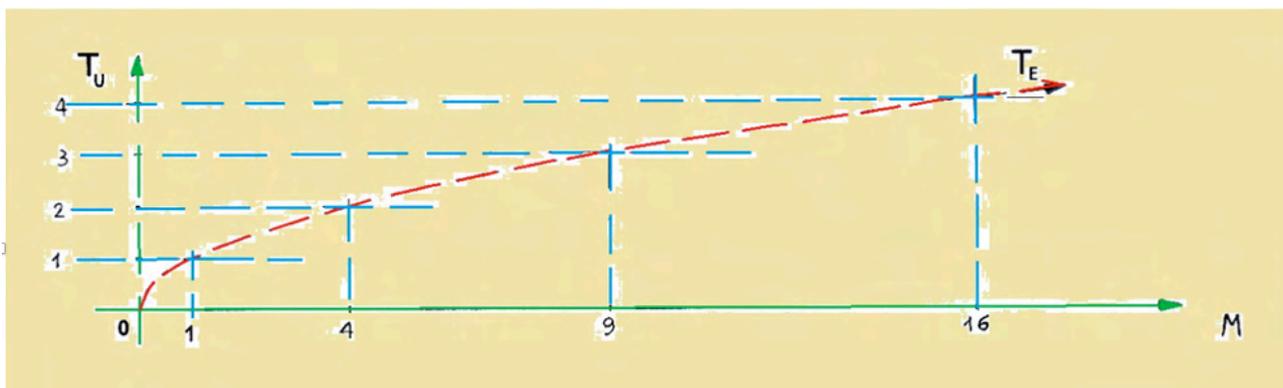


Figura 9.7

Il lettore attento scoprirà facilmente che questo secondo asse segue la curvatura di una *parabola*: gli rammento che sto presentando solo un modellino assai rudimentale di quel che succede nella realtà, e non pretendo di disegnare una vera e propria soluzione delle equazioni della Relatività generale applicate a un universo a una sola dimensione. Volendo farlo a ogni costo, un *arco di cerchio* sarebbe stato più rappresentativo, rispetto alla parabola, per

raffigurare quanto avviene davvero in natura. Il punto è questo: anche il cerchio avrebbe fornito risultati analoghi a quelli che sto presentando (così come qualsiasi altra curva *conica*), ma la grafica sarebbe stata più infelice. E perciò lavoriamo con la parabola senza brontolare.

All'inizio del nostro *gedankenexperiment*, *E* si trova nel punto **0** all'incrocio degli assi. È immobile, anzi: quando lo abbiamo lasciato dormiva della grossa, e anche *U*, attraverso il suo telescopio, lo vede appisolato.

Ora il tempo comincia a passare. Siccome siamo partiti con *E* che stava fermo, *U* si aspetta che, un secondo dopo, il collega si sia spostato solo lungo l'asse del *proprio* tempo  $T_U$ , e quindi all'incrocio tra l'asse verticale e il tempo **1**, ragion per cui il nuovo asse spaziale di *E* dovrebbe essere quello orizzontale, tratteggiato in celeste, che parte da **1**. Ricordiamo, infatti, che qualsiasi oggetto, nel diagramma di Minkowski, anche se è immobile nello spazio, non può comunque evitare di spostarsi nel tempo, e quindi darà la scalata all'asse dei tempi sempre in assoluta verticale, con ritmo costante, scandito dalle lancette di un orologio. Perciò, dopo due, tre, quattro secondi, *U* si aspetta che *E* si arrampichi sull'asse  $T_U$  raggiungendo via via i punti **2**, **3**, **4**, come ogni animale addormentato che si rispetti.

Che cosa sta succedendo, invece? *U* non si capacita: l'amico *E* seguita a russare come un ghio, eppure si sta spostando verso destra! Dopo un secondo si è mosso di un centimetro, e perciò si trova all'incrocio **1** ÷ **1**. Dopo due secondi, è ormai ben quattro centimetri a destra dell'asse  $T_U$ , all'incrocio **4** ÷ **2**, e poi si trova nove centimetri, e poi sedici centimetri a destra di  $T_U$ . Quale malefico trucco sta combinando quel mascalzone di Euniclide?

Nulla! Seguita a dormire ma, trovandosi in un campo gravitazionale, *il suo asse dei tempi è curvo* e dunque, al trascorrere dei secondi, lui non si arrampicherà lungo  $T_U$ , bensì lungo l'asse  $T_E$  che gli compete. Ora, poiché quest'asse piega verso destra (ricordo che è quello tratteggiato in rosso), dopo un secondo l'animale *E* si sarà spostato anche lui verso destra di **1** centimetro, dopo due secondi di **4** centimetri, e via via, sempre più velocemente, poiché la caratteristica della parabola (così come anche per l'arco di cerchio, più adeguato matematicamente) è proprio questa: percorrere spazi (verso destra) proporzionali ai tempi (verso l'alto) *elevati al quadrato*.

Vi è piaciuto questo modellino della curvatura del tempo, per cui gli oggetti che abitano in una regione di spazio in cui il tempo è curvo sono costretti a muoversi verso la massa *M* loro malgrado? O, per meglio precisare la domanda: l'avete capito? Sennò, per favore, rileggete la spiegazione, altrimenti non possiamo procedere.

Bene: ora che avete acquisito familiarità col modellino, tiriamogli un po' il collo (solo un po'; non troppo, ricordatevi!) e traiamone tre conseguenze.

La prima: Euniclide accelera verso la massa poiché, in ogni secondo che passa, percorre spazi sempre maggiori. E come mai accelera? Qui c'è il trucco: giacché ho disegnato l'asse del tempo come una parabola, vi ricordo che *E* percorre spazi proporzionali al quadrato del tempo che è passato. Se qualcuno di voi ricorda i più semplici elementi di fisica imparati a scuola, questa caratteristica è propria dei moti uniformemente accelerati. Quello che trovava Galileo, insomma.

Insomma: Euniclide cade con accelerazione costante, proprio come ci si sarebbe aspettati in un campo gravitazionale. Essendo addormentato, però, lui neanche se ne accorge e, se fosse in una cabina chiusa, potrebbe benissimo pensare di fluttuare nel vuoto senza peso,

lontano da ogni sorgente di gravità. Insomma: è proprio una delle situazioni ipotizzate da Einstein nel suo *gedankenexperiment*.

Seconda conseguenza: supponiamo che il sonno di Euniclide sia condiviso da tutto il suo parentado, a cominciare dai nipotini piccoli, che pesano ben poco, fino allo zio obeso, quello che non può salire su una bilancia normale altrimenti la sfascia. Se tutti i parenti sono fermi rispetto al loro congiunto, e accanto a lui, lo seguiranno nella sua deriva esattamente con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro massa, poiché scaleranno tutti l'asse dei tempi  $T_E$  allo stesso modo. E perciò, non solo cadranno tutti con accelerazione costante, ma perfino con *la stessa accelerazione*, indipendentemente dalla loro massa. Anche qui, proprio come trovavano Galileo e Newton!

Poi c'è una terza conseguenza, e questa è più sottile. D'altronde, dobbiamo cominciare a prenderci confidenza perché, parlando di Buchi neri, saremo costretti a utilizzarla in abbondanza, e ancor più quando discuteremo dell'espansione dell'universo. Forse sarebbe più corretto parlare di *suggerimento* piuttosto che di *conseguenza* in senso stretto, ma sarà una parte importantissima del nostro Modello d'universo, e quindi tanto vale considerarla un dato di fatto: il *trascinamento dello spazio*. Anzi: diciamo pure che il modellino qui sopra è stato studiato proprio per farvi incappare per la prima volta in questo concetto.

Torniamo dunque a Euniclide che dorme sogni beati. Poiché abbiamo affermato che, a patto di considerare un sistema in caduta libera, la forza di gravità svanisce (sempre trascurando quel pezzettino piccolissimo che è la forza di marea, ma di quella parleremo nel prossimo capitolo), dobbiamo concludere che, rispetto alla regione di spazio in cui si trova, per il nostro unimale vale il primo Principio della dinamica: un corpo non soggetto a forze, se inizialmente sta fermo, fermo rimane. Perciò, Euniclide rimane fermo rispetto al *volumetto di spazio* che occupava al tempo  $t = 0$ .

Allora, perché cade verso la massa  $M$ ? Semplice (come altre volte, anche qui si fa per dire). L'effetto della curvatura del tempo, non è quello di far cadere gli *oggetti fisici* in senso stretto, ma di *risucchiare lo spazio verso la massa*. Vale a dire che il *volumetto di spazio* in cui si trova l'unimale comincia ad accelerare verso il centro di massa, essendone *risucchiato* come effetto della curvatura del tempo, e l'unimale che ci sta dentro ne segue le vicissitudini in modo passivo, senza nemmeno accorgersene.

Qui dobbiamo fermarci un momento, e riflettere sul concetto di *spazio*. Prima della Relatività, potevamo pensarlo come un *vuoto* all'interno del quale è lecito immagazzinare oggetti o trasmettere forze. Con la Relatività speciale abbiamo visto che lo spazio si mescola un po' col tempo, e dunque ne abbiamo dovuto dedurre che è un *qualcosa*, piuttosto che *l'assenza di qualcosa*. La Relatività generale ci ha insegnato addirittura che lo spazio *si curva*, e a questo punto abbiamo cominciato a pensarlo come una *struttura*. Ora, però, con la curvatura del tempo, questa struttura acquisisce in maniera sempre più pregnante le caratteristiche di *un oggetto fisico*. Sempre un contenitore, chiaramente, ma uno di quelli con i quali si spedisce per posta un cristallo fragilissimo; uno scatolone ben strutturato all'interno, senza sostanziali vuoti, ma con una serie di elementi che si occupano di assorbire in modo elastico eventuali urti, magari addirittura pieno di patatine di polistirolo, per cui la differenza tra il contenitore e il contenuto tende ad affievolirsi: tutto è contenitore e contenuto allo stesso tempo.

Ebbene: considerare lo spazio in questo modo ci avvicina molto di più alla sua reale natura o, per lo meno, siamo finalmente entrati in possesso di un *modello di spazio* più consono alle nostre esigenze; lo *spazio che si muove* farà parte, d'ora in poi, del nostro bagaglio culturale. Una forza attrattiva non sarà altro che una curvatura del tempo che risucchia lo spazio; una forza repulsiva sarà una sorta di contro-curvatura che respinge via lo spazio.

Ora che abbiamo capito cos'è la curvatura del tempo, almeno come modellino di prima approssimazione, siamo pronti a un primo salto concettuale molto importante, che sarà solo introduttivo a quello del prossimo capitolo.

Domandiamoci: perché la Terra ruota intorno al Sole? La forza di gravità di newtoniana memoria ce la siamo lasciata alle spalle: non c'è nessuna forza tra i due astri. E allora? Nella sezione precedente avevamo affermato che, essendo lo spaziotempo curvo, la Terra segue i binari che si trova dinanzi e, credendo di muoversi di moto rettilineo uniforme come avverrebbe in assenza di forze esterne, in realtà percorre un'orbita chiusa attorno al Sole, che è il responsabile della curvatura dello spaziotempo. È ancora vero tutto ciò, alla luce del modello di curvatura del tempo?

La risposta è articolata. È *verissimo* ma, detto a quel punto della trattazione, potrebbe aver lasciato nella mente del lettore l'idea che il *binario* di cui si parlava fosse puramente *spaziale*, vale a dire: lo spazio è talmente curvo da poter essere pensato come un cerchio attorno al Sole, e la Terra segue, per l'appunto, tale cerchio. Quest'ultimo concetto, invece, è *del tutto falso*, e chi lo propina ai lettori dovrebbe essere impiccato per i pollici! Solo avvicinandoci molto al Sole cominciamo a percepire una debole curvatura dello spazio, tanto vero che gli astronomi avevano già da qualche tempo scoperto che l'orbita del pianeta Mercurio è appena un po' diversa da quanto previsto dalle formule di Newton, e tutto è andato a posto solo con Einstein. Non che l'orbita terrestre sia completamente esentata dal doversi confrontare con la curvatura dello spazio, ma l'effetto preponderante, e di gran lunga, è la curvatura del tempo.

Anzi, mettiamola pure come segue: *quest'ultima simula perfettamente le leggi di Newton* finché la curvatura dello spazio è molto piccola, pressoché trascurabile anche nei conti precisi. Per questo motivo gli ingegneri spaziali, nel calcolo delle orbite delle sonde nel Sistema solare, lavorano proprio con le leggi di Newton. Solo quando una sonda si avvicina molto al Sole, se si richiede una precisione estrema, a quel punto bisogna eseguire i calcoli con la Relatività generale. E la stessa cosa occorre fare con i sistemi di posizionamento **GPS**, che sono una prova sperimentale precisissima delle equazioni di Einstein. Questa, però, è un'altra storia, e la lasceremo da parte.

Insomma: la Terra procederebbe in linea retta ma, via via che si sposta, il volumetto di spazio in cui si trova cade un pochino verso il Sole a causa della curvatura del tempo. Di conseguenza, di momento in momento, la direzione di moto della Terra è leggermente modificata, perché il nostro pianeta era entrato nel volumetto di spazio in una certa direzione e, ora che ne esce, il volumetto stesso si è spostato in giù. Così, da un volumetto infinitesimo all'altro, la Terra è condotta a percorrere un'orbita chiusa attorno al Sole. Questo dice la Relatività generale, e finché la curvatura dello spazio è minuscola, le orbite calcolate con la legge di Newton, e con la legge di Einstein, coincidono. Sono riuscito a spiegarmi?

Ora basta con questo modellino della curvatura del tempo: davvero, mi sa che c'è il rischio di tirargli troppo il collo, e questo non si deve fare. Non potremo abbandonarlo del tutto neanche nel prossimo capitolo, ma per lo meno sappiamo già che sarà sempre più grossolano via via che... stiamo per vederlo. A questo punto, infatti, siamo pronti per applicare la Relatività generale a un oggetto in cui tutte le caratteristiche meno appariscenti della teoria saltano fuori con prepotenza: un Buco nero. Facciamoci coraggio e affrontiamolo, poiché in quel luogo l'effetto della curvatura dello spaziotempo conduce a conclusioni ben diverse da quelle newtoniane: idee che al momento ci sorprenderanno, ma saranno propedeutiche per l'applicazione della Relatività generale alla cosmologia. Altrimenti, molti concetti sul Big bang e sull'espansione dell'universo resterebbero sfumati sullo sfondo, mentre il nostro Modello d'universo dovrà essere a colori pieni, come quelli di Michelangelo.

E badate: nella descrizione seguente io aderisco totalmente al modello relativistico *tradizionale*. Quello, per intenderci, per mezzo del quale si calcolano le onde gravitazionali, e per il quale il trio Penrose – Genzel – Ghez è stato insignito del Nobel per la fisica nel 2020. Vi sono altre interpretazioni – alcune davvero *estreme* – della Relatività, che chiamano in causa la Meccanica Quantistica, a volte unita alla Teoria dell'informazione, eccetera. Non le considero. Così come non considero le vecchie teorie tipo MOND (avrete trovato in giro questo nome), per le quali la teoria della gravitazione corretta è da cercarsi in una modifica della teoria newtoniana a grandi distanze dagli oggetti dotati di massa/energia.

# 10) – Lasciate ogni speranza, eccetera

## 10.1) – Riepilogo, e crollo d'una certezza

Galileo, dunque, nella prima metà del '600, elaborò il principio di relatività, la *cinematica*, e alcune basi utili per lo sviluppo dei primi due principi della *dinamica*. Quasi un secolo dopo, Newton introdusse in modo matematicamente e fisicamente consistente le *forze* e le *masse*, elaborò la *dinamica* completa, e la legge di gravità. Einstein bruciò i tempi. Nel 1905 aveva già rielaborato il lavoro di Galileo per velocità prossime a quella della luce e distanze spaziali molto grandi (Relatività speciale), e dieci anni dopo aveva completato anche le modifiche – radicali – al lavoro di Newton (Relatività generale). Questo lo abbiamo appreso nei capitoli precedenti. Ora soffermiamoci sul significato fisico delle equazioni di Einstein (dico *equazioni* al plurale, perché sono dieci e trattano le tre coordinate spaziali, quella temporale, e le combinazioni tra di loro). Esse sono concettualmente scritte in questo modo:

**[Curvatura dello spaziotempo] proporzionale  $a$  [massa + energia]**

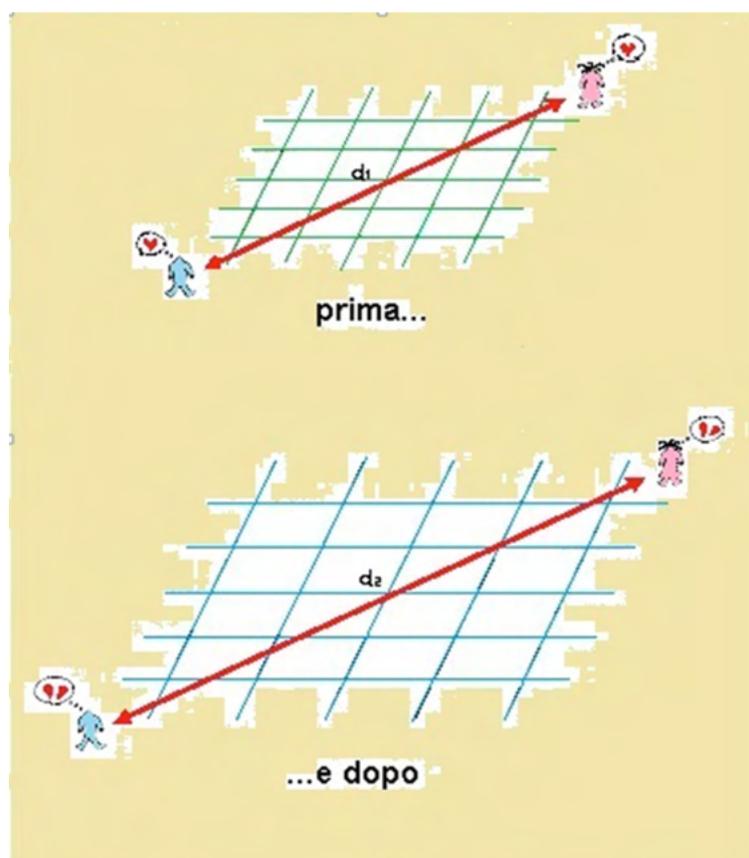
E, ovviamente, viceversa. È chiaro che al posto delle scritte nelle parentesi quadre ci sono simboli matematici che esprimono queste relazioni in termini quantitativi, precisi. Che cosa vogliono dire, in pratica? Ciò che segue: data una distribuzione di massa (ripeto che l'energia *pesa* pure lei), si può calcolare qual è la curvatura dello spaziotempo nei dintorni e, dalla curvatura stessa, si deducono poi le traiettorie seguite dai corpi che attraversano quella regione. Secondo la frase ormai famosa di un noto fisico del '900, John Archibald Wheeler (è stato lui a coniare la dizione “Buco nero”): «La materia dice allo spaziotempo come curvarsi, lo spaziotempo dice alla materia come muoversi».

Permettetemi di essere pedante ancora una volta: sia la Relatività speciale, sia la generale, lavorano con lo spaziotempo, ma tra le due c'è una sottile differenza concettuale che spesso genera equivoci. In un certo qual modo, la Relatività speciale presuppone già l'esistenza di uno spaziotempo completo (ricordate il pancarré cosmico?). Gli *eventi* hanno luogo all'interno di questo spaziotempo così com'è, senza modificarlo, e da un osservatore all'altro cambia solo il modo di *affettarlo*. Le misure di distanze spaziali e temporali hanno valori differenti secondo le velocità relative degli osservatori, ma ciascuno di loro *ha ragione* senza discutere, poiché i punti di vista sono relativi, e ognuno ha pieno diritto al suo. In ogni caso, tutti gli osservatori possono mettersi d'accordo ricorrendo al famoso teorema di Pitagora in quattro dimensioni, con il segno negativo per quanto riguarda il quadrato del *cateto temporale*.

La Relatività generale, invece, agisce direttamente sulla *struttura* dello spaziotempo. Se possiamo raffigurarci quest'ultimo come una sorta di ragnatela, di traliccio (anche temporale) che scandisce l'universo punto per punto, la Relatività generale non si limita a farci passare attraverso gli oggetti secondo i binari già esistenti, ma si impadronisce del

traliccio e lo deforma. In quest'ultimo caso, può tornare utile l'analogia della mosca finita in una ragnatela: se noi ci mettiamo a tirarne i bordi, la posizione della mosca *rispetto all'esterno* cambierà, pur se essa resterà comunque appiccicata allo stesso incrocio di fili. La medesima cosa avviene per i corpi materiali immersi nello spaziotempo: se quest'ultimo è curvato o deformato, i corpi seguiranno le vicissitudini del *pezzetto di spaziotempo* in cui si trovano. Purtroppo, in quest'ultimo caso, *non esiste un "esterno assoluto" cui fare riferimento!*

E qui sta per cadere un caposaldo della fisica che abbiamo studiato finora, dunque prestate molta attenzione. Se, per un motivo qualsiasi che ancora non abbiamo considerato, lo spazio (limite l'analogia al solo spazio; applicarla pure al tempo la renderebbe più confusa) si gonfia, come se il traliccio spaziale fosse elastico e si dilatasse sotto l'azione di una forza esterna, cosa avverrà degli oggetti che vi si trovano immersi? Stiamo cominciando a capire



che resteranno anche loro appiccicati, come la mosca, al loro incrocio di coordinate e dunque, pur sentendosi *fermi*, seguiranno il rigonfiamento dello spazio. Di conseguenza, se inizialmente due oggetti si trovavano a una certa distanza l'uno dall'altro, via via che lo spazio si dilata, la loro distanza aumenta. Ripeto: nessuno dei due si è mosso rispetto a dove si trovava, ma il traliccio che fissava le loro posizioni si è ingrandito.

In Figura 10.1 ho richiamato in servizio il pianimale assieme alla sua amata (di lei sappiamo solo che è di colore rosa e ha lunghi capelli neri). Inizialmente si trovano a una certa distanza  $d_1$  tra loro, e ciascuno è fermo sul suo punto di griglia spaziale. Sono timidi, e restano in attesa che sia l'altro a fare la prima mossa. Intanto, però, lo spazio comincia a dilatarsi, e la distanza ( $d_2$ )

Figura 10.1

aumenta inesorabile. Ora, dato che ogni pianimale sa benissimo di essere *fermo*, per forza di cose *crederà che sia l'altro ad allontanarsi*, con una velocità che aumenta in proporzione alla distanza che li separa (tanto più spazio c'è tra i due, tanto più velocemente salirà la distanza reciproca). Perciò, nessuna meraviglia se, dopo un po', si convinceranno che il/la partner la/lo sfugga, e i loro cuori si spezzeranno!

In buona sostanza, la Relatività generale ci ha messo di fronte a due tipi radicalmente diversi di *spostamento* (e *velocità*) in senso lato. C'è il moto degli oggetti *rispetto allo spazio*,

e c'è anche il **moto dello spazio** che trascina gli oggetti. Pur se, in prima approssimazione, può sembrarci un bizantinismo inutile perché le conseguenze di questi moti sono, *almeno fino a un certo punto*, indistinguibili, si tratta comunque di due concetti diversi, non sovrapponibili, e tali vanno considerati.

So bene, per esperienza mia e altrui, che non si tratta di un'idea banalissima e, la prima volta che ci s'incappa, si tende dapprima a ignorarla, poi a ritenere che sia troppo difficile da capire, e solo con un po' di buona volontà si riesce a digerirla. D'altronde occorre lavorarci sopra perché è la base per comprendere l'espansione generale dell'universo, di cui già sappiamo di dover parlare nel prossimo capitolo. D'altra parte, siamo qui per questo: lanciare oggetti dentro un Buco nero, come quello "fotografato" nel 2019 al centro della galassia **M87**, non si fa solo per divertimento; serve anche a capire meglio il **moto dello spazio**.

Procediamo sempre verso la demolizione delle nostre certezze più granitiche. Partiamo in modo *morbido*, fissando la nostra attenzione su un generico volumetto di spazio sperduto lassù in cielo, tra una stella e l'altra. Essendoci finalmente liberati dalla forza di gravità consentendo al volumetto di cadere liberamente là dove la curvatura dello spaziotempo lo trascina, esaminiamo di nuovo cosa esso contiene. Luce e particelle: atomi isolati, magari anche qualche molecola d'idrogeno, forse un granello di pulviscolo, e insomma tutte cose che abbiamo già incontrato nel capitolo 2.2, non escludendo pianeti, comete e altro se siamo in prossimità di una stella. A che velocità si muovono tutti questi oggetti, **all'interno del volumetto di spazio**? Sappiamo anche questo: la luce si muoverà, per l'appunto, alla velocità della luce; niente di meno, niente di più. Per quanto riguarda la materia, invece, possiamo essere certi che essa **attraverserà il volumetto** a velocità inferiore a  $c$ , e fin qui non c'è nulla di sconvolgente.

Ora, però, tiriamo di nuovo in ballo i due pianimali innamorati. Se mi si consente l'uso di neologismi orribili, che giuro di buttare via appena terminato questo capitolo, dirò così: il ***pianimalo*** si trova nel suo pezzettino di spazio, mentre la ***pianimala*** occupa un altro pezzettino, e all'inizio delle nostre osservazioni i due pezzettini si trovano a distanza che già sappiamo essere  $d_1$ . Grazie alla Figura 10.1, abbiamo pure capito che, al passare del tempo, lo spazio stesso si dilata. Infatti, tra la situazione iniziale e quella finale, distanti un tempo che definiremo  $t$ , non sono state inserite nuove ***maglie spaziali*** della stessa dimensione di quelle iniziali, ma il numero di maglie è rimasto invariato e le maglie stesse del grigliato sono diventate ***più larghe***. Di conseguenza, ora i due pianimali sono separati da una distanza  $d_2 > d_1$ , e anche questo l'avevamo assimilato. Semplificando oltre il lecito, è *come se* i due pianimali si fossero allontanati tra loro con **velocità equivalente**:

$$V_{eq} = (d_2 - d_1) / t \quad (10.1)$$

mentre noi sappiamo benissimo che nessuno/a dei due si è sognato di spostarsi, sperando che l'altra/o facesse la prima mossa.

Questo concetto non ci convince molto, vero? D'altra parte, è perfettamente compatibile con i dettami della Relatività generale: lo spazio è una ***struttura plastica*** e si può comprimerlo, così come si comprime un gas quando lo facciamo passare attraverso un imbuto. Analogamente, almeno in linea di principio (vedremo poi il caso più concreto), possono

esistere *contro-curvature* o, se preferite, *curvature negative* del tempo che costringono lo spazio a divaricarsi, come avviene per i due poveri pianimali innamorati.

E qui arriva il colpo di grazia: chiediamoci se esiste un limite alla velocità equivalente, intesa come rapporto tra la contrazione (o l'espansione) dello spazio, e l'intervallo di tempo in cui la contrazione (o l'espansione) hanno avuto luogo, calcolata per mezzo della formuletta (10.1) qui sopra. Insomma, questa  $V_{eq}$  appena introdotta è soggetta anch'essa alla limitazione  $V_{eq} \leq c$ ? Niente affatto! Occhio alla distinzione, che segue, dunque.

1) I movimenti attraverso un qualsiasi volume di spazio devono sempre obbedire al vincolo  $V \leq c$ .

2) La velocità equivalente con cui due volumi di spazio si avvicinano o si allontanano tra loro non è soggetta ad alcun vincolo; può anche *tendere* a  $V_{eq} = \infty$ .

Sì, avete capito bene. Non c'è limite a quanto velocemente lo spazio possa espandersi o contrarsi. E, per chiarire meglio, definiamo velocità cosmica tout court  $V_c$  la somma di:

- La velocità  $V_a$  di un oggetto materiale **a** rispetto al volumetto di spazio in cui esso si trova immerso,
- più la velocità  $V_b$  dell'oggetto **b** rispetto al suo volumetto di spazio,
- più l'eventuale velocità equivalente di allontanamento o avvicinamento  $V_{eq}^{ab}$  dovuta all'espansione o contrazione dello spazio, che separa gli oggetti **a** e **b**.

Dunque, la velocità cosmica sarà, d'ora in poi, la somma di tre termini: due sono le normali velocità attraverso lo spazio, con le quali abbiamo confidenza, e che obbediscono al vincolo  $V \leq c$ , mentre la terza sarà la velocità di dilatazione o di contrazione *dello spazio in sé*, per la quale non esiste limite di velocità. Insomma:

$$\underline{V}_c = V_a + V_b + V_{eq}^{ab} \quad (10.2)$$

ricordando che le velocità vanno sommate tenendo conto della loro direzione (del loro segno, per intenderci).

Inciso: lo so che non è esattamente così, e che  $V_a$  e  $V_b$ , essendo velocità *rispetto allo spazio*, andrebbero *composte* secondo le regole di Lorentz, ma non compliciamoci troppo la vita con faccende che, da questo momento in poi, diventano dettagli. Ormai, quel che stiamo cercando d'ingoiare è il *moto dello spazio*, e non mi sembra poco!

Torniamo dunque ai pianimali innamorati. Vedendo che la sua amata si allontana da lui a velocità sempre crescente, il pianimalo raccoglierà le forze e, estratto il cellulare, chiamerà il numero della pianimala per dichiararle il suo amore. Purtroppo, nel frattempo, lo spazio si è dilatato al punto tale, che la velocità totale con cui i due si allontanano tra loro ha superato la velocità della luce. Riceverà mai la telefonata, la pianimala? No, chiaramente. Anzi, a quel punto non vedrà neppure più il pianimalo, poiché le onde elettromagnetiche del cellulare e quelle della luce visibile dovranno nuotare alla velocità della luce *contro una corrente di spazio che si gonfia a velocità superiore*, e dunque saranno come salmoni che nuotano contro una corrente più veloce di loro. Sono destinati a perdere la gara.

Confusione generale! Ci sembrava di aver capito che nulla può muoversi più veloce della luce, e adesso...

Pazienza: restiamo sull'esempio del salmone appena citato, perché queste cose si capiscono solo a forza di esempi. Leggiamo sull'enciclopedia che la massima velocità alla quale riesce a nuotare un salmone è circa **6–7** km/h. Supponiamo, perciò, che un salmone stia nuotando contro corrente in un fiume, la cui acqua viaggi verso il mare in modo laminare, senza turbolenze, con velocità di **20** km/h. Noi stiamo osservando la scena sdraiati sul prato, all'ombra di un albero. Secondo voi, riusciremo ad assistere a una lenta risalita del salmone lungo il fiume? No, è ovvio: il fiume sta portando il salmone a valle più velocemente di quanto lo sfortunato pesce riesca a nuotare.

Distinguiamo, perché ormai ne abbiamo gli strumenti mentali: altro è la velocità massima del salmone rispetto alla corrente, altro la sua velocità rispetto a noi che ci troviamo sul prato. Perciò, se qualcuno ha rovesciato un branco di salmoni a monte di dove ci troviamo noi, e questi hanno cominciato subito a nuotare contro corrente alla massima velocità consentita dalla loro muscolatura (i famosi **7** km/h), alla fine li vedremo passare davanti a noi, trascinati verso il mare, a una velocità di circa **13** km/h, che è la differenza tra la velocità globale della corrente e quella dei salmoni contro corrente. Al contrario, se qualche salmone ha imboccato direttamente la strada verso il mare nuotando gagliardamente, quando ci passerà davanti viaggerà a circa **27** km/h. In entrambi i casi, le velocità dei salmoni rispetto a noi saranno più elevate di quanto riportato dall'enciclopedia, ma questo significa forse che l'enciclopedia sia sbagliata? Getteremo via nel fiume una dozzina di volumi (oppure il Prof. Google) perché contengono informazioni che a uno sguardo superficiale paiono inesatte? No, vero?

Insomma, per capire come vanno le cose bisogna sostituire alla corrente del fiume *lo spazio in sé*, che si muove alla velocità che gli è imposta dalla curvatura del tempo (attenzione: sto continuando a distinguere tra la curvatura spaziale e quella temporale, ma ricordate sempre che ciò è possibile solo laddove una delle due superi di molto l'altra, altrimenti s'ingarbuglia tutto). Al salmone, invece, dovremo sostituire un qualsiasi oggetto immerso nello spazio, che si può muovere rispetto a quest'ultimo solo a  $V \leq c$ . Cominciate a intuire le regole del gioco?

Se siamo arrivati indenni a questo punto, già ci viene in mente che, vuoi gettando spazzatura in un Buco nero (si può: non risponde a obiettivi di riciclo, ma per lo meno non inquina) laddove la curvatura generale dello spaziotempo cresce verso l'infinito, vuoi gettandola oltre i confini estremi dell'UC, sarà in teoria possibile imbattersi in oggetti che viaggiano a velocità *peculiare*. Questi ultimi, rispetto a qualche osservatore opportunamente piazzato, possono spostarsi con una velocità che, da un certo punto in poi, presumibilmente supera  $c$ .

Tutto ciò è in contraddizione con la Relatività speciale? Per i più pignoli, possiamo concedere che sembra almeno in violazione *formale*. Noi, però, seguiamo il gioco dei fisici, e ci accontentiamo di constatare che non c'è contraddizione *pratica* perché, nel momento in cui due oggetti si allontanano tra loro con  $V > c$ , nessun segnale può più essere trasmesso tra l'uno e l'altro. Infatti, la velocità massima di un segnale *attraverso lo spazio* è sempre e comunque  $c$  (nell'analogia di prima, la massima velocità del salmone è quella riportata nell'enciclopedia, e cioè **7** km/h). Tanto è sufficiente a impedire che si creino situazioni nelle

quali il principio di causalità possa essere violato. In questo senso, in caso di *trascinamento* o *espansione dello spazio*, non dovremo più scandalizzarci quando troveremo situazioni nelle quali  $V > c$ , poiché la causalità è fatta salva. Insomma: solo la buonanima del nonno Alcibiade può farci sognare le estrazioni del Lotto di sabato prossimo; a nessun viaggiatore *a velocità cosmica*  $> c$  sarà consentito altrettanto.

## 10.2) – Gira che ti rigira...

Nel 1783, un professore di geologia inglese di nome John Mitchell pubblicò, nelle “Philosophical Transactions of the Royal Society”, un saggio in cui riportava il risultato di un suo semplice calcolo. Qualora una stella avesse posseduto una massa sufficientemente grande, a causa della forza di gravità estrema neppure la luce sarebbe stata in grado di sfuggire dalla sua superficie. Sebbene a Mitchell fosse accreditato (giustamente) un notevole ingegno, il suo saggio passò senza far notizia e fu reso pubblico dagli *archeologi della scienza* solo attorno al 1970. Così fu Laplace, nell’anno 1793, a riscoprire da sé il concetto e a rendere popolare, almeno a livello di curiosità scientifica di poca importanza pratica ai suoi tempi, il concetto di “*Astro oscuro*”.

A beneficio del lettore, riporto la sostanza del pensiero di Laplace. «Supponiamo che esista un corpo celeste immenso, delle dimensioni del Sistema solare, e che la sua densità sia uguale a quella dell’acqua. In base alla teoria newtoniana si calcola che, per sfuggire alla forza di gravità e raggiungere distanza infinita, un oggetto dovrebbe partire dalla sua superficie con velocità uguale (se non superiore) a quella della luce. Se questi corpi celesti esistessero davvero, perciò, non invierebbero la loro luce verso di noi, e non saremmo in grado di osservarli». Intuitivamente dovrebbe essere chiaro, ma occorre specificare un po’ meglio un concetto nascosto tra le parole: quello di “*velocità di fuga*”.

Se lanciamo verso l’alto un sasso con tutta la forza del nostro braccio, faremo bene a stare attenti a dove il sasso ricade, perché di certo piomberà giù dopo pochi istanti. E, quando uno sconsiderato decide di *rafforzare* un po’ i botti di Capodanno sparando un colpo di pistola verso il cielo, succede spesso che un povero disgraziato ci rimetta la pelle perché il proiettile, dopo aver raggiunto un’altezza massima, ben superiore a quella del sasso, ricadrà verso il suolo con la stessa velocità con cui era partito dall’arma (dunque, tanto valeva sparare direttamente a qualcuno). Così pure se spariamo un colpo di cannone, o se lanciamo con un razzo un satellite artificiale, per il quale “ricadere” significa “entrare in orbita”, ma...

Un momento: e allora, come mai alcune sonde spaziali hanno oltrepassato l’orbita di Plutone e stanno seguitando ad allontanarsi da noi verso gli spazi interstellari? Che cosa distingue i comuni proiettili dalle sonde che se ne vanno verso la Luna o verso gli altri pianeti?

Risposta: li distingue la velocità di partenza dalla superficie terrestre (ignorando per semplicità altri parametri). Infatti, fino a una certa velocità iniziale, gli oggetti sono destinati a ricadere. Quando raggiungono una velocità limite di circa 8 km/s, detta *velocità orbitale*, entrano in orbita attorno al nostro pianeta e, se raggiungono circa 11 km/s (la velocità orbitale moltiplicata per  $\sqrt{2}$ : il calcolo con le formule di Newton è semplice, ma spero che il lettore mi crederà sulla parola) non ricadono più, ma sono liberi di fuggirsene via nello spazio. Ne concludiamo che, dalla superficie di ogni corpo celeste, esiste una *velocità di fuga*  $V_f$ , e solo oggetti che partano verso l’alto con velocità uguale o superiore a  $V_f$  possono allontanarsi all’infinito. L’*astro oscuro* di Mitchell e Laplace è, per l’appunto, un astro così massiccio, che la velocità di fuga dalla sua superficie uguaglia o supera quella della luce, ossia:  $V_f \geq c$ .

Laplace lavorava ai tempi della Rivoluzione francese e di Napoleone. Poco *feeling*, a quei tempi, tra Inghilterra e Francia e, come dicono gli Inglesi, quando la Manica è in tempesta il Continente è isolato. Saltiamo un secolo e arriviamo a un’altra guerra: quella del 1914 –

1918. Anche allora la Manica era in tempesta, ma stavolta era la Germania a opporsi ad Albione. Per fissare alcuni elementi di cronologia, Einstein aveva reso note le sue equazioni della nuova teoria della gravitazione nel 1915, e a quell'epoca lo stesso Einstein viveva in Germania.

Al fronte, nel Belgio occupato, combatteva un patriota prussiano dal nome quasi impronunciabile: Karl Schwarzschild. Era direttore dell'Osservatorio Astronomico di Potsdam e aveva raggiunto la quarantina ma, allo scoccare della guerra, partì volontario per difendere la sua Grande Prussia. Restando in corrispondenza con Einstein, fu tra i primi a mettere le mani sulle nuove equazioni e, a pochi mesi dalla loro pubblicazione, riuscì a trovarne una soluzione esatta almeno per un caso particolarissimo: un corpo la cui massa fosse tutta concentrata in un punto. Inviò immediatamente le carte a Einstein all'inizio del 1916. Purtroppo, negli stessi mesi fu trasferito sul fronte russo laddove morì di stenti (o di setticemia? Probabilmente non lo sapremo mai di preciso) prima della fine dell'anno.

Per la verità, Einstein si meravigliò assai che qualcuno (oltre a lui) fosse già riuscito a risolvere equazioni così formidabili; inoltre, i suoi interessi, al momento, vertevano più che altro sull'applicazione della Relatività generale alla cosmologia (cercava il suo primo Modellino d'universo, ma aveva in mente un preconcetto e, come già sappiamo, pasticciò un poco). In sostanza, anche se la cosiddetta "**Soluzione di Schwarzschild**" (questo è tuttora il suo nome fra matematici) venne resa pubblica, non furono in molti a lavorarci sopra, almeno a quel tempo. Anche perché sembrava semplice (ingannevolmente), ma nascondeva una serie di concetti tutt'altro che banali, e ci vollero decenni prima che questi ultimi potessero essere chiariti completamente. Contribuirono molto i lavori di Sir Roger Penrose il quale, proprio grazie ai suoi studi sull'argomento, condivise il Nobel per la fisica nel 2020.

In soldoni, e a posteriori: Schwarzschild aveva formalizzato, in modo corretto e completo, sul piano matematico, l'analogo einsteiniano degli astri oscuri di Mitchell e Laplace. Poiché, dal 1967 in poi, la dizione "**soluzione di Schwarzschild**" è stata sostituita, nell'immaginario popolare, da quella, più evocativa, di "**Buco nero**", d'ora in poi useremo quest'ultima che, tra l'altro, è più semplice da gestire tipograficamente. Ma nessuno mi toglie dalla testa che, quando John Archibald Wheeler la conì, forse voleva liberarsi dalla necessità di scrivere "Schwarzschild" a ogni piè sospinto. Eppure, la **superficie di Schwarzschild** riesce a resistere almeno in un caso particolare, come vedremo tra un po'.

Un nuovo inciso. La dizione originaria completa è utilizzata ancora solo negli scritti in lingua russa perché, in quell'idioma, "Buco nero" ha da sempre un significato diverso: esattamente ciò che il lettore malizioso sta pensando proprio ora (vergogna, scostumato/a!)

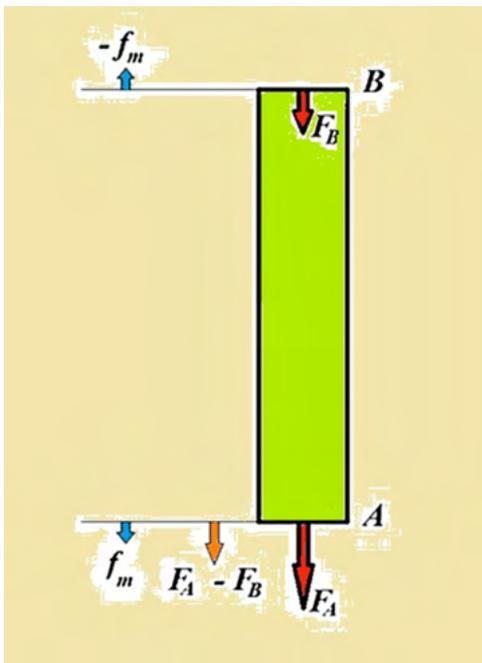
Doveroso omaggio: prima di lasciarci Schwarzschild alle spalle, rendiamo per l'ultima volta onore al valoroso militare, astronomo, matematico e patriota prussiano.

Cos'è un Buco nero? Anche di questo dobbiamo formarci un modellino mentale. Allo scopo, utilizziamo dapprima la vecchia teoria gravitazionale di Newton per aiutarci con l'intuizione, dopodiché sostituiamo ai concetti newtoniani quelli, più corretti sul piano scientifico, che derivano dalla Relatività generale. A tal proposito, torniamo agli **astri oscuri** di fine '700. Aggiungendo un'importante semplificazione: tutta la massa è concentrata in un solo punto di densità infinita, e poi capiremo perché non potrebbe essere altrimenti.

Che cosa succede nei dintorni? Bene: già sappiamo che esisterà una superficie sferica dalla quale la velocità di fuga eguaglia quella della luce. In termini newtoniani, però, non

esiste un limite superiore alla velocità di un oggetto e di conseguenza, sebbene la luce non possa sfuggire da un astro oscuro, nulla osta che ci sia qualcosa di più veloce, che riesca a vincere ancora la gravità della massa centrale. E qui poniamo la prima correzione concettuale, facendo intervenire la Relatività speciale: nulla attraversa lo spazio più velocemente di  $c$  e, pertanto, la superficie del Buco nero (e qui abbandoniamo pure la dizione “astro oscuro”) è una superficie di non ritorno per qualunque oggetto la oltrepassi, luce inclusa. Una volta infilatisi in un Buco nero, non se ne esce più.

Occorre, però, sfatare qualche mito su questa superficie. A volte si trova scritto che su di essa esiste un “gradiente di potenziale gravitazionale” (una variazione di gravità da un punto all’altro) che va all’infinito, o astruserie del genere. Lasciamo che gli specialisti ci si accapiglino sopra; per noi è solo quel che abbiamo appena detto. La regione in cui si ha  $V_f = c$  e niente di più. Un traguardo importante, certo, ma senza particolari *misticismi* scientifici e pseudo-scientifici.



**Figura 10.2**

Seguitiamo, sempre tenendoci agganciati a eventuali analogie newtoniane fin dove possibile. La forza di gravità aumenta in proporzione inversa al quadrato della distanza dal centro. Ora, poiché tutta la massa è concentrata in un punto, via via che ci si avvicina a quel punto la forza tende all’infinito.

Esiste, però, un altro effetto fisico, un po’ più sottile da intendere, che tende anch’esso all’infinito: la forza di marea. L’abbiamo già incontrata nella cabina che cadeva in un campo di gravità, ricordate? Adesso, semplifichiamola immaginando un oggetto *lungo* che cade liberamente verso il centro del Buco nero, e cade proprio *per lungo*. La sua estremità inferiore, che definiremo *A*, sarà più vicina al centro rispetto a quella superiore, definita *B*, e la forza di gravità esercitata sulle due estremità sarà diversa, tanto più quanto più l’oggetto si avvicina al centro. In particolare,  $F_A$  sarà sempre

maggiore di  $F_B$ . E quindi, tra le due estremità ci sarà una differenza di forza  $F_{marea} = F_A - F_B$  come mostrato in Figura 10.2 /freccia arancione)

Questa forza  $F_{marea}$  agirà sull’oggetto in caduta libera cercando di allungarlo, come se metà di essa ( $-f_m$ ) agisse sul bordo *B* tirandolo verso l’alto, e l’altra metà ( $f_m$ ) agisse sul bordo *A* tirandolo verso il basso (freccette in celeste). Capite perché sto insistendo sul concetto di “forza di marea”? Perché somiglia moltissimo all’effetto (che qui di seguito semplifico all’estremo) della gravità lunare sugli oceani terrestri: l’acqua si solleva al passare della Luna, e anche nell’emisfero opposto. Inoltre, poiché  $F_{marea} = F_A - F_B$  cresce via via che ci spostiamo verso il centro, mentre l’oggetto seguita a cadere,  $F_{marea}$  tenderà all’infinito quando il bordo *A* raggiungerà il centro di massa esatto.

Con queste premesse, completeremo il nostro primo, grossolano modellino di Buco nero, con un'ammonizione per chi volesse esplorarne l'interno: «Non solo non potrai più venirme fuori ma, via via che cadrai verso il centro, sarai fatto a brani sempre più piccoli dalla forza di marea che agirà sul tuo corpo. Adesso hai capito perché dentro un Buco nero non s'incontra una superficie rigida? Tutto è distrutto dalla forza di marea, e attirato verso il punto centrale.». Neanche a Dante sarebbe venuto in mente qualcosa di così spaventoso, per il girone dei ficcanaso!

Bene: abbiamo già capito che questo modellino è un'approssimazione davvero molto ingenua alla curvatura dello spaziotempo ma, come abbiamo visto nel capitolo 9.6, la curvatura del tempo è quasi più facile da capire di quella dello spazio poiché essa simula – finché quella dello spazio è trascurabile – la vecchia gravità newtoniana. Ora dobbiamo tornare a Einstein, alla Relatività generale e, ovviamente, alla curvatura dello spaziotempo tutto intero, se vogliamo davvero intendere cosa avviene attorno a un Buco nero e al suo interno. Attenzione, però: di tanto in tanto continueremo ad applicare il modellino quasi newtoniano, pur se sappiamo che non è completamente corretto. D'altra parte, è intuitivo, e questa è la sua potenza.

A beneficio del lettore, abbiamo già scritto nel capitolo 10.1 una parte delle equazioni di Einstein o, per lo meno, un loro modellino semplificato, puramente concettuale. Ora le completiamo.

[curvatura dello spaziotempo] proporzionale a [massa + energia]

[moto degli oggetti] segue la [curvatura dello spaziotempo]

Semplice, no? Quanta più massa (ed energia) abbiamo o, se preferite, quanto più sono concentrate massa ed energia, tanto più lo spaziotempo s'incurva. E qui si pone un primo problema.

Supponiamo di avere un foglio di carta liscio, che rappresenta il solito spazio a due dimensioni, anche se stavolta non ci metteremo sopra un pianimale perché esiste un limite oltre il quale non è più lecito torturare la povera bestiola perfino in un *gedankenexperiment* altrimenti interviene la *gedankentierenschutz* (protezione degli animali immaginari). Afferriamo i due lembi del foglio a destra e a sinistra, e cominciamo a curvarli l'uno verso l'altro per simulare la curvatura dello spazio alla presenza di una massa. E non rinfacciatemi che dovremmo curvare non “a cilindro” ma “a sfera”. Lo so pure io, e ci arriveremo, ma se siete così saccenti provate voi a curvare a sfera un foglio di carta formato **A4**, e per il momento basta così. Gira che ti gira, curva che ti curva, i due lembi finiranno per toccarsi realizzando, per l'appunto, una struttura cilindrica. E cioè: lo spaziotempo, quando è curvato troppo, si richiude su se stesso.

Adesso ragioniamo su questa nuova situazione: qual è la caratteristica principale di un oggetto chiuso su se stesso? Che non ne esce più nulla. Come già abbiamo visto col mappamondo e il pianimale, hai voglia a camminare e camminare; si torna sempre al punto di partenza. L'analogia è ancora un po' povera, ma avviciniamoci per gradi e vediamo, in primo luogo, quali sono le dimensioni tipiche di un Buco nero in cui la massa e l'energia siano concentrate in un punto, e la lettera **M** indichi la loro somma. Vogliamo conoscere la distanza

$R$  dal centro di massa alla quale avviene quest'arrotolamento dello spaziotempo, per cui si forma una superficie che stavolta è, per l'appunto, sferica, e chiusa attorno a  $M$ . La formula che consente di calcolare  $R$  è molto semplice:

$$R = \frac{2GM}{c^2} \quad (10.3)$$

dove  $G$  è sempre la costante gravitazionale di Newton,  $R$  è in km, ed  $M$  è espressa in masse solari. A conti fatti, per il Sole sarebbe  $R = 3 \text{ km}$ . Per un buffo scherzo di natura, si tratta della stessa formula trovata da Mitchell e Laplace, usando la sola teoria della gravità newtoniana, per il raggio di un *astro oscuro*. Attenzione: questa coincidenza non ci dice proprio nulla d'interessante dal punto di vista della fisica di base; è una curiosità e nient'altro. Piuttosto, proviamo a interpretare questo risultato applicando il nostro modellino della curvatura del tempo.

Dove c'è una massa, lo spazio è risucchiato verso la massa stessa, d'accordo? E, maggiore è la curvatura del tempo, più elevata è l'accelerazione dello spazio in caduta libera verso il centro di massa. Accelerando senza limite, a un certo punto la caduta dello spazio avverrà, se vista da un osservatore situato a grande distanza, alla velocità della luce. Ecco: questo è proprio ciò che avviene quando lo spazio – e l'oggetto che esso contiene – si trova a  $R$  km dal centro di massa.

D'ora in poi, ricordiamo quanto segue: definiremo “**Buco nero**” la regione compresa fra il centro di massa puntiforme e la superficie di raggio  $R$  (quella che ancora, saltuariamente, prende il nome da Schwarzschild). Ora, però, prima di cominciare a trarre conclusioni da questo modellino (lo faremo nel rimanente del capitolo), proviamo a mettere nella formuletta qualche numero che abbia per noi un senso, e vediamo cosa ne esce.

Usiamo anzitutto la massa della Terra. Viene fuori un Buco nero con un raggio di appena **9** mm. Poniamoci allora la domanda: se scavassimo un foro in grado di raggiungere il centro esatto della Terra, forse ci imbatteremmo in un Buco nero di **9** mm di raggio? Assolutamente no, le cose non stanno in questo modo! Al centro della Terra non esistono anomalie gravitazionali. E cerchiamo di spiegarci.

Come qualsiasi oggetto dotato di massa, la Terra curva un po' lo spaziotempo. Questo dovremmo averlo capito grazie al modellino della curvatura del tempo: se, sulla superficie terrestre, esiste un'accelerazione di gravità, questa è il risucchio dello spazio verso il centro della Terra, che abbiamo appena modellizzato come l'effetto principale della curvatura del tempo. La gravità alla quale siamo abituati, però, è ben poca cosa se raffrontata a quella di altri corpi celesti. Prendiamo per esempio il Sole: esso non ha una superficie solida ma, se fossimo trasportati su un'ipotetica superficie della nostra stella, peseremmo circa trenta volte di più. Ne deduciamo che, in termini relativistici, la curvatura spaziotemporale causata dalla Terra è quasi impercettibile.

Ora, entriamo nell'ordine d'idee di eseguire un terribile *gedankenexperiment*. Supponiamo che una forza molto intensa applicata sulla superficie del nostro pianeta lo comprima, fino a un raggio che sia solo la metà di quello di partenza. La formuletta di Newton ci dice che la forza di gravità alla superficie di questa Terra compressa sarebbe quattro volte superiore a quella attuale, ed io peserei **420** kg (sono troppi, anche se divisi per quattro!). In termini relativistici, lo spaziotempo sarebbe un tantino più curvo di ora. E perciò, se

seguitiamo a comprimere la Terra, anche lo spaziotempo nei suoi dintorni immediati seguirà a curvarsi sempre di più.

Quand'è che riuscirebbe a richiudersi su se stesso, e quindi a formare un Buco nero? Soltanto se ce la facessimo a condensare tutta la massa terrestre all'interno di una sferetta il cui raggio fosse, per l'appunto, **9 mm**. La Terra, però, è – fortunatamente – espansa, e di conseguenza al suo centro non c'è una forte curvatura spaziotemporale. Anzi: per un gioco di geometria su cui non sto a insistere, essa è addirittura inferiore a quella superficiale; praticamente nulla. Il Buco nero si formerebbe – lo ripeto – solo comprimendo l'intero pianeta **dentro** il raggio di Schwarzschild che si riferisce alla massa terrestre: **9 mm**. Ci siamo capiti?

E per quanto riguarda il Sole? Abbiamo detto che il suo raggio di Schwarzschild è circa **3 km**. Occorrerebbe compattarlo fino a farlo entrare in una sfera di soli **3 km** di raggio, prima di trasformarlo in un Buco nero. Il suo raggio attuale, invece, è circa **700.000 km**, e questo ci fa capire quanto debole sia la curvatura dello spaziotempo anche in prossimità dell'astro del giorno. È ben vero: alla sua morte, il raggio della Nana bianca in cui sarà condensata una frazione non indifferente della massa solare (circa il **60%**) sarà di soli **10.000 km**; in ogni caso ben **3000** volte inferiore a quanto servirebbe per fargli chiudere attorno lo spaziotempo. Sembra ancora poco, però qualche piccolo effetto di curvatura spaziale comincia a farsi sentire, e ce ne accorgiamo osservando le righe spettrali emesse dagli astri di questo tipo.

D'altra parte, chiacchierando di Buchi neri, mi rendo conto di aver definito il concetto in modo ancora troppo vago sul piano relativistico. In pratica, mi sono spostato abbastanza poco rispetto alla definizione settecentesca di *astro oscuro*. Bisogna fare ben altro. Pur sapendo che il modellino di curvatura del tempo intesa come risucchio dello spazio è, per un Buco nero, fallace giacché **anche la curvatura dello spazio è imponente**, e quindi va a modificare il precedente modellino in modo non intuitivo, cercherò di seguirlo fin dove potrò. Poi, lo butterò via prima di avergli tirato troppo il collo.

Facciamoci coraggio, dunque: nel tentativo di chiarire meglio il significato di “Buco nero”, e capire come funzioni fuori e dentro, utilizziamo il metodo galileiano; quello sperimentale. Lo faremo per finta, certo, non sul serio: solo attraverso qualche esperimento ideale. Affrontiamo dunque la prossima sezione a cuor leggero: non ci succederà nulla di pericoloso se non, forse, un po' di mal di capo nel tentativo di seguire concetti che non ci sono per nulla familiari.

## 10.3) – “Guardare” i Buchi neri

Si *vedono* nel senso tradizionale del termine? Laplace ci farebbe notare che un Buco nero, per definizione, non si vede. In qualche modo un po' sottile, però, il grande matematico avrebbe torto. Infatti, proviamo a cambiare un pochino la domanda. Se avessimo un faro potentissimo i cui raggi di luce fossero del tutto paralleli, e con esso cercassimo d'illuminare un Buco nero e i suoi dintorni, non ci tornerebbe indietro neanche il minimo barlume? Non ci aspettiamo nulla di nulla per quanto riguarda la luce che cade entro il raggio  $R$ , e su questo concordiamo con Laplace, ma cosa avviene di quella che lo sfiora appena?

Sempre giocando di fantasia, e supponendo per un attimo d'ignorare la curvatura temporale per focalizzarci su quella spaziale, immaginiamo di poter disporre, nel nostro ben attrezzato laboratorio, di un piccolo Buco nero, il cui diametro sia, tanto per buttare là un numero, una decina di centimetri. Peserebbe una dozzina di volte più del nostro intero pianeta e, per *curvatura temporale* (la famigerata *forza di marea* che, in prima approssimazione, abbiamo già capito), basterebbe avvicinarci un oggetto qualunque, perfino una solida biglia d'acciaio, per vederla disintegrata prima ancora di esserne divorata, ma questi sono dettagli che ora non c'interessano. In ogni caso, cerchiamo di eseguire l'esperimento con un fascio di luce ben collimato avendo prima spento ogni altra lampada e tappato con cura le imposte, per non essere influenzati da disturbi luminosi di origine spuria.

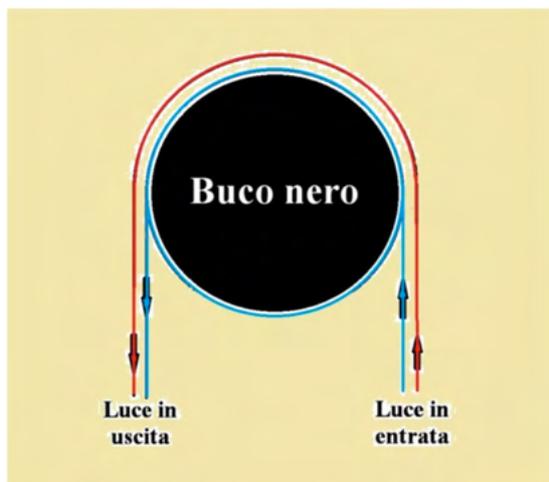


Figura 10.3

Si vedrebbe qualcosa, di ritorno dal Buco nero o dai suoi dintorni? Pochino, ma qualcosa sì: intorno al buio assoluto che è il Buco nero in sé, scorgeremmo una debole aureola luminosa. Che, se proprio fossimo pignoli e la osservassimo con uno strumento ottico molto potente, si risolverebbe in infinite aureole concentriche, sempre più deboli, partendo dalla più esterna e muovendoci verso l'interno. Di cosa diavolo si tratta? Cercherò di rendere la spiegazione *abbastanza* semplice, ignorando tanti dettagli, coll'ausilio della Figura 10.3.

Ragioniamo così: se il Raggio di Schwarzschild è il raggio di *chiusura totale* dello spazio, basterà spostarsi un po' all'infuori e lo spazio sarà *quasi completamente* chiuso, ma non proprio del tutto. Se ne deduce che un raggio di luce uscito dal nostro faro, giungendo nelle vicinanze del Buco nero, sarà costretto a incanalarsi per i binari locali dello spazio curvo. Si noti: nell'ultima frase ho deliberatamente omesso la curvatura temporale e ho cominciato a soffermarmi solo su quella spaziale; ciò è sbagliato dal punto di vista concettuale perché anche quella temporale conta circa allo stesso modo, ma semplificando si capisce meglio intuitivamente. Di conseguenza, se il lettore ricorda quando lo misi in guardia contro l'interpretazione errata di pensare all'orbita terrestre attorno al Sole come dovuta alla sola

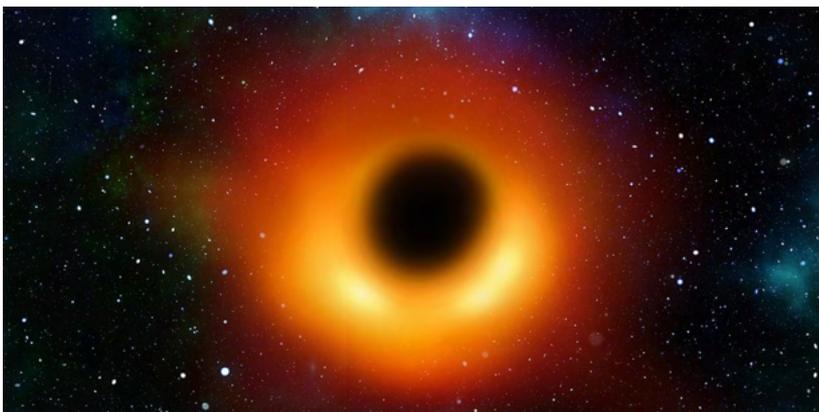
curvatura dello spazio perché quest'ultima è quasi insignificante per distanze planetarie, qui deve accontentarsi del modello opposto: tutte le curvature sono pensate come se fossero dovute solo a quella dello spazio, che costringe gli oggetti (luce inclusa) entro guide "rigide".

I binari spaziali, dunque, sono sempre più curvi avvicinandosi alla superficie di Schwarzschild. E qui è il trucco: ci sarà una distanza ben precisa da  $R$  per cui la *rotaia invisibile* costringerà il raggio di luce (quello disegnato in rosso), proveniente dal nostro faro, a eseguire un giro di  $180^\circ$  attorno al Buco nero prima di rispedircelo indietro. Un raggio luminoso ancora più vicino (disegnato in blu) percorrerà un giro completo prima di essere rinviato nella nostra direzione, e un numero sempre maggiore di giri sarà percorso da raggi luminosi che transitano sempre più vicini al raggio di Schwarzschild  $R$ .

Ecco cos'è, dunque, l'aureola che vedremo (la Figura 10.3, come avrete ben capito, descrive una situazione molto idealizzata): si tratta dell'insieme dei raggi luminosi che, transitando alla *giusta* distanza da  $R$ , sono stati rispediti esattamente verso di noi. Se poi lasceremo fermo il faro e ci muoveremo un po' attorno al Buco nero osservandolo da direzioni diverse, continueremo a vedere un'aureola, anche se la sua morfologia cambierà un po', trattandosi di raggi luminosi che hanno subito deviazioni diverse da  $180^\circ$  e multipli. In fin dei conti era *abbastanza* semplice, no?

Riassumiamo: un Buco nero illuminato da una sorgente esterna restituisce, a un osservatore lontano, una piccola frazione di luce sotto forma di un'aureola molto vicina alla superficie di Schwarzschild. E qualcosa di somigliante accade qualora la luce sia inviata da *dietro*. Ora vi dico qualcosa che vi sembrerà strano: la quantità totale di luce "*riflessa*" (in realtà "*deflessa*") da un Buco nero, è superiore a quella che ci tornerebbe indietro da una sfera completamente riflettente delle stesse dimensioni. Provare per credere (che fate? state andando dal ferramenta per comprare sferetta e Buco nero?).

Ci si domanda: questa poca luce potrebbe essere proporzionata al bisogno di riuscire a osservare *direttamente* eventuali Buchi neri nello spazio interstellare attorno a noi? Per il momento è ancora insufficiente, ma grazie al cielo siamo riusciti a *vedere e fotografare* la



**Figura 10.4**

luce proveniente da almeno un Buco nero di dimensioni galattiche: in particolare quello nel cuore della galassia Messier 87. Attenzione: so che lo avere guardato tutti come se il nero fosse proprio il Buco nero, ma non è così: per una serie di motivi che non sto a dettagliarvi, poiché sono così complicati che non li ho ben capiti neanche io, la dimensione fisica del Buco nero

è solo un terzo (circa) di quel che a noi pare più nero del carbone. Curiosità accademica: quest'ultima osservazione, dopo le onde gravitazionali dovute alla coalescenza tra Buchi neri

binari, è stato il passo decisivo verso il Premio Nobel a Sir Roger Penrose, che se lo meritava da un pezzo, e che è da sempre il cantore dei Buchi neri.

E nel giro di pochi d'anni dovrebbe emergere dalle osservazioni – corrette per l'enorme quantità di polvere e gas lungo la linea di vista – anche il Buco nero centrale della nostra amata Via Lattea, più piccolino ma più vicino di quello di M 87.

Che ci siano davvero Buchi neri in cielo, comunque, ormai lo sappiamo con certezza da tanti altri tipi di considerazioni. Per esempio: alcuni astronomi molto ingegnosi sono riusciti a calcolare, e a misurare in modo incontrovertibile, su alcune sorgenti di raggi  $X$  e  $\gamma$ , la differenza tra la radiazione che proviene dai *bordi* di un vero Buco nero, e quindi è in parte assorbita dal medesimo, e solo per un'altra parte deformata dalla curvatura spaziotemporale prima di essere emessa verso l'esterno, e quella che, invece, è generata nei dintorni di *cadaveri stellari* come stelle di neutroni o altri oggetti ancor più esoterici. Queste ultime sono strutture molto concentrate, già pesantemente dominate dalla curvatura dello spaziotempo, ma ancora non in grado di chiudere del tutto lo spazio attorno a loro anche se, spesso, basterebbe strizzare solo di due o tre volte il raggio di questi astri morti per farli entrare nella loro superficie di Schwarzschild.

E qui possiamo gettare nella spazzatura (attenzione: non è *riciclabile*) il nostro piccolo Buco nero da camera oscura, e passare a quell'altro laboratorio infinito che è l'universo.

Come si fa, dunque, a sapere se e dove questi articoli messi in offerta dalla Relatività generale si trovano? Perché, se fossero troppo vicini, forse dovremmo cominciare a temere qualcosa. Le risposte a quesiti del genere sono piuttosto articolate, e bisogna avere la pazienza di seguire le spiegazioni. Partiamo dai Buchi neri di tipo *stellare*.

Già da molto tempo, gli astrofisici sono in grado di calcolare, per mezzo di potenti computer, cosa avviene all'interno di una stella durante le fasi della sua esistenza, dalla nascita da una nube di polvere e gas, fino alla morte come Nana bianca, oppure stella di neutroni che, verso il centro, si disintegra in una miscela di quark liberi, e infine anche Buco nero.

In effetti, per quanto possa parere strano a chi non ci lavora sopra, è molto più facile conoscere cosa accade al centro del Sole piuttosto che nel nucleo profondo della Terra. Ciò è possibile in quanto un pianeta è un oggetto solido, e la fisica dei solidi ad altissime pressioni non è ancora ben conosciuta. Al contrario, una stella è essenzialmente una nube di gas ionizzato, e le proprietà di questo gas, a parte casi particolari, si possono dedurre dalle leggi generali della fisica. Di conseguenza, sappiamo con ragionevole certezza che il Sole, ma anche stelle fino ad almeno **8** volte più *massicce*, si stabilizzeranno per l'eternità sotto forma di Nane bianche, avendo prima perso, per evaporazione, una gran quantità di materia, ed essendosi ridotte al disotto di **1,44** masse solari all'incirca, che è il limite di Chandrasekhar.

Stelle più massicce – e sono quelle che ci interessano – subiranno un fato diverso: esploderanno come Supernove e lasceranno un nucleo, la cui esistenza futura si biforcherà secondo la massa residua. Se quest'ultima non supera le tre masse solari (sono sempre numeri approssimativi), l'oggetto si stabilizzerà come stella di neutroni con un nucleo di quark liberi, avente un raggio solo due o tre volte maggiore di quello di Schwarzschild, e quindi curvando in maniera poderosa lo spaziotempo nei dintorni. Se, però, la massa del residuo fosse maggiore di questo valore limite, i calcoli mostrano che nessuna forza al mondo potrà impedire al nucleo di continuare a contrarsi (anzi: più c'è forza per ostacolare la contrazione, più c'è energia, e siccome anche l'energia produce gravità, aumentando la forza la situazione

peggiora), fino a entrare nel proprio raggio di Schwarzschild e dando perciò origine a un Buco nero. Poiché si osservano stelle che nascono con masse fino a cinquanta volte quella solare e ancor più, sappiamo che dalla loro morte è virtualmente certo che si origini un Buco nero.

«D'accordo – si può obiettare – ma *virtualmente certo* non è ancora *di sicuro*. Come facciamo a sapere che questi Buchi neri di origine stellare esistono davvero?»

In modo indiretto, ma *praticamente sicuro* (che, per i più pignoli, è una dizione a metà strada tra “*virtualmente certo*” e “*di sicuro*”). Riusciamo a starli se fanno parte di una stella doppia, ossia una coppia di astri che orbitano attorno al baricentro comune. Se una delle due stelle è morta lasciando in eredità alla compagna un Buco nero, in primo luogo possiamo vedere direttamente la stella viva: d'accordo fin qui? Ebbene: analizzando il suo spettro luminoso possiamo accorgerci – dalle variazioni nell'effetto Doppler mentre essa percorre la sua orbita – che deve possedere una compagna *pesante*, poniamo, dieci masse solari. Ora, il punto è questo: se la massa della stella visibile, quella *viva*, fosse molto minore di queste dieci masse solari, ci aspetteremmo di vedere la sua luce quasi del tutto offuscata da quella della stella compagna che, essendo più massiccia, deve anche essere molto più luminosa. Questo, però, non avviene, e giungiamo dunque a concludere che l'oggetto di dieci masse solari rappresenta ciò che rimane di una stella più massiccia, che ha vissuto la sua breve vita e ha lasciato lì il proprio cadavere. E, se la sua massa è superiore alle fatidiche tre masse solari, questo cadavere non può essere che un Buco nero. *Quot erat demonstrandum*.

Non siete convinti da questo ragionamento? Vi trovate in buona compagnia: i signori fisici non sono “Giurie popolari su Internet” e non si accontentano di prove indiziarie come questa, ma pretendono qualcosa di più palpabile, visibile. Le “prove materiali”, per restare nell'analogia processuale.

Ora, per fortuna, in questi sistemi binari c'è sempre un po' di materia perduta dalla stella vivente, che finisce ingollata dal Buco nero. E qui bisogna prestare attenzione: basta che ci sia un minimo di rotazione in questa materia cadente e, avvicinandosi al raggio di Schwarzschild, la conservazione del *momento angolare* (ripensate alla pattinatrice che, stringendo le braccia lungo il corpo, ruota più in fretta) fa vorticare anche questa materia sempre più furiosamente per cui, prima di essere inghiottita dal Buco nero. E si forma attorno a esso un anello di plasma a densità e temperatura elevatissime. Anello che emette raggi  $X$  e  $\gamma$  i quali giungono fino ai nostri rivelatori su satellite. Ed è proprio questa radiazione che, analizzata con cura, dimostra di non provenire da una regione molto distante dal raggio di Schwarzschild  $R$  ma, come vi avevo anticipato poco fa, da una zona così vicina a  $R$  da poter dire che, in quel sistema di stelle, c'è *di sicuro* un Buco nero.

Da ultimo: un progetto che sta andando avanti da una ventina d'anni, il cosiddetto “Event Horizon Telescope (EHT)”, si ripropone di osservare “direttamente” la materia che, dopo aver spiralizzato attorno al Buco nero al centro della nostra galassia, vi piove dentro lasciando nel suo spettro tutte le “signature” previste dalla Relatività, e misurando con precisione il diametro del *mostro*. I risultati, ormai, non dovrebbero farsi attendere a lungo; se avrò vita lì inserirò al posto di questo paragrafo.

È così che possiamo concludere che, a distanza di alcune decine di anni–luce dal Sole, si cominciano a trovare Buchi neri. Non sono proprio frequentissimi, ma sono distribuiti un po' dovunque: non generano luce diretta (ma raggi  $X$  e  $\gamma$  per cattura di materia dalla stella

compagna) e comunque la loro forza di gravità o, se preferite, la curvatura dello spaziotempo, li tradisce.

Poi, ce ne saranno sicuramente di quelli che vivono isolati e, non avendo nulla da mangiare, rimangono buoni e zitti: di questi possiamo sapere ben poco, salvo che non ci mettiamo a esaminare ampie zone di cielo istante per istante. Infatti, se il moto di questi oggetti oscuri li conduce a passare *davanti* a stelle più lontane, che possiamo immaginare come se fossero uno sfondo fisso, la luce di queste stelle più lontane sarà *deformata* dal passaggio attorno al Buco nero (questo effetto prende il nome di *lente gravitazionale*) e noi potremo risalire alla massa, alla velocità e, con minore certezza, alla distanza da noi del Buco nero in transito. In ogni caso, è una specialità astronomica complessa, e non sono molti quelli che vi si dedicano, ma con l'avvento dei telescopi a largo campo e completamente automatizzati, pure questi mostri saranno snidati con una certa facilità. Per esempio, il telescopio spaziale **GAIA**, oltre ad averci fornito la prima mappa dinamica dell'intera Galassia, si occupa di scovare anche questi eventi.

Sempre grazie alla forza di gravità da essi esercitata (attenzione: sto parlando genericamente di *gravità* perché, nel caso che sto per considerare, conta essenzialmente la curvatura del tempo, e abbiamo visto come questa sia indistinguibile dalla forza di newtoniana memoria), li scoviamo nel centro delle galassie. La Via Lattea, per esempio, ne ospita uno la cui massa è quasi **4** milioni di volte quella solare. Lo sappiamo dalla misura delle orbite di stelle brillantissime che ruotano attorno a quest'oggetto oscuro e pesante. Quando, saltuariamente, un po' di materia gli passa troppo vicino, il mostro se la mangia emettendo lampi di raggi **X** e  $\gamma$  in una versione amplificata di quanto avviene in una stella doppia, ma sembra che il Buco nero centrale nella nostra galassia trascorra molto tempo a digiuno o quasi. Infatti, osservazioni accurate rivelano solo una debolissima luminosità nei raggi **X**. Il poveretto dovrà contentarsi di quella poca polvere e gas che ogni tanto gli piove addosso.

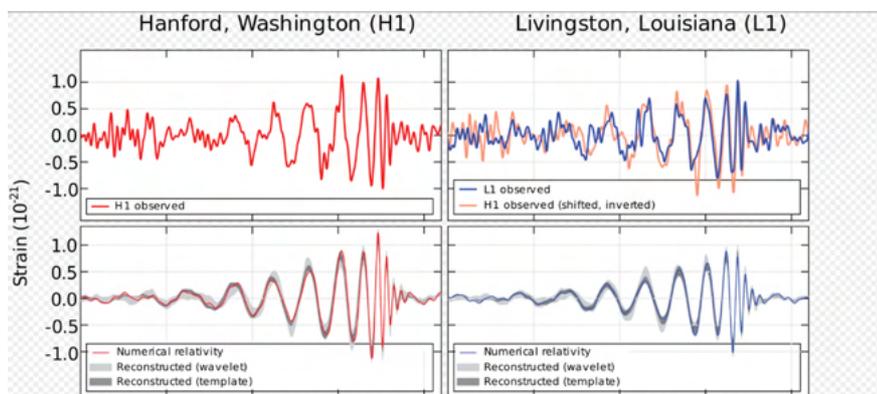
Esistono, poi, galassie la cui storia deve essere stata molto diversa da quella della Via Lattea. Il Buco nero nel loro centro è enormemente più *pesante* e vorace: in qualche caso si parla di masse che superano miliardi di volte, fino a una decina e forse più, quella del Sole, proprio come M 87 di cui vi ho mostrato la "foto" poco fa.

In casi del genere, apriti cielo (cioè: *chiuditi cielo* nel senso più letterale del termine)! Tutto quel che si trova nelle vicinanze di un mostro del genere, si tratti di stelle o di nubi di polvere e gas, è disintegrato e fagocitato, ruotando a spirale sempre più stretta attorno alla superficie di Schwarzschild, con velocità che si avvicina a quella della luce. In questo processo, la materia ionizzata genera correnti elettriche al di fuori della nostra capacità d'intendere, e queste, a loro volta, producono campi magnetici che catturano altra materia ionizzata, e la scaraventano verso i poli magnetici di questa catastrofe cosmica, accelerandola ben più di quanto si possa fare nel più potente acceleratore di particelle sul nostro pianeta.

Questa materia ha una storia tutta sua particolare, e genera oggetti astronomici davvero peculiari. Espulsa verso l'esterno a velocità prossima a quella della luce, essa produce spettacolari *getti* luminosi che raggiungono distanze di **10.000** anni-luce e anche più rispetto al Buco nero che li ha generati. Fasci ionizzati del genere si manifestano in modo cospicuo in un certo numero di galassie anche non troppo distanti, e ci viene da pensare che, in ammassi di stelle così sfortunati da possedere, al proprio centro, una vera e propria imboccatura verso l'inferno avente qualche miliardo di chilometri di raggio, le radiazioni **X** e  $\gamma$ , ma perfino quelle

particellari, sterilizzano periodicamente le superfici di eventuali pianeti. Brutto posto per programmarci una vacanza, ma bello da fotografare, specie con i telescopi spaziali!

Eppure, i signori fisici non si accontentano ancora. Loro vogliono la *prova definitiva* dell'esistenza dei Buchi neri. Accontentiamoli. Nel 2014, l'esperimento **LIGO** rivelò per la



prima volta un *treno di onde gravitazionali*, vale a dire una fluttuazione delle lunghezze dei rami di un lunghissimo spettroscopio (per modo di dire), e la corrispondente fluttuazione nei tempi di percorrenza dei rami stessi, mostrato in Figura 10.5, proveniente da due Buchi neri

**Figura 10.5**

piuttosto grandicelli (circa **30 e 25  $M_{\odot}$** ) – sopra si vede il segnale acquisito, sotto il corrispondente segnale atteso secondo la Relatività generale – che, dopo aver ruotato l'uno attorno all'altro con frequenza sempre crescente, finalmente sono precipitati l'uno nell'altro dando luogo a un buco nero rotante unico, e a una gran quantità di energia dispersa proprio in onde gravitazionali. Come abbiamo già accennato in precedenza. Poco tempo più tardi, fu rivelato un secondo evento. Ora, le rivelazioni sono all'ordine del giorno ed è ufficialmente nata l'astronomia dei Buchi neri (a proposito: non ho detto che si tratta, almeno finora, di oggetti sempre molto lontani, in galassie esterne) e la Relatività generale – la cui esattezza è stata verificata grazie a una quantità di misure astronomiche fino a una precisione strabiliante – consente di calcolare forma, ampiezza e durata di questi treni di onde. Stavolta non c'è santi che tenga: si tratta proprio del *“merge”* di due Buchi neri o, molto saltuariamente, di un buco nero e una stella di neutroni che, scaraventando via materia, consente anche di individuare grazie a potenti telescopi l'evento, e a trarne una gran quantità d'informazioni.

## 10.4) – Avviciniamoci all’“orizzonte degli eventi”

Ebbene: è proprio attorno a uno di questi mostri giganti, possibilmente in un intervallo di quiete, mentre non sta divorando nulla, che ci porterà la fantasia in questa sezione che precede il tuffo nel baratro vero e proprio. I giochini sono finiti: è tempo di fare le cose sul serio se vogliamo intendere meglio le previsioni della Relatività generale.

È pure il momento di affinare un po’ il nostro linguaggio, e non solo per problemi formali. Fino a questo punto, abbiamo usato indifferentemente la dizione “Buco nero” e quella “Superficie di Schwarzschild”. Andava bene finché eravamo lontani dal mostro, ma ora bisogna liberarci da questa imprecisione. La superficie, infatti, è quello che dice il nome stesso: una *superficie* e basta, quindi *bidimensionale*. Il Buco nero, all’opposto, lo definiremo come *tutto quel che c’è all’interno* ma attenzione: *inclusa la superficie stessa*. Un volume, quindi, che comprende il proprio bordo. Se ci siamo capiti, possiamo cominciare a dedicare le nostre attenzioni alla superficie; quel che c’è dentro lo scopriremo nella prossima sezione.

Ricordate quanto affermato in sezione 3.3 in merito al “bordo” dell’UC? Avevamo parlato di un *orizzonte*, inteso come la distanza massima dalla quale, dal momento del Big Bang e fino a oggi, è per noi possibile ricevere informazioni di qualsiasi genere, a causa della limitatezza, vuoi dell’età dell’universo, vuoi della velocità della luce. Anche attorno a un Buco nero incappiamo in un nuovo tipo di *orizzonte*: la superficie di Schwarzschild, infatti, è definita più propriamente l’*orizzonte degli eventi*. Spieghiamo.

Finora abbiamo visualizzato la curvatura del tempo come l’accelerazione con cui è risucchiato lo spazio. In particolare, la familiarissima accelerazione di gravità. Il punto importante già sollevato in precedenza, da ricordare ora e per il futuro, è che la Relatività generale non prevede alcun limite per la “*velocità*” tra virgolette che lo spazio può raggiungere, sotto l’effetto di questo risucchio accelerato via via che si avvicina al centro del Buco nero. Nel caso dell’espansione dell’universo, nulla vieta che questa *velocità equivalente* (attenzione all’uso del termine: ricordate la triste storia dei due pianimali innamorati?) salga fino all’infinito. Di conseguenza, attorno a una concentrazione puntiforme di massa come quella ipotizzata da Schwarzschild, lo spazio può trovarsi a cadere verso il centro a *velocità superiore a quella della luce*. E qui s’impone un breve inciso.

Cos’è una *velocità*? Un rapporto roseo tra due parole: spazio e tempo, direbbe il Cavaliere di Bergerac. E, in linea di massima, avrebbe ragione. Perfino in Relatività speciale il significato si è mantenuto, anche se abbiamo dovuto ingarbugliare un po’ spazio e tempo rimescolandoli tra loro. In Relatività generale le cose, purtroppo, si fanno più complicate. Come si fa a misurare una velocità, se è lo spazio stesso che si muove (almeno secondo il modellino di curvatura del tempo cui ci siamo tenuti stretti)? Bene; tornando all’esempio del salmone che nuota contro corrente, non ci sembra più troppo strano che il moto dello spazio possa raggiungere *velocità qualsiasi* visto che, per dirla breve, *lo spazio si porta appresso se stesso*, ma è una frase molto generica, e si può essere un tantino più precisi, sia sul piano intellettuale, sia su quello quantitativo.

“*Numquam nega, raro adfirma, distingue frequenter*” dicevano i filosofi Scolastici e, in particolare, raccomandava ai suoi Sant’Ignazio di Loyola. Si tratta di una regola del tutto generale cui farebbero bene ad attenersi pure i fisici che si divertono a cimentarsi nell’arte

della divulgazione. In questo caso, insisterò sulla parte del motto: “*Distingue frequenter*”, e cioè riproporrò al lettore la distinzione tra due generi diversi di velocità; quella Dello *spazio in sé*, e quella di *un oggetto che viaggia attraverso lo spazio*. La nostra pratica intuitiva del mondo di ogni giorno ci induce a trovare familiare la seconda delle due, ma abbiamo già cominciato a maneggiare un po’ anche la prima.

Per tornarci sopra restando su qualcosa di ancora abituale, eseguiamo un semplice esperimento, e stavolta possiamo farlo sul serio, non solo col pensiero. *Appoggiamo* il telefono cellulare, il palmare... sapete di cosa parlo, no? Dicevo: *appoggiamolo a mezz’aria* davanti a noi. Abbiamo appreso nel capitolo 10 che, se l’operazione è eseguita con delicatezza, avendo l’avvertenza di non imprimere noi stessi una velocità spuria all’oggetto, questo rimarrà *fermo* nel suo volumetto di spazio. Potete stare tranquilli, dunque: insisto su quel “*fermo*”, fidatevi!

Ebbene: nella curvatura temporale esercitata dalla Terra, non già il cellulare, ma piuttosto il *volumetto di spazio che lo contiene* sarà accelerato verso il centro del nostro pianeta, e così *anche l’oggetto che vi abbiamo depositato, perché quest’ultimo è “fermo” rispetto allo spazio*. La separazione inevitabile tra il volumetto di spazio e l’oggetto in esso contenuto avrà luogo solo quando l’oggetto toccherà il pavimento, perché lo spazio proseguirà nella sua discesa verso gl’inferi, mentre il cellulare andrà in pezzi. Abbiamo già visto che, se la separazione avrà luogo dopo un secondo, la velocità del cellulare sarà di circa 10 m/s, e questa sarà anche la velocità dello spazio in cui esso si trova. Ci siamo rinfrescati le idee col concetto di *velocità di caduta dello spazio?*

Avendo chiarito di nuovo il punto saliente, e per tornare alle vicinanze del Buco nero, sarà necessario definire un punto fisso di riferimento. In fin dei conti, ogni velocità è sempre relativa a qualcosa, no? E dunque, bisogna riferirsi a un osservatore *imparziale* che si trovi a grande distanza dall’orizzonte degli eventi che stiamo per definire. Egli sarà in grado di valutare – attenzione: non chiedetemi come, altrimenti le cose si complicano; per il momento diciamo solo che non va bene la divinazione con i tarocchi, ma occorrono calcoli general – relativistici – la *velocità di caduta dello spazio in quanto tale* in ogni punto nei suoi dintorni. Quell’osservatore, detto per inciso, potremmo essere proprio noi a bordo di un’astronave, d’accordo?

E perciò, eccoci qui mentre orbitiamo sulla nostra astronave, a una distanza di sicurezza il cui valore non ci riguarda poi troppo (diciamo numerose centinaia di volte il raggio di Schwarzschild  $R$ ), attorno a un Buco nero da un miliardo di  $M_{\odot}$ . In fin dei conti, ce ne sono tanti: se ne trovano anche di più grandi al centro di ogni *galassia attiva*, intendendo con questo nome una galassia che mostra variazioni di luminosità molto rapide al proprio centro. Ne abbiamo parlato poco fa, no? Scegliamone dunque uno e avviciniamoci.

Per avere un quadro *pulito* della situazione, solo due condizioni devono essere soddisfatte: la prima l’abbiamo già detta all’inizio di questa sezione, e cioè che i nostri esperimenti non siano disturbati da materia che piove incessantemente da ogni parte; la seconda, è che il Buco nero non sia in rapidissima rotazione. Capiremo poi perché. Ora, però, fate molta attenzione e ricordate quanto segue: il nostro primo esperimento consiste nel lasciar cadere dall’astronave un orologio con attaccata una lampadina led a luce bianca. Orologio e lampadina che ne illumina il quadrante, d’accordo?

Per quanto abbiamo finora inteso di Relatività generale, il Buco nero succhierà spazio a non finire, e lo farà accelerare via via che quest'ultimo si avvicina al centro, laddove la **velocità di aspirazione** raggiunge, teoricamente, l'infinito. Ancora non consideriamo questo caso estremo, però. Concentriamoci su quel che avviene un po' più lontano laddove, a un certo punto, la velocità con cui lo spazio è risucchiato diventa pari a quella della luce.

Già sappiamo che Laplace direbbe che questo particolare punto – anzi: questa superficie sferica attorno al centro del Buco nero –, rappresenta l'**orizzonte** di visibilità, poiché la luce non può sfuggire dagli strati più interni. In termini einsteiniani, immaginiamo perciò il fato di un raggio di luce che è emesso verso l'esterno del Buco nero, proprio nell'istante in cui la lampadina che lo emette (l'abbiamo lasciata cadere noi poco fa, ricordate?) sta attraversando l'**orizzonte**.

In primo luogo, il raggio di luce viaggia a velocità  $c$  – perché lo fa sempre e comunque – **attraverso** il volumetto di spazio in cui si trova. Di conseguenza lo stesso raggio tenta di risalire verso l'esterno. Per sua disgrazia, in quel preciso momento il volumetto di spazio si muove pure lui a velocità  $c$ , ma in direzione opposta. Come conclusione, il povero raggio di luce resta fermo, come **congelato**, rispetto a noi che, dall'astronave, cerchiamo di seguire le vicissitudini della lampadina. E il meccanismo prosegue in eterno: quel raggio seguita ad attraversare alla velocità della luce volumi di spazio che cadono giù alla sua stessa velocità. Insomma, quando ci si trova sulla superficie di Schwarzschild, dove lo spazio è risucchiato esattamente a  $v = c$ , perfino la luce stessa è inchiodata sul posto: riesce a non farsi ingoiare, ma non arriva a evadere.

Di conseguenza, Einstein e Laplace vanno d'accordo nel definire **orizzonte** la superficie di cui abbiamo trattato che, ovviamente, è proprio quella di Schwarzschild. Tutti gli eventi che hanno luogo **fuori** dell'orizzonte li possiamo **vedere** in senso stretto, perché la luce riesce a risalire strati di spazio che si muovono a velocità minore di  $c$ , ma se qualcosa avviene sotto quella superficie, nulla potremo mai saperne. Là dentro, la luce stessa sarà trascinata inesorabilmente verso il centro, giacché l'accelerazione progressiva degli strati di spazio ha condotto questi ultimi a superare la velocità  $c$ . E sappiamo che nulla può attraversare lo spazio a velocità maggiore. Dobbiamo pensare a questa zona come a una frazione di universo che si è definitivamente separata dal resto in tutti i sensi. Si può entrare, ma non più uscire.

Qualche lettore, che ha letto di corsa i paragrafi precedenti, può obiettare: «Un momento: nel capitolo scorso avevamo imparato che le velocità non si sommano; si compongono in modo tale che quella della luce resta sempre  $c$ . Come mai, ora, la luce è trascinata verso il basso come se la sua velocità si sommasse in modo semplice, galileiano, a quella dello spazio? Forse, lo spazio in sé non obbedisce alla Relatività speciale?».

Saltate i prossimi tre paragrafi se già avete capito il gioco. Col lettore disattento sarò paziente e gli risponderò con tutta tranquillità che la domanda potrebbe aver senso, anche se già in precedenza avevamo discusso il problema e suggerito la risposta giusta. Non fa male parlarne di nuovo, magari usando un vocabolario un po' diverso, per insistere su una delle differenze tra la Relatività speciale e quella generale.

La prima teoria afferma che, dato un certo volume di spazio, le velocità degli oggetti che lo attraversano (attenzione: il moto **attraverso** lo spazio!) si compongono tra loro secondo

le trasformazioni di Lorentz, e quindi *non si sommano in modo semplice*, galileiano, come suggerirebbe l'intuizione. Proprio da queste regole viene poi il limite  $c$ .

La seconda teoria *generalizza* questi precetti (non per niente si chiama *generale*) anche al moto dello *spazio in sé*. E le nuove direttive affermano proprio quanto sospettato dal lettore di poc'anzi: la velocità di un oggetto che si muove all'interno dello spazio si somma in modo semplice, galileiano, alla velocità dello spazio medesimo. Come un salmone (e cioè l'oggetto in moto attraverso lo spazio) che risale un corso d'acqua (lo spazio in movimento): la velocità del pesce rispetto a un osservatore su terraferma è la somma di quella del salmone e quella del torrente; tutto qui!

In questo luogo più che altrove, è indispensabile rammentare al lettore che ci muoviamo all'interno di *modelli* della realtà. Quest'ultima, essendo a *quattro dimensioni curve*, sfugge totalmente alla nostra intuizione. Un fisico rigoroso si limiterebbe alla matematica e affermerebbe: «Le equazioni, risolte in questo particolare caso, danno tale e tal altro risultato, per cui è *come se* il raggio di luce restasse fermo sull'orizzonte», ma a noi fa piacere gustare un pochino il *sapore* di quel che succede, no? E allora seguitiamo a dilettarci col modellino semplificato e *niente affatto canonico*. In fin dei conti, già ci ha dato una mano a intuire che, nello spazio che circonda un Buco nero, esiste un *orizzonte* da quale nulla può uscire, neanche la luce.

Se vogliamo rifarci all'analogia della pedana elastica deformata da molle, possiamo immaginare il Buco nero come un avvallamento di profondità infinita. A una certa profondità, finita e a distanza  $R$  dall'asse di questa voragine, esiste un cerchio che è proprio l'orizzonte. Il pianimale che malauguratamente cadesse nel pozzo, riuscirebbe a farsi strada faticosamente verso l'esterno solo se non avesse raggiunto l'orizzonte; superato quello, tutte le energie di questo mondo non sarebbero più sufficienti, e la povera bestia scivolerebbe giù senza salvezza.

Siamo così giunti all'orizzonte e, prima di seguire le vicissitudini di un oggetto che s'inoltra nelle profondità del Buco nero, fa mestieri tornare a esaminare l'esito dell'esperimento che avevamo intrapreso quando gettammo giù una lampadina, e assieme a quella pure un orologio. Ci verrebbe da pensare che, osservando da lontano dovremmo vedere gli oggetti che, avvicinandosi al Buco nero, accelerano sempre di più per finire ingoiati dall'orizzonte in un sol boccone.

Le cose, però, *appaiono* a noi in modo diverso. E adesso vi dico anzitutto quel che vedremmo, e poi perché. Giunta in prossimità dell'orizzonte, la lampadina comincerebbe a cambiare colore. Da bianca che era, la sua luce diventerebbe gialla, poi arancione, poi rossa, sempre più debole, e infine sembrerebbe spegnersi del tutto, ma uno strumento sensibilissimo si accorgerebbe che continua a emettere qualcosa nell'infrarosso, e poi sempre meno nelle microonde, nel radio... L'orologio, tanto per farci impazzire ancora di più, comincia ticchettare sempre più lentamente come se si stesse esaurendo la carica e, quando la lampadina che lo illumina lancia gli ultimi bagliori visibili, le lancette si starebbero completamente fermando.

Il peggio, però, non è ancora questo; ciò che va contro ogni nostra attesa, è che i due oggetti, anziché cadere sempre più celermente fino ad attraversare la superficie di Schwarzschild alla velocità della luce, rallentano via via come se si volessero *appoggiare delicatamente* sull'orizzonte per rimanere lì in eterno. Insomma: l'orizzonte appare a noi

come una superficie fisica *impenetrabile* su cui ogni *cosa* in senso lato si va a deporre, e ci resta per sempre. Santi numi: avevamo capito che da un Buco nero non può uscire nulla, e adesso ci sembra che nemmeno ci possa entrare nulla... come funziona questo paradosso?

Tutta questione di punti di vista e, se seguirete la spiegazione seguente con un po' di attenzione, anche questo stravolgimento di prospettiva diventerà chiaro, addirittura ovvio, e qualcuno dirà: «Già, ci potevo pensare da solo!».

Partiamo da una considerazione fondamentale: qual è il *vettore* per mezzo del quale noi siamo in grado di conoscere ciò che avviene dappertutto, nell'universo? La luce, ovviamente. Anzi; andiamo ancora più avanti su questa strada e affermiamo senza tema di smentite: «La luce ci permette di conoscere la "realtà", poiché abbiamo visto come tutta la Relatività ruota attorno a *c*. Non potendo esistere nulla di più veloce, non siamo in grado di identificare neppure in via teorica un metodo più efficiente di conoscere il mondo, che attraverso la luce stessa!». Ricordate il "*futuro assoluto*" di Unitagora in Figura 7,5? Quel concetto è la chiave di lettura di questo paragrafo.

E dunque: le informazioni su cosa avviene a un orologio che cade verso un Buco nero, a noi chi le porta? La luce della lampadina a esso vincolata. Ora attenzione: torniamo col pensiero alle difficoltà incontrate dalla luce in prossimità dell'orizzonte. Nuota all'insù con sempre maggiore fatica, ostacolata dagli strati di spazio che le piovono addosso a velocità crescente. Ecco spiegato, perciò, l'apparente cambiamento di colore della lampadina. Quella che riesce a giungere fino a noi, è luce che ha dovuto usare parte della sua energia per *risalire il pozzo gravitazionale* o, se preferite vedere le cose in altro modo, che finisce per essere *allungata* o *stiracchiata* dal risucchio spaziale. La lunghezza d'onda aumenta, e il colore tende sempre di più verso il rosso. Quando poi diventa infrarosso, radio eccetera, noi non siamo più in grado di vedere la lampadina.

E che dire del rallentamento del cronometro, e della velocità di caduta più in generale? Anche quelli sono effetti dovuti alla finitezza della velocità della luce. Quest'ultima, infatti, via via che nuota all'insù fra strati di spazio sempre più veloci, non solo spende energia, ma impiega sempre più tempo a risalirli e uscire dal pozzo di gravità. L'orologio sembra rallentare perché gli scatti successivi delle lancette hanno luogo in regioni in cui le velocità di caduta dello spazio sono sempre maggiori e, di conseguenza, la luce emessa tra uno scatto e l'altro impiega sempre più tempo a giungere fino a noi. Al punto che, quando la luce si *ferma* sull'orizzonte, anche la caduta degli oggetti sembra rallentare e bloccarsi sull'orizzonte, almeno per noi che ci troviamo a grande distanza.

Questo discorso va rimuginato e digerito, poiché vi è descritto qualcosa di diverso da una banale *illusione ottica*, come potrebbe sembrare a una lettura sbadata. Abbiamo scoperto un altro significato di *orizzonte*. Non solo questo ci impedisce di vedere cosa c'è oltre ma, per chi sta ben distante, la caduta di un oggetto fino all'orizzonte sembra durare un tempo infinito! Ovviamente gli oggetti *spariscono* lo stesso, e anche in un batter d'occhio, perché la luce impiega un attimo a raggiungere lunghezze d'onda oltre ogni nostra possibilità strumentale di rivelarle ma, finché riusciamo a vedere qualcosa, tutto sembra spiacciarsi sull'orizzonte. E, come anticipato poco fa, possiamo considerare tutto ciò un fatto di *sostanza*, più che di *apparenza*. L'unico tramite dell'informazione nell'universo è la luce, o comunque qualcosa che viaggia a velocità non superiore a *c* e, di conseguenza, quello che la luce porta fino a noi *è la realtà e basta*.

Insistiamo sull'ultima affermazione precedente. Di fatto, il concetto di *Relatività* nei dintorni immediati di un Buco nero è spinto a livelli *totali*. Esiste una vera e propria divaricazione tra la storia di un osservatore esterno, per il quale un Buco nero è *impenetrabile* nel senso sopra discusso, e quella di chi, invece, decida di tuffarsi dentro. Quest'ultimo, come stiamo per raccontare, non fa il minimo sforzo per attraversare l'orizzonte. I due *tempi* (di chi resta fuori e di chi entra) divergono e, all'orizzonte, in qualche modo si *perdono di vista* ma, come abbiamo imparato nel capitolo precedente, sebbene le cose siano percepite da prospettive radicalmente differenti, *hanno ragione entrambi gli osservatori!*

Ultima annotazione prima del tuffo, affinché il lettore possa mettersi l'animo in pace arrivando alla conclusione che, in ogni caso, quello che buttiamo nel Buco nero finisce *ingoiato* in senso stretto, e non si limita a fermarsi sull'orizzonte. Quando un oggetto cade *su* un Buco nero, la massa di quest'ultimo aumenta, e così pure cresce il suo raggio. Di conseguenza, è vero che l'orologio sembra adagiarsi sulla superficie di Schwarzschild, ma quest'ultima fa un passetto verso l'esterno poiché, alla massa del Buco nero, si è aggiunta quella dell'orologio. Se ci piace vedere le cose in questo modo, l'orologio finisce comunque *nel* Buco nero, e non soltanto *su* di esso.

Ormai abbiamo capito che, orbitando attorno a questo maledetto oggetto, più di tanto non possiamo sperimentare. Direi che è il caso di farsi coraggio e...

## 10.5) – ...e ora, dentro!

Alla domanda: «Qualcuno è mai riuscito a entrare in un Buco nero mentre un osservatore a lui collegato (via radio, per esempio) compiva misure da una distanza ravvicinata?», la risposta è ovviamente negativa. E dunque sorge un problema: se la fisica deve essere una scienza sperimentale, come facciamo ad avere la faccia tosta di affermare che sappiamo tante cose e, soprattutto, di raccontarle? Ebbene: come abbiamo appena visto nel paragrafo 10.4, qualche genere di *esperimento* in senso stretto sulla Relatività generale lo abbiamo eseguito, e anche di una precisione estrema. Non solo sul nostro pianeta, addirittura su oggetti celesti, e tanto basta perché la nostra fede nella teoria sia granitica.

Breve inciso: specialmente nella meccanica dei fluidi, s'incontrano situazioni descritte da *equazioni molto simili* a quelle della Relatività generale. Possiamo dunque sperimentare in laboratorio su *analoghi* dei Buchi neri e delle superfici di Schwarzschild. In tali casi, è consentito avventurarsi nei pressi di queste singolarità matematiche e fisiche, perfino infilarci *dentro*, e ovviamente gli esiti delle prove concordano con le nostre previsioni sui Buchi neri einsteiniani. Questo, però, è un altro discorso, e torniamo alle conferme dirette della Relatività.

Primo esempio: abbiamo spedito, su per una torre molto alta, un bel raggio di luce, e abbiamo verificato che, visto dalla cima della torre, questo si *arrossa* nel debole campo di gravità terrestre, proprio come previsto dalla Relatività (lampadina buttata sul Buco nero... ricordate?).

Secondo esempio: abbiamo costruito sistemi di navigazione satellitare (tipo GPS) laddove, se non si tenesse conto delle correzioni alle trasmissioni radio dovute alla curvatura dello spaziotempo (sì, anche dello spazio), le posizioni individuate sulla superficie terrestre sarebbero totalmente sbagliate.

Di più: satelliti costruiti ad hoc hanno misurato il *trascinamento dello spazio* attorno alla Terra dovuto alla rotazione del nostro pianeta. È buffo, no? Una massa che ruota induce in rotazione anche lo spazio nei suoi dintorni, e ci torneremo su alla fine di questo capitolo, perché è un argomento assai importante.

Passando al mondo stellare, abbiamo misurato con precisione estrema (un sacco di cifre decimali) le perturbazioni relativistiche al moto di stelle di neutroni – ciascuna delle quali molto vicina a cadere nel proprio orizzonte degli eventi – che orbitano l'una attorno all'altra. Mi spiego meglio: in analogia a come le cariche elettriche accelerate, per esempio, in LHC emettono luce (vale a dire onde elettromagnetiche) perdendo energia, anche le masse, se sono accelerate, devono emettere *onde gravitazionali* perdendo energia. Di conseguenza, due stelle che stiano orbitando vicinissime, sono costrette anche loro a irradiare onde gravitazionali e, nel processo, avvicinarsi l'una all'altra. Avviene puntualmente, decenni di osservazioni alla mano, come l'avvicinarsi del periastro di due pulsar “gemelle” orbitanti l'una attorno all'altra, mostrato il Figura 10.6. I punti sono le misure sperimentali. Meglio di così...

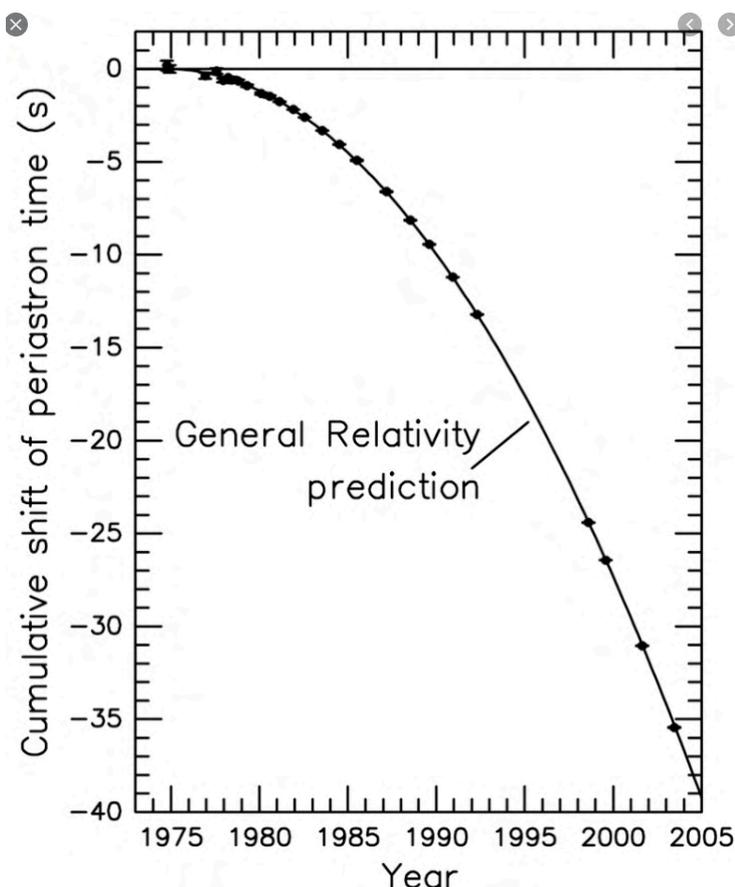


Figura 10.6

E poi, abbiamo finalmente osservato in maniera diretta le onde gravitazionali dovute alla coalescenza di due buchi neri. E “osservato” direttamente Buchi neri...

Potrei proseguire, ma la sostanza è la seguente. La Relatività generale è stata *sperimentata* non solo nel debolissimo campo gravitazionale terrestre (tralascio altre prove sull’orbita di Mercurio e così via), ma anche in condizioni di gravità come quelle che s’incontrano su una superficie di Schwarzschild. Confortati da questi successi della teoria, possiamo usare le sue previsioni come se fossero fatti concreti.

D’altronde, i fisici hanno idee precise su quale sia il punto in cui la Relatività smette – verosimilmente – di essere affidabile e, nel viaggio all’interno del Buco nero, segnaleremo

chiaramente questo limite. Se qualcuno volesse pignoleggiare, però... ebbene: non posso rimangiarmi quanto ho affermato in sezione 1.2, specie verso la fine, e perciò dispenso il pignolo dalla lettura. Se vuole non credere a quanto segue, passi al capitolo successivo: ne ha il diritto morale. Il diritto *intellettuale* un po’ meno.

Guidati dalla teoria, perciò, respiriamo forte, turiamoci il naso e tuffiamoci dall’astronave in verticale, a testa in su. Ora siamo proprio noi a viaggiare verso il Buco nero, sempre portandoci appresso lampadina a luce bianca e cronometro. All’inizio, tutto sembra procedere come in una normale caduta senza effetti relativistici: la lampadina bianca davanti ai nostri occhi è sempre bianca, l’orologio ticchetta con regolarità, e l’unica ragione grazie alla quale sappiamo di avvicinarci alla superficie di non ritorno è che, sotto di noi, vediamo un cerchio di cielo assolutamente buio, una macchia nera circondata da un alone di luce distorto dovuto alle stelle che fanno da sfondo.

Il disco buio si allarga sempre di più e, osservando con molta attenzione, ci accorgiamo pure che, oltre l’alone, perfino le costellazioni sembrano un po’ deformate. Infatti, la luce delle stelle, passando vicino ai bordi del Buco nero e giungendo ai nostri occhi, segue una traiettoria curva come abbiamo già notato in laboratorio. Una curva di cui l’*aureola* rappresenta il caso estremo.

In che modo riusciamo a sapere che stiamo attraversando l'orizzonte degli eventi? Poiché questo non ha per noi nulla di speciale, possiamo riuscirci solo **guardando fuori**: la zona oscura copre esattamente metà della volta celeste. Ecco: ora siamo dentro, e sappiamo di non poter più uscire. Pazienza: eseguiremo l'**esperimento finale**, proprio come dichiarò Feynman quando gli fu diagnosticato un tumore incurabile. Poiché aveva fin da giovane sperimentato sulle fasi del proprio addormentamento, disse che avrebbe sperimentato anche sulle fasi della propria morte. Peccato che non abbia potuto comunicare a nessuno gli esiti di un test così interessante... Perciò, mettiamoci l'animo in pace, e osserviamo quanto più possibile.

Ovviamente, ci viene l'idea di guardare verso il basso per tentare di scorgere il centro esatto del buco nero. Infatti, secondo la Relatività, tutta la materia deve essere concentrata proprio in quel punto, poiché non esistono forze in grado di mantenere in equilibrio alcuna struttura materiale o addirittura *energetica*.

Purtroppo, restiamo delusi. Il buio è fitto e non si vede un bel nulla. Invece, qualcos'altro ci colpisce: sempre osservando verso il basso, vedremo il resto del nostro corpo tanto più scuro quanto più guardiamo lontano. Le mani, all'altezza dei fianchi, si vedono in penombra rossastra; dalle ginocchia in giù, buio quasi completo. La luce è trasportata verso il centro sempre più velocemente dagli strati di spazio che accelerano (continuo a usare il modellino della curvatura del tempo come accelerazione di gravità, anche se qui bisognerebbe considerare anche la curvatura dello spazio), e già quella emessa dal nostro mento fatica un po' prima di raggiungere le pupille. Anzi: per la precisione, non le raggiungerebbe per nulla se, mentre la luce tenta di nuotare all'insù, le pupille stesse non accelerassero verso il basso.

Questo effetto è tanto più massiccio quanto più guardiamo in direzione verticale. L'orologio al polso, infatti, finché è tenuto all'altezza della vita sembra andare molto più lento di quanto dovrebbe. Se però alziamo il braccio e riportiamo l'orologio all'altezza degli occhi, ecco che il ticchettio si fa nuovamente rapido come ci aspettiamo e la luce torna a essere bianca. La spiegazione di questi fenomeni la conosciamo, è correlata al trascinarsi verso il basso dello spazio che la luce deve attraversare. E seguitiamo con altri esperimenti.

Ora, ci guardiamo indietro o, per meglio dire, verso l'alto da cui siamo caduti. Forse ci sembrerà strano, ma seguitiamo a vedere le stelle fuori del Buco nero, e l'astronave da cui ci siamo gettati. Solo che, penetrando verso le profondità del mostro, il cono all'interno del quale scorgiamo il cielo si restringe e si deforma sempre più.

Questo ci pare ragionevole perché, mentre eravamo ancora fuori, vedevamo un'area di buio che si dilatava sempre, raggiungeva la metà del cielo alla superficie di Schwarzschild e dunque, seguitando a dilatarsi, pian pianino ridurrà sempre di più il cono di visibilità esterna. E poi c'è un altro fatto che ci colpisce: le cose, là fuori, sembrano avvenire sempre più velocemente. Il grande orologio sulla pancia dell'astronave accelera: un'ora passa in pochi dei nostri minuti, poi in pochi secondi, poi... E perché?

Beh, è un po' il contrario dell'apparente rallentamento, visto dall'esterno, dell'orologio che cadeva sulla superficie del Buco nero. Nel caso in esame, la luce emessa in tempi sempre successivi alla nostra caduta è catturata e trasportata verso di noi **più velocemente di  $c$** , perché proprio questo fa anche lo spazio che la trascina. Di conseguenza, vedremo le cose esterne accelerare e, soprattutto, la luce sarà più *energetica*. Il bianco dell'astronave virerà verso l'ultravioletto, e poi in raggi **X**, rischiando di friggerci in pochi istanti.

Per nostra fortuna (si fa sempre per dire) un problema ancor più grave ci conduce a miglior vita. Percepriamo una forza che tende a stirarci per lungo. Ricordate la Figura 10.2? Sì, è proprio la forza di *marea* la cui spiegazione, in termini relativistici, è la seguente.

Se, durante la caduta, manteniamo la posizione verticale, i nostri piedi si trovano più vicino al centro del Buco nero, la testa più lontano. E perciò, gli strati di spazio che si trovano in basso accelerano più rapidamente di quelli che si trovano in alto, e ciascuno strato si porta appresso gli oggetti che contiene. Di conseguenza, la parte inferiore del nostro corpo accelera più rapidamente della parte superiore, e percepriamo una forza che ci allunga.

Siamo destinati a una brutta fine: la forza cresce e, in prossimità del centro esatto del Buco nero, tende all'infinito. Il nostro corpo si spezza in due, poi in quattro, e così via. Più in giù si spezzano anche le cellule che ci componevano, quindi tocca alle molecole, agli atomi, ai nuclei atomici, e infine i protoni e neutroni si spezzano a loro volta nei loro costituenti fondamentali: i quark, come vedremo meglio nei capitoli successivi. È inevitabile: cadendo verso il centro, nessuna struttura materiale può sopravvivere.

Così abbiamo ricavato (a caro prezzo) un'informazione importante: che c'è dentro i Buchi neri? Il vuoto più assoluto, perché tutto quello che vi cade si disintegra e crolla sul centro esatto. E qui si pone il problema. Se diamo retta alla Relatività generale, cosa ci aspettiamo di trovare in questo centro esatto? Un punto materiale in cui si accumula tutto e che, quindi, ha densità infinita.

I fisici, però, quando si trovano di fronte a valori numerici che raggiungono l'infinito, storcono il naso. Ci deve essere qualcosa che non abbiamo ancora capito, e dunque l'opinione diffusa è che, vicinissimo al centro di un Buco nero, la Relatività generale cessa di descrivere correttamente il comportamento della natura. Occorrerà una nuova teoria che la generalizzi ancor più, possibilmente includendo anche gli effetti dovuti alla Meccanica Quantistica, prima che siamo in grado di avere ragionevoli certezze in merito alla struttura delle zone più centrali di un Buco nero. *Et de hoc satis*. Anche perché dobbiamo aggiungere nuove pennellate di colore all'interno di un Buco nero. Come dite? Che è nero? Ebbene: tutto è *più relativo* di quanto vi piaccia pensare, e se ci portiamo appresso un barattolo di vernice azzurra, chissà che a un certo punto non lo possiamo utilizzare?

## 10.6) – Non commettere errori già commessi

Riprendiamo il discorso: anche se ci sfuggono i dettagli di quanto avviene al centro esatto di un Buco nero, una volta passata la superficie di non ritorno il destino è segnato. Poiché, dall'orizzonte in giù, la velocità di trascinarsi dello spazio supera quella della luce, nulla e nessuno è in grado di percorrere un cammino a ritroso. Noi, e tutto ciò che ci portiamo appresso, acceleriamo verso il centro.

C'è però una domanda che ancora non ci siamo posti: è almeno lecito spostarsi lateralmente, oppure cadere più velocemente, o magari più lentamente? Bene: in una certa misura ciò è possibile. Se, per esempio, avessimo a disposizione potenti motori a razzo, potremmo accenderli, ed ecco che la nostra caduta si trasformerebbe. Con una spinta laterale, per esempio, da rettilinea che era, la traiettoria si trasformerebbe in un arco di spirale.

Non che questo sarebbe sufficiente a salvarci da una brutta fine ma, per quanto riguarda le equazioni della Relatività, esistono soluzioni che consentono di muoversi verso destra e verso sinistra; mai verso l'alto, ma per lo meno di cadere un po' più lentamente o un po' più velocemente. E tutto ciò ha risultati dirompenti per la logica e per il buon senso perché le stesse equazioni ci informano che, all'interno di un Buco nero, muoversi nello spazio comporta anche *spostarsi nel tempo!*

Ci possiamo chiedere: è solo un dettaglio accademico d'interesse per gli eruditi, tanto abbiamo già visto che, per chi sta fuori a guardare, non si percepisce nulla di questi giochini perversi e, comunque, anche il viaggiatore nel tempo è destinato ad annientarsi? Forse sì, forse no. Qui necessita ancor più pazienza da parte del lettore, poiché siamo arrivati a un punto in cui il semplice schema che identifica l'accelerazione di gravità con la curvatura del tempo fallisce del tutto.

La curvatura dello spazio, all'interno di un Buco nero, infatti, è poderosa: lo è talmente tanto, che non è più lecito ragionare come se fosse separabile da quella temporale e dunque, ormai, è inevitabile parlare di *curvatura dello spaziotempo* tutta intera. E questo può generare, almeno all'inizio, l'impressione di una confusione totale. Dovendo rinunciare alle equazioni cercheremo comunque di tenerci aggrappati all'intuizione, ma l'appiglio sarà debole, scivoloso e una buona quota di confusione resterà con noi per tutto il tragitto.

In quest'ottica, e con queste limitazioni e riserve intellettuali, cosa intendiamo con "*spostarsi nel tempo*"? Forse che, se fosse possibile a chi è stato inghiottito da un Buco nero riemergerne in qualche modo, costui avrebbe l'opportunità di farlo nel passato, rispetto al momento in cui ha attraversato l'orizzonte? In un tempo che, per chi fosse rimasto fuori a guardare dall'astronave, potrebbe essere *prima del tuffo*?

Lo ammetto: le equazioni ci dicono proprio qualcosa del genere, e concorderete con me che il verificarsi di un evento così irrazionale metterebbe in grosse difficoltà la fisica tutta intera (inclusa la Relatività). L'intrepido eroe che si fosse gettato nel Buco nero, emergendo nel proprio passato e sapendo quel che lo attende, farebbe ogni sforzo per *trattenere il proprio doppione più giovane* dal gettarvisi, e magari ci riuscirebbe. Se le cose andassero così, però, nessuno sarebbe finito nel Buco nero per *poi* emergerne *prima* e vivere un'esistenza in due copie. E allora?

Proviamo ad avanzare lentamente fra concetti che non solo *appaiono* contraddittori, ma **lo sono** a tutti gli effetti. Cercheremo anzitutto di rispondere alla prima, ovvia domanda: come si fa a viaggiare nel tempo dentro un Buco nero, spiegato in parole povere. Purtroppo, la risposta **vera** è celata nelle pieghe della curvatura dello spaziotempo, e sappiamo bene come l'intuizione sia particolarmente povera quando si trova alle prese con concetti del genere. In ogni caso potremo azzardare almeno una similitudine, anzi un paio. Cimentiamoci in quest'impresa quasi impossibile.

Introduciamo un'analogia che, fortunatamente, non è troppo campata per aria, ma riesce addirittura a mantenere un minimo appiglio con quel che affermano le equazioni. Abbiamo già ricordato come, avvicinandosi molto all'orizzonte degli eventi, le **storie temporali** di chi cade e di chi resta fuori cominciano a divergere, per "**poi**" seguire due tracciati diversi e incompatibili tra loro una volta attraversato l'orizzonte. Se siamo riusciti a non perderci nelle spiegazioni delle sezioni precedenti, è il momento di fare un salto di logica, e di riflettere un po' più approfonditamente su come percepiamo il *tempo*.

La nostra idea intuitiva del tempo è quella di un flusso che ci trascina tutti nella stessa direzione, e con la medesima velocità. I filosofi possono complicare quest'idea – nata dal buon senso quotidiano – a loro piacimento, ma noi sappiamo benissimo, per esperienza diretta, come non sia consentito a noi, e a nessuno, di **fermarsi** nel tempo, di **tornare indietro** o di **procedere più in fretta**, a parte le complicazioni già introdotte dalla Relatività speciale e che, al momento, non prenderemo in considerazione.

Riusciamo a convenire su questa **descrizione funzionale** del tempo, che non si pone per nulla il problema di **cosa sia il tempo in sé**?

Ora torniamo alla caduta dentro il Buco nero: poiché la velocità di *caduta libera* dello spazio verso il centro supera ormai quella della luce, lo spazio stesso diventa un flusso che ci trascina tutti nella stessa direzione, e con la medesima velocità, almeno istante per istante.

Il lettore accorto già ha inteso dove vado a parare. Quella che, all'esterno del Buco nero sembrava essere la caratteristica tipica del tempo (un flusso che ci trascina tutti ecc.), sotto la superficie di Schwarzschild è ora una caratteristica dello spazio. E di conseguenza (non tirate per il collo questo modellino, perché è più fragile di una ballerina in vetro soffiato di Murano), mentre in condizioni normali non possiamo spostarci nel tempo, ma nello spazio ci è lecito qualsiasi movimento, dentro un Buco nero non possiamo spostarci nello spazio (o, per meglio dire, possiamo spostarci *di poco*), ma **diventa lecito muoversi nel tempo**.

La seconda analogia, forse coglie un po' di più lo spirito della Relatività, ma è ancora più debole della prima e, per giunta, richiede un nuovo sforzo d'intuizione. Siamo dentro il Buco nero e cadiamo assieme a tutto ciò che è entrato con noi. Un momento, però: se, col solito motore a razzo potentissimo, noi ci spostassimo un po' più in avanti rispetto alla posizione occupata – e questo è teoricamente lecito – finiremmo per catturare la luce che è entrata **prima** che noi attraversassimo la superficie di non ritorno. Quella luce, infatti, nuota a ritroso nello spazio che precipita, e se noi non le corressimo incontro, non riuscirebbe mai a raggiungerci.

Qui è il punto cruciale, che abbiamo già incontrato in precedenza, e che ora ripetiamo: la *realtà* è quella definita dalla luce che giunge ai nostri occhi. Questo ci è stato insegnato dalla Relatività speciale, e perfino ora, dentro il Buco nero, il concetto non viene a cadere. Al più andrà generalizzato, ma l'idea fondamentale resta: **quel che vediamo è quel che succede**

e quindi, se abbiamo catturato la luce che è stata risucchiata *prima* del nostro ingresso nel Buco nero, ci siamo spostati nel tempo a *prima che entrassimo noi*, e cioè nel nostro passato. E qui basta con le analogie, perché sento di muovermi come il proverbiale elefante nel negozio di cristalleria, e sto per appoggiare la zampa sulla ballerina.

Stando così le cose, i Buchi neri potrebbero essere vere e proprie macchine del tempo? Come si fa a evitare che avvengano paradossi logici? In fin dei conti, non farebbe piacere a nessuno di noi se qualche malintenzionato viaggiasse all'indietro nel tempo e uccidesse i nostri genitori prima della nostra nascita, no?

Ebbene: non serve grande scienza per tranquillizzarsi subito. La risposta sembra banale: chi sta dentro può aggirarsi per i meandri del tempo quanto gli piace, ma tanto è destinato a disintegrarsi nel centro del Buco nero, e siccome Superman non verrà a salvarlo non potrà in alcun modo uscirne a combinare disastri. A questa semplice considerazione è stato assegnato il nome quanto mai appropriato di "*Censura cosmica*".

Siete dunque ragionevolmente convinti che un Buco nero non possa essere utilizzato come macchina del tempo? Beati voi! Magari fosse così facile.

C'è un ultimo frammento della Relatività generale di cui non posso evitare di far cenno, e anzi l'ho già introdotto di sfuggita poc'anzi, nella sezione scorsa: la rotazione. Infatti, sappiamo che nell'universo, in pratica, non c'è nulla che non ruoti. Dalle galassie alle stelle, dai pianeti ai satelliti e, saltando agli oggetti microscopici, dalle molecole agli atomi, dai nuclei alle particelle elementari, ogni oggetto possiede rotazione.

Così, è certo oltre ogni dubbio che la stella da cui ha avuto origine il Buco nero ruotasse, e anzi: sono proprio quelle le stelle che ruotano più velocemente. Ora, esiste una legge fondamentale della fisica che consente di affermare che la *rotazione* in senso lato, e in particolare quella stellare, è sempre conservata, e dunque una bella frazione deve per forza andarne a finire nel Buco nero, che girerà come un pazzo. E non basta: se ciò avviene in un sistema binario, il mostro finirà per divorare gli strati esterni della stella che lo accompagna, che girano pure loro, per cui la rotazione di alcuni buchi neri può addirittura aumentare nel tempo. Dove ci conduce tutto ciò?

Alla seguente precisazione. Una massa in rotazione, non si limita a succhiare lo spazio, ma agisce come se nei suoi dintorni esistesse una sorta di *attrito cosmico*, un *Maelstrom spaziale* che fa ruotare sempre più vertiginosamente anche lo spaziotempo nei suoi dintorni. E, all'interno del Buco nero, questa rotazione cresce via via che lo spazio si avvicina al centro finché...

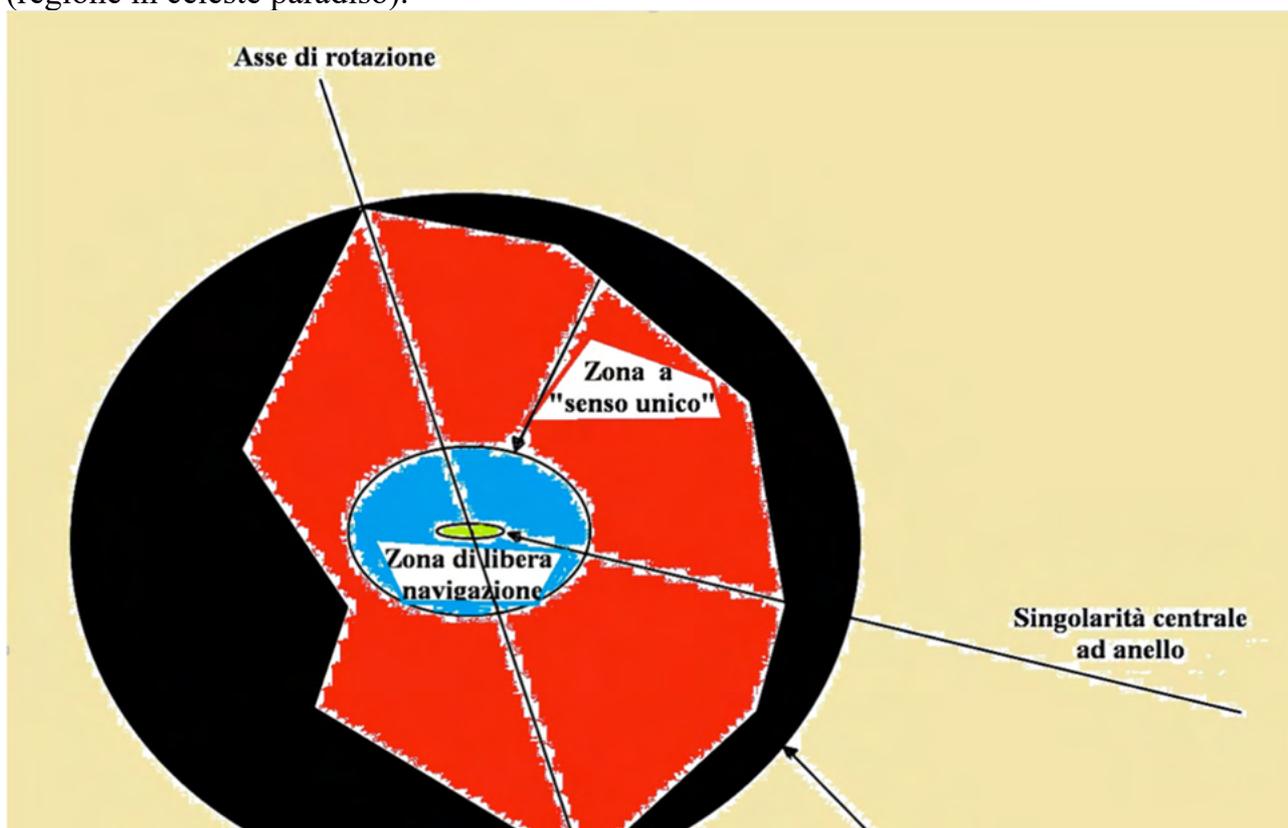
Pure in questo caso, il lettore sarà costretto a contentarsi di giocherellare con un modello intuitivo molto casereccio. E anzi: deve in primo luogo promettermi – già in passato gli ho chiesto d'impegnarsi sul suo onore a non divulgare nulla sui miei modellini da caserma – che non ne parlerà con nessuno, perché mi vergogno io stesso del linguaggio che sto per usare.

Tant'è: forse sarà utile a farci capire qualcosa, e dunque richiameremo in servizio permanente effettivo la cosiddetta "*Forza centrifuga*". Proprio quella che, in un classico gioco da spiaggia, permette all'acqua di restare in un secchiello anche quando quest'ultimo è capovolto, a patto che si leghi con una corda robusta e si faccia ruotare rapidamente.

Che cosa fa, all'interno di un Buco nero, la forza centrifuga? Presto detto: poiché *tira verso l'esterno*, si mette in contrasto con la *forza di gravità* (che Einstein mi perdoni e non

mi strafulmini!). Per di più, il contrasto cresce così rapidamente scendendo in profondità, che all'interno di un Buco nero ruotante si forma un piccolo volume ellissoidale, proprio attorno al punto centrale, dove l'effetto della forza centrifuga riesce a bilanciare, e poi *superare*, la gravità stessa: un volume in cui un oggetto potrebbe, sempre usando il solito razzo, rallentare e fermare la propria caduta, e addirittura tornare un po' indietro.

Stando così le cose, un Buco nero stellare o galattico avrà una struttura a doppio strato. Appena superata la superficie (nera) di Schwarzschild, troveremo una regione (Figura 10.7, in colore rosso inferno) in cui lo spazio cade in modo accelerato, più veloce della luce, e in questa regione non si può tornare indietro. Più in profondità attraverseremo un'altra superficie, che talvolta è identificata col nome di Kerr-Newman dai due scienziati che per primi se ne sono occupati, oltrepassata la quale si riacquista una certa libertà di movimento (regione in celeste paradiso).



**Figura 10.7**

Qui esiste la possibilità di viaggiare nel tempo a piacere, senza essere condannati a disintegrarsi sul punto centrale. Il quale, tra l'altro, sempre per forza centrifuga *non è più un punto e basta, ma si trasforma in un anello*. Addirittura, si può passare attraverso il centro di quest'anello senza essere annientati. Dal punto di vista dell'eventuale viaggiatore, navigare in questa zona sarebbe un normale muoversi nello spazio sotto l'azione di razzi. Solo se potesse uscire dalla superficie di Schwarzschild si accorgerebbe che là fuori c'è qualche pasticcio temporale, e lui si trova nel passato o nel futuro rispetto all'istante della sua immersione.

Per nostra fortuna, comunque, ancora gli servirebbero superpoteri per riuscire in un'impresa del genere. Infatti, attraversando verso l'esterno la superficie di Kerr-Newman, ancora dovrebbe nuotare *contro mano* nella zona esterna del Buco nero, quella in rosso che, invece, sappiamo essere *a senso unico*. Ciò vuol dire che possiamo dormire sonni tranquilli... o no?

Chissà? Qualche incubo può ancora intervenire a turbare le nostre evasioni oniriche. Esiste, almeno sul piano matematico, una possibilità estrema, però stavolta non sembra trattarsi di una forzatura della teoria, anzi! Quel che vado a raccontarvi è un risultato *semplice* sia dal punto di vista della soluzione delle equazioni, sia da quello intuitivo. Vale a dire: non stiamo tirando il collo alla Relatività come avviene nelle zone centrali di un Buco nero; qui stiamo trattando regioni esterne, in cui non c'è motivo di dubitare della teoria.

Si tratta di quanto segue. Crescendo via via la rotazione, la regione interna alla superficie di Kerr-Newman in cui si può manovrare, tornare indietro e viaggiare nel tempo, si dilata, e fin qui non dovremmo avere difficoltà concettuali: se aumenta la *forza centrifuga*, s'ingrandisce pure la regione in cui quest'ultima è in grado di contrastare efficacemente la *forza di gravità*.

Il guaio (grosso) è che, oltre un certo limite di rotazione, questa *zona di libera navigazione* si dilata fino a inglobare la superficie di Schwarzschild, e *perfino zone più esterne*. Di conseguenza, se un viaggiatore potesse avvicinarsi abbastanza alle regioni del Buco nero dove il viaggio nel tempo diventa realtà, avrebbe agio di sguazzare a piacere nel passato e nel futuro e poi, dacché i signori Kerr e Newman gli consentono di veleggiarsene via verso l'esterno, se ne potrebbe tornare nell'universo normale, ma "*quando*"?

Quest'idea infastidisce i fisici, poiché la scienza si costruisce per mezzo della logica e quest'ultima verrebbe a cadere se si invertisse il principio di causalità, come per l'appunto accadrebbe nel caso di un viaggio all'indietro nel tempo, potendo poi uscire dai dintorni del Buco nero e combinare birbonerie nel passato dell'universo. Per questo motivo, in molti hanno cercato di dimostrare matematicamente che, prima di giungere a tanto, si dovrebbero verificare altri eventi (il malvagio demolitore del nostro sereno passato sarebbe forse annientato dalla forza centrifuga, anziché da quella di gravità?), in conseguenza dei quali la violazione della causalità sarebbe evitata in calcio d'angolo.

Bisogna però ammettere che, finora, la Relatività ha sempre retto molto bene anche in situazioni di curvatura spaziotemporale davvero intensa (ricordate le osservazioni di stelle di neutroni o Buchi neri che orbitano l'uno attorno all'altro, e le onde gravitazionali delle quali abbiamo accennato in precedenza?), e la possibilità che un Buco nero in forte rotazione sia compatibile con l'esistenza di una macchina del tempo, pare ormai essere entrata nel panorama della fisica.

Anche perché *sembrerebbe* (il condizionale, stavolta, è d'obbligo) esserci un trucco: per una macchina del tempo basata sui principi della Relatività, non sarebbe possibile viaggiare all'indietro nel tempo *fino a prima dell'entrata in funzione della macchina stessa!*

E cioè: se domattina alle otto in punto si accendesse per la prima volta una macchina del genere, gli intrepidi viaggiatori non potrebbero comunque tornare indietro prima di domattina alle otto. Chi entrasse nella macchina tra mille anni potrebbe fare un bel viaggio all'indietro e tornare nella nostra epoca (portandoci un elenco delle prossime estrazioni del Lotto), ma chi vi entrasse subito, appena acceso l'ordigno infernale, al massimo ne uscirebbe

un istante prima di entrarvi. Sempre un concetto che ci disturba un po' ma in fin dei conti, sperando che nessuno abbia ancora inventato una macchina del tempo funzionante, possiamo sentirci un po' più tranquilli in merito a eventuali incursioni dal futuro. Oggi come oggi, queste ultime sono impossibili.

Finisce qui la storia sui viaggi nel tempo? Forse, ma forse no. Esiste un enunciato che piace molto ai fisici, e prende il nome di: "Principio totalitario della fisica". Esso afferma: «**Tutto ciò che non è vietato, è obbligatorio**». Ad alcuni piace metterlo in tono più *morbido*, ma il concetto resta quello. L'idea è venuta fuori pian piano, riscontrando che Madre natura, almeno finora, ha sempre mostrato molta più fantasia di quella dei fisici e non solo: perfino degli scrittori di fantascienza.

Infatti, spessissimo, nel corso del progresso scientifico, abbiamo sbattuto il naso contro fenomeni a dir poco inattesi, a volte giudicati impossibili di primo acchito. Solo dopo, grazie a un lavoro capillare si è finalmente capito che si trattava di casi altamente improbabili, ma non rigorosamente vietati dalle stesse leggi di natura.

E perciò chiediamoci: cosa avviene al centro di galassie in cui il Buco nero ha una massa pari a miliardi di volte quella del Sole, ed è in rotazione vorticoso? Non ci sarà, in quel luogo, una violazione della *censura cosmica*? E una razza di esseri intelligenti molto più antica di noi non sarà stata in grado di avvalersene per i propri scopi che, magari, includono anche escursioni nel *nostro* passato? O, più modestamente, in qualche Buco nero, magari uno di quelli che restano come residui di supernove nei nostri dintorni, non entreranno *poi* particelle che usciranno *prima*, confondendo irrimediabilmente gli astronomi che le stanno osservando?

Per gli scopi di questo libro, l'illustrazione delle due Relatività è ormai sufficiente. È stato indispensabile dedicare loro molto spazio (*spaziotempo*, direi, se mi consentite un volgarissimo gioco di parole), giungendo perfino a entrare nei Buchi neri, affinché il lettore prendesse familiarità con i due fenomeni fisici diversi di spostamento *attraverso* lo spazio, e movimento *assieme allo* spazio. Infatti, queste sono le due colonne d'Ercole attraverso le quali è necessario transitare se vogliamo che il nostro Modello d'universo esca da un mare chiuso e prenda i venti nell'oceano. A un certo punto parleremo nuovamente di Relatività, e... vedremo!

# 11) – Di nuovo il Modello d’universo

## 11.1) – Il Big Bang è stato come una bomba?

Ora che siamo (ragionevolmente) ferrati nella Relatività generale possiamo tornare al capitolo 8, dove abbiamo già concluso che l’universo deve essere nato da un Big Bang, ma non abbiamo spiegato cosa sia stato quest’ultimo evento. Né ancora lo faremo nel presente capitolo, rinviando una discussione delle fasi della *creazione* in minuscolo alla Sezione IV, quando avremo preso qualche familiarità con la Meccanica Quantistica. Qui, però, cominceremo a girare un po’ intorno alle *conseguenze* del Big Bang, e la risposta alla domanda nel titolo di questa sezione dipende dal senso che diamo al concetto di *esplosione*.

Molti di noi, fortunatamente, non hanno esperienza diretta con lo scoppio di bombe, ma neppure hanno difficoltà concettuali a immaginarne una. Esiste un oggetto che occupa una posizione ben definita nello spazio e che, terminato il conteggio alla rovescia senza che nessuno sia riuscito a trancare il cavetto rosso, va in frantumi con violenza. Nello scoppio, scaraventa i suoi frammenti tutt’intorno ad alta velocità, e con effetti distruttivi, su eventuali altri oggetti che occupino posizioni non distanti nello spazio.

È in questo modo che dobbiamo intendere anche l’esplosione del Big Bang? Ovverosia: tutta la materia esistente era all’inizio condensata in un punto (l’*atomo primigenio* di Lemaitre) e le schegge scagliate via nello spazio circostante sono le galassie, o lo sono divenute al passare del tempo? In parte sì, in parte no: a questo quadro manca una precisazione molto importante.

In base ai calcoli dello stesso Lemaitre, lo spazio e il tempo “*fuori*” e “*prima*” del Big Bang non esistevano proprio! Questo è il modello mentale col quale dobbiamo prendere confidenza. Già sappiamo come Einstein respingesse inizialmente questi risultati, commettendo uno dei suoi classici errori di pregiudizio (ne vedremo altri nella Sezione III, e ce ne sono anche di un acume eccezionale, che hanno segnato il seguito della scienza fino a oggi), e solo alcuni anni dopo fu costretto ad accettarli come la più ovvia delle soluzioni cosmologiche della Relatività.

Cos’è stato dunque il Big Bang in quest’ottica? La risposta può sembrare esoterica, ma dobbiamo digerirla prima di andare avanti: il Big Bang è stato lo *srotolarsi istantaneo di tutto lo spaziotempo*. E ovviamente ogni volumetto di spazio, seguitando a espandersi senza tregua, si è portato appresso la materia in esso contenuta: materia che, al passare degli eoni, si è aggregata in galassie e ammassi di galassie, dando origine all’universo come lo vediamo noi oggi, **13,77** ( $\pm 40$  milioni di anni, mi dicono stamane, ma sono cifre sempre aggiustabili) miliardi di anni dopo.

Qui pure ci sarebbe da chiedersi: «Ammesso e non concesso, ma c’è una differenza sostanziale tra le due raffigurazioni (un’esplosione *nello* spazio o un’esplosione *dello* spazio), oppure si tratta di un nuovo bizantinismo per eruditi?». Accidenti se c’è differenza! Anzi: una differenza *infinita*, come stiamo per constatare.

Andiamo per gradi. Spesso, durante le conferenze su questi argomenti, mi sento porre domande del tipo: «Dove è avvenuto il Big Bang?». Semplicissimo: *dovunque*. Qualsiasi punto dello spazio era, all'inizio, *dentro* il Big Bang o, se preferite, coincideva con il punto in cui ha avuto luogo il Big Bang stesso. Sebbene i vari punti di spazio si siano poi allontanati tra loro, e adesso non coincidano più, ciò non vuol dire che un luogo in particolare abbia maggior titolo degli altri a rivendicare: «Io sono il sito esatto del Big Bang». Possiamo affermare che era qui, certo, ma era anche lì, e laggiù, con ugual diritto.

Per esempio, il lettore è particolarmente fortunato poiché, assieme a questo libro, ha acquisito anche il segno d'interpunzione al termine di questa frase – che metterò per ossequio tra parentesi – poiché il Big Bang si è verificato esattamente al suo centro geometrico  $\{(\cdot)\}$ . Però, lo stesso Big Bang ha pure avuto luogo sul bordo Nordest della grande macchia rossa che adorna il pianeta Giove e, guardando la seconda stella a destra (e poi dritto fino al mattino), diecimila miliardi di miliardi di miliardi di anni luce più lontano, ben oltre i confini del nostro UC.

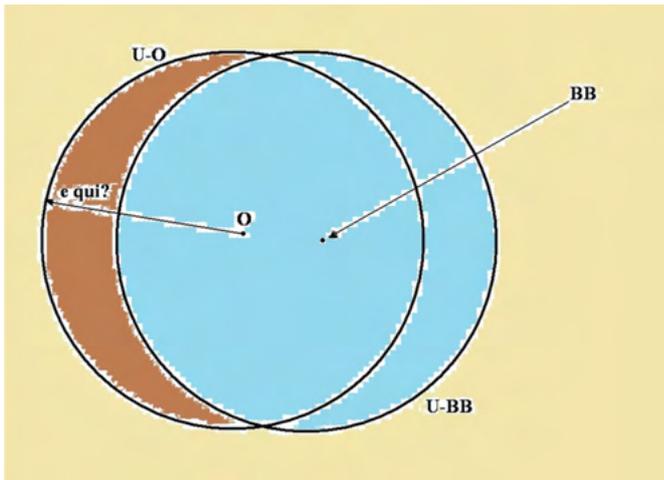
Esatto: *oltre l'orizzonte causale*. Infatti, l'esplosione, come già detto, non è avvenuta come un moto *attraverso* lo spazio, ma è stata un moto *dello* spazio e, almeno per quanto possiamo capirne per mezzo della fisica di oggi, non c'è stato alcun limite alla violenza del botto. Ricordate che, al centro esatto di un Buco nero, la velocità di risucchio dello spazio va all'infinito? Esattamente l'inverso è avvenuto nel Big Bang, che possiamo pensare come una sorta di Buco nero alla rovescia o, come dicono i fisici, un *Buco bianco*.

Spiego la definizione: quest'ultimo *oggetto* in senso lato è una soluzione matematica della Relatività generale; un punto dal quale sono espulsi spazio, materia ed energia. Di conseguenza, è utile pensare al Big Bang come a *un'esplosione infinita di spazio*, giungendo a concludere che, già nel primo istante di vita dell'universo, lo spazio è giunto a coprire un volume infinito. So bene che ciò urta profondamente contro la nostra mentalità, non voglio nascondendomi dietro un dito facendo passare il concetto come acquisito senza problemi, ma ormai dovremmo avere abbastanza domestichezza con le stramberie (per la maggior parte *giuste*) partorite dal cervello di Einstein per poter almeno prendere in considerazione l'idea.

Provo a togliere ogni possibilità di equivoco per mezzo di un esperimento concettuale ma realizzabile anche con la tecnologia astronomica disponibile ai nostri giorni, che il lettore può compiere nel chiuso della propria testa, oppure compulsando Internet alla ricerca d'immagini delle galassie da noi più lontane, se non addirittura di quella della radiazione di fondo.

Cerchiamo perciò di visualizzare che cosa sarebbe successo se il Big Bang si fosse comportato come una specie di superbomba esplosa *nello* spazio. Un quadro del genere si troverebbe in armonia col nostro modo tradizionale di ragionare: lo spazio sarebbe stato preesistente e *fermo* e le galassie, essendo state originate dai frammenti di materia eiettati nello scoppio, non avrebbero potuto trapassarlo a velocità superiore a quella della luce. Ricordiamo, infatti, che, per il vincolo imposto dalla Relatività speciale, un corpo, durante il suo moto *attraverso* lo spazio, non può superare la velocità  $c$ .

Ora prestate attenzione, perché il giochino è tutto qui: nella situazione sopra descritta, l'universo nel suo insieme sarebbe oggi una sfera di volume finito, che coinciderebbe coll'UC *del punto ove fosse esploso il Big Bang* (qui la sfera U-BB in Figura 11.1); un punto ben identificato nello spazio, e indicato con BB. Se un osservatore privilegiato scrutasse nel vuoto



**Figura 11.1**

proprio da quel punto, vedrebbe un universo simmetrico, in espansione, esattamente come lo vediamo noi dalla Terra. Per qualsiasi altro osservatore **O**, posto in un luogo diverso, il suo UC (qui la sfera **U-O**) apparirebbe invece **gravemente asimmetrico!**

Infatti, come abbiamo già notato, la distribuzione di materia nell'universo si estenderebbe solo fino alla distanza raggiunta dalle galassie più veloci rispetto al centro del Big Bang e cioè, assumendo che questa velocità sia poco inferiore a

quella della luce, essa riempirebbe solo la sfera **U-BB** di circa quattordici miliardi di anni-luce di raggio. L'osservatore **O**, se guardasse lungo la direzione indicata dalla freccia, vedrebbe galassie solo fino a una certa distanza, ma poi più nulla nella regione indicata dalla scritta: "e qui?".

Ci siamo? Ora riflettiamo che noi, dalla Terra, vediamo l'UC del tutto simmetrico in ogni direzione, per **una parte per milione** o quasi (ricordate questa cifra; tornerà buona più avanti). In una concezione pre-copernicana potremmo assumere che il centro della Terra coincida col punto esatto in cui esplose il Big Bang. Forse Claudio Tolomeo se la sarebbe sentita di sostenere un punto di vista del genere (ma più probabilmente non l'avrebbe accettato neanche lui): noi ce la sentiamo? Non credo proprio, vero?

Se non siete d'accordo su questo punto fondamentale, vi prego di smettere di leggere qui e andare a trastullarvi con la fantarcheologia. Per quanto ci riguarda, la totale simmetria attorno a noi dell'UC è la prova irrefutabile che il Big Bang è stato l'esplosione **dello** spazio (anzi, dello **spaziotempo**). Un'esplosione, con ogni probabilità, addirittura **infinita**, e non avvenuta *solo in un punto preciso* come siamo abituati a pensare, che ha generato un universo immensamente più grande del nostro UC.

Ciò può turbarci, ma fissare un limite qualsiasi alle dimensioni dell'universo in generale sarebbe arbitrario; per questo i fisici e gli astronomi tendono ad asserire (senza averne prove certe, s'intende, ma per economia di pensiero o, per dirla in gergo, seguendo il *rasoio di Occam*) che l'universo è, semplicemente, infinito. E verso la fine del prossimo capitolo vedremo come, senza recare troppa offesa a Galileo e al Metodo sperimentale, sia lecito addirittura fare supposizioni su alcune delle **cose** in senso lato che, probabilisticamente, dovremmo aspettarci di trovare oltre l'orizzonte del nostro UC, sebbene ogni osservazione diretta ci sia negata per principio.

Bene: giacché abbiamo aggiunto un bel frammento – addirittura **infinito** – al Modello d'universo che stiamo costruendo, vogliamo battere il ferro finché è caldo e incastrare altri pezzi importantissimi. È quel che faremo nei prossimi capitoli: tenetevi forte perché anche qui non si va con la mano leggera.

## 11.2) – L'ultimo atto del Big Bang.

Come sarebbe a dire? Invece di prendere l'avvio dal principio partiamo dalla coda? Perché proprio l'*ultimo atto*? Ebbene sì, il nostro Modello d'universo non può arricchirsi immediatamente del Big Bang tutto intero; occorre per il momento dare uno sguardo d'insieme all'UC ed esaminarne il contenuto, o per lo meno quel che *era* il suo contenuto nel momento in cui, dalle varie parti che lo compongono, partì la luce che arriva oggi ai nostri strumenti di osservazione.

Cominciamo con un ragionamento semplice semplice, proprio nell'ottica dell'ultima frase qui sopra. Più guardiamo lontano nello spazio, più vediamo lontano nel tempo, d'accordo? Se è così, e se avessimo strumenti in grado di osservare i limiti estremi dell'UC, alla faticosa distanza di **13,77** miliardi di anni–luce da noi, non dovremmo riuscire a vedere proprio il Big Bang? Il vero *orizzonte* osservativo dovrebbe essere quello, anche se l'idea di *un punto* (poiché tale è l'immagine del Big Bang che stiamo ancora usando), *spalmato* sull'intera superficie celeste in ogni direzione, ci confonde un po', non è vero? Prometto che tornerò anche su questo.

In linea di principio le cose dovrebbero andare proprio così. In pratica, dobbiamo constatare che la nostra capacità di ricevere onde elettromagnetiche (*luce* in senso lato, di ogni lunghezza d'onda) incontra un ostacolo inatteso, di tipo *osservativo* e non *assoluto*, che definiremo "Parete di fuoco" (ricordate il rumore di fondo trovato da Penzias e Wilson?), corrispondente a un evento svoltosi nell'universo appena **380.000** anni dopo il Big Bang. Si tratta per l'appunto dell'avvenimento cui ci siamo riferiti con la dizione *ultimo atto del Big Bang*. Vale a dire: dal tempo zero fino a **380.000** anni si svolgono le varie fasi del dopo – Big Bang; da allora in poi, si può dire che cominci la storia dell'universo come lo conosciamo, come riusciamo a ricostruirla non solo in modo teorico, ma per mezzo di osservazioni dirette. Si tratta di un confine piuttosto importante, no?

Senza bisogno di anticipare troppo diciamo che, appena dopo l'istante del Big Bang, la temperatura del fluido di energia che all'epoca permeava l'universo era così elevata, che perfino la luce era *caldissima*: restando sul generico, essenzialmente c'erano raggi  $\gamma$ , ben più penetranti di quelli *X* usati in medicina. Poi, al passare del tempo, lo spazio si è espanso trasportando con sé questo fluido le cui vicissitudini vedremo in un capitolo successivo. E, come succede per qualsiasi fluido in espansione, la sua temperatura scese lentamente e progressivamente finché, dopo la bellezza di **380.000** anni, raggiunse circa **5000 °C**; poco meno della temperatura della superficie solare (che è circa **5500 °C**).

A quel momento, secolo più, secolo meno, vi fu per l'universo una svolta di drammatica importanza. Infatti, se in un fluido composto essenzialmente d'idrogeno, com'era appunto l'universo a quell'epoca, la temperatura supera **5000 °C**, per assorbimento di luce e pura semplice agitazione termica gli elettroni sono soggetti a urti così violenti che se ne volano via dagli atomi, e fluttuano liberi in una miscela di nuclei ed elettroni che prende il nome di *plasma*. Fin qui niente di grave, a parte un dettaglio: gli elettroni liberi sono voraci predatori di luce. Assorbono quella che piove loro addosso, la emettono di nuovo in tutte le direzioni, e per di più mutata di lunghezza d'onda (colore).

Di conseguenza, per quanto un plasma possa essere caldo e luminosissimo, è ciò nondimeno *opaco* alla luce. Se avviene qualcosa *dietro* una regione in cui si trova un plasma, non ne potremo mai ricevere alcuna informazione visiva; la luce che attraversa il plasma è catturata, rimescolata ed emessa a casaccio, esattamente come se attraversasse una nebbia fitta. Infatti, nella nebbia, le goccioline d'acqua in sospensione nell'aria riflettono a caso la luce pure loro, e un banco di nebbia può anche emettere una luminosità biancastra, ma non ci lascia vedere cosa avviene al suo interno. Come dire che un astronauta che attraversasse una nube di plasma, farebbe bene a tenere una velocità piuttosto bassa, per non andare a cozzare contro un ostacolo invisibile.

Torniamo all'idrogeno. Quando la temperatura del fluido scese sotto **5000 °C**, e ciò avvenne per l'appunto **380.000** anni dopo il Big Bang, gli elettroni, che prima erano liberi e assorbivano la luce, si stabilizzarono in atomi obbedendo a leggi che cominceremo a discutere nella prossima Sezione, e nel far ciò smisero di catturare luce. Da opaco che era, l'universo divenne all'improvviso *trasparente* com'è oggi nei nostri dintorni. Di conseguenza, i telescopi di qualsiasi tipo sono in grado di captare la luce emessa da ogni sorgente nell'universo da quel momento in poi, e a noi è consentito *vedere* in senso stretto quel che è accaduto a partire dalla fatidica data di **380.000** anni.

Attenzione, però: anche la nube di plasma era luminosa e quindi, scrutando abbastanza lontano in ogni direzione, la nostra linea di vista andrà alla fine a incrociare questo plasma a **5000 °C** di temperatura. Incontreremo all'improvviso la *parete di fuoco* di cui si è accennato prima, la cui temperatura è quasi uguale a quella della superficie solare. Questa parete ci nega la visuale delle prime fasi dopo il Big Bang e, ovviamente, del Big Bang stesso che, dunque, resta nascosto alle nostre osservazioni da un *orizzonte* fatto di luce.

Parziale ma importante precisazione: ricordo che quanto detto sopra, e discusso ampiamente nel seguito, riguarda soltanto le onde elettromagnetiche. Oggi che l'astronomia dei neutrini, e più ancora delle onde gravitazionali, è diventata una realtà, è probabile (anche se non banale sul piano tecnologico, e non me l'aspetterei troppo presto) che l'orizzonte della Parete di fuoco venga superato, avvicinandoci molto di più – sempre in modo *osservativo* – all'istante del Big Bang. Ma proseguiamo.

In qualche modo, la fisica riesce a penetrare, sebbene per vie traverse, anche questa parete di fuoco, e recuperare informazioni su avvenimenti così a ridosso del Big Bang da meravigliarci; sta di fatto che qualsiasi *telescopio* in senso lato che osservi per mezzo di onde elettromagnetiche, dai raggi  $\gamma$  al radio, incontra un *orizzonte* oltre il quale non può più scorgere nulla, a **13** miliardi e **770** milioni meno **380.000** anni–luce.

Inciso: in gergo, la ricombinazione tra elettroni e nuclei, allora avvenuta per formare atomi neutri prende, per l'appunto, il nome di “*Ricombinazione*”, e come tale la definirò anch'io d'ora in poi.

Se dobbiamo credere alla lettera a quanto detto sopra, è legittimo che il lettore finisca nel pallone. Ricordando la storia di Penzias e Wilson, là avevamo parlato della radiazione di fondo come di un disturbo radio, e ciò comporta che la sorgente doveva essere molto più *fredda* della radiazione solare. Ora, però, abbiamo affermato che, guardando in ogni direzione del cielo, la nostra linea di vista finisce invariabilmente per impattare con una vera e propria *parete di fuoco* la cui temperatura è circa di **5000 °C**.

Stando così le cose, perché il cielo notturno è buio? Non è forse questa una nuova versione, modernizzata e *definitiva*, del paradosso di Olbers? Se, in ogni direzione, si incontrasse la parete di fuoco, il cielo notturno dovrebbe essere tutto brillante come la superficie solare o poco meno. Spiegare, spiegare, per favore. Spiegherò, certo, e vedrete che tutto andrà a posto.

Mettiamoci nei panni di un'onda luminosa emessa più o meno quando gli elettroni liberi cominciarono a essere catturati dai protoni per formare atomi d'idrogeno. In particolare, supponiamo che si trattasse di luce *blu*, con una lunghezza d'onda ben precisa corrispondente a **0,4** millesimi di millimetro. Il nostro occhio riesce a vedere piuttosto bene questo tipo di luce ma, se la lunghezza d'onda scende ancora, si arriva al violetto, dove la sensibilità della retina scende, e quindi all'ultravioletto dove siamo del tutto ciechi. Fortunatamente il blu fa al caso nostro, e allora seguiamo quest'onda nel suo viaggio attraverso lo spazio finché, dopo quasi quattordici miliardi di anni, finisce nei nostri strumenti d'osservazione.

E qui non mi pare lecito procedere se non aggiungo un inciso, perché spesso mi sento chiedere: «Come mai il raggio ha impiegato tanto tempo a raggiungerci, se l'UC, a quell'epoca, aveva un raggio di soli **380.000** anni-luce?» Domanda lecita e, per rispondere, dovremo tornare con la mente alla luce emessa da una sorgente che sta per attraversare l'orizzonte di Schwarzschild di un Buco nero. Quella luce nuota *contro corrente* attraverso spazio che sta cadendo *quasi* alla velocità della luce, e dunque impiega molto più tempo di quanto ci attendessimo per arrivare fino a noi. Analogamente per la luce emessa durante la *ricombinazione*: la parete di fuoco si stava espandendo *quasi* alla velocità della luce, e quel raggio luminoso, nuotando contro corrente, ha impiegato poco meno di quattordici miliardi di anni per arrivare fino a noi. Almeno grossolanamente, ci siamo?

La luce blu, dunque: quando è stata emessa l'universo era ormai trasparente, e il raggio si è propagato in linea retta senza trovare ostacoli. E finalmente, dopo tanto tempo di viaggio contro l'espansione dello spazio, è giunto fino a noi e ha terminato la sua esistenza catturato da un rivelatore. Attenzione, ora: nel paragrafo precedente avevamo già introdotto il concetto chiave, e qui l'abbiamo riaffermato; durante questo lungo viaggio la luce è stata davvero indisturbata? No: neanche per niente. Proviamo a vedere la cosa da due punti di vista apparentemente diversi, ma che conducono alla medesima conclusione.

Primo punto di vista: la dilatazione dello spazio. Nel nono capitolo abbiamo scoperto come fanno gli astronomi a misurare il ritmo di espansione dell'universo, e abbiamo parlato di questo ritmo come se fosse una costante: la famosa "Costante di Hubble" o  $H_0$ . In prima approssimazione, ipotizziamo che anche nei primi tempi di vita dell'universo il ritmo d'espansione dello spazio fosse lo stesso (era un po' diverso, non tanto, e ne parleremo più avanti), e traiamo qualche conseguenza da questa ipotesi. Per la precisione, ragioniamo così: se la lunghezza d'onda della luce era **0,4** millesimi di millimetro quando l'età dell'universo era pari a **380.000** anni, quanto sarà diventata grande questa lunghezza d'onda dopo trascorsi **altri 380.000** anni?

Qualcuno borbotta: «Perché dovrebbe essere diversa? Sarà sempre 0,4 millesimi di millimetro, no?». Proprio per nulla. Abbiamo appena imparato che il Big Bang non scaraventò materia ed energia *nello* spazio, bensì scagliò *spazio* contenente a sua volta materia ed energia, e fu (ed è tuttora) lo spazio stesso a *dilatarsi* al passare del tempo. Lo spazio, con tutto quel che contiene, e quindi *anche con la luce*, capito?

E perciò, all'età dell'universo di **760.000** anni, vale a dire doppia rispetto all'età di ricombinazione, se il ritmo di espansione fosse stato costante come abbiamo appena ipotizzato, la *griglia spaziale* cosmica (ricordate la triste storia dei pianimali innamorati?) si sarebbe dilatata del doppio, e la lunghezza d'onda di quel particolare raggio luminoso sul quale ci stiamo soffermando sarebbe raddoppiata pure lei: **0.8** millesimi di millimetro, corrispondente a luce *rossa*. Per puro caso, una lunghezza d'onda che si pone anche lei al limite di visibilità per l'occhio umano, ma dall'altro lato; già onde di **0,9** millesimi di millimetro sono nel campo dell'infrarosso, laddove siamo ciechi.

Poi, proseguendo, a **3,8** milioni di anni di età l'espansione cosmica avrà stirato la lunghezza d'onda della luce ben dieci volte, fino a quattro millesimi di millimetro: siamo all'interno della banda infrarossa. A **3,8** miliardi d'anni, l'allungamento sarebbe stato di mille volte, e cioè la lunghezza d'onda avrà raggiunto quattro millimetri, come in un forno a microonde e, dopo un viaggio di quattordici miliardi di anni, quando la luce giungerà ai nostri strumenti, la sua lunghezza d'onda sarà quasi due centimetri, al limite tra le microonde e il radio.

È questa la soluzione *definitiva* al vero paradosso di Olbers, quello che riguarda la parete di fuoco primordiale. Infatti, la temperatura che le leggi fisiche associano alla radiazione, è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda. Di conseguenza, i **5000 °C** della ricombinazione ci appaiono ormai freddissimi: solo **2,73** gradi Kelvin (**°K**), e cioè rispetto allo zero assoluto (sono circa **270 °C** sotto lo zero dei nostri termometri). È verissimo, quindi, che ci proviene luce da ogni direzione; questa luce, però, è così poco energetica che non scalda per niente; anzi: è invisibile all'occhio e occorrono strumentazioni complicate per rilevarla.

E mi perdonerete se ho semplificato molto il ragionamento: avrei dovuto considerare che, al passare del tempo, il ritmo di espansione si è modificato; alcuni dei numeri sopra riportati avrebbero bisogno di essere un po' limati, ma gli ordini di grandezza sono giusti.

Comunque, avevo promesso di analizzare lo stesso fenomeno da due punti di vista diversi ma solo apparentemente. E allora proviamo a ragionare in modo più *classico*, facendo finta che la Relatività nemmeno esista. Sappiamo di ricevere luce a **5000 °C** da un guscio sferico tutto intorno a noi che, per espansione dell'universo, si allontana con una velocità che è molto vicina a quella della luce. Quanto vicina? Ne differisce per una parte su mille (sto sempre lavorando a spanne, s'intende). Allora, per *effetto Doppler*, lo spostamento verso il rosso della luce che proviene dalla parete di fuoco deve essere di *circa mille volte*, ed ecco che anche per questa strada torniamo alle microonde, e ai tre gradi circa di *temperatura apparente* della sorgente. Contenti?

Al termine di questi conti, resta un fatto importantissimo. Sia che consideriamo lo spostamento verso il rosso della luce proveniente dalla parete di fuoco primordiale come un effetto dell'espansione cosmica della lunghezza d'onda, sia che ne discutiamo in termini di effetto Doppler, non cambia nulla nella sostanza. Ne discende che, essendo noi in grado di osservare in dettaglio la ricombinazione per mezzo di telescopi infrarossi, nelle microonde e nel radio, siamo pure in grado di ricostruire con precisione la struttura dell'universo quando la sua età era di soli **380.000** anni.

Ecco: per gli increduli del Big Bang possiamo dire quanto segue. Sappiamo con certezza assoluta, poiché lo mostrano tutte le osservazioni dirette fattibili e pensabili, che

l'universo ha *per lo meno* attraversato la stessa fase *che avrebbe attraversato se fosse uscito dal Big Bang 380.000 anni prima*. E scusate se vi pare poco... ma il gioco non finisce qui.

## 11.3) – Recuperare qualcosa di assoluto.

Prima di accennare all'evoluzione successiva dell'universo, alla sua struttura sul piano geometrico e al suo contenuto, vale la pena di spendere due parole su una curiosità. Per come la radiazione di fondo è stata emessa (e vi risparmio i dettagli), i fisici prevedono – e costatano sperimentalmente – che detta radiazione deve seguire in modo quasi perfetto la distribuzione in lunghezze d'onda cosiddetta di “**Corpo nero**”, su cui torneremo in molto maggior dettaglio nella Sezione III, quando cominceremo a parlare di Meccanica quantistica.

Al momento, contentiamoci di sapere che la parete di fuoco appare, con un'approssimazione di una parte su 70.000 (e pure su queste piccole deviazioni dovremo tornare), un Corpo nero alla temperatura di **2,73** gradi sopra lo zero assoluto. Quanto di più simmetrico intorno a noi sia possibile immaginare.

Un momento, però: l'effetto Doppler va tenuto in conto! E, di conseguenza, soltanto un osservatore veramente *fermo* rispetto alla parete di fuoco vedrebbe la radiazione di fondo esattamente come se provenisse da un Corpo nero. Se l'osservatore fosse *in moto*, misurerebbe una temperatura un po' più *calda* nella direzione verso la quale si sposta, più *fredda* in direzione opposta. Non se ne esce.

Perciò, studiando con cura le differenze osservate rispetto a un Corpo nero, gli astronomi hanno dedotto che, rispetto alla parete di fuoco, il gruppo di galassie di cui fa parte anche la nostra non è esattamente *fermo*, ma si muove in direzione di un enorme ammasso di galassie che si trova nella costellazione della Vergine, con una velocità di circa **600** km/s. Il numero che avevamo visto tanto tempo fa, parlando del biliardo inchiavardato al suolo, ricordate?

Intendiamoci: bastava la Relatività di Galileo per screditare l'idea di un moto *assoluto*; figuriamoci se ci aggiungiamo pure quella di Einstein! Nonostante tutto ciò, in qualche modo un po' rudimentale, la simmetria quasi perfetta osservata nella parete di fuoco ci permette di definire almeno un sistema di riferimento che, pur non potendosi definire *assoluto*, è per lo meno *privilegiato*. Si considera *immobile* rispetto all'universo (locale, s'intende; non possiamo estendere il concetto a distanze cosmiche) un osservatore che, misurando la radiazione di fondo alle varie lunghezze d'onda, trovi che essa si conforma a una distribuzione di Corpo nero.

Con un'altra capriola intellettuale, riusciamo a estendere un concetto analogo perfino al *tempo*. Certo, la sua misurazione dipende da distanze e velocità, e pur tuttavia è lecito definire qualcosa che si avvicina a un *tempo cosmico assoluto*. Diremo che due sperimentatori – e in questo caso possiamo prenderli lontani tra loro quanto si voglia – eseguono contemporaneamente le loro misure se:

- ciascuno di loro è *fermo* nel senso sopra specificato, e cioè osserva una radiazione di fondo che obbedisce esattamente alla legge di Corpo nero, e
- ciascuno dei due misura la stessa temperatura (sempre di Corpo nero).

Se poi fissiamo una ben precisa temperatura per come appare la parete di fuoco, possiamo addirittura associare un'*età assoluta* dell'universo a quella temperatura: un'età identica per qualsiasi osservatore che misuri proprio quella temperatura. Perfino per un ipotetico osservatore al di fuori del nostro UC. Se non c'è qualcosa di *assoluto* in tutto ciò...

Di conseguenza, in tutto l'universo è possibile misurare se si è in quiete rispetto allo spazio nella piccola regione in cui ci si trova, e fissare una cronologia assoluta scandita dalla temperatura della radiazione di fondo. Ripeto: escludendo che i fisici abbiano preso un granchio fenomenale, questo concetto si applica sia all'interno del nostro UC, sia in ogni altro UC, non importa se parzialmente coincidente col nostro o meno. Due osservatori in due differenti universi causali non potrebbero essere a conoscenza l'uno dell'esistenza dell'altro, e inoltre si allontanerebbero tra loro, per dilatazione dello spazio, a velocità superiore a  $c$ , ma resterebbero accomunati dal tenue filo dell'età. Se fossero *fermi* rispetto alla loro regione di spazio, e misurassero la stessa temperatura per la parete di fuoco primordiale, sarebbero *contemporanei* in un senso che trascende la possibilità di comunicare e quindi, in ultima analisi, di *conoscere*.

Nell'ultimo paragrafo abbiamo introdotto il concetto di universi causali separati. Restando nello stesso ordine d'idee, vorrei qui rispondere a un'altra delle domande ingenuie ma frequenti: cosa troverebbe un astronauta che, per miracolo o magia, riuscisse a *saltare* in modo istantaneo dalla Terra al luogo in cui osserviamo l'orizzonte del nostro UC? Finirebbe forse immerso nella parete di fuoco? Certo che no. Infatti, anche lì sono passati quasi quattordici miliardi di anni dal momento in cui esplose il Big Bang, e l'universo ha avuto agio di evolvere. Verosimilmente, ci saranno stelle, galassie e nebulose un po' come qui da noi. Semmai, guardandosi indietro in direzione della Terra, in considerazione della sua nuova prospettiva vedrebbe il luogo ove oggi ci troviamo noi immerso nella parete di fuoco primordiale del *suo nuovo UC*.

Con queste ultime considerazioni abbiamo aggiunto un bel po' di pezzi al nostro Modello d'universo, ma ovviamente non è ancora finita. Qui di seguito dovremo narrare qualcosa sulle epoche ancora successive a quelle trattate fin qui, e quindi passeremo a discutere la *forma* dell'universo in senso lato, oltre al suo *contenuto*. E che dire del suo destino futuro? Non basta; ho deciso di stupirvi. Alla fine del prossimo capitolo ho in serbo un effetto speciale!

## 11.4) – Per prime furono le stelle. Poi le galassie

Qui entriamo in un argomento che tratterò solo per sommi capi, vuoi perché in parte non è ancora del tutto chiarito né dal punto di vista teorico, né da quello osservativo, vuoi perché esso è trattato di solito nei libri più orientati verso quella disciplina che potremmo definire in senso lato “Geografia astronomica”.

Quest’ultima, infatti, studia anzitutto il Sistema solare, poi le costellazioni, quindi tratta degli oggetti astronomici in esse proiettati sulla sfera celeste (nebulose, ammassi, galassie eccetera), fino a fornire una panoramica della distribuzione della materia *visibile* nella parte di universo accessibile all’osservazione diretta. Le belle immagini fornite da telescopi e sonde spaziali aiutano molto, ma questo libro, come ormai ben sapete, ha un *orientamento* diverso. Di conseguenza narrerò brevemente come l’universo cominciò, al passare del tempo, a *somigliare* a quello che vediamo oggi, e poi la pianterò lì per tornare ad altri argomenti, che riguardano sempre la struttura dell’universo nel suo insieme.

Torniamo alla *ricombinazione*, perciò. Abbiamo visto come, in breve tempo (**380.000** anni), il plasma luminoso ma opaco si trasformò in una miscela di atomi neutri, trasparente alla luce per cui, avendo strumenti di potenza adeguata, potremmo in teoria osservare direttamente tutto ciò che avvenne nell’universo da quel momento in poi.

Inciso: nel momento in cui scrivo (circa metà dell’Anno domini MMXXI) catturare la luce di oggetti distanti quasi quattordici miliardi di anni–luce è ancora una tecnica per specialisti. Qualche sprazzo si rileva saltuariamente e, grazie a una manciata d’informazioni dirette supportate dalla teoria, gli astronomi stanno cercando di ricostruire ciò che avvenne nei primissimi tempi di vita dell’universo. Nei prossimi anni è prevista l’entrata in funzione di telescopi terrestri e spaziali (principalmente spaziali perché, per arrossamento Doppler, la luce proveniente anche dai più caldi oggetti primordiali è comunque spostata nell’infrarosso lontano, e l’atmosfera è poco trasparente a queste lunghezze d’onda), tra i quali il lungamente atteso James Webb Space Telescope, il cui lancio è previsto per la fine del 2021, dedicati proprio allo studio delle più antiche strutture materiali dell’universo, e quello che scrivo oggi potrebbe aver bisogno di un’implementazione sostanziale in tempi brevi.

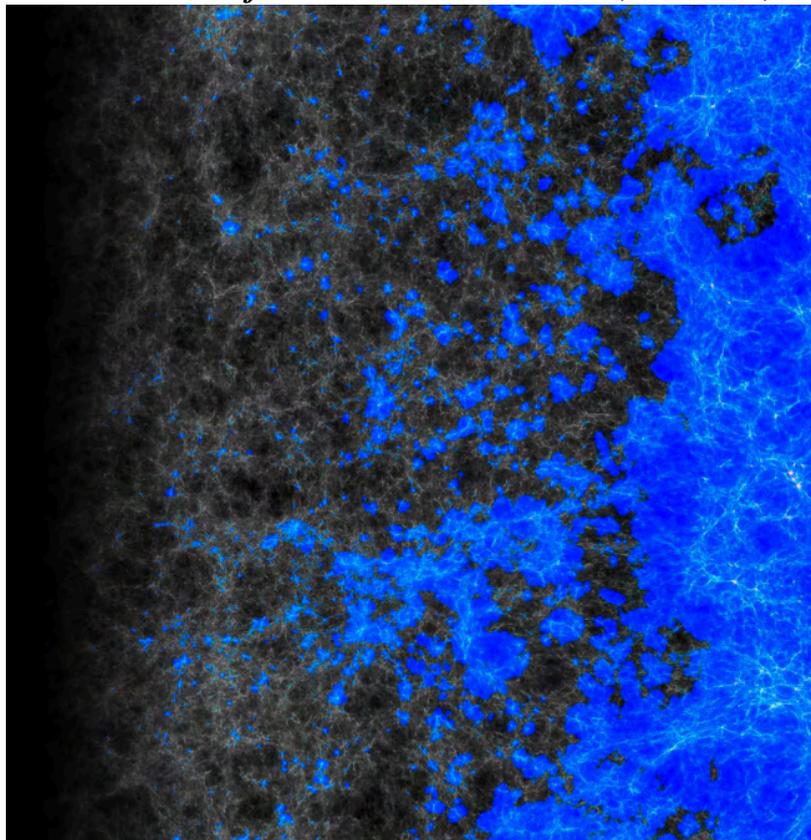
Inciso: scrivere un libro divulgativo sulle frontiere della scienza è come acquistare un nuovo computer. Già si sa in partenza che, tempo un paio d’anni, saranno disponibili sul mercato modelli a costo minore e prestazioni enormemente superiori e, nel mio caso, so che almeno una parte di questo libro è destinata a rapida obsolescenza. Per minimizzarla ho preferito soffermarmi a lungo sulle acquisizioni definitive, per cui mi accingo a descrivere in un certo dettaglio la parete di fuoco che è stata osservata molto bene da appositi telescopi infrarossi su satellite, e dedicherò poco spazio alle attuali frontiere osservative della cosmologia stellare e galattica. Se poi ci saranno grandi novità, finché non sarò sottoterra cercherò di aggiornare qualcosa anche qui, come per tutto il resto del libro. Fine dell’inciso.

Abbiamo visto, in una sezione precedente, che la parete di fuoco emette luce come un corpo nero quasi perfetto a circa **5000** gradi. Attenzione: *quasi* perfetto e, infatti, come già accennato, ci sono piccole deviazioni dell’ordine di una parte su **70.000**. Spieghiamone il perché.

Anche senza entrare troppo in dettagli, il lettore non avrà difficoltà a convincersi che, all'epoca della ricombinazione, l'universo non poteva essere *assolutamente omogeneo*, ma con ogni probabilità doveva contenere regioni un po' più dense e altre più rarefatte. Per il momento accettiamo quest'affermazione per buona; quando parleremo dell'universo quantistico, il motivo diventerà evidente.

Ora, riflettiamo sulla ricombinazione. Le regioni più dense saranno state anche un po' più calde (gonfiando la gomma della bicicletta con la pompa, l'aria si scalda via via che la sua pressione – e la sua densità – aumentano), mentre le regioni più rarefatte dovevano essere un po' più fredde. Di conseguenza, la ricombinazione non è avvenuta dappertutto in un batter d'occhio, ma sarà cominciata *prima nelle zone più rarefatte*, e solo al passare del tempo si sarà estesa alle regioni più dense.

In altri termini, la parete di fuoco non è una superficie sottilissima, ma piuttosto un *guscio* dotato di un certo spessore (non molto grande). Quando osserviamo una zona *rarefatta* sulla parete di fuoco, sappiamo che questa si trova un pochino più lontano da noi rispetto a una zona *densa*, proprio a causa dello spessore del filamento che stiamo esaminando. Ecco, allora, il punto importante che vi sottopongo: applicando la legge di Hubble (è solo una grossolana approssimazione per spiegare il concetto), dovremmo trovare che le zone inizialmente *rarefatte* si allontanano da noi, in media, a una velocità maggiore rispetto alle



zone inizialmente *dense*. Ho rubato a Internet questa immagine (Figura 11.2) che illustra il concetto. Dalla parete di fuoco (scura, perché non ne vediamo nulla) si staccano via via “bolle d'Idrogeno ionizzato”, sempre caldo e opaco, mentre il resto si raffredda in filamenti di Idrogeno neutro blu, trasparente.

Lo ripeto per eccesso di precauzione: c'è una leggera differenza nelle distanze e, di conseguenza, anche nelle velocità di allontanamento. E quindi, per effetto Doppler, le zone rarefatte devono apparirci, per l'appunto, più fredde della media della parete di fuoco, mentre quelle dense ci appariranno più calde.

**Figura 11.2**

In effetti, la parete di fuoco è un po' butterata da macchie fredde e calde, e c'è voluta una sensibilità estrema degli strumenti di rivelazione per accorgersene, visto che la differenza

di temperatura è, come abbiamo detto prima, di una parte su **70.000**. Per ora teniamo a mente questo concetto e proseguiamo con la storia dell'universo primordiale.

Passata la ricombinazione, ci sono solo atomi neutri d'idrogeno ed elio, più tracce minime di pochi altri elementi che, in un altro capitolo, saranno per noi d'estremo interesse, ma qui ce ne possiamo scordare. Come evolverà questo gas? Intuitivamente è semplice: almeno in prima approssimazione, laddove la sua densità è sufficientemente alta si condenserà in stelle e galassie mentre, dove ce n'è poco, si apriranno ampi squarci di vuoto.

Il che è senz'altro vero, e sarà pure successo, ma quando passiamo dai discorsi *qualitativi* alle valutazioni *quantitative* che interessano i cosmologi, le cose si fanno un po' più complicate. Infatti, ragionando a braccio, ci verrebbe da pensare che si siano dapprima condensate enormi nubi le quali, al trascorrere del tempo, si siano frammentate in galassie, formando poi stelle e ammassi.

Purtroppo, cifre alla mano, si dimostra come questo processo non possa avvenire senza una manciata d'*inquinamento* nel gas. Inquinamento da parte di elementi più pesanti, come il carbonio, l'ossigeno, e sempre più su fino al ferro, altrimenti una miscela di puro idrogeno ed elio non riuscirebbe a raffreddarsi abbastanza, da contrarre fino a formare una galassia. Solo i *metalli*, come sono definiti impropriamente dagli astrofisici tutti gli elementi chimici che non siano, per l'appunto, idrogeno ed elio, sono in grado di dare a una nube di gas primordiale un efficace *radiatore* che le permetta di perdere calore, vale a dire energia cinetica degli atomi (velocità, in soldoni), e finalmente cadere su se stessa formando la benedetta galassia che stavamo aspettando.

E qui si pone il problema: è nato prima l'uovo o la gallina? O, per la precisione, le stelle o le galassie? Infatti, i *metalli* si formano solo nel cuore di stelle di grandissima massa che poi, esplodendo, scagliano nei loro dintorni proprio questi elementi i quali, al passare del tempo, si mescolano col gas circostante. Per quanto ne sappiamo, però, le stelle si formano solo dopo che le galassie, contraendosi, cominciano a frammentarsi in piccole nubi di gas di densità altissima. Ora: se le galassie non possono condensarsi senza che prima ci siano state stelle che hanno inquinato di *metalli* il gas, come si risolve questo circolo vizioso? No, non si tratta per nulla del solito dettaglio per eruditi: è un punto fondamentale sul quale, al momento, abbiamo solo idee frammentarie.

Ve lo racconto brevissimamente, perché siamo in quella regione della ricerca scientifica che osservazioni imminenti potranno chiarire molto meglio. S'ipotizza che, all'inizio, ci siano state qui e là un certo numero di forti condensazioni spontanee di gas, sufficienti a consentire la formazione di una primissima generazione di stelle di massa enorme, centinaia di volte quella del Sole. Queste, dopo una vita brevissima (pochi milioni di anni), sono esplose liberando nel gas primordiale circostante proprio i *metalli* necessari a raffreddare le nubi, e consentire finalmente la formazione delle galassie.

Una traccia debolissima di queste stelle primigenie è nella ionizzazione del gas causata dalla loro luminosità enorme, quasi tutta nell'ultravioletto. Vale a dire che il gas primordiale si è dissociato di nuovo in elettroni e protoni liberi per poco tempo, ma stavolta la sua densità era scesa moltissimo, e il *plasma* così generato era tenue, per cui l'universo è rimasto quasi del tutto trasparente.

Le osservazioni non sono ancora molto precise, ma sembrano confermare che le cose non possano essere andate molto diversamente da come ve le ho raccontate, anche se non

siamo ancora in grado di eseguire misure dirette (forse dovrei dire *convincenti*, perché qualche straccio di misura si è già fatta) su queste primissime stelle pre-galattiche. Dovremmo riuscirci dopo questo benedettissimo James Webb Telescope, quindi pazienza.

Eccoci al momento in cui si formano le primissime galassie. Come sono fatte? Anche qui le osservazioni sono ancora troppo provvisorie perché forniscano risposte esaurienti. Sembra però ragionevole ammettere che i *semi* attorno ai quali si sono addensate le prime galassie siano Buchi neri: magari proprio quelli lasciati dall'esplosione delle precedenti stelle di grandissima massa. O, magari, generatisi da estreme condensazioni di materia nei primissimi istanti del Big Bang. E, sempre restando nel "*sembra ragionevole*", queste galassie iniziali dovevano essere molto più piccole di quelle che osserviamo nei nostri dintorni, e quindi in epoca recente. Sono poi cresciute nel tempo mangiandosi a vicenda (come sta ancora facendo la Via Lattea con le piccole galassie che la circondano), e nutrendo i loro Buchi neri centrali fino a farli crescere a dismisura.

Ecco: sull'evoluzione dell'universo dopo il Big Bang non vorrei dire altro; i prossimi anni porteranno molte novità, e vedremo come modificare e precisare questo quadro, ancora molto ipotetico. Ora torniamo all'universo in sé.

## 12) – La “forma” dell’universo

### 12.1) – Mappamondi per dritto e per rovescio

Ha senso parlare di una “*forma*” dell’universo nel suo insieme? Entro certi limiti sì, purché non commettiamo l’errore di volerlo immaginare visto *da fuori*. Piuttosto, avendo imparato che lo spaziotempo può essere curvo, e soffermandoci per semplicità sul solo spazio, è lecito chiedersi se, globalmente, l’universo possieda una curvatura e, nel caso, di quale genere.

Per rispondere a questa domanda occorre applicare la Relatività generale all’universo nel suo insieme, ma prima dobbiamo tornare per un momento su alcuni fondamenti di geometria, sia euclidea sia più generale, come per esempio quella sferica (ricordate gli scherzi che abbiamo fatto al pianimale sul mappamondo?) o quella *iperbolica*. E non vi spaventate; al dunque si tratta di banalità o quasi.

Torniamo al concetto di linea retta, che abbiamo già sfiorato senza approfondire troppo. Non abbiamo alcuna difficoltà a tracciare un segmento di retta su un piano (ricordate: nel *piano* vige la geometria di Euclide), e neppure incontriamo problemi intellettuali formidabili se immaginiamo di far proseguire quel segmento all’infinito da entrambi i lati. È il concetto di *retta* a noi familiare. In uno spazio piano, euclideo, sappiamo benissimo cos’è una retta e, di conseguenza, un segmento.

Ora, però, ragioniamo: e se dovessimo tracciare una retta su un mappamondo, come il povero pianimale che cercava di tracciare un triangolo? Per lui, un segmento era semplicemente un qualcosa che non deviava né a destra né a sinistra, ma noi vedevamo *da fuori* come quella specie di *pseudo-segmento* non fosse per niente *dritto*, perché curvava nella terza dimensione, seguendo la superficie. E capivamo senza la minima difficoltà come, se il pianimale avesse prolungato il segmento da entrambi i lati, avrebbe finito per disegnare un cerchio massimo sul mappamondo, e dunque una linea di lunghezza finita. Altro che retta!

I matematici, però, hanno la capacità di *generalizzare* i concetti. Vediamo come, servendoci proprio dell’esempio di cui sopra. Il ragionamento prende in esame una delle caratteristiche fondamentali di una retta euclidea, quella con cui abbiamo familiarità. Sappiamo tutti che, dati due punti, il segmento della retta che passa per quei due punti è la linea di minor distanza tra i due punti stessi. Questa è la chiave: *la linea di minor distanza*. In quest’ottica, ci rendiamo subito conto che il pianimale, malgrado ancora non conoscesse la geometria sferica, non di meno tracciava segmenti di minor distanza tra due punti qualsiasi. Attenzione: lui non poteva neppure pensare di forare il mappamondo e tracciare *un buco rettilineo nella terza dimensione* tra i due punti; doveva muoversi sempre e solo sulla superficie.

Date queste premesse, la generalizzazione è la seguente: lasciamo cadere la definizione “retta”, poiché si applica solo allo spazio euclideo. Introduciamo al suo posto un nome nuovo: la “*geodetica*”; una linea concepita come il segmento di minor distanza tra due punti e,

ovviamente, il suo prolungamento. Se ragioniamo in questo modo, la *retta* è solo un caso particolare di *geodetica*: quella dello spazio *euclideo*. Su una superficie sferica, una geodetica completa sarà proprio un cerchio massimo. Su altri tipi di superficie... vedremo.

Domanda, giusto per vedere se ci siamo capiti: in uno spaziotempo curvo, quale sarà il percorso di un raggio di luce? Un segmento di retta? No di certo: la luce percorrerà segmenti di geodetica. Anzi: le geodetiche dello spaziotempo si misurano in base al percorso della luce. E vi prego di memorizzare pure quest'informazione, poiché è un'altra di quelle che ci torneranno buone tra un po' di tempo.

Avendo accennato a questi pochi fondamenti di geometria e chiarito – o almeno spero – il concetto di geodetica, ne introduco un secondo che è un po' più difficile da capire, pur se rientra ancora nell'ambito di quello che è disegnabile su un foglio di carta e, di conseguenza, ragionevolmente semplice da visualizzare intuitivamente.

Ricordate quando vi narrai del povero Girolamo Saccheri il quale, nel tentativo di dimostrare che esiste solo la geometria di Euclide, arrivò invece a trovarne un'altra, completamente diversa? I suoi teoremi erano così strani che si rifiutò di crederci e, di conseguenza, dichiarò solennemente che, stante la ripugnanza che il parto della sua mente destava all'intelletto, ciò doveva vedersi come la prova che non ha senso cercare alternative a Euclide. Bene: lui era arrivato proprio alla terza delle geometrie che possono esserci utili alla ricerca di quella dell'universo, e cioè a quella *iperbolica*.

In che modo la potremmo considerare? Dal punto di vista formale, come *l'esatto contrario della sferica*. Nel senso che, in qualunque punto ci si trovi di una superficie iperbolica, due rette *divergono* l'una rispetto all'altra, anziché *convergere* tra loro come invece avviene su una sfera. L'esempio più classico e intuitivo? Una sella di cavallo. Nella speranza di rendere le cose un po' più visive, ecco nella Figura 12.1, sempre rielaborata da Internet, come si presenta una superficie iperbolica vista nello spazio a tre dimensioni, e cioè quello con gli assi *x*, *y* e *z*. Non è banale da capire, vero? Saccheri ha tutta la nostra simpatia.

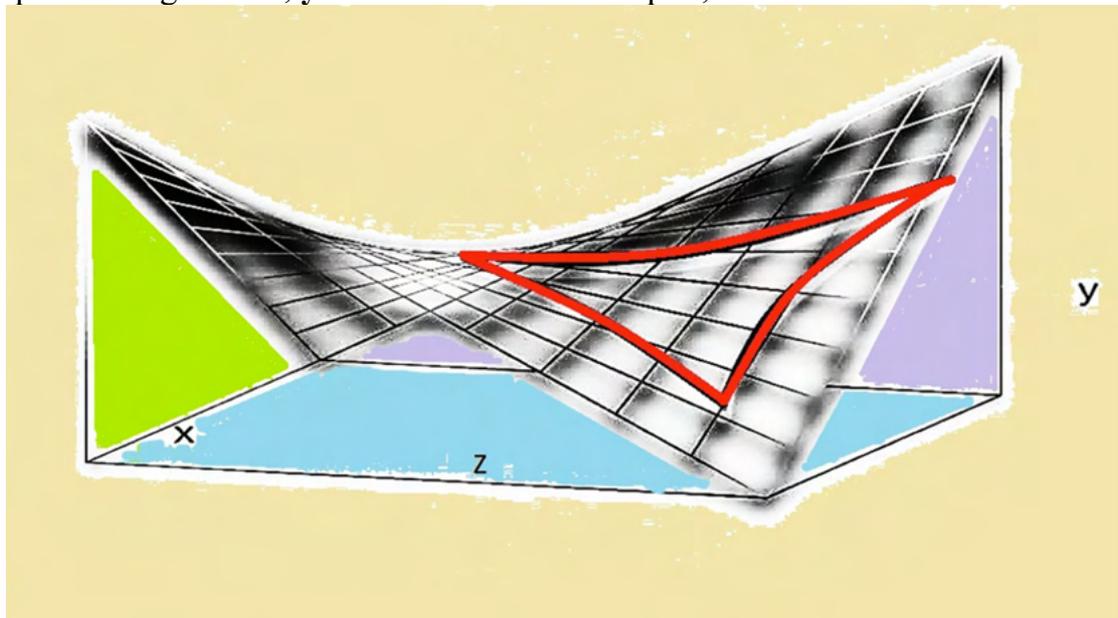


Figura 12.1

Ragioniamo un po' su questa figura; in primo luogo, si vede subito che non è possibile disegnarvi sopra linee rette in senso stretto, ma solo curve di minor distanza tra due punti: le *geodetiche* iperboliche, per l'appunto. E adesso che lo sapete, potete anche voi strabiliare i vostri conoscenti con questi paroloni...

Ancora: se guardate bene il triangolo sulla destra, in rosso, vi renderete subito conto che la somma degli angoli interni è di sicuro inferiore a  $180^\circ$ , al contrario di quanto avveniva sulla sfera quando giocavamo scherzi al povero pianimale. Quanto a quest'ultimo, poiché è vero che la geometria iperbolica fa proprio schifo (come diceva Saccheri in modo più *pulito*), ci siamo ben guardati dallo spiattellare la bestiola su una superficie iperbolica: è una questione di coscienza tra noi e lui.

Ora che abbiamo sfiorato superficialmente anche quest'ultima geometria, non sarà difficile renderci persuasi di un dato di fatto importante sul quale ragionare: la geometria euclidea, nonostante sia di sicuro la più studiata e meglio compresa, rappresenta solo un caso specialissimo. È quello estremo, di transizione, tra geometria sferica e iperbolica.

Infatti, possiamo considerarla il limite di una geometria sferica se il raggio della sfera tende a infinito e la superficie si spiana via via o, se preferite, il limite di una geometria iperbolica se afferriamo i bordi della sella e li tiriamo all'infinito, cosicché anch'essa si spiani. E, per comodità del lettore, riassumo alcune caratteristiche delle tre geometrie:

1) Sferica: la somma degli angoli interni di un triangolo è **maggiore di  $180^\circ$** , e le geodetiche sono archi di cerchio massimo (quindi convergenti); **attenzione, perché la lunghezza delle geodetiche è finita!** Niente *parallele*, neanche in senso lato.

2) Piana (euclidea): la somma degli angoli interni di un triangolo è  **$180^\circ$** , e le geodetiche sono le tradizionali rette, per cui si prolungano all'infinito. Solo qui è possibile definire **due rette parallele nel senso tradizionale**, che mantengono ovunque la stessa distanza tra loro.

3) Iperbolica: la somma degli angoli interni di un triangolo è **minore di  $180^\circ$** , e le geodetiche sono archi d'iperbole (quindi divergenti); di conseguenza, anch'esse si prolungano all'infinito. Data una qualsiasi geodetica, esistono **infinite geodetiche** che non la toccano mai (*parallele* in senso lato)

Se ci fate caso, dunque, esiste una differenza sostanziale tra la geometria sferica e le altre. La prima è "**finita**" o meglio: "**chiusa**", mentre le altre vanno all'infinito.

Adesso, però, basta di parlare di geometria pura e semplice, e torniamo all'universo. Da quanto detto, si capisce bene che, se fosse possibile misurare la somma degli angoli interni di un triangolo di dimensioni cosmiche, potremmo capire a quale geometria obbedisca l'universo nel suo insieme e non solo nelle vicinanze di una massa, laddove la Relatività costringe la geometria a curvarsi sfericamente.

Un primo tentativo in tal senso fu eseguito da Gauss attorno all'800: dovendo compilare una carta geografica precisa della Germania, e avendo perciò costruito una griglia trigonometrica affidabile, provò a capire se, all'interno degli errori di misura, le cime di tre montagne abbastanza distanti tra loro fossero i vertici di un triangolo esattamente euclideo, oppure no. Purtroppo per lui, e come sappiamo oggi, per rilevare differenze indicative rispetto a Euclide occorre lavorare con distanze enormemente maggiori, oppure in un campo gravitazionale davvero spaventoso, e dunque i suoi sforzi condussero ai soliti  $180^\circ$ . Veniamo perciò a tempi più recenti.

Ho già raccontato in precedenza come i geografi riescano ormai a misurare la più piccola deviazione non solo *sferica* dovuta al campo gravitazionale terrestre (parlo sempre delle correzioni relativistiche necessarie a far sì che il sistema **GPS** fornisca risultati attendibili).

Per quanto riguarda gli astronomi, anch'essi misurano da qualche decennio, e ormai con enorme precisione, gli effetti dovuti alla deformazione sferica dello spaziotempo in vicinanza di oggetti molto massicci. Ci verrebbe dunque da pensare quanto segue: poiché ogni massa curva in modo sferico lo spaziotempo nei suoi dintorni, e nell'universo si trovano un sacco di masse, anche quest'ultimo nel suo insieme dovrebbe conformarsi alla geometria sferica. Magari, il raggio di curvatura dell'universo in sé potrebbe essere enorme, per cui ci sembrerebbe *quasi piano* e al suo interno ogni massa rappresenterebbe un nodulino a curvatura maggiore.

Per molto tempo una soluzione del genere è stata favorita da un buon numero di cosmologi, poiché sembrava la più semplice compatibilmente con i dettami della Relatività generale: in quest'ottica l'universo avrebbe posseduto un raggio gigantesco ma *finito*. Nel senso che, se potessimo inviare un intenso fascio di luce ben collimata in una certa direzione, dopo un tempo sufficientemente lungo vedremmo quel fascio che ci torna indietro proprio alle spalle. Buffo, vero? La stessa, però, cosa succederebbe a un pianimale su una sfera, se ciò può aiutarci a capire il concetto. Certo: se l'universo fosse in espansione – come è in realtà – il raggio di luce di ritorno alle nostre spalle percorrerebbe un tratto di spirale... ma lasciamo

perdere, tanto è un esperimento che non si può fare.

È famoso il “lumacone cosmico”. Ve lo propongo in Figura 12.2 a titolo scherzoso. È auto-esplicativo.

D'altra parte, la Relatività generale ammette, per l'intero universo, anche curvatura nulla (euclideo) e perfino negativa (iperbolico). Di conseguenza non basta rifarsi a preconetti, ma occorre sperimentale e vedere cosa succede. Una pratica del genere è diventata tecnicamente possibile solo in tempi recenti, e penso sia utile seguire il corso dei ragionamenti che hanno condotto finalmente alla soluzione (o quasi) del problema della geometria cosmica, a partire da Einstein e fino a domani.

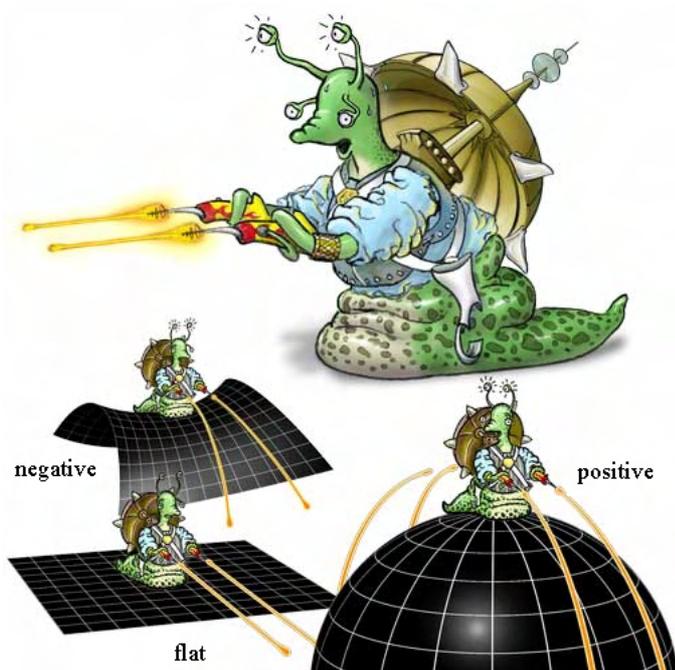


Figura 12.2

## 12.2) – Si gonfia, oppure crolla su se stesso?

Lasciamo da parte un momento (ma un momento solo) il problema della geometria dell'universo, e torniamo alle equazioni della Relatività generale, lasciando che sia proprio Einstein a risolverle per noi applicandole all'universo nella sua totalità. Già fin dal capitolo 3.2 conosciamo il risultato: o l'universo si sta espandendo, oppure contraendo, e il caso limite è quello di un universo che si espande all'infinito sempre più lentamente fino a fermarsi dopo un tempo anch'esso infinito, e quindi ricade su se stesso, ma sempre impiegando un tempo infinito.

Il quadro appena delineato è una conseguenza dell'essere la gravità sempre attrattiva, e per il momento vogliamo fare a meno della famigerata *costante cosmologica  $\Lambda$* , che dà origine a *forze repulsive*. Memorizzate pure quest'ultima frase.

In tale scenario, per capire quale sia la curvatura dell'universo, non sarebbe sufficiente constatare che oggi esso è in espansione. Potrebbe trattarsi di una fase temporanea che, a causa dell'attrazione gravitazionale generale, alla fine si esaurirà e sarà seguita da un nuovo collasso. Il ragionamento deve partire da molto più lontano: da quell'ipotetico caso limite di espansione all'infinito e successivo stop dopo un tempo infinito. Quali sono le condizioni *dinamiche* affinché possa verificarsi un caso del genere?

Qui è giocoforza incastrare il lettore sul concetto di *velocità di fuga* rispetto a un corpo celeste; ne abbiamo già discusso nella sezione 10.2, ma ora dobbiamo entrare in maggior dettaglio dovendolo applicare all'intero universo. Semplifichiamo a dismisura, ipotizzando che in tutto il cosmo esista solo la Terra. La formula di Newton che si riferisce alla forza di gravità afferma che quest'ultima diminuisce in proporzione al quadrato della distanza. Di conseguenza, per qualsiasi distanza eccetto quella infinita, essa non si annulla mai, e il nostro pianeta continua a esercitare un tenue vincolo diverso da zero su qualsiasi oggetto materiale. Ci siamo, fin qui?

Ebbene: ripetiamo esperimenti di lancio di oggetti verso l'alto per verificare – con alla mano il cronometro, la fettuccia metrica, il teodolite eccetera – cosa avviene. Prendiamo il solito sasso e scagliamolo con tutta la velocità che riescono a impartirgli i muscoli del nostro braccio. Salirà di una decina di metri e ricadrà. Uno sperimentatore accurato che abbia misurato i dettagli del lancio ci dirà come, via via che il sasso saliva, la sua velocità diminuiva a causa della forza di gravità, fino al momento in cui la velocità stessa andava a zero e quindi il sasso ricominciava a cadere di moto accelerato.

Ripetiamo l'esperimento, sostituendo una bocca da fuoco alla muscolatura del nostro braccio. Prima di ricadere, il proiettile raggiungerà una quota molto più alta: diverse centinaia di metri o anche più, secondo l'arma usata. Se lo sperimentatore è *davvero* accurato, si accorgerà che, al culmine della traiettoria, la forza di gravità che ha finito per riportare indietro il proiettile era un po' inferiore – pochissimo – rispetto a quella misurata al suolo. Tutto ciò è coerente con la formula di Newton, no?

Ricordate il cannone "Columbia" che, secondo Giulio Verne, doveva portare un proiettile fino al punto in cui la gravità lunare (che finora non abbiamo considerato) prendesse il sopravvento e lo catturasse? Secondo i calcoli di Impey Barbicane, riveduti e corretti dal

Capitano Nicholl, l'esplosione del pirossilo (o fulmicotone) avrebbe dovuto imprimere alla navicella un impulso iniziale di circa **11** km/s.

Lasciamo stare la Luna, che è entrata di straforo nel nostro discorso, e domandiamoci: cosa succede partendo con velocità ancora superiore? Intuitivamente, ci verrebbe da dire che, pur aumentando la velocità a piacimento, e poiché la gravità terrestre si estende comunque all'infinito, il proiettile raggiungerà distanze sempre maggiori ma, alla fine, non potrà fare a meno di tornare indietro. L'intuizione non ha fatto i conti assieme a Giulio Verne, e comunque non ricorda quanto avevamo già appreso nel capitolo 10.

Infatti, è pur vero che la gravità è sempre presente, ma ricordiamo che la forza che tira giù il proiettile diminuisce col quadrato della distanza. Se scrivessimo un paio di formule – e non ci penso neanche a propinarvele – troveremmo la famigerata velocità limite molto speciale, che definiamo “**Velocità di fuga  $V_f$** ”. Al disotto di questa, la ricaduta è inevitabile, ma se la superiamo il proiettile, pur continuando a rallentare mentre si allontana, riesce a vincere sull'attrazione e, quando raggiunge distanza infinita e quindi attrazione zero (dopo un tempo infinito, s'intende), mantiene ancora una certa velocità.

Di conseguenza ***non ricade***, e questo è il punto. Per il pianeta Terra, Barbicane aveva ragione e, infatti,  $V_f$  è esattamente 11,19 km/s. Ora, poiché nessun astronauta, e ben poche apparecchiature, resisterebbero a venir sparati a questa velocità da un cannone, i viaggi spaziali si avvalgono di razzi che, progressivamente, accelerano fino alla stessa velocità nel corso di alcuni minuti.

Avendo acquisito definitivamente (spero) il concetto di velocità di fuga dopo questo ripasso, possiamo tornare all'espansione dell'universo. Utilizzando un linguaggio ancora un po' troppo rudimentale, si potrebbe pensare che tal espansione si fermerà dopo un tempo finito, e tutto collasserà nuovamente su se stesso fino al “Big Crunch” – l'opposto del Big Bang – se la velocità con cui è ***esploso*** l'universo è inferiore alla  $V_f$  dell'universo medesimo preso nel suo insieme. In ogni caso, non occorre grande sapienza per capire che l'analogia, semplificata fino a questo livello, è scavata con l'ascia di pietra.

Tanto per dirne una: se la massa totale dell'universo fosse infinita, e se il Big Bang avesse scaraventato i ***pezzi di spaziotempo più lontani*** con velocità infinita, che senso avrebbe parlare di velocità di fuga? Dovremmo passare a un'analogia più raffinata, se volessimo capirci qualcosa.

E qui chiedo nuovamente pazienza al lettore ma so che, se seguirà il ragionamento che gli sto per propinare, alla fine gli si accenderà una lampadina nella testa come ad Archimede Pitagorico.

Il ragionamento corretto deve prendere in considerazione un volume d'universo grande, sì, ma finito. Per esempio, una sfera di cento milioni di anni–luce di raggio, poiché si presume (ed è abbastanza vero) che in un volume così enorme si possano eseguire ***medie*** indicative di com'è distribuita la materia nell'universo intero. In questa sfera, di conseguenza, ci saranno ammassi di galassie e grandi vuoti.

Calcoliamo anzitutto quanta massa ***M*** c'è, come somma della materia contenuta in tutte le galassie, più quella del gas intergalattico freddo, che non si può rivelare in luce visibile ma sappiamo misurare con i radiotelescopi (non ve lo dico per complicare il discorso, ma questo gas che non si condenserà mai in stelle è ben ***otto volte*** maggiore di quello costituente le stelle medesime). Giacché conosciamo il volume ***V*** della sfera, calcoliamo anche la densità

media della materia cosmica come rapporto  $M/V$ , e definiamola con la lettera greca  $\rho$ ; qui ancora non ci servirebbe, ma ci tornerà utile tra un po', intesi? E finora non credo di aver introdotto concetti che vadano oltre le possibilità di comprensione di un lettore medio. Oppure ho torto?

Se ho ragione, possiamo eseguire il passo successivo, che è anche il penultimo: poniamoci sulla *superficie* di questa enorme sfera ideale, proprio come se si trattasse della superficie di un pianeta di cui conosciamo massa e raggio. Con la stessa procedura usata da Barbicane per la Terra (e valida per ogni altro corpo celeste), sarà anche possibile calcolare la velocità di fuga  $V_f$  per un oggetto che si trovi in quella posizione. Non conosciamo forse massa e raggio dell'immane sfera?

Come vedete, passare dall'infinito universo a un suo volume finito è stato un buon trucco. Infatti, abbiamo ridotto il problema di sapere se l'universo si espanderà per sempre, oppure ricadrà su se stesso, dal confronto tra la sua *velocità di espansione* e la sua velocità di fuga  $V_f$ . Un momento, però: *quale* velocità di espansione? Bene: poiché abbiamo calcolato (almeno in linea di principio; i numeri ce li metteremo tra poco)  $V_f$  alla superficie di una sfera di cento milioni di anni-luce di raggio, e stiamo trattando questa sfera come se fosse un corpo celeste fittizio, la velocità di espansione dell'universo da confrontare con  $V_f$  sarà quella alla superficie della sfera. E mi spiego ancora.

Qual è il valore della costante di Hubble  $H_0$ ? Gli ultimi conti suggeriscono 22 km/s per ogni milione di anni-luce. Vale a dire: prendendo una sfera d'universo di cento milioni di anni-luce di raggio, la velocità con cui lo spazio alla *superficie* di questa sfera si allontana dal suo *centro*, si calcola come  $H_0$  moltiplicato per il raggio (sempre in milioni di anni-luce), e il risultato è **2200** km/s, che chiameremo per comodità  $V_{esp}$ . Questa è la velocità di espansione da confrontare con  $V_f$ .

In buona sostanza: se  $V_{esp} > V_f$  il cosmo seguirà a espandersi indefinitamente; se invece  $V_{esp} < V_f$  l'espansione dell'universo si fermerà tra qualche tempo, e seguirà la contrazione verso il Big Crunch. Se, con un bilanciamento perfetto,  $V_{esp} = V_f$ , ci troveremo nel caso limite in cui l'espansione continuerà all'infinito, ma sempre più lenta, per fermarsi e tornare indietro, ma comunque *dopo un tempo infinito*.

Alla fine, è venuto fuori che la cosa era più semplice di quanto potessimo temere, quindi mi affretto a complicarla. No, dico per scherzo: chiederò al lettore di mandare a memoria un altro simbolo, e vedremo che questo ci aiuterà molto, in futuro, a semplificare i concetti e arricchire il nostro Modello d'universo. Pronti?

Siccome conosciamo abbastanza bene (ci sono piccole discrepanze, ma per ora le lasciamo da parte) il valore numerico della costante  $H_0$ , supponiamo di voler calcolare quanto sia la densità cosmica *critica* – che definiremo  $\rho_C$  – tale per cui  $V_{esp} = V_f$ , e cioè l'universo riesca a espandersi come nel caso limite, il terzo discusso qui sopra, fino all'infinito e ritorno. In ogni caso, ancora non è questo il simbolo matematico da memorizzare, perché lo utilizzeremo subito, qui appresso, una volta sola e poi basta. Definiamo piuttosto  $\Omega_M$  – questo è, invece, il simbolo da tenere a mente d'ora in poi – come il rapporto tra la densità *vera* della materia (il pedice “M” significa proprio “materia”) e quella *critica* appena definita sopra; in altre parole:  $\Omega_M = \rho_M/\rho_C$ . Niente paura:  $\Omega_M$  ci dice semplicemente quanto conta *la materia* nel bilancio cosmico dal quale potremo dedurre la forma dell'universo.

Con questo, siamo giunti finalmente alla semplificazione tanto desiderata. D'ora in poi sapremo (con la complicità della Relatività generale che lega  $\Omega_M$  alla geometria cosmica in modo univoco), che se  $\Omega_M > 1$  vuol dire che c'è **un sacco di materia**, e perciò l'universo ha **geometria sferica** ed è destinato a ricadere su se stesso per forza di gravità. Se, al contrario,  $\Omega_M < 1$  l'universo è **troppo leggero**, e quindi ha **geometria iperbolica** per cui la sua espansione sarà infinita e oltre, mentre il caso  $\Omega_M = 1$  è quello limite: la densità della materia nell'universo è proprio **giusta giusta** per farlo espandere all'infinito, e poi tornare indietro, gratificandolo altresì di una bella, comprensibile, elegante **geometria euclidea**. Concepito in questo modo, il simbolo  $\Omega$  ci permette di semplificare un po' le cose come vi avevo promesso, no?

Ora, ho bisogno di lasciare il lettore col fiato sospeso per alcuni paragrafi, ma è tutto a suo beneficio. Gli astronomi hanno misurato abbastanza bene il valore di  $\Omega_M$ , o per lo meno ne sono abbastanza persuasi, ma prima di rivelarlo e di raccontare la storia quasi epica della sua misura occorre tornare un attimo alla geometria dell'universo. Ho appena affermato che, se  $\Omega_M > 1$ , la geometria è *sferica*; se  $\Omega_M < 1$  è *iperbolica*, e se  $\Omega_M = 1$  l'universo è *piano*, euclideo. Non posso, però, cavarmela con queste frasette, perché si può fare un sacco di confusione.

Partiamo dal caso  $\Omega_M > 1$ . Che cosa vuol dire che l'universo è sferico? Ci verrebbe in mente una sfera *sic et simpliciter*, con tutto l'universo contenuto dentro. Sbagliato: non è sferico il solo *spazio*, ma l'intero *spaziotempo*, e perciò bisognerebbe pensare a una **sfera a quattro dimensioni**, ma in pratica non si può, non più di quanto si riesca a visualizzare intellettualmente un tesseratto. Non tutto è perduto, comunque: si possono lo stesso capire alcune delle possibili conseguenze di un'eventuale sfericità dell'universo.

Tanto per dirne una, non è per niente scontato che un universo sferico nelle quattro dimensioni abbia un volume finito, come invece accade certamente per una sfera. Può benissimo essere infinito, pur mantenendo le sue caratteristiche di sfericità. Una di queste caratteristiche l'abbiamo accennata prima: le geodetiche sarebbero – in prima approssimazione, ma ci può bastare – di lunghezza finita, e quindi la luce percorrerebbe circoli immensi per tornare infine al punto di partenza, se trascuriamo l'espansione cosmica (ricordate il lumacone con le pistole laser).

Qualcuno potrebbe chiedere: «Allora, se guardassi dritto di fronte a me con un telescopio di enorme potenza e per un tempo abbastanza lungo, finirei per vedere la mia nuca?». Sempre in prima approssimazione, **sì**, però ricordiamoci pure che l'universo è in espansione e quindi, anche in un universo sferico, la luce non percorrerebbe traiettorie circolari, ma spirali di raggio sempre crescente. Di conseguenza, nell'**universo reale**, la risposta alla domanda di prima è negativa o meglio: la domanda è priva di senso.

D'altronde, è pur vero che in un universo del genere, destinato a ricadere su se stesso in un tempo finito, la curvatura dei raggi di luce sarebbe analoga alle *parallele* che il pianimale tracciava sulla superficie del mappamondo. E perciò, se potessimo misurare triangoli su distanze cosmiche, troveremmo che la somma degli angoli interni è **superiore a 180°**. Ricordate quest'ultima affermazione, per favore.

Perfino la definizione **universo piano**, nel caso in cui  $\Omega_M = 1$ , potrebbe suscitare qualche equivoco. Siccome a scuola si studia la geometria euclidea **bidimensionale**, e in pratica niente di quella **tridimensionale**, e cioè delle **figure solide** come il cubo, la sfera, il

tetraedro e così via, può succedere che, sentendo parlare di *universo piano*, ci venga in mente un universo *sottile*, una specie di foglio di carta esteso all'infinito, ma di spessore limitatissimo. Errore: *tutte e tre* le dimensioni vanno all'infinito, la luce segue linee rette, e la somma degli angoli interni di un triangolo quant'è? Non si sbaglia: **sempre e solo 180°**. Di nuovo: cercate di memorizzare quest'ultima informazione. Ah, scusate: tutte e *quattro* le dimensioni vanno all'infinito, tempo compreso.

Molti meno equivoci li incontriamo nel caso in cui  $\Omega_M < 1$ , e cioè con un universo *iperbolico*. Infatti, è così complicato che nessuno (a partire da Saccheri) prova neanche a immaginarlo. Neppure noi lo faremo se non per ricordare che, in questo caso, il percorso dei raggi di luce è divergente, e la somma degli angoli interni del triangolo cosmico è sempre **inferiore a 180°**. Anche questo è un concetto che ci tornerà buono tra un po'.

Finalmente, possiamo tornare alla battuta di caccia astronomica tesa a ricavare il valore reale di  $\Omega_M$ . Riepilogando:  $H_0$  l'abbiamo misurato, ed è circa **22** km/s per milione di anni-luce; il corrispondente valore di  $\rho_C$  – la densità necessaria a far sì che  $H_0$  coincida con la velocità di fuga rispetto all'universo stesso – lo possiamo calcolare in modo semplice in base alla legge di gravità, e non ve ne scrivo il valore perché non ci servirà a nulla. Cosa ci manca per conoscere la geometria e il futuro destino del cosmo?

Sembra semplice: occorre sapere qual è la *vera* densità  $\rho_M$  della materia nell'universo, per poter finalmente calcolare il rapporto  $\Omega_M = \rho_M/\rho_C$ . E qui siamo nelle grane, purtroppo.

## 12.3) – Ha ragione l’inventario o la bilancia?

Una curiosità storica, prima di raccontare com’è stato misurato il valore di  $\rho_M$ . Per molti decenni dopo il 1916, una gran quantità di cosmologi ha scommesso un po’ alla cieca che doveva essere *per forza*  $\Omega_M = 1$ , o forse appena appena *maggiore di 1*. E badate: molto prima che le tecnologie astronomiche rendessero possibile uno straccio di misura di  $\rho_M$ .

Ci si basava, piuttosto, su ragionamenti filosofici coinvolgenti una *simmetria* in senso lato. Riducendo all’estremo di banalità il discorso, riassumerò in questo modo: «Se nel Big Bang ha avuto origine una certa quantità di spazio, la materia esistente nell’universo non fa che rimangiarselo. Siccome spazio e materia sono collegati tra loro (e questo è il punto debole del discorso), *tanto spazio è stato generato nel Big Bang, tanto se ne mangeranno le masse.*».

Detto in altro modo: l’espansione dell’universo è bilanciata esattamente dalla gravità, e perciò  $\Omega_M = 1$ . Magari un tantinello maggiore, così abbiamo un universo che si espande e poi ricade su se stesso in un tempo finito, rigenerandosi da sempre e per sempre. È un ragionamento elegante ma, come spesso avviene quando si ha a che fare con quantità infinite, i termini della questione sono formulati in modo un po’ vago, e hanno bisogno di una revisione, come vedremo tra un po’.

Torniamo dunque a  $\rho_M$ . Anche al più sprovveduto dei miei diciassette lettori (stanno sempre diminuendo), sarà chiaro che la misura di questa quantità non si potrà eseguire direttamente, in laboratorio. Perciò, gli astronomi hanno inventato un modo indiretto che, a prima vista, può sembrare efficace.

Si fa così: bisogna catalogare tutti gli oggetti osservati nell’universo, e poi valutare in qualche modo la massa di ciascuno di essi. Per quanto riguarda le stelle, a esempio, si mutua dall’astrofisica una relazione piuttosto precisa tra la luminosità e la massa per cui, nota la prima dalle osservazioni, si può valutare in buona approssimazione la seconda.

Poi, una volta misurata la distribuzione delle masse nello spazio vicino a noi, e proseguendo con determinazioni della densità media sempre più lontano, fino ad abbracciare volumi di universo via via crescenti, si continua a calcolare  $\rho_M$  finché si arriva a una cifra che non cambia più all’aumentare del volume e questa, nelle intenzioni, dovrebbe essere, *vuoto per pieno*, proprio la  $\rho_M$  cosmica. La metodologia che vi ho appena descritto è definita: “**Inventario**” per ovvi motivi. Sapendo quanti oggetti ci sono, e il peso di ciascuno, quello totale è la somma dei pesi dei vari oggetti inventariati. Continuo a usare “*peso*” invece di “*massa*”, che è fisicamente sbagliato, ma il concetto dovrebbe essere chiaro lo stesso.

Applicando quindi l’inventario, già molti decenni fa si giunse a risultati che, a quell’epoca, parevano un po’ *preoccupanti*, perché non si conformavano al pregiudizio di allora. La densità di materia nell’universo era davvero bassa. Pur considerando che molti oggetti celesti non emettono luce (stelle morte, pianeti, nubi fredde di gas che sono la più gran parte della materia, e così via) e che bisogna includerli lo stesso nell’inventario, nemmeno si riusciva a raggiungere il 10% della densità critica. Vale a dire:  $\Omega_M \leq 0,1$ . Addirittura, qualcuno arrivava a  $\Omega_M \leq 0,06$ . Incredibile!

Ciò dovrebbe condurre a un universo sicuramente iperbolico, in espansione un po’ rallentata ma infinita. Comunque, già allora le cose non si presentavano così semplici (e

quando mai lo sono?). Per spiegare meglio il problema in cui si trovavano gli astronomi, mi servirò di un brevissimo apologo: quello della Polizia stradale.

Immaginiamo che quest'ultima blocchi un camion su autostrada, e chiedi al guidatore la bolla di accompagnamento che, per legge, elenca le merci trasportate. Per semplicità supponiamo che si tratti di elettrodomestici, e dunque di casse con un volume e un peso ben precisi. Dovrebbero esserci un certo numero di frigoriferi, di lavatrici eccetera, ed è quindi possibile calcolare il peso del camion a pieno carico, includendo ovviamente il camion stesso.

I poliziotti fanno i conti sulla base dell'inventario (come facevano un tempo gli astronomi) e giungono a un totale di *cinque* tonnellate incluso il veicolo. A questo punto, invitano il guidatore a spostare il camion sulla piattaforma di pesa che si trova nella piazzola di sosta poco più avanti. La misura diretta fornisce un risultato pari a *sette* tonnellate. Pensate forse che la Polizia, archiviate le cifre, dia il via libera al camionista, per proseguire con due tonnellate di coca, T4 e kalashnikov nascosti a bordo?

L'analogia si riferisce a un modo molto più diretto dell'inventario, di cui dispongono i poliziotti–astronomi per *pesare* l'universo in senso stretto. Si tratta di osservare le conseguenze della forza di gravità esercitata dalle masse che lo costituiscono. Vediamo in che modo prendendo per esempio la nostra Galassia, poiché si presume che sia ben osservabile dai più potenti strumenti astronomici dei nostri giorni (ed è verissimo, almeno da quando esiste il satellite astrometrico **GAIA**).

Infatti, di là da ogni ragionevole dubbio, la massa degli oggetti luminosi e oscuri che ne fanno parte è conosciuta con buona precisione. Ora, il punto è il seguente: conoscendo la massa della Galassia valutata secondo il metodo dell'inventario, le leggi di Newton consentono di calcolare senza incertezze le velocità orbitali dei diversi oggetti celesti che la compongono, a qualunque distanza questi si trovino rispetto al Buco nero ospitato nel baricentro galattico.

Cifre alla mano, si misurano adesso le velocità orbitali usando l'effetto Doppler che, come sappiamo, è precisissimo. Purtroppo, si giunge alla conclusione scientificamente certa che tali velocità sono assai maggiori di quanto previsto dalla teoria, almeno considerando tutta la materia che *si vede*, via via che ci si sposta verso le regioni più esterne. Ergo: la massa della Via Lattea è molto maggiore di quanto si calcola per mezzo dell'inventario. Gli astronomi non sono come i poliziotti, e quindi non ci intimeranno di scendere dalla Galassia con le mani dietro la testa, ma il problema non è indifferente.

Questa (apparente?) contraddizione fu scoperta dall'astronoma Vera Rubin, e mi piace ricordarla poiché fu una delle tante persone che, oltre ogni dubbio, meritavano abbondantemente un Nobel, ma non lo ottennero mai.

Astronomi e fisici affrontarono il problema della "*gravità mancante*" seguendo due linee di pensiero diverse: o non vale la legge di Newton quando le distanze diventano molto grandi, o il metodo dell'inventario fornisce risultati sbagliati. Discutiamo anzitutto la legge di Newton.

Tale legge, come vi ho ripetuto fino alla nausea, non è altro che un caso particolare della Relatività generale e, almeno fin dove riusciamo a misurare, le equazioni di Einstein hanno sempre fornito risultati in accordo con quelli sperimentali con una precisione quasi incredibile. Il dubbio, comunque, poteva restare se riferito a distanze cosmiche, perché le misure eseguite fino a quell'epoca si riferivano ancora, sempre, a oggetti *vicini tra loro*.

Perciò, alcuni fisici provarono a modificare un po' la legge di gravità, introducendo termini aggiuntivi, trascurabili fin dove si può sperimentare, mentre la loro importanza cresce su scale di distanza enormi. In tal modo, si cercò di rendere conto delle velocità orbitali osservate nella Galassia senza modificare l'inventario.

Almeno fino a oggi, comunque, ogni tipo di modifica escogitata finirebbe per richiedere la comparsa di effetti collaterali che, invece, non sono mai stati osservati. È come prendere le medicine per un disturbo: lo fanno passare, ma di solito ne spunta fuori un altro dovuto ai farmaci. In sostanza, ormai quasi tutti i cosmologi sono convinti che la soluzione a questa contraddizione non possa essere cercata nella legge di gravità, pur se una retroguardia non demorde.

Di conseguenza, si è cominciato a pensare che ci deve essere qualche problema molto grossolano coll'inventario. E non a caso dico "**grossolano**" perché, passando da una singola galassia a gruppi interi, e quindi avvinandoci alla *vera*  $\rho_M$  dell'universo, la misurazione diretta della massa totale eseguita per mezzo delle velocità orbitali finisce per essere circa  $6 \div 7$  volte superiore a quella che si ricaverebbe dall'inventario. Deve esserci della "**materia oscura**" in senso stretto (non la vediamo) e lato, e deve essercene tanta, ma ancora non sappiamo di cosa si tratti, pur se ne discuteremo (invano) nelle Sezioni III e IV.

Comunque sia, a questo punto posso finalmente scrivere i valori definitivi, o per lo meno quelli sui quali si è ormai raggiunto un ragionevole consenso. Secondo l'inventario rivisitato e corretto in base alle ultime osservazioni, si trova  $\Omega_M \cong 0,04$ . Quando, invece, *pesiamo* l'universo per mezzo della forza di gravità, il risultato è ancora un miserabile  $\Omega_M \cong 0,28$ .

Fin qui ho solo accennato di sfuggita a un tipo di tecnica osservativa molto difficoltosa, ma di enorme potenza, di cui possono disporre gli astronomi dall'inizio di questo secolo. Si tratta della cosiddetta "**lente gravitazionale**". Cercherò di spiegarla in poche parole senza pretendere di essere esaustivo.

Ricordate che, secondo la Relatività generale, i raggi di luce seguono le geodetiche locali e che, alla presenza di materia ed energia, le geodetiche medesime s'incurvano? Era il trucco escogitato per cercare Buchi neri isolati *vicini*, ma ora estendiamo a distanze abbondantemente extragalattiche.

Ebbene: se esistesse una galassia davvero lontana, e tra lei e noi ci fosse una massa molto grande (per esempio un gruppo di galassie davvero enorme) che curvasse in modo sensibile lo spaziotempo nei suoi dintorni, la luce proveniente dalla galassia sullo sfondo sarebbe deviata. A causa di questa deviazione della luce, quando questa giungesse alla fine ai nostri strumenti, vedremmo l'immagine della galassia in oggetto (quella lontana) come se fosse passata attraverso una lente deformante.

Ormai è diventato possibile studiare osservativamente questo effetto che, si noti bene il punto, ha a che fare *solo con la gravità* e, di conseguenza, con la materia – *tutta la materia pesante* – che c'è nell'universo. Inoltre, poiché si lavora su distanze cosmiche, sono proprio queste le osservazioni che più facilmente spiazzano le teorie che vogliono correggere la Relatività generale, dato che i risultati sperimentali, almeno finora, sembrano rigorosamente conformi a quanto previsto dalle equazioni di Einstein. Le quali, con la rivelazione delle prime onde gravitazionali, hanno fatto (scusate) un pernacchio a molte teorie alternative.

Di conseguenza, il lettore capirà bene che, per mezzo delle lenti gravitazionali, deve essere possibile ricavare il valore *vero* della densità di materia nell'universo, *in modo del tutto indipendente* da quanto si può fare con i due metodi dell'inventario, e delle velocità orbitali delle stelle o addirittura delle intere galassie attorno al baricentro del loro ammasso. I risultati sono ormai altamente precisi e, al momento in cui scrivo, il valore numerico di  $\Omega_M$  calcolato grazie all'osservazione di lenti gravitazionali si attesta nell'intervallo tra **0,27** e **0,29**. In sostanza, il valore di  $\Omega_M$  cui dobbiamo credere è quello ottenuto con i due sistemi differenti di *pesa diretta*, e cioè: 1) la lente gravitazionale e 2) le velocità orbitali, senza neanche bisogno di sapere cosa stiamo pesando. In quel famigerato numero, **0,28**, abbiamo infilato dentro tutto, vale a dire:

- la materia che “*si vede*” (o, per lo meno, quella “*normale*” che sappiamo esserci, più il gas intergalattico che si “vede” solo con i radiotelescopi), indicata col pedice “**V**”. Con questa si arriva soltanto a  $\Omega_V \cong 0,04$ ;

- la materia che “*non si vede*”, e non sappiamo cosa sia, ma solo che pesa e dunque deve essere una forma di materia “*oscura*” e non “*normale*” come la precedente, e la indichiamo col pedice “**O**”; questa contribuisce per  $\Omega_O \cong 0,24$ .

Di conseguenza, sommando la parte *visibile* e quella *oscura*, arriviamo al valore di  $\Omega$  per tutta la “*materia*”, indicato sempre col pedice “**M**”:  $\Omega_M = \Omega_V + \Omega_O \cong 0,28$ .

Se il lettore è un po' sconcertato, sappia che pure i cosmologi, e i fisici in generale, lo sono. In fin dei conti, non abbiamo ancora usato violenza a Galileo perché, pur senza mai avere *osservato* in senso stretto la *massa mancante* o *materia oscura*, almeno abbiamo *misurato* i suoi effetti gravitazionali. E, se ci pare riduttivo dover ammettere di aver *capito abbastanza bene*, in ben quattro secoli di ricerca scientifica, cosa sia solo il **15%** della materia gravitante, è ancora presto per strapparci i capelli: ben peggio succederà tra poco.

Per ora, vorrei solo notare che ho evitato di concludere che l'universo è *iperbolico tout court* malgrado, secondo le equazioni di Einstein, così dovrebbe essere. Eppure, in una sezione precedente non ho fatto che ribadirlo: se  $\Omega_M < 1$  ciò comporta, per l'universo, una geometria iperbolica. Perché sono reticente ad affermarlo in maniera esplicita?

Perché qui ci dobbiamo confrontare con la natura della ricerca scientifica. Ci sembra di aver appena risposto a una domanda importante («Quale sarà il fato ultimo dell'universo? Espansione infinita»), e subito ci rendiamo conto che la domanda stessa era stata posta in termini non del tutto corretti. Infatti, appena ottenuta la risposta – o così crediamo –, le osservazioni astronomiche ci pongono di fronte a un'altra evidenza cui nessuno aveva mai pensato in precedenza. Per la precisione, la tecnologia dei nostri giorni ci mette in grado di eseguire un tipo completamente diverso – e definitivo – di misura cosmologica.

Si tratta quanto segue. Per dirimere ogni dubbio sul *vero* valore di  $\Omega$ , sappiate che è ormai possibile misurare la somma degli angoli interni di un triangolo cosmico, e con precisione enorme. Lo abbiamo fatto, e il risultato è stato che...

## 12.4) – Dove avevamo ficcato Euclide?

Come si fa a misurare direttamente la geometria dell'universo? C'è bisogno di un qualche oggetto che agisca come *righello* la cui lunghezza  $R$  sia a noi conosciuta. Dopodiché, dovremo trasportare questo righello a una distanza  $L$  anch'essa perfettamente nota, e misurare con cura l'angolo di vista. Osserviamo la Figura 12.3 a), e capiremo meglio il resto del ragionamento.



Figura 12.3 a)

Se la geometria dell'universo nel suo insieme – lasciando da parte effetti come le lenti gravitazionali, che agiscono su scala piccola rispetto a quella cosmica – è *piana* nel senso di *euclidea*, allora la luce dagli estremi del righello, viaggiando lungo le geodetiche (in verde, a tratto pieno) che in questo caso sono *linee rette*, raggiungerà l'osservatore O, posto sulla Terra, secondo un angolo di vista facilmente calcolabile con le formulette che abbiamo imparato a scuola. Questo è il caso in cui  $\Omega_T = 1$ : il pedice "T" ci dice che il valore di  $\Omega$  è quello "totale" dell'universo, e per il momento neppure ci domandiamo *cosa* conduca a quel *totale*. La somma degli angoli interni del triangolo cosmico, in ogni caso, è *pari a 180°*.

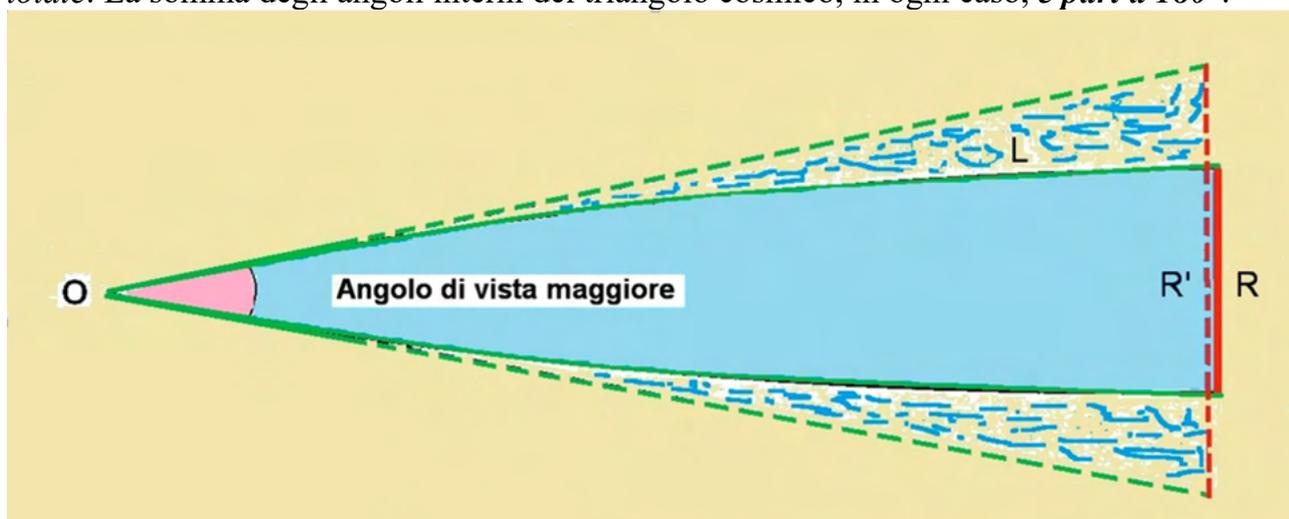


Figura 12.3 b)

Adesso ripetiamo il ragionamento, ma stavolta supponiamo che l'universo nel suo insieme abbia *curvatura sferica*, sarebbe a dire  $\Omega_T > 1$ . Se così fosse, i raggi di luce che partono dai bordi del righello (sempre in verde, a tratto pieno), seguendo geodetiche a curvatura sferica come in Figura 12.3 b), giungerebbero all'osservatore sotto un angolo di vista maggiore rispetto al caso euclideo. Se l'osservatore prolungasse idealmente il percorso di questi raggi fino alla distanza  $L$  (le due linee rette tratteggiate, sempre in verde), si renderebbe conto di "vedere" una lunghezza del righello  $R'$  superiore a quella  $R$  che, al contrario, lui sa essere *giusta*. Per questa ragione, concluderebbe di vivere in un universo a curvatura sferica, in cui la somma degli angoli interni del triangolo cosmico è **maggiore di  $180^\circ$** . Spero che in prima approssimazione il ragionamento sia chiaro anche per questa seconda circostanza.

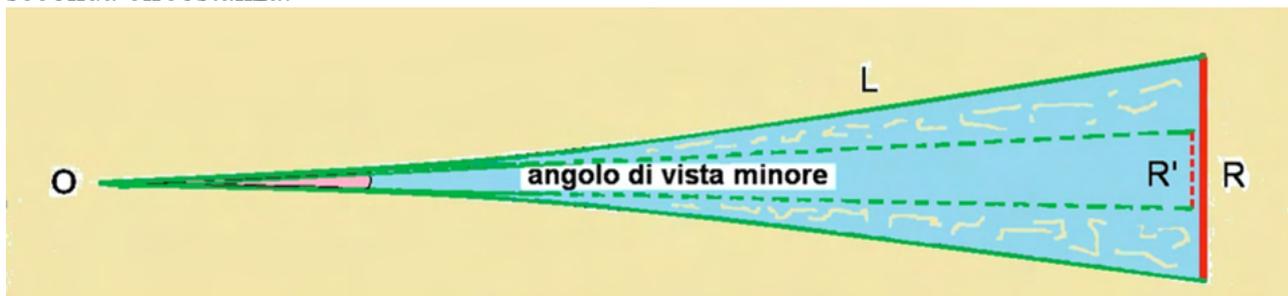


Figura 12.3 c)

Il terzo caso da considerare è ovviamente quello di un universo con  $\Omega_T < 1$ , a *curvatura iperbolica*, come sembrerebbe dover essere quello *reale*, stante la relativa scarsità di materia. Come si vede in Figura 12.3 c), le geodetiche che conducono fino all'osservatore i raggi di luce che partono dai bordi del righello sarebbero curvate all'opposto, rispetto al caso precedente, e alla fine l'angolo di vista sarebbe minore che in geometria euclidea. L'osservatore nel punto  $O$ , proiettando in avanti in linea retta per una distanza  $L$  i raggi che entrano nel suo occhio (sempre quelli verdi, tratteggiate), giungerebbe a calcolare una lunghezza del righello  $R'$  minore di quella che lui sa essere vera,  $R$ , per cui si renderebbe conto di vivere in un universo iperbolico in cui la somma degli angoli interni del triangolo cosmico è **inferiore a  $180^\circ$** .

In sostanza, le considerazioni che permetterebbero di conoscere il valore di  $\Omega_T$  se, di fatto, avessimo misurato questi famigerati triangoli cosmici veri e propri, sarebbero abbastanza semplici. Ripeto per non equivocare: potendo disporre davvero di questo benedetto righello standard, e sapendo da che distanza lo osserviamo, misureremmo direttamente la somma degli angoli interni del triangolo, da cui il valore di  $\Omega_T$ .

Il lettore, da me sollecitato oltre misura, ha di certo fatto caso che, nella precedente discussione sulla geometria cosmica, ho scritto  $\Omega_T$  e non  $\Omega_M$ . Una complicazione non necessaria? No: un motivo c'è, molto importante, e ci arriveremo tra breve. Prima di parlarne, però, è necessario chiarirsi le idee su righelli e distanze cosmiche, per capire se ha senso cercare di eseguire le misure geometriche dirette appena discusse. Vedremo che ha pienamente senso. Per giungere a tanto, però, occorre un inciso su un argomento che *sembra* solo una curiosità per esperti. "Sembra", ma non lo è.

In una parete di fuoco lontana, tanto tempo fa...

Il Big Bang, esplodendo in modo tale da dare origine allo spaziotempo, alla materia e all'energia, è stato un avvenimento assolutamente *omogeneo e simmetrico*? O, ponendo la domanda in modo leggermente diverso: fin dai primissimi istanti di vita dell'universo, la materia e l'energia erano contenute nello spazio in modo *uniforme*? A posteriori possiamo rispondere di no, poiché altrimenti non si sarebbero formate le galassie, gli ammassi di galassie e, soprattutto, l'universo attuale non avrebbe avuto la struttura a *schiuma* di cui abbiamo accennato in un precedente capitolo.

E qui devo chiedere al lettore un momentaneo atto di fede: prometto che nella Sezione III, parlando della Meccanica Quantistica saranno chiariti i motivi di questa mancanza di omogeneità. Anzi: spiegherò nei limiti del possibile perché le cose non sarebbero potute andare diversamente. Purtroppo, quando ci avviciniamo al Big Bang, la Meccanica Quantistica è assolutamente propedeutica, e noi la attaccheremo solo nella prossima Sezione. Per ora, contentiamoci di acquisire come nozione generale la *non omogeneità* nella distribuzione cosmica della materia, fin da età dell'universo così microscopiche che tacere è bello (per ora).

Lavoriamo, dunque, su questo concetto: nell'universo assai giovane ma forse (probabilmente, ma questo è un pregiudizio dell'autore) già infinito, esistevano piccole regioni in cui la materia era più densa, altre di densità minore. Calcolando l'evoluzione temporale di tali regioni, si evince come quelle a maggior densità abbiano continuato a estendere la loro influenza gravitazionale alla velocità con cui si propaga la stessa forza di gravità, che è proprio quella della luce.

In che modo tutto ciò ha influito sull'evoluzione successiva del cosmo? Per semplicità, diciamo che la gravità locale ha *richiamato altra materia*, e frenato maggiormente l'espansione delle zone a densità più alta rispetto a quelle a densità più bassa. Insomma: *dove già all'inizio c'era più materia, ancor più se n'è accumulata; dove ce n'era poca, si è diluita ancora di più*. «A chi ha sarà dato, e a chi non ha sarà tolto pure quello che ha.» Vi ricorda qualcosa? *L'Ufficio delle imposte*, ovviamente.

Il discorso, però, non finisce qui. Il passo successivo è cercar di capire se, e come, all'epoca della *ricombinazione* tra elettroni e nuclei atomici, e cioè quando l'universo è diventato trasparente alla luce, ci siano state differenze tra le zone a densità alta e quelle a densità bassa. È il ragionamento già riportato in 11.4), e spero non me ne vogliate se lo richiamo a questo punto, perché è davvero molto importante.

Ce ne sono state, di differenze, e il motivo è semplice: *maggiore è la densità, più alta è la temperatura*. E tutto ciò è dovuto al calore liberato durante la contrazione di materia in quella regione. Di conseguenza, nelle zone più dense e calde, il tempo necessario a raffreddarsi fino alla ricombinazione è stato (di poco) maggiore che in quelle rarefatte e fredde. Si arriva perciò alla conclusione che l'universo *non è diventato trasparente dovunque* nello stesso momento, come avevamo già capito. Ancora un po' di pazienza, perché non possiamo fermarci a queste semplici considerazioni: manca una conclusione importante su come tutto ciò abbia determinato l'apparenza delle strutture che vediamo nella parete di fuoco che ci circonda.

Ora: se le regioni più dense sono diventate trasparenti *qualche tempo dopo* rispetto a quelle meno dense, nello spessore *diverso da zero* della parete di fuoco esse saranno anche leggermente *più vicine a noi*. Infatti, se a un certo punto la parete di fuoco, in media, *si*

*spagne*, le regioni dense restano *accese* ancora per un po'. Dopodiché, quando *si spengono* anche queste ultime, il resto della parete si è già *allontanato un po' di più* nei loro confronti.

Se siamo giunti a ricordare questo punto, ecco che arriva il resto: le zone più vicine della parete di fuoco devono anche *sembrarci* leggermente *più calde* rispetto alle altre. Infatti, per espansione generale dell'universo, seguendo per semplicità la pura e semplice legge di Hubble, più distante è un oggetto, maggiore è la sua velocità di allontanamento, e dunque maggiore anche il suo *arrossamento* (raffreddamento apparente) per effetto Doppler. Le zone più dense, essendo più vicine, ci appaiono leggermente più calde, e lo avevamo già capito nel capitolo precedente. Continuo a chiedere scusa per la ripetizione, ma se non teniamo a mente questi indizi non riusciremo a proseguire.

Insomma: la parete di fuoco, per quanto molto omogenea, non lo è al **100%**. Se misuriamo con sufficiente precisione, ci accorgiamo che essa appare come un insieme di macchie più calde su zone più fredde. Le differenze di temperatura sono minime, di soli *settanta milionesimi* di grado rispetto ai **2,73 °K** della media, ma ormai siamo in grado di misurarle, e con molta precisione.

Fine del lungo inciso. E ora chiediamoci: abbiamo speso tutti questi paragrafi solo per rinforzare con altra colla un pezzetto del Modello d'universo che già avevamo montato? E cioè che la parete di fuoco è un po' butterata? Non eravamo forse partiti alla ricerca del righello cosmico necessario a misurare la geometria dell'universo? Certo. Il righello sono proprio *le macchie calde sulla parete di fuoco*. Come sarà mai?

Il dato di fatto essenziale, è che siamo in grado di calcolare le dimensioni assolute delle macchie calde. La fisica e la matematica coinvolte non sono per nulla banali, ma almeno in prima approssimazione il ragionamento è semplice.

Abbiamo già affermato che l'influenza gravitazionale degli addensamenti usciti direttamente dal Big Bang si è propagata alla velocità della luce. Quanto tempo hanno avuto, le macchie calde, per accrescere le loro dimensioni, prima di congelarsi per l'eternità sulla parete di fuoco? Lo sappiamo: circa **380.000** anni. E perciò, quale sarà il raggio *medio* delle macchie calde, in valore assoluto? *Circa 380.000 anni-luce*.

Abbiamo finalmente il righello di dimensioni note; anzi, ne abbiamo migliaia, distribuiti su tutta la sfera celeste, e sappiamo perfino quanto sono distanti da noi: circa **13,77** miliardi di anni-luce. Tutto quel che ci serve per misurare direttamente il triangolo cosmico, come nelle Figure 12.3 a), b) e c). Osserviamo per mezzo di esperimenti accurati le dimensioni angolari sotto le quali ci appaiono questi righelli, misuriamo quindi la somma degli angoli interni del triangolo cosmico e, alla fine, conosceremo qual è la geometria dell'universo, col corrispondente valore di  $\Omega_T$ . Non mi pare una conclusione da poco, no?

Alla fine degli anni '60 del secolo scorso, un satellite (IRAS) permise una prima misurazione, ancora molto rudimentale, di  $\Omega_T$ . I risultati erano compresi, all'incirca, tra **0,6** e **1,3**. Comunque, *molto maggiori di  $\Omega_M$* . Le incertezze erano grandi ma molti scienziati furono sorpresi da un fatto: pur con tutte le cautele, i numeri in gioco erano compatibili con un valore di  $\Omega_T \sim 1$ . Che tutto ciò avesse qualche significato?

Nel 1998, un pallone lanciato dall'Antartide fino a **42** km di altezza osservò per la prima volta un pezzetto della parete di fuoco con enorme accuratezza. Si trattava di un esperimento in cui la collaborazione dell'Università di Roma – La Sapienza fu decisiva.

Risultati: in buona approssimazione,  $\Omega_T$  doveva essere compreso all'incirca tra **0,95** e **1,05**. Impressionante, vero?

Nel 2001 fu lanciato il satellite WMAP con lo scopo esplicito di mappare in dettaglio la parete di fuoco la quale, con queste osservazioni, è finalmente rientrata in maniera definitiva nel regno galileiano della *osservabilità* (con mezzi un po' costosi e mirati, si riesce a *vedere* tutto l'universo, fino al limite estremo, e cioè *all'orizzonte* di quanto è teoricamente raggiungibile con radiazione elettromagnetica). I risultati finali sono stati comunicati nel 2010:  $\Omega_T$  è compreso tra **0,99** e **1,02**. Insomma, l'universo è con buona approssimazione **piano, euclideo**. Non aggiungo l'immagine finale di WMAP, perché è fin troppo popolare.

Nel 2009 è stato lanciato il satellite PLANCK con lo scopo di raffinare ulteriormente le scoperte di WMAP, e dirci – per giunta – se l'universo ha davvero attraversato una certa fase, definita *inflazione*, nei suoi primi istanti di vita. Come vedremo più avanti, se l'inflazione sarà confermata, la cosmologia e la fisica di base faranno un passo avanti gigantesco.

I primi risultati di PLANCK sono apparsi nel 2013, e altri ne sono seguiti nel 2015, e gli ultimi e definitivi nel 2018. PLANCK ha trovato che... bene: per il momento diremo solo che ne ha trovate delle belle, e prima di aggiungerle al nostro Modello di universo dovremo digerire la Meccanica Quantistica. In ogni caso, per quanto riguarda  $\Omega_T$ , possiamo dire che, se il suo valore si discosta da **1**, è per meno di  $\pm 0,006$ . Evviva Euclide!

È stato un *tour de force*. Ciascun ragionamento, preso a sé, non era di una difficoltà spaventosa. Molto più difficile non perdere il bandolo della matassa mentre mettevamo assieme il tutto, per giungere a una conclusione che potrebbe a buon diritto lasciarci sbalorditi. Non era forse  $\Omega_M \cong 0,28$ ? Anzi: con i nuovi dati siamo arrivati a  $\Omega_M \cong 0,29$ . E allora, da dove arriva quella frazione di  $\Omega$ , il cui valore è  $1 - 0,29 = 0,71$ , che manca per arrivare a  $\Omega_T = 1$ ?

Insomma: il risultato delle misure è quest'ultimo e non ci sono vizi di logica o errori strumentali nascosti. Abbiamo imparato che i fatti sono fatti, si accettano senza fare storie, e non ci si meraviglia se Madre natura ha più fantasia di noi. Ora ci troviamo di fronte a due costatazioni non suscettibili di negazione.

La prima: misurando direttamente la forza di gravità esistente nell'universo, quella dovuta alla materia visibile o invisibile, troviamo  $\Omega_M = 0,29$ . La seconda: osservando con cura la geometria dell'intero universo, abbiamo  $\Omega_T = 1$ . Dov'è che abbiamo sbagliato? Perché è ovvio che: o siamo noi a sbagliare o, nel migliore dei casi, non vediamo *tutto* quel che c'è.

La risposta preliminare è che non riusciamo a individuare alcun errore sperimentale di principio; dunque, verosimilmente non stiamo sbagliando da nessuna parte. E allora, ragioniamo di fino: ricordate l'inizio del capitolo 12.2, allorché riprendemmo le equazioni della Relatività generale? C'era una frase importante: “per il momento vogliamo fare a meno della famigerata *costante cosmologica*  $\Lambda$ , che dà origine a *forze repulsive*”.

Certo, bisogna ammettere che aggiungere al quadro generale pure questa benedetta  $\Lambda$  può sembrare fastidioso. C'è un *però*, comunque: e se fosse necessaria? Se l'apparente contraddizione di cui sopra potesse trovare soluzione soddisfacente solo immettendo pure  $\Lambda$  nelle equazioni di Einstein? Forse, la costante cosmologica non fu il più grande errore scientifico del genio di Lipsia: ne commise altri, e assai gravi ma molto intelligenti (e “seminali”, come si dice in fisichese), e ne parleremo.

## 12.5) – L’espansione accelerata

Facciamo il punto della situazione. Il Modello d’universo si distende all’infinito seguendo un traliccio i cui tubolari si possono incurvare un po’ in piccole regioni, ma su grande scala sono rettilinei, e s’intersecano a  $90^\circ$  come previsto dalla geometria di Euclide. Infatti, il valore di  $\Omega_T$  che si ricava dalle misure dirette è praticamente **1** e, secondo i cosmologi (che non sono *complotalisti*), deve probabilmente esistere qualche legge di natura ancora sconosciuta che lo inchioda a questa cifra. Ciò è molto superiore al valore **0,29** che si ricava quando *pesiamo* direttamente l’universo.

Eppure, già sappiamo che perfino questo misero **0,29** ci costringe a un primo salto nel buio, poiché la materia *visibile* in senso lato, quella fisicamente conosciuta, raggiunge al massimo un totale di **0,045**, e quindi dobbiamo ipotizzare una qualche forma di *materia oscura* finora mai osservata direttamente.

Ma per arrivare a  $\Omega_T = 1$  manca un buon **0,71** e, per di più, sappiamo che questa “*roba*” in senso lato *non può essere materia, perché non pesa!* Altrimenti, tutto sarebbe stato individuato dalla pesa diretta per mezzo della gravità. Che si tratti di un qualche tipo di energia sconosciuta? Eppure, il termine *A* nelle equazioni di Einstein può essere interpretato proprio come un *campo di energia costante*, che pervade tutto lo spazio, e contribuisce a determinare il valore di  $\Omega$  non diversamente da quanto fa il termine in cui si prende in considerazione la materia.

Se così fosse, il valore di  $\Omega_T$  sarebbe dato dalla somma tra  $\Omega_M$ , dovuto alla materia, e  $\Omega_A$  relativo all’energia – sconosciuta – che sfugge alla gravità. Un qualcosa che i cosmologi non si aspettavano ma che, comunque, almeno sul piano matematico non stravolge la Relatività generale.

In ogni caso, bisogna ragionare meglio sul perché abbiamo subito fatto ricorso a *A* per questa nuova  $\Omega$ . Qual era il significato originale di *A* nelle equazioni di Einstein? Il nostro se ne serviva per cercare di non far collassare l’universo su se stesso: *A* era dunque una specie di “*anticurvatura*” che spiana l’universo o, se preferite, *il lato oscuro della forza di gravità* (solo di quella); una *repulsione spazio–spazio* che si oppone all’*attrazione materia–materia*. Seguendo la nomenclatura dei cosmologi, diremo che il termine *A* tiene conto della presenza – dovunque – della cosiddetta “*Energia oscura*”.

Ipotizziamo, dunque, che nell’universo esista anche questa energia oscura, la cui manifestazione pratica si concretizza in una forza repulsiva tra diverse regioni dello spazio, per ora non meglio precisata se non in termini matematici, come coefficiente nelle equazioni di Einstein, e che il suo contributo sia sufficiente a portare  $\Omega_T$  fino a **1**.

In fisica si procede proprio così: si parte da una “ipotesi di lavoro”, che in genere è la più semplice fra le tante possibilità suscettibili di spiegare qualche fatto sperimentale ancora non chiarito, e si scopre che le conseguenze dell’ipotesi condurrebbero al verificarsi di altri fatti, al momento non ancora osservati. Gli sperimentatori si gettano quindi alla loro ricerca e, se questi fatti non si trovano, l’ipotesi di lavoro si getta via e si sostituisce con un’altra. Se, invece, si riesce a individuare sperimentalmente i fatti cercati, allora vuol dire che l’ipotesi potrebbe avere un certo valore, magari solo come modello di prima approssimazione alla realtà, e bisogna continuare a cercarne conferme o smentite.

Riportandoci al nostro caso, per il momento siamo arrivati a:

- 1) un universo geometricamente euclideo,
- 2) che invece dovrebbe essere iperbolico, considerando che  $\Omega_M$  è minore di 1,
- 3) ma è riportato a  $\Omega_T = 1$  da una energia repulsiva ancora ignota.

Che fare? Cercare le conseguenze dell'eventuale energia repulsiva. Infatti, questa, soverchiando la gravità, dovrebbe condurre non già a un *rallentamento* nel ritmo di espansione dell'universo, come abbiamo finora sempre ipotizzato, ma addirittura a una sua *accelerazione*.

E come ce ne potremmo accorgere? Bene: uno dei mezzi possibili sarebbe quello di misurare il valore della costante di Hubble  $H_0$  al variare del tempo. Siccome esiste questa forza repulsiva, infatti, il ritmo di espansione sarebbe tutt'altro che costante, ma dovrebbe aumentare col tempo. Se la traccia è quella giusta, dovremmo poter accertare che, qualche miliardo d'anni fa,  $H$  (ometto il pedice "0" perché ormai, in quest'ordine d'idee, non abbiamo più a che fare con una costante universale, ma con una banalissima *variabile*) doveva valere meno di adesso.

Anche qui, le osservazioni astronomiche necessarie a cogliere sul fatto una variazione di  $H$  dalla gioventù dell'universo a oggi rientrano da poco tempo nelle possibilità dei più moderni e potenti telescopi. I primi risultati furono presentati nel 1998 e, se vogliamo, possiamo memorizzare la data come quella in cui prese l'avvio la grande rivoluzione cosmologica che quasi meriterebbe le iniziali maiuscole. Si parla nuovamente di *supernove di tipo Ia*: le candele campione per le misure di distanza cosmica. Vediamo come funzionano le cose. In primo luogo, se  $H$  fosse una costante assoluta, le galassie si allontanerebbero a velocità linearmente crescente l'una dall'altra, e si otterrebbe la retta indicata con la dicitura: "Espansione uniforme".

Se, però, nell'universo esistesse *solo la materia*, la sua espansione dovrebbe *rallentare* un po' al passare del tempo. Di conseguenza, eseguendo osservazioni di supernove

lontanissime, ci aspetteremmo di trovarle *un po' più veloci* rispetto a quelle vicine. Siccome so che il ragionamento, almeno la prima volta che si fa, non è banale, lo ripeto con altre parole.

Serviamoci di un diagramma (Figura 12.4) sul quale riportiamo i risultati delle osservazioni delle supernove più lontane oggi osservabili. Sull'asse delle ascisse segniamo, per ogni

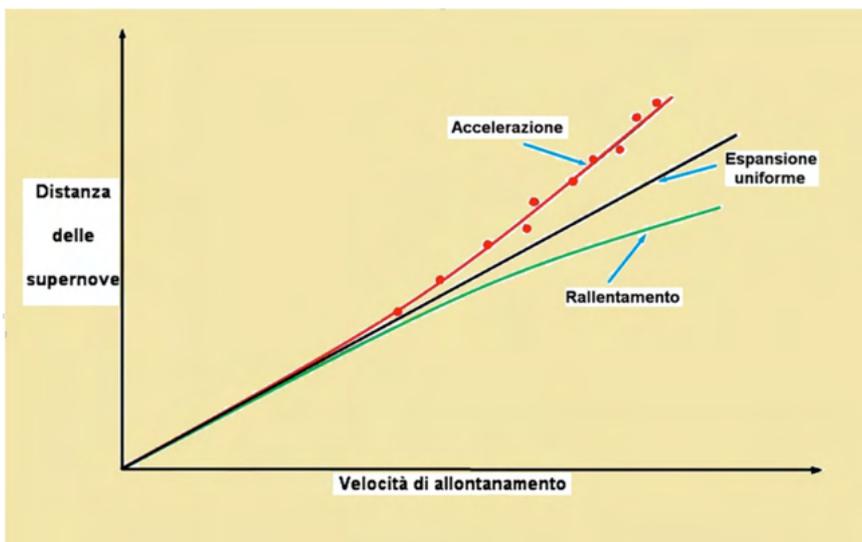


Figura 12.4

supernova, la velocità di allontanamento da noi, che sappiamo misurare con precisione in base all'effetto Doppler; su quello verticale mettiamo invece la distanza, il cui valore si ottiene dalla luminosità apparente della supernova stessa. È il tipico diagramma usato per calcolare il valore della costante di Hubble.

Ora, supponiamo che il valore di **H** sia sempre stato identico a quello misurato oggi nelle vicinanze della Terra; i famosi **22** km/s per milione di anni-luce. In tal caso, a qualunque distanza nello spazio (e, di conseguenza, *anche nel tempo*) osservassimo una supernova, velocità di allontanamento e distanza sarebbero sempre linearmente proporzionali l'una l'altra.

Se, invece esistesse solo la materia (visibile e oscura), nel diagramma, queste supernove antichissime si porrebbero *a destra* rispetto alla retta di espansione uniforme, proprio perché la luce da loro emessa tanto tempo fa, e che solo ora giunge ai nostri strumenti, le denuncerebbe come *più veloci* di quanto ci aspetteremmo *se H fosse stata sempre costante*. Ragionando un solo istante in questi termini, vi persuaderete che, in un universo la cui espansione rallenta, le supernove lontane dovrebbero piazzarsi sulla curva in verde contrassegnata con "Rallentamento".

Ora veniamo al caso in cui l'energia oscura imponga all'espansione dell'universo di accelerare col tempo. Siamo nella circostanza opposta alla precedente. Le supernove antichissime si allontanavano da noi *più lentamente* rispetto a quelle vicine. E perciò, a parità di distanza, sul diagramma le dovremmo trovare sulla *sinistra* della retta di espansione costante. In pratica, seguirebbero la curva rossa contrassegnata con "Accelerazione".

Chiarito (spero) il significato del diagramma, possiamo finalmente domandarci: «Bene; cosa dicono le osservazioni?» La risposta è già presente nella figura: i cerchietti rossi non sono altro che i risultati di misurazioni eseguite su supernove lontane. Di là da ogni possibile dubbio, l'espansione dell'universo sta accelerando col tempo, e questa è una caratteristica piuttosto importante da aggiungere al nostro Modello d'universo anche perché, più o meno tacitamente, finora avevamo assunto il contrario, e cioè che la presenza di materia ne facesse decelerare l'espansione. E badate che, ormai, le supernove lontane ben misurate sono centinaia e centinaia. Non c'è possibilità di equivoco nonostante la cosa, almeno all'inizio, ci disturbi.

E perché è il contrario di quel che ci aspettiamo? Perché nello scatolone infinito dobbiamo aggiungere allo spazio qualcos'altro; una forza repulsiva che permea lo spazio stesso e di cui, in buona sostanza, non sappiamo nulla se non questo: tutte le misurazioni finora eseguite possono essere descritte con buona precisione dal coefficiente **A** inserito nelle equazioni di Einstein. Attenzione: **A** costante, senza altri impicci (almeno per ora...): *non è repulsione materia-materia, ma spazio-spazio (e tempo-tempo, che non aggiungo mai perché fa scoppiare la testa, oltre che l'universo.)*

Come mai c'è voluto tanto per arrivare a questa conclusione? Ebbene: per decenni gli astronomi hanno costruito diagrammi di questo tipo, per ricavare il valore della costante di Hubble ipotizzando che fosse, per l'appunto, *costante*. Però, quantunque le supernove siano davvero luminosissime, fino alla fine del secolo scorso o quasi non era possibile misurare, con un minimo di precisione, quelle che scoppiavano in galassie in allontanamento da noi a più del **10 ÷ 15%** della velocità della luce. Vale a dire, una distanza di uno o due miliardi di anni-luce; non più di così.

Poi sono entrati in funzione i telescopi a terra di nuova generazione, specie quelli europei ad alta quota in un deserto cileno, con specchi di **8** metri di diametro e altri accorgimenti tecnologici, e finalmente il telescopio spaziale Hubble. A quel momento, è diventato possibile osservare *molto bene* supernove fino a ***circa metà strada*** rispetto ai bordi dell'UC, grosso modo sarebbe a dire **7 ÷ 8** miliardi di anni-luce. Telescopi ancora più grandi, e miglioramenti in quelli già esistenti, hanno esteso ancora le distanze osservabili e, sebbene riusciamo a *vedere* la parete di fuoco solo con telescopi **spaziali** dedicati, ciò dipende più che altro dal fatto che quest'ultima è rivelabile solo in infrarosso e microonde, e purtroppo l'atmosfera terrestre assorbe un bel po' di radiazione infrarossa. Così, a parte quelli spaziali, solo i grandissimi telescopi ad alta quota in un deserto riescono a captarla, poiché lì la quantità di vapore acqueo (principale assorbitore di infrarosso) è minuscola.

Come spesso accade quando ci troviamo di fronte a un avanzamento formidabile delle conoscenze scientifiche, ci accorgiamo che le domande che ci ponevamo in precedenza erano almeno **imprecise**, e che occorre ragionare su come riformularle, se non cancellarle del tutto. E poi, oltre all'enorme cifra – in € o in \$ non cambia nulla – che abbiamo dovuto spendere per costruire le apparecchiature che hanno finalmente fornito le risposte, c'è da pagare anche un altro tipo di prezzo: confrontarsi con le nuove – e in genere più difficili – ipotesi che sorgono nel nuovo contesto appena dischiuso. Ne citiamo solo un paio, tra le più importanti:

- L'energia oscura è una **contro-curvatura** dello spazio che rimarrà costante in eterno?
- Oppure si tratta di un vero e proprio, nuovo **campo di energia** che può evolvere nel tempo e magari, un giorno lontano, addirittura **cambiare segno** e diventare **attrattivo**?

Se fosse valida la prima ipotesi, dovremmo assumere che tutto lo spaziotempo è permeato da un'energia a noi ancora sconosciuta, costante sia nello spazio, sia nel tempo, che fa in modo che due regioni di spaziotempo qualsiasi si respingano tra loro per il semplice fatto di esistere. Come già anticipato, tutte le osservazioni accumulate finora sembrano essere congruenti con questo quadro.

Allora, però, potrebbe sorgere la domanda: «Benissimo; siccome lo spaziotempo si espande ed è perennemente **creato nuovo spaziotempo**, ne dobbiamo dedurre che è perennemente **creata nuova energia** in proporzione allo spaziotempo? In questo caso, il principio di conservazione dell'energia dove va a finire?». Bella domanda, eh? Io non ho la risposta, e chi afferma di averla deve introdurre contorsioni mentali molto fantasiose e *ad hoc*. Però, tanto vale anticipare qualcosa: nel nostro universo, si può perfino dimostrare che ***l'energia non si conserva*** (confusione totale).

Nel caso di validità della seconda ipotesi, diventerebbe ancora più difficoltoso capire cosa diavolo sia questa nuova energia, e a quali leggi di natura obbedisca, fermo restando che la stessa domanda di prima resterebbe inevasa. Infatti, almeno finora, questa fantomatica energia, da alcuni definita "**Quintessenza**", si è comportata in tutto e per tutto come se fosse una banale (si fa per dire) costante cosmologica, e quindi il nuovo spaziotempo che si viene a generare istante per istante ne è comunque **ripieno**.

C'è comunque un interessante effetto da tenere in conto. Finora abbiamo calcolato  $\Omega_A$  come differenza tra **1** (dato osservato dalla geometria dell'universo) e **0,29**, che è il valore di  $\Omega_M$  da noi misurato, in base alle osservazioni della forza di gravità – e quindi della materia – esistente nell'universo. Ci chiediamo se le osservazioni dell'accelerazione dell'espansione cosmica non potrebbero fornirci un qualche valore numerico – stavolta sarebbe un vero e

proprio dato sperimentale – riguardo alla quantità di energia presente nel vuoto, e necessaria a produrre l’accelerazione osservata. Poi, sapendo quanta energia c’è, dovremmo essere in grado di calcolare *direttamente* quanto vale  $\Omega_A$ , senza neanche sapere *cosa sia questa energia oscura*. Un po’ nello stesso spirito di come calcoliamo  $\Omega_M$  senza bisogno d’intendere *cosa sia la materia oscura*. Ve lo dico in un altro modo: misurare l’accelerazione sarebbe un po’ (scusate l’imprecisione per rendere intuitivo il discorso) come *pesare l’energia oscura*.

La risposta alla precedente domanda è che le equazioni di Einstein sono lì proprio per tirare fuori numeri anche lavorando un tantino al buio. Dal valore osservato dell’accelerazione cosmica, si ricava senza problemi il valore corrispondente di  $\Omega_A$ , e suppongo che nessuno si meraviglierà se affermo che, in base ai dati disponibili oggi,  $\Omega_A \approx 0,71$  avendo usato il simbolo di “*uguale circa*” per non compromettermi troppo. È una controprova eseguita senza bisogno di passare per la geometria. Vi piace?

Un momento: ma allora  $\Lambda$  non è stato il più grande errore di Einstein? Beh, lui aveva bisogno di un valore molto diverso da quello osservato...

Questa sezione, comunque, è già abbastanza difficile da ingoiare per conto suo; vorrei evitare di renderla troppo indigesta. Di conseguenza, sulla *materia oscura* e sull’*energia oscura* in quanto tali mi fermo qui, senza cercare di addentrarmi in ipotetiche spiegazioni in merito alla loro natura. Nelle Sezioni III e, specialmente, IV, dopo aver discusso un po’ di fisica delle particelle elementari, e delle principali fasi del Big Bang (dovremo inserire pure tutta questa roba nel nostro Modello d’universo, no?), i problemi lasciati aperti in questo capitolo faranno la loro ricomparsa. Forse, a quel momento avremo accumulato abbastanza strumenti intellettuali da poter almeno formulare qualche ipotesi e magari, addirittura, portare a suffragio alcune primissime osservazioni sperimentali che stanno gettando un minimo bagliore su territori ancora tremendamente oscuri e inesplorati. Ora passo ad alcune conseguenze dell’espansione accelerata dell’universo, per rimpinguare ancora il Modello con nuovi pezzi, nuove sfaccettature.

## 12.6) – Passato, presente e futuro.

Abbiamo dunque *misurato* come,  $7 \div 8$  miliardi di anni fa, l'espansione cosmica fosse più lenta di ora. Attenzione, però: non dimentichiamo mai che questa espansione obbedisce a un bilancio tra quanto *attrae la materia* e quanto *respinge lo spaziotempo*. Sappiamo che, oggi come oggi, è il secondo di questi effetti ad avere il sopravvento, ma cosa avveniva in tempi molto remoti?

La domanda è ragionevole. Infatti, quando l'universo era giovanissimo, uscito da poco dal Big Bang, doveva per forza essere più *denso* rispetto a come lo vediamo nelle nostre vicinanze, poiché l'espansione aveva agito per un periodo breve, ma già c'era tutta la materia che c'è oggi. Se ipotizziamo che anche allora valesse la legge di natura che, secondo i cosmologi, impone  $\Omega_T = 1$  (e, quando finalmente parleremo dell'*inflazione cosmica*, vedremo che ci sono eccellenti motivi teorici e indizi sperimentali per esserne in pratica certi), i valori di  $\Omega_M$  e  $\Omega_A$  dovevano essere differenti rispetto a quelli da noi misurati. In particolare,  $\Omega_M$  doveva essere maggiore di **0,29**, e  $\Omega_A$  minore di **0,71**.

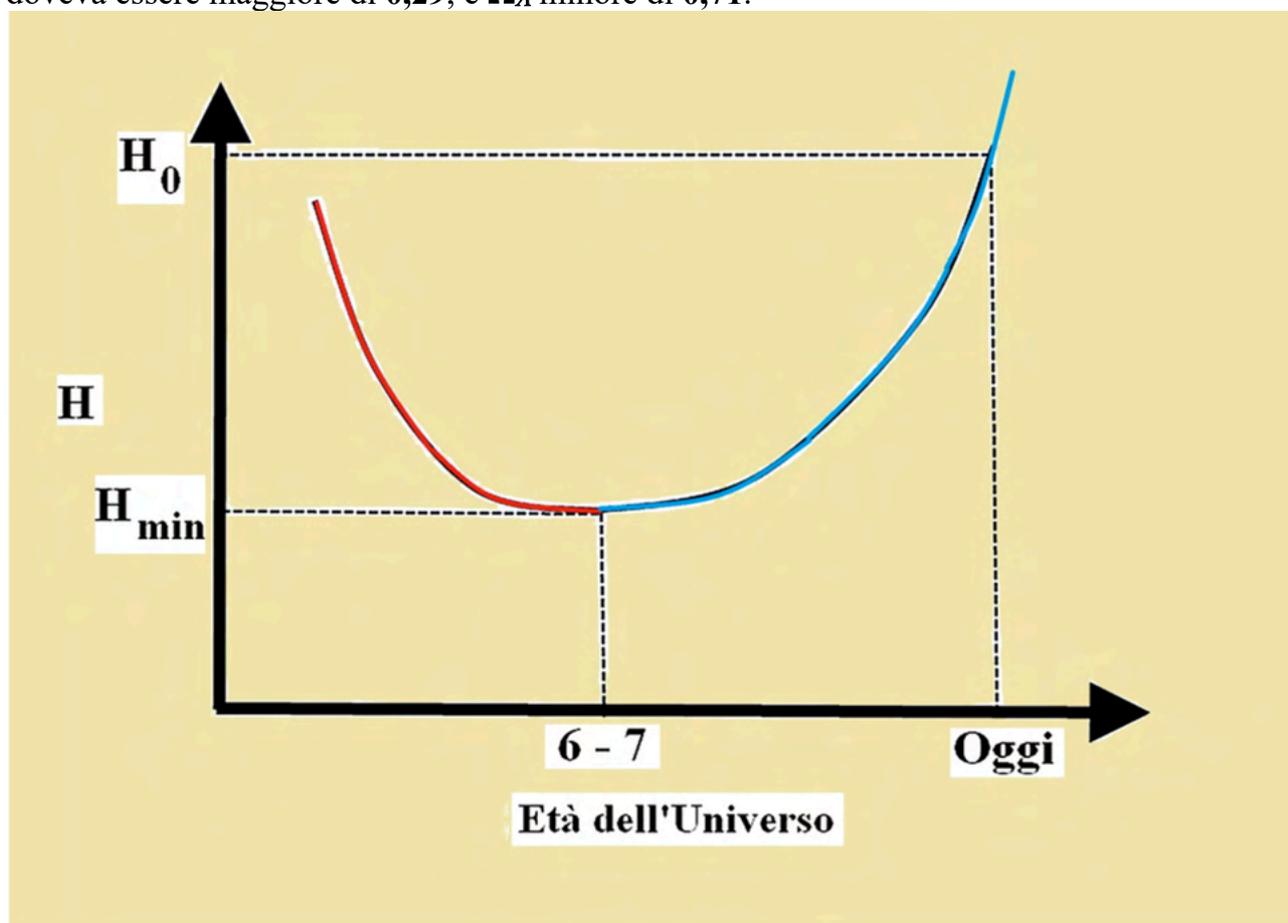


Figura 12.5

Per insistere su questo punto, dirò che quando la materia era più addensata, la *curvatura positiva* da essa causata – in soldoni: la forza di gravità – doveva essere più intensa,

e quindi era più favorito il *rallentamento* rispetto all'espansione. Inoltre, c'era *meno spaziotempo* e quindi *meno curvatura negativa* – minor *energia oscura*, repulsiva – per cui c'era una tendenza più debole ad *accelerare* l'espansione. Insomma: durante tutto il periodo in cui  $\Omega_M > \Omega_A$  l'espansione dell'universo deve essere stata *rallentata* e non *accelerata*, al contrario di quel che avviene ai nostri giorni. Il ritmo di espansione cosmica  $H$ , di conseguenza, era costretto a scendere, come mostrato dalla parte in rosso della curva in Figura 12.5, che contiene proprio il grafico dell'andamento di  $H$  dal remoto passato a oggi.

Poi, al passare del tempo, la materia è diventata sempre più rarefatta, con una conseguente diminuzione progressiva della forza di gravità, mentre nuovo spaziotempo ha continuato a crearsi e, come risultato, è pian piano cresciuta la repulsione cosmica. Al giro di boa, e cioè nel momento in cui  $\Omega_M = \Omega_A = 0,5$ , il ritmo di espansione  $H$  ha raggiunto il suo valore minimo  $H_{\min}$  e, da quel momento in poi, l'accelerazione ha cominciato ad avere la meglio sul rallentamento, come mostrato dalla parte in blu della curva.

All'attuale età dell'universo,  $H$  è cresciuta fino a raggiungere  $H_0$  e, stante che la materia si diluisce sempre più, questa tendenza all'accelerazione progredirà via via che l'universo diventerà sempre più vecchio. Tra l'altro, vorrei rassicurarvi sul fatto che la Figura 12.5 non è un puro e semplice costrutto ideale, ma si basa – con qualche incertezza sui numeri precisi – su dati di fatto osservativi. Per i primi  $6 \div 7$  miliardi di anni l'espansione dell'universo è stata rallentata ( $H$  diminuiva) dopodiché è iniziata la fase di accelerazione ( $H$  è aumentata di nuovo) che dura fino ai nostri giorni.

Come noterete, nella figura ho disegnato solo una parte della curva che mostra l'andamento di  $H$  nel tempo. Mancano la frazione iniziale, e tutto quello che succederà da oggi in poi. Cosa se ne può dire?

La frazione iniziale: ripeto che ne parleremo diffusamente più avanti, e con migliori strumenti concettuali. Qui anticipo solo che, nel modello in cui il Big Bang è un'esplosione *infinita*, anche il valore iniziale di  $H$  è infinito, per poi precipitare a valori grandi ma finiti in meno che non si dica. Di conseguenza, a stretto rigore, non avrei potuto disegnare in alcun modo l'andamento di  $H$  fino a  $t = 0$ .

Che succederà da oggi in poi: su questo ci sono tanti scenari possibili, ma almeno fino a un certo punto sono tutti d'accordo su quanto segue: l'espansione crescerà in modo esponenziale e, tra *alcuni* miliardi di anni (le stime sono approssimative; le prossime ricerche riusciranno a raffinarle), raggiungerà valori *esplosivi*.

Fine di tutto. Gli ammassi di galassie schizzeranno via gli uni rispetto agli altri, trascinati a velocità superiore a quella della luce dal rigonfiarsi tumultuoso dello spaziotempo che – come ricorderete – non è soggetto a vincoli di velocità.

Dal nostro Ammasso, che a quell'epoca sarà stato inglobato nella Galassia di Andromeda ben rimpinguata, perderemo di vista tutto il resto, più o meno secondo le stesse modalità in base alle quali si perde di vista un oggetto che cade dentro un Buco nero. Vale a dire che la sparizione non sembrerà istantanea ma graduale, per la finitezza della velocità della luce che ce ne porterà le immagini. Questo scenario esplosivo prende il nome di *Big Rip* (“Grande rottura”: ai cosmologi piace tutto ciò che è “**Big**”, e forse hanno ragione).

Una variante di questa visione apocalittica – potrei definirla: “Apocalittica all'ennesima potenza” – prevede che perfino gli oggetti che oggi sono legati dalla gravità finiscano per essere *aperti* dall'espansione; poi toccherà a quelli legati dalle forze

elettromagnetiche, e infine a quelli soggetti a legami nucleari. Se così fosse davvero, in un batter d'occhio anche la nostra grande Galassia di quel giorno futuro *esploderà*, così come esploderanno le stelle, i pianeti, e perfino i Buchi neri. Poi, in frazioni minuscole di secondo, esploderanno gli atomi residui, e quindi i quark (?) che, come vedremo, sono contenuti nei nuclei atomici, finché non resterà... chissà? Forse nulla; qualche onda elettromagnetica vagabonda che, per effetto Doppler crescente, continuerà ad allungarsi fino a sparire del tutto o quasi. Dopodiché, secondo calcoli molto precisi, suoneranno le Trombe del Giudizio Universale... scherzo (almeno spero; il lettore ha ormai inteso che su questi argomenti mantengo un atteggiamento vagamente possibilista.).

La differenza tra questo secondo scenario, e quello precedente, è nascosta nel valore numerico di un certo parametro che si riferisce all'energia oscura, e i cosmologi e i fisici stanno cercando di misurarlo. È un parametro molto difficile da ricavare dalle osservazioni oggi possibili, e ancora non siamo in grado di dire se ci aspetta un'apocalisse semplice, o una all'ennesima potenza. Maggiori indizi li avremo forse tra uno o due decenni.

Se l'energia oscura è solo un modo di rappresentare la costante cosmologica  $\Lambda$ , e quest'ultima rimarrà costante nei secoli dei secoli, la cosa finirà qui. L'universo si sgretolerà, disperso in un'infinità di spaziotempi sempre crescente a ritmi inconcepibili, e non resterà nulla da dire. Se, al contrario, l'energia oscura è qualcosa di diverso, ed è solo *simulata* ai nostri occhi da una  $\Lambda$  di cui non siamo ancora in grado di misurare la variazione col tempo, le cose *potrebbero* evolvere in modo molto differente.

Vale a dire: una delle due apocalissi ci sarà comunque ma, se su tempi scala lunghissimi, miliardi di miliardi di anni, l'energia oscura evolvesse e pian piano cambiasse segno diventando *attrattiva*, allora l'espansione s'invertirebbe. Ci sarebbe una contro-apocalisse: lo spaziotempo, e l'energia in esso contenuta, sarebbero richiamati all'indietro e, *ceteris paribus*, tutto finirebbe per collassare in un punto; l'inverso del Big Bang ovvero, secondo una delle definizioni correnti, il *Big Crunch*.

Quale delle tre? Non sappiamo e, verosimilmente, non sapremo ancora per molto tempo. Forse, mai. Amen!

Comunque, la polvere e il gas ancora liberi nelle galassie sono abbondanti; ci vorrà molto tempo prima che si esauriscano, e quindi il ritmo di formazione di nuove stelle scenda verso lo zero. Siccome solo le stelle di piccolissima massa vivono a lungo, alla fine la Galassia sarà formata da centinaia di miliardi di stelline rosse e fioche, di massa inferiore a **0,3** masse solari all'incirca, che – nel caso in cui avvenisse l'“apocalisse semplice”, potrebbero durare ancora **2000 ÷ 3000** miliardi di anni.

Di conseguenza, niente di particolarmente interessante: la nostra Galassia gigante si spegnerà lentamente come brace, e... non è finita qui. Per effetti correlati alla Meccanica Quantistica, in tempi spaventosamente lunghi le Nane bianche residue finirebbero per collassare fino a Stelle di neutroni e infine a Buchi neri e, avendo ancora molto più tempo, perfino i Buchi neri evaporerebbero per fluttuazioni quantistiche (? Il punto interrogativo è d'obbligo).

Insomma, la situazione finale non sarebbe molto diversa da quella che ci aspetteremmo con l'apocalisse all'ennesima potenza, anche se procederebbe assai più lentamente: un universo in cui c'è solo radiazione elettromagnetica sparpagliata in vuoti immensi. Questa

situazione si definisce “*morte termica*”. E mi sembra quasi inutile osservare che, in condizioni del genere, non ci sarebbe più posto per alcuna forma di vita.

In effetti, la vita, più che essere legata all’*energia* in quanto tale, può procedere solo se sono possibili *scambi di energia*, e questi sarebbero impossibili in linea di principio nel momento in cui ogni cosa avesse raggiunto lo stesso livello di energia: il minimo consentito dalle leggi della fisica, e cioè lo *zero assoluto*. Pazienza! Non credo che i miei lettori si strapperanno i capelli per questo.

## 12.7) – E finalmente *apriamo l'Universo Causale*

Converrete con me che, in questo capitolo, il nostro Modello d'universo si è arricchito non poco, e magari abbiamo fatto una certa fatica ad apprezzare ogni sua nuova sfaccettatura. Adesso, a parte i giochi del Big Bang, il tutto sembra completo – almeno se ci limitiamo a **grandi dimensioni** – e possiamo tirare un bel respiro di sollievo, non vi pare?

Ebbene: le cose non stanno esattamente così. Mancano un paio di precisazioni importanti, spesso taciute per timore di spaventare i non addetti ai lavori con astruserie incomprensibili. Così facendo, però, si rischia alla fine di dare luogo a equivoci formidabili. Ragion per cui, ho deciso di parlarne qui anche se in maniera abbastanza *naïve*.

Il lettore deve almeno sapere di cosa si tratta, e capire quando è il momento in cui si rasenta l'equivoco, per evitarlo grazie a questi nuovi “pezzi” da incastrare nel Modello d'universo, indispensabili per farlo funzionare correttamente. Il titolo di questa sezione è sintomatico, ma anche un po' sibillino; quello della prossima sarà anche peggio, ma cercheremo lo stesso di spiegare tutto con ragionamenti semplificati, un pezzetto per volta.

Abbiamo appena imparato che il valore di **H** è variabile nel tempo ma, riguardo a quanto stiamo per discutere, tiriamo un tratto di penna e manteniamolo costante. Approssimiamolo con un valore abbastanza vicino a **H<sub>0</sub>**: diciamo per comodità **H ≈ 20 km/s** per ogni milione di anni–luce, e supponiamo che dal Big Bang a oggi non sia cambiato di nulla.

Ora prendiamo come esempio una galassia molto lontana da noi, una che ci appaia nientemeno che a dieci miliardi di anni–luce di distanza. Questa galassia ci sembrerà molto **giovane**; la sua età, quando emise la luce che oggi ci raggiunge, era all'incirca **3,5** miliardi di anni, ma noi tendiamo a sorvolare sul seguente punto: **la luce che oggi ci raggiunge** è partita dieci miliardi di anni fa, e attenzione alla frase in corsivo grassetto, perché la chiave di tutto è proprio lì.

Siamo abituati a pensare a questo effetto come a una sorta di *macchina del tempo* che ci permette di studiare com'era l'universo in passato, e questo è certamente vero, ma tende a adombrare un fatto molto importante. Proprio su questo dobbiamo soffermarci, e chiederci **dove si trova ora** questa benedetta galassia. Certamente, **non dove la vediamo oggi!**

Un calcolo molto brutale è abbastanza semplice, anche se all'atto pratico fornisce risultati stimati per difetto; noi lo introdurremo lo stesso per comodità di pensiero, spiegando brevemente che la matematica giusta è un po' più complicata di così, ma senza bisogno di scriverla: ci basterà conoscere i **risultati giusti**.

Riprendiamo il discorso: la galassia distava da noi, quando emise la luce che oggi vediamo, dieci miliardi di anni–luce. Se applichiamo la costante **H** a questa distanza, troviamo il risultato – che forse non ci sorprende neppure – secondo cui la velocità di allontanamento della galassia rispetto a noi era, a quell'epoca, **200.000 km/s**. Vale a dire **2/3 di c**. Ebbene, se da allora a oggi quella galassia ha continuato ad allontanarsi a questa velocità (proprio qui c'è la famosa approssimazione che ci porteremo appresso, e cioè: allontanandosi, la sua velocità di recessione **è aumentata sempre più**, ma la formula giusta da usare è un po' complicata, e non la scriverò), a che distanza si trova oggi? Un conto della serva ci fornisce il risultato: **16.7** miliardi di anni–luce da noi. Fuori dall'UC? Che cosa vuol dire tutto ciò?

Andiamo avanti: una galassia la cui luce ci giunge da **dodici miliardi** di anni–luce, oggi si trova a circa **ventidue miliardi** di anni–luce da noi (se facessimo il calcolo giusto, considerando anche l’accelerazione subita nel frattempo, giungeremmo a circa **venticinque**).

Questi numeri crescono in modo considerevole avvicinandoci ai bordi dell’UC. I conti eseguiti come ragion comanda forniscono, per un oggetto osservato a **tredecimiliardi** di anni–luce, una distanza **odierna** di circa **trentacinque miliardi** di anni–luce e, quando arriviamo alla parete di fuoco, le ex – macchie calde di allora, evolute nel frattempo in ammassi di galassie, si trovano ormai a ben **quarantasei miliardi** di anni–luce da noi.

Stiamo perdendo il bandolo della matassa, vero? Non c’è da vergognarsene: anche l’autore, che parla in modo tanto saccente, è rimasto piuttosto disorientato la prima volta che ha ragionato su queste distanze che, in inglese, prendono il nome di “**Comoving distances**”. Di conseguenza, lascerà al lettore tutto il tempo necessario per digerire questo **spalancarsi** dell’UC a distanze inimmaginabili, suggerendogli di andarsi a guardare l’argomento su *Wikipedia*, laddove sono riportati anche gli errori più comuni (tra cui una volta trovai un’incomprensibile sparata di **152 miliardi** di anni–luce!). Dopodiché, c’è uno sforzo per discutere l’argomento cercando di precisare meglio i concetti.

Che il raggio **visibile** dell’UC resti **13,77 miliardi** di anni–luce, è un dogma di fede, e amen. Data una certa età dell’universo, la luce può percorrere solo una distanza ben precisa, e di qui non ci si sposta. L’espansione dello spazio stesso, però, non è limitata dalla velocità della luce e, di conseguenza, non dovremmo meravigliarci troppo se, nel momento in cui chiamiamo in ballo pure questa dilatazione accelerata, le cose non sono più tanto semplici. In qualche modo, sembra che l’espansione dello spazio riesca a farci avere **barlumi** su quel che succede **fuori dall’UC**. In un certo senso questo è vero (ma solo in un certo senso) e ora cercherò di spiegare in che modo.

Il lettore rammenterà forse che, già in precedenza, abbiamo eseguito l’esperimento ideale di saltare all’improvviso su una delle macchie calde che vediamo sulla parete di fuoco, per scoprire cos’è diventata oggi quella macchia calda di tanto tempo fa. E abbiamo affermato che, secondo quanto ci pare di capire dell’evoluzione cosmica, la macchia calda si è trasformata nel tempo in un ammasso di galassie, non differente dagli ammassi che vediamo nei nostri dintorni.

La cosa che allora abbiamo taciuto, è che il salto spaziale non sarebbe stato di **13,77**, ma di **quarantasei**, miliardi di anni–luce, poiché quel che vedevamo allora sulla parete di fuoco, di tanto si è allontanato rispetto a noi nei **13,77 miliardi** di anni trascorsi da allora a oggi.

Se questo è (vagamente) chiaro e un po’ digerito, possiamo passare a spiegare in qual senso sia lecito parlare di **apertura** dell’UC. Prenderemo in esame, come esempio, le influenze *qui e ora* dovute alla forza di gravità esercitata dalle “**allora – macchie – calde**”. Infatti, propagandosi la gravità a velocità *c*, proprio allo stesso modo in cui *solo oggi* ci giunge la luce delle macchie calde, anche la loro influenza gravitazionale (per trascurabile che sia) sta arrivando fin qui **in questo momento**. Insomma: l’universo nei nostri dintorni è stato ed è tuttora plasmato da luce e gravità provenienti da oggetti che, **ai giorni nostri**, si trovano distribuiti in una sfera di **quarantasei miliardi** di anni–luce di raggio, e non di soli **13,77**!

Attenzione, però: è ben vero che la materia oggi presente fino a quarantasei miliardi di anni–luce di distanza ha potuto avere qualche influenza su noi, ma ricordiamoci: si tratta

sempre e solo della stessa materia che vediamo oggi sulla parete di fuoco. Come dire che quest'*apertura* dell'UC è *più virtuale che reale*.

Ecco, alla fin fine, il concetto chiave: tutto ciò che abbiamo detto in questa sezione non ha fatto crollare il concetto di UC come l'avevamo introdotto all'inizio del libro. Piuttosto, ha precisato meglio qualche caratteristica del nostro Modello d'universo, suggerendoci nuovi orizzonti. Ne dico uno solo: se, con un po' d'ingegno e d'equazioni, sapessimo calcolare come riescono a generarsi ed evolvere gli ammassi di galassie a partire dalle pure e semplici macchie calde sulla parete di fuoco, saremmo in grado di determinare la struttura *odierna* dell'universo fino a distanza di *quarantasei* miliardi d'anni-luce. E nel giro di pochi anni riusciremo a farlo in maniera almeno dignitosa.

Insomma: la sfera di universo a noi accessibile è molto più grande dell'UC, ma solo in teoria. Se ci affidiamo alla scienza buona, quella galileiana, dobbiamo ricordare che, seppure fossimo capaci di calcolare, per mezzo di estrapolazioni dedotte da ciò che vediamo all'interno dell'UC, come si dovrebbe presentare punto per punto l'universo in questa sfera più grande, si tratterebbe comunque d'ipotesi teoriche, e la prova sperimentale non l'avremo mai. Vogliamo definire "*spazio ipotetico*" questa distesa sterminata che ci circonda, e che si limita a far capolino nell'UC?

Vorrei mettere il punto qui, ma la fantasia vola, e non sempre è giusto abatterla con la doppietta del buon senso. Perciò racconto l'esito delle mie (e non solo mie) elucubrazioni. Noi "vediamo" fino alla parete di fuoco, che mostra l'universo a **380.000** anni d'età, perché in precedenza il plasma era opaco alla luce. Ora chiediamoci: esistono altre informazioni sperimentali, oltre alla luce, che potremmo strappare al cielo, per ricavare qualche dato su com'era l'universo *prima* dei fatidici **380.000** anni? Perché, se ci riuscissimo, la sfera di conoscibilità (*ipotetica*, ricordatevelo sempre) prima discussa si dilaterrebbe a distanze sempre crescenti. Come limite estremo, i conti mostrano che, potendo "*vedere*" in qualche modo il vero e proprio istante del Big Bang, il raggio dello *spazio ipotetico* crescerebbe di un altro miliarduccio di anni-luce. Non molto, ma sempre qualcosa in più.

Ebbene: possibilità esistono, ma per il momento siamo davvero al limite dello sperimentabile. Infatti, come meglio si capirà più avanti, per i *neutrini* – particelle elementari molto difficili da catturare –, il plasma che inizialmente componeva l'universo era del tutto trasparente e dunque, se la luce non usciva, i neutrini uscivano eccome. E in gran copia, ci fanno intendere i calcoli teorici sul Big Bang.

L'astronomia dei neutrini è una specialità difficile, ma ormai da tempo ci si sta lavorando in modo serio, e i primi risultati sperimentali sono di grande interesse. Tanto per dirne una, anche durante l'esplosione di una supernova il nucleo è opaco alla luce ma trasparente per i neutrini, e si cominciano a ottenere in tal modo misure dirette di quello che sta succedendo nel nucleo delle stelle che esplodono.

Si potrebbe pensare di estendere queste ricerche ai neutrini usciti dal Big Bang, ma qui osta una difficoltà grossa quanto un Mammut (modo di dire mutuato dall'American-English corrente). Infatti, i rivelatori oggi disponibili sono sensibili solo ai neutrini di alta energia. Certo: durante il Big Bang i neutrini sono stati emessi con energia enorme ma, ahimè, anche loro hanno subito una sorta di *effetto Doppler* analogo a quello per la luce, e di conseguenza la loro energia, ai giorni nostri, è ridotta a valori minimi, tali per cui non abbiamo alcuna speranza di poterli catturare per mezzo di tecnologie utilizzabili al momento.

Tanto per buttare là un numeretto, i neutrini emessi un millesimo di secondo dopo il Big Bang, li riceveremmo con un'energia ben *duecento miliardi* di volte inferiore a quella con la quale sono stati generati. E perciò, rinviando alle generazioni future queste osservazioni, soffermandoci solo un attimo sulle onde gravitazionali emesse nel Big Bang. Anche qui le tecnologie di rilevazione sono abbastanza mature, e le onde emesse durante il mutuo assorbimento di due Buchi neri le riceviamo. D'altronde, per quelle del Big Bang vale un ragionamento analogo all'Effetto Doppler, per cui le vedremo estremamente deboli. Ma se il Big Bang fosse proprio un "Grande Botto" ... chissà? E passiamo all'ultimo mattoncino che ci permetterà di arricchire il Modello d'universo in costruzione fino a livelli che, all'inizio, non ci saremmo immaginati.

## 12.8) – Un telescopio a infiniti ingrandimenti

Il ragionamento che svolgeremo in questo capitolo è in qualche modo legato a quello del precedente: andare a scoprire in qual modo le *apparenze* degli oggetti molto lontani si discostino dalla realtà. Qui prenderemo in esame le *dimensioni apparenti* delle strutture più antiche e distanti da noi.

Quanta parte di cielo occupa la Luna piena? Domanda peregrina: se abbiamo un minimo di familiarità con l'osservazione celeste, sappiamo che le misure degli oggetti astronomici si eseguono in gradi sessagesimali, primi e secondi. In questo contesto, la dimensione della Luna piena è circa mezzo grado: se preferite, possiamo dire **30'**.

Analogamente, non importa quanto siano lontane le strutture osservate: per dare un'idea della loro *dimensione apparente* useremo sempre i gradi sessagesimali; quelli, per intenderci, in base ai quali “*un angolo retto bolle a 90°*”, secondo una popolare barzelletta.

Adesso, ci domandiamo sotto che angolo vediamo, in media, le macchie calde sulla Parete di fuoco che ci circonda. La risposta è: all'incirca **1°**. Che, se ci pensate un attimo, è un bel po': il doppio del diametro apparente lunare.

Se fin qui non ci sono state obiezioni, ne sollevo subito una io. Sapendo che la *dimensione assoluta* di queste macchie calde è pari a circa **380.000** anni–luce, e che la loro distanza (ignoriamo le complicazioni della sezione precedente perché in questo caso non sono pertinenti, e quando vi dico d'ignorare una complicazione fareste bene a darvi retta) corrispondeva, quando la loro luce fu emessa, a circa **13,77** miliardi di anni–luce, piccoli teoremi di geometria elementare mi consentono di calcolare l'angolo visuale sotto il quale mi aspetto di osservarle. L'angolo in **O** di Figura 12.2 a), per capirci. Risultato: circa un millesimo di grado. Misericordia! E allora perché le vedo mille volte più grandi? Non ci capisco più nulla.

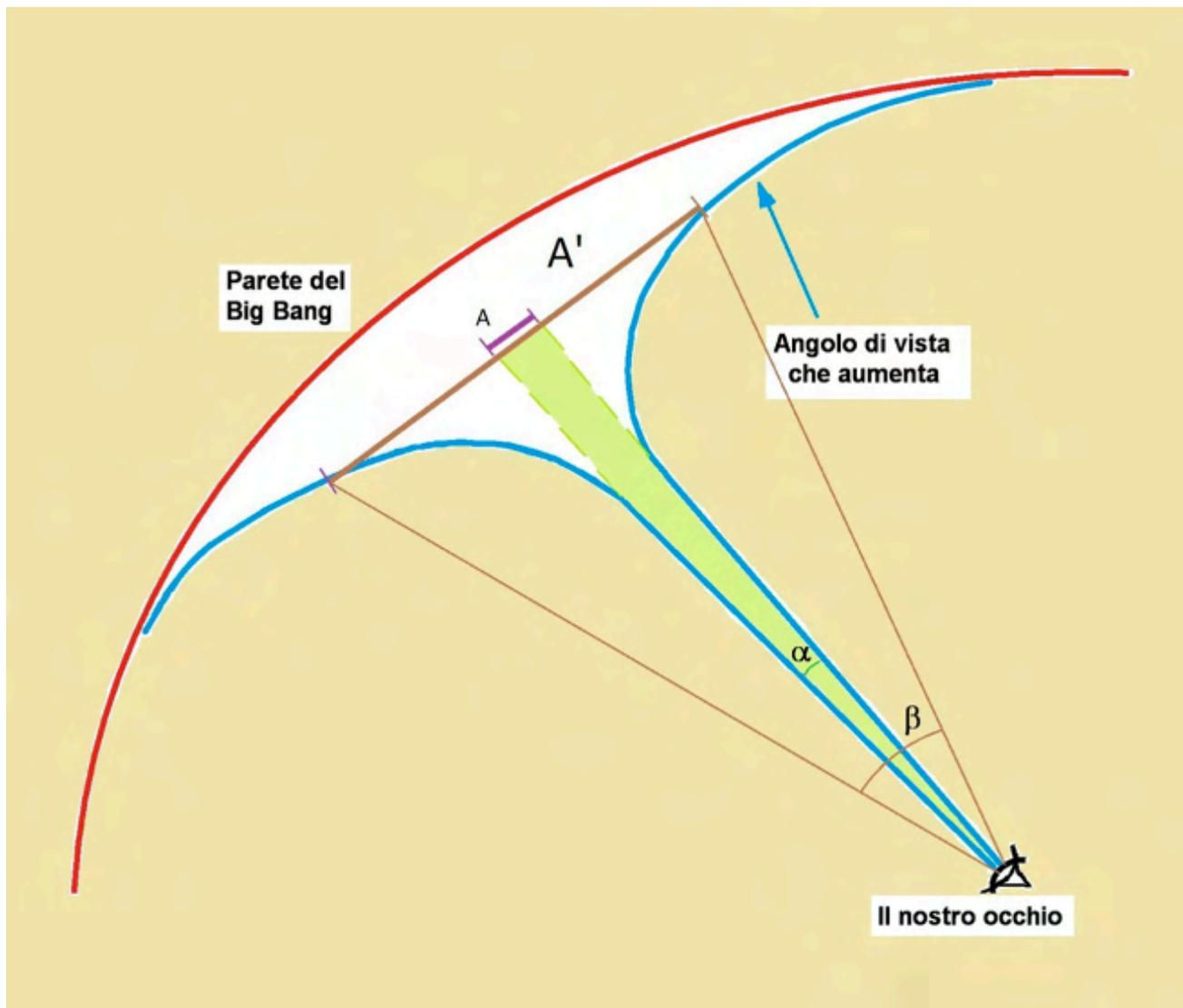
Credetemi: pure io, prima d'intendere le regole esatte del gioco, ho impiegato un po' di tempo, aiutato (per modo di dire) da figure *completamente sbagliate* che ho trovato in libri di semplice introduzione alla cosmologia, e mi sono dovuto affidare alle formule... per poi rendermi conto che la matematica funzionava, sì, certo, ma non riuscivo a capire perché. Di seguito cercherò, nei limiti concessi alle mie ridotte capacità grafiche, di presentarvi un'immagine che, almeno sul piano qualitativo, non sia troppo sbagliata, e fornisca un'idea intuitiva di quel che succede.

Prima d'introdurre la figura, però, dobbiamo ripercorrere alcune informazioni di massima sul Big Bang, delle quali siamo già in possesso. Per esempio, che all'istante del Big Bang tutta la materia oggi diffusa per l'UC era compressa in un volumetto microscopico. Ora, non ci interessa quanto fosse piccolo, di preciso, questo volumetto, perché il ragionamento che segue ne prescinde totalmente, e tanto vale approssimarlo con un *punto* privo di dimensioni.

Bene; se potessimo *vedere* in senso stretto fino a quel famigerato *punto*, la domanda è: *dove lo vedremo, in cielo?* E la risposta, per quanto la cosa possa un po' infastidire il nostro buon senso, ci sembra abbastanza obbligata: *in qualunque direzione*. Se ricordate, è la prima cosa che abbiamo imparato nel Capitolo 11.1.

Vi sentite presi in contropiede? È vostro buon diritto ma, se riuscite a prescindere dalla confusione che il concetto può suscitare nella vostra mente, e ci ragionate con un po' di pazienza, vi convincerete che **il punto – Big Bang è spalmato sull'intera sfera celeste**. Un momento di panico, e poi riprendete il fiato.

Ecco a voi il diagramma su cui meditare, in Figura 12.6. Se il punto – Big Bang occupa l'intera sfera celeste (l'arco di cerchio in rosso), vuol dire che **è come se** quel singolo punto fosse amplificato **infinite volte**, da quel che potremo definire **fattore d'ingrandimento cosmico**. E, di conseguenza, osservando oggetti sempre più vicini al Big Bang, li dovremmo



**Figura 12.6**

vedere sempre più **ingranditi**. Cosa che avviene puntualmente. Per gli oggetti vicini a noi, questo fattore d'ingrandimento cosmico è trascurabile, e comincia a crescere solo quando ci avviciniamo al Big Bang, come mostrano le curve in blu contrassegnate con: **“Angolo di vista che aumenta”**.

Ecco: leggiamo bene il grafico e occupiamoci proprio di queste curve blu. In primo luogo, notate dov'è **il nostro occhio**, che osserva l'oggetto astronomico **A**, la cui dimensione intrinseca è disegnata in viola, e che secondo tutto quel che abbiamo appreso finora dovrebbe essere sotteso dall'angolo  $\alpha$  in verde. Ebbene: le curve in blu delineano proprio il fattore d'ingrandimento cosmico, che alla fine si espande in maniera asintotica fino a tutta la sfera celeste.

Conseguenza di tutto ciò è che l'oggetto **A**, ancora a una certa distanza dal punto – superficie del Big Bang (**380.000** anni–luce poiché **A**, se non l'aveste ancora capito, è proprio la macchia calda sulla parete di fuoco) lo vediamo *ingrandito* in maniera tale da non sottendere più l'angolo  $\alpha$ . Invece, esso sottende l'angolo  $\beta$ , in marrone, per cui misuriamo una dimensione apparente **A'** molto più lunga del vero valore di **A**.

Nel caso disegnato, per restare nei limiti di ciò che si può capire con una grafica povera come la mia, il fattore d'ingrandimento cosmico è circa nove volte, come potrete costatare misurando **A** e **A'**, oppure  $\alpha$  e  $\beta$ . La formuletta per calcolare *l'ingrandimento in funzione della distanza* (meglio: dell'arrossamento per effetto Doppler) è semplice, ma ve ne faccio grazia.

Se avete avuto pazienza, e siete riusciti a digerire anche questa breve sezione non del tutto intuitiva (ma abbastanza, in fin dei conti), avrete anche sospettato che il fattore d'ingrandimento cosmico, per la parete di fuoco, raggiunge un valore prossimo a **1000**. Solo grazie a questo *telescopio*, messoci gratuitamente a disposizione da Madre natura, siamo riusciti a osservare direttamente le macchie calde le quali, in assenza di un ingrandimento cosmico, avrebbero dovuto aspettare ancora due o tre generazioni di telescopi spaziali di potenza immane (e costo proporzionato).

Vi prego di ripassare la lezione: non è indispensabile per quanto siamo per affrontare, ma converrete con me che, al pari dell'*allargamento virtuale* dell'UC discusso nella sezione precedente, aggiunge altre sfumature di colore non disprezzabili al nostro Modello d'universo, che comincia a rivaleggiare con quello degli addetti ai lavori.

Ora manca il Big Bang. Nella Sezione III, innanzitutto ci dedicheremo alla Meccanica Quantistica, e poi al Modello Standard. La speranza l'avevate già lasciata entrando nella Relatività: non so più cos'altro farvi lasciare... Prometto, però, che arriveremo a *osservare* (indirettamente) cos'è avvenuto due o tre minuti dopo il Big Bang, e forse anche molto prima.

## 12.9) – Il “Modello cosmologico di concordanza”

Un brevissimo paragrafo per evitare, più avanti, di fare confusione tra mele e pere le quali, come è noto, non si possono sommare anche se sono parenti. Molto spesso, nella letteratura astronomica, al modello di universo che ho delineato qui sopra, viene assegnato impropriamente il nome di “Modello Standard” cosmologico. E questo non va.

Infatti, come vedremo in seguito, esiste una importantissima branca della Meccanica Quantistica cui viene assegnato il nome di “Modello Standard” o *MS* tout court. Ma quest’ultimo non ha nulla a che vedere con la cosmologia (almeno per ora).

Tra i vari tentativi di evitare l’equivoco tra i due “MS” in senso lato, c’è stato quello riportato nel titolo di questo paragrafo, ma è stato giustamente fatto notare che esso era troppo aleatorio, in quanto “concordanza” si riferiva semplicemente alla sensazione, più o meno diffusa tra la maggioranza dei cosmologi, che quello che vi ho raccontato (a volte in una semplificazione intollerabile per i puristi), descriva ragionevolmente bene ciò che avviene in cielo. Troppo generico!

Alla fine, si è deciso che il vero modello cosmologico standard doveva basarsi solo sui dati teorico-sperimentali inappellabili. In particolare:

- a) la presenza di materia oscura “fredda” (cioè particelle “lente” e probabilmente molto massicce), e
- b) l’espansione accelerata causata dalla presenza di energia oscura, ben simulata quest’ultima dalla costante cosmologica  $\Lambda$ .

Insomma: per quanto ci possa sembrare strano – ma ricordiamo che in fisica funziona così –, le uniche certezze sulle quali tutti gli astrofisici convergono sono quelle su cui sappiamo di meno: l’energia oscura e la materia oscura. O forse sarebbe meglio dire che in cosmologia tutti concordano sull’azione di queste due entità ancora sconosciute.

Qual è dunque la miglior definizione attuale del modello standard dell’universo? Semplice: la cosiddetta  $\Lambda$ CDM, vale a dire,  $\Lambda$  per l’energia oscura, e CDM per “Cold Dark Matter”.

Ricordate questa distinzione, perché non tutti i testi di cosmologia se ne curano: quando sentirete parlare del “Modello standard” cosmologico, non pensate al *MS* delle particelle e forze elementari della Meccanica Quantistica, ma sostituite mentalmente con la sigla  $\Lambda$ CDM: energia oscura più materia oscura fredda, d’accordo?

Ma non va ancora come dovrebbe. Infatti, la Costante di Hubble può essere misurata con precisione in due modi diversi. Uno ve l’ho raccontato, ed è quello della stima di distanza per mezzo delle supernove, e fornisce il valore  $H_{supernovae} \cong 72 \text{ km/s} * M_{parsec}$ . Scrivo tutte le unità di misura per non essere equivocado.

L’altro modo, altrettanto preciso, si basa sulla dimensione delle zone “calde” e “fredde” che vediamo sulla *parete di fuoco*, e qui non mi perdo in chiacchiere perché è un po’ difficile da raccontare. Fatto sta che, in questo caso, troviamo  $H_{par. fuoco} \cong 66 \text{ km/s} * M_{parsec}$ .

Mi direte che la differenza è piccolina, ma non è vero. Infatti, le incertezze nei due tipi di misura sono molto più piccole della differenza tra i due valori di  $H_0$ . Dunque, una vera e propria *concordanza* non c’è ancora, e si spera nelle onde gravitazionali come terza misura non dipendente dalle altre. In bocca al lupo a voi giovan

## Sezione III: l'universo quantistico

## 13) – Un piccolo, enorme edificio

### 13.1) – La seconda nuvoletta di Lord Kelvin.

Finora abbiamo parlato del Big Bang solo in modo vago, ma tra le varie affermazioni buttate qua e là è venuto fuori che esso ha avuto luogo in un *punto*, e anzi abbiamo incluso quest'ultimo (il punto preciso) nella Sezione II, tra numerose parentesi, nel Capitolo 12, senza però specificare troppo. Né ancora potremo entrare in dettagli in questa Sezione; il concetto di *punto* ci servirà, al momento, solo per giustificare la trattazione della fisica dell'enormemente piccolo. Dobbiamo infliggerla al lettore in quanto: a) parte importantissima del Modello d'universo, poiché contiene le leggi ultime della natura, e b) propedeutica alla comprensione del Big Bang. E poi, se qualcuno non l'avesse capito, c) quel famigerato punto l'abbiamo *spalmato* su tutta la volta celeste nel paragrafo precedente. Merita un po' più di attenzione, non vi pare?

Un *punto* è piccolo, o così ci hanno insegnato in geometria. Anzi: *infinitamente* piccolo. Ma ai fisici non piacciono gli infiniti (o infinitesimi) e di conseguenza, così com'è stato inevitabile discutere le due Relatività per descrivere l'universo in grande, eccoci alla Meccanica Quantistica (vi dispiace se, d'ora in poi la abbrevierò con **MQ**?) utile a sollevare parzialmente il nebbione che avvolge il famigerato *punto*, e gli eventi susseguenti nei primissimi tempi di vita del cosmo, quando tutto l'UC era contenuto in un volumetto di spazio di dimensioni subatomiche.

Ci sono, però, anche altri motivi che giustificano questi lunghi capitoli sulle leggi fondamentali della natura, come s'incontrano ai livelli minimi di distanze e tempi, e oltre le quali (forse) non c'è più nulla da sapere, tranne quel pochissimo che anticiperemo nella Sezione IV. Il nostro scopo è di costruire un bel Modello d'universo, no? E allora consentitemi di portare avanti l'analogia del trenino giocattolo.

Cosa rende bello un plastico in cui corrono le locomotive a vapore ed elettriche? Solo la presenza delle rotaie e dei treni medesimi? Questi sono certamente fondamentali ma, almeno a mio modo di vedere, è altrettanto importante anche tutto il contorno. Per esperienza personale, sono sempre stato affascinato da colline e laghi, gallerie e scambi, foreste e ponti, stazioni e mandrie di animali, persone e case, con tutti i parafernali che una volta rendevano interessanti e piacevoli anche i presepi natalizi; bancarelle con verdura e frutta, osterie, fornai e ciabattini, e così via.

Questi elementi fanno parte a pieno diritto di un modello ferroviario che si rispetti, e anzi: sono indispensabili e basta! E dunque, nel nostro Modello d'universo non dovremo occuparci solo delle scale di distanza *grandi, cosmiche*, ma anche di tutta la *minuteria* fino ai limiti estremi. Non borbottate, dunque, se qui non racconto di *multiversi paralleli o perpendicolari* (ce ne saranno, sempre nella Sezione IV, però non buttatevi subito a leggerla prima di aver digerito questa), ma solo di umilissimi *fotoni* e altre schifezzuole della stessa

genia: sono *universo* anche loro, perciò infiliamo tutto nel Modello. E partiamo con la seconda nuvoletta di Kelvin.

Qui occorre essere sinceri e premettere un avviso importante: entro certi limiti, persino i fisici di professione hanno un sacro timore della **MQ** e, se non l'hanno, è lecito dubitare della loro reale comprensione di questa materia. Non sono io solo a dirlo, ma gli stessi padri fondatori, e coloro che più hanno approfondito l'argomento. Poi, naturalmente, esistono scuole di fisico–matematici i quali, avvezzi a manipolare formule su formule senza neanche porsi il problema di capire cosa possano significare, sono convinti che anche questa branca della fisica sia banale un gioco di equazioni differenziali e tensoriali, unite alla *Teoria dei gruppi*, non diversamente da tutto il resto.

Le cose, però, non stanno così. Prima ancora di prendere in considerazione la seconda nuvoletta intravista dal vecchio Lord Kelvin all'orizzonte dei suoi cieli azzurri (la prima nuvoletta, ricordate, sfociò nella Relatività), forse vale la pena di riportare alcune opinioni sulla **MQ**. Opinioni di un certo peso, come vedremo.

Max Planck, il nostro primo eroe, e fisico della vecchia scuola. Nell'anno 1900 fu lui a ipotizzare che, diversamente da quanto affermato dai filosofi antichi ("*Natura non facit saltus*"), e tenuto per vero fino a quel giorno di dicembre in cui egli tenne un seminario sulla radiazione emessa da un Corpo nero (non balzate sulla sedia: tra un attimo vedremo di cosa si tratta), alcune situazioni sperimentali richiedano una *descrizione granulare*, per quanto riguarda entità fisiche piuttosto comuni, come per esempio le onde luminose.

Attenzione: Planck parlava ancora di *descrizione* e aveva ritengo a usare il termine *comportamento*, poiché sono due concetti diversi. Tra l'altro, la granularità era impercettibile per le misure eseguibili ai suoi tempi. Una cosina che sfugge ai sensi, ma comunque tale da richiedere un totale sconvolgimento di paradigmi per il semplice fatto di esistere. *Descrizione* invece di *comportamento*. Pare di ascoltare l'eco della voce flebile di Copernico quando propose il suo Sistema del mondo come un semplice espediente di calcolo, così, per facilitare un po' la previsione dei fenomeni astronomici in genere e delle eclissi in particolare, senza però voler insinuare che Madre natura l'avesse fatta così grossa! Succede spesso, nello sviluppo della scienza: qualcosa che serve a semplificare una descrizione, e che alla fine viene assunto come *realtà*, qualunque cosa ciò voglia significare. E Planck si comportò allo stesso modo.

Il poveretto iniziò col proporre qualcosa del genere come un espediente matematico, ottenendo così una formula teorica esattamente sovrapponibile alla curva sperimentale che vi mostrerò fra pochi paragrafi. Quando capì le conseguenze di quel piccolo passo, se ne preoccupò assai e cominciò a predicare cautela. Una sua frase in tarda età è: «Se qualcuno afferma di poter ragionare sui problemi quantistici senza rimanerne stordito, vuol dire che non ne ha capiti i fondamenti». E badate: lui campò fino al 1947, quando la **MQ** era ormai completa da un pezzo, e non esistevano più dubbi sulla sua validità. Di conseguenza aveva avuto tempo e modo per rendersi pienamente conto di cosa stava parlando.

Erwin Schrödinger: altro eroico pioniere – e gran brav'uomo, mi piacerebbe aggiungere, se non ci fosse di mezzo qualche perplessità dovuta alla sua vita coniugale ed extraconiugale, complicatissime anche per una mentalità di oggi, e il cognome quasi impronunciabile per noi italiani. Fu lui a ricavare la più nota equazione della **MQ**.

Egli era convinto che la sua formula sarebbe stata in grado di ricondurre quel dirompente ramo della scienza entro l'alveo della studiata e tradizionale *meccanica delle onde* (una faccenda risalente al '700), mettendo un punto fermo a un proliferare d'idee fumose e illogiche di là da ogni ragionevole dubbio.

Quando Niels Bohr gli fece toccare con mano i motivi per cui le soluzioni di quell'innocua equazione rappresentavano assurdità inconcepibili in un ambito *classico*, e malgrado ciò la formula funzionasse alla perfezione nel prevedere l'esito di ogni esperimento quantistico, il poveretto ne rimase quasi sotto shock. Il suo commento sulla **MQ** in genere suonava: «Non mi piace, e mi rammarico di averci avuto a che fare».

Albert Einstein: e qui non si scherza, perbacco! Come già sappiamo, nel 1905 aveva dimostrato che il giochino matematico di Planck non era un sollazzo numerico, ma pura e semplice, *materiale* realtà fisica, e dunque è sempre stato considerato come il padre, o per lo meno il più influente tra i padri di questa nuova scienza. Al punto che il premio Nobel a lui assegnato nel 1921, fu per la **MQ**, non per la Relatività. Eppure, noi stessi, proprio discutendo di Relatività, ci siamo resi conto della potenza dell'ingegno di quest'uomo.

Bisogna dirlo: Einstein ripudiò (più o meno esplicitamente) la propria creatura e, fino al termine della sua vita, ritenne che i meccanismi di *casualità e imponderabilità* alla base della **MQ** fossero errati o, almeno, fraintesi. In proposito, resta la sua frase: «Dio non gioca a dadi!». Aveva torto, purtroppo: Dio fa il *croupier* e, come dicono taluni, talvolta usa dadi truccati, gettandoli addirittura dove non possiamo vederli.

Aggiungo una curiosità di solito sottaciuta, forse per correttezza politica: l'atteggiamento ambiguo dei fisici sovietici nei confronti di questa nuova branca della scienza. Da un lato, ci furono figure luminosissime come Lev Landau e pochi altri; costoro ne intesero l'importanza e, talvolta a loro rischio e pericolo, la svilupparono e la divulgarono riuscendo a vincere la riluttanza dei commissari politici. Dall'altro lato vediamo la maggioranza dei loro colleghi i quali, in rigida osservanza ai dettami del Materialismo dialettico marxista – leninista, affermavano che la **MQ** risentiva di compromissioni *idealistiche*.

Adirittura, nel 1953, sulla **Правда** (Pravda) comparve un articolo a nome di Andrej Zdanov (lui era già morto, ma la sua corrente politica, affine allo stalinismo più becero ne conservava il nome) dove si affermava proprio questo: la **MQ** era il punto di forza della lotta senza quartiere della borghesia contro il Materialismo dialettico. E di conseguenza, era per forza di cose il frutto di una cospirazione capitalista e imperialista.

Ora, sapendo bene che in ogni *regime* (incluso quello più democratico e libertario immaginabile) il potere delle baronie universitarie è immenso, specie quando si salda al potere politico, qualche fisico sovietico (pochi, per fortuna), per difendere la nuova scienza finì in Siberia assieme agli evolucionisti darwiniani, oppositori del famigerato Lisenko.

Non vorrei aver spaventato il lettore con questa premessa: tutt'al contrario, l'ho pensata per rassicurarlo. Infatti, i poderosi cervelli che ho passato sopra in rassegna erano perfettamente in grado di capire i *fenomeni fisici, sperimentali* alla base della **MQ**, e altrettanto riescono a fare i nostri cervelli, anche se il mio (non so il vostro) è di gran lunga più debole rispetto a quello di Einstein, di Planck e di tanti altri. Solo, questi grandi geni si rifiutavano di abbandonare... ecco, su questo vi chiedo pazienza. Cosa si rifiutassero di abbandonare lo vedremo più avanti, e allora ci chiederemo se anche noi saremo disposti, a

compiere questo sacrificio. Spero di sì, almeno in modo parziale, altrimenti ci troveremo nei guai.

Cito il nome di Niels Bohr, di fatto il secondo *padre* della **MQ**; poi ci furono Heisenberg, Dirac, Born (non confondetelo con Bohr, attenzione, Born era un altro) e così via fino a Feynman, che a tutti gli effetti ne *completò* la struttura portante, ponendo le fondamenta del cosiddetto “**Modello standard**”, l’edificio teorico ancora oggi, pur tra tanti scricchiolii sinistri, sommo reggitore e dominatore della fisica contemporanea. In effetti, a molti piace declinarlo con tutt’e due le maiuscole, e più avanti anche noi lo abbrevieremo con “**MS**”. Ma solo molto più avanti; per ora non pensateci.

Su questo punto bisogna capirci bene, perché la differenza tra gli entusiasti e i reticenti non era sulla *maggior o minore validità* delle leggi che governano la **MQ**. Tutti concordavano sulla bontà della sua struttura matematica, capace di descrivere ogni fenomeno sperimentale. Il punto di discordia era il seguente: poiché i dati osservativi della **MQ** sono *ripugnanti alla ragione* (come diceva il povero Saccheri per la geometria iperbolica da lui scoperta...) e non ha alcun senso cercare di crearsene un *modello mentale intuitivo*, la scuola facente capo a Bohr riteneva che, una volta che fosse data la struttura matematica, non ci sarebbe stato più nient’altro da cercare.

Einstein e seguaci, al contrario, coltivavano il dubbio che le leggi della **MQ** nascondessero uno strato più profondo della natura, ancora da scoprire. Alla fine, la spuntarono i *giovani*, e per motivi che, forse, potranno sembrare *sgradevoli* ad alcuni lettori (io stesso ho sempre tifato per Einstein, pur sapendolo sconfitto con l’onore delle armi, e verso la fine di questo capitolo dirò qualcosa di più).

Va però considerato, che anche i vincitori della disputa si rendevano pienamente conto del problema filosofico formidabile, ed era stata una loro scelta deliberata quella di riporlo in soffitta. Una prova? Feynman ammoniva i suoi studenti: «Se, a un certo punto del mio corso, credete di aver capito la **MQ**, venite subito ad avvertirmi, perché vuol dire che state sbagliando. Io stesso non la capisco, perché non è possibile».

Ora, però, termino davvero il preambolo; torniamo al vecchio Lord Kelvin e alla sua seconda *nuvoletta*: il comportamento strano della radiazione emessa da un **Corpo nero**, a basse lunghezze d’onda.

Cos’è un **Corpo nero**, e perché merita l’iniziale maiuscola? Per definizione, si tratta di un oggetto che assorbe senza pietà qualsiasi raggio di luce vi finisca sopra. Se volete realizzarne una buona approssimazione casalinga, sciogliete un cartoccio di nerofumo in un barattolo di vernice nera opaca, e col ricavato tingete bene una palla di legno dalla superficie un po’ scabra; può rendere l’idea. Un oggetto più nero di così... sporca perfino le mani, a toccarlo.

Ahimè, quest’approssimazione è abbastanza dignitosa, solo se la applichiamo alla luce visibile. Tanto per dirne una, lo stesso oggetto assorbe poco la luce infrarossa, e perciò dobbiamo cercare qualcos’altro, assai più generale.

Prima di descrivere un buon **Corpo nero** da laboratorio, però, bisogna ricordare quanto segue: per una legge di natura della quale non dirò altro – vi prego di crederci e basta – si dimostra che, *se un oggetto assorbe* un certo tipo di onde elettromagnetiche, quando poi lo riscaldiamo abbastanza esso è anche in grado di *emettere* lo stesso tipo di onde. E perciò, se

un Corpo nero è un *assorbitore universale*, portandolo ad alta temperatura diventa un *emettitore universale* di luce di ogni lunghezza d'onda.

Come si fa a costruire un Corpo nero il più perfetto possibile? Abbiamo visto come verniciare di nero un oggetto non sia sufficiente, ma già sapete che, in media, i fisici sono furbi. E hanno inventato un altro sistema davvero infallibile per catturare tutte, ma proprio *tutte* le onde elettromagnetiche.

Immaginate *una sfera di metallo cava* ottenuta avvitando due calotte sferiche, la cui parete interna sia un po' riflettente ma non al 100%. In questa sfera pratichiamo un forellino con una punta di trapano sottilissima. Adesso, proviamo a pensare cosa avviene a un raggio di luce di qualsiasi lunghezza d'onda che penetra attraverso il forellino.

All'interno della sfera, la luce sarà riflessa rimbalzando qua e là, con una probabilità virtualmente nulla di riuscire a imboccare di nuovo il forellino e uscire all'esterno. E dunque, poiché la superficie interna non è riflettente in modo perfetto, cosa farà alla fine il raggio entrante, riflesso qua, riflesso là? Sarà assorbito. Si tratti di una microonda o di un raggio X, subirà comunque lo stesso destino, cedendo la sua energia alla sfera e riscaldandola un po'.

Ecco, perciò, il motivo per cui una cavità di questo genere è un *assorbitore universale* di luce. Secondo quanto abbiamo detto, il forellino dovrà essere anche un *emettitore universale*.

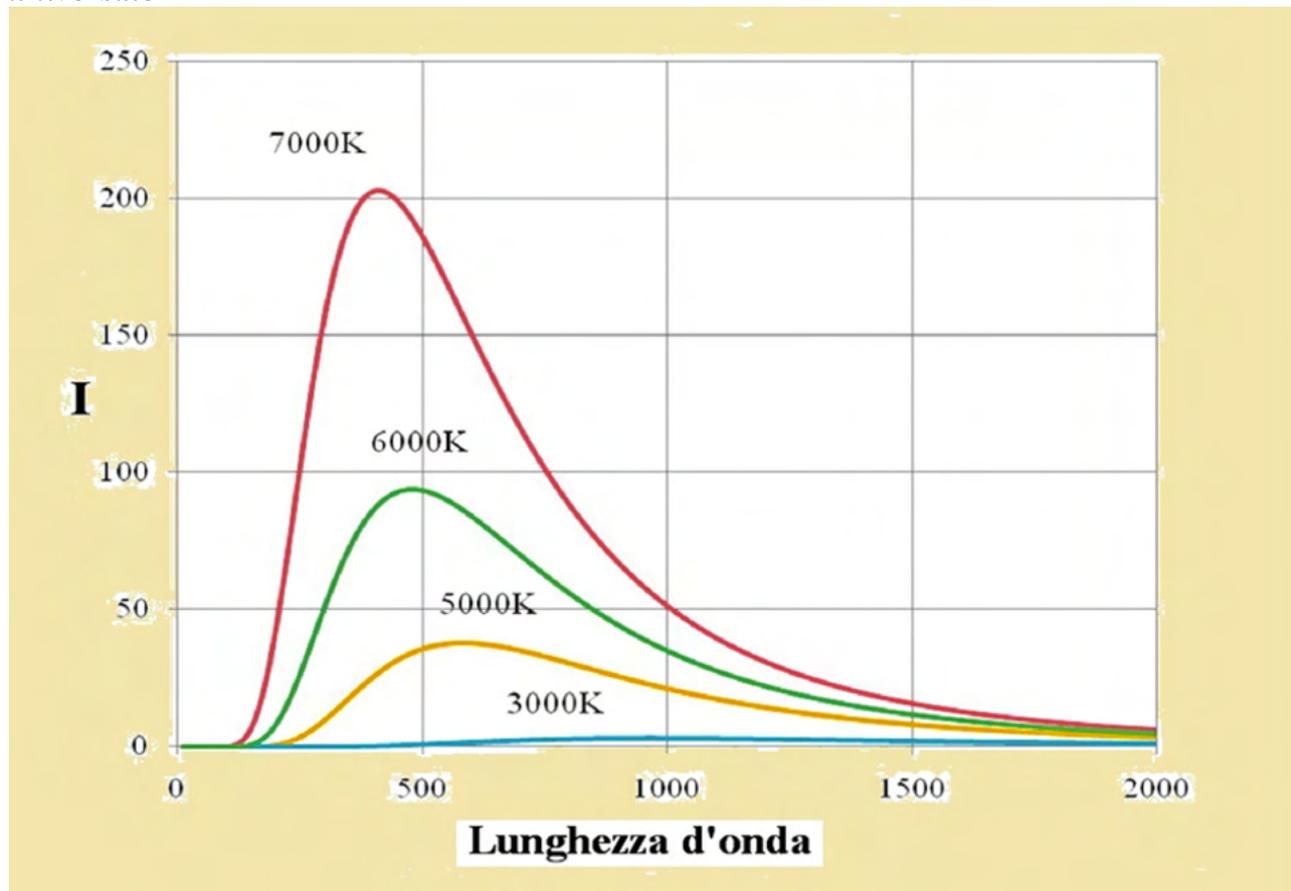


Figura 13.1

Ora che abbiamo il Corpo nero perfetto, immaginiamo di riscaldarlo fino a circa **6000K**<sup>o</sup>, poco più della temperatura superficiale del Sole, cosicché la luce emessa dal forellino sia per la maggior parte nell'intervallo di lunghezze d'onda corrispondenti al massimo di visibilità del nostro occhio (e cioè tra il rosso e il violetto, meglio se tra il giallo e il verde).

Non mettetevi subito a borbottare solo perché nessun oggetto materiale, neanche il tungsteno, resiste a quella temperatura ma si squaglia prima: i fisici (sempre loro) sono in grado d'immaginare, seguendo le stesse linee di pensiero di prima, *strutture* in senso lato, in grado di emettere luce a qualsiasi temperatura. Di conseguenza, dal *forellino equivalente* (neanche io so cosa sia, ma esiste), uscirà la radiazione di Corpo nero corrispondente (circa) a quella emessa dal Sole. Facendola passare attraverso uno spettroscopio e scomponendola in un arcobaleno o *spettro* (è la definizione tecnica), ci accorgeremo che è ben diversa dalla luce emessa da una lampadina, dal fuoco del fornello o da una candela, e il suo spettro sarà addirittura diverso da quello solare, perché la nostra stella non è un Corpo nero perfetto anche se gli si approssima un po'.

Nella Figura 13.1 possiamo vedere come si presentano le curve di emissione di luce di un Corpo nero a varie temperature, da **3000 °K** a **7000 °K**. Sull'asse verticale, la lettera **I** indica l'intensità della luce uscente dal forellino, in unità di misura poco importanti in quest'ambito; sull'asse orizzontale c'è la lunghezza d'onda espressa in miliardesimi di metro (dunque, numeri molto piccoli se raffrontati col mondo di ogni giorno, quello cui siamo abituati). Queste sono le curve che tanto crucciavano il povero Kelvin, e vediamo perché.

La luce – come sappiamo – è un'onda elettromagnetica e, ricordando bene questo concetto, cerchiamo di raffigurarci mentalmente cosa avviene all'interno della cavità di Corpo nero quando cominciamo a riscaldarla.

Le sue pareti sono formate di atomi e questi, a loro volta, di particelle elettricamente cariche: gli elettroni e i nuclei. Poiché il calore è nient'altro che vibrazione atomica, le cariche elettriche si urteranno, saranno soggette ad accelerazioni e, come affermano le equazioni di Maxwell, ogni accelerazione di una carica elettrica produce onde elettromagnetiche. In conseguenza di ciò gli atomi in moto, urtandosi, libereranno la loro energia cinetica sotto forma di luce di ogni lunghezza d'onda. Fin qui Kelvin e soci. Purtroppo, c'è un problemino, e ora vediamo quale.

Secondo un ragionamento *classico*, le onde luminose più *lunghe* saranno quelle meno favorite, quando si tratta di uscire dal forellino. Infatti, fissato un certo diametro interno della sfera, più le onde sono lunghe, minore è la frazione di un'onda intera che ci può stare dentro. Figuriamoci, poi, trovare l'uscita! Per questo motivo, nella Figura 13.1, quando prendiamo in considerazione onde molto lunghe vediamo come la loro intensità di emissione tenda a zero.

Fin qui tutto bene, ma al diminuire della lunghezza d'onda, nella cavità ci sarà spazio per un numero sempre maggiore di onde e tra l'altro, rimbalzando sempre più frequentemente, per loro sarà più facile imboccare per puro caso il forellino d'uscita. Secondo questo ragionamento, nell'emissione prevista per un Corpo nero, partendo da destra (onde lunghe) e andando verso sinistra (onde corte), l'intensità **I** della luce uscente dovrebbe continuare ad aumentare sempre. È quello che avviene in realtà?

No. Ma anche se rinunciamo a un modellino così grezzo e applichiamo le equazioni di Maxwell a una situazione del genere, troviamo che l'intensità **I** deve salire... fino a quanto?

Ebbene; il problema di Kelvin era proprio qui: a lunghezza d'onda tendente a zero (e cioè avvicinandoci sempre più al punto d'incrocio degli assi cartesiani), l'intensità  $I$  deve tendere *all'infinito*.

Grazie a Dio questo, palesemente, non accade. Le curve disegnate in Figura 13,1 si somigliano tutte: raggiungono la massima intensità di emissione per una certa lunghezza d'onda, sempre più corta al crescere della temperatura, e poi tendono a zero via via che anche la lunghezza d'onda scende verso lo zero. Il contrario delle previsioni teoriche.

Tra l'altro, poiché ogni oggetto si *approssima* un po' a un Corpo nero, e l'emissione infinita di energia radiante dovrebbe avvenire a qualsiasi temperatura, il mondo che conosciamo non potrebbe esistere. E qui aggiungo un'informazione sul gergo dei fisici. Questa crescita illimitata di  $I$  sarebbe stata concentrata nella regione *ultravioletta* dello spettro luminoso (a quell'epoca, i raggi  $X$  erano ancora una curiosità di laboratorio e non se ne parlava molto); di conseguenza, al problema dell'emissione infinita era stato assegnato il nome assai azzecato: "*Catastrofe ultravioletta*". Bella *nuvoletta* per il vecchio barone, non pare anche a voi?

Ecco: abbiamo inquadrato il problema dal punto di vista concettuale e, alla fin fine, ragionando in modo semplice, pure a noi sembra di poter provare solidarietà verso Kelvin. Dentro la cavità, non c'è verso: minore è la lunghezza d'onda, più onde ci devono essere. E allora, come mai questo strano andamento della radiazione di Corpo nero? Bene: con pazienza, seguiremo il procedimento per mezzo del quale Planck riuscì a ricondurre a valori finiti, così come si misura in realtà, quell'intensità di luce che, secondo logica, sembrerebbe dover crescere senza limiti.

E avverto in precedenza: quando schematizzerò i ragionamenti di Planck, sarà una *razionalizzazione a posteriori* già sapendo dove bisogna arrivare. Come faccio sempre ogni volta che racconto ragionamenti altrui, e questo già lo sapete. Per il povero Planck, venirne fuori fu un calvario durato diversi anni costellato di false partenze, vicoli ciechi, intuizioni folgoranti ma sbagliate perché non andavano al posto giusto... ma così è la ricerca scientifica: si procede a tentoni, e solo dopo si rimette tutto in ordine.

## 13.2) – Planck deve indossare i “quanti”

Ricordate i bei tempi della Relatività speciale, quando Einstein diciottenne eseguiva un *gedankenexperiment*, un ragionamento elegantissimo del tutto teorico, e dunque nel chiuso della propria mente, sull'impossibilità, per le equazioni di Maxwell di descrivere un campo elettrico e uno magnetico perpendicolare, che rimangano *fermi nello spazio* mentre variano nel tempo come in un'onda? E, come conseguenza logica del puro pensiero, veniva fuori la velocità della luce come limite cosmico, da cui seguiva la relatività del tempo e tutto il resto. Limpido come un brillante!

Ahimè: purtroppo, nella **MQ** non troveremo nulla di così *pulito e lineare*. Come già stiamo sospettando, non esiste un'intuizione semplice e immediata, utile a spiegare in modo ovvio l'emissione di luce da un Corpo nero. Non fu il solo Planck a brancolare nel buio, ma molti altri dopo di lui provarono a buttare qua e là ipotesi un po' a casaccio, nel disordinato processo di crescita di questa contro-intuitiva branca della fisica. Si parte dal danese Niels Bohr, che ne azzeccò molte senza neanche saperne il motivo, finché altri, da Heisenberg a Feynman, riuscirono a mettere un po' d'ordine e a schematizzare le regole matematiche fondamentali di questa esoterica invenzione di Madre natura.

Attenzione, però: sto parlando solo di *regole matematiche*, perché, se le vogliamo tradurre in entità fisiche intuitive, queste *sembrano* fornire modelli alla nostra mente ma, appena cerchiamo di afferrarne saldamente uno per la coda, ci sguscia dalle mani come un'anguilla e, peggio ancora, ci pare di aver appena immerso le mani stesse in una poltiglia disgustosa e appiccicosa, sgocciolante da tutte le parti. No: non odio la **MQ**; mi piace, ma voglio assegnarle il posto giusto.

Diciamo finalmente due parole sull'eroe di questo capitolo: per l'appunto il fisico tedesco Max Planck. Lui si era proposto di dissipare, entro i limiti della fisica di fine '800, la seconda nuvoletta di Kelvin, e vi lavorò sopra accanitamente, favorito in ciò dal fatto che alcuni suoi colleghi, con i quali si trovava in contatto continuo, stavano eseguendo misure di laboratorio sempre più precise proprio sulla radiazione di Corpo nero, giusto attorno al volgere del secolo.

Dopo un'infinità di tentativi, tutti andati a vuoto, di sviluppare una formula che, partendo dalle solite equazioni di Maxwell, fornisse risultati somiglianti a quelli sperimentali, Planck scelse un approccio meno ortodosso. Decise, per prima cosa, di mettere da parte per un po' la fisica, e limitarsi a individuare l'espressione matematica adeguata a riprodurre la curva di Corpo nero osservata. Qui è una parte del trucco, lo ripeto e fate attenzione: *per il momento*, Planck *non si curò dell'eventuale fisica sottostante*.

La sua procedura somigliava un po' a un moderno gioco per computer. Infatti, poiché già ai suoi tempi esistevano imponenti volumi gremiti di funzioni algebriche ascendenti, discendenti e così via, non gli fu troppo difficile acchiapparne un paio e metterle assieme, trovando un'espressione matematica che *simulava* molto bene l'andamento della radiazione. Anzi: *perfettamente*, senza sgarrare dai dati sperimentali, adattando un po' un certo numeretto che compariva come *parametro libero*.

Solo una volta in possesso della formula giusta, si trattò di capire se ci fosse arrosto oltre al fumo, ed essendo un buon fisico, Planck ebbe l'intuito di focalizzarsi non tanto sulla

*lunghezza d'onda*, ma piuttosto sulla *frequenza* della luce: d'ora in poi la indicheremo con la lettera greca  $\nu$  come si fa in ogni libro di fisica.

Cos'è la *frequenza*? Facile da capire:  $\nu$  misura il numero di volte che, in un secondo, ci passa davanti un picco dell'onda elettromagnetica. Esempio: se la lunghezza d'onda è **300.000** km, quanti picchi scorreranno davanti ai nostri occhi in un secondo? Uno solo, ovviamente, perché la luce, in un secondo, si sposta proprio di **300.000** km. Se dimezziamo la lunghezza d'onda (**150.000** km), in un secondo conteremo due picchi, e così via. Più in generale, se  $\lambda$  è la lunghezza d'onda, la frequenza  $\nu$  si scriverà banalmente:

$$\nu = c / \lambda$$

Planck, spinto dalla disperazione – come egli stesso affermò diversi anni dopo – ma sempre tenendo un occhio puntato sull'espressione matematica da lui trovata, perché era *troppo* perfetta e *doveva per forza* avere un significato, riuscì a capire cosa, in realtà, la formula suggerisse (a lui non piaceva per niente), e *obtorto collo* cominciò a ragionare più o meno come segue.

«Siccome non cavo un ragno dal buco, ancora non dico nulla ai miei colleghi, ma ipotizzo che la luce non sia emessa in modo *continuo*, come noi fisici siamo abituati a pensare, magari lavorando perfino con *frammenti d'onda* come suggeriscono le equazioni di Maxwell. La formula sembra suggerire, infatti, un'emissione di luce in *granelli finiti d'energia*, come se si trattasse di *piccoli oggetti non frammentabili*. Tutto ciò va contro ogni mia comprensione intuitiva ma, come ho già detto, per il momento lo tengo per me. Di conseguenza, faccio sbizzarrire la fantasia, e vado avanti aggiungendo altre ipotesi *ad hoc*.»

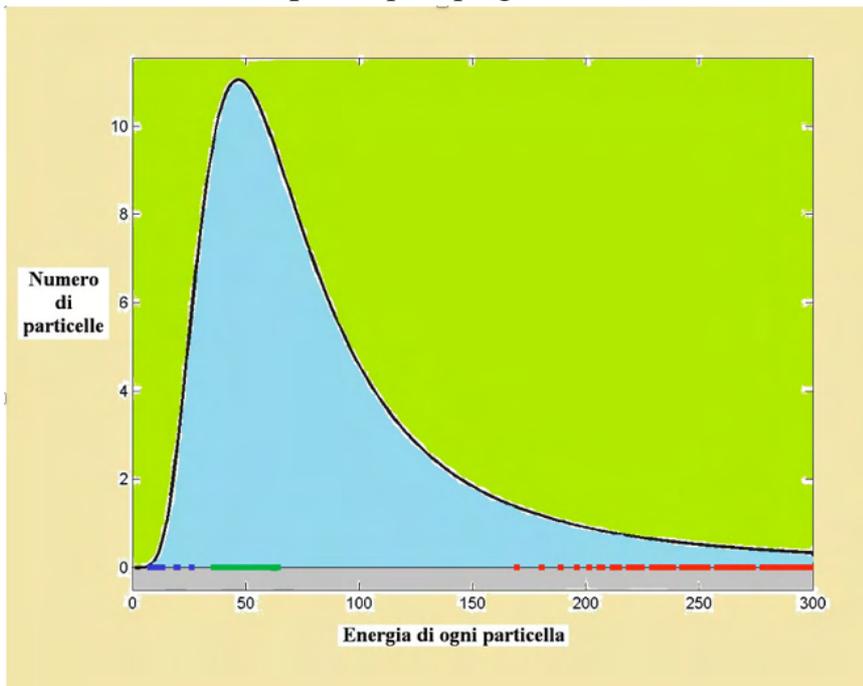
«Per esempio: mi fa comodo pensare che l'energia contenuta in ciascun *granello* sia proporzionale alla frequenza  $\nu$ . In tal modo, posso scrivere una relazione semplice tra frequenza ed energia per ogni granello di luce:  $E = h\nu$ , dove  $h$  non rappresenta altro che una banale *costante di ragguaglio* (ma anche il parametro libero nella formuletta) tra energia e frequenza, sul cui valore numerico, per ora, non mi voglio pronunciare. Ammetto di ragionare così per un motivo vergognoso, e cioè: nella formula da me trovata, c'è un pezzetto che andrebbe a posto se le cose funzionassero proprio in questo modo. Un buon fisico non si dovrebbe permettere di lavorare seguendo direttive di questo tipo, ma io non lo confesserò mai.» (Non è vero, alla fine confessò.)

«Adesso, devo riflettere bene su cosa fa una particella dotata di carica elettrica, in movimento nel materiale di cui è composto il Corpo nero, proprio nell'istante in cui essa è soggetta a una collisione e, in conseguenza dell'accelerazione subita, emette luce. Se questa luce deve venir fuori a granelli, e l'energia di ciascuno di essi è proporzionale alla frequenza, difficilmente la materia riuscirà a tirare fuori granelli di frequenza troppo elevata.»

«Infatti, studiando la scienza del calore, la cosiddetta *termodinamica*, io so che a ogni temperatura corrisponde una certa *distribuzione statistica* dell'energia delle particelle.» Essa prende (ai nostri tempi) il nome di *curva di Maxwell – Boltzmann*, ed è mostrata in figura 13.2.

«Ora, questo grafico racconta una cosa piuttosto importante. Tanto maggiore è l'energia rilasciata dalla particella sotto forma di luce (più vado verso destra sull'asse orizzontale, nella zona tratteggiata in rosso), tanto minore è il numero di particelle che possiedono quest'energia (la curva scende verso zero).»

E qui interrompo un attimo le riflessioni di Planck, da me pesantemente rivedute e corrette *ad usum delphini*, per spiegare al lettore che i numeri scritti sugli assi di figura 13.2



sono in unità di misura del tutto arbitrarie. Per esempio, se consideriamo un grammo (o un centimetro cubo) di materia della cavità di corpo nero, il numero di particelle va moltiplicato per qualcosa come  $10^{24}$  circa, e non è poco! Perciò, contentiamoci di numeri piccoli.

In ogni caso, partendo da zero e al crescere dell'energia desiderata, si ha dapprima una salita nel numero di particelle (zona tratteggiata in blu sull'asse orizzontale)

**Figura 13.2**

fino a raggiungere un massimo (in verde pieno), dopodiché, il numero di particelle con energia sempre maggiore scende verso lo zero, come nella zona tratteggiata in rosso.

Chiarito il grafico, possiamo tornare al *modello di Planck* e far ancora parlare questo coraggioso pioniere tra sé e sé. «A questo punto, mi sembra di poter eseguire la *saldatura* tra la curva di Maxwell – Boltzmann e la radiazione emessa dal corpo nero. Se, a una determinata temperatura, l'energia  $h\nu$  richiesta affinché sia emesso il *granello di luce* è molto maggiore dell'energia media delle particelle costituenti la cavità, poiché ci troviamo nella zona tratteggiata in rosso, i granelli di luce emessi con quella frequenza saranno, per forza di cose, in numero sempre minore via via che  $\nu$  aumenta, proprio come si osserva in realtà.»

Insomma, introducendo l'ipotesi fondamentale che la luce sia liberata solo in *granelli* – detti *quanti* dal Latino *quantum* ovvero: *quantità finita* – la distribuzione di Maxwell – Boltzmann per le energie delle particelle materiali costituenti il Corpo nero impone inesorabilmente, al crescere di  $\nu$  e perciò al diminuire di  $\lambda$ , un numero di granelli di luce uscenti dalla cavità tendente a zero al limite di  $\lambda = 0$  ovvero  $\nu = \infty$ .

Proprio come si trova negli esperimenti, ma in violazione totale delle equazioni di Maxwell. Come la mettiamo? Maxwell – Boltzmann in contrasto con Maxwell... il povero scozzese, se non fosse già morto nel 1879, si sarebbe trovato a litigare con se stesso. Confusione totale!

Per Max Planck, il problema concettuale era enorme, e si traduceva in una dualità insostenibile: la luce è *onda o particella*? Pensiamoci anche noi: un'onda è un'onda e, pur con tutta la buona volontà di questo mondo, uno non riesce a immaginarsela "impacchettata" in tanti grumi, ciascuno dei quali identico all'altro finché la frequenza  $\nu$  (in poche parole il *colore*) è costante. È dunque mestieri far parlare di nuovo il nostro eroe.

«Un momento: io ho pronto un trucco che, forse, rimetterà tutto a posto. Nella nuova formuletta non derivabile da nessuna legge di natura conosciuta, ma da me costruita *ad hoc* dalle tabulazioni matematiche al solo scopo di riprodurre la curva di radiazione di Corpo nero, io posso benissimo variare a piacimento il valore di questo benedetto (o maledetto) coefficiente arbitrario  $h$  la cui presenza è inevitabile, sia perché stava scritto sul libro, sia perché, in effetti, è proprio lui a permettermi di evitare la *catastrofe ultravioletta*.»

«Allora, cosa farò? Semplice! Una volta riuscito a riprodurre la curva sperimentale esatta, comincerò a diminuire via via il valore di  $h$  fino a portarlo a zero. In questo modo la granularità nell'emissione della luce svanirà, ma io avrò mantenuto la forma giusta della curva teorica.»

Qui devo introdurre un breve inciso. Cosa vuol dire “*fattore di ragguglio*” o “*coefficiente moltiplicativo*” come ora abbiamo definito  $h$  e come, a suo tempo, definimmo la costante gravitazionale  $G$  nella formuletta di Newton? Bisogna spiegarlo con un esempio. Me n'è piaciuto uno, che ho trovato in un libro (mediocre) di Kenneth Ford, e ve lo propongo.

La nostra auto è in riserva. Ci fermiamo a una stazione di servizio e facciamo il pieno. Sulla colonnina dell'erogatore contiamo i litri, e supponiamo che il serbatoio ne inghiotta quaranta. Arrivato il momento di pagare, tiriamo fuori una banconota da 50 € e la porgiamo al gestore attendendo il resto. Ma anche il gestore rimane in attesa e alla fine protesta: «Non sono cinquanta €, ma molto di più!».

Noi ci fingiamo sorpresi: «Come sarebbe? Quaranta litri sono quaranta €, no?».

Neanche per idea: c'è un “*fattore di ragguglio*” o “*coefficiente moltiplicativo*”; molto banalmente, il costo di un litro di benzina in €. Che, per un'altra Legge inesorabile, aumenta sempre come l'Entropia, ed è ben superiore a 1.

Ecco: la natura di  $h$  o di  $G$  non è diversa. Questi due numeri sono l'espressione di, rispettivamente, *quanto costa, in termini di energia, una frequenza*, e *quanto costa, in termini di forza, il rapporto [massa/raggio] elevato al quadrato*. La grossa differenza tra loro e il costo della benzina in € l'abbiamo appena rilevata: Madre natura lavora su valori costanti, mentre Padre governo lavora su cifre variabili (le accise e altre tasse) che aumentano ogni giorno e non diminuiscono più.

Finalmente, completato l'inciso, possiamo tornare a Planck e alla sua velleità di diminuire via via il valore di  $h$  nella formula, fino a conciliare la distribuzione osservata di Corpo nero con le previsioni delle equazioni di Maxwell.

Facile a dirsi, caro Max, ma non bisogna vendere la pelle dell'orso finché non si ha in mano! Purtroppo, ogni sua speranza fu vanificata come se fosse stata riposta in una bolla di sapone. Vale a dire: per un certo valore ben preciso di  $h$  la curva teorica prevista dalla sua formula era sovrapposta perfettamente a quella sperimentale, ma se appena il povero Planck provava a diminuire un po' il valore numerico di  $h$ , le nuove curve teoriche ricominciavano a tendere inesorabilmente all'infinito per le alte frequenze, e finivano per diventare indistinguibili da quella di Maxwell.

Ribattevano – ripeto – la curva che Madre natura aveva decretato *sbagliata* ma, purtroppo, si ricavava in modo impeccabile in base alle equazioni di Maxwell. Bella grana! D'altra parte, adottando valore *giusto* di  $h$ , la formula teorica prevedeva un andamento della radiazione di Corpo nero sovrapposta con precisione assoluta alla curva osservativa,

sperimentale. Ciò faceva sospettare che non potesse trattarsi di una banale coincidenza, e qualcosa dovesse ben esserci sotto, ma che cosa?

Nel dicembre del 1900, sconsigliato e confuso, Planck raccontò i suoi risultati ai colleghi della società Berlinese di fisica in un seminario per specialisti. Per quanto si sentisse imbarazzato, stava cominciando a prendere sul serio l'idea che la luce fosse emessa da un Corpo nero (e in generale da qualsiasi sorgente) in "pacchetti" o *quanti*. Noi, oggi, chiamiamo *fotoni* questi pacchetti e perciò, d'ora in poi userò sempre quest'ultima dizione, pur se non era ancora quella dell'epoca (il termine fu coniato solo nel 1926).

Nel dotto consesso, l'ipotesi di Planck fu accolta con un misto di scetticismo e curiosità, ma per lo meno non fu scartata a priori con disdegno perché, assegnando a *h* il valore  $6,626 \times 10^{-27}$  nel sistema di misura preferito dai fisici (il centimetro – grammo – secondo), la curva di Corpo nero teorica era lì, sotto gli occhi di tutti, e su questo non si poteva scherzare perché ogni nuova misura sperimentale confermava la formuletta di Planck.

Detto in altro modo, la faccenda venne resa nota anche al mondo più generale dei fisici, ma rimase in sospenso a bollire a fuoco lento in attesa che venisse fuori qualcuno con una spiegazione convincente di questa grossolana violazione della fisica classica, quella di Kelvin e Maxwell (Kelvin aveva pontificato solo pochi mesi prima).

In sintesi, lavorando *al buio* con un po' di matematica (la formula pura e semplice), e con ben poco ausilio da parte della fisica (il significato era ancora troppo vago per divenire *presentabile*), la seconda nuvoletta di Kelvin era stata almeno *aggredita*, ma al prezzo di sostituirla con una tempesta incombente: l'ipotesi secondo la quale l'energia elettromagnetica fosse *impacchettata*. Un po' come se le onde luminose venissero giù a *caramelle colorate*. Quelle verdi sono più grandi (hanno più energia) delle rosse, e le blu sono ancora più grandi delle verdi ma, fissato il colore, è fissata anche l'energia (il *peso*, se preferite) di ogni caramella.

Oppure, come descrizione alternativa che soddisfa tutti (si fa per dire: non soddisfa nessuno), la luce può comportarsi come una normale onda (e l'ottica *ondulatoria* lo dimostra, con precisi esperimenti datati dal primo '800 in poi) ma, nei processi di emissione o assorbimento, compare, a volte, sotto forma *particellare*. Un brutto pasticcio.

Chi poteva togliere le castagne dal fuoco a Planck? Einstein, ovviamente: sempre e solo lui. Nel 1905, il nostro dimostrò in modo incontrovertibile che Planck aveva ancor più ragione di quanto lui stesso credesse, e che i *fotoni* non erano un artificio matematico, bensì una caratteristica fondamentale del modo di procedere di Madre natura.

L'astro nascente della fisica raggiunse questo risultato, spiegando un effetto ben osservato e quantificato in laboratorio, definito "Effetto fotoelettrico", anch'esso non congruente con le previsioni delle equazioni di Maxwell. In questo caso avviene un *assorbimento* (ricordate: per il Corpo nero si tratta di *emissione*) di luce in termini di *quanti*, e ciascuno di essi possiede, per l'appunto, energia *hv*.

Non starò a tediare il lettore con la dimostrazione di Einstein: è semplice e ben comprensibile, ma un po' lunghetta e non serve ai nostri scopi. Dirò solo questo: come tutti i lavori del genio di Ulma, anche la prova da lui portata era così solida ed elegante da non poter essere soggetta a critica neppure dai più scettici, e chiunque fu costretto a chinare il capo di fronte all'evidenza. La luce può davvero presentarsi vuoi come onda, vuoi come particella, secondo il particolare tipo di esperimento cui è soggetta. La comunità dei fisici, in ogni caso,

richiese un po' di tempo prima di mandare giù il rospo, e solo nel 1918 Planck fu premiato con il Nobel per la fisica.

Così, prima in sordina, e poi con una botta secca da far saltare il banco, s'intrufolò nella mente dei fisici l'idea secondo la quale, almeno nell'enormemente piccolo e in qualche caso particolare, «*Natura saltus facit. Iure si facit, damnant!*» (tanto per evitare equivoci linguistici). In ogni caso, era ancora solo un inizio, limitato alla luce. Siccome Einstein aveva cominciato a inseguire la Relatività generale mollando i *quanti*, che già cominciavano a fargli un po' senso, alcuni fisici più giovani di una generazione presero la palla al balzo, e provarono a estendere il concetto.

La nuova costante di Planck ( $h$ ) ha le dimensioni fisiche del cosiddetto **momento angolare** (non è la stessa cosa di **€ per litro**, mi raccomando) una quantità che, per motivi di principio, si conserva sempre, al pari dell'energia e altre ancora. Puro e semplice caso, in prima battuta poco importante, o almeno così sembrava all'inizio. E invece fu la chiave per mezzo della quale Niels Bohr cominciò spazzare via un altro nuvolone che intorbidava i cieli della fisica, e di cui Kelvin, non fece in tempo a rendersi conto, essendo passato a miglior vita alla fine del 1907. Vediamo di cosa si trattava.

Esperimenti condotti dall'australiano Rutherford, col quale Bohr collaborava all'inizio della propria carriera scientifica, avevano dimostrato, attorno al 1909, che l'atomo contiene un piccolo nucleo nel quale si concentra tutta la massa e tutta la carica elettrica positiva, ed elettroni leggerissimi, di carica negativa. Questi ultimi, in qualche modo non del tutto chiaro, possono solo **orbitare** attorno al nucleo stesso. È l'analogia tradizionale, quella studiata a scuola, in cui l'atomo è descritto come se fosse un sistema solare in miniatura.

In realtà, anche questo modellino apparentemente innocuo è in grave contraddizione con le equazioni di Maxwell. Infatti, una particella elettricamente carica come l'elettrone, se si muove di moto orbitale, sta accelerando – ricordate: la rotazione attorno a un centro comporta necessariamente un'**accelerazione laterale** – e, per questo stesso fatto, deve irradiare luce perdendo energia. Di conseguenza gli atomi non potrebbero esistere se non per frazioni minuscole di secondo, e ogni elettrone, irradiando tutta la sua energia in un breve lampo di luce, finirebbe per cadere sul nucleo.

Altro breve inciso: questo è il motivo per cui, negli acceleratori di particelle, non è possibile aumentare l'energia di queste ultime oltre un certo limite strutturale, dovuto a com'è costruita la macchina. Le cariche elettriche (siano esse elettroni, protoni o nuclei di qualcosa), infatti, ruotando in una ciambella, sono accelerate a ogni giro. All'aumentare della loro velocità fino quasi a  $c$  (meno una minuscola differenza) come, per esempio, nel caso di **LHC**, si raggiunge un **equilibrio dinamico** per cui esse irradiano, a ogni giro, tanta energia quanta la macchina gliene riesce a impartire nel corso del giro stesso. Per aumentare l'energia alla quale studiare poi le collisioni, l'unico rimedio trovato finora è diminuire l'accelerazione laterale delle particelle, ma ciò si può ottenere solo aumentando il raggio della loro traiettoria (e quindi dell'acceleratore). In particolare, **LHC**, con una circonferenza di **27 km**, già è costato circa otto miliardi di €. Ma, come vedremo, ne è valsa la pena. Fine dell'inciso.

Anche Bohr, come Planck prima di lui, se ne venne fuori con un'ipotesi dovuta alla disperazione, ma essendo giovane, e avendo assimilato la **quantizzazione** tra i suoi strumenti intellettuali, fu più coraggioso e, per risolvere il problema dell'esistenza degli atomi in barba

alle povere equazioni di Maxwell, ebbe la faccia tosta d'introdurre in fisica un nuovo principio calato dal nulla, e sostenerlo a spada tratta.

Egli ipotizzò che gli elettroni potessero ruotare attorno al nucleo atomico senza perdere energia, a una sola condizione: il **momento angolare** della loro orbita (per i più curiosi, il prodotto della massa dell'elettrone per la sua velocità, moltiplicato ancora per il raggio dell'orbita) doveva essere uguale a  $h$  o a un suo **multiplo intero**. E perché?

Cerchiamo di capire meglio come dovrebbe funzionare la faccenda nel caso dell'atomo d'idrogeno; il più semplice poiché possiede un solo elettrone. Quest'ultima particella, se Bohr fosse nel giusto, non potendo più **ruotare** a qualsiasi distanza dal nucleo, ma solo a quelle ben precise il cui momento angolare soddisfacesse il requisito dello stesso Bohr, avrebbe a disposizione una prima orbita – quella più vicina al nucleo –, una seconda più lontana e così via, e non potrebbe cadere sul nucleo perché, in tal caso, il suo momento angolare si annullerebbe.

Già fermandosi qui, bisogna ammettere che è un bello schiaffo alle equazioni di Maxwell. Come corollario, però, l'energia dell'elettrone sarebbe pur essa **quantizzata** e, di conseguenza, l'atomo potrebbe emettere soltanto **fotoni** di energia ben precisa (e quindi non tutto lo spettro di Corpo nero) durante i **salti** dell'elettrone da un'orbita più esterna a una più interna. Elegante ma arbitrario, a meno che la cosa funzioni sperimentalmente, e cioè la luce emessa dall'idrogeno portato ad alta temperatura si conformi alle previsioni di Bohr. Come andò a finire la storia? Andò così: la radiazione dell'idrogeno aderiva in modo clamoroso alle condizioni imposte da Bohr, almeno per quanto potessero dimostrare le misure ottenute dalle apparecchiature di quei tempi.

In anni successivi, venne fuori che la faccenda aveva risvolti più complicati: quella di Bohr era una prima approssimazione e sarebbe stato necessario tener conto di diversi altri meccanismi, ma il fondamentale passo in avanti era stato eseguito. Ragion per cui, avendo accettato l'evidenza che la quantizzazione non si applica solo ai fotoni, ma agli interi atomi (e cioè a particelle materiali), sarebbe stato necessario rivedere in modo assai pesante le normali leggi della meccanica newtoniana, sostituendole con... con qualcos'altro, ma cosa? Ora vedremo.

Era nata, per l'appunto, una nuova Meccanica: quella **Quantistica (MQ)**. Solo, le mancava ancora un **Principio** basilare, una roccia solida cui appoggiarsi, com'era stato il Principio d'invarianza di  $c$  per la Relatività, onde consentirle di svilupparsi in modo efficace e consistente. Cosa poteva mettere in relazione la rotazione degli elettroni in un atomo con l'emissione di fotoni da parte di un corpo nero? Una debole ragnatela d'ipotesi ed esperimenti, e bisognava rinforzarla.

Bohr diventò all'istante l'alfiere e sovrintendente della **MQ**, durante i lavori di costruzione durati tre decenni, sostituendosi a Planck ed Einstein che l'avevano creata, ma non ne erano per nulla contenti. Quando saltava fuori un aspetto ripugnante all'intuizione, Bohr lo accettava così com'era senza mettersi a discuterlo più di tanto (molte volte faticava un po' anche lui, e alla fine la cosa venne fuori), e combatteva perché fosse accettato anche dagli altri fisici.

A posteriori, come dicevamo, lo ammise: neanche lui si era turato il naso del tutto, e quindi non aveva fin dall'inizio mandato giù il rospo tutto intero, vale a dire l'idea secondo

la quale la nascente **MQ** dovesse rispecchiare una realtà nota solo a Madre natura; una realtà, entro certi limiti, incompatibile con la logica.

Il danese, infatti, si era chiesto perché l'universo, almeno nell'enormemente piccolo, non sembrasse conformarsi alle regole che regnano nei cervelli dell'Homo sapiens. E la sua conclusione (dopo anni in cui cercò di conciliare la **MQ** con un minimo di *realismo*) fu la seguente: non c'è alcun motivo a priori per cui la natura debba sottostare a questo vincolo, come toccheremo con mano tra poco. Al contrario di quanto pensava – e desiderava – Einstein il quale, purtroppo, su questo fronte aveva torto... però vedremo più avanti che pure il grande vecchio – era ormai tra i quaranta e i cinquanta; un'età da vecchi, per l'epoca – si dimostrò *molto sottile*, forse anche più dell'amico / nemico Niels.

Se ci pensiamo bene, d'altronde, Bohr non si stava allontanando, sul piano filosofico, dal solco principale della fisica. Le sue motivazioni seguivano rigorosamente il più puro spirito galileiano: il risultato dell'esperimento va accettato e basta, e si traspone in termini matematici. Solo dopo, semmai, si può provare a costruirne anche un modellino intuitivo.

Qualora questo secondo passo, però, porti frutti incerti e parziali, non importa più di tanto. Si restringe l'intervallo di validità di ogni *modello* solo a pochi aspetti del fenomeno considerato, a volte pochissimi, e s'inventano altri modelli, ciascuno dei quali relativo, a sua volta, a una sola, minuscola, tra le numerosissime sfaccettature della *realtà* fisica (la *realtà*: un concetto sempre più sfuggente). Pazienza, se una cosa non si può *capire* del tutto: importa solo che, sul piano sperimentale, si possa trattare matematicamente, e tanto deve bastare al fisico.

Proprio in questo senso (la costruzione di modelli o la rinuncia a provarci), Bohr fu molto attivo: lui lavorava a Copenaghen, e la sua interpretazione favorita della **MQ** prese il nome di "interpretazione di Copenaghen". Quella che non andò mai giù a Planck, Einstein e Schrödinger, per capirci. Tenterò di far inorridire il lettore almeno quanto inorridisco io quando gliela spiegherò, e anche lui si troverà di fronte ad alcune implicazioni logiche a dir poco *contorte*.

Non dimentichiamoci mai, però, del nostro filo conduttore. In prima approssimazione, questi discorsi sono strumentali a una descrizione del Big Bang, e non possiamo seguire i dettagli dello sviluppo della **MQ**. Al più, dove non saranno indispensabili allo scopo di cui sopra, diverranno comunque un abbellimento del nostro Modello d'universo.

Giungiamo dritti al motore, quello cercato da Bohr e che, all'inizio, spaventò *un pochino* (anzi, *tanto*) pure lui: il *Principio d'Indeterminazione* individuato finalmente da Heisenberg (per noi sarà da subito il **PdI**). Vale a dire: il *Principio* fondamentale, sul quale edificare tutto il resto.

E vi metto in guardia da subito: l'enunciato del **PdI** sembra significare una cosa, ma ne vuol dire un'altra, radicalmente diversa. Niente paura, comunque: io sono qui per aiutarvi a districare la matassa, e ho tutta la pazienza che volete; vi basterà rileggere all'infinito... e potete pure mandarmi un'e-mail, se non esagerate (e se sarò ancora vivo). In fin dei conti non c'è nulla di noioso, anzi!

Specie considerando che è tutto *vero*, per quanto possa sembrare incredibile. La sola condizione per procedere è *far tacere il nostro buon senso e la logica*. Spero non vi sembri un vincolo eccessivo...

### 13.3) – “Heisenberg 2”: la vendetta

Werner Heisenberg, ancor più “*Tetesco ti Cermania*” del patriota Schwarzschild, presentò nel 1923 una tesi di laurea molto brillante sulla *turbolenza* ma, per quanto geniale egli fosse, fu quasi bocciato nella dissertazione. Il suo contro-relatore era Wien (premio Nobel nel 1911), un fisico sperimentale di valore dal quale abbiamo un’utile legge empirica sul Corpo nero utilizzata anche da Planck.,

Wien, giustamente, riteneva che un fisico teorico (quale voleva diventare il giovane Werner) dovesse comunque avere pratica di laboratorio, e saper discutere i problemi della sperimentazione in modo ragionevolmente accurato. Di conseguenza, picchiò duro nel farsi spiegare fino ai dettagli estremi cosa avviene quando, in un microscopio, si osserva un oggetto le cui dimensioni siano paragonabili alla lunghezza d’onda della luce che lo illumina.

Intendiamoci: Heisenberg era super preparato. Solo, gli successe quanto accade a ciascuno di noi: sotto pressione, col vecchio e autorevole Wien che gli era pregiudizialmente contrario e non ne faceva mistero, chiunque avrebbe sofferto di qualche vuoto di memoria; della difficoltà di vedere il passaggio matematico ovvio e così via (a me è successo diverse volte, e dunque so bene cosa si prova), per cui riuscì a strappare la laurea, ma non ne cavò fuori un buon ricordo. Questo sarebbe l’“*Heisenberg I*”. Ora, la vendetta.

Non c’è da meravigliarsi, infatti, se i biografi del genio germanico tendano a vedere, nella prima enunciazione del Principio d’Indeterminazione (**PdI**) del 1927 (proprio quella usata come roccia per fondarvi tutta la **MQ**), un certo spirito di rivalsa postuma nei confronti di Wien. Il quale, comunque, morì l’anno dopo, ed è molto dubbio che si sia reso conto delle intenzioni vendicative di Heisenberg.

In sostanza, l’esempio utilizzato dal nostro Werner per spiegare l’esito delle sue cogitazioni si basa, per l’appunto, sulle difficoltà *sperimentali*, oltre che teoriche, cui si va incontro quando si cerca di osservare una particella molto piccola, di dimensioni atomiche, con uno strumento la cui definizione sarà per noi “*microscopio*”. E ciò, nonostante possa trattarsi di tutt’altra cosa: qualche marchingegno di tipo diverso dalla solita apparecchiatura a lenti. Ecco: proprio gli *acceleratori di particelle*, a modo loro, sono *microscopi*.

Ovviamente, non starò a tediare il lettore con i passaggi matematici – ingannevolmente semplici, trattandosi di un *gedankenexperiment* – per mezzo dei quali si giunge al **PdI**; cercherò piuttosto di chiarire (nei limiti del possibile che, come vedremo, non aiutano molto) il suo significato intuitivo, con un’avvertenza importante. Il primitivo enunciato di Heisenberg, infatti, trascurava tutta una serie di dettagli *sperimentali* (ci risiamo, eh Werner?) i quali, alla fine, sono importanti almeno quanto quelli, *teorici*, da lui presi in considerazione. Ci pensò Bohr, nel tentativo di capire se il giovane collega avesse preso un granchio. In ogni caso, alla fine arrivò allo stesso risultato, e questo è l’importante.

Partiamo da una considerazione che si capisce benissimo anche senza buttar giù formule e numeri: se guardiamo un oggetto attraverso un microscopio, la precisione con cui riusciremo a determinarne la posizione non potrà comunque essere migliore di... pensateci; ragionate un attimo da soli perché è banale (ma ve lo dico lo stesso). Della lunghezza d’onda della luce per mezzo della quale osserviamo l’oggetto.

Vi propongo un esempio su un caso pratico: decidiamo di usare un'onda radio avente  $\lambda =$  un metro, per *illuminare* un capello. Il nostro *microscopio*, stavolta, sarà un'antenna grande quanto quelle con le quali si studia il cielo per capire se gli alieni ci mandano segnali radio. Cosa potrà dirci un'apparecchiatura del genere sulla posizione del capello? Ben poco: se saremo fortunati, e il capello verrà davvero rivelato, sapremo tutt'al più che quest'ultimo si trova all'interno dell'intervallo di *un metro* coperto dal *fotone radio*. Seppure l'onda riesca a *percepire* un oggetto così piccolo, e in pratica non lo farà. Infatti, un fotone *non ha parti*, ma è un *tutt'uno*; quello da noi utilizzato è *come se fosse lungo un metro*: gli oggetti più piccoli, *neanche li vede*, in senso stretto.

Di conseguenza, se l'informazione che stiamo cercando riguarda lo spessore del capello – un decimo di millimetro circa –, dovremo illuminarlo con luce di lunghezza d'onda molto minore. Quella visibile, per esempio, fa al caso nostro, e non per nulla funziona bene con i tradizionali microscopi a lente poiché la sua lunghezza d'onda è circa mezzo millesimo di millimetro. Questo è il motivo per cui essa consente di ottenere immagini *ingrandite* fino a circa 1000 volte: 2000 a sparare grosso.

In sostanza: quando osserviamo oggetti troppo piccoli, le cui dimensioni cominciano a diventare paragonabili alla lunghezza d'onda della luce visibile, le forme si fanno sempre più sfocate. La colpa non è del microscopio, ma della luce stessa: avendo quella certa lunghezza d'onda, non riesce a *infilarsi* meglio di tanto nelle asperità dell'oggetto.

È finalmente l'ora di affrontare Heisenberg e il suo **PdI** (rammento; Principio d'Indeterminazione), memorizzando preventivamente la convenzione già accennata prima, e che adesso che stipulo col lettore: di qui in poi parlerò sempre di *microscopio*, qualunque sia il tipo di apparecchiatura equivalente sottintesa (anche l'acceleratore LHC del CERN è un *microscopio* dalle prestazioni eccezionali).

Ma è ora di seguire l'esperimento concettuale. Supponiamo che sul *vetrino* del microscopio, qualcuno sia riuscito ad appoggiare – non è possibile sul piano pratico, ma non facciamoci scoraggiare da così poco: è un *gedankenexperiment* – un elettrone. Noi vogliamo misurarne la posizione con buona precisione. Sarà dunque necessario lanciare un fotone che colpisca l'elettrone, ne sia riflesso, passi attraverso il microscopio e, finendo nel nostro occhio o su un altro rivelatore adeguato, renda accessibile l'informazione da noi desiderata.

Da quanto detto sopra, sappiamo già che la lunghezza d'onda  $\lambda$  della luce inviata, dovrà essere *uguale o inferiore* alla *precisione* nella misura da noi ritenuta accettabile. Come caso estremo: se esigessimo precisione infinita, bisognerebbe usare fotoni di lunghezza d'onda zero, e cioè di frequenza ed energia infinita. Siccome questo non è pensabile, ovviamente bisognerà accontentarsi di una misura approssimata.

Per esempio: ci basterà sapere che, lungo l'asse delle  $x$ , la posizione dell'elettrone è compresa all'interno di un piccolo intervallo. Per comodità del discorso seguente, lo definiremo  $\delta x$ . Potrebbe essere un miliardesimo di millimetro come un centimetro; il valore non ci interessa, conta solo il ragionamento generale.

Avendo perciò accettato una precisione  $\delta x$  nella misura, e ricordando il discorso precedente, già sappiamo che sarà necessario inviare luce (o qualcos'altro che urti l'elettrone, ma è più semplice seguire a parlare di fotoni) avente  $\lambda < \delta x$ ; solo così potremo ricavare l'informazione di nostro interesse. Suppongo che fin qui mi stiate seguendo, vero? Siamo già arrivati alla prima metà del **PdI**.

Ora inizia la seconda parte: conoscendo  $\lambda$  della luce inviata, ne deriveremo la frequenza  $\nu = c/\lambda$ , e potremo calcolare l'energia  $E$  del fotone, che non può essere piccola a piacere, ma è fissata dalla formuletta di Planck:  $E = h\nu = hc/\lambda$ . Fin qui, nulla di nuovo. Possiamo quindi tornare all'elettrone urtato dal fotone.

Cosa avviene quando due biglie in moto si urtano? Rimbalzano, e le loro direzioni e velocità dipendono dalle caratteristiche dell'urto. Ebbene: elettrone e fotone sono, *entro certi limiti*, due biglie.

Il microscopio, perciò, ci dirà in quale intervallo  $\delta x$  stava l'elettrone *all'istante dell'osservazione* ma – e qui state attenti perché è la chiave di tutto –, proprio per il fatto di averlo osservato, e di averlo *urtato* con un fotone dotato di una certa energia, l'elettrone è *rimbalzato* e ora *non si trova più lì*.

Inoltre, e questo è il problema aggiuntivo irrisolvibile, non solo il nostro elettrone, durante la collisione col fotone, ha cambiato il suo stato di moto ma, poiché i dettagli dell'urto sono sconosciuti, non sappiamo più in che direzione si muova, e con quale velocità.

Questo è il fondamento del **PdI**: per riuscire a osservare sempre meglio la posizione di un oggetto, bisogna spedirgli un fotone di energia via via crescente, e di conseguenza se ne conosce sempre peggio la velocità dopo l'osservazione.

Heisenberg riuscì a mettere in formule il **PdI**. Se definiamo  $m_e$  la massa dell'elettrone, e  $\delta V$  l'incertezza con cui se ne può valutare la velocità dopo l'urto (non commettete errori di lettura;  $V$  è una velocità e non ha nulla da spartire con la frequenza  $\nu$ ), si ha:

$$\delta x \times (m_e \delta V) \geq h/4\pi$$

E lasciate perdere il  $4\pi$ : viene fuori dai conti precisi. Ora vi chiedo di avere pazienza se vi costringo a ripercorrere per l'ennesima volta l'accaduto, anche se sono convinto che ne abbiate capito bene i fondamenti. Il perché di questa ripetizione diventerà chiaro nel prossimo capitolo.

L'elettrone, dunque, inizialmente si trova in un certo punto, ma noi non sappiamo quale. Arriva un fotone che lo urta e gli impartisce una certa velocità, dopodiché il fotone finisce in un apparecchio, e per mezzo di questo possiamo misurare qual era, prima del suo arrivo, l'intervallo di lunghezza  $\delta x$  al cui interno si celava l'elettrone.

Fin qui, sarebbe legittimo se uno si domandasse: «Un momento. Siccome so di preciso l'energia e la direzione da cui ho sparato il fotone, e com'è stato deviato il fotone stesso per arrivare al rivelatore, per quale motivo non posso calcolare con esattezza le modalità dell'urto e, di conseguenza, conoscere anche la velocità con cui l'elettrone è stato sparato via, proprio come farei con due biglie?».

In prima approssimazione, una risposta potrebbe essere: «Se conosco la posizione dell'elettrone solo approssimativamente (si trova entro  $\delta x$ ), come faccio a sapere le circostanze *esatte* della collisione? Può essere stata frontale, di striscio, e così via. Perciò, non è vero che posso calcolare tutto con precisione; al massimo, saprò che la velocità finale dell'elettrone è compresa entro un intervallo  $\delta V$ ».

Avendo scrutinato da ogni parte la collisione con tutte le incertezze sperimentali, ruoto la frittata dall'altra parte e provo a fare il ragionamento inverso. Vale a dire: mi soffermo sulla misura della velocità, anziché su quella della posizione.

In questo caso, supponiamo che l'elettrone sia in movimento con velocità  $V$ , e di voler misurare con una precisione  $\delta V$  la sua velocità. Siccome la velocità è un rapporto tra la

distanza percorsa e il tempo impiegato a percorrerla, sarà necessario misurare in due momenti diversi la posizione dell'elettrone, e quindi in due posizioni differenti. Per raggiungere quest'obiettivo nel miglior modo possibile, riflettiamo: quale tipo di fotoni converrebbe inviare sull'elettrone per eseguire le due misure, perturbando il suo movimento il meno possibile?

Se utilizzassimo fotoni di alta energia, conosceremmo bene le due posizioni ma, purtroppo, perturberemmo molto la velocità. Di conseguenza, pare ragionevole servirsi di fotoni di bassa energia che, proprio per questo, hanno una  $\lambda$  piuttosto grande. Solo in questo modo la perturbazione della velocità causata dalla misura potrà essere minore di  $\delta V$ . Allora, però, giacché non possiamo conoscere la posizione dell'elettrone con una precisione migliore di  $\lambda$ , siamo alle solite: se l'incertezza  $\delta V$  da noi accettata nella misura della velocità è piccola, il valore di  $\delta x$  aumenta. Insomma, pure facendo il discorso al contrario, si scopre che, se diminuisce  $\delta V$ , deve per forza aumentare  $\delta x$  e viceversa. E tutto come conseguenza della **granularità** della luce e della formuletta di Planck!

Proviamo a mettere giù un po' di numeri, tanto per confrontare il nostro mondo normale con la realtà quantistica. Decidiamo che la precisione con cui è sufficiente conoscere la velocità di un elettrone è un centimetro al secondo. Con quale precisione riusciremo a determinare la sua posizione? Il valore della costante di Planck  $h$  lo conosciamo, e così pure quello della massa dell'elettrone  $m_e$ . A conti fatti, viene fuori: se  $\delta v = 1 \text{ cm/s}$ , allora  $\delta x \sim 1 \text{ cm}$ .

Dobbiamo considerare quest'incertezza *grande* o *piccola*? Tutto dipende da cosa intendiamo; su scala *umana* è ragionevolmente piccola; nel mondo ultramicroscopico è spaventosamente grande: **cento milioni di atomi messi in fila**. Sarebbe come dire che non abbiamo la più pallida idea di dove si trovi quell'elettrone!

Adesso, vogliamo ripetere i conti con qualcosa di più grosso, vicino alle **nostre** dimensioni. Per esempio, con un'auto che passa davanti all'autovelox. Per legge, la precisione nella misura della velocità dovrebbe essere di pochissimi km/h. Sostituiamo di nuovo i valori numerici nella formuletta di Heisenberg, e ricaviamo quant'è la conseguente incertezza nella posizione dell'auto, se quest'ultima pesa quattro o cinque quintali. Non occorre scrivere il risultato preciso perché, in ogni caso, il valore di  $\delta x$  è di gran lunga inferiore al raggio di un nucleo atomico.

Suppongo che, se in queste condizioni il guidatore pretendesse di chiamare in ballo il **PdI** e arguisse col poliziotto: «Ma Lei non può sapere dove si trovava esattamente l'auto, perché se divido  $h$  per  $4\pi...$ », il tutore dell'ordine riterrebbe opportuno sottoporre l'autista al test del palloncino o procedere al ricovero coatto. E con ottime ragioni.

Perché tanta differenza, pure concettuale, tra i due casi? Per via della **massa**. A conti fatti, se le masse vanno da quelle molecolari in giù, l'indeterminazione domina sovrana e la meccanica newtoniana è solo un giocattolo sfasciato da buttare via. Ci vuole la **MQ**, per l'appunto. Al contrario, se le masse in gioco sono maggiori, l'indeterminazione non cessa per questo di esistere, ma il suo ammontare diventa non più misurabile in termini pratici e perciò, nel nostro mondo macroscopico, neanche riusciamo a percepirla.

Ragion per cui, nel corso dell'evoluzione, il cervello umano non è stato sottoposto a nessuno stimolo per sviluppare la sensibilità necessaria a comprendere i rivolgimenti che hanno luogo nel mondo atomico e subatomico. Dobbiamo ancora meravigliarci se la **MQ**

appare ripugnante alla ragione, e ritenerla perciò sbagliata? Non esiste alcuna ragione biologico – evolutiva per cui dovremmo capirla. Eppure, quando ci penso, mi si rovesciano lo stesso le budella...

Domanda: «Perché dici questo? In fin dei conti, abbiamo dedicato alcune pagine a far rotolare il **PdI** per ogni dove e, almeno fino a questo punto, non abbiamo ancora trovato nulla di sconvolgente. Se accettiamo il vincolo ipotizzato da Planck, e confermato sperimentalmente da Einstein, che la luce sia emessa e assorbita non in modo continuo, ma a flussi di *caramelle colorate* il cui peso (energia, per essere più precisi) è diverso quando cambia il colore, la conseguenza è abbastanza ragionevole: data una qualsiasi particella, è impossibile misurare (e quindi *conoscere* in senso lato) posizione e velocità allo stesso momento, con la precisione che meglio ci aggrada. L'ha dimostrato Heisenberg coll'esempio convincente del suo microscopio.»

Certo, sono d'accordo: fino a questo punto, e dopo averci ragionato sopra qualche minuto, tutto pare abbastanza *intuitivo*, e non tale da toglierci il sonno. Abbiamo forse perso qualcosa per strada? La risposta è: sì, *tutto*, perché non abbiamo riflettuto abbastanza sul *significato fisico* del **PdI**.

O meglio: riflettendoci, ce ne siamo fatti un certo modello mentale, e di conseguenza gli abbiamo implicitamente assegnato un significato abbastanza neutrale senza nemmeno rendercene conto. Invece ne ha un altro, radicalmente diverso e sconvolgente, e lo vedremo procedendo nella lettura.

## 13.4) – Einstein non vuol credere ai fantasmi

Sono mortificato, chiedo scusa, ma illustrando il **PdI** ho deliberatamente raggirato il lettore. D'altronde, a volte, per spiegare la fisica, occorre passare anche attraverso modelli *di transito* che durano lo spazio di un mattino e poi si buttano via. In questa sezione, dovremo liberarci con qualche rimpianto del modello intuitivo costruito nella sezione precedente attorno al **PdI**, per sostituirlo con uno che ci sembrerà indigesto già a vederlo da lontano, manco fosse un fungo velenoso col cappello rosso e le squame bianche sopra (Amanita muscaria), come nei boschi popolati da nanetti e fatine.

Per avviare il discorso, ripensiamo al significato finora attribuito al **PdI**, e poi focalizziamoci sulla domanda seguente cercando di non perdere il filo, perché è un po' lunga e contorta e dura un intero paragrafo. Farebbe comodo una tastiera spagnola col punto interrogativo rovesciato all'inizio: ora lo cerco tra i simboli. Trovato.

Si chiede: «¿Afferma forse, esso “Principio” che, a causa della quantizzazione nell'energia dei fotoni, e alla conseguente perturbazione da essi esercitata, noi non possiamo conoscere (contemporaneamente) posizione e velocità di una particella con precisione assoluta, ma solo con una certa incertezza il cui valore si calcola grazie alla formuletta del **PdI**, *nonostante la particella in sé possieda, ovviamente, posizione e velocità intrinseche ben precise?*».

Tutto quanto vi ho narrato nella sezione 13.3, è congruente con (ma, come vedremo, non richiede necessariamente) una risposta affermativa. E mi spiego meglio: ho sempre parlato – implicitamente – dell'elettrone, come se esso fosse una *particella materiale* analoga a un granellino di sabbia, solo molto più piccolo (non sappiamo quanto; potrebbe anche essere *infinitamente* piccolo). Non mi sono dilungato oltre, limitandomi a dire sempre: “elettrone” e basta, perché questo primo modellino mentale era sufficiente per arrivare all'enunciato matematico del **PdI**.

Il quale, in realtà e come stiamo per capire, non contiene o richiede affermazioni sulla *particella in sé*, ma ci dice solo quali siano *i limiti sperimentali*, dovuti alla quantizzazione della luce, che Madre natura ha attuato, e che non possono essere aggirati quando si cerca di acquisire informazioni sulla particella medesima. Attenzione: la chiave di volta del **PdI** è proprio l'energia da associare a ciascun fotone; se non esistesse la quantizzazione, il principio medesimo andrebbe per lo meno rivisitato.

Stiamo girando attorno al punto: la *realtà assoluta* della particella in esame è senz'altro condizione *sufficiente* per il Principio, ma è anche condizione *necessaria*? Forse non lo è per nulla e, anzi, il **PdI** può essere utilizzato come fondamento per tutta la **MQ**, soltanto a patto di formarci un'immagine intuitiva della particella radicalmente diversa rispetto al granellino di sabbia piccolissimo e perfettamente localizzato. Ci serve un modello alternativo, sul tipo di quello suggerito dall'interpretazione di Copenaghen.

Proprio qui nasce il dissenso radicale di Einstein nei confronti della **MQ**: un dissenso che lo spinse a definire “Spiritiche” alcune sue caratteristiche, di cui parleremo in una sezione apposita. Lui usava il termine “*spooky*”, riferito alle caratteristiche dei fantasmi come quella di passare attraverso i muri eccetera; una traduzione letterale sarebbe: “Spettrali”, ma in italiano funziona male. Vi dispiace se anch'io userò “spooky”, al solo scopo di evitare

confusioni con le *righe spettrali* e con le *sedute spiritiche*? Grazie. E a questo punto posso proporre il seguente enunciato finale, che va accettato come dogma di fede della fisica e della MQ, con tanto di scomunica e interdetto per chi lo rifiuta.

Enunciato: una particella *non possiede* una localizzazione nello spazio, né una velocità *in sé*. Quando eseguiamo una misura su di essa, si *materializza* (ma sul significato di quest'ultimo termine i fisici litigano da un secolo) per il tempo strettamente indispensabile (secondo alcune interpretazioni più moderne non fa neanche questo; vedi il Capitolo 14.2), poi torna in quel limbo di esistenza così *spooky*.

In altre parole, l'entità *impalpabile* che, secondo il vecchio modello mentale classico, corrisponde alla particella, si trova distribuita *in tutto l'universo*, ma *esiste un po' di più* proprio nell'intervallo  $\delta x$ . Qualcuno direbbe: è *più probabile trovarla in  $\delta x$*  ma, come vedremo, questo modo di porre le cose invocando direttamente la *probabilità* non è del tutto corretto, sebbene io stesso, più avanti, sarò costretto a esprimermi in termini simili per non incartarmi irreversibilmente nel mondo *spooky* della MQ.

Inoltre, la particella è anche *distribuita* in un intervallo di velocità *tra zero e c e oltre* (sì, avete letto bene, pur se qui i fisici della vecchia scuola sono piuttosto reticenti a dirlo a voce alta) essendo  $\delta V$  l'intervallo in cui è *più facile trovarla*. Finalmente, tra  $\delta x$  e  $\delta V$  sussiste la relazione esplicitata nel **PdI** di Heisenberg.

Per favore, rileggete e ragionate sui *corsivi* e sui **grassetti**; li ho messi apposta per evitare che concetti importanti siano saltati involontariamente durante una lettura veloce, e il quadro finale sia *confuso nel modo sbagliato*, invece che *incomprensibile nel modo giusto*. Bello, eh?

Se vi può aiutare, utilizzate sempre quest'idea chiave, che fornisce un po' il *sapore* del nuovo gioco: nella MQ il vero e proprio concetto di *esistenza* è *indebolito*. Materia ed energia acquisiscono contorni un po' vaghi, sfumati, e la *realtà* così cara a Einstein va ripensata. Non perché non esista più, ma perché la *corporeità* degli oggetti viene a mancare. Le equazioni del moto, da sostituire a quelle della dinamica newtoniana, non trattano direttamente posizioni e velocità ma *onde* che nascondono, dietro un *numero immaginario privo di significato fisico immediato*, le probabilità che avvenga una cosa oppure un'altra.

E non vi preoccupate se, in questo momento, le frasi che ho appena detto vi paiono sibilline e incomprensibili: tutto il seguito, fino alla fine del prossimo capitolo, è elaborazione su queste idee. Rassicuratevi, dunque: vi impadronirete in maniera solida di questi concetti, e a quel punto non vi sembreranno più sibillini e incomprensibili, ma solo disgustosi e irragionevoli.

Un momento: allora che fine ha fatto la normale fisica newtoniana? Buona domanda, e la risposta è la seguente: ogni *singolo* avvenimento quantistico presenta forti elementi di *casualità*, ma la statistica su un numero sterminato di tali eventi, un numero così grande che il *sistema* sotto osservazione sia grandissimo, visibile, e quindi soggetto alla nostra percezione diretta come *reale*, riacquista tutte le normali caratteristiche del mondo che conosciamo.

Ciò avviene perché le leggi di natura che regolano il nostro mondo normale, sono l'esito, come appena accennato, della *statistica* su un gran numero di eventi quantistici, *ciascuno dei quali obbedisce al caso* con, al più, qualche vincolo. Quale vincolo? Per l'appunto quello già detto: la statistica su tanti eventi deve riprodurre la fisica newtoniana.

Sia chiaro: non mi sto inventando nulla. Piuttosto, sto seguendo in modo pedissequo il poco che riesco a capire dell'interpretazione di Copenaghen (ma badate: pure i suoi creatori litigavano sui significati), edificata nel corso degli anni non solo da Bohr & Co; ci lavorarono tanti altri fisici il cui nome tralascierò, ma non perché non abbiano svolto un lavoro egregio.

Ora, se questa interpretazione ha avuto successo (tiene banco pure ai giorni nostri, sebbene i suoi punti deboli siano tanti e importanti), non è stato perché i fisici siano intrinsecamente malvagi e si divertano a intorbidare le acque, ma perché soltanto grazie a essa si rende ragione dei dati sperimentali (*fatti e non ipotesi*, ricordatevelo prima di criticare) accumulati nel tempo.

Tra breve, infatti, presenterò un esempio *concreto*, che può avere un significato sia pur vago solo nell'interpretazione di Copenaghen, ma è non spiegabile se il **PdI** va inteso nei termini classici di particelle reali e ben localizzate, delle quali è *tecnicamente* impossibile misurare bene tutte le caratteristiche solo a causa della quantizzazione dell'energia dei fotoni.

A questo punto, mi pare necessario introdurre un lungo, importante inciso. Per quale motivo proprio questa interpretazione apparentemente un po' esoterica del **PdI** è fondamentale per spiegare il modello atomico di Bohr? Cercherò di spiegarvelo. Ricordate Schrödinger, il meschino, convinto com'era di aver ridotto tutta la **MQ** a una banale equazione delle onde? Bene: proprio per mezzo della sua equazione è possibile ricavare i valori esatti delle energie delle varie *orbite elettroniche* nell'atomo d'idrogeno e (con minore precisione, ma poi ci pensò Dirac a inserire le correzioni opportune) in ogni altro atomo. Fin qui tutto bene o quasi.

Adesso arriva la domanda: come dobbiamo formarci un'immagine mentale di queste *orbite*? Ci siamo: ora casca l'asino. L'atomo non somiglia per nulla a un sistema solare in miniatura, come ci hanno insegnato a scuola. Il nucleo si trova al centro e, poiché la sua massa è *relativamente* grande, la sua posizione è *abbastanza ben determinata*. Gli elettroni, però, non sono palline orbitanti. Piuttosto, ogni elettrone è *confuso* (tra un attimo vi spiego come) all'interno di un volume.

Cos'è questa *confusione*? Significa forse che l'elettrone non è puntiforme, ma piuttosto è una nebbiolina tenue o, se preferite un'immagine ancor più palpabile, un *fiocco di cotone* le cui dimensioni riempiono quelle dell'orbita? No, altrimenti, se l'elettrone fosse diffuso, anche la sua carica elettrica lo sarebbe.

Invece, gli esperimenti eseguiti bombardando l'atomo con altri elettroni, mostrano che la carica dell'elettrone orbitante è *sempre concentrata*. E non vorrei confondervi ancor più, ma è opportuno ricordare come un esperimento del genere sia comunque una *misura* dell'elettrone atomico il quale, perciò, *si materializza* per un istante, e solo dopo riassume tutte le sue caratteristiche spooky.

Allora, tornando alle onde di Schrödinger (se non c'è materia, forse c'è *un'onda*, malgrado questa sia già più difficile da visualizzare mentalmente), non esisterà, magari, un'*onda di probabilità* che riempie l'orbita, e ci suggerisce dove è più e meno probabile trovare l'elettrone?

Magari bastasse! Madre natura ha scelto altrimenti. A riempire l'orbita c'è sempre un'onda, ma è di quel tipo malefico che Bohr dimostrò, all'esterrefatto Schrödinger, non corrispondere a *nulla di fisico*, poiché contiene *numeri immaginari*, e Dio solo sa cosa voglia dire (ammesso che lo sappia pure Lui – se esiste, cosa sulla quale non mi pronuncio rinviando

il lettore al mio libro “E se Dio esistesse?”). Per questo ho preferito la dizione “*più facile da trovare*” al posto di “*più probabile da trovare*”.

Di conseguenza, la descrizione fisica di un oggetto quantistico di ogni genere non è una *nube di esistenza* e neanche un’*onda di probabilità di esistenza*, che ancora riusciremmo a tollerare pur masticando amaro, ma è l’*onda immaginaria* di Schrödinger. Solo in seguito, Born (ricordate: non è Bohr) eseguì la saldatura intellettuale necessaria. Il suo contributo fu di dimostrare come, elevando al quadrato la funzione matematica descrivente l’onda di Schrödinger, sparivano i numeri immaginari e si otteneva finalmente quella benedetta *onda di probabilità* che, a questo punto, già ci sembra meglio di niente.

Ecco il punto: bisogna ricordare quanto segue. Poiché l’equazione di Schrödinger sostituisce, nella **MQ**, le vecchie equazioni della dinamica newtoniana, la nuova dinamica quantistica non si applica a *entità fisiche da noi intuibili* in modo diretto, ma purtroppo solo a un’onda rappresentata per mezzo di numeri immaginari, che chissà cosa diavolo significa (se Dio non comprende la **MQ**, forse ci riesce il demonio; è molto più consona a lui). Fine di questo inciso durato un bel po’ di paragrafi, ma non mi sentivo di ometterlo.

Ah, dimenticavo! In quest’ottica, cosa sono i famigerati  $\delta x$  e  $\delta v$  (ormai posso usare la notazione  $v$  anziché  $V$  parlando di velocità, poiché d’ora il poi non mi servirà più la  $v$ ) che compaiono nel **PdI**? Ebbene: sono quantità correlate all’ampiezza dell’onda di Schrödinger. Ora, poiché elevando al quadrato quest’ultima si ottengono delle *probabilità*,  $\delta x$  e  $\delta v$  sono indicazioni un di quanto sia *concentrata* la particella nello *spazio delle lunghezze e delle velocità*.

Vale a dire: è più facile trovare la particella all’interno di  $\delta x$  e  $\delta v$ , *pur se non si può escludere di trovarla altrove*. Questa è la saldatura matematica trovata da Born tra l’equazione di Schrödinger e il **PdI**, e il motivo per cui  $\delta x$  e  $\delta v$  non hanno alcuna relazione con la pura e semplice incertezza *tecnica* di misura, della quale abbiamo parlato nella sezione precedente.

E qui giungiamo a Einstein il quale – ricordiamolo – aveva assestato i primi colpi formidabili alla fisica ottocentesca di Kelvin e alle sue due nuvolette, venendosene fuori con la Relatività, e avendo dimostrato che Planck aveva ragione sulla radiazione di Corpo nero, fissando perciò il primo aggancio sperimentale su cui edificare la **MQ**.

Il quasi cinquantenne genio non si rassegnò per nulla a questa caduta del *realismo* scientifico. Combatté per tutto il resto della vita, cercando di dimostrare come, nella nuova, costituenda fisica dell’infinitamente piccolo doveva esserci qualche baco, magari solo un’*incompletezza*. Alla fine, perse la guerra o così sembrò a quei tempi, ma diverse battaglie furono combattute in modo efficace, e gli avversari furono costretti a concedergli almeno l’onore delle armi, più qualcosina che era sfuggita a molti di essi stessi.

Difatti, lui si era reso conto per primo di aspetti assolutamente ignorati da Bohr & Co. Aspetti tali per cui, il Grande vecchio avendoli messi di fronte a ciò che non poteva essere negato, costoro si trovarono a dover mandare giù numerosi rospi non preventivati nel conto. Rospo molto indigesto, peraltro. E scusate le maiuscole di cui lo gratifico, ma Einstein è tra i miei eroi, anche se umanamente parlando aveva poco di eroico.

Lui aderiva, come abbiamo già notato, a una qualche variante della filosofia del *realismo scientifico*. E perciò, non riteneva accettabile che la *realtà* fosse *diluata* come richiesto dalla **MQ**. La materia è materia, perbacco! Si può transigere in qualche scambio tra

materia ed energia, ma oltre non si va. Ragionandoci un attimo, non è questo, forse, l'atteggiamento istintivo di ciascuno di noi? Neanche ci pensiamo, ma siamo tutti *realisti*.

Io stesso mi dichiaro *realista rassegnato*, perché il realismo mi piace, col cuore sto con Einstein, ma la ragione mi dice che la natura segue i dettami di Bohr, e cioè l'indeterminazione quantistica è *ontologica* e non *epistemologica*. Mi rendo conto dei motivi per i quali, almeno nelle sue grandi linee, l'interpretazione di Copenaghen è irrinunciabile, ma ciò non vuol dire che mi piaccia. Preferivo i tempi belli in cui si potevano lanciare due biglie d'acciaio l'una contro l'altra, e prevedere esattamente cosa sarebbe successo... pazienza!

Oltre a tutto, nell'interpretazione di Copenaghen ci sono lacune e punti poco chiari. Ho già anticipato (tra parentesi) qualcosa sul dibattito tra i fisici, e ne discuterò in modo più diffuso nel prossimo capitolo. Per ora vi anticipo solo la bufala più grossa. Per tamponare una falla molto appariscente, un altro fisico di grido, Wigner, anche lui premio Nobel (nel 1963), inserì l'idea che ogni misura quantistica richieda la presenza di un non meglio specificato "*osservatore autocosciente*" (lui? io? voi? un gatto? un marziano? o serve un Ph.D. di Princeton?), altrimenti la misura non ha luogo. Ciò potrebbe turare un buco, ma di sicuro ne apre un altro più grosso... il resto della storia più avanti, quando i gatti saranno l'oggetto della nostra riflessione (non scherzo).

Possiamo puntare le nostre telecamere sul problema, tentando un angolo di visuale differente. E se tutti i nostri guai fossero dovuti a un utilizzo impreciso del concetto di *esistenza*? Per abitudine – e per storia evolutiva del nostro cervello – associamo l'esistenza all'idea che un qualcosa resti sempre tangibile, mentre nella MQ la *materializzazione* degli oggetti ha luogo solo nell'istante della misura – e allora ne conosciamo posizione e velocità entro i limiti stabiliti dal **PdI** – dopodiché gli oggetti stessi ricadono nel limbo spooky.

Per quelli di Copenaghen, la suddetta *materializzazione* prende il nome di *collasso della funzione d'onda*, e il riferimento è alla *funzione matematica* che descrive l'*onda* di Schrödinger. Ma, come vedremo, le cose sono ben lungi dal presentarsi così semplici, e il litigio su altre interpretazioni ancora non è risolto.

Sarebbe come dire: Madre natura *fa economia*. Gli oggetti diventano *reali*, sì, ma solo quando non se ne può fare a meno perché ci stiamo sperimentando sopra; poi si possono *rilassare*: funzioni d'onda al posto di strutture compatte. Ripensando alle idee di Wigner, Einstein chiedeva ad Abraham Pais, un suo collega molto ligio a Bohr & Co: «Lei crede davvero che la Luna non sia lassù quando non la guardiamo?».

Non è banale rispondere, anche se siamo tutti convinti che la Luna *sia* sempre lassù. Solo, bisogna dare il giusto valore al verbo *essere*. D'altra parte, ragionando in questo modo, forse ci limitiamo a spostare il mucchietto di spazzatura da un angolo all'altro del tappeto. Chissà?

Ora vi devo una spiegazione fin troppo posposta: fa mestieri chiarire perché il significato del **PdI** è quello rispecchiato nell'interpretazione di Copenaghen e, di conseguenza, il modo di pensare di Bohr si è rivelato vincente.

Ebbene: mentre scrivo queste pletoriche righe, mi trovo di fronte al computer, e utilizzo un normale *word processor*. Se un lettore sta imprecando sui miei scritti, lui stesso è la prova vivente che il computer ha fatto il suo dovere. Il computer, però – e ormai tutte le apparecchiature elettroniche di uso comune – sfrutta, tra le tante caratteristiche della

microelettronica, pure il cosiddetto “*Effetto tunnel*” di cui avrete sentito parlare tante volte. Se lo volessimo riportare in termini a noi familiari, potrebbe essere spiegato (scusate: non *spiegato*, ma al più *raccontato*) con l’analogia che segue.

Andiamo in cucina e tiriamo fuori una pentola di acciaio di tipo moderno, dalle pareti alte e robuste, e un fondo di almeno un centimetro di spessore. Non dobbiamo cuocerci nulla, solo depositare con delicatezza una biglia di vetro sul fondo della pentola medesima. Fatto ciò, scuotiamola leggermente, cosicché la biglia cominci a rotolare da un lato all’altro e, giungendo al bordo arrotondato dove inizia la parete, abbia un minimo di velocità e riesca a risalire quest’ultima per un paio di millimetri, prima di tornarsene giù.

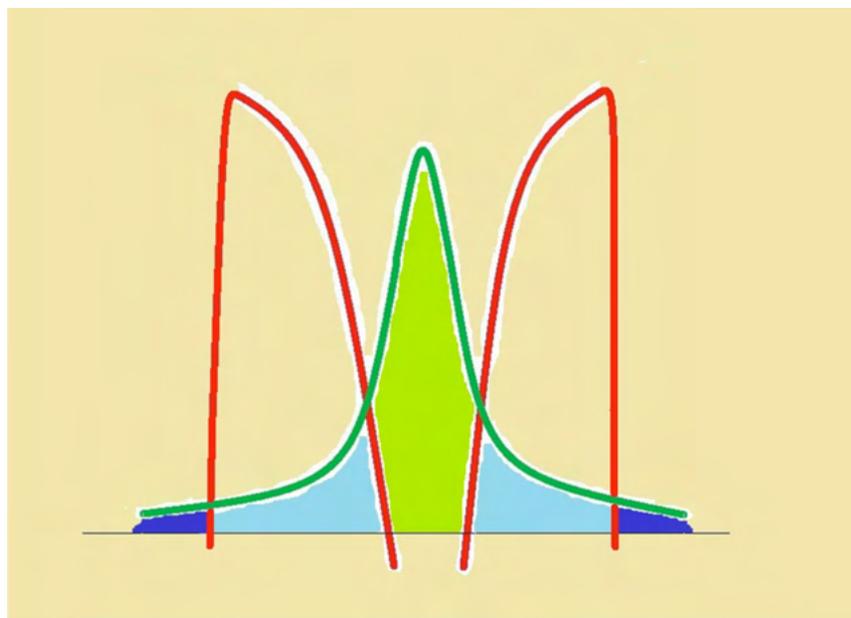
Immaginiamo pure che non ci sia attrito, e dunque la pallina continui in eterno con questo avanti – indietro senza perdere energia. Adesso ci armiamo di *moltissima* pazienza, ci sediamo, leggiamo l’*opera omnia* di Balzac, quella di Tolstoj, di Zola, ascoltiamo tutta la “Tetralogia” di Wagner e le sinfonie di Mahler, poi c’è Thomas Mann e gli scritti e discorsi del Duce e di Fidel Castro... insomma, aspettiamo che *la pallina esca dalla pentola*.

Non cominciate subito a strillare: “È impossibile!”; lo so pure io, ma l’analogia funziona in questo modo. State zitti una buona volta e seguite la pallina, accidenti!

Appena salta fuori dalla pentola, mettetela subito in un’altra, identica, osservando la medesima procedura di prima, e aspettate di nuovo che esca. Dopo che la pallina avrà percorso una ventina di pentole, è *come se* il computer avesse eseguito un’operazione aritmetica. Attenzione: non rileggete subito questo paragrafo (ma neanche Balzac, eccetera); andate avanti.

Per il momento, mi limito a darvi ragione: la pallina non uscirà mai dalla pentola, ma se invece della pallina avessimo considerato un elettrone? La pallina, infatti, obbedisce alle leggi di Newton; l’elettrone no: solo a quelle di Schrödinger.

Ecco il punto: la pallina non esce, *ma l’elettrone sì*. Infatti, sto per descrivervi



l’analogia quantistica. La pentola, nel circuito del computer, corrisponde a un campo elettrico, con una profonda buca centrale e alte pareti, sempre di campo elettrico. È la voragine all’interno delle curve rosse in Figura 13.3. In fondo alla buca posiamo la nostra pallina *quantistica*, e cioè l’elettrone. Quest’ultimo non possiede l’energia necessaria a risalire la china del campo elettrico, e dunque è destinato a sostarvi in eterno... o no?

Figura 13.3

No, l'elettrone può scapparne fuori, e sapete perché? La sua *funzione d'onda*, non si annulla ai bordi del campo elettrico, ma seguita a *esistere anche al di fuori*. E quando eleviamo al quadrato questa funzione d'onda, poiché ci serve conoscere la *probabilità* che l'elettrone *esista* dove più e dove meno, troviamo la curva in verde scuro, sempre in Figura 13.3.

Osservando bene questa curva, notiamo come la probabilità di trovare l'elettrone *dentro* la buca sia massima (il picco della curva verde). La stessa curva di probabilità, però, *non va a zero* quando tocca le pareti della buca, ma c'è una certa probabilità che l'elettrone, da noi depositato *dentro* il campo elettrico, possa esistere *all'interno delle pareti* (area azzurra) e perfino *fuori* della buca di potenziale (le ali estreme della curva verde, con la sottostante area in colore blu scuro).

Di conseguenza, ogni tanto, qualche elettrone depositato *dentro*, si trova a *esistere fuori* dal campo elettrico, proprio come se avesse scavato un tunnel nelle sue pareti, contrariamente a quanto può fare la biglia di vetro nella pentola.

In conclusione: ciò non potrebbe accadere se volessimo a tutti i costi un'interpretazione di tipo *realistico* del **PdI**. Se le particelle fossero *oggetti* nel senso tradizionale, chi è dentro è dentro, chi è fuori è fuori, anche se, magari, non sappiamo esattamente chi sia dentro e chi fuori. Il solo modo in cui l'effetto tunnel può aver luogo, è *se ha qualche valore l'interpretazione di Copenhagen*. Prova sperimentale: questo testo scritto.

In tal caso,  $\delta x$  fornisce solo informazioni sull'intervallo di *maggior probabilità di esistenza* dell'elettrone (sto pian pianino assimilando  $\delta x$  alla *probabilità di esistenza*; non vi scandalizzate per questa imprecisione concettuale). Non si può escludere che, con probabilità minore, l'elettrone *esista* anche lontano, e qualche volta si *materializzi*, dove c'è poca speranza di trovarlo.

Ripensiamo il tutto in questo modo: nel mondo macroscopico, il concetto di *esistere* ha connotati duali; o una cosa esiste, o no. Nel mondo subatomico, il parametro dominante è la *funzione d'onda*, e questa ha poca attinenza con la nostra capacità d'intuire. Essa non possiede caratteristiche duali (sì o no), ma è piuttosto una *distribuzione continua*.

Corrisponde, cioè, alla famosa quantità che il povero Schrödinger sperava di aver domato in termini *reali* con la propria equazione ondulatoria, finché Bohr non gli chiese: «E adesso spiegami cosa diamine significa quella radice quadrata di  $-1$  a moltiplicatore della soluzione.».

Esistenza *immaginaria* o, come diceva Einstein, *spiritica, spooky* (lui, per essere più precisi, associava il concetto a quanto vedremo nel Capitolo 14.1).

Ora bisogna sciogliere un dubbio (uno fra i tanti, ovviamente). Abbiamo parlato di *fotoni, elettroni, particelle* e perfino di un'automobile, supponendo che la stessa equazione delle onde (quella di Schrödinger) si applichi a ogni entità fisica. È proprio vero questo? Un conto sono i fotoni, associati alle *onde elettromagnetiche*, ma per le particelle di *materia*?

La pensata risolutiva venne da Louis De Broglie, un nobile francese di origine piemontese. Se le onde elettromagnetiche si comportano anche come particelle (fotoni), per quale motivo le particelle non dovrebbero manifestarsi anche sotto forma di onde?

Bellissima idea: si va nel seminterrato, dove sono i laboratori sperimentali, si eseguono prove con elettroni al posto dei fotoni, e pure gli elettroni danno luogo a manifestazioni ondulatorie, come per esempio la *diffrazione*. Premio Nobel a De Broglie nel 1929.

E qui bisogna prestare attenzione, perché le cose possono sembrarci inutilmente complicate (forse lo sono, ma abbiamo una ragionevole speranza che una migliore comprensione della fisica di base, in un futuro lontano, le *complichi ulteriormente*).

Il punto è: non dobbiamo pensare alle tradizionali onde elettromagnetiche. A ogni particella è assegnato *un suo campo specifico*: elettronico, protonico eccetera, e l'equazione di Schrödinger si riferisce alle funzioni d'onda *per quel campo specifico*. Le cose, ovviamente, sono ancor più ingarbugliate di così, e fu necessario arrivare a Dirac e Feynman prima di sostituire la vecchia formula di Schrödinger con le nuove equazioni usate ancora oggi, ma la strada era quella.

Cosa significhi, sul piano intuitivo, questa moltiplicazione dei *campi* non è per niente chiaro, e lo dico anche dal punto di vista di tutti gli altri fisici di questo mondo. Lasciamo stare, dunque, e contentiamoci di ricordare che fu De Broglie a individuare, per primo, l'espressione matematica per calcolare la lunghezza d'onda da associare a ogni particella, in modo da poter poi applicare senza problemi le equazioni riguardanti il *campo di quella particella*.

Nota: in anni successivi, lo stesso De Broglie finì assai più nella scia di Einstein che in quella di Bohr... quanti *padri fondatori* malcontenti di come crescevano le loro creature!

Nel calcolo della lunghezza d'onda di De Broglie, proprio come succede nel **PdI**, conta molto la massa. Per un'automobile, la lunghezza d'onda equivalente è troppo corta perché si riesca a misurarla; per un elettrone in un atomo, invece, il lettore avrà già intuito che la lunghezza d'onda equivalente corrisponde alle *dimensioni dell'orbita stessa*. Quest'ultima, di conseguenza, non è il *fiocco di cotone* di cui avevamo accennato prima, ma solo un'*astrazione algebrica*. Pazienza!

Forse, ora le cose non sono diventate più chiare ma, per lo meno, abbiamo fatto un passo avanti nel visualizzare la *dualità onda – particella*, alla base della **MQ**. Del restante, ricordiamo che le *nubi di funzione d'onda* delle particelle sono tanto più piccole e meno sfumate (e cioè tanto più *particellari* e meno *ondulatorie*) quanto maggiori sono le loro masse e velocità. Attenzione: anche *velocità*, e sapete perché?

Un modo semplice (ma fisicamente è quasi una *bruttura*) per immaginarlo è ricordare la correlazione tra velocità ed energia cinetica. E, d'altra parte, più elevata è l'energia, maggiore è anche la *massa equivalente* ( $E = m c^2$ ). Me la cavo con questa grossolana approssimazione, perché tutto ciò sarà utile nel quindicesimo capitolo, quando parleremo della dimensione *intrinseca* delle particelle elementari.

## 14)– Cosa significa, però?

### 14.1) – Il Vecchio leone lancia l'ultimo ruggito

Il lettore attende che, prima o poi, io passi a discutere il collegamento tra **MQ** e Modello d'universo. Bene: ha ragione solo fino a un certo punto poiché – mi sembra opportuno ribadirlo – qui studiamo la *struttura fine* del cosmo (l'erbetta del plastico della ferrovia), e più avanti ciò ci condurrà a ipotesi (almeno per ora solo *ipotesi*) stupefacenti sulla *granularità* di spazio e tempo. Per il Big Bang e *le cose in grande* bisognerà pazientare fino alla Sezione IV. Quanto segue deve essere utile a chiarire, sempre nei limiti del possibile, i fondamenti, i problemi e le contraddizioni logiche dalle quali, purtroppo, è piagato il panorama della **MQ** e, di conseguenza, anche i risvolti quantistici del Big Bang, che oggi vediamo amplificati nella *struttura a larga scala* del Modello che vogliamo costruire. E quindi ho deciso di accennare in breve a uno degli scontri intellettuali tra Einstein e Bohr: forse il più decisivo da entrambe le parti.

Nel 1935, Einstein e altri due suoi colleghi (Podolsky e Rosen) se ne vennero fuori con un esperimento ideale molto ingegnoso, un *gedankenexperiment* che avrebbe dovuto mettere in crisi l'interpretazione di Copenaghen.

Il colpo andava dritto al cuore della **MQ**, al principio guida, e cioè al **PdI** il quale, ricordiamolo, implica che: “Se si misura qualcosa di una particella, si finisce senza scampo per perturbarne qualcos'altro”. Naturalmente, Einstein & soci non se la prendevano con i fatti sperimentali; quelli erano lì e basta. Il loro scopo, piuttosto, era dimostrare quanto segue, e qui fate molta attenzione perché l'argomento è sottile (ma non incomprensibile).

Abbiamo già visto come l'interpretazione Copenaghen vuole che una particella *non possieda* caratteristiche fisiche ben precise prima della misura. Il *gedankenexperiment* si proponeva di dimostrare come, al contrario, la particella *possieda sempre* posizione, velocità, energia, rotazione e altro, *reali*, e non viva nel limbo di *esistenza fantasma*. Di conseguenza, il terzetto **EPR** (dalle iniziali dei cognomi) cercava di provare come il **PdI** illustri solo *il limite tecnico delle possibilità di misura* come avevamo visto inizialmente in sezione 13.3 (ricordate il microscopio col fotone che urta la particella e così via?) e niente più. La vendetta di Heisenberg su Wien, insomma.

La storia non è banale come ve la sto raccontando ma, almeno rozzamente, ciò che aleggiava per le menti di **EPR** è esprimibile, in questo modo. Per dimostrare il loro punto di vista, i tre individuaronò un sistema per eseguire misure *senza perturbare* un oggetto.

L'esperimento **EPR**, semplificato e limato da generazioni di scienziati e divulgatori, si può descrivere invocando una particella subatomica *priva di rotazione* (non deve essere una trottola, insomma), che si *disintegri* spontaneamente. Ne esistono, e noi ne sceglieremo una particolare: al termine della sua vita effimera, produrrà un elettrone e un positrone (o *antielettrone*, e nel prossimo capitolo parleremo pure di *antimateria*).

La bestiola a noi necessaria è conosciuta da molto tempo, e prende il nome di *pione neutro*; di costui, però, non diremo nulla di più poiché non ci serve. Basti sapere che, disintegrandosi, il *pione* emette anche un raggio  $\gamma$  il cui destino, fortunatamente, non ci interessa. Seguiamo invece elettrone e positrone mentre si allontanano tra loro.

Un principio inderogabile di Madre natura, la *conservazione del momento di rotazione*, pretende che la somma di quelli posseduti dall'elettrone e dal positrone sia zero, poiché la particella madre, proprio per come l'abbiamo scelta, non ruotava. Fin qui, non c'è nulla da eccepire.

Un momento, però: sia l'elettrone, sia il positrone, ruotano per come mamma li ha fatti, e non è possibile *fermare* questa *rotazione intrinseca*. Come si fa, allora, ad azzerare la rotazione complessiva? Semplice: nel caso in esame, eseguendo misure di rotazione sulle due *particelle figlie* del *pione*, ci aspettiamo che esse ruotino in verso opposto l'una rispetto all'altra. Pure fin qui non ci piove, e qualunque fisico deve per forza concordare e controfirmare. Anche il più feroce dei quantistici.

«Fermi tutti, precisiamo bene», afferma Bohr, perché già vuole mettere le mani avanti. «In base all'interpretazione di Copenaghen, finché non è eseguita una misura, il momento di rotazione è *nebbia*. Non è un problema d'ignoranza da parte nostra; l'equazione di Schrödinger ci racconta tutto ciò che *esiste*, e non solo il *misurabile per cause tecniche*. Più di quello, *non c'è assolutamente null'altro*. Di conseguenza, anche la rotazione di elettrone e positrone è sintetizzata in due funzioni d'onda in cui *coesistono entrambe le possibilità*, ma nessuna di esse è più *reale* delle altre!»

Il dibattito, ovviamente, non si svolse in questo modo, ma per mezzo di articoli su riviste specializzate. Io sto *drammatizzando* a beneficio del lettore.

«Vedremo, Per ora, comunque, non litighiamo» ribattono **EPR**. «Al momento, e per gli scopi del nostro *gedankenexperiment*, accettiamo questo punto di vista, Adesso, mettiamoci ad aspettare con grande pazienza finché le due particelle si siano allontanate molto l'una dall'altra; migliaia, milioni o miliardi di chilometri. Solo a quel punto, misuriamo in quale verso sta ruotando l'elettrone. Ci siamo?»

Nulla da eccepire da parte di Bohr.

«Benissimo», seguitano **EPR**. «Sempre seguendo in modo pedissequo l'interpretazione di Copenaghen, concludiamo che solo in quell'istante Madre natura fa la sua scelta e, di tutta la nube di funzioni d'onda, si *materializza* uno e uno solo tra gli infiniti casi possibili il quale, per un attimo, diventa *reale*. Supponiamo che il risultato sia "l'elettrone ruota *in senso orario*, e il suo asse di rotazione è diretto *verso* la Stella polare". Abbiamo inteso bene il vostro pensiero? La procedura da noi ideata è lecita, almeno fin qui?»

«Perfettamente lecita, perbacco!» afferma Bohr, lieto che i suoi avversari abbiano accettato il suo punto di vista – o così crede lui.

«Va bene», riprendono **EPR**. «Se fin qui ci siamo, scusate se dal nostro cilindro tiriamo fuori un coniglio. Siccome bisogna comunque assicurare la conservazione della rotazione totale delle due particelle, ne deduciamo quanto segue: nell'istante preciso in cui abbiamo misurato la rotazione dell'elettrone costringendolo ad assumerne un valore ben preciso, *abbiamo costretto anche il lontanissimo positrone ad assumere un valore reale della rotazione*. Se misurato anche un attimo dopo l'elettrone, il positrone dovrà senza fallo ruotare *in senso antiorario*, cioè con l'asse di rotazione in *allontanamento* dalla Stella polare.»

Bohr e i suoi compari si guardano negli occhi un po' confusi. Un coniglio come questo non se l'aspettavano.

«Badate inoltre:» incalzano **EPR**, «la *materializzazione* della rotazione del positrone deve essere *contemporanea* a quella dell'elettrone. Se così non fosse, due misure eseguite nello stesso istante sulle due particelle avrebbero potuto fornire un risultato in violazione di un principio sacro alla fisica. Si domanda: Bohr, Heisenberg, Dirac, Born e tutti i sostenitori dell'interpretazione di Copenaghen, ritengono di poter essere in accordo?».

«Uhm... Sssssì, dovrebbe andare in questo modo», mugugnano gli interpellati, sentendo per la prima volta puzza di bruciato. «Se l'elettrone, al momento della misura, ruoterà in senso orario, nessun dubbio: il positrone, se misurato, mostrerà di ruotare al contrario, in senso antiorario.» Sembra esserci un *controverso accordo* universale, e scusateci per l'ossimoro.

«Perfetto! Allora», chiedono i signori **EPR**, «chi è stato a *comunicare al positrone* che, molto lontano da lui, l'elettrone è stato misurato e trovato *orario* e quindi, se anche lui sarà misurato, dovrà conformarsi e scegliere una rotazione *antioraria*? Nessuna informazione può propagarsi più veloce della luce e, se le due particelle sono abbastanza distanti e le misure sono eseguite immediatamente una dopo l'altra, nulla può essere scambiato tra loro. La vostra interpretazione della **MQ** consente il verificarsi di una situazione del genere? Ne siete proprio sicuri?»

«Grrrrrr... Andate avanti», borbotta Bohr. «Dove volete arrivare?»

«Siamo già al punto», esclamano **EPR**. «Se la vostra tesi è che l'elettrone, appena misurato, invii un segnale al positrone *a velocità infinita*, comunicandogli: “Bada, la mia rotazione è così e così; regolati di conseguenza”, avete accettato di violare la Relatività speciale che, invece, anche voi accettate. L'ovvia alternativa (da noi proposta) è quella *realistica*: le due particelle già possiedono *realmente* rotazione in verso opposto fin dalla loro nascita, e le misure lo hanno semplicemente confermato. Esiste tra le due particelle qualche genere d'informazione in grado di viaggiare a velocità infinita? Rispondete, per favore.»

Bohr mastica amaro, perché ha finalmente capito la natura diabolica della trappola tesagli dal suo accanito e geniale avversario. È stato preso in contropiede e si trova in difficoltà.

**EPR** non demordono, e insistono con Bohr: «Secondo te, possono esistere *informazioni* con propagazione più veloce della luce?».

Bohr, onestamente, risponde: «No, non credo».

**EPR**: «Allora, concordi che le particelle già possedevano *realmente* rotazione in verso opposto fin dall'inizio?».

Bohr ha fede cieca nell'interpretazione di Copenaghen, e risponde un secco: «No!».

Stavolta è il turno di **EPR**, a essere un po' sconcertati. «E allora, come diavolo interpreti il *gedankenexperiment*?».

Bohr discute e riflette con i suoi colleghi, e risponde: «**Le due particelle, e l'intero apparato sperimentale usato per misurare le loro rotazioni, per quanto lontani possano essere i pezzi tra loro, rappresentano un oggetto unico, e quindi è come se fossero sempre in contatto diretto**». (Attenti: quest'ultima è una citazione testuale da un articolo di Bohr, non l'ho inventata io per la mia *gag*, e perciò l'ho messa tutta in grassetto.)

**EPR** si guardano negli occhi a tre, come nel “*triello*” finale de: “Il bello, il brutto, il cattivo” di Sergio Leone: «???????».

Bohr, però, seguì a mantenere il punto, ribattendo con le stesse argomentazioni, e non rispose altro. Oltre tutto, proprio in quegli anni la **MQ** cominciava a espandersi verso i fondamenti del *Modello Standard*, ed era più interessante seguire i nuovi sviluppi, anziché battersi con Einstein. Eppure, ancor oggi, a tanti anni di distanza, sono in molti ad ammettere che la risposta rifletteva solo la fermezza della fede di Bohr nell’interpretazione di Copenaghen, ma a parte questo non conteneva nulla di *fisico*.

Siate onesti: non vi sembra di usare violenza al buon senso accettando l’idea di Bohr? Due oggetti separati tra loro da una gran quantità di spazio vuoto possono essere pur sempre *un oggetto solo*, cosicché la comunicazione tra le parti di questo esoterico oggetto possa trasmettersi istantaneamente? Fu proprio quest’ultima caratteristica della **MQ** a guadagnarsi la definizione di “*spooky*”. E a buon diritto, direi! Solo un fantasma poteva correre da una particella all’altra, e spiegare come comportarsi se qualcuno avesse deciso di misurare la sua rotazione.

L’esperimento, a quell’epoca, non poteva essere realizzato in laboratorio; la tecnologia necessaria era di là da venire. Sempre in quegli anni, il poderoso matematico John von Neumann dimostrava la *completezza* della **MQ**, riuscendo in tal modo a zittire i critici, ai quali restò solo da mugugnare. Malgrado ciò, attorno al 1960, John Bell, un fisico irlandese non troppo convinto della dimostrazione di von Neumann, riuscì a infilare il dito nell’unico buchino ancora inesplorato della **MQ**.

Già, perché ogni dimostrazione matematica deve per forza partire da un certo numero di *assiomi* o *verità ovvie e indiscutibili*, e solo dopo i lavori di Bell si capì che uno degli assiomi di cui si era servito von Neumann, già assumeva a priori quanto si proponeva di dimostrare (si trattava del *collasso della funzione d’onda* cui abbiamo accennato in sezione 13.4), la qual cosa è una tautologia e, com’è ovvio, non dimostra un bel nulla.

Di conseguenza era rimasto proprio il buchino trovato da Bell, il quale riuscì a impostare teoricamente le basi matematiche affinché un eventuale esperimento potesse provare in modo definitivo se avesse ragione Einstein, oppure Bohr. Senza esperimento, la cosa poteva restare in dubbio.

Intendiamoci: Bell era ragionevolmente convinto che Einstein avesse torto nell’affermare l’esistenza *reale* delle proprietà fisiche delle particelle, poiché la **MQ** aveva ormai dimostrato di poter superare ogni ostacolo. La risposta di Bohr, però, gli sembrava priva di significato. Così, giocando con una matematica piuttosto elementare, si rese conto che, se l’interpretazione di Copenaghen fosse stata *giusta*, la statistica sui risultati di *numerosi esperimenti di tipo EPR* in senso lato, avrebbe dato risultati un po’ diversi rispetto al caso in cui avessero avuto ragione Bohr o Einstein. Insomma: dimostrò che si può provare in laboratorio, una volta per tutte, se le particelle sono sempre *diffuse* e senza caratteristiche determinate, oppure se sono *oggetti* con tutte le loro specifiche ben precise.

Solo nel 1985, Alain Aspect riuscì a eseguire le prime misure significative, servendosi di fotoni anziché elettroni (ma il gioco funziona più o meno allo stesso modo). Risultò che aveva ragione Bohr, e l’interpretazione di Copenaghen ne uscì vincitrice.

L’esperimento di Aspect fu criticato, un po’ a ragione e un po’ a torto, invocando sottili effetti sui quali non mi metto a disquisire. In sostanza, però, ripetendolo in condizioni sempre

più controllate, nei primi anni del nuovo millennio si raggiunse finalmente un verdetto concorde, tale da zittire pure i dubbiosi più accaniti. Il punto oscuro, però, è il seguente.

Bohr aveva ragione, ma perché? In un modo o nell'altro, nemmeno lui lo sapeva. Infatti, i dubbi sollevati dall'esperimento **EPR** non sono tuttora stati fugati. Esiste forse qualche *informazione quantistica* istantanea? Il vecchio leone morì nel 1955, eppure bisogna dargli atto di essere riuscito a tenere sulla corda la **MQ** fino a settant'anni dopo la propria morte. Un pezzo di bravura da meritare comunque un applauso, non vi pare?

Non basta, però. Come già accennavo, le sue domande a Bohr non hanno ricevuto ancora una risposta soddisfacente. È incontrovertibile che, nel mondo quantistico, sia ormai necessario ammettere l'esistenza d'*informazioni in senso lato*, di cui si può solo dire: "è come se" si propagassero a velocità infinita. Sotto tutti questi *corsivi* e "virgolettati" si nasconde un aspetto di Madre natura davvero indigeribile; con ogni probabilità, lo stesso Bohr non era pronto ad accettarlo, almeno a quei tempi. Oggi, per questo risvolto immasticabile, abbiamo coniato il nome edulcorato di: "*Non località*".

Vogliamo proprio farcene un modellino mentale? Possiamo anche provarci; attenzione, però: come in altri casi, e anzi peggio, il modellino è molto *debole*, e non possiamo tenerlo sulla corda perché cade subito. All'incirca è questo: il vero e proprio concetto di *distanza spaziale* non ha significato per i fenomeni quantistici. Due particelle che, in un certo momento della loro esistenza, abbiano interagito l'una con l'altra, *ricordano* questa interazione finché non sono perturbate da altri eventi e, pure se dal nostro punto di vista sono *lontane*, per quanto le riguarda restano sempre *vicine*.

In qual modo? Nessuno lo sa. Se a voi piace, potete immaginare l'esistenza di una *quarta dimensione spaziale a noi nascosta* (ma questo è addirittura un *modellino del modellino*, e tenetevelo per voi) tale per cui gli oggetti, sebbene possano essere assai distanti tra loro nelle tre dimensioni da noi percepite normalmente, restino sempre a contatto (o quasi?) nella quarta.

E non credo di insistere troppo sull'argomento se ci tengo a ricordare un dato di fatto: fu Einstein, e non Bohr, a mettere per primo in luce questo inquietante aspetto della **MQ**, laddove gli altri, il *club dei giovani rampanti*, erano convinti che il vecchietto fosse ormai un po' rimbambito.

Sì, sul piano sperimentale aveva ragione Bohr, ma non certo per il motivo che pensava. Piuttosto, per uno diverso e forse, secondo l'opinione posteriore di molti, lui stesso non si sarebbe sentito di sottoscriverlo. Errore fortunato, quello di Einstein; da solo valeva più di tante ragioni di Bohr messe assieme!

Annotazione al volo: anni addietro, la rivista online "Physicsworld" ha lanciato un piccolo referendum tra i suoi lettori. Qual è la caratteristica più strana, indigesta, della **MQ**, scelta tra cinque possibili, tra cui il **PdI** e altre. Ha *vinto*, con oltre il **70%** dei voti, la "*spooky action at distance*". A tanta distanza di tempo, la stragrande maggioranza dei fisici non la manda ancora giù.

Ho ritenuto di dover parlare dell'effetto **EPR** non solo per la sua importanza in **MQ**, ma anche perché può avere – forse – qualche rilevanza in cosmologia. Infatti, tutte le particelle costituenti l'universo sono state in strettissimo contatto nel Big Bang. Magari, ciò ha conseguenze su come funziona l'universo ai giorni nostri. Non lo sappiamo per certo, non si può escludere a priori, ma adesso finiamola con le ipotesi selvagge e veniamo al famoso "gatto

di Schrödinger”, perché sono certo che il lettore si aspetta almeno un breve cenno su questa popolare (povera) bestia.

## 14.2) – E Schrödinger *miagola* con efficacia

Nelle tarde agiografie dei “Padri della fisica”, leggesi di Erwin Schrödinger: “Proprietario di un gatto, ma non necessariamente amante dei gatti.” Donde questa cattiva fama?

Meritata, in un certo senso. Critico, come Einstein, nei confronti della nuova branca della fisica che lui stesso aveva contribuito a creare e a far sbocciare, apponendogli con la sua equazione il suggello definitivo, i suoi strali si appuntavano su un altro aspetto, molto specifico, della **MQ**. Cercherò di spiegarlo come meglio posso.

Si tratta del *problema della misura*: alcuni ritengono di averlo risolto da pochi anni, ma l'accordo generalizzato dei fisici ancora non s'è raggiunto, nonostante legioni di scienziati (e di cultori di fantascienza) vi abbiano lavorato e continuino a trafficarvi sopra da quasi un secolo. Anzi: pare che nell'ipotetica soluzione ci siano errori non eliminabili.

In sintesi, esso riguarda cosa avviene di una particella mentre ne è misurata una certa quantità specifica, e cioè nel momento in cui – secondo l'interpretazione di Copenaghen – la famosa *funzione d'onda*, costretta dall'apparato sperimentale, si decide a *collassare* (abbiamo visto che si dice proprio così) restituendo per un momento una certa parvenza di *realtà* alla particella stessa.

Il quesito di Schrödinger, manco a dirlo, fu sollevato più o meno contemporaneamente a quello **EPR**; la domanda rivolta a quei di Copenaghen era lunga, e vi prego di leggerla con attenzione e pazienza, perché rimane tuttora fondamentale. Ho provato a spezzarla in paragrafi brevi, ma resta un po' difficile lo stesso.

«Fissiamo la nostra attenzione» dice Erwin «sull'apparato sperimentale, supponendo che la misura riguardi la rotazione di una particella. Se il risultato indica il senso orario, la lancetta di un contatore scatterà verso l'alto, nel caso opposto scatterà verso il basso.»

Un contatore *macroscopico*, s'intende, la cui lancetta sia per noi ben visibile. E fin qui ci dovremmo essere.

«Ora, se osserviamo attentamente la struttura matematica della mia equazione» – è di nuovo Schrödinger a parlare –, «vediamo bene come essa sia applicabile non solo alla singola particella sotto misura, ma si estenda con uguale efficacia anche a tutte le particelle costituenti l'apparecchiatura sperimentale, perché anch'esse obbediscono, se le prendiamo una per una, alla **MQ**.»

Ha ragione da vendere, e nessun fisico oserebbe affermare il contrario: la matematica dice proprio questo, e sulla matematica con la maiuscola non si può discutere.

«Di conseguenza» seguita il nemico dei gatti, «se evitiamo di baloccarci con questo famigerato *collasso* che non ha alcun fondamento fisico – ma è stato inserito *ad hoc* da Bohr perché, altrimenti, non avrebbe cavato un ragno dal buco –, la **MQ** pulita pulita, senza forzature, s'impadronisce pian piano di tutta l'apparecchiatura sperimentale.»

Carino, no? Non ci avevate pensato, vero?

«E non finisce qui», incalza il nostro. «Siccome la particella in esame si trova in una *sovrapposizione di stati*, per cui la sua rotazione è in senso orario, ma contemporaneamente è anche in senso antiorario, non ho nemmeno bisogno di risolvere la mia equazione per tutta l'apparecchiatura, particella per particella – la qual cosa andrebbe oltre le possibilità di

chiunque. Infatti, è sufficiente *guardare* la formula per capire che, *proprio grazie alla struttura matematica dell'equazione stessa*, l'intero apparato di misura è costretto ad *amplificare via via l'indeterminazione* presente sulla particella da misurare per cui, alla fine, *la lancetta sul quadrante segnerà su e giù allo stesso momento.*»

Neanche questa ve l'aspettavate. Bellino, non vi pare? Ma le cose stanno proprio così.

«Adesso» conclude Schrödinger, «chiedo a qualcuno di dimostrarmi dove sto sbagliando dal punto di vista matematico oppure, in alternativa, di farmi vedere una lancetta macroscopica che, secondo i dettami della MQ, sia in una *sovrapposizione di stati*, e quindi *contemporaneamente su e giù*, la qual cosa m'incuriosirebbe molto».

Il problema, dunque, verteva sul punto specifico del *collasso della funzione d'onda* in sé. Bisogna ammetterlo: anche a noi sembra una forzatura introdotta per spiegare come mai, alla fine di una misura quantistica, si ha sempre un risultato *classico*, con l'apparato di misura che si comporta in modo *newtoniano*, mostrando *uno solo* dei possibili risultati.

Questo *collasso*, detto in altro modo, non sta scritto in nessun luogo, nelle equazioni, ed è vero e sacrosanto che, seguitando ad applicare le equazioni stesse alle parti – via via sempre più grandi – dell'apparato di misura, quest'ultimo deve per forza adeguarsi a quanto afferma la MQ e, alla fine, comportarsi nel suo insieme come una singola unità quantistica. La forma stessa delle equazioni lo implica, e quindi, proprio secondo l'affermazione di Schrödinger, non c'è nessun bisogno di risolverle per sapere dove andranno a parare le cose; devono adeguarsi alle sue conclusioni.

Peggio che peggio: la risposta di Bohr all'esperimento **EPR** era in sostanza, a leggere tra le righe, un *rafforzamento* della posizione di Schrödinger, poiché *la particella e l'apparato di misura* – parole testuali del danese – dovevano trovarsi pure loro legati indissolubilmente. Così affermava il brano riportato nella sezione precedente.

Possiamo rigirare la frittata quanto ci pare ma, fisicamente e matematicamente, non sembra esserci scampo. D'altra parte, la realtà fisica, quella sperimentale, *galileiana e newtoniana*, è diversa. Ogni volta che eseguiamo un esperimento quantistico, le lancette dell'apparecchiatura vanno *su o giù*, e non le vediamo mai in una sorta di *sovrapposizione quantistica*. Francamente, una situazione del genere avrebbe del metafisico perché non ce la sappiamo neanche immaginare.

Come va questa faccenda? Ha ragione Bohr quando introduce, a un certo punto, una fantomatica cesura delle regole quantistiche per passare a quelle newtoniane? A quale dimensione dell'apparato di misura occorre questa rottura? E, soprattutto, perché avviene?

Quei di Copenaghen non avevano una risposta alla domanda di Schrödinger, poiché sapevano bene pure loro come l'equazione fondamentale della MQ dovesse per forza condurre al risultato dedotto dal nostro, in assenza di una *frattura* di qualche tipo nelle regole quantistiche stesse.

Bohr, per quanto ci avesse ragionato sopra, era stato incapace di trovare un ragionamento utile a fissare il punto di frattura, e ci provarono altri, ma giravano tutti in tondo, finché Wigner (premio Nobel nel 1963; mica un cretino qualsiasi!) non se ne venne fuori con una soluzione che, come abbiamo anticipato, sembrava evitare di dover imporre arbitrariamente una massa, o qualcosa del genere, sopra la quale la fisica newtoniana riprendesse il sopravvento.

Wigner affermò: «La misura, con tutte le sue conseguenze pratiche sulla posizione delle lancette, ha luogo nel momento in cui un osservatore ne prende atto». Quasi subito fu costretto a specificare: «Un osservatore *autocosciente*».

«Benissimo!» replicò Schrödinger, e qui entrano in ballo i felini. «Allora facciamo così: prendiamo il mio gatto (forse disse “*il tuo*”, ma se n’è persa memoria) e mettiamolo in una scatola sigillata, in modo tale da impedire a chiunque di sbirciare dentro. Sempre nella scatola mettiamo una particella di materiale radioattivo che, nell’intervallo temporale di un’ora, abbia il **50%** di probabilità di decadere emettendo un elettrone. Aggiungiamo un contatore di elettroni pronto a scattare se la particella si disintegra, e un martello che, allo scattare del contatore, rompe una fiala di cianuro uccidendo il gatto».

Proprio per questo motivo, Schrödinger si è fatta una brutta nomea tra gli animalisti, ma seguiamolo nella sua argomentazione. In fin dei conti si tratta di un *gedankenexperiment*, e possiamo assicurare oltre ogni dubbio che gli esperimenti sono stati condotti senza far vittime.

«A questo punto, le chiacchiere non conducono a nulla. Prendo alla lettera Copenhagen e Wigner e ne traggio le ovvie deduzioni. La particella radioattiva si trova in una *sovrapposizione di stati* per cui, dopo un’ora, sarà **al 50% integra e al 50% disintegrata**. Di conseguenza pure il contatore di elettroni dovrà raggiungere la sovrapposizione di stati: *scattato / non scattato*, e perciò la fiala di cianuro sarà, contemporaneamente *intera e rotta*, con il gatto *vivo e morto*. Badate: non “*vivo e morto*”, ma “*vivo e morto*”.» Neppure nel vecchio West, in un manifesto con una taglia su un furfante, avrebbero scritto una tale bufala!

In soldoni, finché un essere umano, passata un’ora, non apre la scatola e guarda cosa è successo, il gatto si troverà in una sovrapposizione di stati per cui **è al 50% vivo e al 50% morto**. Ci credete davvero? Se non ci credete, quale soluzione riuscite a fornire per questo paradosso? E non venitemi a obiettare che, tanto, il gatto non può raccontarci le sue esperienze astrali.»

Ripeto: al passare del tempo sono state tentate diverse strade, alcune delle quali dal sapore fantascientifico, ma al momento attuale non c’è una risposta convincente per tutti e, come succede spesso in questi casi, molti fisici glissano sul problema.

Alcuni ci lavorano sopra attivamente e, in questo scorcio di secolo, stanno tentando di percorrere la strada della cosiddetta *decoerenza* nella speranza di salvare capra e cavoli – anzi: gatto e cavoli – senza per questo ipotizzare bruschi passaggi dalla **MQ** a quella newtoniana, e senza neanche toccare la struttura matematica dell’equazione di Schrödinger.

Io trovo interessante il tentativo, ma la maggioranza dei fisici non sono d’accordo e motivano, sempre ricorrendo a puntualizzazioni matematiche (forse valide, questo non riesco a capirlo per mia ignoranza), perché la decoerenza **non può bastare**.

Siamo a questo punto, e personalmente non ho suggerimenti da dare: forse la **MQ** è davvero troppo al di fuori della logica e della causalità perché possa esistere una soluzione intuitiva accettabile ai problemi della *non località*, e del povero gatto di Schrödinger. Il quale, ormai, sarebbe spirato comunque di serena vecchiaia pur senza essere stato torturato in una scatola.

## 14.3) – Probabilità e ignoranza

Prima di imboccare la strada verso il Modello Standard e il Big Bang, mi pare giusto far prendere fiato al lettore – nei limiti del possibile – con un capitolo in cui si trovino concetti più familiari e, almeno all'apparenza, più *innocui* di quelli tradizionali della **MQ**. Di conseguenza, richiamerò la sua attenzione su cos'è la *probabilità* in fisica, e la sua normale interpretazione in termini d'*ignoranza*. Partirò da esempi elementari, e li *amplierò* mantenendo però semplice il discorso.

Un amico (lo stesso che vi aiutava nelle misure della distanza dal muso dell'aereo nel capitolo 7.1, ricordate?) v'invita a partecipare a un gioco d'azzardo. Accettate perché, pure se non lo avete mai detto a nessuno, il demone del gioco vi possiede. Sognate il tavolo verde, la roulette, il baccarà e chissà cos'altro (scusate, non sono pratico).

Il primo impatto col gioco proposto, però, è deludente. L'amico tira fuori un mazzo di carte, ne estrae l'asso di denari e quello di coppe, e li mette sul tavolo (neanche verde) di fronte a voi. Ve li mostra ben bene, poi li ruota col dorso in alto e pone l'asso di denari sopra quello di coppe. Un mucchietto di sole due carte. A questo punto, vi chiede d'indovinare quale sia la carta in cima al mucchietto.

Non capite, vi sembra che l'amico voglia prendervi in giro, ma forse potrebbe avere qualcos'altro in mente. Di malavoglia, rispondete: «L'asso di denari». A controllo effettuato avete ragione, ovviamente. E questa fesseria doveva essere un gioco d'azzardo? Pazienza, vediamo come va avanti la cosa.

Il croupier improvvisato, adesso, pone la carta superiore sul tavolo e vi deposita sopra l'altra, invertendo l'ordine delle carte. Di nuovo, vi chiede quale sia la carta superiore nella nuova disposizione. «L'asso di coppe», ed è vero.

La cosa, però, non finisce lì. Il passo successivo è di ripetere la procedura di invertire le carte per diverse volte, prima di chiedervi quale sia la carta superiore. Voi, che non avete difficoltà a capire come funziona il gioco, avete contato il numero d'inversioni. Se esso è pari, la carta superiore è l'asso di denari; se è dispari, l'asso di coppe. Non ci sono casi intermedi: le carte non possono essere state invertite 17,38 volte, ma solo 17 o 18 volte. Con 17 inversioni avremo coppe; con 18 inversioni, denari. Non si scampa.

A questo punto, l'amico decide di tirare fuori anche gli altri due assi e li aggiunge agli altri. Il mucchietto, ora, è di quattro carte. Il procedimento matematico per indovinare quale sia la carta superiore dopo un numero  $N$  d'inversioni è un po' più complicato, ma sempre alla vostra portata, per cui in questo gioco non c'è proprio nulla di azzardo, e seguitate a sentirvi delusi.

Ora, però, l'amico vi sorprende. Prende l'intero mazzo, e mette in ordine crescente le carte di ogni seme: prima bastoni, poi spade, poi coppe, e sopra denari. Il mucchietto è di **40** carte, e voi conoscete perfettamente la posizione iniziale. Il gioco vero comincia solo a questo punto.

Molto velocemente, l'amico distribuisce un certo numero di carte in un mucchietto, un altro po' in un secondo mucchietto – sempre dicendovi quante ne mette in ciascuno – e così via per sette – otto mucchietti. Poi, prende i mucchietti a casaccio e li pone nuovamente uno sull'altro. Qual è la carta superiore?

Siete un po' disorientati, ma cercate di ricordare come sono state distribuite le carte. Non è ancora una fatica erculea, specie perché all'inizio erano ordinate per numero e per seme, e dopo aver fatto due conti su un taccuino, riuscite a dare la risposta giusta. Perfetto!

Sempre lavorando col mazzo che, ora, ha una nuova e più irregolare distribuzione interna, l'amico ripete il procedimento di prima. Stavolta, risalire alla carta superiore del mazzo è molto più complicato. Infatti, l'ordine iniziale per numero e seme non è più **completo** come prima, ma i mucchietti sono un po' rimescolati. Se siete un genio della matematica (e un mostro di memoria), forse riuscirete a risalire anche stavolta alla carta giusta, ma vi sfido a farlo dopo la terza, o quarta, o quinta volta che l'amico ripete la procedura. A questo punto è un vero gioco d'azzardo, non vi pare?

No, non del tutto. Infatti, vi balena in mente un modo per venire a capo del trucco e, adducendo un'emicrania improvvisa, chiedete all'amico di poter ripetere il gioco un altro giorno, quando starete meglio. Nulla da eccepire: concesso!

La volta successiva, però, portate appresso il vostro **tablet** nel quale avete impostato un programma in Python (o quel che volete) neanche troppo difficile da scrivere. Conoscendo la disposizione di partenza, e una volta forniti al programma il numero di carte di ciascun mucchietto e l'ordine in cui essi vengono rimessi uno sopra l'altro, per la macchina è questione di un attimo calcolare la nuova successione delle carte, e dire qual è quella in cima. E non importa quante volte sia ripetuta la procedura: il metodo di calcolo è sempre lo stesso, e la macchina non sbaglia mai (se non ci sono errori nel programma).

Non era un gioco d'azzardo, insomma: "**se**" (badate a quel "**se**") a voi sembrava che, dopo un po' di spostamenti, il mazzo finisse rimescolato alla rinfusa e di conseguenza la carta superiore fosse una qualunque, a caso, ciò dipendeva solo dalla vostra **ignoranza** della situazione, poiché l'esito dei mescolamenti non era **davvero** casuale. La prova è nel computer il quale, avendo più memoria di voi, essendo più veloce a eseguire i calcoli, e non sbagliando mai un conto, non trova difficoltà a indovinare la carta giusta.

Ci stiamo avvicinando alla connessione tra **probabilità** e **ignoranza**. Di solito, quando **ignoriamo** la struttura interna di un sistema complesso nei suoi dettagli più minuti, dobbiamo limitarci ad assegnare una **probabilità** agli esiti del suo funzionamento. E veniamo finalmente al Casinò che agognate già da qualche tempo.

Stavolta c'è il tavolo verde e la roulette. Il croupier mette in rotazione il disco, lancia la pallina nel verso di rotazione opposto, e quando tutto è in moto annuncia: «*Les jeux sont faits, rien ne va plus*». Se avete puntato un numero qualsiasi, la vostra **probabilità** di vincita è pari a  $1/37$ . Ci si chiede: è una **probabilità** genuina, nel senso che non c'è modo alcuno di prevedere il risultato, o perfino la roulette potrebbe essere considerata come un caso particolarissimo, molto più complicato, di quello del miserabile giochino del vostro amico con i due assi?

Ebbene: in linea del tutto teorica la risposta giusta è la seconda, ma le complicazioni aggiuntive sono troppe, e rendono **virtualmente** impossibile conoscere in anticipo in quale casella si fermerà la pallina. Vediamo alcune di queste complicazioni.

Il croupier, per quanto possa allenarsi, non riuscirà mai a impartire ogni volta lo stesso momento di rotazione al disco. Da un turno all'altro ci saranno piccole variazioni, e queste influiranno sul risultato.

Sempre il croupier, non riuscirà a lanciare ogni volta la pallina esattamente con la stessa velocità, sia come intensità sia come direzione, e questa è un'altra variabile di cui bisognerebbe tener conto.

La pallina rimbalzerà per ogni dove, prima di finire intrappolata in una casella. Volendo calcolare con precisione assoluta ogni rimbalzo, occorrerebbe tener conto di minuscole irregolarità nella forma e nell'elasticità della pallina e degli ostacoli. Irregolarità che, per micro – usura, possono perfino cambiare da un turno all'altro. Come può cambiare un po' l'attrito del disco della roulette sul suo perno di rotazione.

Mettendo tutto assieme, nessun sistema di sensori e di calcolo permette, ai nostri giorni, di calcolare e piazzare la scommessa sicura tra l'istante in cui la macchina è messa in moto e il fatidico “*rien ne va plus*”. Insomma: per nostra **ignoranza pratica** dei dettagli del moto della pallina, dobbiamo contentarci di parlare di **probabilità** e affidarci alla fortuna.

Di conseguenza, potremmo immaginare un tempo futuro quando le telecamere nascoste nell'occhiello del giocatore sotto il garofano bianco, e collegate al computer nell'orologio, renderanno sempre più difficile la vita agli operatori di roulette, poiché il gioco non è **intrinsecamente** casuale, ma lo è solo **praticamente**. Ma attenzione, uno straccio di conto della serva mostrerà che il raggiungimento di questo risultato è fisicamente impossibile. E non sto a dettagliare la fisica del *Caos deterministico*.

Si domanda ora: ¿Abbiamo capito perché il concetto di **probabilità**, nella fisica classica (quella in cui credeva fermamente Einstein), maschera solo la nostra **ignoranza** dei dettagli di una struttura troppo complicata perché sia possibile analizzarla in dettaglio? Tutto funziona rigorosamente in base al principio di causa–effetto, ma noi ci contentiamo di descrivere le cose all'ingrosso, e parliamo di **probabilità** al posto di **certezze**.

Qui s'innesta il contenzioso con Bohr. Quando si parla di **probabilità** in MQ, nell'interpretazione di Copenaghen il termine cambia significato, e va inteso:

**non come tutto ciò che SI RIESCE a sapere in pratica, ma come tutto ciò che C'È da sapere, e basta!**

E cioè: noi usiamo la **distribuzione di probabilità** di esistenza di un elettrone, non perché l'elettrone sia un sistema complicato, composto di molte parti, delle quali non conosciamo il gioco interno. Non c'è **ignoranza pratica** ma **realtà indeterminata**.

Se volete antropomorfizzare, come a me piace fare spesso, si potrebbe dire che neppure Madre natura ha la minima idea di come e dove si **materializzerà** l'elettrone, finché quest'ultimo non lo farà.

Un concetto del genere ripugnava al vecchio Einstein (e a tanti altri), e di conseguenza egli era convinto che la MQ fosse non già **sbagliata**, ma piuttosto **incompleta**, e le mancasse la descrizione di un qualcosa – nessuno poteva sapere di che si trattasse – per mezzo del quale la **casualità quantistica**, anziché essere **ontologica**, e cioè **intrinseca**, potesse essere derivata, magari solo in termini filosofici e non pratici, da un qualcosa di **causale**. Come se ci fosse un sistema d'ingranaggi nascosto, dentro l'elettrone, e **da fuori** non si riuscisse a vederne il funzionamento. Secondo Bohr, invece, l'elettrone era proprio **elementare** e basta, senza **pezzi** nascosti.

**Casualità** e **causalità** fanno a pugni; un'inversione di due lettere conduce a un'inversione totale e irriducibile di concetti. Ne dirò qualcosa nel capitolo seguente.

## 14.4) – Retrospectiva sulla MQ

L'equazione di Schrödinger era stata ricavata nell'ipotesi che la velocità delle particelle in esame fosse molto piccola nei confronti di quella della luce. Nel mondo subatomico, però, le cose non vanno sempre in questo modo. Di conseguenza, attorno al 1930, Dirac corresse l'equazione di Schrödinger (tirandone fuori un gruppo di equazioni) per applicare la **MQ** agli elettroni nel caso in cui la loro velocità fosse relativistica.

Giostrandoci un po', egli si accorse di un fatto strano: c'erano sempre *due* soluzioni matematiche; una *positiva* (per l'elettrone in esame) e una *negativa*, e quest'ultima sembrava priva di significato fisico. Solo più tardi fu chiaro che la soluzione negativa si riferiva al corrispettivo dell'elettrone sotto forma di *antimateria*, allora sconosciuta, e trovata sperimentalmente solo qualche anno dopo. Ne parleremo un po' nel prossimo capitolo. La storia, comunque, non finisce qui: ecco una velocissima carrellata sui successivi sviluppi.

Pure l'equazione di Dirac non era abbastanza generale, e ci lavorarono sopra in molti, tra i quali Wigner ed Enrico Fermi, finché Feynman, Schwinger e Tomonaga, tra gli anni '40 e i '50, sortirono tre metodologie (premiare con Nobel nel 1965), che Dyson dimostrò essere tre facce di una sola realtà, per descrivere l'interazione elettromagnetica. Alcuni fisici si avventurano fino a definire "*elegante*" questo modello, ma io non sono tra costoro. Tra gli anni '50 e i '60, la trattazione fu poi estesa alle interazioni nucleari, *debole e forte*.

In tal modo, cominciò a essere edificato lo scheletro di quello che ai giorni nostri prende il nome di "*Modello Standard*" (**MS**) con le maiuscole, di cui ho accennato in precedenza. Ho anche affermato come il **MS** ancora regga, ma scricchioli assai, e a esso ho ritenuto necessario dedicare tre brevi capitoli, anche perché negli attuali libri divulgativi se ne parla un po' troppo poco in rapporto alla sua importanza.

Sarà proprio il **MS**, infatti, a guidarci nel tentativo di capire cosa avvenne nei primi secondi di vita del cosmo; in esso giostrano particelle elementari e forze di natura, e ne vedremo delle belle: tra l'altro, incontreremo addirittura *fantasmi di fantasmi* che fanno torcere le budella a tanti (a me, per esempio, e così spero avvenga anche per il lettore).

La retrospectiva sulla **MQ**, però, vuole soffermarsi sui fondamenti logici di quanto abbiamo appreso in questo capitolo.

L'impressione è che tutti i costrutti della **MQ** siano un po' *fragili*, non perché la teoria sia fragile in sé (rappresenta comunque la *legge fondamentale di Madre natura* alla quale qualsiasi oggetto esistente deve conformarsi, e gli esperimenti lo confermano oltre ogni dubbio), ma forse perché noi stessi non ne comprendiamo del tutto le fondamenta per nostra inadeguatezza, come già rilevato in precedenza.

Comunque cerchiamo di girare la frittata, infatti, ne vengono fuori paradossi logici, e di conseguenza i modelli mentali intuitivi sono sempre tirati per i capelli. Certo: una schiera di fisici e filosofi della scienza si dedica interamente a provare nuove idee ed esegesi, per mezzo delle quali *sperare*, almeno, di uscire da questo pantano.

Infatti, è opinione piuttosto diffusa che l'*interpretazione di Copenaghen* pura e semplice non regga bene agli attacchi di Einstein e, specialmente, di Schrödinger, ma devo ammettere che la maggioranza degli scienziati non si cura molto di questi tentativi. In fin dei conti, se l'uso prevalente è quello di applicare la formalizzazione matematica e tirar fuori

numeri (a volte cifre precise, altre volte distribuzioni di probabilità), un motivo dovrà pur esserci.

Per me, alcune *interpretazioni correnti* della **MQ** sono a volte fantascientifiche (e quindi non mi soffermo neppure un istante su quella, favorita da alcuni, dei *molti mondi*, ma “guardo e passo”), a volte oscure, perché solo uno specialista le può seguire, e quindi nemmeno si può escludere che siano viziate da errori logici e garbugli inestricabili. Anche se non lo fossero, però, non cambia nulla. Il problema, infatti, almeno a mio avviso, è nel punto fondamentale in comune a tutte: non *risolvono* il problema, ma si limitano a *spostarlo*.

E finalmente, per consentire al lettore di avere la chiave di lettura più ampia possibile della **MQ**, mi assumerò la responsabilità di affermare quanto, a stretto rigore di termini, non sarebbe lecito dire se si desidera restare nell’ambito della logica. Mi sporcherò la bocca, cioè, esplicitando ciò che Einstein e gli altri si rifiutavano di accettare.

Attenzione, perché la frase tra virgolette nel prossimo paragrafo è un ossimoro, e ne vedremo subito dopo il motivo (Immanuel Kant mi scomunicherebbe *per se ipse*), ma per lo meno fornisce il *sapore* dell’argomento, e spesso la troverete scritta in un libro di fisica *serio*, senza però spiegazioni sull’intrinseca irrazionalità del concetto stesso.

Frase incriminata: «La MQ mostra che la natura, al suo livello più fondamentale, *non rispetta il principio di causalità* se non in modo statistico. E perciò, i risultati del singolo esperimento possono essere *del tutto casuali*. Solo la *media dei risultati su un gran numero di esperimenti* comincia a rientrare nel gioco causale.»

Perché non sarebbe lecito dirlo? Ragionateci: affermare che qualcosa non obbedisce alla causalità è una contraddizione in termini, giacché la logica (umana, ma io non ne conosco altre, e forse perfino i filosofi del Pianeta Vulcano sarebbero d’accordo) è tutta fondata sul principio di causa ed effetto, e non ne può prescindere. Qui viene fuori il nucleo del problema proposto nella sezione precedente, quando feci distinzione tra *probabilità come ignoranza* (opinione di Einstein) e *probabilità intrinseca* (Bohr e gli altri).

Lo dico in un altro modo. Quando *dimostriamo* qualcosa (sia un teorema matematico o la colpevolezza del cattivissimo in un’indagine forense), terminiamo con la frase “... e quindi...”. Ora, ciò significa che abbiamo esaminato le cause e siamo giunti all’effetto in un ragionamento *deduttivo*, oppure l’inverso (dagli effetti alle cause) se il ragionamento è *induttivo*.

Se le cose stanno così, però, come si fa a dimostrare *causalmente* che qualcosa *non è causale*? Bisognerebbe *uscire dalla logica*, e non si può. E allora, perché l’ho detto? Perché, piaccia o no, la maggioranza dei fisici moderni (me compreso, malgrado io non sia moderno ma cominci a suscitare l’interesse degli antiquari) mugugna tra i denti proprio questo: la non-causalità della **MQ**, sia essa dimostrabile o no (e non può esserlo, in senso stretto), deve essere comunque *vera*. Signori: parliamoci chiaro. La cosiddetta “*non località*” della **MQ** non è altro che un modo elegante ed oscuro per significare “*non causalità*” senza poi doversi andare a sciacquare la bocca col sapone. E finalmente l’ho detto, perbacco!

Sulla **MQ** ho detto anche troppo per quel che ci serve. Qui mi fermo, e passo invece a introdurre i primi concetti sul Modello Standard (**MS**).

## 15) – Il Modello Standard

### 15.1) – Riassunto sulle forze. Anzi: “Interazioni”

Questa sarà una lunga carrellata dedicata, come i precedenti due capitoli, alla *grana fine* del nostro Modello d’universo. È tempo di far sbocciare anche i fiori seminati quando abbiamo parlato di **MQ**, nuotare le papere negli stagni, volare i passeri tra le siepi, e quant’altro di più carino e lezioso può venirvi in mente per un bel plastico ferroviario.

Attenzione, però: rileggendo le parti **15)**, **16)** e **17)** mi sono reso conto che, per chi è poco interessato ai dettagli e vorrebbe giungere presto al Big Bang, questo gruppo di capitoli può, alle volte, entrare in alcune minuzie non indispensabili. In tal caso, il mio suggerimento è il seguente.

*Non saltate a piè pari, ma leggete tutto rapidamente, senza impuntarvi su ciò che non capite. Una parte del contenuto la capirete comunque, perché ci sono parti abbastanza chiare e vi aiuteranno le figure; il resto leggetelo velocemente, in modo che vi rimanga in mente solo un po’ di nomenclatura e le regolette più semplici. Lasciate ai più puntigliosi il compito di capire i dettagli e giungete rapidamente alla Sezione IV. Qui, saranno presenti solo i “personaggi principali” e le più banali tra le leggi che li legano, quindi non vi mancherà comunque la capacità d’intendere quello che avvenne nei primi microsecondi dopo l’istante del Big Bang vero e proprio. Tranquillizzatevi, perciò, e andate avanti con la lettura come con un giallo troppo complicato, ma di cui v’interessa solo sapere, alla fine, chi è l’assassino.*

Siamo giunti, infatti, al cosiddetto “*Modello Standard*” (MS): ho già accennato che perde acqua da molte parti, eppure consente previsioni teoriche confermate dagli esperimenti fino alla decima cifra decimale e anche più. Come si possono mettere assieme queste due affermazioni?

Lo vedremo nel gruzzoletto di pagine che seguono, disponendo gli attori del Big Bang sulla scacchiera o, se preferite, aggiungendo quelli dei primi microsecondi di vita dell’universo, perché gli altri li conosciamo già (e li vedremo meglio più avanti). Glissando del tutto su *materia oscura* ed *energia oscura*; qualcosa ne dirò nella Sezione IV: solo quel che serve, però.

Il primo dilemma nel quale s’impatta è – fatte le debite proporzioni – quello dell’uovo e della gallina. Bisogna discutere prima le *forze* di natura, o è meglio partire da qualcosa di *apparentemente* più solido, e cioè le *particelle elementari*, e rinviare a dopo il discorso – leggermente più vago – sulle forze–interazioni?

In effetti, i due aspetti della natura (particelle e interazioni) sono così interconnessi e rimescolati tra loro, che toccherà avere pazienza e rassegnarsi a un *mélange*: in questo

capitolo e in parte del prossimo cercherò di mantenere il filo del discorso più sulle interazioni, ma le particelle saranno lì a rendere sdruciolevole il percorso. Quando poi toccherà alle particelle, le interazioni si presenteranno come una melassa attraverso la quale scavarsi la strada con fatica.

Per la verità, i due argomenti sono uno solo, e la vera soluzione è discuterli non prima o dopo, ma prima e dopo. Per nostra fortuna a un certo punto avrà luogo la saldatura, quando narreremo splendori e miserie della “**Teoria quantistica dei campi**” nel suo tentativo di risolvere il problema di Newton (come diavolo si trasmettono le forze a distanza) in conformità a concetti propri: astrazioni che non hanno davvero nulla a spartire con l’*elegante* curvatura dello spaziotempo della Relatività generale.

Se il lettore teme per la propria incolumità intellettuale di fronte alla scaletta di argomenti appena tracciata, non me la sento di dargli torto alla leggera: quando racconto queste cose, qualcuno mi prende invariabilmente per matto. A volte, quel qualcuno sono proprio io, perché mi trovo a chiedermi: «Ma ci credo *sul serio?*». D’altronde, come sempre è avvenuto in precedenza, non è il caso di aver *troppa* paura: le cose non sono banali, ma sfido chiunque a non trovarle interessanti.

Lasciatemi, perciò, sintetizzare i tre elementi principali del **MS**, almeno per come piace a me impostare il discorso. In altri libri potrete trovare schemi diversi, ma anche questo funziona, e perciò lo userò. Ecco qui di seguito le chiavi di lettura.

- Le “**forze**” o “**interazioni**”;
- le **particelle elementari**, e
- le **regole** per calcolare tutto quel che serve.

Come vedrete, però, non introdurrò questi tre elementi nell’ordine in cui li ho elencati. È stata Madre natura stessa a non rispettare i nostri schemi mentali, e io non potrò farci niente.

Le forze o interazioni, dunque, e molto brevemente: nei libri c’è scritto che sono quattro ma, fino a convincente prova contraria, mi sento autorizzato a contarne cinque. Le elencherò in ordine di “*forza crescente*”, secondo quanto sono “*intrinsecamente robuste*” sul tavolo dello sperimentatore. Dove la dizione tra virgolette non è generica come ci si potrebbe attendere, ma riflette una precisa graduatoria numerica. In effetti, queste interazioni sono messe in riga da una certa gerarchia naturale, e ce ne sono di *intrinsecamente più forti* e di *intrinsecamente più deboli*.

La più *debole* in assoluto è quella che sta accelerando l’espansione dell’universo. Tanto debole, da essere impossibile la sua rivelazione in laboratorio. Può sembrare strano che, alla fine, debba essere proprio lei a determinare il futuro dell’universo nella sua globalità, ma bisogna ragionare come segue: è *intrinsecamente debolissima*, sì, ma agisce su volumi di spazio immensi e sempre crescenti. Siccome, inoltre, è *sempre repulsiva*, e quindi non incontra nulla che possa *saturarla* (tipo una *forza attrattiva* di analoga intensità), su scala cosmica, a conti fatti, vince su tutte le altre. Più avanti aggiungerò altre caratteristiche di questa *forza* che però, secondo molti, non va trattata a parte ma è già compresa nella Relatività generale.

La seconda, in ordine di *forza propria* crescente, è la gravità. Anch’essa è *intrinsecamente debole*, e se ci pare così robusta che il tentativo d’ignorarla possa costarci un osso rotto se non la vita, ciò dipende dalla sua natura sempre e solo attrattiva. *Tutta* la Terra ci attrae; ciò permette alla gravità di essere ben presente nella nostra esistenza di ogni

giorno, e anche di giocare un ruolo non indifferente nella stessa economia cosmica, stante la gran quantità di massa esistente nell'universo. E così abbiamo esaurito le forze descritte dalla Relatività: ora iniziano quelle formalizzate in modo soddisfacente solo nella **MQ**, per la precisione nel **MS**.

A enorme distanza dalla gravità, sempre crescendo di *forza propria*, troviamo una faccenda strana; per il momento, può sembrarci addirittura un po' esoterica, mentre in realtà non lo è solo un po', ma molto più di quanto saremo disposti a digerire. È la prima delle interazioni quantistiche e, volendo essere sinceri, a uno sguardo superficiale non ci pare neanche corretto classificarla come *forza* in senso stretto. Meglio parlare, per l'appunto, d'*interazione* e basta. Circa  $10^{25}$  volte più *forte* della gravità (la cifra è un po' arbitraria perché, come vedremo, dipende molto da come la si vuole misurare), viene la cosiddetta *interazione nucleare debole* che, in primo luogo, presiede alle disintegrazioni radioattive, e ne combina di cotte e di crude con i *neutrini*.

È confinata all'interno dei nuclei atomici, donde la dizione *nucleare*. La sua prima teorizzazione fu di Enrico Fermi nel 1933; si tratta di una specie di *uncino* capace di scattare solo a distanze molto piccole, inferiori al raggio di un protone. Oggi conosciamo i numeri precisi: solo *un millesimo* del raggio di un protone! Quando scatta, però, *prende il sopravvento su tutto il resto*. Questo è il motivo per cui sono reticente ad assegnarle una classificazione propria ben precisa: può essere considerata *debole* come *fortissima*.

Dopo Fermi, molti altri vi lavorarono sopra scoprendo che, affinché l'uncino scatti, occorre lo scambio di un *gettone*, come vedremo nel prossimo capitolo.

Un esempio di questa interazione in atto? Semplice: un neutrone libero, vale a dire isolato e fuori da un nucleo atomico, vive in media solo una decina di minuti e poi si disintegra, dando luogo a un protone, un elettrone e un *antineutrino*. Ciò avviene grazie all'intervento dell'interazione nucleare debole. E, in condizioni particolari, può avvenire il processo opposto: *un protone si trasforma in neutrone* (più un *antielettrone* e un neutrino). Già stiamo scivolando sulle particelle (mi spiego: va bene l'elettrone ma quest'*antineutrino*?) e *antiparticelle*. Succederà sempre più spesso, quindi abbiate pazienza; ogni cosa a suo tempo. E vedremo meglio anche la disintegrazione del neutrone.

Non sottovalutiamo, perciò, quest'interazione *falsamente debole*, poiché senza di essa le stelle non potrebbero generare energia, e costruire nuclei complessi partendo da soli protoni. Colgo pure l'occasione per insistere col lettore sul vocabolo: "*forza*". Col suo significato ormai storicamente consolidato nella lingua, non riesce a esprimere bene la varietà di eventi che si possono incontrare nel mondo quantistico.

Per questo motivo, come ho già anticipato, ormai da molto tempo, è invalso l'uso di sostituirle il vocabolo: "*interazione*" e, come si noterà, io stesso ho iniziato a aderire a questa convenzione. Non si tratta solo di un fatto formale, ma esprime meglio il concetto. In fin dei conti, una *forza*, per sua natura, può solo attrarre o respingere, un'*interazione* può anche frantumare e saldare. Non buttate quest'idea nel dimenticatoio.

Circa  $10^{36}$  volte più intensa della gravità, è l'*interazione elettromagnetica*, con la quale siamo convinti (a torto) di avere dimestichezza. Perciò ne parlo relativamente poco, ma aggiungerò qualcosa nel prossimo capitolo. Sappiamo che esistono due *cariche* elettriche di tipo diverso, *positiva e negativa*, e si attraggono se sono di segno opposto mentre si respingono se dello stesso segno. Ancora: quando una carica elettrica (o un *campo* elettrico)

è in moto, si genera un *campo magnetico* e, viceversa, il moto del campo magnetico genera a sua volta campi e correnti elettriche. L'accelerazione (pure quella radiale) di una carica elettrica, poi, genera un' *onda elettromagnetica*.

Poiché l'interazione elettromagnetica è davvero *robusta*, è molto difficile separare le cariche elettriche di segno opposto. Se, infatti, si riesce a dividerle e poi si lasciano a se stesse, impiegano ben poco a saturarsi a vicenda, precipitandosi le une sulle altre.

Questo è il motivo per cui, per utile e *potente* che sia l'elettricità, riusciamo a beneficiare solo di una frazione molto piccola di quanto se ne potrebbe ricavare, qualora non ostassero difficoltà tecniche insormontabili a separare, per esempio, *tutti* gli elettroni da una sbarra di metallo e trasferirli su un altro oggetto. Ne verrebbe fuori qualcosa di comparabile a una centrale nucleare. Ma, ripeto, non si può fare perché l'attrazione è troppo forte.

E ricordiamo pure un concetto chiave, utile a capire molte delle cose discusse in futuro: tanto più *forte* è un'interazione, tanto meno probabile sarà riuscire a scovarne *cariche libere*, perché tenderanno a scaraventarsi il più rapidamente possibile le une sulle altre, e neutralizzarsi.

Infine, ancora  $10^{38}$  volte più intensa della gravità, c'è l'altra interazione nucleare, quella cosiddetta "*forte*", che tiene assieme le particelle – i *quark* che stiamo per incontrare – di cui sono formati protoni e neutroni. Una sua *codina* uscente da queste ultime particelle, è poi responsabile della stabilità dei nuclei atomici.

La stranezza dell'interazione forte è la seguente: le sue cariche sono di *tre* tipi diversi, anziché due come nel caso elettrico, e ciò dà luogo a effetti non facilmente immaginabili. I fisici non hanno fatto un grande sforzo di fantasia quando hanno definito "*di colore*" le *cariche forti*, chiamandole: **rosse, verdi e blu**.

D'altra parte, non è stata una scelta troppo infelice: il *colore*, infatti, sembra essere un'analogia utile per un semplicissimo modellino mentale, poiché la *composizione* di cariche *forti* di diverso colore funziona, molto vagamente, come il mescolamento dei tre colori fondamentali in pittura e in grafica, e ne ripareremo più avanti perché non abbiamo certo finito con la discussione delle interazioni.

Ce ne sono altre, o dobbiamo limitarci a queste cinque? A volte, i fisici hanno ipotizzato l'esistenza di altre interazione, tra cui una definita "*di Technicolor*", più intensa ancora di quella di colore, ma sono solo ipotesi, alcune delle quali ormai abbondantemente screditate dagli esperimenti, ed è meglio restare ai fatti. Qualcosa deve esistere di certo, ma ancora non sappiamo cosa. Cinque (o quattro se mettiamo assieme le general-relativistiche) sono le interazioni conosciute oggi, e per il momento basta così.

Avendo presentato al lettore questa grossolana carrellata sull'argomento, è subito necessario cominciare a prendere in considerazione le prime sottigliezze.

Anzitutto le due interazioni più deboli. Repulsione cosmica e gravità non saranno, per caso, solo due aspetti diversi della curvatura dello spaziotempo? Non è detto a priori (la forza che determina la repulsione cosmica potrebbe essere la *quintessenza* dei fisici più arditi...). E poi: il fatto che non si riesca in alcun modo a *quantizzare* la forza di gravità, per cui tutta la Relatività generale rimane fuori del **MS**, è una delle crepe di quest'ultimo. Ricordare, per favore.

Ora passiamo alla terza e quarta interazione. Alla fine degli anni '60, i fisici Weinberg, Salam e Glashow dimostrarono che pure queste due sono solo aspetti diversi di una realtà

unica, cui è stato assegnato il nome: “*Interazione elettrodebole*”, e furono perciò premiati col Nobel nel 1979. Ovviamente, anche su quest’argomento dovremo tornare più avanti, e dedicargli spazio nel prossimo capitolo, perché non solo è un pochino complicato da spiegare, ma è pure molto importante.

Qui anticipiamo solo un concetto: ad alta temperatura – circa un milione di miliardi di gradi – queste due interazioni non si manifestano più separatamente ma come una sola, di caratteristiche un po’ diverse da come siamo abituati a pensarle nel nostro mondo a bassa temperatura, laddove ci sembra di aver a che fare con due *entità* prive di qualsiasi correlazione tra loro.

D’altro canto, ricordiamo pure come *temperature* così alte si raggiungano benissimo negli attuali acceleratori di particelle, e dunque non è difficile sperimentare su questa (per noi) strana interazione unificata. A conti fatti, dunque, le cinque interazioni di natura si potrebbero ridurre solo a tre.

Resta ancora l’interazione nucleare forte, e questa è davvero una bestia strana come vedremo in breve. I fisici, però sono *ragionevolmente* convinti che, a temperature enormemente più elevate di quelle raggiungibili in laboratorio oggi, e purtroppo anche in un futuro prevedibile (qualcosa come  $10^{38-39}$  °K), pure quest’ultima debba *unificarsi* con quella *elettrodebole*.

È una predizione che ha del miracolistico, giacché è al di fuori di ogni possibilità di sperimentare, eppure non sembra del tutto priva di significato, quindi dovremo dirne qualcosa. In ogni caso, se quanto abbiamo appena affermato fosse vero, alla fine ci troveremmo con:

- da un lato una sola interazione descritta dalla Relatività,
- e dall’altro una sola interazione dominata dalla **MQ**.

Prima d’introdurre le particelle elementari, per tornare quindi alle interazioni, mi sembra giusto risolvere un dubbio legittimo che il lettore avrebbe tutto il diritto di sollevare: se queste cinque (o due, o quanto piaccia ai fisici) sono le uniche interazioni esistenti nel cosmo, cosa succede quando *io spingo un oggetto*? Non esercito pure io una *forza*? Qual è la sua natura?

Ebbene; su scala umana, le forze che non sembrano rientrare nell’elenco delle cinque sono solo manifestazioni particolari di una di esse: quella elettromagnetica. I nostri muscoli sono in grado di esercitare forza, perché ogni organismo vivente è una complessa macchina stereochimica, e le molecole sono guidate dall’elettricità.

A causa di particolari reazioni chimiche, infatti, nel nostro corpo deboli campi elettrici costringono alcune cellule a distendersi, e queste sono appunto le cellule muscolari per mezzo delle quali esercitiamo le forze di tipo biologico. Dopodiché, come si trasmettono queste forze agli oggetti? Per mezzo di un *contatto diretto*, sembrerebbe. Non potendo entrare nel dettaglio, giungo subito all’anello finale della catena: quello che porta dalla mano all’oggetto che spingiamo.

Tutto dipende, infatti, dal significato assegnato ai termini usati nel discorso. Infatti, ciò che noi definiamo *contatto diretto* è la pura e semplice *repulsione elettrica* degli elettroni nella nostra mano, nei confronti di quelli esistenti nell’oggetto che stiamo spingendo. Insomma: si tratta sempre di elettroni contro altri elettroni. Con una *complicazione* della **MQ** di cui non ho parlato: il *Principio di esclusione di Pauli*. È piuttosto importante, ma ci porterebbe fuori strada e dovrete andare a cercarlo qualche libro sulla **MQ**. Mi perdonate?

Il giochino descritto sopra è valido in ogni apparecchiatura meccanica moderna, si tratti di un motore a scoppio, una pressa idraulica, un carrello elevatore, il trapano del dentista e così via. Le *nubi elettroniche* (ricordate la MQ?) degli atomi di un oggetto, passano la spinta all'altro per il tramite di nubi elettroniche che li ostacolano. Un tiro alla fune alla rovescia, insomma. In pratica, tutte le forze con cui abbiamo a interagire in meccanica, in biologia e in genere nel mondo di ogni giorno, nascono da mutazioni di stato atomiche o molecolari, e sono trasmesse da nubi di elettroni che si respingono a vicenda. È chiaro?

Mi sa che fin qui non lo è molto, vero? Pazientate: ce la faremo.

## 15.2) – Incubi al risveglio di Finnegan

La prima carrellata sulle forze è completa, almeno per quanto ci servirà nell'immediato futuro. Ora affrontiamo, almeno in via provvisoria, quella parte del **MS** che si occupa di particelle elementari.

Credo sia utile, per introdurre i minimi costituenti della materia, partire da qualcosa di familiare: il sale da cucina, e cioè il cloruro di sodio. Una molecola di sale è particolarmente semplice, essendo composta di un solo atomo di sodio e uno di cloro, tenuti assieme dalla forza elettrica generata quando l'atomo di sodio *cede* un elettrone a quello di cloro, e resta carico positivamente, mentre il cloro *acquista* carica negativa (modellino rudimentale).

Di conseguenza, spezzettando il sale in frammenti sempre più microscopici, si giungerà alle molecole: le più piccole unità di materia che mantengano le caratteristiche chimiche del sale. Spezzando una molecola, invece, vengono fuori i due atomi: il cloro, un gas giallo-verdognolo irrespirabile usato nella Grande guerra sotto forma di *fosgene* e *yprite*, e il sodio, morbido come la cera, che all'aria si ossida in pochi istanti e gettato in acqua produce fiamme ed altri effetti speciali. Il primo passo, quello di arrivare agli atomi, è fatto.

Il vocabolo "*atomo*", in greco, significa *indivisibile*. Già se ne parlava nella Scuola ionica, attorno al 600 a.C., ma non tutti i filosofi di allora erano d'accordo sull'esistenza degli atomi. Altri pensavano che la materia fosse divisibile all'infinito, e tra questi ultimi c'era Aristotele il quale, manco a dirlo, lasciò l'impronta a lungo, specie durante il Medio evo.

Nel 1905, il solito Einstein produsse la prima prova *sperimentale* della presenza reale di atomi nella materia, ma già da un paio di secoli prima di lui le leggi della chimica, specie quelle di Lavoisier e Dalton, si basavano implicitamente sull'esistenza degli atomi, e il conte Amedeo Avogadro aveva addirittura proposto un metodo per calcolare quanti ce ne fossero in un dato volume di gas.

Tra l'altro, sempre le stesse leggi della chimica lasciavano sospettare che perfino l'atomo non potesse essere considerato *indivisibile* in senso stretto. Se l'atomo ha conservato questo nome, dunque, è per motivi storici e null'altro.

Può sembrarci strano che un importantissimo scienziato e filosofo della scienza come Ernst Mach, ancora a cavallo del '900, considerasse l'atomo non come una realtà fisica, bensì come un comodo *artificio di calcolo* e null'altro, ma così vanno le cose. Eppure, Mach era un personaggio assai influente, e molti fisici dell'epoca furono influenzati dalle sue opinioni. Perfino Einstein.

L'atomo, come oggi sappiamo, è divisibile, ma prima di prenderlo a martellate misuriamolo. È piccolo e, in unità *mondane*, il numero esprimente il suo diametro non ci dice granché. Mettiamola così: nello spessore di un capello, ce ne vanno diversi milioni in fila. E tanto basti, almeno per ora.

Adesso interveniamo sull'atomo con *pinzette ideali* sempre più piccole a seconda della bisogna, e tiriamo fuori tutti gli *elettroni* mettendoli da una parte. Dall'altra parte resterà un *nucleo*, e cioè la parte *pesante* dell'atomo. Ci vorrà una bella dose di fatica per tenere separati i due mucchietti perché si attraggono con una forza elettrica non indifferente, ma possiamo ignorare questo problema pratico: stiamo lavorando a un *gedankenexperiment*.

Finalmente, con le *pinzette* più piccole nel contenitore (se volete comprarne un paio dal ferramenta sotto casa vostra dovete chiedere quelle da  $10^{-20}$  pollici, ma rischiate una brutta risposta), afferriamo un solo elettrone e sottoponiamolo a tutta una serie di analisi di laboratorio. Può sembrare strano che ci si riesca, ma non è poi così complicato, seppur con metodi un po' diversi dal gioco con le pinzette.

Ci accorgiamo presto che pure questo cosino ha una certa massa, e dunque è soggetto all'*interazione gravitazionale*. La sua carica elettrica la conosciamo e, possedendone una, obbedirà pure all'*interazione elettromagnetica*. Forse non ci aspettavamo che fosse anche *portatore di carica nucleare debole* in senso lato. Diciamo quindi così: può essere *scambiato* o *trasformato* quando scatta l'interazione debole. Attenzione, però: la natura di quest'ultima è assai particolare, e il concetto di *carica debole* è, per i profani come noi (mi ci metto anch'io), piuttosto sfumato, anche se in fisica ha un significato ben preciso.

La carica nucleare *forte*, invece, gli è completamente ignota, e dunque l'elettrone non partecipa ai processi nucleari che richiedano scambio di *colori*.

Memorizziamo quest'ultimo dato, e procediamo. Il passo seguente sarebbe, in linea di principio, quello di cercar di spaccare l'elettrone in pezzi ancora più piccoli. Ci si riesce? Per quanto ne possiamo dire ai giorni nostri, no: non sembra possibile. Quando cerchiamo di frammentare un elettrone, anche per mezzo dei più potenti acceleratori di particelle, esso ci appare, a tutti gli effetti, *infrangibile e puntiforme*.

Potrebbe essere una *superstringa* (vedi Sezione IV, dove ho raccolto un sacco di porcherie)? Non lo sappiamo. Insomma: fino a prova sperimentale contraria l'elettrone non ha parti costituenti, e dunque si può considerare una vera e propria *particella elementare*. La prima che possiamo finalmente inserire in una casella del **MS**.

Il lettore, giustamente, protesta. «Un momento: la **MQ** afferma che l'elettrone è *sparpagliato, diffuso*. Cos'è questa nuova storia, secondo cui gli elettroni sono puntiformi?»

Non c'è contraddizione. Ricordiamo il **PdI**. Secondo il suo enunciato, urtando un elettrone con fotoni di energia sempre più alta, e dunque di lunghezza d'onda sempre minore, si può ridurre a piacimento il valore dell'incertezza  $\delta x$  (vale a dire: del *raggio di confusione*) purché aumenti in conseguenza l'incertezza  $\delta v$ .

Ebbene: negli acceleratori dove corrono particelle di altissima energia le quali, secondo afferma il *settimo Duca di De Broglie*, hanno lunghezza d'onda associata piccolissima, possiamo ridurre  $\delta x$  o, se preferite, la *dimensione quantistica* dell'elettrone, a valori piccoli a piacere, purché non ci occupiamo di quanto enorme diventi  $\delta v$ .

Vorrei che questo concetto fosse chiaro, prima di procedere, perché sarà necessario tenerlo implicitamente in considerazione d'ora in poi. In fin dei conti, dopo aver misurato la *dimensione minima* dell'elettrone, non ci importa proprio nulla di dove se ne sia andato a finire. Senza violare la **MQ**, si può imporre un *limite superiore* alla dimensione di un elettrone, e nei giorni nostri sappiamo che, se non è puntiforme, per lo meno è più piccolo di *un decimillesimo di un nucleo atomico*.

Ora torniamo a quando avevamo smembrato l'atomo. Ricorderete che da una parte c'erano gli elettroni, dall'altra il nucleo. Soffermiamoci su quest'ultimo perché ormai gli elettroni li abbiamo studiati bene, e notiamo anzitutto che esso è circa **100.000** volte più piccolo di un atomo.

Il lettore rammenta di sicuro (spero) i giochini dei quali ci eravamo serviti nel capitolo 3.3 per visualizzare quanto è grande l'UC, (l'Universo Causale) e qui possiamo ripeterli. Se il nucleo di un atomo viene gonfiato fino a fargli raggiungere la dimensione di una chiave, quanto sarà grande la prima *orbita elettronica* dell'atomo nella stessa scala? Nessuno si meraviglierà, suppongo, se essa si espanderà fino a inglobare il sistema di Tangenziali o il **GRA...**

Veniamo perciò al nucleo: tutti sappiamo che in esso troviamo due tipi di particelle, ciascuna delle quali circa duemila volte più pesante di un elettrone. Ci sono i protoni, dotati di carica elettrica positiva, e i neutroni, elettricamente neutri.

In alcune situazioni, i fisici trovano comodo definire sia il protone, sia il neutrone, con l'appellativo comune di *nucleoni*. Se mi capiterà, pure io farò uso di questo termine, quindi vale la pena di ricordarlo, anche se ormai fa parte di una fisica un po' vecchiotta.

Già da quanto abbiamo detto, si deduce che pure il nucleo è divisibile. Di conseguenza, bisogna passare al gradino successivo: i due tipi di nucleone sono a loro volta particelle elementari in senso stretto? I fisici hanno lavorato per molti anni come se lo fossero, ma non ne sono mai stati del tutto certi.

Uno dei motivi sperimentali per alimentare il dubbio, si trova in un comportamento peculiare del neutrone: pur non possedendo carica elettrica complessiva, agisce come una piccola calamita. E noi sappiamo che il campo magnetico non può esistere se non è generato da una corrente elettrica. Ne deduciamo quindi che, all'interno del neutrone, si devono trovare particelle dotate di carica elettrica, e per di più in rapido movimento.

Finalmente, dagli anni '70 del secolo scorso, i grandi acceleratori hanno cominciato a fornire *immagini* nitide dell'interno di protoni e neutroni (non pensate a immagini di tipo microscopico tradizionale o elettronico; le cose sono più complicate). In effetti, come ognuno si aspettava, in ciascun nucleone ci sono altre particelle e, stavolta, possiamo assumere queste ultime come elementari e indivisibili: i *quark*. Per essere precisi, ce ne sono tre in ogni nucleone.

Proviamo a *raccontare* un quark per mezzo di una sua scheda anagrafica, pur se non potrà essere completa quanto ci piacerebbe. Infatti, la **MQ** rimescola molto le carte in tavola: ignoriamola fin dove possibile, e partiamo dal nome.

¿*Nomina sunt consequentia rerum* come dice Giustiniano? Forse sì, ma con molta buona volontà. Le agiografie narrano, infatti, di come Murray Gell-man – lo scienziato che aveva molto lavorato su questo nuovo livello della materia assieme ad altri colleghi – considerasse le particelle in oggetto veri e propri *quirk* (stranezze) di natura. Così, una sera, trovandosi in birreria e non essendo rimasto col becco asciutto, dopo aver proposto di chiamarle *qwark* perché ricordava il verso dell'oca, trovò subitanea ispirazione in James Joyce, e in particolare nel "*Finnegan's wake*".

In questo *romanzo* (in senso molto lato) si trova la frase: «*Three quark for Muster Mark!*». La traduzione in italiano? Anche allentando molto i cordoni della borsa dell'idioma britannico il quale, si sa, tende a raccattare ogni monosillabo e affibbiargli un significato, la traduzione non c'è. Due vocaboli (*three* e *for*) vogliono dire qualcosa e, poiché a quell'epoca si parlava già della possibile esistenza di *tre* differenti particelle subnucleari, perché non definirle *quark* in onore di Muster Mark? Chi era costui? Se proprio volete saperlo a ogni costo, vi mando volentieri all'inferno per chiederlo a Joyce in persona.

Insomma: da *quirk* a *quark*, ma io sono della scuola che vede i nomi come *accidenti* e non *sostanze*, mentre siamo più interessati a queste ultime. Di conseguenza, passiamo a elencare le caratteristiche fisiche dei quark. Per cominciare, nei nucleoni si trovano quark di due tipi diversi (il terzo tipo, già individuato da Gell-man, interverrà più avanti).

Come si chiamano, tanto per poterli distinguere meglio? Stavolta, i nomi loro affibbiati sono poco fantasiosi. Molto semplicemente: “*su*” e “*giù*” (attenzione: poiché s’incontrano sempre i nomi inglesi, anch’io comincerò d’ora in poi a parlare di quark *up* e *down*). Magari, sarebbe stato meglio scomodare ancora Finnegan...

Entrambi hanno una loro massa – rispettivamente, e all’incirca, **5** e **10** volte quella dell’elettrone –, sono dotati di carica elettrica, rispondono pure alla carica nucleare debole e, soprattutto, a quella *nucleare forte*, ed è proprio quest’ultima a determinare in maggior misura le loro caratteristiche. Ripeto che entrambi sembrano *infrangibili* e *puntiformi*, privi di struttura interna, e quindi è ragionevole concedere pure a loro il diritto allo stato di *particelle elementari* in senso stretto. Aggiungiamoli al costituendo zoo del **MS**.

Molte caratteristiche di questi due quark ci sconcertano un po’, almeno in prima battuta. E sconcertavano allo stesso modo i creatori del modello, i quali impiegarono diverso tempo a convincersi di come gli esperimenti (elettroni che andavano a curiosare *dentro* protoni e neutroni) la stessero raccontando giusta. Vediamo qualche stranezza (*quirk*).

Per dirne una, le masse. Sono piccole, al più una decina di volte quella dell’elettrone. E perciò, se un nucleone – che *pesa* duemila volte un elettrone – è composto di soli tre quark, la bilancia dovrebbe suggerire per questi ultimi qualcosa come seicento masse elettroniche. Da dove viene il peso (la *massa*) in eccesso?

Una risposta semplificata oltre il ragionevole – ma non c’è un “ragionevole” quando si toccano questi argomenti – potrebbe essere che si tratta di energia potenziale e cinetica di quark e gluoni. In teoria semplice, in pratica difficile da calcolare matematicamente: la massa in più è *pura e semplice energia d’interazione* tra queste tre particelle (divisa per  $c^2$ , s’intende). Già questa prima considerazione fa intuire quanto *forte* sia, per l’appunto, l’*interazione nucleare forte*, e quanto le energie comincino a dominare sulle masse, quando si arriva ai livelli ultimi della materia.

In pratica, se i quark fossero del tutto privi di massa, il *peso* dei nucleoni non cambierebbe moltissimo. Questa, però, è fantascienza, e lasciamola stare. Mettiamo in lista d’attesa il *gettone* responsabile – più d’uno, in realtà – di questa energia in eccesso, e andiamo avanti con le schede anagrafiche.

A prima vista, ci sembrano strane pure le cariche elettriche dei quark: se definiamo  $-1$  quella dell’elettrone (il segno “meno” dipende da una pura e semplice convenzione dovuta a Franklin), la carica elettrica di *up* è pari a  $+2/3$ , mentre quella di *down* risulta  $-1/3$ . Cariche frazionarie!

Un momento, però: forse c’è un buon motivo perché le cariche elettriche dei quark siano multipli positivi o negativi di  $1/3$ . Infatti, ricordiamo che in ogni nucleone ci sono *tre* quark. Ecco in qual modo sono distribuite le cariche:

$$\begin{aligned} \text{- protone} & \Rightarrow \textit{up} + \textit{up} + \textit{down}; \\ \text{carica elettrica} & = + 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1 \end{aligned}$$

- neutrone  $\Rightarrow up + down + down$ ;  
carica elettrica =  $+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Avete capito perché i fisici già sospettavano che i neutroni non potessero essere particelle elementari nonostante la loro carica elettrica nulla? I tre quark del neutrone ruotano come pazzi e, semplificando in modo ragionevole, nel loro balletto perenne producono un campo magnetico.

La scheda anagrafica prosegue con la *carica nucleare debole*. Per il momento diciamo solo che *up* e *down* sono soggetti in modo considerevole a questa interazione. E qui vale la pena di ritornare sull'esempio già visto in precedenza dell'interazione debole e della disintegrazione spontanea del neutrone.

Quest'ultima particella, in un nucleo atomico è, in media, stabile sotto l'azione del *brodino* di quark (e di *gettoni* che trasmettono l'interazione di colore, come discuteremo nel prossimo capitolo) nel quale si trova immerso. Se, però, isoliamo un neutrone, l'interazione debole consentirà a uno dei due quark *down* di diventare *up*, perché quest'ultimo è un tantino più leggero e, in linea di massima, ogni corpo tende sempre a scendere in energia (massa). Cosa succede, in dettaglio?

Bene: in primo luogo bisognerà mantenere la carica elettrica totale. Poiché il neutrone è diventato un protone, e dunque è passato da carica **0** a carica **+1**, dovrà essere emessa una particella di carica **-1**: nella fattispecie, un elettrone.

Badate bene, però: l'elettrone *non stava mica nascosto da qualche parte dentro il quark down*; molto semplicemente, è stato *creato* nel momento necessario. Come si vede, nel caso della disintegrazione del neutrone la *forza debole* agente tra i quark ha, come effetto primario, quello di *trasformare* un quark di un tipo in uno di tipo diverso. E poi è debolmente repulsiva ma, per l'appunto, *debolmente*.

A ogni modo, la storia non finisce qui. Esiste, in fisica, una nuova legge del tutto generale, che incontriamo per la prima volta in questa circostanza. Si chiama: "Conservazione del numero delle particelle (e *antiparticelle*)". Applichiamo questa *conservazione* al decadimento del quark *down*, per capire come funziona.

Avevamo un quark *down*, ma ora si è trasformato in un quark *up*. Sono tutte *particelle*: una (il quark *down*) ne avevamo all'inizio, una (il quark *up*) ne abbiamo alla fine. Fin qui, le cose vanno bene. C'è, però, un intruso: per portarsi via la carica elettrica in eccesso, è stato necessario *creare* un elettrone, e cioè una seconda *particella*. Di conseguenza, i conti non tornano più: avendo *una* particella iniziale, alla fine ce ne troviamo in mano *due*.

Come si fa? Niente paura; il trucco esiste. Nello stesso processo in cui si crea una particella, contestualmente vien fuori un coniglio dal cappello dell'interazione debole: vale a dire un' *antiparticella*, per la precisione un *antineutrino* che, nel conteggio del **numero totale delle particelle**, ha *segno negativo*. Nei fatti, perciò, senza ancora specificare troppo, una particella ha dato origine a due particelle e un'antiparticella, e quindi i conti tornano di nuovo: **1  $\Rightarrow$  2 - 1 = 1**.

Chi è il vero intruso, perciò? Bene: ci troviamo di fronte al quarto tipo di particella elementare o, in questo caso particolare, alla sua *antiparticella*. Poiché il concetto di antiparticella sarà discusso più avanti, per ora soffermiamoci sul *neutrino*. Di cosa si tratta?

Il nome la dice lunga: una particella elettricamente neutra, e neppure soggetta all'interazione nucleare forte cui sottostanno i quark. Pur essendo *seminudo*, possiede

ugualmente due *cariche* in senso lato. La prima è quella **debole**, la seconda è la pura e semplice **massa**. Molto, molto piccola, qualche **milionesimo** di quella dell'elettrone, ma in ogni caso diversa da zero.

Questa bestiola strana compare sempre quando scatta l'**interazione debole** e, a conti fatti, porta a quattro il numero di particelle elementari conosciute. Sotto alcuni punti di vista ci sembra un po' anomalo: le altre tre servono a costruire tutta la materia conosciuta, la quarta a cosa serve? Per esempio, a conservare il numero di particelle e antiparticelle, come abbiamo appena visto, ma ha anche altre funzioni, e ne parleremo più avanti.

Una di queste funzioni, però, è già importante a questo livello di conoscenza: così come i due quark **fanno coppia** come i Carabinieri delle barzellette, anche elettrone e neutrino fanno coppia tra loro. Come se fossero due facce di una sola moneta, poiché l'interazione debole può trasformare una particella della coppia nell'altra, creando al contempo tutto ciò che è necessario per conservare le cariche e così via. Di solito, scappano fuori **elettrone e antineutrino**, oppure **antielettrone e neutrino**. Non avete capito, vero? Niente paura: il **sapere** del discorso vi rimarrà a ronzare per il cervello, e ne discuteremo un po' meglio quando sarà davvero necessario.

Per questo motivo, e per altri ancora che vedremo più avanti, i fisici hanno ritenuto giusto definire una **prima famiglia di particelle elementari** e cioè quelle con cui abbiamo appena fatto conoscenza, separata in due gruppi: **quark up e down** i quali possono trasformarsi l'uno nell'altro, e **leptoni**, per l'appunto **elettrone e neutrino**, che possono anche loro trasformarsi l'uno nell'altro. Il nome **leptoni** viene da "**leptos**", "leggero" in greco. Sarebbe un po' come distinguere, in una famiglia biologica: **due genitori** (grandi) che possono scambiarsi i turni di chi lava i piatti e rifà i letti, e **due figli** (piccoli) che si scambiano i LEGO™, li lasciano in giro, fanno scappare il gatto e... ci siamo capiti un po' meglio, vero?

Ora, per comprendere meglio i quark e le loro stramberie (quirk), dobbiamo affrontare il problema dell'**interazione nucleare forte**, e poiché le sue caratteristiche non sono per nulla semplici sarà bene dedicarle un intero capitolo. Il resto dei discorsi sulle particelle elementari, e l'approfondimento sull'interazione debole, arriveranno più oltre.

## 15.3) – Una tavolozza a tre (sei) colori

Dei quark abbiamo anticipato già qualcosa: reagiscono a tutte e quattro le interazioni fondamentali oggi conosciute, e quella che li tiene assieme si comporta come una vera e propria *forza*, anche se il suo modo di agire ci sorprenderà.

Perché quest'ultima asserzione? Bene: riflettete con me sulle poche righe seguenti. Non abbiamo grossi problemi a confrontarci con la forza di gravità, sempre attrattiva; probabilmente questo avviene perché siamo abituati a sperimentarla fin dalla nascita. Con un po' di pazienza e ragionamento, neppure ci ribelliamo di fronte alla repulsione cosmica, sempre negativa, forse perché è solo una specie di gravità a rovescio. E tanto basti per le interazioni relativistiche.

Ora veniamo a quelle quantistiche. Grazie a un mondo basato su tecnologie di tipo *elettrico* in senso lato, abbiamo imparato a convivere con l'interazione elettromagnetica laddove due cariche di tipo diverso (positivo e negativo) *si attraggono se sono di segno opposto, si respingono se di segno uguale*.

Purtroppo, quando tentiamo di generalizzare la nostra intuizione al caso delle interazioni nucleari, le cose si fanno più complicate. Lasciamo al capitolo successivo quella *debole* che, malgrado sia ormai compresa relativamente bene sul piano fisico e matematico, è la più ostica quando si cerca di costruirne un modello mentale, e in questo capitolo limitiamoci a concludere la nostra prima carrellata con quella *forte*, in cui *le cariche sono di tre tipi*, si respingono se uguali e si attraggono se diverse.

La situazione non è per nulla banale da manipolare con l'intuizione, e per due motivi importanti. Il primo, è la confusione generata da *tre* cariche al posto delle due del caso elettromagnetico che ci è familiare ma su questo, forse, alla fin fine si riuscirebbe a soprassedere. Il secondo motivo è molto più importante, e ha a che fare con la legge di attrazione o repulsione: la forza non diminuisce all'aumentare della distanza ma, piuttosto, *fa il contrario*, e ciò non può evitare di confonderci. Sì: avete capito bene. Se allontaniamo due quark di colore diverso, *si attireranno con forza sempre maggiore* (da una certa distanza in poi, la forza si mantiene costante). Di conseguenza, se vogliamo districarci in questo ginepraio, dovremo arrivarci per gradi.

In primo luogo, ricordiamo perché i fisici hanno coniato la definizione "*Cromodinamica quantistica*" per la legge che regola l'interazione forte, detta pure *di colore*, e affermano che i quark sono *colorati*. Il motivo deve essere ricercato in alcune somiglianze superficiali tra la teoria dei colori usata dai pittori e dai grafici fin dai tempi di Leon Battista Alberti (1435), e il comportamento delle tre cariche nucleari.

Cominciamo con una definizione di queste benedette cariche, seguendo proprio l'analogia dei colori, nel caso in cui mescoliamo questi ultimi come si fa su ciascun pixel di un monitor. E dunque, non lavoriamo col pennello e gli acquerelli in *assorbimento*, ma in *emissione* di luce. Converremo di chiamare le cariche nucleari "rosse, blu e verdi (**RBV**)".

Qui possiamo giostrare un po' in maniera tradizionale, poiché sappiamo tutti, o dovremmo saperlo, che la neutralità di colore, e cioè il bianco (o grigio), si ottiene proiettando assieme sul monitor **R**, **B** e **V** in ugual misura. In Figura 15.1, il bianco centrale è proprio la somma dei tre colori.

Ebbene: se mettiamo assieme tre quark (qualsiasi), ciascuno dotato di carica nucleare diversa, otteniamo un oggetto *neutro* dal punto di vista dell'interazione forte. Come se dicessimo: «Una configurazione *bianca* o, comunque, *neutra*, si ottiene sommando tre quark colorati, rispettivamente, di **R**, **B** e **V**, e questa configurazione è “stabile”».

Il gioco, però, non finisce qui. Sempre dalla stessa teoria dei colori, è noto che è possibile ottenere il *bianco* in altri modi. Per esempio, si usa definire i cosiddetti “Colori complementari” e, se me lo consentite, per comodità del discorso successivo assegnerò a questi ultimi il nome: “*Anticolori*”. Badate: anche qui possiamo pensare sia alla teoria dei colori, sia ai quark / antiquark.

Per esempio, l'*antirosso* è il ciano (celestino un po' verde) e, mescolando uguali quantità di rosso e ciano, si ottiene il bianco. Attenzione, a questo punto: per raggiungere la neutralità servono tre colori se si lavora con quelli fondamentali, ma solo due colori se questi sono un *colore* e il suo relativo *anticolore*. Tutto ciò che appartiene all'“*antimondo*” satura ciò che appartiene al “*mondo*”.

Proseguendo, l'*antiblù* è il giallo aranciato, e l'*antiverde* è il magenta (una tonalità di viola con un po' di rosso). Pure i tre *anticolori* sono presenti in Figura 15.1.

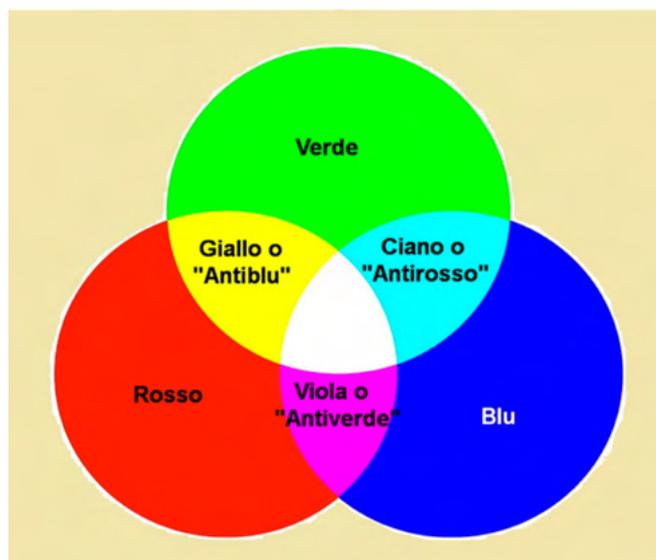


Figura 15.1

Adesso, sempre col vostro permesso (o anche senza) adatterò questo stratagemma tipografico: anziché scrivere per esteso il nome del colore o dell'anticolore, scriverò **R**, **B**, **V** per rosso, blu e verde, e **Ṛ**, **Ḃ**, **Ṽ** per i relativi colori complementari o anticolori. E quindi, avremo che **Ṛ** = ciano, **Ḃ** = giallo aranciato e **Ṽ** = magenta.

Con questa notazione, forse è più facile ricordare come ogni unione colore – anticolore come **ṚṚ**, **ḂḂ** e **ṼṼ**, equivalga al bianco (guardate sempre la figura) o, se preferite, alla neutralità di colore, così come la combinazione **RBV** e l'altra, complementare, **ṚḂṼ**. Fin qui è la normale teoria dei colori, con la sola aggiunta della *neutralità* del *bianco*, tipo pixel di un monitor, e questa ci servirà per il prossimo passaggio.

Il quale passaggio, ci porta subito nel cuore dell'interazione forte. È talmente intensa che, contrariamente a quanto avviene nel caso elettromagnetico, non si riescono a separare tra loro quark da una configurazione neutra o bianca. Se, quindi, ci troviamo di fronte a un gruppo **RBV**, sarà inutile agganciare in qualche modo il quark di colore **V** e tentare di liberarlo.

Seguite il gioco: supponiamo di riuscire in qualche modo a catturare questo benedetto **V** con le stesse pinzette usate per l'elettrone (le più piccole), e cominciare a tirarlo. Via via che lo stiamo allontanando dal gruppo **RBV** contrastando la forza forte, dovremo eseguire una gran quantità di lavoro per cui, ancor prima che la nostra particella si manifesti come

*libera* rispetto alle altre due, l'*energia* accumulata nella tensione della *molla dell'interazione forte* si trasformerà in *massa* (sempre  $E = mc^2$ ).

E non basta: quale tipo di massa verrà fuori di preciso? Semplice: una coppia quark / antiquark  $V\bar{V}$ , poiché si conservano pure colori e anticolori, e per di più il numero di particelle e antiparticelle deve sempre essere rispettato. Di conseguenza ci troveremo nelle pinzette un quark  $V$  e un antiquark  $\bar{V}$ . Più il *vecchio* quark  $V$  che stavamo estraendo dal nucleo. Insomma: un gruppo *scompagnato* di tre quark e antiquark di color *verde* e *antiverde*.

Siccome sul discorso dell'antimateria torneremo più avanti, vi prego di avere pazienza; anticipiamo solo questo: il *nuovo* quark  $V$  (quello venuto fuori dall'energia attrattiva tra quark) se ne tornerà indietro a ricostituire il gruppetto **RGV** iniziale il quale, di conseguenza, alla fine dell'esperimento si presenterà identico a prima.

E cosa avverrà dell'antiquark  $\bar{V}$  appena creato? Bene, l'abbiamo già detto: noi stavamo tirando via un quark  $V$ , non è vero? L'antiquark  $\bar{V}$  non farà altro che agganciarlo, producendo una coppia *bianca* quark / antiquark  $V\bar{V}$ . Una configurazione del genere, però, si rivela *instabile* negli esperimenti, e i due corpuscoli finiranno in breve per annichilarsi l'uno con l'altro, liberando l'energia contenuta nella loro massa sotto forma di onde elettromagnetiche.

Insomma: in questo tira e molla eravamo partiti da una terna **RBV**, abbiamo speso energia, e ci troviamo di nuovo con la stessa terna **RBV**, mentre l'energia spesa se n'è andata in radiazione. Il gioco non valeva la candela.

Conclusione: non esistono quark *liberi* se non, per istanti brevissimi, nei più potenti acceleratori di particelle. L'energia che li lega è così forte che si trovano sempre in gruppi di due o tre, di carica nucleare complessiva neutra (bianca). Ricordate quando, in un capitolo precedente, avevamo affermato che, più forte è l'interazione, più difficile è liberare due particelle? Questo è il caso estremo.

Prima domanda: ma allora, se non abbiamo mai visto un quark isolato, come facciamo a sapere che esistono davvero? Galileo ci condannerebbe al rogo per aver violato il criterio scientifico fondamentale: il *metodo sperimentale*? Il cielo non voglia!

Seconda domanda: come fanno questi benedetti quark a legarsi così strettamente? Lo vedremo nel prossimo capitolo; per ora abbiamo anticipato solo che si tengono assieme grazie a un continuo "*scambio di gettoni colorati*". Siete curiosi, vero? Pazienza.

Per quanto riguarda la non esistenza di quark liberi, non c'è molto da dire. Le cose stanno proprio in questo modo, e nessun esperimento è mai riuscito a evidenziare un quark isolato, anche se, nell'acceleratore **LHC**, qualcosina succede (i quark si possono *allontanare* un po' tra loro e sputare fuori getti di altre particelle e questi getti, stavolta, si *vedono* eccome!). Con ogni probabilità, dovrebbero essere esistiti quark isolati all'epoca del Big Bang; in tempi brevissimi, però, si sono aggregati in protoni, e da allora non se n'è più visto uno vagabondare per conto proprio.

Galileo e il metodo scientifico: no, non corriamo alcun rischio. Pensandoci bene, infatti, nessuno ha mai detto che, per eseguire misurazioni anche molto precise su un quark singolo, sia necessario tirarlo fuori dal gruppetto *bianco* in cui si trova.

Cerco di spiegarmi meglio: cos'è un nucleone, per esempio un protone? Un pallino con una superficie rigida? No, niente affatto. È solo la *regione di spazio* dai confini un po' sfumati, all'interno della quale si svolge perennemente il balletto dei tre quark che si avvicinano e si allontanano, ma non più di tanto, perché l'energia di cui dispongono non consente loro di

spingersi troppo distanti dal baricentro della carica nucleare (con piccole correzioni dovute alla carica elettrica).

Stando così le cose, se immaginiamo di poter gonfiare questo *spazio di manovra* dei tre quark fino alle dimensioni del **GRA** (ricomincia il gioco...), l'acceleratore **LHC** consente di *misurare* particolari che, in scala, non sono più lunghi di cinque – dieci metri. In soldoni: i fisici sono perfettamente in grado di distinguere ogni singolo quark nel nucleone, eseguirvi misure (massa, carica, rotazione, energia di moto, posizione e altro), e via discorrendo. Il solito Ufficio delle imposte potrebbe servirsene per trovare quark non iscritti al Catasto particellare, e tassarli.

Tutta buona fisica galileiana, perciò: i quark non sono ipotesi e modelli matematici convenienti da usare, ma *oggetti* nel senso tradizionale del termine e, ovviamente, entro i limiti nei quali la **MQ** consente loro di *esistere*; questo non dobbiamo scordarlo, ma non vale solo per loro. In una certa misura vale pure per il nostro gatto (o quello di Schrödinger, povera bestia), e per noi stessi!

Ultima annotazione: il nostro Modello d'universo si sta colorando, ma attenzione; non bisogna ragionare in questo modo se non per scherzo. Tenetelo a mente sempre: i quark sono *reali*, i colori sono *modelli matematici* e non hanno niente a che fare con i colori veri. Mi dispiace.

Adesso sdraiatevi comodi, tirate un lungo respiro, magari bevete un gocchetto, e poi partiamo assieme alla scoperta degli *ingranaggi* che fanno funzionare il **MS**. L'interazione debole verrà dopo. Non sarà una passeggiata, purtroppo!

## 16) – Il *macchinario* del MS

### 16.1) – Morte di un fantasma viaggiatore

Torniamo con la mente a quanto appreso nei capitoli sulla MQ. E bada, lettore: qui si parrà la tua nobilitate. Perché non basterà più accettare la *semplice* idea che ogni oggetto materiale, specie quelli più piccoli come le particelle maneggiate finora, possieda un'*esistenza attenuata*, un po' come un *fantasma*.

Magari fosse sufficiente! Per spiegare come agiscono le *forze a distanza* (ricordate sempre il problema di Newton sull'assurdità dell'elastico cosmico e, in generale, delle *forze che si esercitano tra due corpi senza nulla in mezzo*) e trasformarle in *forze a contatto*, i creatori del MS hanno inventato un modello – un modello, attenzione, senza alcuna ambizione di descrivere la sottostante realtà –, tra le cui caratteristiche c'è perfino qualcosa definibile come un *fantasma di fantasma*.

Sto parlando delle cosiddette "*Particelle virtuali*". Cercherò di spiegarle ma, in questa circostanza più che mai, qualcuno potrebbe dire cose molto cattive su di me e, quel che più mi cruccia, sui miei antenati. Pazienza!

Torniamo perciò al **PdI**. Ricordate il suo enunciato? Lo riscrivo, per comodità, con tanto di parentesi e segni di moltiplicazione.

$$(\delta x \times m_e) \times \delta v \geq h/4\pi$$

Ebbene; se lo manipolassimo appena un pochino, così poco che, se alla fine lo facessi in formule davanti ai vostri occhi, sbuffereste: «E c'era bisogno di chiacchierare tanto? Non potevi farci vedere direttamente queste due moltiplicazioni e divisioni?», giungeremmo a scriverlo anche così:

$$\delta E \times \delta t \geq h/4\pi$$

Qualche purista masticherebbe amaro, perché c'è sotto una leggera forzatura. Sia pure, ma ormai questa piccola sporcizia (una più, una meno...) è entrata nel canone della MQ, e la userò anch'io, cominciando con lo spiegarne il significato.

Di solito, in fisica, un'*E* maiuscola rappresenta un'energia, e succede pure qui. Di conseguenza,  $\delta E$  sarà da intendere come un'*incertezza* nell'energia, o se preferite l'*incertezza* nella sua *misurabilità* nel senso quantistico che abbiamo imparato a mandar giù. Invece, *t* è un tempo, e  $\delta t$  dovrà perciò rappresentare l'*incertezza* nella misurabilità di un tempo.

Non finisce qui, però: cosa vuol dire quel prodotto? Possiamo intuirlo come segue: se vogliamo misurare una certa quantità di energia, occorrerà un po' di tempo. Più precisa vogliamo la misura, più tempo è necessario. Se il tempo a nostra disposizione è proprio  $\delta t$ , sarà impossibile misurare l'energia meglio del valore  $\delta E$  ricavato dalla formuletta precedente. Se è minore di  $\delta t$ , non riusciremo a misurare un bel nulla!!!

Del tutto innocuo e abbastanza comprensibile, non vi pare? Purtroppo, la *bestia quantistica* è nascosta in agguato, e qui balza fuori e morde con tutta la sua ferocia. Ed ecco

il *modello a particelle virtuali*. Attenzione, perché è indigesto, ma funziona perfettamente (almeno entro certi limiti).

Il *vuoto* (e se l'ho evidenziato tipograficamente fino a questo limite, avrò avuto un buon motivo: quello di mantenere desta la vostra attenzione) è una riserva inesauribile di *particelle non misurabili neppure in linea di principio*. Perché? Ragionateci: se *saltano fuori* dal vuoto stesso, e  $\delta E$  è la loro energia (chi glie la presta? Il vuoto; è lampante), basta che *vivano* per un tempo inferiore a  $\delta t$ , e poi *spariscano nuovamente* nel vuoto restituendo il prestito energetico. In questo modo, non potremo mai coglierle con le mani nel sacco. Sono per l'appunto le *particelle virtuali*, i *fantasmi di fantasmi* come vi avevo anticipato, e non saranno mai loro a far crollare Wall Street a causa di prestiti di energia non rimborsabili.

Provo anche qui a fare un esempio *concreto* (mi vien da ridere al solo pensiero di qualcosa di *concreto* in questo campo). Supponiamo che il *vuoto* sia la “**Banca di Heisenberg**”; una di quelle inaccessibili ai comuni risparmiatori, super sicure, perché si occupano solo di transazioni illecite e segretissime (non per niente ho usato la maiuscola).

La Banca decide di *prestare* energia a una coppia di particelle elettrone / positrone che *ancora non esistono*. Di conseguenza, queste compaiono dal nulla improvvisamente e, “*non c'è trucco, non c'è inganno, signori*”: tutti i principi di conservazione sono salvi, poiché le cariche e il numero di particelle / antiparticelle totali sono zero, così com'erano prima. «**C'è il trucco! Non è zero l'energia perché ora abbiamo massa**», obiettrate, vero? Ma aspettate un momento.

Quant'è l'energia associata a queste due particelle? Semplice:  $\delta E = 2m_e \times c^2$ ; la sappiamo calcolare facilmente poiché la massa del positrone è identica a quella,  $m_e$ , dell'elettrone. E perciò, non protestate su una violazione del principio di conservazione dell'energia perché, se queste due particelle vivono solo per un tempo:

$$\delta t \leq h / (4\pi \times 2m_e \times c^2)$$

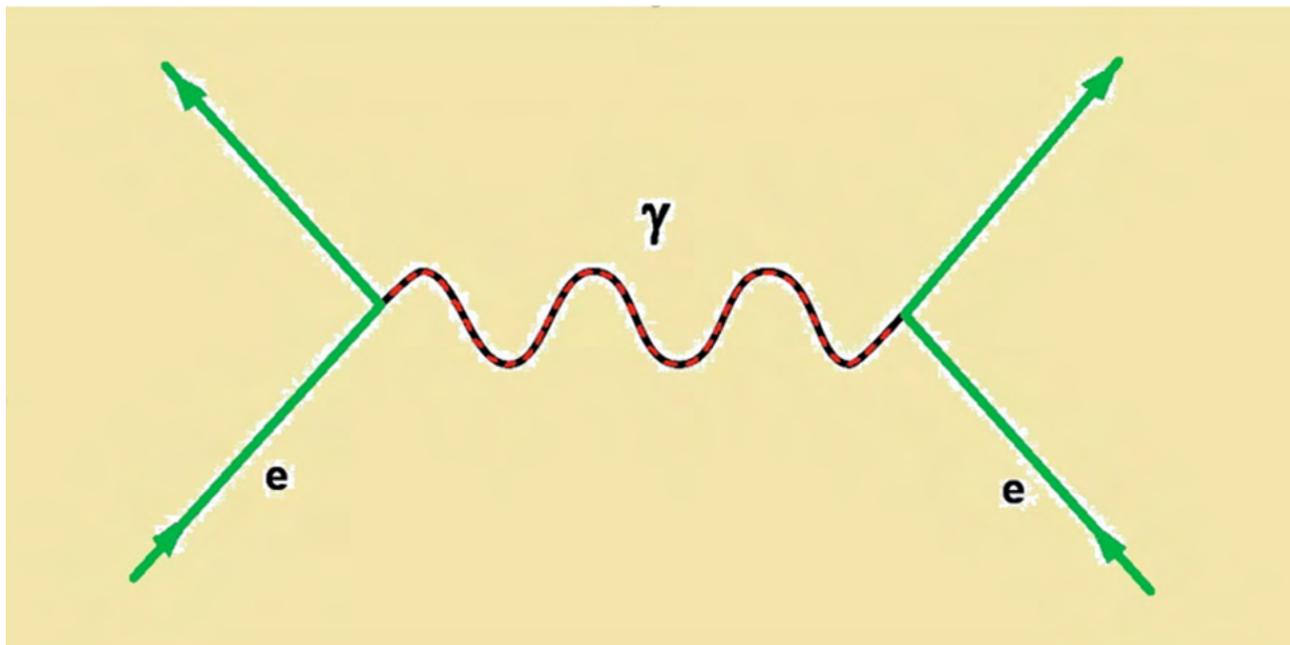
e poi se ne tornano nel nulla (nel *vuoto*, ma ormai abbiamo capito essere il *vuoto* ben altra cosa dal *nulla*; tutt'altro, anzi: a modo suo è un *caveau di energia che a noi sembrerebbe illecita*) restituendo alla Banca il prestito segretissimo, tutto va a posto. Infatti, in base al **PdI**, *nessuno potrà mai sapere che queste due particelle sono esistite*, e perciò anche la conservazione di energia è fatta salva!

Qualcuno commenterebbe a questo punto: «Va bene; io ho tanta pazienza, e sono disposto anche a mandar giù quest'ultima contorsione della **MQ**, nella quale non basta che le particelle *reali* siano già un po' *fantasmi*, ma adesso s'inventano anche particelle il cui comportamento è un po' da *fantasmi di fantasmi*. È un bel giochino culturale, grazie di avermelo propinato, ma non riesco a capire quale sia la sua utilità. Se neanche possiamo sapere che queste particelle esistono, a cosa servono? Vogliamo passare a qualcosa di più concreto, per favore?».

Utilità? A cosa servono? Accidenti se servono! Sta facendo il suo ingresso nientemeno che Sua Maestà, il fondamento della *spiegazione quantistica delle forze a distanza*! E scusate se è poco...

L'esempio più tipico, quello trovato in ogni libro di testo, è l'interazione repulsiva esistente tra due elettroni, perché aiuta l'intuito anche se, a mio modo di vedere, potrebbe generare un equivoco che mi affretterò a spazzar via. E perciò, osserviamo bene la Figura 16.1. Si tratta di un cosiddetto “**Diagramma di Feynman**”, dal nome del fisico che introdusse

per primo questo strumento concettuale. È un diagramma spazio-tempo: sull'asse orizzontale ci sono le distanze e su quello verticale i tempi. Insomma, è rappresentata una sola dimensione spaziale, come sarebbe piaciuto a Unitagora, ma ci basta per capire il gioco.



**Figura 16.1**

Ora, *leggiamo* questo diagramma come segue. Dal basso, a sinistra e a destra, **entrano** due elettroni (di quelli *reali*, s'intende) le cui traiettorie sono disegnate in color verde, diretti l'uno verso l'altro. A un certo punto del percorso, tra i due scatta un **fotone virtuale** indicato con la sinusoide  $\gamma$ , tratteggiata in rosso-nero. In prima battuta (ma ci sarà una *seconda battuta*) pensiamolo come un pallone scambiato con gran furia tra due giocatori. Il primo, venendo da sinistra, calcia con forza il pallone verso destra e rincula verso sinistra. Il secondo, arrivando da destra, si trova un pallone che gli arriva da sinistra, lo stoppa, e pure lui rincula verso destra. Dopo lo scontro, le due traiettorie **divergono** a causa del rinculo dei due elettroni.

Fuori dell'analogia, la forza elettrostatica che respinge i due elettroni si risolve nello scambio di **fotoni virtuali**, ciascuno dei quali trasferisce da un elettrone all'altro un po' di quantità di moto. È semplice, no? Non è vero, non ci siamo, ed è colpa mia. Ho sempre parlato di fotone *virtuale*, ma ho descritto la situazione come se questo fosse *reale*: emesso a un certo punto e in un certo momento da un elettrone, è stato catturato in un altro punto e in un altro momento dall'altro elettrone, e il gioco è fatto. E questo non va bene per niente.

Proviamo a chiarire le cose con un diagramma diverso; quello che mostra come funziona la **forza attrattiva** tra un elettrone e un *positrone*, cioè di carica **positiva**. È in Figura 16.2. In esso, dal basso entrano un elettrone (verde) e un positrone (viola) i quali, avendo carica elettrica opposta, devono attrarsi. Anche qui scatta il fotone, ma ora siamo in grado di capire meglio il motivo per cui il suo comportamento non si può descrivere bene con la metafora del pallone e dei due calciatori.

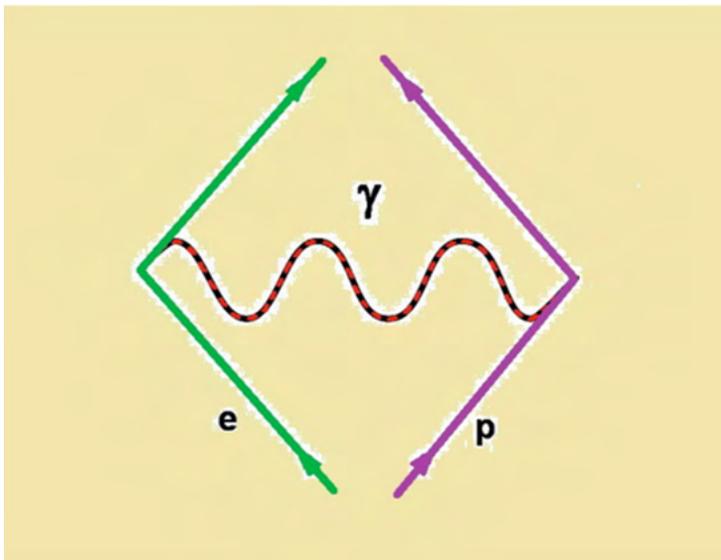


Figura 16.2

State ben attenti. Appena il fotone parte verso destra dall'elettrone, *tira* verso di sé l'elettrone stesso, e gli ruba un po' della sua quantità di moto, facendolo deviare verso destra. Allo stesso tempo, però, lo stesso fotone scatta anche dal positrone verso sinistra, rubando a quest'ultimo un po' della quantità di moto che questi possedeva verso destra, e facendolo deviare.

E qui è il punto: se restiamo nell'analogia del pallone scambiato tra

giocatori, è *come se* non ci fosse *un fotone solo*, ma *due mezzi fotoni* si accollassero l'onere del gioco. Questi *due mezzi fotoni*, alla fine, s'incontrano al centro e, annullate le loro quantità di moto – uguali ma di segno opposto –, spariscono.

Insomma: in questo secondo caso, se il lavoro fosse eseguito da fotoni *reali*, dovremmo invocare una quantità di coincidenze poco credibile. La prima: i due *mezzi fotoni* dovrebbero scattare allo stesso momento. Poi: sarebbero costretti a dirigersi infallibilmente l'uno verso l'altro. Infine, e qui il vincolo è ancora più stringente: le due quantità di moto rubate dovrebbero essere identiche e di segno opposto per evitare che, alla fine del processo, una legge fondamentale di natura sia violata. E comunque: chi ha mai detto che possano esistere *mezzi fotoni, sia pur virtuali*? Irrealizzabile per motivi di principio!

Come funziona, allora? Applichiamo lo stesso tipo di ragionamento a entrambi i casi 16.1 e 16.2. Mentre le due particelle sono in moto, *in tutto lo spazio che li divide scatta un singolo fotone virtuale*. Quest'ultimo, funzionando come una *molla carica*, aggancia le due particelle e *scarica la molla su entrambe*. Se sono dello stesso segno le spinge verso l'esterno, se di segno opposto verso l'interno con due spinte uguali e contrarie, e scompare. Così il gioco va meglio e, come vedremo tra poco, permette di calcolare tutto con precisione.

Bisogna ammettere che un fotone virtuale e, più in generale, ogni *particella virtuale*, sia una bestia davvero strana, pure in base ai canoni della MQ. Non solo sfugge a ogni tentativo di rivelazione diretta, ma *esiste contemporaneamente in tutto lo spazio* ancor peggio dell'elettrone (reale) nell'effetto tunnel. Perciò, onde evitare di spaccare il capello in quattro, è sempre opportuno ricordare il punto fondamentale: le particelle virtuali sono solo un *modello* di come si comporta Madre natura, e non ha senso porsi troppe domande sul loro significato *preciso*, altrimenti si finisce nella nebbia.

Un esempio di come ci si possa perdere se si tira troppo il collo al modello? Poniamoci la seguente domanda: se il fotone virtuale appare in un punto e si annulla in un altro nello stesso istante, ciò vuol dire che la sua velocità è *infinita*?

Bene: un fotone virtuale non è costretto a restarsene entro il limite  $v = c$ . Può sembrare una bestemmia, ma l'importante è solo che la **media** dei fotoni si adatti a sottostare a questo limite. Forse, se io fossi Bohr, imbastirei un discorso oscuro sull'impossibilità che particelle *reali* e *virtuali* siano concettualmente separate all'interno dello stesso esperimento, bla, bla, pur di evitare di affermare esplicitamente quanto mi sono permesso di dire qui sopra. D'altra parte, io non sono Bohr, e non scrivo per un pubblico di fisici professionisti. Di conseguenza posso permettermi di porre le cose in modo molto più semplice, affermando: in un **modello** come quello che vi ho presentato non è possibile che particelle *reali* e *virtuali* siano concettualmente separate all'interno dello stesso esperimento, bla, bla...

Scherzi a parte: concedo senza troppa reticenza che, quando alcuni autori disegnano un diagramma di Minkowski in **MQ**, sostituiscano le **rette – luce** inclinate a  $45^\circ$  con due regioni un po' confuse, sfumate, in cui c'è ampio spazio per propagazioni **superluminali**. Qui, però, non cerco di stupire nessuno con effetti speciali, ma vorrei restare sul concetto di *particelle virtuali* in quanto **mediatori dell'interazione a distanza**.

Quella elettromagnetica, come stiamo cominciando a capire, è mediata proprio dai fotoni virtuali. Ora: quant'è l'energia di un fotone? Lo sappiamo: ce lo ha detto Planck;

$$E = h\nu = h \times c/\lambda$$

Dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda. Vale a dire: maggiore è la lunghezza d'onda  $\lambda$ , minore è l'energia  $E$ .

Ora: siccome il discorso seguente è basato sui fotoni virtuali, invece di  $E$  scriveremo  $\delta E$  perché, per quanto ci riguarda ora, è la stessa cosa, d'accordo? Ebbene: i fotoni virtuali di minore energia *vivranno* più a lungo, e, poiché la loro lunghezza d'onda è maggiore, potranno trasportare il **calcio** elettromagnetico, pur se via via più debole, a distanze sempre crescenti. Nel caso limite in cui l'energia del fotone virtuale tende a zero, esso potrà vivere all'infinito, e quindi riuscirà a farsi sentire a distanza infinita.

E qui vorrei insistere proprio sull'**energia**. Se l'interazione si propagasse per mezzo di fotoni *reali*, ciascuno di essi porterebbe con sé la propria energia, e potrebbe scambiarla con le particelle cariche. Questo, però, non succede, perché all'atto della sua **venuta in essere** ogni particella virtuale sottoscrive, con la Banca di Heisenberg, un contratto–capestro con tanto di clausole in carattere piccolo, dove s'impegna tassativamente a non negoziare con terze parti l'energia ricevuta in prestito, perché la dovrà restituire in breve tempo.

Di conseguenza, niente scambi d'energia, tranne il caso particolare in cui esista una “Banca ausiliaria” che rileva il debito d'energia, trasformando il fotone virtuale in reale, ma non voglio complicare inutilmente le idee proprio a questo punto. Già è un discorso oscuro, vero? Come sempre, un po' di pazienza: nella Sezione IV incontreremo pure la Banca ausiliaria, ancor più vorace e tenebrosa di quella di Heisenberg.

Insomma: abbiamo imparato qualcosa d'interessante sulle particelle virtuali. Anche se non le potremo mai cogliere direttamente con le mani nel sacco, non di meno riusciamo a costatare il loro effetto in quanto **mediatori delle interazioni a distanza**. Vale a dire: **le forze a distanza non esistono** perché ci sono sempre le particelle virtuali a **trasportare a distanza i “calci”**! La qual cosa non è poco, se mi consentite.

Un passetto alla volta – e l'ultimo è stato un passo proprio lungo – ci stiamo avvicinando al cuore della “Teoria quantistica dei campi” grazie alla quale è possibile calcolare un po' tutto quel che serve in **MQ**. Per intenderci: l'insieme di regole e conti

necessari a sostituire definitivamente la meccanica newtoniana, di cui l'equazione di Schrödinger era solo il primo passo, e il **MS** è l'espressione più moderna.

## 16.2) – Infinito meno infinito uguale...

Se non capite questo capitolo e i due successivi vi assolve, ma cercate di fare uno sforzo. Alla fine, potreste rendervi conto di quanto si perderebbe a saltarli e basta.

I diagrammi di Feynman, come ho accennato in 14.4, sono solo uno dei diversi modi trovati dai fisici per descrivere le interazioni quantistiche. A tutt'oggi sono ancora quelli di utilizzo più pratico – con un'importante eccezione trattata più avanti – e per questo motivo sono utilizzati molto spesso nei calcoli. E ora vi racconto come si eseguono proprio questi calcoli. Niente paura: si riesce a capire e non ci sono formule.

Torniamo alla Figura 16.1, dove due elettroni sono deviati da un fotone virtuale, e chiediamoci se è possibile che, oltre a questo processo semplicissimo, se ne possano dare di più complicati, sempre con l'effetto di far respingere i due elettroni.

Probabilmente nessun lettore si sorprenderà se rispondo di sì alla domanda, ma il punto è: quali altri processi? Pazienza un attimo: per ora lasciatemi assegnare la qualifica “*di ordine zero*” al diagramma di Feynman in cui è scambiato un solo fotone virtuale.

Quale potrebbe essere un diagramma “di ordine uno” che, per come sto mettendo le cose, già s'intuisce dover essere più complicato di quello appena visto? Ne abbiamo un esempio in Figura 16.3.

Cerchiamo di *leggere* anche questo nuovo diagramma. Come nel caso precedente, dal basso entrano due elettroni diretti l'uno verso l'altro. A un certo punto interviene il solito fotone virtuale  $\gamma$ , ma stavolta il suo percorso è spezzato da un cerchio, evidenziato in rosso e tratteggiato. Di cosa si tratta?

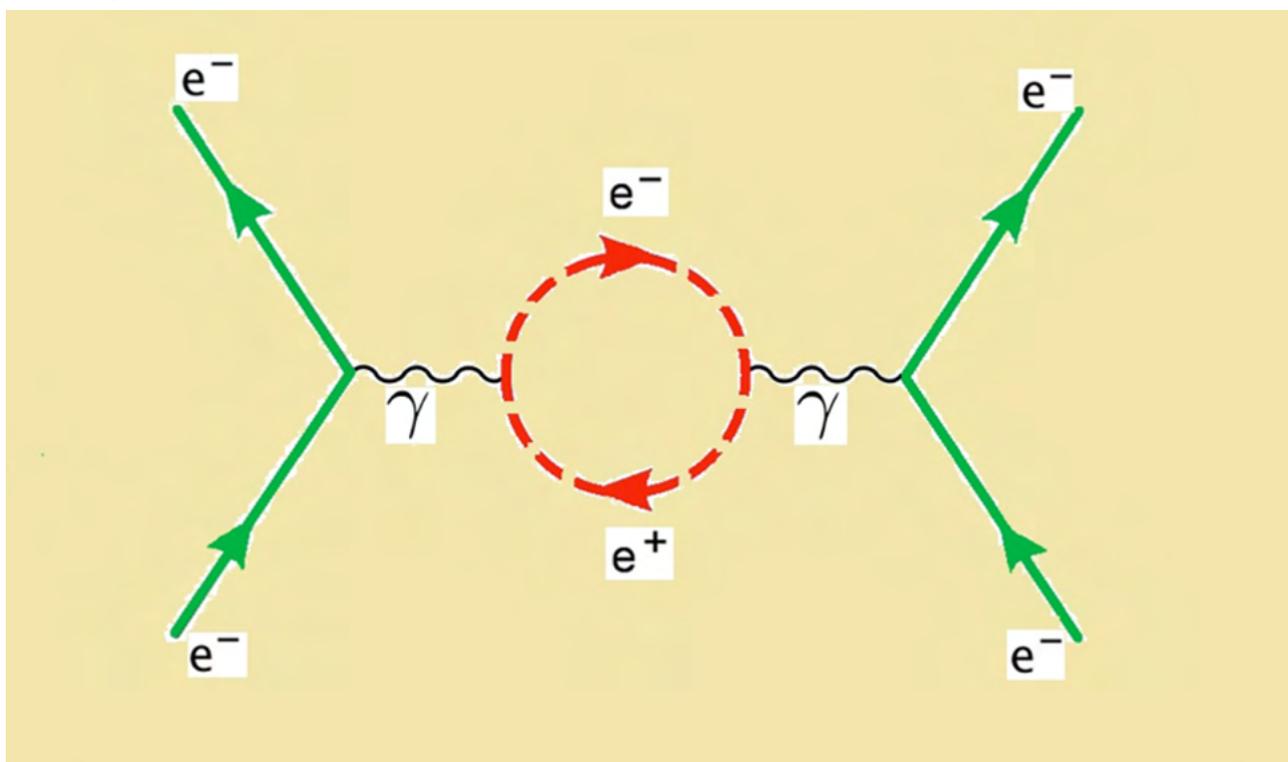


Figura 16.3

Non fatevi una cattiva idea dei fisici; non sono peggiori né migliori di chiunque altro. Se vi pare che insistano troppo su faccende che a una mente sana potrebbero sembrare sconcezze intellettuali, è solo perché Madre natura è lei stessa un po' sconcia. E ne combina di cotte e di crude, come abbiamo imparato già da un pezzo.

Parliamo del cerchio rosso tratteggiato, dunque. Il fotone virtuale, non pago dell'obbligo energetico già contratto col vuoto, decide di rendere ancor più grave la propria posizione debitoria, e mutua l'energia sufficiente a generare una coppia – sempre *virtuale*, s'intende – *elettrone / positrone*. Sono le due metà, rispettivamente superiore e inferiore, del cerchio rosso. La Banca di Heisenberg non fa una grinza, tanto è in una botte di ferro. Scaduti i termini contrattuali, i suoi addetti al recupero crediti saranno ben più efficaci di quelli di Al Capone o, peggio ancora, dell'Ufficio delle Imposte.

Di conseguenza, dopo aver *vissuto* un'esistenza effimera, elettrone e positrone si annulleranno a vicenda restituendo il mal tolto, e ritroveremo lo stesso fotone virtuale che avevamo all'inizio. Come se, nel corso della sua breve esistenza, nulla fosse avvenuto.

Proprio nulla? No, non è vero. Infatti, elettrone e positrone sono due particelle dotate di carica elettrica e quindi, nel corso della loro pur breve esistenza, avranno influenzato i due elettroni *reali* il cui moto stiamo cercando di calcolare. Si tratta di una perturbazione minuscola, perché di durata evanescente, ma pur sempre una perturbazione da dover tenere in conto nei risultati finali.

Come tenerla in conto? Qui parliamo finalmente della regoletta da usare, ma solo dopo aver introdotto il concetto di *vertice*. Si definisce *vertice* un qualsiasi *punto di biforcazione* in un diagramma di Feynman. E, per chiarirci le idee, cominciamo a contare i vertici in Figura 16.1, il *diagramma di ordine zero*, partendo da sinistra e verso destra.

Un primo vertice s'incontra dove l'elettrone di sinistra e il fotone virtuale interagiscono. È una *biforcazione*: da una linea sola (elettrone incidente) ne escono due (elettrone che rimbalza verso sinistra e fotone virtuale).

Un secondo vertice s'incontra, dove il fotone virtuale interagisce con l'elettrone che viene da destra: siamo a due vertici. E poi? E poi basta: un *diagramma di ordine zero* ha sempre e solo *due vertici*.

Ora, contiamo i vertici in Figura 16.3, sempre da sinistra verso destra. Uno (elettrone – fotone), due (fotone – coppia  $e^- - e^+$ ), tre (coppia  $e^- - e^+$  – fotone) e quattro (fotone – elettrone). Avete capito il gioco? I diagrammi di Feynman di prim'ordine hanno quattro vertici.

Un momento: perché sto parlando al plurale dei diagrammi di prim'ordine? Ne abbiamo visto uno solo, no? Certo, ma pensateci anche voi: il fotone virtuale ha la faccia di bronzo e può chiedere in prestito alla Banca di Heisenberg tutta l'energia che vuole; ad esempio, per creare una coppia di particelle diversa, magari protone / antiprotone. E la Banca ha il muso di granito. Non batte ciglio ed eroga. Ecco che abbiamo un nuovo diagramma di prim'ordine.

Poi, tanto per continuare con gli esempi, il singolo fotone virtuale si può dividere in due, e ricomporre; al posto delle due metà, superiore e inferiore, del cerchio rosso di Figura 16.3, avremo due sinusoidi che divergono e poi convergono di nuovo. Altro diagramma di prim'ordine, con quattro vertici.

Insomma: mentre esiste un solo diagramma di ordine zero, perché a volerne disegnare uno con due soli vertici non ce ne vengono in mente altri che quello in Figura 16.1, diagrammi di prim'ordine ce ne sono un bel po', ed esistono regole precise per calcolare quanti.

Senza bisogno di disegnare altri diagrammi più complicati, il lettore avrà, però, ben compreso che possono esistere, in numero sempre crescente, diagrammi di *secondo ordine* nei quali compaiono ancor più particelle virtuali, e *sei* vertici. Mentre i diagrammi di *terz'ordine* saranno una quantità sterminata, e ciascuno di essi avrà *otto* vertici. Stiamo riuscendo a generalizzare quanto necessario? Perché è il fondamento per il passo successivo.

Ci siamo: per calcolare la *forza* con cui interagiscono tra loro i due elettroni reali sui quali stiamo facendo i conti, si lavora come segue.

All'unico diagramma di ordine zero, si associa il valore arbitrario *1,000*..., vale a dire: *1* e basta, seguito da infiniti zeri. Perché questa cifra è arbitraria? Perché poi bisognerà sommarla a tutta una serie di fattori che dipendono da come si esegue l'esperimento; l'importante dal punto di vista della *MQ*, però, è come si andrà a modificare questo valore unitario, e ora lo vedremo.

Quanti diagrammi di prim'ordine ci sono? Abbiamo visto che sono  $N_1 = 2$ . Si prende il numero  $N_1$  e si moltiplica per *l'intensità intrinseca dell'interazione elettromagnetica elevata al quadrato*. E ora, calma e sangue freddo, perché questa frase sibillina troverà spiegazione semplice.

Nel capitolo 15.1 avevamo detto quanto ciascun'interazione è *più forte relativamente a quella gravitazionale*, ma non avevamo fornito le cifre *assolute*. Per l'interazione elettromagnetica, indichiamo col simbolo  $\alpha_{EM}$  l'intensità scelta da Madre natura, e risulta:  $\alpha_{EM} \sim 0,007297$  o, più spesso, si trova scritto  $\alpha_{EM} \sim 1/137$ , ovviamente la stessa cosa. Questo è un altro dei valori numerici che anche i Vulcaniani condividerebbero con noi, pur se userebbero un simbolo differente.

Adesso ragioniamo così:  $\alpha_{EM}$  è piuttosto piccolino, meno di un centesimo. Se lo moltiplichiamo al quadrato, verrà fuori un numero ancora più piccolo, con quattro zeri dopo la virgola. Se moltiplichiamo  $N_1$  per  $\alpha_{EM}^2$  il risultato sarà una schifezzuola. A conti fatti, il numero trovato si discosta da zero solo nella terza cifra decimale.

Teniamo da parte questo numeretto, e passiamo a contare quanti diagrammi di *secondo ordine* ci sono. Una gran quantità: diciamo  $N_2 \gg N_1$ . Stavolta eleveremo  $\alpha_{EM}$  alla *quarta* potenza prima di moltiplicarlo per  $N_2$ . Il risultato sarà un numero minuscolo, che differisce da zero solo nella quinta cifra decimale. Mettiamo da parte anche questo.

Il gioco si ripete un gran numero di volte: si contano tutti i diagrammi del terzo, quarto, quinto ordine e così via, e si moltiplica il loro numero per  $\alpha_{EM}$  elevato, rispettivamente, alla *sesta*, alla *ottava*, alla *decima* potenza eccetera, sempre aumentando di due la potenza per ogni successivo ordine, e ottenendo cifre che differiscono da zero nella sesta, ottava, decima cifra decimale. Dopo un po' non vale più la pena di continuare, perché i numeretti che vengono fuori sono troppo piccoli.

Insomma, più cresce il numero dei vertici in un ordine di diagrammi, meno conta quell'ordine, perché la potenza di  $\alpha_{EM}$  per cui si moltiplica diventa sempre maggiore, e  $\alpha_{EM} \ll 1$ .

Adesso, si prende *1*, e gli si sommano tutti i contributi provenienti dai diagrammi di ordine superiore, dal primo in su. Il risultato finale sarà comunque poco superiore a *1*, e

quando lo moltiplicheremo per i fattori di ragguaglio opportuni avremo la previsione dell'esito dell'esperimento sotto osservazione, con una precisione tanto maggiore, quanto maggiore è l'ordine dei diagrammi di Feynman inclusi nel calcolo. In particolare, avremo individuato il valore esatto della **forza** con cui si respingono due elettroni.

E se avessimo considerato il puro e semplice scambio di un fotone virtuale, ignorando tutte le altre possibilità? Avremmo sbagliato dalla terza cifra decimale in poi. In alcuni casi sarebbe stato poco, in altri moltissimo, specie se l'esperimento fosse eseguito in modo tale (non vi spiego come) da poter ignorare il contributo del diagramma di ordine zero, ed evidenziare solo quelli superiori.

Quando Feynman completò la messa a punto di questo schema, relativamente intuitivo perché, se proprio si vuole, si possono disegnare **tutti** i diagrammi di ordine superiore (già fino al quint'ordine servirebbe una lavagna gigantesca), fu felice, almeno finché non provò ad applicarlo al **singolo elettrone**.

Avete capito bene: così com'è possibile calcolare con quanta energia due elettroni interagiscono l'uno con l'altro, è anche possibile calcolare con quanta energia **un elettrone interagisce con se stesso**. E così, l'amico Richard si mise a disegnare i diagrammi in cui un fotone virtuale era emesso e assorbito dallo stesso elettrone, e via di questo passo, solo che... misericordia!

Il tutto gli esplose nelle mani. Vale a dire: il numero di diagrammi di ordine superiore **creceva più rapidamente di quanto crollasse il coefficiente moltiplicativo**. E, di conseguenza, anziché sommare a **1** numeri sempre più piccoli, stavolta si andavano a sommare numeri sempre più grandi e, per forza di cose, i risultati fornivano un valore infinito per la carica elettrica (e la massa) del singolo elettrone. Come fare, giacché la particella ha massa ben precisa, e piuttosto piccolina, e carica elettrica **-1**?

Probabilmente, Feynman avrà sbattuto a lungo la testa contro la lavagna e contro il muro. Cominciò a frugare qua e là tra i risultati di alcuni fisici-matematici che si erano occupati di serie numeriche come quelle che esplodono nelle sue mani, e alla fine trovò un salvagente per mezzo del quale riuscì a rimanere a galla, ma non a toccare terra, come vedremo più avanti da quanto lui stesso scrisse una ventina d'anni dopo.

Il trucco, orribile solo a descriversi, funzionava così: i termini della serie che portava all'infinito, potevano essere separati in due pile diverse, una delle quali di segno positivo, l'altra di segno negativo. Molto semplicemente, Feynman affermò: «Non potendo venire a capo del problema con metodi ortodossi, assumo che **la differenza dei due infiniti** per mezzo dei quali si calcola la carica dell'elettrone fornisca un valore finito, e cioè proprio la carica elettrica misurata in laboratorio».

Insomma: infinito meno infinito uguale un numero ben preciso. Nessun matematico potrebbe tollerare una sporcizia del genere, e neanche un fisico, intendiamoci! Però... però, i fisici adottano un punto di vista diverso: se la cosa funziona in termini sperimentali, allora ci si deve almeno ragionare. E così fu coniato il termine edulcorato: "**Rinormalizzazione**" per descrivere una procedura che ciascuno si sarebbe vergognato di spiegare.

E già, perché il trucco funziona a meraviglia. Se usiamo nei calcoli la carica elettrica sperimentale per l'elettrone (ma lo stesso vale per ogni massa, e per ogni altra particella carica), il **macchinario** del **MS** – vale a dire la somma sui diagrammi di Feynman – fornisce risultati precisissimi, vuoi se lo applichiamo all'interazione elettromagnetica, vuoi a quella

nucleare *debole* alla quale sarà dedicato ampio spazio più avanti, vuoi a quella nucleare *forte* (ma qui, come vedremo, sorge un altro problema).

Nei libri di **MQ**, per esempio, si riporta il vero e proprio trionfo del **MS** con *tutte* le particelle virtuali, non solo i fotoni, ma pure quelle cariche. Si tratta del calcolo *esatto* del campo magnetico generato da un elettrone, con le correzioni dovute all'oceano di elettroni, positroni e quark virtuali in cui esso si trova a *galleggiare*. Attenzione alle cifre che seguono, perché sono importanti.

Normalizzando a **1** il valore ipotetico di questa caratteristica in assenza di interferenze di ogni tipo, il suo valore *misurato* è pari a **1,00115965218**. Orbene: se le undici cifre dopo la virgola non sono tutte uguali a **0**, ciò è dovuto proprio alle perturbazioni dovute alle particelle virtuali, e la correzione *teorica*, quella *calcolata* in base al modello, *coincide con la perturbazione osservata*.

Le undici cifre *teoriche* sono tutte lì, e *coincidono con quelle sperimentali*. Il modello delle particelle virtuali, dunque, va considerato qualcosa in più di un giochino, pur con tutte le *incrostazioni* che si porta appresso, ma è piuttosto una *buona* rappresentazione intuitiva, senza apparenti alternative, e *descrive davvero* ciò che avviene in natura, *almeno entro certi limiti*.

C'è di più. Sempre secondo questo modello, ogni minimo volumetto di vuoto dovrebbe essere *gremito* di particelle virtuali (fotoni e quark inclusi) che *entrano ed escono dall'esistenza* per tempi effimeri. A parte le interazioni a distanza appena viste, e le perturbazioni sui momenti magnetici, queste particelle non potrebbero avere altre conseguenze misurabili? Possibile che non si facciano sentire in altro modo?

Lo fanno, e vi accenno solo un "effetto a conferma". L'ormai notissimo *effetto Casimir*, a causa del quale due lamine metalliche nel vuoto, avvicinate molto tra loro, si attraggono pur se prive di carica elettrica. Perché succede una cosa così strana?

Il motivo va ricercato in una pieghina delle equazioni di Maxwell: in un *conduttore* (la lamina metallica) non è possibile che esistano *campi elettrici*. Allora, però, nello spazio tra le due lamine possono esistere solo fotoni virtuali di lunghezza d'onda pari alla *distanza tra le lamine*, e *sottomultipli interi*, perché così il campo elettrico dei fotoni virtuali può essere nullo quando tocca una lamina. All'esterno delle lamine, invece, c'è posto per fotoni virtuali di *ogni lunghezza d'onda*, e questo sbilanciamento fa sì che i fotoni virtuali esterni *spingano* più di quelli interni. Le misure sono precisissime, e confermano la presenza di tutti i fotoni virtuali attesi secondo il modello.

Ovviamente, ci sono un sacco di altri riscontri, e tutto ciò potrebbe condurci a pensare che, in fin dei conti, il *modello a particelle virtuali* potrebbe veramente essere una buona descrizione intuitiva della sottostante *realtà*. Forse lo è, ma solo entro certi limiti.

Quali sono questi limiti? Ve li dico subito. Siccome Relatività e **MQ** fanno a pugni, la seconda deve cedere quando entra in ballo la prima. E difatti succede proprio così: la presenza di particelle virtuali nel vuoto dovrebbe avere un effetto che va *un po' contro* alcune osservazioni. Quanto vale questo "*un po'*"? Giudicate voi, da quel che segue.

Ragioniamo: secondo il modello in esame, in ogni volumetto di spazio, deve esistere una certa quantità di energia *presa in prestito dal vuoto*, anche se non la possiamo misurare direttamente. Siamo, però, in grado di misurare i suoi effetti in modo indiretto. Ebbene: questa energia dovrà per forza di cose *sommarsi* al *campo di energia cosmico* che, in Relatività

generale, descriviamo per mezzo della *costante cosmologica  $\Lambda$* ; anzi, potrebbe essere proprio lue la causa dell'esistenza di una  $\Lambda \neq 0$ . Forse abbiamo trovato l'*anello mancante* tra i due mondi?

Idea fantastica! I conti li sappiamo fare e... ci deve essere qualcosa che non quadra, perché il calcolo quantistico con le particelle virtuali fornisce un risultato *appena  $10^{120}$*  volte superiore a quello osservato... sì, avete capito bene: centoventi ordini di grandezza, e cioè: uno, seguito da centoventi zeri. Anche volendo essere di manica larga, capite bene come, in questo caso, le particelle virtuali ce le dobbiamo lasciare dietro. Non c'è verso: Einstein e Bohr hanno sempre dibattuto fra loro, in vita, e continuano pure adesso da morti... forse è un *dibattito virtuale* tra i loro *fantasmi*!

Insomma: il *macchinario* del **MS** è un'oscenità da non raccontare ai minorenni, già a cominciare dalle *particelle virtuali*, ma riesce a trattare tutte e tre le interazioni descritte dalla **MQ**, e *solo quelle*. La Teoria Quantistica dei Campi (stavolta metto tutte le maiuscole) si fonda sull'esistenza di particelle non rivelabili neanche in linea di principio, e sulla differenza aritmetica

$$\infty - \infty = \text{valore finito}$$

ma, a parte queste *minuzie per eruditi*, va benissimo così. Vi piace? A me no, ma per ora non abbiamo di meglio!

Le descrizioni alternative a quella di Feynman, trovate da Schwinger e Tomonaga? Sono solo più complicate, ma incontrano gli stessi problemi concettuali, e perciò mettetevi l'animo in pace.

## 16.3) – Dove si lavora con la colla

L'interazione elettromagnetica fu la prima a consentire a Feynman, Schwinger, Tomonaga (e Dyson) di mettere a punto il vero e proprio *macchinario* del MS. Prima di passare alle altre due interazioni, quelle nucleari e cioè *debole* e *forte*, mi sembra necessario richiamare l'attenzione su un aspetto importante dell'elettromagnetismo: il suo *mediatore*, vale a dire il fotone (virtuale o no, per quanto sto per dire, importa poco), di per sé *non è elettricamente carico*, pur interagendo con le particelle cariche. Ricordiamocelo.

Siccome ogni interazione ha peculiarità tutte sue e la *debole*, in particolare, ne ha di strane e inattese, concentriamoci prima sull'interazione forte, quella *di colore*. Cosa si scambieranno i quark, per mantenersi legati tra loro? È chiaro: anch'essi subiranno l'azione di qualche *mediatore* e, poiché quest'ultimo agisce come un fortissimo collante, gli è stato riservato il nome di *gluone*, dall'Inglese “*glue*” e cioè, per l'appunto, *colla*.

Questo gluone, a parte l'esser privo di massa, non ha altro in comune col fotone. Infatti, è una sorta di *Michelangelo* in miniatura. Trasporta *colori e anticolori* da una parte all'altra, e se ne serve per far cambiare colore ai quark. Come fa? Per mezzo di un balletto frenetico basato su una delle otto combinazioni possibili delle quali vi fornirò adesso un solo esempio.

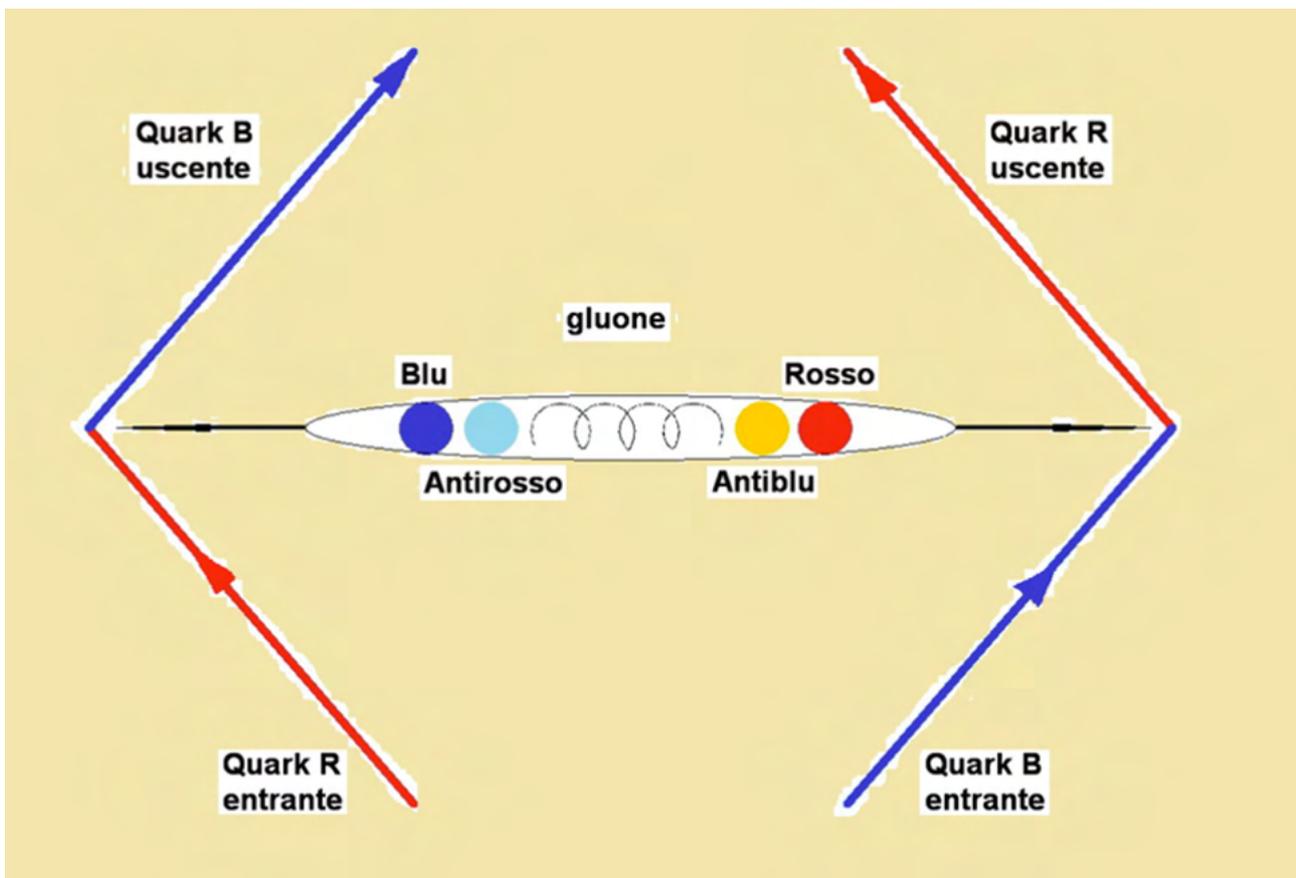


Figura 16.4

In Figura 16.4, c'è un quark di colore rosso (**R**), e accanto a lui un altro di colore blu (**B**), che entrano dal basso. Si trovano, per esempio, in un protone e non importa di *quali* quark si stia parlando, perché il gioco funziona con tutti allo stesso modo, intesi?

Dal vuoto sorge un *gluone* (sempre *virtuale*, ovviamente), e questo è un oggetto complicato, giacché trasporta *due colori e due anticolori*. Nel nostro caso, ci interessa il gluone virtuale: (~~**B**~~ + ~~**R**~~**B**)

il quale, tra l'altro, pur avendo elementi *colorati*, in sé è *neutro* perché porta colori e anticolori in ugual misura, come è facile controllare nella figura. Quasi dimenticavo: nei diagrammi di Feynman il gluone è rappresentato, di solito, come una spirale, perché la sinusoide è già occupata dal fotone. Una *molla*, per intenderci, a sigillare la sua intensità.

Ecco come vanno le cose. Il gluone virtuale scarica la coppia ~~**B**~~**R** sul quark **R**, trasformandolo in un quark **B** poiché la coppia di colori **R** (*del quark*) + ~~**R**~~ (*del gluone*) si annulla e resta solo **B**. Contestualmente, l'altra metà del gluone virtuale completerà lo schema trasformando il quark **B** in un quark **R** secondo modalità analoghe. Fine della partita; il gluone è sparito nel nulla, e i due quark hanno mutato colore, scambiandosi al contempo un calcio *verso l'interno* avendo subito l'effetto di una *forza attrattiva*.

Come per il caso elettromagnetico, nella figura ho riportato solo uno degli otto diagrammi di ordine zero – ricordate: ci sono otto combinazioni colore / anticolori per i gluoni – ma la metodologia serve, in pratica, solo a dimostrare che il concetto di *rinormalizzazione* si applicherebbe pure in questo caso, mentre il calcolo vero e proprio degli effetti dovuti all'interazione di colore ha dovuto aspettare tempi più recenti.

In effetti, due difficoltà di principio rendono pressoché inutilizzabili gli schemi di lavoro impostati da Feynman stesso quando si cerca di applicarli all'interazione forte. Al punto che è stato indispensabile trovare soluzioni alternative, e solo al volgere del millennio si è finalmente riusciti a ottenere i primi risultati teorici ragionevolmente confrontabili con quelli sperimentali.

La prima delle due difficoltà è correlata alla *forza intrinseca* dell'interazione di colore che, in 15.1, abbiamo visto essere circa cento volte superiore a quella elettromagnetica. In analogia a  $\alpha_{EM}$ , definiamo anche una  $\alpha_S$ , dove il pedice *S* sta per “*strong*”. A conti fatti, vien fuori:  $\alpha_S \sim 0,7 \div 0,9$  (varia un po' secondo le circostanze, ma non ve ne spiegherò il perché).

Ora, torniamo con la mente a come si esegue calcolo della forza effettiva scambiata tra due particelle: esso prevede *la somma di una serie infinita di termini*, essendo ciascuno di essi moltiplicato per la *forza intrinseca* elevata al quadrato, poi alla quarta, alla sesta potenza, e così via.

Se ricordate, nel caso elettromagnetico questa forza intrinseca  $\alpha_{EM}$  è all'incirca  $1/137$  e, di conseguenza, i termini successivi della serie diminuiscono rapidamente di valore per cui, nei calcoli, ci si può fermare al quarto o al quinto termine, ottenendo un risultato numerico che, confrontato con le osservazioni, sarà precisissimo.

Nell'interazione forte, invece, con  $\alpha_S \sim 1$ , anche elevando al quadrato, alla quarta e così via questo numero, il fattore moltiplicativo di fronte a ciascun termine della serie rimarrà comunque piuttosto grande.

Ciò conduce alla pratica impossibilità di sommare gli infiniti termini della serie che dovrebbero condurre al calcolo effettivo della *forza* scambiata tra quark. I fisici, perciò, hanno dovuto inventare metodi alternativi nei quali gioca un ruolo molto importante la *forza bruta*

dei computer, i quali si accollano l'onere di considerare tutte le configurazioni possibili, in strani spazi fatti a cellette minuscole lungo le quali si propagano **lacci** di forza che ricordano alla lontana le **linee del campo** sulle quali ragionava il vecchio Faraday.

La seconda complicazione si capisce meglio se, in primo luogo, si ripensa al fotone che trasmette la forza elettrica tra due particelle cariche. All'inizio di questa sezione abbiamo ricordato come il fotone in sé non porti carica elettrica e dunque, nel suo tragitto (virtuale), non interagisca direttamente con altri fotoni. C'era un buon motivo, per questo richiamo. **Il gluone, infatti, trasporta cariche di colore, eccome!**

Qual è la conseguenza? Anche il più semplice dei diagrammi di Feynman per lo scambio di un gluone virtuale, si complica immediatamente con l'aggiunta di una miriade di altri gluoni virtuali che il primo, **contenendo colori** pur essendo globalmente neutro, tira fuori dalla Banca di Heisenberg, e che si scambiano tra loro cariche di colore. Tutto ciò conduce a un bailamme in cui gli stessi fisici, in breve, non si raccapezzano più o quasi, e hanno bisogno di inventarsi regole complicate per determinare quanta roba c'è di questo tipo, quanta di quest'altro, e così via.

Insomma: sebbene i fondamenti della **Cromodinamica quantistica** seguano gli stessi dettami impostati a suo tempo da Feynman e altri per l'**Elettrodinamica quantistica**, il primo caso si presenta molto, molto più complicato del secondo, quando lo si voglia tradurre in numeri da confrontare con le osservazioni.

In particolare, proprio questa enorme **forza intrinseca** dell'interazione di colore fa sì che un quark, allontanandosi dagli altri due quark con i quali componeva un trio **bianco**, sia soggetto a un'attrazione che, al crescere della distanza, aumenta fino a... all'infinito, perché non serve fare conti fantascientifici: interviene prima la creazione di una coppia quark / antiquark, e il gioco finisce lì.

Sull'interazione forte mi sembra di aver detto abbastanza. Anche se in pratica è difficile da trattare, i suoi principi di funzionamento somigliano abbastanza a quelli dell'interazione elettromagnetica, e come tali ci conviene accettarli. Ora passiamo alla meno intuitiva delle tre interazioni del **MS**. Si tratta di quella debole, ovviamente, o meglio: di quella **elettrodebole**, come vedremo in breve.

## 16.4) – Nell’antro dell’alchimista

Nel tentativo di comprendere come il modello delle particelle virtuali riesca a interpretare *tutte* le interazioni che obbediscono alla MQ, facciamo un nuovo passo in avanti: chiediamoci cosa avverrebbe se il mediatore dell’interazione non fosse privo di massa (come il fotone o il gluone), ma ne fosse dotato? Definiamola semplicemente  $M_m$ , dove il pedice “ $m$ ” significa “*del mediatore*”.

In tal caso, la sua nascita (virtuale) dal vuoto non potrebbe avvenire con energia piccola a piacere, ma ci sarebbe un’**energia minima** sotto la quale non può scendere:  $\delta E = M_m c^2$ , e cioè la sua **energia di massa**. Di conseguenza, questo mediatore virtuale non potrebbe campare più di un tempo prefissato, che ormai sappiamo bene come calcolare grazie al PdI:

$$\delta t_i = h/(4\pi \times M_m c^2)$$

In base al modello finora sviluppato, dunque, anche se si muovesse a velocità prossima a quella della luce, il mediatore non potrebbe percorrere una distanza superiore a  $\delta x \sim \delta t_i \times c$ . Per un’interazione del genere, il **raggio d’azione** non potrebbe in alcun modo giungere all’infinito, ma sarebbe limitato a una distanza  $\delta x$ ; sarebbe cioè tanto più corto quanto maggiore è la massa  $M_m$  del mediatore virtuale.

Ripeto per chiarezza e per prolissità: questa ipotetica interazione non si estenderebbe a distanza qualsivoglia, ma avrebbe un raggio d’azione massimo piuttosto ristretto, scattando solo se le due particelle interagenti si trovano a distanza inferiore a  $\delta x$ .

Ci fa pensare a qualcosa? Sì: all’**interazione nucleare debole**; può sfasciare tutto, ma solo tra particelle vicinissime. Già ho anticipato che dovremo dedicarle un capitolo intero e, purtroppo, non potrà essere breve. Anzi: saranno due capitoli...

Volete trasformare il piombo in oro? Non c’è nulla di più facile, se acconsentite a farvi condurre per mano dall’interazione debole, l’alchimista di natura. E già dovrete averlo sospettato quando, nel capitolo 15.2, abbiamo parlato di un quark **down** che diventa **up**, con la conseguente comparsa di un protone (più elettrone e antineutrino) laddove c’era prima un neutrone. Vero: in quel luogo abbiamo considerato particelle isolate, ma cose del genere possono avvenire anche all’interno dei nuclei atomici. Quali, in particolare?

Ricordi di scuola: tutti sappiamo come, nei nuclei **normali**, si trovino all’incirca tanti protoni quanti neutroni. Nei nuclei più pesanti i neutroni sono un po’ più abbondanti, ma non di troppo. Considerando una situazione del genere dal punto di vista dei quark, si vede che, nei nuclei degli atomi **stabili** ci sono all’incirca tanti **up** quanti **down**.

Siccome una ben precisa legge di natura, una variazione sul tema “Principio di esclusione di Pauli” sfiorato con una piuma nel capitolo 15.1 (non pretenderete certo che vi spieghi tutte le leggi di natura! Io stesso ne conosco solo una frazione minuscola), rende impossibile l’esistenza di troppi **up** o troppi **down** nello stesso posto, perfino i neutroni che, se fossero isolati, si disintegrerebbero, quando stazionano nei nuclei atomici diventano stabili, sennò la loro trasformazione creerebbe degli **up** di troppo. L’ho detto in modo molto rozzo, ma contentatevi.

Avete mai sentito parlare d’**isotopi**? Certamente sì! Sono i nuclei nei quali c’è qualche neutrone in meno o in più rispetto al nucleo atomico di riferimento, e mi spiego con l’esempio del **carbonio 14**, quello usato in archeologia per datare oggetti di origine organica. Sappiate,

perciò, che in natura si trovano ben tre diversi tipi di nuclei di carbonio, aventi le stesse proprietà chimiche ma caratteristiche **nucleari** diverse.

Il più comune è il  $^{12}\text{C}$ , che rappresenta circa il **99%** del totale. Segue il  $^{13}\text{C}$  con un modestissimo **1%**, e si differenzia dal precedente per avere un neutrone in più. È perciò un **isotopo più pesante** del normale carbonio. Poi, con percentuali davvero microscopiche, c'è pure il  $^{14}\text{C}$ , creato da collisioni con i raggi cosmici, con la bellezza di due neutroni di troppo; questo è radioattivo, con un tempo di dimezzamento di circa **5000** anni. La trasformazione del neutrone in eccesso in un protone trasforma il nucleo restante, al termine della propria esistenza come carbonio, in azoto: lo stabilissimo  $^{14}\text{N}$ .

E se in un isotopo, anziché esserci troppi neutroni, ci fossero troppi protoni? In questo caso, l'interazione debole agirebbe in modo opposto: per mezzo della **cattura di un elettrone orbitale** trasformerebbe un quark *up* in un *down*, vale a dire un protone in un neutrone, facendo cambiare la specie chimica dell'elemento anche in questo caso.

Ecco: avete visto come si lavora nel vero antro dell'alchimista? Non per mezzo di reazioni chimiche (e cioè **interazione elettromagnetica**) come tentavano gli scienziati in erba del Medioevo, ma usando l'interazione debole, e per ottenere questo risultato bisogna scaldare **molto** i crogiuoli negli antri di ricerca moderni. Condizione necessaria a far scattare questo famoso **uncino**, quantificato per la prima volta da Enrico Fermi.

In pratica, serve una sorgente di protoni o di neutroni, e s'irradia con questa sorgente un certo elemento chimico, sperando che catturi qualche protone o neutrone in più e si trasformi in un altro elemento, il quale può a sua volta catturare un protone o un neutrone in più, eccetera. All'atto pratico, la cosa funziona molto bene nei reattori nucleari a fissione, dove c'è grande abbondanza di neutroni che vanno in giro senza meta finché qualche nucleo non li cattura.

Ora, però, bisogna esaminare l'interazione debole sotto il punto di vista dei diagrammi di Feynman, per vedere come questa possa agire anche come **forza** in senso stretto, scambiando un **gettone virtuale** tra due particelle (reali). E qui vengono fuori due nuovi **mediatori**, cui sono stati assegnati i nomi: ***W*** e ***Z***.

La vicenda è complicata, ma farò uno sforzo per semplificarla nei limiti del possibile. Diciamo solo che ***W*** e ***Z*** sono particelle di grande massa e vita effimera. Il mediatore ***Z*** non porta carica elettrica, e per ricordarlo si scrive ***Z*<sup>0</sup>**, dove l'apice "***0***" rappresenta per l'appunto la carica elettrica. Esso **pesa** più di cento volte un protone. Poco meno di lui pesa il mediatore ***W*** il quale, contrariamente allo ***Z*<sup>0</sup>**, è **sempre** portatore di carica elettrica, ed è scritto ***W*<sup>+</sup>** oppure ***W*<sup>-</sup>** secondo che sia elettricamente positivo o negativo. Insomma: ***i due gettoni sono tre***.

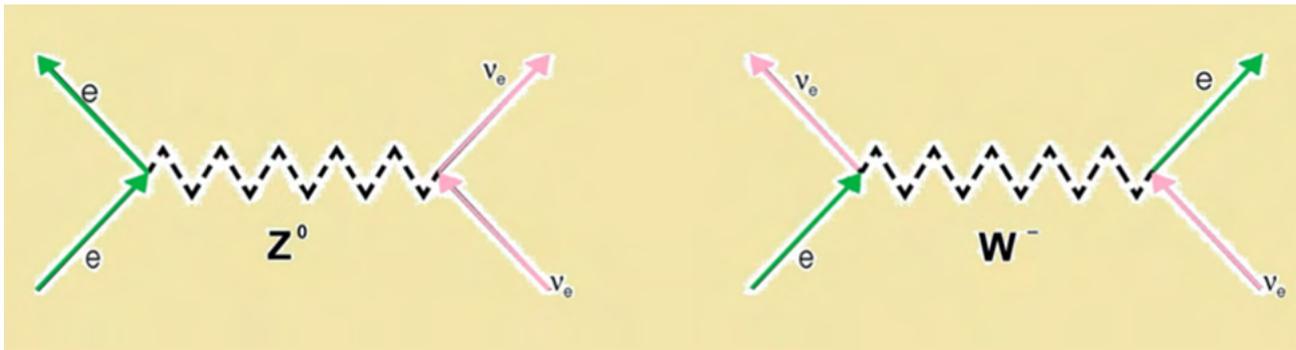
Ricordate come avviene lo scambio di quantità di moto tra due elettroni, o con un positrone, rispettivamente in Figura 16.1 e 16.2 nella sezione precedente? Il **fotone virtuale**, scoccando tra le due particelle, dà luogo a quella che, nel nostro mondo macroscopico, vediamo come repulsione o attrazione elettrostatica. Non ci meravigliamo, perciò, scoprendo che anche l'**interazione debole** agisce per scambio di **mediatori virtuali *W* e *Z***.

Ebbene: **qualsiasi** particella elementare (**sinistrorsa**) è soggetta a questa interazione, e non solo può trasformarsi in un'altra particella, ma anche **percepire una forza** suscettibile di deviarne la traiettoria. Ho detto "**sinistrorsa**", vale a dire che il suo spin e la sua velocità vanno come si avvolgono le dita, e il pollice esteso, in una mano sinistra. Le particelle che, per puro

caso, si trovano a essere “*destrorse*” neanche si accorgono dell’interazione debole. Perché? *Quien sabe?*

Nella Figura 16.5, ho riassunto i due casi più generali: quello dello scambio di un mediatore  $Z^0$ , senza mutazione di carica elettrica, e quello dello scambio di un  $W^-$ , che si diverte a scambiare la carica tra un elettrone e un neutrino. Ora, comunque, li vedremo più in dettaglio.

Esaminiamo perciò il diagramma a sinistra. Un elettrone (verde) e un neutrino (di colore rosa – Piero della Francesca) giungono dal basso, rispettivamente da sinistra e da destra, e quando scatta lo  $Z^0$  virtuale (i mediatori dell’interazione debole si raffigurano di solito con linee a zig-zag tratteggiate), le due particelle sono deviate, rispettivamente, verso sinistra e destra.



**Figura 16.5**

Nota importante: spesso, nei libri, si trova l’affermazione secondo la quale i neutrini non possono mai essere deviati o rallentati, ma solo assorbiti. Non è del tutto esatto: con una probabilità davvero bassissima possono anche essere *deviati* grazie allo scambio di mediatori  $Z^0$ .

Prima di trarre altre conclusioni, però, osserviamo il diagramma di destra. Si parte come prima, ma stavolta è il  $W^-$  a scattare e, miracolo! L’elettrone diventa un neutrino, e viceversa, poiché il mediatore ha scambiato una carica elettrica negativa tra le due particelle. Un leptone si trasforma nell’altro e, se avessimo giocato con due quark, l’uno si sarebbe trasformato nell’altro. Ecco il vero *alchimista* al lavoro.

E qui possiamo finalmente fermarci a riflettere. Il punto importante è quello appena visto: la trasformazione dell’elettrone in neutrino (o viceversa), così come quella tra due quark, con il *down* che diventa *up* (o viceversa), grazie allo scambio di un  $W$  negativo o positivo. Tutto ciò fa pensare che i due quark e i due leptoni siano solo aspetti diversi di una stessa medaglia, (due medaglie, per essere più precisi: una per i quark e una per i leptoni) e all’interazione debole incomba l’onere di rovesciarla.

Inciso: alcuni fisici sono convinti che in natura debba operare una *simmetria*, provvisoriamente battezzata “*Supersimmetria*”, ancora più generale di quella esistente tra i due quark o tra i due leptoni. Quest’ultima potrebbe addirittura vedere i quark trasformarsi in leptoni, e viceversa. Sapete: ai fisici piace molto procedere a battesimi affrettati prima che il pargolo veda la luce o, come in questo caso, che si sappia se c’è un pargolo o no. Per la verità, **LHC** non solo non ne ha trovato traccia, ma sembra aver dimostrato che questa ipotesi è da scartare, e alcuni scienziati – non tutti – la stanno abbandonando.

Così, ridendo e scherzando (per modo di dire, perché sento qualche lettore che pronuncia sconcezze irripetibili sulla complicazione estrema di questa benedetta, anzi: maledetta, interazione debole, e allora deve rileggersi il capitolo da capo), abbiamo sbattuto il naso sulle meraviglie dell'alchimia.

Tre cose ancora voglio discutere in questo capitolo. Sulla prima abbiamo già fatto un po' di conti. L'interazione debole scatta solo a distanze *inferiori a un millesimo del raggio di un protone*. Il perché lo abbiamo già capito: dipende dalla massa dei mediatori virtuali scambiati, circa cento volte maggiore di quella del protone. Per il **PdI**, affinché si *materializzi* uno di questi mediatori, il *prestito di energia* è enorme:  $\delta E = M_{(W,Z)} \times c^2$ .

La "**Banca di Heisenberg**", come sappiamo, è esigentissima; il debito deve essere *restituito* entro il tempo concordato al momento del prestito. Di conseguenza, durante un attimo così fuggente, dove volete che se ne vada il mediatore virtuale anche se sta scappando alla velocità della luce? Rimane, per così dire, *in zona*, e non dobbiamo meravigliarci se il *gettone* dell'interazione debole potrà essere scambiato solo tra due particelle che siano riuscite ad avvicinarsi così tanto.

E ora capite anche perché, all'inizio del capitolo 15, ho detto che definire quanto sia *forte* questa interazione è un po' questione di scelte personali. Infatti, il valore numerico riportato in sezione 15.1 risale ancora alla prima schematizzazione di Fermi, e quella era molto approssimativa.

Seconda cosetta, non poco importante. I fisici che diversi anni fa costruivano il **MS**, già da qualche tempo erano alle prese con un problemino, ma questo esplose solo quando si cominciarono a precisare le regole dell'interazione debole. A dirlo così, sembra la storia di un branco di bambini che giocassero a: «Facciamo finta...», ma ormai vi ho ricordato fino alla nausea come la scienza proceda anche in questo modo.

Il punto è questo: i conti tornavano solo se *tutte le particelle* (materia e mediatori della forza) fossero state *prive di massa*. Non è vero: a parte fotoni e gluoni, tutte le altre ne hanno un po', ma intanto si andava avanti così,00 sperando di trovare prima o poi una risposta al problema, specie considerando che le masse dei leptoni e dei quark allora conosciuti erano piccoline. Solo, quando si arrivò ai pesantissimi *W* e *Z<sup>0</sup>* e al quark *TOP*, la finzione non poté più reggere, e toccò cercare la soluzione.

Così, al termine degli anni 1960 e di una serie di lavori preliminari, una schiera di fisici – tra i quali emerge lo scozzese Peter Higgs – se ne venne fuori con una proposta che può sembrare peregrina. In parole povere: se tutto lo spazio è permeato di un nuovo *campo* (quello *di Higgs*, per l'appunto, come è ormai definito anche nei libri di testo) la cui funzione è di creare *attrito* con le particelle elementari, queste possono anche essere *prive di massa in sé*, ma hanno difficoltà nel farsi strada attraverso il campo, e non possono raggiungere la velocità della luce.

Ebbene: come sappiamo dalla Sezione II, solo chi non ha massa, può (deve) viaggiare a  $v = c$ . Se *qualcosa* si sposta a  $v < c$ , noi diciamo che quell'*oggetto* in senso lato è dotato di massa. Nel caso in esame, guardando da lontano, le particelle elementari *sembrano* possedere una massa, maggiore o minore secondo quanto ciascuna di esse è soggetta alla *viscosità* del campo di Higgs.

Come se già non bastassero i *campi* evocati dal **MS**!

È una soluzione possibile, ma a sua volta presenta un nuovo problema. Siccome, in **MQ**, a ogni *campo* deve corrispondere una *particella*, qui bisogna ipotizzare anche quella di Higgs. Per di più, altri ragionamenti fanno pensare che le masse dei  $W$  e  $Z^0$  siano abbastanza vicine a quella del *bosone di Higgs*, perché è un po' come se *ne avessero ingoiato uno*.

Cerca che ti ricerca, solo il 4 luglio 2012 i fisici di **LHC** annunciarono la “*scoperta ufficiale*” di questa benedetta particella la quale, in maniera infelice e per volgari ragioni editoriali, nel 1993 fu battezzata da Leon Lederman: “*La particella di Dio*”. Di certo, Dio non è in rapporti con l'editoria americana o, se esiste, ha a che vederci in modo diverso da quanto pensasse Lederman, e i fisici sono molto seccati da questo epiteto che, giornalmisticamente, torna ogni volta quando si parli di questo oggetto *estremo* del **MS**. La massa della particella di Higgs? Quasi *130 volte quella del protone*.

Terza e ultima faccenduola di qualche interesse. Riandate al diagramma di sinistra in Figura 16.5. Esso funziona nello stesso modo, anche se, dal basso, arrivano due elettroni invece di un elettrone e un neutrino. In altri termini, l'interazione debole ha anche un effetto simile a quella elettromagnetica descritto in Figura 15.1 perché, nei diagrammi, il  *fotone*  e il mediatore  $Z^0$  sono *intercambiabili* e conducono entrambi allo scambio di quantità di moto tra particelle cariche.

Ciò fece pensare i fisici, già dalla fine degli anni '50, a una qualche possibile *unificazione* tra l'interazione debole e quella elettromagnetica. Il tentativo di teorizzarla in modo matematico, e poi osservarla in un acceleratore di particelle andò a buon fine. A temperature molto elevate ma raggiungibili in laboratorio, i tre mediatori  $W^\pm$  e  $Z^0$  riescono a *liberarsi dalla loro massa* (sputano il povero Higgs) e, *rimescolandosi* col fotone, danno luogo a un nuovo quartetto di particelle che non vi starò a dettagliare: i mediatori dell'*interazione elettrodebole*.

In 15.1, riassumendo la nostra attuale conoscenza delle interazioni, tra le altre cose dissi pure che quella debole e quella elettromagnetica sono solo due aspetti – a bassa temperatura – di qualcos'altro; un'interazione che, a temperatura molto alta, si presenta *unificata*. Ecco il perché di quell'affermazione.

Alcuni traggono una conclusione *forse legittima* (ma più probabilmente no) da quest'unificazione. Secondo loro, l'aggiunta della *supersimmetria* al **MS** dovrà condurre, alla fine, all'unificazione dell'interazione *elettrodebole* con quella *nucleare forte* o *di colore*. Se fosse vero, a quel punto avremmo *due sole* interazioni di natura: la prima descritta dalla Relatività generale (repulsione cosmica e gravità), la seconda descritta dalla **MQ** (le altre tre). E, tanto per gradire, qualcuno sta già lavorando al tentativo di unificare perfino *queste ultime due*, per mezzo delle *superstringhe* o di altro. Qualcosa in più nella Sezione IV.

## 16.5) – Specchi e altre stramberie

In Italia, dal 1968 in poi, e fino al termine del secolo scorso, era invalso l'uso politico di classificare qualunque *cosa* in senso lato come se fosse “di destra” o “di sinistra”. Un esempio stupido: lo yacht era di destra, la barca a vela di sinistra (mi pare lo dicesse D'Alema, ma potrei sbagliare). Per la verità non mi vengono in mente esempi intelligenti (scusate: mi dicono che la cosa funziona allo stesso modo anche oggi per cui io, non volendo essere politicamente etichettato, sono *ipso facto* di destra...) ma, volendo giocare con le analogie, potremmo dire che l'interazione debole è **di sinistra**.

Ovviamente, la politica non c'entra; quella che vi ho propinato è solo una comoda regola mnemonica e adesso passo alla spiegazione in termini modellistici. Tranquillizzando eventuali fascisti accaniti tra i miei cinque o sei lettori rimasti; possono dormire tra due cuscini: nel mondo dell'*antimateria*, l'interazione debole è così **di destra** che più non si potrebbe.

Dobbiamo riprendere in mano lo *spin* di una particella, e nel senso più letterale del termine. Occorre, cioè, visualizzare lo spin come la rotazione della particella stessa attorno a un suo asse, e agguantarla con la seguente regola: se il pollice della mano destra indica la direzione secondo cui si muove la particella, questa è **destrorsa** se le altre dita della mano si avvolgono attorno a essa nella medesima direzione del suo moto di rotazione. Se, al contrario, dobbiamo usare la sinistra per fare questo giochino, la particella sarà **sinistrorsa**.

In Figura 16.6 ho riportato le quattro combinazioni principali: destra – sinistra e sopra

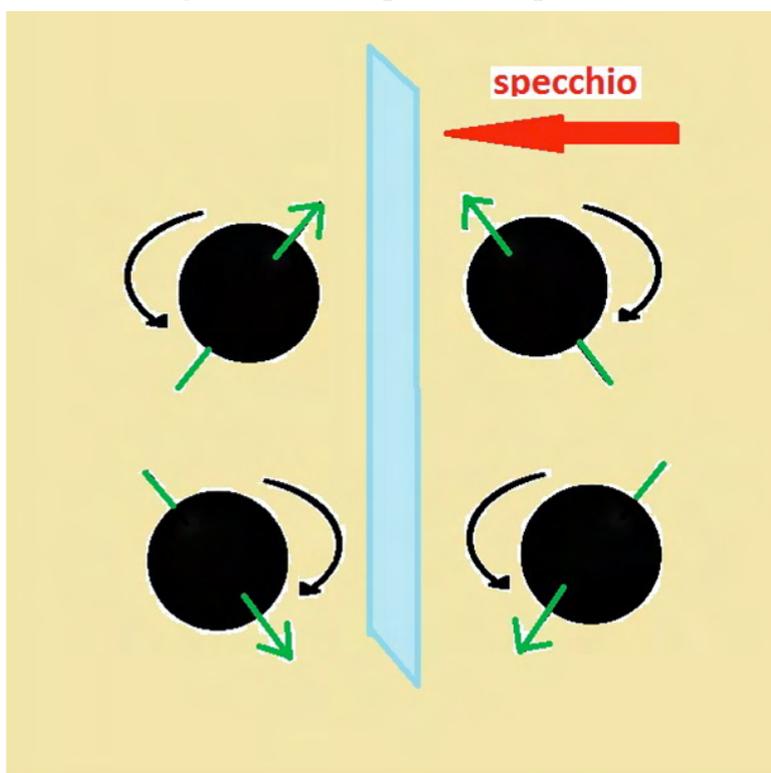


Figura 16.6

– sotto. Esaminiamola bene, questa figura, e per cominciare fissiamo la nostra attenzione sulla particella in alto a sinistra.

Supponete di afferrarla con la mano **destra**, il pollice puntato come la freccia verde, che rappresenta la direzione del moto. Le dita si avvolgono attorno alla sferetta proprio come la freccia nera, circolare, che indica il verso di rotazione (lo *spin*, ma consentitemi di non entrare nel dettaglio di quest'ultimo) della particella. Essa è dunque **destrorsa**.

Ora ruotate il polso finché non vi farà male, cosicché il pollice punti verso il basso come nella sferetta sottostante, sempre a

sinistra. Le dita continueranno ad avvolgersi secondo il verso di rotazione e, di conseguenza, anche questa seconda particella è *destrorsa*. In generale, possiamo orientare a piacimento la sua direzione di moto mantenendola destrorsa.

Al centro della figura, però, c'è uno specchio. Come appare l'immagine speculare di ciascuna delle sue particelle? Provate a prendere, sempre con la mano destra, la particella in alto a destra e orientare il pollice secondo la direzione di moto. Le dita seguono il verso di rotazione? Niente affatto. Se invece l'afferriamo con la mano *sinistra*, tutto va a posto. Le particelle destrorse, riflesse in uno specchio, diventano *sinistrorse*.

C'è un altro modo, però, per far diventare sinistrorsa una particella destrorsa, senza bisogno di rifletterla in uno specchio – la qual cosa, per altro, ci suona un po' troppo “Alice nel paese delle meraviglie” – ed è semplice. Si *ferma* una particella destrorsa, e si fa ripartire in direzione opposta. La rotazione mantiene il suo verso, la velocità s'inverte, ed è come se la particella in alto a sinistra in figura 16.6 si fosse trasformata in quella in basso a destra.

Detto questo, e in mancanza di ulteriori specifiche, ci aspettiamo che il nostro mondo contenga una miscela di particelle destrorse e sinistrorse. Con le debite eccezioni discusse più avanti, è proprio così.

Eccoci al punto. Nel capitolo 16.4, parlando dell'interazione debole, ho affermato: “*qualsiasi* particella elementare è soggetta a questa interazione”. È vero, ma avevo anticipato, con una frase sibillina, il seguente concetto: *solo la metà* delle particelle la percepisce. L'interazione debole prende in considerazione *solo le particelle sinistrorse*. Se, nel suo raggio d'azione, ce ne sono di *destrorse*, nemmeno se ne accorge, le snobba. Come sarà mai?

*Nessuno lo sa*. Per il momento, limitiamoci a trarre una conseguenza importante da questa osservazione sperimentale.

I neutrini, com'è noto, si generano solo nei processi nei quali entra in gioco l'interazione debole. Di conseguenza, tutti i neutrini esistenti nell'universo sono nati *sinistrorsi*.

Poc'anzi ho spiegato in qual modo una particella destrorsa possa diventare sinistrorsa: fermanola e facendola ripartire in direzione opposta. E qui sorge il problema: come si fa a fermare un neutrino? La risposta è semplicissima: nessuna tecnologia, per quanto futuristica, lo consentirebbe. Amen.

Supponiamo pure che tutti gli elettroni e i quark dell'universo siano nati da processi mediati dall'interazione debole e, di conseguenza, l'universo primordiale fosse una zuppa di particelle tutte sinistrorse (non è così, ma non importa). Le collisioni *elettromagnetiche* e *di colore* avrebbero ben presto omogeneizzato questa zuppa, rendendo casuali le velocità delle particelle, e stabilendo perciò un equilibrio tra quelle destrorse e sinistrorse, ma i neutrini?

Questi non sono soggetti a interazioni *energetiche* in senso lato e, per di più, la loro massa è così piccola che si muovono a una velocità molto prossima a quella della luce. Mentre il resto della zuppa primordiale si ripartiva tra destra e sinistra, i neutrini seguivano a restare – mi si consenta la metafora politica – lo *zoccolo duro della sinistra*.

Torniamo alla figura 16.6. La “roba” a *destra* dello specchio è, in un certo senso, il “mondo” in cui viviamo, mentre a sinistra dello specchio esiste l’“antimondo”, e cioè l'universo delle *antiparticelle*. Le quali, come abbiamo già anticipato, vanno soggette all'interazione debole solo se *destrorse*. Detto in termini tecnici, *l'interazione debole non è*

*simmetrica per riflessione speculare.* È simmetrica solo se *si scambia anche il mondo con l'antimondo*, che non è poco! Quando i fisici se ne accorsero, almeno all'inizio fu uno shock.

Ho introdotto questi concetti, non come sfida all'intelletto del lettore o come insopportabile briciola di erudizione. Il motivo è ben altro, ed è connesso alla vera e propria possibilità di esistenza dell'universo come lo conosciamo. Ovviamente, non posso proseguire molto oltre con le stranezze dell'interazione debole; ho voluto evidenziare solo questa perché, con l'aiuto di un disegno, si capisce facilmente, ma ce ne sono altre.

In buona sostanza, l'interazione debole è responsabile, in generale, della *violazione di numerose simmetrie* tra materia e antimateria. E questo è molto, molto importante per noi. Perché? Devo fare il discorso breve: nel Big Bang, ci si aspetta che siano venuti in essere materia e antimateria in egual misura. L'universo alla portata delle nostre osservazioni, però, è composto di sola materia, e di questo parlerò molto diffusamente nel capitolo 17.2. Dov'è finita l'antimateria?

La risposta completa non la possediamo ancora, ma sta nascosta in qualche pieghina del funzionamento dell'interazione debole. Gli esperimenti finora condotti hanno, infatti, dimostrato che quest'ultima ha una leggerissima *preferenza* per la materia rispetto all'antimateria. È un altro dei modi in cui l'interazione debole lavora *in violazione delle simmetrie fondamentali della natura*.

Come mai succede una cosa del genere? Lo sapessi! Purtroppo, già è tanto se riesco a capire *quali* simmetrie sono violate, perché i processi fisici in gioco non sono semplici, ma passano attraverso decadimenti di associazioni quark / antiquark secondo canali difficili (per me) da seguire. Solo un fisico particellare ci riesce bene.

Sono situazioni nelle quali la **MQ** aggiunge il colpo di grazia, poiché consente una *sovrapposizione di stati* fra configurazioni le cui *apparenze esterne* sono identiche ma le *costituzioni interne* diverse. Combinazioni materia / antimateria differenti si possono *rimescolare* tra loro, purché *da fuori* sembrino sempre la stessa cosa. E ciò non aiuta la comprensione dei giochi in atto. So che non avete capito nulla di questo paragrafo: neanche io, ma so pure che così è, se vi pare o no, e come me l'hanno venduto ve lo regalo.

A ogni modo, tanto si può dire: se l'interazione debole non agisse in modo sottilmente asimmetrico tra materia e antimateria, noi non saremmo qui a romperci il capo per capirne il perché, poiché tutto, nel Big Bang, si sarebbe annullato in frazioni di microsecondo. E ora basta di discutere su questo scherzo di natura, poiché rinvio il lettore alle bibliografie in Appendice 2. Ora dobbiamo passare a qualcosa di più *solido*. Solido per modo di dire, come sempre.

# 17) – Particelle, ma quante?

## 17.1) – Problemi di famiglia

Il lettore accorto ha già sospettato qualcosa leggendolo tra le righe, ma ora bisogna che ve la racconti proprio tutta. Perché, si sa, succede anche nelle migliori famiglie... Quanti sono i quark?

Non rispondetemi che sono quattro perché bisogna contare pure gli antiquark, o ventiquattro perché i due quark possono venire ciascuno in tre *colori* diversi per un totale di dodici, e altrettanti per gli antiquark. La risposta ve la darò io tra un attimo, e dopo vi potrete sbizzarrire col gioco delle moltiplicazioni aggiungendo, se vi piace, pure le (forse soltanto ipotetiche) particelle *supersimmetriche* di cui non sappiamo ancora nulla. E non lo sanno neanche i fisici, e magari non lo sapranno mai perché, nonostante la loro (sempre ipotizzata) esistenza sia allettante in quanto annoderebbero molti fili pendenti del **MS**, forse non esistono. E non tutti i fili si annodano; per questo motivo il **MS** è un colabrodo. La cosa va come segue.

Conosciamo i due quark *up* e *down*, e i due leptoni (elettrone e neutrino, quest'ultimo di solito definito *neutrino elettronico*) che fanno *pendant* con i quark medesimi. A parte le differenze nelle cariche, abbiamo pure visto come l'interazione debole possa trasformare un quark nell'altro, e un leptone nell'altro. Finora stiamo trattando con due particelle *grandi* e due *piccole*, pur se i quark sono solo  $10 \div 20$  volte più *pesanti* dell'elettrone. Amen.

Una pulce nell'orecchio già ronza da un po', e andrà ripresa nella Sezione IV: non ci potrebbe essere un'altra interazione, ancora da scoprire, che trasforma i quark in leptoni e viceversa? Teniamocela ben in caldo questa domanda, e passiamo oltre.

Per comodità di discorso, diciamo che le quattro particelle appena viste formano una *famiglia*. E ora attenzione: non sto cambiando le carte in tavola se torno per un attimo al Modello d'universo del capitolo 12, e ricordo il famigerato parametro  $\Omega$  che fornisce informazioni sulla geometria dell'universo a grande scala. I numeri suggeriti dalle osservazioni astronomiche sono:

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_V + \Omega_O + \Omega_A \approx 1$$

dove il pedice "V" indica la materia *visibile*, il cui contributo possiamo approssimare al più con **0,05**; il pedice "O" è la materia *oscura* che ci dà un ulteriore **0,23**, e infine il pedice "A" è l'energia associata all'espansione cosmica ( $\Omega_A = 0,72$ , ovviamente). Per ora, ci focalizziamo sulla sola materia *visibile*.

Ebbene: le quattro particelle elementari della *famiglia* finora esaminata costituiscono, aggregandosi in vario modo, tutta la *materia visibile* all'interno della quale, come vedete, sono inclusi perfino i neutrini elettronici, poiché anche questi ultimi, ormai, sono rivelabili da appositi *telescopi* in senso lato, nello stesso spirito in cui gli acceleratori di particelle sono definibili *microscopi* sui generis. Insomma: la materia studiata dai fisici costituisce solo il 5%, o poco meno, di *tutto ciò che esiste*. Fantastico, nevvvero? Per 500 anni di studio...

Cosa sarà, dunque, la materia *oscura*? La fisica, in questo momento, può solo suggerire una ridda di risposte preliminari, tutte teoriche, poiché i pochi esperimenti che sembrano dare un qualche risultato sono contraddittori, e i più recenti e potenti non sono riusciti a rivelarne neanche una particella, dicesi *una*. Di conseguenza bisognerà aspettare molti anni affinché LHC accumuli nuovi dati e, specialmente, aumenti di *luminosità*, in modo da fornire (sperabilmente) una risposta concreta all'interrogativo.

Non mi sbilancio troppo, però, se affermo che la grande maggioranza dei fisici riteneva, da ormai una cinquantina d'anni buoni, che la materia oscura fosse costituita da particelle *supersimmetriche* le quali, interagendo con la materia normale o con se stesse solo per mezzo della gravità, e del *debolissimo* mediatore  $Z^0$ , fossero riuscite a passare inosservate nei rivelatori posti in laboratorio, e si *vedessero* solo grazie alla loro influenza gravitazionale.

Questa sarebbe un'informazione interessante, pur se molto incompleta, e ci piacerebbe aggiungerla al Modello d'universo, ma LHC sembra averla giustiziata sotto la ghigliottina sperimentale con grande costernazione di chi ci lavorava su da decenni. Ne parlo solo perché il suo decesso è recente, e qualcuno spera ancora che risorga in qualche modo un po' contorto, ma la resurrezione dalla tomba riuscì solo a quel famoso falegname ebreo... E, come si capisce, sto ancora girando attorno a qualche problema da mettere a fuoco, di sicuro connesso con la *famiglia* di particelle elementari.

Qui è il punto, giacché non esiste una *famiglia* sola, ma ce ne sono la bellezza di *tre*! Come va questa storia? In questo modo: le famiglie di particelle elementari sono proprio tre, e ciascuna delle due che, al solo scopo di capirci bene definiremo *superiori*, sembra una fotocopia della prima. Una fotocopia in cui, però, tutte le particelle sono *gonfiate* rispetto a quelle della prima famiglia, poiché la loro massa, *e solo la massa*, è notevolmente superiore.

Nella Figura 17.1 ho riassunto tutto ciò che abbiamo imparato finora sul *MS*, aggiungendo però anche le due famiglie supplementari. Esaminiamo la figura. Alcune delle cose già le sappiamo, e ci serviranno da guida per interpretarla. In primo luogo, ritroviamo la distinzione tra:

- *mediatori della forza* (rappresentati in blu nella colonna più a destra) a partire dal fotone per l'interazione elettromagnetica, poi il gluone (il mediatore *colorato* dell'interazione forte), quindi i due mediatori  $Z^0$  e  $W$  che giocano nell'interazione debole, e
- *particelle elementari* in senso stretto.
- Poi c'è il *bosone di Higgs*, e lo abbiamo appena visto; fa ancora parte dei *lavori in corso* (ricordo che sto scrivendo nel 2021).

Le tre colonne di sinistra mostrano dunque le tre famiglie di particelle: in alto da sinistra ci sono le coppie di quark (in rosa), e in basso quelle di leptoni (in verdino). La prima colonna è quella con cui abbiamo già preso familiarità. In cima troviamo il quark *up*, con la sua massa, la carica elettrica, la *rotazione in senso lato* (lo *spin*) espressa in  $h/2\pi$  (e zitti un attimo. Perché? Perché sì, e basta) e da ultimo il nome della particella in questione.

Poi c'è la seconda casella dall'alto, e questa contiene il quark *down*. Scendendo, s'incontrano i due leptoni, e cioè il neutrino elettronico, e infine l'elettrone. Queste cose già le conosciamo, e abbiamo appena detto che queste quattro particelle formano tutta la materia visibile nell'universo. Per intenderci, sono loro e solo loro a contribuire a  $\Omega_V$ .

E allora, le altre due famiglie servono a qualcosa? Poi: perché ce ne sono solo altre due (o per lo meno come facciamo a saperlo)? E infine: cosa sono, *intrinsecamente*, queste otto particelle aggiuntive? Cominciamo col rispondere a quest'ultima domanda, ben sapendo che il lettore potrebbe averne di altre. È in buona compagnia, quanto a questo, perché anche i fisici non ci capiscono ancora nulla.

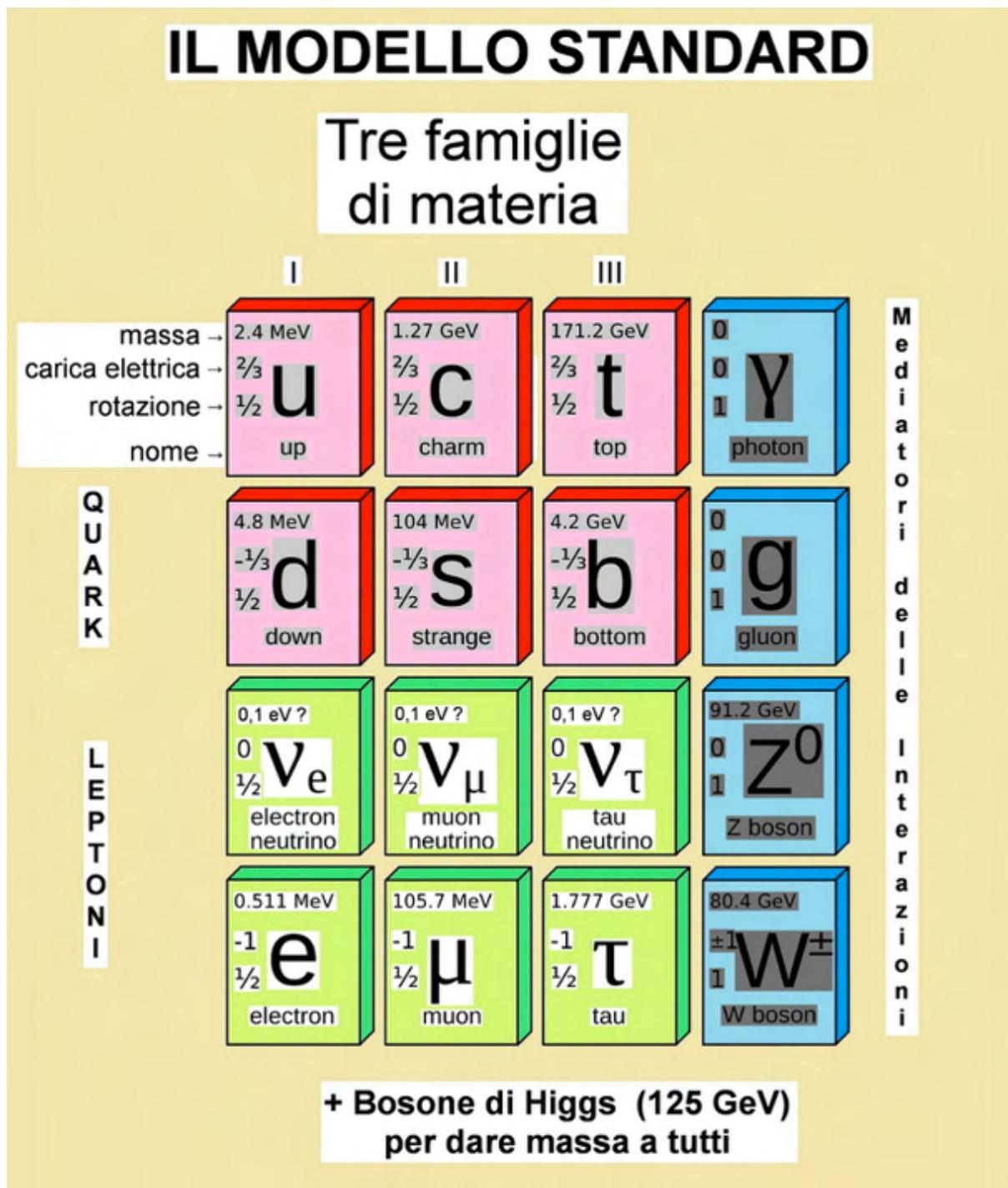


Figura 17.1

Un avvertimento: nella lettura della tabella, vedendo che le tre masse dei neutrini sono indicate come inferiori a circa 1 Mev. Ora come ora sappiamo che le loro masse sono inferiori a [0,1 eV (?)], e è bene ricordare che questi sono i *limiti superiori sperimentali diretti*, cioè il limiti superiori ottenuti *provando a pesare i neutrini in laboratorio (e senza riuscirci, perché di sicuro pesano molto meno di 0,1 eV)*. Ma tutta una serie di rivelazioni dirette, derivanti pur esse da misure credibili, in questo caso di tipo astronomico, forniscono indicazioni per la massa dei neutrini non superiori a  $10^{-6}$  eV. Inoltre, i neutrini fondamentali saranno pur sempre tre, ma ciascuno una miscela dei tre: elettronico, muonico e tauonico e si chiamano: neutrino uno, due e tre. Sarebbe troppo semplice, sennò, non vi sembra?

Qualcuno potrebbe avanzare l'ipotesi secondo la quale, in realtà, le particelle delle famiglie superiori siano solo *stati eccitati* di quelle della prima famiglia, e cerco di spiegarvi meglio.

Sappiamo tutti che, in un atomo, un elettrone può *saltare* in un'orbita più esterna (per questo ragionamento ci basta il rudimentale modellino atomico di Bohr) trovandosi così con un'energia maggiore. In queste condizioni, l'atomo si definisce: *eccitato*. Poi, emettendo l'energia in eccesso sotto forma di un fotone, l'elettrone se ne torna al suo posto e l'eccitazione atomica sparisce.

Analogamente, se all'interno di un quark ci fossero *pezzi* in movimento, e qualora uno di questi pezzi acquistasse all'improvviso dell'energia in più, noi vedremmo il quark mantenere tutte le sue caratteristiche tranne una: l'energia. In altri termini, *peserebbe* di più (energia diviso  $c^2$ ), e sarebbe un *quarkone*.

In realtà, i fisici hanno individuato diversi motivi in base ai quali non sembra essere questo il caso. Ve ne citerò tre, ma a mio avviso dovrebbero bastare.

Il primo è il seguente: pur esaminandoli tutti con i più potenti acceleratori, fino a LHC, nessuno di loro, nemmeno il quark più pesante della tabella, e cioè il *top*, mostra al proprio interno *strutture* di nessun genere. In questo senso, siamo umanamente convinti che tutti e sei i quark siano davvero particelle *elementari* in senso stretto, e dunque non ci sia proprio nulla che possa *saltare* a un livello di energia più alto come, invece, accade in un atomo, composto di tante parti.

E badate: non si tratta di un *ragionamento circolare* del tipo: «Poiché io assumo già il quark come particella elementare, allora è ovvio che non possa avere parti interne, e di conseguenza è davvero elementare, Q.E.D.». No: si passa attraverso gli esperimenti e si trova come, pure fornendo a un quark molta più energia di quella necessaria a *saltare* da una famiglia a un'altra, non c'è proprio nulla che si metta a *saltare*, e amen!

L'altro motivo è più complicato e più semplice allo stesso tempo. Prendiamo, per esempio, il quark *top* e segniamolo sulla tabella in figura 17.1. Se esso fosse solo *un quark up gonfiato*, ci aspetteremmo che esso *decadesse* prima in un quark *charm* e poi in un *up*, mantenendo invariata la carica elettrica. Invece, così non avviene.

Intendiamoci: il *top* decade in tempi brevissimi, ma in cosa? In un *bottom*, con lo scambio di un mediatore  $W^+$ . Poi, il *bottom* non decade in uno *strange* (vi prego di seguire sempre lo zig zag dei decadimenti sulla Figura 17.1) seguendo quello che sembrerebbe il percorso più semplice, ma si trasforma in un *charm*, avvalendosi dei servizi di un mediatore  $W^-$ . Alla fine, il *charm* cosa fa? Lo avete capito da soli: per mezzo di un nuovo mediatore  $W^+$  finisce la sua esistenza *in un beauty*, e il gioco continua.

Ora, converrete con me che, se i quark delle famiglie superiori fossero solo quark della prima famiglia, ma *gonfiati*, tutto questo balletto con i mediatori carichi dell'interazione debole non avrebbe alcun senso. Al più, sputando un paio di  $Z^0$  (o più semplicemente fotoni di alta energia), il *top* finirebbe per assestarsi su un *up*, ma ciò non avviene mai. Le trasformazioni da un quark all'altro *non possono aver luogo in orizzontale* lungo la tabella, ma *sempre e solo in verticale o in diagonale*.

Difficile, quindi, pensare a qualcosa di diverso da vere e proprie particelle elementari, specie se aggiungiamo una terza considerazione: per restare *confinata all'interno di un quark*, eventuali, ipotetiche *particelle sub – elementari* dovrebbero essere soggette a energie d'interazione tra di loro così enormi che, se si dividessero queste energie per  $c^2$ , le *masse equivalenti* dei quark *up* e *down* verrebbero fuori enormemente maggiori di quelle misurate. Per me, questo è il ragionamento più convincente. I quark sono tutti e sei *matrioske centrali*, quelle in legno duro e pieno, impossibili da aprire.

La seconda domanda era: come facciamo a sapere che ci sono tre famiglie, e solo tre? Parte della risposta verrà quando parleremo del Big Bang, ma intanto i fisici, esaminando certi modi abbastanza rari di decadimento del mediatore  $Z^0$ , hanno constatato quanto segue: se oltre ai tre neutrini delle tre famiglie ne esistesse un quarto tipo, la sua massa dovrebbe essere davvero enorme. Al punto tale che, fatte le debite proporzioni, i quark di questa ipotetica quarta famiglia dovrebbero pesare quanto un pallino da caccia (scherzo: di meno, ma non poi così *troppo* di meno), e li avremmo già scovati da un pezzo.

Questa non è ancora una dimostrazione *assoluta* (ma in fisica è difficile trovare qualcosa di veramente *assoluto*). Vi sembrerà più ragionevole osservando le masse dei neutrini. Per ora sono state misurate in modo ancora un po' incerto, ma comunque sono circa un milionesimo di quella dell'elettrone.

Siccome il mediatore  $Z^0$  *pesa* quasi duecentomila volte più di un elettrone, decadendo potrebbe produrre neutrini *cento miliardi di volte* più pesanti di quelli conosciuti, ma questi ipotetici neutrini superpesanti, ipoteticamente appartenenti ad altre famiglie, non si trovano mai. E dunque, le famiglie del *MS* sono tre e solo tre.

Ultima – o prima – domanda, secondo i punti di vista: a cosa servono queste famiglie aggiuntive? Non lo sappiamo ancora. Di certo, hanno giocato un ruolo fondamentale durante il Big Bang, quando erano presenti eccome, ma non siamo ancora in grado di specificare quale in dettaglio. Nel prossimo capitolo accennerò qualcosa in più, ma per ora abbiamo solo una piccola manciata d'indizi: dati sperimentali solidi, certo, ma si tratta di minuscole deviazioni... vedremo.

Ultima riga della Figura 17.1: Il bosone di Higgs non ce lo scordiamo, vero? Interagendo in vario modo con tutte le particelle e i mediatori delle interazioni (tranne il fotone e il gluone, la cui massa è nulla), è lui a chiudere la confezione del *MS*, perché in sua assenza le particelle non avrebbero massa. Anche se sembra difficile possa essere lui a dare la massa ai neutrini; questi ultimi peserebbero meno di  $10^{-15}$  volte un Higgs, davvero pochino!

## 17.2) – La natura è matrigna (con l'antimateria)

Finora, dunque, abbiamo individuato le dodici particelle davvero *elementari* o, per lo meno, molti fisici sono convinti che non ci siano, come già spiegato, altre matriske nascoste nel loro interno. Alle misurazioni eseguite nei più potenti acceleratori, esse appaiono puntiformi; si distinguono tra loro per le differenti risposte alle quattro interazioni: gravitazionale, elettromagnetica, debole e di colore. *Et de hoc satis*.

Parlando del decadimento del neutrone, abbiamo visto come, per mantenere costante il numero di particelle e antiparticelle quando dal cappello dell'alchimista cosmico si genera un elettrone, esca con lui un *antineutrino*. Più in generale, ricordiamo che i leptoni (neutrini ed elettroni), in ogni trasmutazione, compaiono sempre in coppia allo scopo conservare il numero totale di particelle / antiparticelle e pertanto, quando l'interazione debole scatta e produce un *antielettrone* (detto anche *positrone*), vien fuori assieme pure un neutrino.

Così, con la scusa delle stranezze dei neutrini, stiamo già discorrendo di antimateria. Abbiamo introdotto l'antineutrino il quale, a quanto ne sappiamo, differisce dal neutrino solo per ruotare in senso inverso e, in generale, comportarsi in modo inverso nei confronti dell'interazione debole secondo che sia destrorso o sinistrorso.

E abbiamo anche accennato brevemente al positrone o antielettrone; l'unica antiparticella ad avere il privilegio di un nome proprio (le altre si chiamano semplicemente: *anti-qualcosa*). La sua carica elettrica è  $+1$ , e quindi positiva, all'opposto di quella dell'elettrone, mentre per tutto il resto si comporta come un elettrone normale, avendone la stessa massa.

Che esistano anche gli *antiquark* l'abbiamo già detto nel capitolo 15.3, dove abbiamo pure discusso diverse delle loro proprietà, ma fatemi riprendere il filo del discorso e procedere un passetto per volta. Prendiamo un quark, scelto secondo le vostre preferenze, e riassumiamo quali siano le sue *cariche*:

- gravitazionale;
- elettromagnetica;
- debole;
- di colore (**R**, **B** oppure **V**).

Adesso, immaginiamo una particella *opposta* a quella appena considerata, in cui tutte le *cariche* – tranne quella gravitazionale – siano di segno inverso. Pure quelle di colore, che saranno perciò **R̄**, **B̄** oppure **V̄**. Questa particella è, per l'appunto, un *antiquark*. Cosa succede quando un quark e il suo antiquark si toccano tra loro? Ebbene: essendo tutte le cariche di segno opposto, si annulleranno a vicenda lasciando... lasciando cosa?

Il punto è questo: sappiamo già da qualche tempo che la massa è una *carica a senso unico*; non esiste l'*antimassa* (o, se esiste, non ne abbiamo ancora avuto sentore, poiché la repulsione cosmica – il lato oscuro della gravità – non agisce sulla *massa*, ma sullo *spazio*).

Inciso: qualche ragionevole prova sperimentale che anche l'antimateria cada verso il basso in un campo gravitazionale, come tutto il resto, nel momento in cui scrivo ormai esiste, ma siccome i fisici non si contentano mai, vogliono misurare la caduta delle antiparticelle (nella fattispecie antiatomi di idrogeno o elio) con precisione sempre maggiore. Attenderemo, ma senza aspettarci troppe novità. Fine dell'inciso.

La prima cosa che viene in mente è questa: annientandosi tutte le *cariche* delle due particelle, rimarrà un **oggetto** del tutto privo di ogni *altra* carica (perfino privo di *rotazione* e questo, per una particella di materia, non sembra ammissibile per motivi dovuti allo zampino malefico della **MQ**) a parte la massa, la quale sarà doppia, vale a dire la somma di quelle della particella e dell'antiparticella entrate nel processo.

Sembra ragionevole, no? Eppure, Madre natura, come il solito, ha preferenza per scelte diverse dalle nostre. Il gioco, difatti, potrebbe essere descritto come segue.

La massa, *da sola*, non può esistere. Ha comunque bisogno di *sostenersi* a una qualsiasi altra carica (interazione). Tanto vero che perfino il neutrino, questa schifezzuola quasi impalpabile, va soggetto a interazione debole. E perciò, se assieme alle cariche eliminiamo ogni altra interazione, pure la massa cessa di esistere.

Cosa avviene, allora, alla coppia quark / antiquark dopo che tutte le altre cariche (massa a parte) si sono neutralizzate a vicenda? Avviene quanto segue: la massa rimane *priva di supporto*, e svanisce dando luogo, per esempio, a una coppia di fotoni. L'energia liberata in questo processo è, ovviamente,  $2m_q c^2$ , dove  $m_q$  è la massa del quark di cui stiamo parlando, perché l'energia totale si conserva, pure quella *condensata* nella massa.

Potessimo avere antimateria a volontà! La reazione materia / antimateria sarebbe la fonte ultima di energia: conversione totale della massa, senza scorie di nessun genere.

Bene: con l'avvertenza che non c'è modo, a questo mondo, di avere antimateria se non si spende *prima* l'energia necessaria a generarla, e di conseguenza essa non potrebbe in ogni caso considerarsi alla stregua di una *sorgente* di energia, quark e leptoni possiedono ciascuno la propria antiparticella.

Stando così le cose non ci meraviglieremo se, sommando gli antiquark in gruppi di tre, si possano formare *antiprotoni* e *antineutroni*. Da questi ultimi, in linea di principio nulla osta alla costruzione di *antinuclei* e, aggiungendo al gioco di *anti-LEGO*<sup>TM</sup> cosmico anche i *positroni*, vengono fuori veri e propri *atomi di antimateria*. Così è: presso il **CERN** e altri laboratori, ci sono *bottiglie* in senso lato nelle quali è possibile, al momento, conservare *atomi di antielio* per qualche migliaio di secondi.

E qui sarebbe necessario rispondere ad almeno un paio di domande che sorgono immediatamente:

- La prima la conosciamo già dal capitolo 16.5. Se esiste una legge di conservazione materia / antimateria, dove si nasconde, nell'universo, tutta l'antimateria, giacché troviamo solo materia, e l'antimateria ce la dobbiamo costruire pezzetto per pezzetto nei laboratori di ricerca?

- Dovendo contare pure l'antimateria, le particelle elementari sono dodici o ventiquattro?

Per queste due domande, possediamo soltanto risposte provvisorie e nemmeno del tutto soddisfacenti, anche perché neppure i fisici hanno del tutto chiari i termini del problema. Come facciamo di solito, cerchiamo di andare per approssimazioni successive.

Se una stella fosse composta di antimateria, non avremmo alcun modo di accorgercene osservando solo la sua luce. Infatti, il fotone si comporta come se fosse l'*antiparticella di se stessa*: tanto vale un fotone, tanto vale un *antifotone*. Come mai quest'affermazione peregrina?

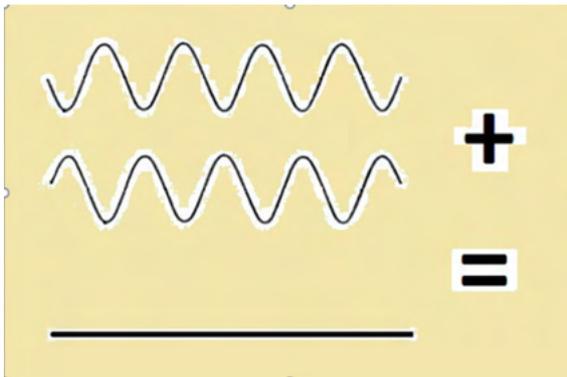


Figura 17.2

Stavolta la risposta è semplice: basta pensarli come *onde*. Infatti, se due onde s'incontrano **contro fase**, in modo tale che i *picchi* dell'una coincidano con i *ventri* dell'altra, esse si annullano a vicenda, e ne esce calma piatta. È questo il senso in cui fotoni e antifotoni sono solo due modi diversi di vedere la stessa entità fisica. Ci siamo? Sennò, osservate un attimo la Figura 17.2 e capirete.

Chiarito un po' questo punto, bisogna pure aggiungere un'altra considerazione che ci parrà subito ovvia: se invertiamo il segno di tutte le cariche, tutte ma proprio tutte a esclusione – ovviamente – di quella gravitazionale, ogni processo fisico agente in un'**antistella** dovrebbe essere, almeno in linea di principio *simmetrico* rispetto a quello che ha luogo in una stella. Le reazioni nucleari procederebbero alla stessa velocità, le righe spettrali degli **antielementi** sarebbero identiche a quelle degli **elementi**, e basandoci solo sulla luce che giunge a noi, e cioè sui fotoni, non potremmo distinguere una stella da un'antistella.

Nel 2016, è stato possibile paragonare le righe spettrali emesse dall'anti-idrogeno con quelle del normale idrogeno. Esse sono state trovate identiche entro la precisione degli esperimenti, che era enorme: una parte su dieci miliardi. Con precisioni molto maggiori si troverebbero piccolissime differenze dovute all'interazione debole, ma già previste dalla teoria. Direi che ci possiamo sentire soddisfatti.

Allora, come facciamo a sapere con assoluta certezza che l'antimateria è assente nell'universo? Da altre considerazioni. Per esempio, la seguente: se vi fossero accumuli di antimateria, vi sarebbero anche regioni nelle quali materia e antimateria si toccano. Di conseguenza, l'alone di qualche superammasso di galassie costituite di antimateria non potrebbe evitare di lambire una regione in cui esiste materia (che ci deve pur essere da qualche parte, perché almeno noi siamo fatti di materia, ohibò!).

Ora, secondo quanto abbiamo appreso, l'annichilazione materia / antimateria darebbe luogo, laggiù, a intensa emissione di raggi  $\gamma$  aventi un'energia ben precisa, e i satelliti inviati a rivelare in modo specifico questo possibile evento non hanno trovato un bel nulla. Antimateria niente, nada, nichts, rien, niet, nihil, chiaro questo punto?

Ma come mai? Allora, che fine ha fatto il principio di conservazione particelle / antiparticelle? La risposta è molto sottile, provvisoria e, come già anticipato, siamo alla frontiera della fisica conosciuta, per cui cercherò di dirvi qualcosa in più rispetto al capitolo 16.5, ma resterò forzatamente sul vago perché, come già vi ho spiegato ne so ben poco, e ne sa poco chiunque.

Misurando le collisioni ad alta energia negli acceleratori, dove si può formare di tutto, sia particelle, sia antiparticelle, abbiamo imparato come Madre natura, per uno dei suoi scherzi bizzosi, **preferisca la materia all'antimateria**. Attenti, però, perché non è completamente matrigna per quest'ultima: lo sbilanciamento è leggerissimo, e per quanto

possiamo capirne oggi come oggi, il poco già misurato e incluso nel *MS* non basta, *e di gran lunga*, a spiegare il motivo della mancanza totale di antimateria.

Mettiamola così: la preferenza (*misurata, non scordatevelo*) per la *materia* rispetto all'*antimateria* è talmente modesta che, in tutto l'*UC*, dopo che le particelle si fossero annichilate con le antiparticelle poco dopo il Big Bang, resterebbe al più materia normale sufficiente a formare una sola galassia come la nostra; un po' pochino, non vi pare?

Ripeto quanto già accennato in precedenza: nascondendosi nei meandri della più *sporca* delle interazioni (quella *debole*, tanto per non fare nomi), il principio di conservazione è *manipolato*. Volendo semplificare oltre ogni limite, la *materia* finisce più facilmente nel canale che va in quark ed elettroni, e quindi se ne può formare tutto il mondo visibile; l'*antimateria* prende più volentieri canali diretti verso particelle instabili nelle quali, alla fine del gioco, le (anti)cariche elettriche e di colore si annichilano.

Insomma: la *massa* dell'*antimateria* si disperde sotto forma di energia, luce, e restano solo (ma ne siamo del tutto sicuri?) *antineutrini* in numero tale da bilanciare il numero di *particelle di materia*, e testimoniare come, una volta, le *antiparticelle* ci fossero pure loro.

Fate bene attenzione, però: il giochino che vi ho appena raccontato è solo un *modello molto rudimentale* delle vere regole della partita. Le quali, come ho appena accennato, sono ancora poco chiare.

C'è chi afferma che pure l'altra interazione nucleare, quella *forte*, abbia un suo ruolo nel rimescolare le carte e accrescere questo effetto. Ma le misure eseguite in *LHC* sembrano aver dimostrato ormai con umana certezza che l'interazione *di colore* non si sporca le mani con asimmetrie materia / antimateria. Resta solo quella *debole*.

In ogni caso, converrete che quanto appena detto aggiunge informazioni importanti al nostro Modello d'universo. Sapere che solo in circostanze assai peculiari, come negli acceleratori, ma anche nei raggi cosmici, nell'esplosione di supernove, nelle vicinanze di quasar e buchi neri, e in genere dove c'è energia da vendere, può generarsi un po' d'*antimateria* la quale, però, si disintegra appena collide con la normale materia, non è un dettaglio trascurabile, se si pensa a quanto potrebbe essere stato importante tutto ciò durante il Big Bang.

E giungiamo finalmente alla seconda domanda, quella su quanti tipi di particelle elementari esistono. Considerando pure le antiparticelle, dovrebbero essere ventiquattro, non vi pare? Si può mettere anche in questo modo ma qui, più che altrove, il problema è di nomenclatura. Un filosofo scolastico direbbe: "Stiamo trattando di *accidenti*, non di *sostanze*. *Stat rosa pristina nomine.*"

Spingendo al limite il ragionamento precedente, infatti, si giungerebbe alla conclusione che anche i puri e semplici quark (adesso non tengo in conto gli antiquark) dovrebbero essere non già sei ma diciotto. Sappiamo, infatti, come ogni quark si presenti di un *colore* diverso scelto fra tre: dunque ci sono tre tipi diversi di ciascun quark. Siamo a quarantotto particelle elementari!

A molti fisici, però, questo modo di porre le cose pare una forzatura. Sembra più ragionevole seguire una linea di pensiero diversa: le dodici particelle elementari in figura 17.1 possono avere cariche elettriche e di colore (anche *deboli*, ma lì il discorso è meno intuitivo) di ogni genere, purché si seguano le debite precauzioni nel maneggiare le cariche medesime.

In quest'ottica, pure l'antimateria rientrerebbe nel gioco: sono sempre *le stesse particelle, ma con cariche invertite*. I quark (ma un discorso analogo vale pure per i leptoni), di conseguenza, sono sempre sei, e si possono presentare sotto diverse forme, ciascuna con una particolare combinazione di cariche. Il problema, quindi, si sposta sul concetto di *carica*: lo vedete anche voi, no?

Ecco il punto. Cos'è la *carica* rispetto a una certa interazione? Chi lo sa? Per ora, ci rendiamo solo conto di aver a che fare con una linea di ricerca promettente, ma è tutto da scoprire; fisica per la seconda metà di questo secolo. Forse, com'è suggerito dal famoso *modello M* col quale subiremo un duro impatto solo nella Sezione IV, c'è ancora *qualcos'altro da curvare*.

Mi perdonerete, spero, se aggiungo una sconcezza fresca fresca al discorso sull'antimateria. Quando si eseguono i conti con i diagrammi di Feynman, questi ultimi forniscono i risultati corretti a patto che si esegua una delle due *correzioni* in senso lato:

- a) Cambiare segno, nelle somme, qualora si presenti una particella di antimateria, oppure
- b) Mantenere il segno, ma cambiare la *direzione del tempo* (all'atto pratico è del tutto equivalente a cambiare il segno, e quindi è la stessa cosa del caso a), ma detta in modo più complicato)

Come conseguenza della possibilità offerta dal caso b), alcuni fisici trovano gradevole trattare le antiparticelle come se fossero normali particelle, che però *viaggiano all'indietro nel tempo*.

Lo stesso Feynman, per un certo tempo, sostenne questo punto di vista. Poi lo abbandonò, perché alcune delle sue conseguenze finivano per non essere giustificate da altre considerazioni teoriche e sperimentali più solide, a meno di non dedicarsi a funambolismi intellettuali eccessivi. A me, l'idea del viaggio all'indietro nel tempo sembra una complicazione inutile, ma in un mondo dedito al terrapiattismo, all'anti-vax e altre oscenità intellettuali, magari può piacere.

## 17.3) – Per soli adulti (specie se matematici...)

Intendo concludere questi tre faticosi capitoli con qualche parola sulla *modalità colabrodo* esibita dal *MS*, nonostante la sua apparente potenza e capacità di prevedere con precisione ogni risultato sperimentale. Ora ci arriviamo.

Cominciamo col machiavello utilizzato da Feynman per aggirare un problema irrisolvibile per principio. La metodologia generale, come abbiamo visto in sezione 16.2, consente di calcolare almeno in teoria la forza (interazione) agente tra due particelle qualsiasi; non importa se elettromagnetica, nucleare debole, o forte.

Abbiamo già visto, infatti, come, all'atto pratico, l'identica metodologia non sia applicabile, strettamente parlando, al caso di un singolo elettrone, e cioè al calcolo dell'interazione elettrostatica esercitata *dall'elettrone su se stesso, vale a dire la sua carica elettrica*. Qui interviene il primo dei trucchi matematicamente poco puliti: la *rinormalizzazione*.

Sono proprio i trucchi di questo genere a essere sotto severo scrutinio, ai nostri giorni, perché dietro di essi potrebbe celarsi un nuovo passo avanti della fisica. Restiamo, però, su carica elettrica e massa (infinite) del povero elettrone il quale, come si sa, ha una carica elettrica ben precisa, e così pure una massa – piuttosto piccola, peraltro. Come si *rinormalizza*? Ricordate?

Come fece Feynman, dopo aver giocato con alcuni teoremi individuati da altri fisici e matematici. «Dov'è il problema?» disse. «Molto semplicemente, siccome gli infiniti nei miei diagrammi sono positivi e negativi, io li sottraggo, ipotizzo che si annullino a vicenda o quasi, e sostituisco a questa somma tra infiniti i valori sperimentali, vale a dire, per l'appunto, carica elettrica e massa misurate per l'elettrone, e tutto va a posto!».

In effetti, con sorpresa generale, quando è eseguita la sostituzione proposta da Feynman, premio Nobel per il 1965, il resto della teoria funziona a perfezione. Le interazioni *teoriche* tra cariche di ogni genere risultano identiche a quelle *sperimentali* eccetera. Riflettiamoci un attimo senza pregiudizi: stando così le cose, questo benedetto trucco dovrà pur contenere *elementi di realtà*, per quanto il principio di base (sostituire una differenza d'infiniti teorici con un numero sperimentale) possa essere privo di senso fisico e matematico.

E allora, a che punto stiamo? Posso solo dirvi questo: lo stesso Feynman, circa trent'anni dopo i suoi successi, scriveva qualcosa traducibile (liberamente) come segue.

«Il gioco delle tre carte al quale ricorriamo, è chiamato in linguaggio tecnico “*Rinormalizzazione*”. Ma non importa quanto possa essere impressionante il suo nome; è sempre quel che definirei un gioco un po' strampalato. Aver introdotto questo trucco vagamente fraudolento ci ha dispensati dal dover dimostrare che l'elettrodinamica quantistica è matematicamente priva di contraddizioni. È sorprendente che, in un modo o nell'altro, finora non se ne sia potuta raggiungere la dimostrazione; personalmente, sospetto che la *rinormalizzazione non sia matematicamente legittima*.»

Insomma, già da questa prima considerazione dello stesso creatore delle basi del *MS*, c'è l'ammissione secondo la quale, almeno dal punto di vista matematico, esso è un colabrodo. Non basta: ne abbiamo di meglio.

Chiediamoci se il **MS** così com'è oggi riesca *davvero* a prevedere, fino ai limiti estremi realizzabili in un esperimento di laboratorio, *tutte* le quantità fisiche. No, non ce la fa. Cominciamo a trovare qualche eccezione. Per esempio: il **muone**, vale a dire l'omologo dell'elettrone nella seconda famiglia di particelle elementari, ruota anch'esso su di sé, e di conseguenza deve possedere un **momento magnetico**.

Cosa dicemmo riguardo a quello dell'elettrone? Le previsioni del **MS** concordavano con i risultati sperimentali almeno entro **dieci cifre decimali** o più. L'analogo confronto col muone è un po' più complicato, e per lui il **MS** pare che fallisca già dalla **quinta cifra decimale**. Qualcosa non va, ma cosa?

Andiamo avanti: abbiamo già parlato della possibile **unificazione** ad altissima energia delle tre interazioni quantistiche (vale a dire elettromagnetica, nucleare debole e forte) in un'interazione sola. Ebbene: spingendo i conti col **MS** fino a quell'energia, vien fuori che **si manca l'unificazione**. Per un pelo, ma si manca.

Ovviamente, ciò potrebbe non voler dire nulla. Magari, la natura non prevede l'unificazione. I fisici, però, preferiscono pensare che l'unificazione abbia luogo, e sia l'estrapolazione del **MS** a non funzionare. Lasciamo questo punto in sospenso.

La massa dei neutrini. Piccola quanto si voglia (pochi milionesimi di quella dell'elettrone), il **MS** non trova in alcun modo il sistema per giustificarla. Tutte le altre particelle non hanno problemi (come sempre, si fa per dire) ma per i neutrini non c'è verso. Non possono avere massa, e basta. Mentre, invece, l'hanno. Altra crepa fondamentale del **MS**.

Più in generale, i fisici sono da molto tempo convinti che il **MS** rappresenti solo un gradino di una lunga scala: salito quel gradino, bisognerà affrontare il successivo. Perché questa sensazione? Il motivo è da ricercarsi nella ricchezza di **parametri liberi** presenti nel modello.

E mi spiego: in una Teoria con la maiuscola che descriva davvero tutto, anche i valori numerici dei parametri fondamentali dovrebbero essere giustificati all'interno della Teoria medesima. Siete d'accordo? Spero di sì.

Purtroppo, ciò non avviene col **MS**, in cui i valori delle masse, delle cariche, delle intensità con cui le particelle rispondono alle interazioni, più un certo numero di costanti di natura, devono essere inseriti **dall'esterno**, misurando quelle quantità in laboratorio e poi comunicando al **MS**: «Carissimo; d'ora in poi lavorerai assumendo, per la massa di questo quark, tanto e tanto, e così via.»

Insomma: un po' il problema di Feynman coll'elettrone, ma moltiplicato fino a una **ventina** di parametri diversi, e sono un po' troppi, davvero. Tra l'altro – e questo è per ora solo un sospetto, ma ben fondato – il loro numero potrebbe essere ancora maggiore.

Fatte le debite proporzioni, sembra quasi la situazione della tavola periodica degli elementi prima della scoperta della struttura dell'atomo: un totale di oltre 300 isotopi stabili, e migliaia di instabili. Troppa roba, finché non si scoprì che bastavano protoni, neutroni ed elettroni (tre particelle in tutto), e si poteva costruire qualsiasi elemento e isotopo. Così dovrebbe essere una buona teoria: col numero di **parametri liberi** ridotto all'osso!

Una possibile cura per questi malanni? Forse la **supersimmetria**, ma più probabilmente no. Di essa dirò qualcosa (poco) solo nella Sezione IV.

Da ultimo, vorrei tornare sulla mancata unificazione tra **MS** e Relatività generale. La gente ci ha provato in tutti i modi ma, non appena s'ipotizza il **gravitone virtuale** come

*mediatore dell'interazione gravitazionale*, e lo si mette al lavoro, scoppia tutto. Direi quasi: nel senso letterale del termine.

Cosa succede, all'atto pratico? Ebbene: non occorre aspettare di arrivare all'interazione gravitazionale di una particella con se stessa, per poi dover applicare la *rinormalizzazione*. Basta la pura e semplice interazione tra due particelle, e già le somme sui diagrammi di Feynman vanno all'infinito. Purtroppo, data la natura intrinseca di questi infiniti, qui non ci sono teoremi, seppur di dubbia applicabilità, che ci aiutino a venirne a capo. Il vero e proprio *metodo*, il *macchinario* del *MS*, in questo caso non è applicabile.

Qual è il problema? Il *gravitone*, per quanto virtuale possa essere, è *gravitazionalmente carico*. Non come i gluoni; loro trasportano cariche di colore, è vero, e già questo conduce a una moltiplicazione dei diagrammi di Feynman anche nel caso più semplice, ma complessivamente sono *neutri*. Il gravitone è *carico e basta* e, non esistendo l'*antigravità* (lasciate da parte la repulsione cosmica, per favore; in questo discorso non c'entra), non è possibile *neutralizzare una carica gravitazionale*.

Di conseguenza, ogni singolo gravitone virtuale *interagisce con se stesso* e immediatamente l'interazione gravitazionale sale all'infinito. Il che, ovviamente, in natura non avviene. Il *MS* e il modello a particelle virtuali non funzionano, con l'interazione gravitazionale, e qui il discorso deve finire per forza.

No: prima di finirlo devo parlare del bosone di Higgs. Pure lui, essendo relativo alla massa, *non è rinormalizzabile*. E qui è il fallimento più cocente del *MS*: il bosone *serve a tutti i costi*, ma è *incompatibile a tutti i costi*... Basta!

Prima di passare al Big Bang, vorrei nuovamente chiedere venia al lettore se mi sono dilungato sul *MS* più di quanto sarebbe stato strettamente indispensabile. Il motivo per questa mia prolissità esiste, ed è nella scarsità di libri divulgativi dedicati a quest'argomento.

In effetti, nell'ultimo capitolo (ma anche prima, a pensarci bene) ho detto peste e corna di questo strumento raffinato della fisica dei nostri tempi. Però, devo pure ammettere che esso rappresenta, in un certo senso, *l'unica cassetta degli attrezzi* di cui disponiamo, per indagare quanto avviene nel mondo dei costituenti fondamentali della materia. Di conseguenza, è inutile negare la sua centralità nella fisica moderna e se, nel nostro Modello d'universo, vogliamo un *plastico ferroviario* realistico, la sua *struttura fine* è tutta racchiusa nel *MS*.

Per questo motivo, ho ritenuto necessario fornire un sunto non troppo stringato delle sue varie parti costituenti. È vero, la *MQ* è la legge fondamentale di natura, ma come si applica agli elementi costituenti la natura stessa? E, soprattutto, quali sono questi elementi? Ce lo dice solo il *MS*. Purtroppo, la letteratura divulgativa sulla *MQ* comprende intere biblioteche; quella sul *MS* si riduce a una manciata di libri, a volte neanche troppo facili. Spero, quindi, di aver fatto cosa gradita, bla, bla, e ora smetto di parlarvi addosso.

Fatemi dare un'occhiata alla cassetta degli attrezzi (intellettuali) che ho cercato di riempire finora: sì, mi pare che non manchi nulla. Possiamo concludere la Sezione III, e passare alla IV, dove si troverà... be', anzitutto il Big Bang, ma anche altro. Coraggio, dunque.

## **Sezione IV: dal *Big Bang* ai *Multiversi***

## 18) – Tra metafisica e fisica

### 18.1) – Prolegomeni a ogni futura scienza...

E così, dicevo, abbiamo nella cassetta degli attrezzi un certo numero di strumenti utili a non farci perdere la bussola mentre affrontiamo l'argomento più spinoso di tutta la cosmologia: il Big Bang. Infatti, siamo all'interfaccia tra l'universo *piccolissimo* e quello *infinito*. Qui, Relatività generale e **MQ** s'incontrano (si scontrano?) e il nostro Modello d'universo è destinato a subirne i ghiribizzi. Come sempre ci vuole pazienza, e di qualcosa verremo a capo anche stavolta, almeno entro i limiti concessi alle attuali conoscenze.

Il primo capitolo di questa sezione è una lunga premessa: pure chi non fosse interessato alle mie idee sui rapporti tra Big Bang e Creazione / creazione, però, farebbe bene a non saltare direttamente al capitolo 18.2. Rischierebbe di perdere non solo una chiave di lettura delle opinioni mie (e altrui), ma anche di ciò che si nasconde dietro le principali teorie scientifiche riguardanti l'*inizio* dell'universo.

E qui parte una filippica. Già vi è noto che io sono un ricercatore scientifico, un professionista serio che non vuole vedere strapazzata la fisica. Di conseguenza, inzupperò spesso una spugna nell'acqua pulita onde eliminare non solo dalla mia mente, ma anche da quella del lettore, ogni incrostazione ideologica di quelle usate spesso per inquinare il ragionamento sull'*origine* in senso lato. Già ho discusso molto di quanto sto per ripetere, ma mi è parso buono e giusto farlo sempre per motivi puramente scientifici.

Il Big Bang è stato la *Creazione*, quella con la maiuscola? Vale a dire: *prima* o *fuori* del Big Bang sono concetti privi di senso, poiché anche il tempo e lo spazio sono stati *Creati* (sempre con la maiuscola) assieme al resto? Forse, qualcuno ritiene che ogni *credente* (anche in senso molto lato) debba condividere questa fede con furore dogmatico, e ogni *non credente* vi si debba opporre con foga iconoclasta? A me sembrerebbe una follia, e cercherò di spiegarvi.

Cominciamo con un esempio concreto. Alcuni fisici sono *religiosi* (non solo *cattolici*) *praticanti* ma pure in quanto tali molti di essi, me compreso, trovano assai gratificante l'idea del Big Bang come di un *evento estremo di "trasformazione"* all'interno di una catena di altri eventi. Quali? Qui mettiamo il piede sul terreno sdruciolevole della *metafisica* poiché la scienza non si può pronunciare né, quasi con assoluta certezza, mai potrà farlo. Diciamo solo che l'immaginazione estende tali eventi ipotetici all'indietro e in avanti *per un'infinità di tempo*, e all'intorno *per un'infinità di spazio*.

Possiamo, noi fisici, dimostrare *scientificamente* la correttezza delle nostre convinzioni? No, non possiamo: si tratta di un'opinione *emotiva*; è *soddisfacente* e basta. Magari, quest'immagine blandisce il senso estetico e nulla di più. Che si tratti di fisici *credenti* o *non credenti* non fa differenza; questa concezione del Big Bang è gradevole ma, ahimè, non è dimostrabile. Ma ho parlato di metafisica, e devo chiarire in anticipo molti equivoci sul

significato *metafisico* dei discorsi attorno al Big Bang. Su quelli scientificamente *plausibili* (ma non dimostrabili, come “inflazione continua” e altri) tornerò invece in altri capitoli.

Perché tiro in ballo la metafisica in un libro come questo, dove già fin dall’inizio (capp.1.1 e 1.2) avevamo concordato che non avrebbe dovuto trovare ricetta? Ebbene: lo avrei evitato se non lo facessero in molti, e a sproposito. E vedo la fisica strapazzata proprio in questo tipo di pronunciamenti. Sarà una mia nevrosi personale, ma non mi piace: quando qualcuno si diverte a prendere la fisica per la coda e trascinarla nel fango, mi ribello. Purtroppo, molti discorsi sulle primissime fasi di esistenza dell’universo, Big Bang compreso, oggi come oggi si trovano proprio in queste travagliate condizioni, ed è opportuno informarne bene il lettore.

Non equivocate, dunque; la *religione* non c’entra nulla. Conta solo la *scienza*, e basta. E così, affermo con tutta forza che mi pare un’idiozia bella e buona affermare, come fanno certi, che “*la scienza è ormai giunta a lambire la metafisica, e di conseguenza può dire l’ultima parola su Dio (e sull’Aldilà)*” e castronerie annesse. Per chi ricordasse Kant, questo era – ed è tuttora – l’errore concettuale dei “*Deisti*”, opposti ai “*Teisti*” quali ci si aspetterebbe, invece, dover essere gli uomini di scienza. Restare a bocca chiusa e non avvertire il lettore l’avrei sentito come contrario a una corretta deontologia professionale, specie considerando come esistano prove assai concrete di come sia *scientificamente impossibile* aggredire i problemi sull’*origine ultima*.

Pare strano doverne parlare ancora: da secoli l’idiozia “*deistica*” torna a far capolino, per poi spegnersi in silenzio perché, tanto, la metafisica seguita a rimanere irraggiungibile a priori. E allora come mai, qua e là, si trova sempre qualche (notate bene la delicatezza del mio linguaggio e assaporate il francesismo) coglione che la rispolvera?

Un lettore m’interrompe, chiedendomi come mi permetto di sparare così forte contro ingegni che, in molti casi, io stesso riconosco senza dubbio alcuno di gran lunga superiori al mio. Il problema va visto diversamente: l’ingegno non basta; occorre anche un’altra condizione e questa sembra verificarsi più di rado. Il genio *non deve* fondarsi sul pregiudizio ideologico. Ricordate i rapporti di Einstein con la MQ? Su di questa il più grande intelletto scientifico degli ultimi secoli aveva torto marcio, ma morì senza giungere ad ammetterlo pur possedendo gli strumenti intellettuali per potersene convincere.

Di questi tempi, ad esempio, è di moda avviare il discorso affermando che, una volta date le Leggi di natura (notate la maiuscola in “*Leggi*”), era inevitabile lo *srotolamento*, partendo dal vuoto o magari neppure da quest’ultimo, dell’universo nello spazio e nel tempo, generando materia ed energia, e transitando per la configurazione di altissima densità e temperatura oggi definita Big Bang. Magari si tira in ballo il *modello M* (cercatelo tra le *fancies* nel capitolo 21.5) perché sembra piacere a molti, data la sua struttura matematica talmente complessa da non essere padroneggiata da nessuno.

E badate: se i cosmologi di grido con i quali ho il dente avvelenato si fermassero qui, e distinguessero tra *opinioni* e *realtà*, ancora non troverei nulla da eccepire. Si discute d’ipotesi così lontane dalla possibilità del vaglio sperimentale, che è pur lecito servirsene a titolo speculativo. Perfino quando tali ipotesi assumono una presunta *circolarità del tempo* di cui non dirò altro. E poi, quanto ancora non rientra nella fisica galileiana lo troveremo ben più avanti.

Dirò di più, a scampo di equivoci: secondo me, i fisici che lavorano su modelli del genere seguono linee di pensiero interessanti. Allora, qual è il mio problema vero? Li vorrei meno aggressivi nel propugnare le loro idee, quasi fossero veri e propri *dogmi laici*. Specie quando la dimostrabilità scientifica di questo tipo di congetture sembra destinata a restare poco probabile per decenni o secoli (o forse per sempre). Via: sintetizziamo qualcosa, ma proprio l'indispensabile. Pensateci anche voi: basta fare un passetto logico sulla trave ideale usata nel tentativo di costruire un ponte tra la scienza e la metafisica, per capire che questa passerella oscillante è inchiavardata (male) solo dal lato scientifico, mentre dall'altro penzola nel vuoto.

Ora: abbiamo un'evidenza *scientifica* secondo cui, in natura, non si danno *creazioni* in senso stretto, ma solo *trasformazioni* da qualche stato a qualche altro. Anche le *particelle virtuali* (almeno secondo il modello corrente sul quale siete ormai preparatissimi) non sono *create*, ma *prendono in prestito energia, e devono poi restituirla* e badate: perfino questo caso estremo obbedisce a leggi vincolanti in modo rigidissimo; nella fattispecie il **PdI** e la statistica.

Come vedete, pian pianino sto spostando anch'io l'enfasi dalla *creazione degli oggetti in senso lato* alle *leggi che ne regolano l'esistenza e il venire in essere*. Ora, siccome il nostro intelletto *non è fatto per prescindere dal principio di causalità*, l'albero delle *cause seconde* (si parte dagli "oggetti", poi si risale alle "Leggi", quindi alle "Leggi delle Leggi" e così via) si dovrà interrompere prima o poi, fosse pure all'infinito. Il che non cambierebbe nulla, e qui cascano molti asini.

Eccoci giunti, perciò, al requisito di una *causa prima* la quale, per esser tale, deve anche obbedire al vincolo di essere: *causa di se stessa*, e qui salta fuori il Creatore / creatore. Vi supplico di notare bene come, nel definire quest'ultima entità, io abbia cura di usare vuoi la maiuscola, vuoi la minuscola. Ora rileggete gli ultimi paragrafi, ve ne prego, perché il grimaldello che vi consentirà di non farvi menare per il naso è tutto lì.

Avete inteso bene? Allora badate: l'aggiunta "*causa di se stessa*" già rappresenta un'estrapolazione scientificamente un po' troppo ardita, e un misero tentativo di creare un *modellino del "principio di esistenza"*; un'operazione fallimentare per Immanuel Kant, pure se Tomaso d'Aquino l'avrebbe ancora considerata tollerabile come "*Prova dell'esistenza di Dio*": una "Prova" che mi lascia alquanto freddo, devo ammettere ma, d'altronde, nel Medioevo il concetto di "Prova" era più sfumato di quanto siamo abituati a immaginare noi.

Insomma: questo "Principio di esistenza" sfugge per definizione alla causalità, e di conseguenza non possiamo neanche teorizzarlo in modo logico (causale). Qui dovrebbe fermarsi chiunque.

Volete obiettarvi che la natura prescinde dalla causalità nel *singolo evento quantistico* (ma non nella *statistica*)? Benvenuti ma, pure se le cose andassero così – e già si sfilaccia un po' la ragione affermandolo con certezza, sebbene siano in molti a parlarne senza rendersi conto dell'irrisolvibile errore epistemologico – la mente umana non è comunque autorizzata a trarre "*inoisulcnoc ehcigol non ilasuac*" (è un ossimoro, se ci pensate).

Proprio in questa nebbia crepuscolare alcuni scienziati commettono il *loro* errore di logica: affermano cioè che, se le Leggi di natura prevedono la creazione di spazio, tempo ed energia a partire dal nulla, *come conseguenza logica* non c'è bisogno di un "*principio di esistenza*".

Per mettere in crisi quest'affermazione, basta spostare il discorso al livello superiore: da dove vengono le Leggi di natura? Oppure le *Meta – leggi* dalle quali discendono le leggi da noi conosciute, e così via in una regressione senza fine? Per me il discorso è ridicolmente semplice. In qual modo si potrà mai esorcizzare la necessità di un “*Principio di esistenza*”, se il *MS* con le sue future estensioni (supersimmetria? modello *M?*) non potrà *a priori* spiegare come *il tutto possa provenire dal nulla*? Tenendo presente – è chiaro – che in quel *nulla* ci dovrebbero stare anche le stesse Leggi le quali, invece, sono invocate come *preliminari* per giustificare il Big Bang, o il *Pre – Big Bang e ...* ci siamo?

C'è poco da girarci attorno: la logica, basata sul principio di causalità, richiede comunque un “*Principio di esistenza*”, non importa quanto distante nel tempo, nello spazio, nella forma delle Leggi di natura, e inventate voi qualcos'altro. Ma giochiamo ancora un attimo: torniamo alla ipotetica non causalità della Natura e traiamone le conseguenze... le conseguenze... provate voi a trarle, queste conseguenze, senza cadere in un errore di logica. Per Madre natura, la povera logica umana potrà essere poco importante, ma purtroppo *è tutto ciò che abbiamo noi*.

Siamo come il proverbiale ubriaco della barzelletta: lui cerca la chiave di casa sotto il lampione perché, dove non c'è luce, non ha possibilità di trovarla. Dobbiamo accontentarci. Affermare che, date le Leggi di natura, non occorre più pensare a un “*Principio di esistenza*”, è come proclamare: «Signori, abbiamo dimostrato per quale motivo la chiave dell'ubriaco si possa trovare *pure se non c'è!*». Attenzione all'ultima frase; è equivoca, ma più di così...

Così vanno le cose e, allo stesso modo in cui noi troviamo ridicoli i castelli di carta edificati nel passato da scienziati famosi, un giorno lontano i posteri rideranno di noi per aver tentato di scavalcare un abisso senza fondo con i metodi rudimentali della scienza di questo scorcio del XXI secolo.

Insomma, lettore: cerca di prestare bene attenzione alle notizie che rimbalzano sui *media* perché, purtroppo, qualcuno venderebbe l'anima al diavolo (nell'ipotesi indimostrabile che anima e diavolo esistano davvero) pur di farti credere che *scienza* sia sinonimo di *onniscienza*. La qual cosa non è vera, né mai lo sarà.

E tieniti ben stretti i tuoi pregiudizi (scusa: “*Paradigmī*”), purché tu non irrida a quelli altrui. In ogni epoca, il pregiudizio (*paradigma*) socialmente più accettato, e ritenuto **LA VERITÀ**, è questione di moda, e le mode cambiano perché, tanto, in questo campo la scienza non potrà mai dimostrare un bel nulla.

Ti ho messo in guardia abbastanza. Con questo, spero aver sgomberato il campo da equivoci troppo facili quando si tratta del Big Bang: se decidiamo di mantenere la sua trattazione entro i limiti della scienza, possiamo cominciare a parlarne. Purtroppo, già nel prossimo capitolo cominceremo a muoverci in una *zona grigia* della fisica: cammineremo perigliosamente su una di quelle famose passerelle inchiavardate dal lato scientifico, ma penzolanti sull'abisso. E perciò, non dimenticare i ragionamenti di questa introduzione filosofico – metafisica (for DUMMIES, essendo un dummy anche lo scrivente).

## 18.2) – Un infinito troppo grande per noi

Cosa mai può dire la scienza dell'*istante preciso* del Big Bang, del presunto *tempo zero*? Oggi come oggi, nulla: al momento nessuna teoria è abbastanza potente da disquisire sull'eventuale fase di *trasformazione* preliminare all'immane esplosione.

Magari un giorno, qualche teoria molto più generale del *MS* consentirà di ricavare *ipotesi teoriche ben strutturate* non solo sullo stesso Big Bang, ma addirittura su eventuali fasi *anteriori* a esso. Come caso limite, neppure me la sento di escludere a priori la possibilità d'individuare nell'universo attuale possibili *signature* lasciate da queste ipotetiche fasi. In tal caso, non si tratterebbe più di speculazione filosofica, ma di solida scienza galileiana. Ai nostri giorni, però, non siamo ancora a questo punto, e neppure è chiaro se potremo giungerci mai.

Al contrario, se ci contentiamo di parlare di quanto avvenne *poco dopo* il Big Bang, anche *pochissimo* – e più avanti metterò giù qualche numero in proposito – è forse possibile arrivare ad alcune conclusioni a metà strada tra l'*ipotesi ragionevole* e la scienza sperimentale. Ci proveremo nel capitolo seguente.

Purtroppo, qui occorrerà procedere a una ristrutturazione radicale del Modello d'universo, buttando via un *pezzo* che, per essere pignoli, non vi era stato inserito mai perché non era nella scatola di montaggio, ma in un modo o nell'altro aleggiava nel retro della mente di molti lettori, avendolo io stesso avallato con una frase sibillina. Proverò ad avvicinarmi a questo famigerato *pezzo* lavorando all'indietro, vale a dire: partendo dall'universo di oggi, e facendo scorrere la lancetta dei secondi al contrario.

L'universo attuale è in espansione, e per quanto ci serve qui, non importa esattamente come si espanda. Basti sapere questo: se risaliamo a tempi antichi, doveva essere più denso di adesso, e anche più *caldo*; il *fotone medio* aveva cioè energia maggiore.

Non per nulla, osservando com'era l'universo circa **380.000** anni dopo il Big Bang, misuriamo la sua temperatura attorno ai **5000 °K** e vediamo già le fluttuazioni di densità che, nel tempo, avrebbero dato luogo agli ammassi di galassie.

Sto parlando ovviamente della *parete di fuoco* perché, fino a questo punto del libro, rappresenta l'istante più vicino al Big Bang di cui io abbia discusso in termini sperimentali (nel capitolo 11.2). Un lettore pignolo avrebbe, dunque, il diritto di chiedersi se l'esistenza della parete di fuoco sia una garanzia che *prima* vi sia stato *davvero* un Big Bang. Dubbio legittimo; in fin dei conti, quanto riusciamo a *vedere* è già abbastanza distante nel tempo da questo ipotetico evento iniziale.

Ebbene: nel giro di pochi capitoli riusciremo proprio a dimostrare come ci si possa avvicinare al Big Bang molto più di così, pur restando all'interno della buona fisica sperimentata in laboratorio. Di conseguenza, assumiamo come *ipotesi di lavoro* che la parete di fuoco provenga proprio dal Big Bang, *sfondiamola* e seguiamo a far scorrere il tempo all'indietro.

Se ignoriamo volutamente, in questa fase del discorso, la mancanza di prove sperimentali che quanto sto affermando sia conforme ai reali avvenimenti in epoche tanto remote, immagino che nessuno troverà da ridire se affermo: «Più indietro nel tempo si risale,

maggiori erano densità e temperatura del *plasma* (questo ultimo era, come già abbiamo discusso, lo stato della materia prima dei fatidici **380.000** anni)».

Tanto maggiori che, oltre un certo limite, neppure il plasma poteva esistere, ma la materia si scomponesse in quark, elettroni e neutrini. Prima ancora, non erano presenti neppure le particelle elementari, e dobbiamo pensare a una *zuppa di energia* indifferenziata.

Vedremo tra breve fino a quale istante si può risalire con una ragionevole attendibilità fisica; per ora voglio solo individuare il famoso *pezzo* da sostituire nel Modello d'universo, e non mi faccio scrupoli di arrivare al *tempo zero*.

«Come sarebbe!» sento risuonare da più parti. «Non avevi detto che la scienza è sorda, muta e cieca in merito? E adesso vuoi utilizzare qualcosa d'impossibile da teorizzare per metterlo nel Modello? Questa storia non funziona!»

Calma e sangue freddo: non è mio desiderio farvi bere come nettare quanto segue, ma vi racconto l'opinione diffusa tra i cosmologi perché, al crescere delle osservazioni astronomiche, il fondale del Modello d'universo dovrà forse essere implementato con le idee che sto per illustrare. Di conseguenza, è bene prenderle in considerazione anche se potranno disturbare un po'. Come il solito sto girando con cautela attorno al punto in esame, ma ormai ci sono arrivato.

In un precedente capitolo ho affermato: «Poco dopo il Big Bang, tutto l'UC era contenuto in un volume inferiore a quello di un atomo». Vero, confermo. Ne dobbiamo dedurre che lo stesso Big Bang sia stato *piccolo come un punto*? In un certo senso sì, ma solo per quanto riguarda il *nostro* universo.

(Momento di sconcerto. Cosa diavolo significa? Ci sono *altri* universi oltre al *nostro*? È fantascienza? Costui si è forse convertito d'improvviso alla piramidologia?)

Vi avevo chiesto sangue freddo, no? Ebbene: i cosmologi, laddove non esistano motivi di principio che impediscono di estendere i concetti *ad libitum*, tendono a *generalizzare* perché, fino a questo momento, il criterio si è sempre rivelato un potente metodo d'indagine scientifica.

Certo: in alcuni casi, fare d'ogni erba un fascio ha condotto a falsi paradigmi (vedi Einstein e l'infinità nello spazio e nel tempo dell'*universo statico*), ma di solito rappresenta un buon punto di partenza per progettare altri vani dell'edificio scientifico. E dunque, si generalizza pure quando si parla di Big Bang.

Insomma: non c'è alcuna ragione a priori per teorizzare il Big Bang come *un punto* in senso stretto. È intellettualmente più semplice pensare che, se avessimo fatto scorrere al contrario il film della vita dell'universo non solo all'interno del *nostro microscopico, miserabile UC*, ma anche da distanze infinite in ogni direzione, il *punto* iniziale si sarebbe trasformato in un volume *pur esso infinito* di concentrazione di energia, a densità e temperatura infinite... devo continuare, o avete capito dove sto mirando? No, sono troppo oscuro. Ci riprovo.

Vediamo se così funziona meglio: non intendo affatto negare che il Big Bang dal quale ha avuto origine il *nostro UC* sia partito da *un volumetto molto piccolo* (bisogna cominciare a imporre cautela nel trattare questi argomenti in maniera quantitativa) la cui dimensione, per il momento, ci resta ancora nascosta. Accettato questo, però, si fa *economia di pensiero* se si aggiunge l'ipotesi secondo la quale, *attorno* al volumetto del Big Bang le cui vestigia ricadono sotto le nostre possibilità osservative, ci sia stata una *distesa infinita di Big Bang*

da cui si è generata *un'infinità di universi/i*, ben oltre le nostre più spinte capacità d'intuizione.

Nel nostro Modello d'universo, perciò, i *confini del plastico* in cui corre la locomotiva giocattolo non sono per niente ben tracciati, ma piuttosto *fluidi*, e vanno a sconfinare in un'infinità di altri plastici che non riusciremo mai a esplorare. Vi disturba quest'*infinità d'infiniti* i quali, manco a dirlo, si espandono anche loro all'infinito? Forse non riuscirete a mandarla giù al primo sorso e, se proprio non vi piace, non dovrete nemmeno ingollarla per forza, in virtù di due considerazioni importanti.

La prima è di carattere empirico. Infatti, noi possiamo *vedere* solo il nostro UC, pur se dobbiamo tener presente che, più ci avventuriamo a osservare lontano nello spazio (all'indietro nel tempo), più sorge una dicotomia importante tra il raggio *canonico* dell'UC (13,75 miliardi di anni-luce), e la distanza alla quale sono arrivati *oggi* gli oggetti più lontani (e cioè a distanze maggiori) da noi osservati *come erano allora*. È il discorso un po' complesso che abbiamo affrontato nel capitolo 12.7 con le "*comoving distances*", se ricordate. Di conseguenza, se pure ci fosse qualcosa *fuori*, non ci riguarderebbe: in un certo senso, per noi *non esisterebbe* proprio.

L'altra considerazione è più teorica. Riguarda l'ipotesi che quel "*Super Big Bang*", quel *volume di Big Bang infinito nello spazio* di cui ho fatto cenno poc'anzi, sia stato ovunque *omogeneo e simmetrico*. Quest'ultima ipotesi pare *ragionevole*, ma solo perché, non essendoci motivi a priori in contrario, adottiamo il rasoio di Occam e ci contentiamo.

Resta però un fatto: si tratta pur sempre di un'ipotesi, e nessuna prova sperimentale ne è stata mai raccolta o ne sarà raccolta in futuro, immagino. Diversamente le cose si farebbero assai più complicate, e cercherò di dirne qualcosa più avanti quando cercheremo di andare sul serio oltre il Big Bang *con la fantasia*. Insomma: non preoccupiamocene più di tanto. Aggiungiamo al Modello d'universo un *fondale un po' nebbioso, sfumato*: ne aumenta l'ampiezza all'infinito (nell'ipotesi che sto trattando, e che prende il nome tecnico di "Inflazione infinita", è un fatto dimostrabile matematicamente), ma il *nostro* trenino non ci si andrà a infilare mai.

Ora, possiamo finalmente far *esplosione* questo benedetto Big Bang. Il *nostro*, intendo dire. In un certo senso, e volendo a tutti i costi seguitare a usare modellini mentali, si potrebbe dire così: al *tempo zero*, le tre dimensioni spaziali e quella temporale da noi percepite cominciano a *srotolarsi*, forse a velocità infinita (lo stesso concetto è un po' nebuloso) dal *volumetto* in cui erano contenute, dando origine al normale spazio a quattro dimensioni in cui viviamo. Ricordate, per favore, quanto ho appena scritto all'inizio del paragrafo: questo avvenne all'interno microscopica regione che finirà per dar vita al nostro universo.

Cosa mai potremmo dire di eventuali altri volumetti, sparsi per ogni dove, a densità e temperatura infinite pure loro? Saranno *esplosi* contemporaneamente al nostro? Siamo al *Multiverso*? Domande oziose, almeno per ora: non sappiamo neppure se essi siano mai esistiti. Certo: qualcuno ci lavora sopra accanitamente e ne costruisce modelli minuziosi, ma noi abbiamo capito quale valore assegnare a questi funambolismi *quasi* metafisici, e quel "quasi" è un atto di generosità da parte mia.

Badate bene: in questa parte della Sezione IV in particolare sto cercando di usare immagini *suggestive* per la nostra mentalità, quanto poteva esserlo il "*Fiat lux*" biblico per un pastore caldeo del XII secolo a.C. Probabilmente, le rappresentazioni che vi sottopongo

non sono molto più *scientifiche*, e i posteri vedranno con una certa compassione il **simbolismo** che domina perfino nelle nostre idee più avanzate, poiché molta acqua dovrà passare sotto i ponti prima che la cosmologia sia in grado di trattare in modo davvero quantitativo i tempi e i luoghi di cui sto discorrendo.

Passa il tempo... ne passa pochino, per la verità, e già siamo in grado di tracciare a linee grandi e sfumate uno schizzo che, forse, potrebbe avere un po' di senso. Si tratta di quanto segue: a soli  $5 \times 10^{-44}$  secondi dopo l'esplosione vera e propria, quando la temperatura della radiazione era scesa a circa  $10^{32}$  °K, occorre un primo evento sulla reale occorrenza del quale una scommessina, magari assai modesta, si potrebbe anche fare (vedete? Sto buttando i primi numeri sul tavolo verde del gioco d'azzardo della ricostruzione del Big Bang). Attenzione, perché non è banale.

Quando Max Planck introdusse la sua famosa costante  $h$  riuscì pure a individuare, combinandola opportunamente con altre costanti di natura, una lunghezza, una massa e un tempo **universali**; sembra strano, ma perfino un extraterrestre troverebbe gli stessi valori. Vi rammento, a questo proposito, che il metro, il chilogrammo e il secondo ce li siamo inventati noi, esseri umani, e di sicuro i Vulcaniani o i Klingon usano unità di misura diverse, mentre tutti concorderemmo su quelle di Planck.

In particolare, il **tempo di Planck** è, per l'appunto,  $5 \times 10^{-44}$  secondi e, se aggiungiamo alle tre costanti di natura di cui sopra una quarta, individuata da Boltzmann nella trattazione dei gas, è anche possibile definire una **temperatura di Planck** di cui ho detto sopra, pari a  $10^{32}$  °K. A quest'epoca, il raggio della **bollicina** corrispondente a un UC era circa  $10^{-33}$  cm (la **lunghezza di Planck**, per l'appunto e cioè, banalmente, la distanza percorsa dalla luce in un tempo di Planck). A cosa ci porta tutto ciò?

Bene: i cosmologi addetti a queste faccende mostrano, conti (della serva) alla mano, che prima di quell'istante – per comodità potremmo considerarlo come il **quanto elementare** di tempo, anche se è una definizione che io stesso trovo un po' troppo rudimentale – la Relatività generale e la MQ dovevano **dialogare tra loro**.

In qual modo? Possiamo dire solo che, fino a quel momento, l'interazione gravitazionale, e quelle elettro – debole – forte, si presentavano **circa della stessa intensità**. E, ovviamente, pure la dimensione dell'universo corrispondeva al **quanto elementare** di spazio, un volume di  $10^{-99}$  cm<sup>3</sup>. Avete visto? Siamo riusciti a buttar giù i primi numeri **scientificamente traballanti**, ma **non del tutto balordi**. Tutto questo ci porta a due considerazioni.

La prima: è possibile che allora non esistessero le **cinque** interazioni di natura dei nostri giorni, ma ve ne fosse **una sola, comprensiva di tutte**, a partire dalla repulsione cosmica, e fino alla forza di colore. Volete sapere quale interazione? Vattelappesca! Non ne abbiamo ancora la minima idea. Anzi: siamo pure molto in dubbio sulla reale possibilità di parlare del **"prima"**, se il tempo e lo spazio stessi avanzano solo a **quanti!** Rifletteteci un attimo.

La seconda considerazione è forse più interessante: per quanto una situazione come quella descritta si sia verificata in epoche così **precoci**, non si può escludere a priori che essa abbia lasciato qualche **segnatura** ancor oggi visibile, da individuare per mezzo di osservazioni apposite.

Molti cosmologi scuotono il capo, a questo proposito, ma bisogna ricordare che l'esistenza stessa dell'universo è una conseguenza di quanto avvenne allora. E d'altra parte,

pure nel nucleo di un Buco nero Relatività e **MQ** dialogano, ma lo fanno a nostra insaputa; nel Big Bang, invece, successe qualcosa di cui noi stessi siamo uno dei tanti spettatori, **13,75** miliardi di anni dopo.

Lo so: sto gettando battute qua e là senza il supporto di prove scientifiche di qualche spessore. Essenzialmente vorrei aprire per il lettore uno spiraglio sul modo di lavorare scientifico: ci si pone un obiettivo, magari lontanissimo, e a quello si mira finché non si raggiunge, o finché non si dimostra che l'obiettivo era *sbagliato*.

Nel caso di cui vi sto parlando, se trovassimo davvero qualche traccia sperimentale riguardo a quei famosi  $5 \times 10^{-44}$  secondi, riusciremmo anche ad avere indizi per cominciare a unificare Relatività e **MQ** in un'unica teoria, che potrebbe prendere il nome provvisorio di “*Gravità quantistica*” (traduzione *creativa* di “*Quantum – gravity*”).

A quel punto, diventerebbe lecito risalire in modo *plausibile* a quanto successe durante il Big Bang, dal tempo di Planck in poi. Ai nostri giorni, comunque, è poco più di una fantasia. Anche se i telescopi a neutrini e i rivelatori di onde gravitazionali stanno diventando ormai una realtà di notevole spessore nell'astronomia osservativa, ed è proprio con strumenti del genere che possiamo sperare di risalire sperimentalmente a epoche così remote. Chissà?

Dopo quel primissimo istante – di gran lunga troppo breve se paragonato ai tempi oggi misurabili in laboratorio, e durante il quale le temperature eccedevano talmente quelle raggiungibili negli attuali acceleratori da esser vano pensare di poterci sperimentare sopra – è opinione generalizzata che ci sia stata la *frattura* definitiva tra interazioni relativistiche e quantistiche, con la comparsa di gravità e repulsione cosmica (trattiamole, come convenuto, come una sola interazione), più una seconda interazione la quale, a quell'epoca, esprimeva ancora in forma *unificata* le tre interazioni quantistiche oggi note, quelle del **MS** per capirci.

Sarà vero, sarà falso? La maggioranza dei fisici è incline a ritenere questo modello veramente grezzo, quasi da doversene vergognare. È meglio di niente, però, perché un conto è “*grezzo*”, un altro conto sarebbe “*da buttare*”, e perciò può valer la pena di farci sopra qualche ragionamento. Se volete, stiamo cominciando a raccontare qualcosa di più concreto rispetto al metaforico: “*Fiat lux*”.

Ora, però, basta con le ipotesi più o meno fluide: passiamo a qualcosa di relativamente *solido*, che potrebbe (forse *dovrebbe*) aver lasciato alcune *segnature* osservabili e, in tal caso, sarebbe *scientifico* senza troppe discussioni. Una faccenda un po' peculiare, di cui non siamo ancora in grado di comprendere appieno i dettagli, ma potremmo tentare di inquadrarla nel **MS** dopo averlo tirato per il collo fino a farlo crepare o quasi.

I capitoli seguenti impostano il problema così come lo raccontano molte osservazioni; poi verranno quelli dedicati alla sua soluzione, ritenuta assai probabile scientificamente.

# 19) – L’orizzonte della conoscibilità

## 19.1) – Tanto, troppo omogeneo!

Una delle domande che i cosmologi si pongono da quando è stato possibile cominciare a indagare sul serio la struttura dell’universo, e cioè dal secondo decennio del secolo scorso (anche se il problema era spuntato fuori prima, ma non allontaniamoci troppo dal seminato) è: “Come mai l’universo è tanto *omogeneo*?”

È un discorso già accennato: a prima vista, non ci sembra di capire bene i termini del problema. Omogeneo in che senso? Qui c’è la Terra, e perciò una gran quantità di materia. Non troppo lontano da noi troviamo il Sole, la cui massa è enorme rispetto a quella terrestre. A qualche anno–luce, e quindi dopo enormi spazi vuoti o quasi, ci sono altre stelle e, mettendone assieme qualche centinaio di miliardi (più polvere e gas a non finire), si costruisce l’intera Galassia. Poi ci sono gli Ammassi di galassie, concentrati al loro interno, e separati tra loro da vuoti immensi. Dov’è tutta quest’omogeneità?

Ci sono tante risposte, alla domanda precedente. Ve ne presento un paio, giusto per darvi il *sapore* dell’argomento.

La prima sorge quando applichiamo al Big Bang la **MQ**. Provando a calcolare in qual modo l’universo, appena uscito dal Big Bang, subisse l’effetto delle *fluttuazioni quantistiche* (e le sappiamo calcolare almeno all’ingrosso), arriviamo a concludere che esso doveva essere tempestato da regioni ad altissima densità le quali, al passare del tempo, avrebbero seguito a crescere a dismisura ingoiando tutta la materia circostante, e presentandosi oggi come immani Buchi neri, di dimensioni perfino maggiori rispetto a quelle di un UC. E poi spazi vuoti ancor più immensi: vuoti davvero *assoluti* percorsi, al più, da qualche fotone vagabondo.

Basta darsi un’occhiata intorno, e chiaramente l’universo nelle nostre vicinanze non si presenta così. Anzi: se lo guardiamo veramente su grandi distanze o, meglio ancora, su *enormi volumi*, la sua *omogeneità sostanziale* in densità della materia e sua temperatura appare così evidente da lasciarci sospettare che essa si estenda ben oltre i confini dell’UC, e forse per migliaia di UC adiacenti in ogni direzione.

A meno di non voler ricorrere all’*escamotage* di affermare che, per puro caso, ci troviamo in una *bollicina* sfuggita ai fati orrendi prima descritti. Bollicina circondata poi da tutte le mostruosità delle quali ho appena fatto cenno.

Quest’ultimo espediente non fa scienza, più di quanto ne faccia la pretesa di chi affermi che, tra le infinite combinazioni di possibili universi inospitali consentite dal *modello M* (purtroppo devo tirarlo in ballo spesso, ancor prima di aver avuto la possibilità di raccontarvelo; abbiate pazienza) noi abitiamo nell’unico, o in uno dei pochissimi, in cui è possibile la vita. Fin dalle prime pagine del libro, però, ho continuato a bombardarvi col messaggio secondo cui non si fa scienza se ci basiamo sui “*potrebbe essere...*”, e mantengo il punto.

Tra l'altro, sempre con varianti del discorso, i cosmologi hanno costruito una quantità di argomenti abbastanza mastodontici, e convincenti sul piano scientifico (ve ne dico giusto un altro: perché  $\Omega \sim 1$  con un universo placidamente euclideo e non, per esempio,  $\Omega = 10^{106839}$  oppure  $\Omega = 10^{-344257}$ ?). Restano ormai pochi dubbi sul fatto che l'osservata omogeneità, e la *piattezza* (sempre in senso euclideo) dell'universo siano frutto, sulla base della fisica conosciuta, di un caso troppo improbabile perché valga la pena di prenderlo in considerazione.

Di conseguenza, deve esistere qualche altra legge di natura ancora non scoperta o ben compresa, dalla quale discende la struttura *antropica* del cosmo, ossia *adeguata all'esistenza degli esseri umani* (*ανθρωποι* in greco), e discetteremo pure su questo verso la fine del libro.

Un ulteriore indicatore di *omogeneità* è ancor più singolare e *intellettualmente preciso*, poiché si può quantificare con un conto della serva, e pone una domanda alla quale non c'è risposta (almeno oggi).

Rammentate quando vi parlai delle macchie calde sulla parete di fuoco, affermando che il loro raggio era fissato dalle dimensioni dell'UC quando esse si formarono e cioè, per l'appunto, **380.000** anni-luce? Le abbiamo usate come *righello cosmico* e, siccome se ne vedono proprio tante, possiamo farci sopra statistica e misurare direttamente  $\Omega \sim 1$ .

Ancora: la differenza di temperatura tra le macchie calde e quelle fredde è infinitesima; circa **1/70.000** di °K su una media di **2,73** °K. Ricordate pure questo? Bene: comunque l'abbiamo menzionato, e adesso ci ricameremo sopra.

Mettiamo assieme tutte queste informazioni, e arriviamo a una conclusione sorprendente. L'argomento di base è: sulla parete di fuoco vediamo una pletora di regioni, calde o fredde che siano, le quali, quando l'universo aveva un'età di soli **380.000** anni, *erano ancora tutti UC separati e indipendenti l'uno dall'altro*. Fin qui ci dovremmo essere: ogni macchia aveva le dimensioni di un UC dell'epoca, e se ne contano a migliaia.

Il problema sorge a questo punto. Dall'istante Big Bang e fino a quel momento, *neanche un fotone poteva essere stato scambiato tra una macchia calda o fredda e l'altra*, fossero pure *contigue*, poiché non erano in grado trasmettersi informazioni – luce compresa – da un UC all'altro. Non per niente, l'UC si chiama “Causale” ed era “*causale*” anche allora, per tutti i diavoli! Mi seguite anche fino a questo punto? Sto spezzettando il problema in brevi paragrafi, proprio allo scopo di consentirvi di dover rileggere solo l'ultimo, se vi sta sfuggendo il concetto.

Ci siamo arrivati. Malgrado questa *separazione inviolabile* degli innumerevoli UC **che possiamo contare alla Ricombinazione**, la loro temperatura era *quasi esattamente la stessa* entro una parte su settantamila. Com'era possibile tutto ciò? Pensateci pure voi: una serie di UC che all'epoca *non si conoscevano ancora l'un l'altro* erano già *omogenei tra loro* a un livello così spinto.

Non vi pare strano? E non venitemi a pontificare in calcio d'angolo che, sì, certo, per forza erano omogenei: era stato omogeneo pure il Big Bang, e quindi tutte le sue conseguenze dovevano rispecchiare *per costruzione* quest'omogeneità. È un'ipotesi *ad hoc* priva di valore scientifico. E comunque, le fluttuazioni quantistiche iniziali le abbiamo scordate?

Forse è necessario andare a frugare ai confini della scienza meglio (o peggio) conosciuta, per cercare qualche indizio del principio fondamentale, della legge di natura che ha costretto una quantità enorme di UC tutto attorno a noi, pure a distanze assai considerevoli,

a diventare ben presto, prima dei canonici **380.000** anni – e forse *molto* prima – praticamente *omogenei* tra loro e col nostro UC.

Oltre i bordi del quale, se questa benedetta legge esiste davvero, non ci aspettiamo più di trovare giganteschi Buchi neri o vuoti orribili, ma altri universi pressoché omogenei come li vediamo qui, con le galassie e i vuoti, proprio come rilevato poc'anzi.

I signori fisici vogliono guadagnarsi il pane? Hanno qualche idea su quanto avvenne subito dopo il Big Bang, per far sì che fossero poi rispettate le condizioni osservate oggi e (troppo) brevemente riassunte sopra? Forse sì, forse qualcosa fanno perfino i fisici e, sebbene i fili della matassa siano ancora ingarbugliati e ne pendano un bel po' non annodati, un'idea di massima è venuta fuori: un'idea *ragionevolmente credibile* battezzata ormai da una quarantina d'anni: "*Inflazione*". Le dedicheremo il prossimo capitolo.

## 19.2) – Un Big Bang piccolo piccolo

Andiamo per gradi, perché il discorso non è più (da un bel po' di pagine, purtroppo) banalissimo. Sul problema di base della fisica contemporanea abbiamo già sbattuto il naso diverse volte: Relatività e **MQ** non dialogano tra loro, e di conseguenza non è finora possibile trattare l'interazione gravitazionale in termini di teoria quantistica dei campi (con i **gravitoni virtuali**, se vi diletate di pornografia scientifica), o le interazioni quantistiche in termini di curvature spaziali (ci prova il **modello M**, e vedremo con quali risultati).

Di conseguenza – e questo dovrebbe ormai esserci chiaro – tartufare tra le primissime fasi del Big Bang, quando gravità ed effetti quantistici giocavano con lo stesso pallone non è ancora possibile, e dobbiamo andare oltre.

Il problema successivo, però, è un tantino più abordabile almeno alla lontana: come si fa a integrare tra loro **tutte e tre le interazioni quantistiche in una sola**, “eletto – debole – forte”? I fisici avevano, dagli anni '80 del secolo scorso, tentato di collegarsi ai discorsi sulla **supersimmetria**. Purtroppo, sembra che Madre natura abbia deciso altrimenti, e sia fatta la sua volontà. Ora che **LHC** lavora a pieno regime da qualche anno, infatti, le tanto attese **particelle supersimmetriche** si sono ben guardate dal fare capolino. La scoperta **che non ci sono proprio**, comunque, dovrebbe fornirci indizi consistenti di dove altro andare a cercare.

D'altronde, è pur vero che alcuni modelli di **supersimmetria di ordine superiore**, per mezzo del quale i fisici sperano ancora di giungere a manipolare una sorta di **Modello Standard esteso**, non si possono escludere sperimentalmente, anche se la loro “**bruttezza fisica e matematica**”, in contrasto all'eleganza della supersimmetria semplice, fa inorridire almeno i matematici. I quali, finora, ci sono sembrati disposti a mandare giù di tutto.

Anzi: qui lo dico e qui lo nego perché il soggetto è ancora fonte di studio: quella trottolina elettrificata che è il **muone** (elettrone pesante) sembra comportarsi un po' diversamente, come magnetino, da quanto la teoria – attenzione: **una** teoria – vorrebbe. Esistono anche altri modi di calcolare il momento magnetico del muone, e questi sono più in accordo con i dati sperimentali. E anche qui la **supersimmetria semplice** sembra essere esclusa. Ma occorrerà ancora pazienza, misure e calcoli prima di affermare con certezza che questo momento magnetico anomalo venga verificato, e che sia dimostrato che non può essere ridotto al **MS**. È un regalino – forse provvisorio – che ci fa la scienza, sperando che il XXI secolo inizi con una grande novità. Ma lasciamo qui l'argomento: avevo promesso di fermarmi al 2020, e invece sto già sbordando oltre.

Sta di fatto che, per energie troppo maggiori rispetto a quelle alle quali è oggi possibile sperimentare, ci si aspetta **l'unificazione dell'interazione eletto – debole con quella di colore**, e forse la supersimmetria non è l'unica strada per arrivarci. Dal momento che sono finito col naso nella melassa (in buona compagnia, però) farò finta che la supersimmetria esista, come “**Modello – catorcio**” per andare avanti nel discorso, ma liberandomi dall'onere di descriverla. Comodo, no? Ma sapeste quante volte la fisica è progredita in modi simili...

Questa **super – unificazione** fra le tre forze si **scollerebbe** nel quadro oggi conosciuto appena  $10^{-36}$  secondi dopo il Big Bang, e la temperatura corrispondente dell'universo primordiale sarebbe  $10^{27}$  °K. Le estensioni provvisorie del **MS** sembrano suggerire questi

numeri e così, a braccio, vale la pena di seguire la linea di ragionamento, perché non è del tutto campata nel vuoto.

Ora veniamo al punto: mentre le tre forze quantistiche erano unificate, e cioè durante i primi  $10^{-36}$  secondi dopo il Big Bang, la teoria (molto) provvisoria prevede l'esistenza di **un vuoto sovraccarico di energia**. Nel momento in cui la forza unica si divise in due (quello elettro – debole da un lato, e quella di colore dall'altro), il vuoto **si liberò di questa energia in eccesso**.

In qual modo poté farlo? In fisica si parla di **pressione negativa** che spinse per alcuni istanti (tra poche righe vedremo qualche numero) l'espansione dell'universo, accelerandola di botto in modo spaventoso.

Un modello un po' tirato per i capelli (per me è perfino sbagliato, ma contentiamoci), forse di qualche aiuto intuitivo, è il seguente: se in ogni volumetto **unitario** di spazio c'era inizialmente l'energia  $E$ , e questo valore doveva scendere a un livello molto minore definito  $E'$ , qual era la strada da battere? **Espandere** il volumetto iniziale fino a che l'energia iniziale  $E$  si **diluisse** abbastanza, e il volume unitario finale (un'enormità rispetto a quello iniziale) contenesse l'energia  $E'$ .

Riuscite a intravedere il concetto? È come diluire un colore col solvente adatto. Proviamo a buttar giù l'analogia, se mi promettete di non dire a nessuno chi ve l'ha raccontata.

Se si mette un millilitro (e cioè un centimetro cubo) di acquerello concentrato (l'energia  $E$ ) in una grande vasca, e ci si versano dentro cento litri d'acqua, si ha una diluizione enorme del colore. Nel caso in esame, un millilitro della soluzione finale contiene una quantità di acquerello (l'energia  $E'$ ) centomila volte inferiore a quanta ne contenesse il millilitro iniziale di colore pieno. Per passare dalla prima situazione alla seconda, però, abbiamo dovuto aggiungere tantissima acqua limpida (nuovo spazio).

Ecco: adesso arrivano i numeri **cosmici**. Ovviamente si tratta ancora d'ipotesi di lavoro e poco più, poiché la teoria delle tre forze unificate non c'è e la supersimmetria nemmeno, ragion per cui stiamo tirando il collo al **MS**. Ebbene: nell'intervallo temporale intercorso tra  $10^{-36}$  e  $10^{-32}$  secondi, quando si raggiunse il nuovo equilibrio duraturo (fino ai nostri giorni), si calcola che ciascun volumetto dell'universo uscito dal Big Bang si sia gonfiato **almeno  $10^{75}$  volte o anche molto di più!**

Insomma; all'età di  $10^{-32}$  secondi l'universo uscì da una fase di espansione terrificante e, badate bene: questa espansione era stata abbondantemente (come faccio a dirlo? mi butto!) **superluminale**. I cosmologi la definiscono, per l'appunto, "**Inflazione**", e adesso prestate molta attenzione al ragionamento seguente, perché continua a essere un po' intricato.

Ciascuno delle centinaia e centinaia di UC che oggi vediamo distribuiti sulla Parete di fuoco, quando cominciò l'inflazione aveva un raggio di  $3 \times 10^{-26}$  centimetri (l'età moltiplicata per la velocità della luce, come per definizione). Gonfiandosi tumultuosamente, lo spazio contenuto inizialmente al suo interno si trovò, al termine dell'inflazione, distribuito in un volume avente circa **un millimetro** di raggio. Nel frattempo, però, **il raggio di ogni UC era salito solo fino a  $3 \times 10^{-22}$  centimetri**.

Qui è il **busillis**: lo spazio (con tutto il suo contenuto) che  $10^{-36}$  secondi dopo il Big Bang era all'interno di **un solo UC**, si è trovato sparpagliato, dopo l'inflazione, in circa  $10^{75}$  UC dell'epoca **o anche più**, a causa della breve ma violentissima espansione superluminale. Poi, finita l'inflazione, l'espansione di ogni singolo UC è ripresa al ritmo normale  $d$   $c$ .

Questo **secondo big bang** con le minuscole, infinitamente *più debole* del primo, se ci pensate bene risolve ogni problema di **omogeneità** in senso lato sul tipo di quelli sollevati nella sezione precedente. Abbiamo trovato la vera e propria **Legge di natura** che costringe l'UC all'omogeneità. In qual modo? Vediamo.

Vi porto solo qualche esempio; gli altri potrete costruirveli da soli, perché la strada è semplice, una volta ingoiata l'inflazione.

Prendiamo la geometria del cosmo, perfettamente euclidea nei limiti in cui oggi è misurabile. E, ora che mi ricordo, da qualche parte avevamo un pianimale... eccolo qui, sta sonnecchiando. Acchiappiamolo di nuovo, e spiattelliamolo sulla superficie di un palloncino di gomma (robusta, capirete poi perché).

Chiediamo alla nostra amata bestiola di misurare, per mezzo di triangoli, il tipo di geometria del suo nuovo universo. Lui, giocando con squadre e goniometri, troverà somme degli angoli interni ben maggiori di  $180^\circ$ ; qualcosa di somigliante a una sfera, magari un po' schiacciata e, di conseguenza, dedurrà di trovarsi su una superficie ellissoidale, irregolare. In prima approssimazione ha colto nel segno, e non credo ci sia bisogno di una figurina per spiegare cosa succede: ne abbiamo viste abbastanza nel capitolo 9.2.

Adesso chiediamogli di aspettare un po', e cominciamo a gonfiare il pallone. Gonfia che ti rigonfia, il volume aumenta dieci, cento, mille, diciamo diecimila volte per fare cifra tonda. Per motivi che uno scolaro di terza media ben comprende, la superficie sarà aumentata di mille volte e a noi, dall'esterno, apparirà abbastanza **spianata** rispetto a prima. Questo è il momento di suggerire al pianimale di misurare nuovamente la geometria del mondo in cui si trova.

Stavolta, la somma degli angoli interni dei suoi triangoli, se si limita a costruirne relativamente piccoli come nel caso precedente, sarà **appena appena maggiore di  $180^\circ$** , ma di poco. La bestiola, non avendo a disposizione apparecchi di misura accuratissimi (con un goniometro non si apprezza più del mezzo grado), sospetterà nuovamente di trovarsi in un mondo **più o meno sferico**, ma di raggio grandissimo, e altro non saprà dirci.

Gonfiamo ancora il pallone e facciamo sì che il suo volume aumenti ancora diecimila volte (capito, ora, perché la gomma doveva essere robusta?). La superficie sarà cresciuta di un altro fattore mille, e cioè un milione di volte rispetto alle prime misure del pianimale. Al quale chiediamo ancora di misurare la geometria del suo mondo.

Lui fa quello che può, povera bestia, ma non gli si può chiedere l'impossibile. La somma degli angoli interni di ogni triangolo di dimensioni compatibili con la sua strumentazione è sempre  $180^\circ$ , almeno entro gli errori di misura. E così, il suo responso sarà: «Vivo su una superficie che in prima approssimazione sembra piana, euclidea».

Lasciata l'analogia bidimensionale, il rigonfiarsi enorme dell'universo (il quale potrebbe anche essere uscito dal Big Bang con geometria sferica o iperbolica), ha condotto lo spazio a **spianarsi** in maniera tale per cui, a noi che ci viviamo dentro, anche il più grande dei triangoli cosmici appare euclideo entro gli errori di misura.

Di conseguenza,  $\Omega = 1,00$  perché, sebbene l'universo conservi *in linea di principio* lo stesso tipo di geometria con cui è nato, la deviazione di  $\Omega$  rispetto a  $1$  comparirà, magari, nella decima, o ventesima, o trentesima cifra decimale, ben oltre quanto le osservazioni oggi a noi consentite permettano di misurare.

Il secondo esempio di come l'inflazione risolva tanti problemi riguarda le fluttuazioni quantistiche iniziali, dalle quali avrebbero avuto origine, alla nostra epoca, universi o *del tutto pieni* (Buchi neri), o *del tutto vuoti*. Attenzione a quanto sto per affermare, perché non c'è trucco, non c'è inganno.

Ebbene sì, signori: l'espansione *superluminale* dello spazio *apre anche i Buchi neri!* E perciò, gli eventuali Buchi neri primordiali che si stessero formando proprio allora sono stati *aperti*, conducendo a regioni enormi di spazio in cui la densità dell'energia (la materia era ancora di là da venire) fosse *media*, con minuscole fluttuazioni residue di poca importanza. Proprio quanto serve ai cosmologi per costruire al computer un universo dalle apparenze molto simili al nostro. Dovrebbe bastare, no?

Non è vero, ancora non basta. C'è il problema di come mai le macchie calde primordiali abbiano tutte la stessa temperatura, malgrado appartenessero a UC diversi e lontani tra loro quando la loro apparenza fu fissata per sempre sulla parete di fuoco.

In Figura 19.1 ho riportato uno schemino semplice rielaborato, manco a dirlo, da Internet. Ve lo spiegherò e rispiegherò in diverse riprese.

Si parte dalla pallina grigia in alto a sinistra: un volumetto di spazio il quale, trovandosi ben all'interno dei bordi del proprio UC (cerchio rosso), non ha avuto difficoltà a raggiungere l'equilibrio termico, e cioè la stessa temperatura in ogni suo punto, scambiando fotoni tra le zone inizialmente più calde e quelle più fredde.

Poi, all'improvviso, scatta una piccola inflazione che fa espandere una decina di volte, a velocità superiore a quella della luce, il volumetto interno a questa pallina. Il salto da una configurazione all'altra avviene in un tempo brevissimo e, intanto, l'UC iniziale fa in tempo a dilatarsi poco o niente (l'altro cerchio rosso).

Giungiamo così alla sfera grande, in basso a destra: la temperatura è dappertutto la stessa, perché così era già per la sferetta di partenza. Chi non sa che c'è stata l'inflazione, però, non si capacita di come abbiano fatto le regioni *esterne al nuovo UC* a raggiungere la

stessa temperatura. Il gioco è fatto

Qui, un lettore molto pignolo mi ferma di autorità, e debbo dargli ragione. Per come sto raccontando la cosa, manca un chiarimento fondamentale. È scritto tra le righe, ma non sarà male esplicitarlo.

«Tutte le conclusioni della Sezione II» dice il lettore, «portano alla nozione secondo la quale, fuori dei bordi dell'UC, l'espansione dello spazio è *superluminale*, per cui eventuali oggetti a venti, cinquanta, cento miliardi di anni –

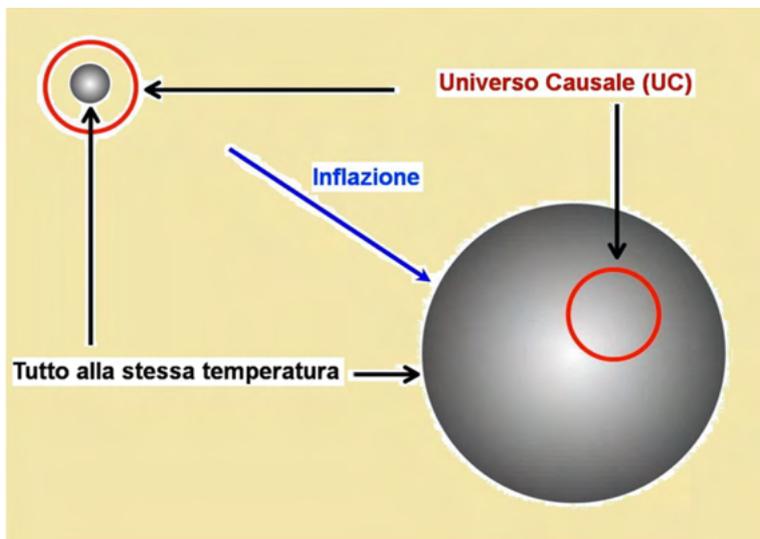


Figura 19.1

luce da noi, si allontanerebbero con velocità maggiore di  $c$ . Stando così le cose, perché stiamo insistendo su una presunta differenza tra *inflazione* e *normale espansione*? In fin dei conti, anche quest'ultima è superluminale, fuori dell'UC!»

Domanda ben posta, ma la chiave per rispondere è proprio nell'ultima frase. La normale espansione cosmica è superluminale *fuori* dell'UC; l'inflazione, al contrario, è stata superluminale *dentro*! Vale a dire: per un brevissimo istante, un volumetto di spazio che chiameremo  $V$ , il quale si trovava ben all'interno di un UC, e anzi ne rappresentava un pezzettino piccolissimo, pieno di energia e tutto isoterma o quasi, è stato rigonfiato e ha *tracimato ben oltre i confini* del suo UC di origine.

Quando questa *esplosione* si è placata, tutto il volume dell'UC di partenza era ricolmo di cosa? Dei residui del volumetto  $V$  e anzi: ben al di fuori dei bordi dell'UC, per distanze enormi, tutto lo spazio si era allineato alle proprietà di  $V$ .

Guardando *da lontano* (in senso figurato), un super – astronomo avrebbe osservato una distesa sterminata di UC tutti identici o quasi, e si sarebbe chiesto come diavolo poteva darsi una configurazione del genere, trattandosi di UC separati che, per definizione, non potevano trasmettersi l'un l'altro alcuna informazione. È il nostro stesso problema con la parete di fuoco. Ci siamo, ora?

Insomma: l'inflazione risolve tutti i problemi di omogeneità dell'universo visti nella sezione precedente, e molti altri ancora dei quali non ho fatto parola. Possiamo ora chiederci se tutto questo bel risultato sia gratis, o se ci sia un prezzo da pagare.

In verità, ci sono due conti da saldare: uno teorico e uno sperimentale. Quello teorico è ovvio: dobbiamo ipotizzare l'esistenza di questo non meglio identificato *campo d'energia* che, al *distaccarsi* dell'interazione forte da quella elettro – debole, piomba da un livello all'altro liberando tutta l'energia necessaria a innescare l'inflazione stessa.

Esistono buoni motivi teorici per supporre che un tale campo debba esistere? Gli addetti ai lavori sono *quasi* tutti convinti di sì, e prendiamo per buona la loro parola senza chiedere altre spiegazioni. Tranne una in particolare, chiaramente, e cioè quella relativa al più importante dei due conti da saldare: l'aspetto osservativo, sperimentale. Nell'universo dei nostri giorni, sono rimaste *segnature* chiare dell'inflazione, di là dei suoi effetti omogeneizzanti? Forse. Vediamo un po'.

Nell'ottobre del **2011**, il gruppo di scienziati addetti a elaborare i risultati ottenuti dalla sonda spaziale **WMAP**, quella che ha fornito per la prima volta i dettagli della parete di fuoco e ha consentito di misurare il famigerato *triangolo cosmico*, si sono sbilanciati. Al limite delle possibilità osservative, hanno ritenuto di poter individuare una distribuzione delle strutture cosmiche più piccole, un po' diversa da quella prevista se l'inflazione non ci fosse stata, e concorde con una famiglia di modelli d'inflazione proposti già da qualche tempo.

Passa il tempo e passano le sonde spaziali. Nel **2015**, sulla base dei risultati più precisi di **PLANCK** ( $\Omega = 1,000 \pm 0,005$ ), si è capito che il problema sperimentale è molto delicato. Infatti, attorno alla nostra Galassia, sono state individuate nubi di gas e polvere che falsano l'interpretazione delle misure precedenti. C'è ancora da lavorare.

Possiamo sentirci tranquilli, allora? Io sono un conservatore: ci credo perché, senza inflazione, troppe cose non potrebbero essere spiegate, ma credevo anche nella supersimmetria... Pazienza, dunque. Nel frattempo, aggiungo due considerazioni conclusive.

La prima riguarda direttamente le possibilità di osservare i primi istanti di vita dell'universo. Stante la dilatazione enorme dello spazio durante l'inflazione, e i processi fisici che vi hanno avuto luogo (raffreddamento causato dall'espansione, nuovo riscaldamento per rilascio dell'energia del vuoto, e così via), questo evento ha in pratica *cancellato* ogni memoria di quanto avvenne nelle fasi precedenti.

L'inflazione viene perciò considerata dai cosmologi come un vero e proprio *orizzonte* osservativo, che preclude (forse per sempre) l'osservazione di eventuali *signature* risalenti a tempi anteriori. Vale a dire: lo studio sperimentale dell'evoluzione dell'universo ha senso solo dalle ultime fasi dell'inflazione in poi. Quanto avvenne prima è nascosto dietro un sipario e, almeno per il momento, è assai poco *galileiano*.

La seconda e ultima considerazione – e questa s'incastra subito nel nostro Modello d'universo –, è forse un tantino più *metafisica*. L'eventuale *bollicina* post - Big Bang dalla quale ha avuto origine l'UC, sostanzialmente *omogenea* con quanto osserviamo attorno a noi, a causa dell'inflazione è diventata *enormemente più grande* dell'UC stesso. Al di fuori di quest'ultimo, e per un volume almeno  $10^{75}$  volte maggiore, si stende una *gigantesca bolla di universo* avente la stessa temperatura, la stessa densità, le stesse apparenze (statisticamente parlando) del cosmo nei nostri dintorni.

Vedete come, pian pianino, sembra inevitabile arrivare a concludere che l'universo nel suo insieme – e il plastico in cui corre la nostra locomotiva giocattolo – è *davvero grande*; molto più di quanto il nostro microscopico UC lascerebbe pensare!

## 20) – Tanta buona fisica

### 20.1) – Poi non succede più nulla...

...per molto tempo. L'universo, dopo il botto dell'inflazione, ha ripreso il suo ritmo di espansione regolare. E questo *lungo* periodo di calma dura circa  $10^{-12}$  secondi, che sono pochini (quindi non prendetevela troppo comoda), ma ben più dei  $10^{-32}$  secondi di durata dell'inflazione. Lo spazio è un inferno di radiazione, nel quale agiscono:

La repulsione cosmica (per ora trascurabile)

L'interazione gravitazionale (ancora abbastanza importante)

L'interazione di colore (importantissima)

L'interazione elettro – debole (importantissima).

Ora tocca all'ultima di quelle elencate qui sopra. All'età di  $10^{-12}$  secondi l'interazione debole e quella elettromagnetica, si *separano* e compaiono quindi, finalmente, la normale interazione elettromagnetica con la quale abbiamo familiarità, e quella nucleare debole con i suoi *mediatori* pesantissimi *W* e *Z*.

Qui è necessario introdurre una considerazione, a parer mio molto importante. Come ho già accennato, e come vale la pena di ripetere, nei grandi acceleratori di particelle siamo in grado di raggiungere la *temperatura* esistente nell'universo a quel momento. Di conseguenza, possiamo *sperimentare* quali fossero, in tempi così remoti, le condizioni di materia ed energia, con una limitazione di cui dirò tra un momento. Le nostre ricostruzioni di quanto avvenne da  $10^{-12}$  secondi in poi sono perciò *buona fisica galileiana*: nulla di campato in aria.

La limitazione è che, mentre possiamo raggiungere le *temperature* alle quali l'interazione elettro – debole si è separata in due, ancora non riusciamo a riprodurre le *densità* relative. E questo ci costringe a usare la teoria in modo *ragionevolmente corretto, ma non certo al 100%*. Buoni progressi si stanno facendo in LHC per mezzo di collisioni tra nuclei di piombo, e ci stiamo avvicinando pian piano a trasformare la teoria in pratica.

Le vedute correnti sostengono che, all'epoca, facessero la loro comparsa per la prima volta i *frammenti di materia elementari*: quark, elettroni e neutrini (assieme alle antiparticelle relative). Il brodo conteneva una miscela di tutto, *mediatori* compresi, e le collisioni frequentissime conducevano a trasmutazioni di ogni genere.

Proprio in questa fase, i quark delle due famiglie superiori devono aver giocato un qualche ruolo nell'evoluzione cosmica, pur se non siamo ancora in grado di intendere quale. I fisici sono al lavoro: stanno costruendo acceleratori dedicati specificamente alla costruzione di aggregati materia / antimateria contenenti quark *strange, charm, bottom* e nei limiti del possibile perfino *top*. Tra una ventina d'anni, forse ne sapremo di più.

Mi piacerebbe sorvolare sul discorso, ma quando un problema è aperto e di grosse proporzioni, non se ne può tacere. Ho parlato di materia e antimateria. Nel capitolo 17.2 ho

già accennato che l'interazione debole sembra, in modo non ancora del tutto chiaro, *preferire la materia all'antimateria*. Qui aggiungerò qualcosa.

Primo punto: se ci limitiamo a *contare* quanti quark e quanti fotoni si trovano oggi per unità di volume (su scala cosmica, non all'interno di un blocchetto di piombo), il rapporto tra i due numeri, senza andare troppo per il sottile, è circa *uno su un miliardo*. Non ve lo racconto per erudizione; è un numero importante. Cosa significa tutto ciò?

Ebbene: quando hanno fatto la prima comparsa le particelle elementari, il plasma era così caldo e denso, da mantenere *in equilibrio* tutte le *specie* presenti, fossero fotoni, gluoni, mediatori *W* e *Z*, neutrini eccetera. Ciò poteva avvenire perché l'energia a disposizione era immensa, e nelle collisioni tra coppie di *oggetti* sopra elencati si poteva *creare* (leggi: *trasformare*) qualunque cosa con uguale probabilità.

Di conseguenza, per fare qualche esempio, c'erano tanti *antiquark top*, quanti neutrini elettronici, quanti *fotoni*. Ecco il punto: siccome, da un certo momento in poi i fotoni sono rimasti mentre le altre particelle sono – in buona misura – scomparse, il numero attuale di fotoni è ancora uguale al numero di ogni altra particella e mediatore *in quei tempi*.

Ebbene: a quell'epoca, materia e antimateria dovevano essere presenti in proporzione uguale, così come per tutto il resto. Tanti quark, tanti antiquark. Poi, in meno di un batter di ciglia, allo scendere della temperatura, le collisioni hanno smesso di generare le particelle più pesanti. Resta però il fatto che, se in seguito non fossero avvenuti processi di distruzione di massa dei quark, oggi dovremmo trovare tanti quark quanti sono i fotoni, mentre ne troviamo solo *uno su un miliardo*.

Quand'è che i quark si sono annichilati quasi tutti, tranne uno su un miliardo? Sempre nei primi istanti, quando erano a contatto con gli antiquark a causa della densità elevatissima, circa  $10^{-6}$  s dopo il Big Bang. Riflettiamo su questa strana sparizione *asimmetrica*: senza vincoli supplementari, quark e antiquark sarebbero stati in ugual numero, e oggi non dovrebbe restare materia proprio per nulla. Ora la conclusione: se c'è un quark per ogni miliardo di fotoni, vuol dire che, quando l'equilibrio con i fotoni è andato perduto, per ogni miliardo di quark, gli antiquark erano *un miliardo meno uno*.

Tutto ciò, però, non poteva essere un esito della pura e semplice casualità poiché, in assenza di una precisa legge di natura che *preferisca i quark*, materia e antimateria dovevano essere presenti in proporzione identica.

Fu il fisico russo Sacharov a capire per primo, attorno al 1967, quali condizioni fossero necessarie affinché la materia prevalesse (seppur di così poco) nell'universo attuale. Tra queste, figura la strana asimmetria destra – sinistra (capitolo 16.7) mostrata dall'interazione debole, e altre ancora. L'ingrediente primario, però, è il requisito di un qualche genere di processo ancora non identificato e, forse, da trovare nelle estensioni future del **MS**, in grado di trasformare *quark in leptoni*.

Ovviamente, questo processo deve anch'esso privilegiare la materia. Vale a dire: per ogni miliardo di quark che se ne vanno in leptoni, *un miliardo e uno* antiquark devono trasformarsi in antileptoni. Così resta un quark privo di controparte, e può durare fino a oggi, andando a costruire la materia normale.

Per questo motivo, come vi avevo anticipato, ci *dovrebbero* essere *più antineutrini che neutrini*. Infatti, la trasformazione di un *antiquark in antileptone*, trova il suo sbocco naturale quando l'antileptone diventa un antineutrino. Quest'ultimo è stabile in eterno, la sua

probabilità di collidere con un neutrino e svanire in un lampo di luce è pressoché nulla, e dunque ce lo troveremmo ancora attorno.

Insomma: la simmetria totale tra materia e antimateria nel Big Bang potrebbe esserci anche stata, ma l'antimateria si è incanalata più facilmente verso gli antineutrini, la materia verso i quark. Tutto ciò, a causa di qualche legge di natura ancora sconosciuta ma che deve esistere per forza, e sappiamo pure con quali frequenze interviene: una preferenza di uno su un miliardo in favore dei quark.

Vi sembra metafisica? Non lo è del tutto. In primo luogo, la materia è qui, e dobbiamo spiegare la sua presenza. In secondo luogo, l'interazione debole già soddisfa per conto suo una delle condizioni poste da Sacharov (pur se lo sbilanciamento non è sufficiente a spiegare tutta la materia presente, ma solo una frazione infinitesima).

Col viatico di un mistero ancora aperto, andiamo avanti con l'orologio fino a circa un secondo di vita dell'universo. Nell'evoluzione cosmica, i tempi ai quali avviene qualcosa d'interessante salgono via via di molti ordini di grandezza. Siamo al termine delle annichilazioni tra particelle e antiparticelle, con un residuo netto di materia e con il prevalere dell'interazione di colore sui quark (ormai solo *up* e *down*) rimasti.

Già da prima, i quark si sono raggruppati a tre a tre formando protoni e neutroni (essenzialmente protoni). È la fine dell'esistenza dei quark liberi e l'inizio della materia come la conosciamo, sia pure sotto forma di plasma caldissimo: molti miliardi di gradi. I protoni, infatti, sono già di per sé i nuclei del gas idrogeno, l'elemento più diffuso nel cosmo, e tra un po' di tempo (non pochissimo: **380.000** anni) cattureranno gli elettroni rimasti liberi nella zuppa per formare normali atomi.

Intanto, però... ma questo è un altro discorso interessante, e richiede una sezione apposita.

## 20.2) – La nucleosintesi primordiale

Abbiamo dunque, tra le mani, questo plasma d'idrogeno ad altissima temperatura. Cosa vogliamo farne? Siccome pure la densità è molto alta, in fin dei conti ci viene in mente che queste condizioni fisico – chimiche possano somigliare un po' a quelle esistenti nel centro delle stelle. Ora: laggiù quali sono i processi più rilevanti? Semplice: la fusione nucleare o *nucleosintesi*. E fusione sia!

Il primo passo è quello di agganciare due protoni tra loro facendo, al contempo, scattare l'interazione debole che ne trasformerà uno in neutrone. Ecco formato un nucleo di deuterio. Questo è un processo relativamente *lento* poiché la probabilità che, nell'istante brevissimo in cui due protoni si scontrano avvenga anche il decadimento di uno dei due in neutrone, è mediata per l'appunto dall'interazione debole, e già sappiamo come quest'ultima sia per lo meno un po' *reticente*.

Ora basta agganciare un nuovo protone, e si arriva all' ${}^3\text{He}$ , la forma *leggera* del normale elio.

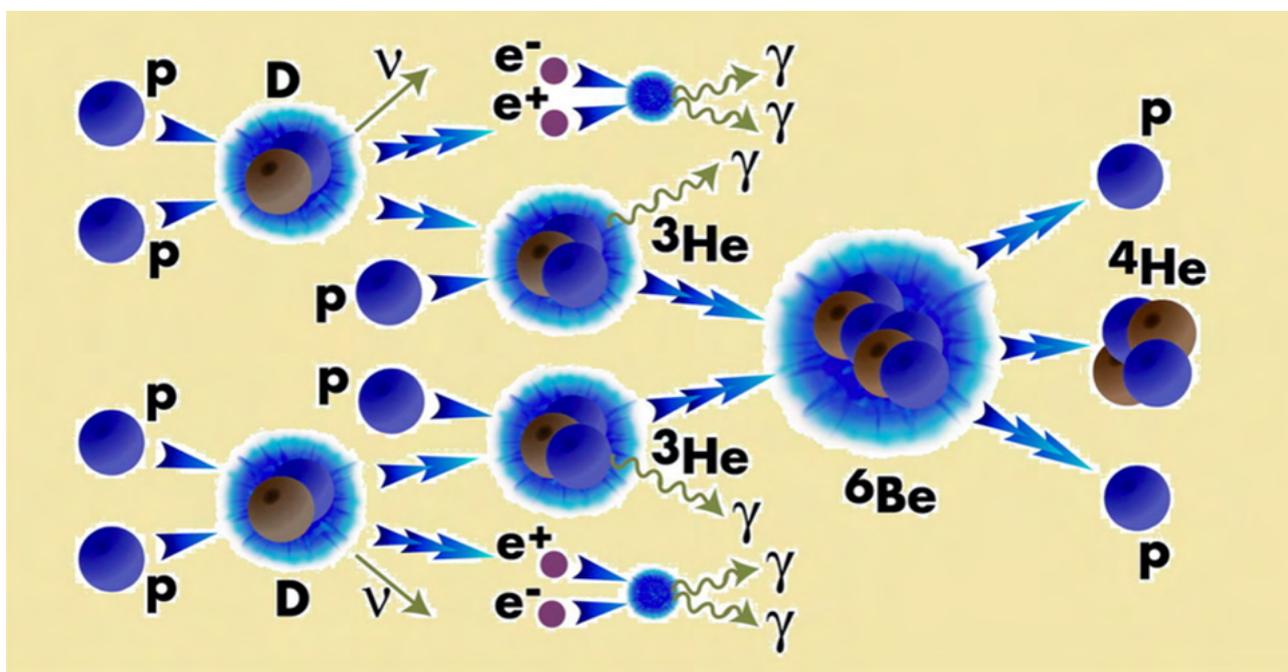


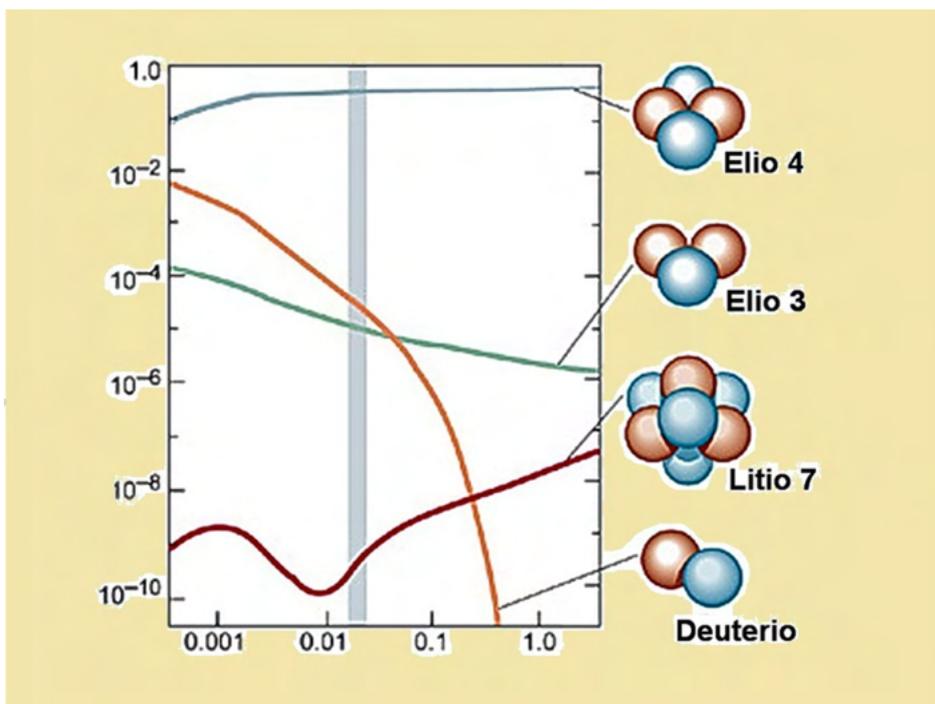
Figura 20.1

Da ultimo, due nuclei di  ${}^3\text{He}$  fondono assieme, creando per un istante una forma molto instabile di berillio: il  ${}^6\text{Be}$ . Questo sopravvive frazioni minuscole di secondo, poi si spacca in un nucleo di  ${}^4\text{He}$  e restituisce all'ambiente due protoni. La catena di reazioni che avviene all'interno del Sole, mostrata in Figura 20.1.

«A questo punto», verrebbe da dirsi «il processo seguirà. L'elio fonderà con se stesso in  ${}^8\text{Be}$  e quest'ultimo nucleo, agganciandone un terzo di elio, formerà il  ${}^{12}\text{C}$  e poi, in cascata, tutti gli altri elementi conosciuti». Mica tanto! E perché?

Bene: il nucleo di  ${}^8\text{Be}$  è una sorta di scherzo di natura. Si forma, è vero, ma poi si disintegra in un tempo così breve (meno di un decimilionesimo di miliardesimo di secondo), risputando fuori i due nuclei di elio intatti, ed è improbabile che, durante la sua vita effimera, riesca a catturare il terzo nucleo di elio per trasformarsi in  ${}^{12}\text{C}$ .

Di conseguenza, durante questa fase del Big Bang, con la temperatura e la densità in progressiva diminuzione al passare del tempo, il bruciamento nucleare si è arrestato all'elio. Dopo un centinaio di secondi (duecento a dir tanto), infatti, il plasma si era raffreddato ed era divenuto abbastanza tenue, e la nucleosintesi ha avuto termine lasciando la chimica dell'universo *congelata*. Solo la successiva evoluzione delle stelle avrebbe poi condotto a piccoli (ma importanti) cambiamenti della chimica cosmica.



Cosa è rimasto nel plasma primordiale? Sempre gli elementi mostrati in figura 20.1. Sull'asse delle ascisse si trova la densità della materia, e la sottile striscia grigia verticale indica quella prevista per dalla teoria per l'epoca. Sulle ordinate, poi, troverete le abbondanze dei vari elementi al variare della densità. Ciò vuol dire che le abbondanze osservate dovrebbero essere quelle all'interno della

Figura 20.2

banda grigia. Qui troviamo molto idrogeno (circa il 70%) ed elio (circa il 30%); si trovano piccolissime tracce di deuterio, di  ${}^3\text{He}$ , e perfino un pizzico di  ${}^7\text{Li}$ .

Da dove salta fuori costui? In massima dalla fusione tra  ${}^4\text{He}$  e  ${}^3\text{He}$ , che produce  ${}^7\text{Be}$  il quale, *instabile* pure lui come quasi tutti i suoi parenti (brutta famiglia, quella del berillio...), in un mesetto circa decade in  ${}^7\text{Li}$  il quale, invece, è stabile. Passato quel mesetto, però, la nucleosintesi cosmica è finita da un pezzo, e il litio è rimasto a perenne testimonianza.

Ora è necessario premettere, al discorso sulle abbondanze chimiche uscite dal Big Bang, un'informazione importantissima. Quando gli astrofisici teorici fanno i loro conti su *quanto* si è prodotto di ciascuno degli elementi di cui sopra, possono cambiare a loro piacimento (tanto, si gioca coi numeri) il valore della densità della materia *normale*, quella da cui sono formate galassie, stelle, pianeti e noi stessi, che nel capitolo 12.3 avevamo incluso nel parametro cosmologico  $\Omega_M$ .

Perché insisto su questo punto? Semplice: al cambiare della densità della materia soggetta alle reazioni nucleari primordiali, cambia anche, a volte in misura considerevole, la quantità degli elementi prodotti. Poiché in figura 20.2 è mostrato come, per diversi valori di  $\Omega_M$  tra **0,001** e **1**, si modifichi l'*output* del Big Bang, seguiamo, per esempio, il variare dell'abbondanza residua di deuterio.

Nell'intervallo di  $\Omega_M$  considerato in figura, dovremmo aspettarci di trovare un valore compreso tra qualche parte per mille e zero o giù di lì. L'abbondanza di  $^3\text{He}$  è compresa tra  $10^{-4}$  e  $10^{-6}$  e così via. E (tanto vale ripetere per chiarire) quella banda verticale in grigio, cosa rappresenta? L'intervallino  $\Omega_M = 0,03 \div 0,04$ , e cioè il risultato sperimentale ottenibile dai metodi dell'inventario, della pesa diretta e del triangolo cosmico, che abbiamo visto nei capitoli 12.3 e 12.4.

Di conseguenza, se vogliamo che il Modello d'universo in costruzione sia congruente col modello di Big Bang ormai dato per buono dai cosmologi, le abbondanze chimiche *osservate* degli elementi in discussione devono per forza essere quelle incontrate alle intersezioni tra le varie curve e la banda verticale. Ci potrà essere una minima variazione, ma non possiamo ammettere grosse differenze.

E qui, finalmente, abbiamo la prima traccia certa – mi sbilancio fino a dire *galileiana* – della validità del quadro teorico finora descritto. Un test inequivocabile, e svincolato da ogni altro, di quanto avvenne pochi secondi dopo il Big Bang. Cerco di spiegarmi più chiaramente.

Osservando gli spettri della luce emessa dalle atmosfere delle stelle più antiche, quelle formatesi prima che un gran numero di supernove inquinasse il gas primordiale, ci si dovrebbe aspettare di trovare le abbondanze chimiche ancora immutate, così come sono uscite dal Big Bang. Ancora meglio: Anziché le stelle, si osservano le nubi interstellari primordiali di gas, non ancora sporcate e riciclate dalle supernove. Qui è il test: si trovano davvero gli elementi in figura 20.2 secondo le percentuali suggerite dai calcoli teorici? *Suspense*: cosa avviene in realtà?

Avviene questo: le abbondanze osservate coincidono con quelle teoriche in ottima approssimazione, assumendo un valore di  $\Omega_M = 0,03 \div 0,04$  e non maggiore o minore. C'è ancora qualche problema per il  $^7\text{Li}$ , ma è in via di soluzione (non è una *terza nuvoletta* alla Kelvin). Purtroppo, il  $^7\text{Li}$  è un elemento un po' *sporchetto*, essendo anche distrutto e prodotto nelle regioni superficiali delle stelle. Peggio che peggio: *evapora* dalle superfici delle stelle più antiche, e può inquinare perfino le nubi di gas; così, quando si cerca di tenerne conto, i calcoli non sono banalissimi.

Per il resto, possiamo ormai affermare quanto segue: osservando la distribuzione di questi cinque elementi ( $^1\text{H}$ ,  $^2\text{D}$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$ ) nella materia primordiale, siamo riusciti a trovare la *segnatura sperimentale delle reazioni nucleari occorse nell'universo da un secondo a circa tre minuti dopo il Big Bang. Le cose sono andate come la teoria le descrive, con  $\Omega_M \approx 0,04$ , e non c'è spazio per altri voli di fantasia.* E scusate il grassetto sottolineato, ma ancora mi capita d'incontrare imbecilli che dicono: «Sì, certo, il Big Bang, ma è *solo una teoria!* Chissà come saranno andate le cose, in realtà...».

E ormai, sono in chiusura con quanto è scientificamente lecito narrare di solidamente basato sulle osservazioni sperimentali in merito al Big Bang.

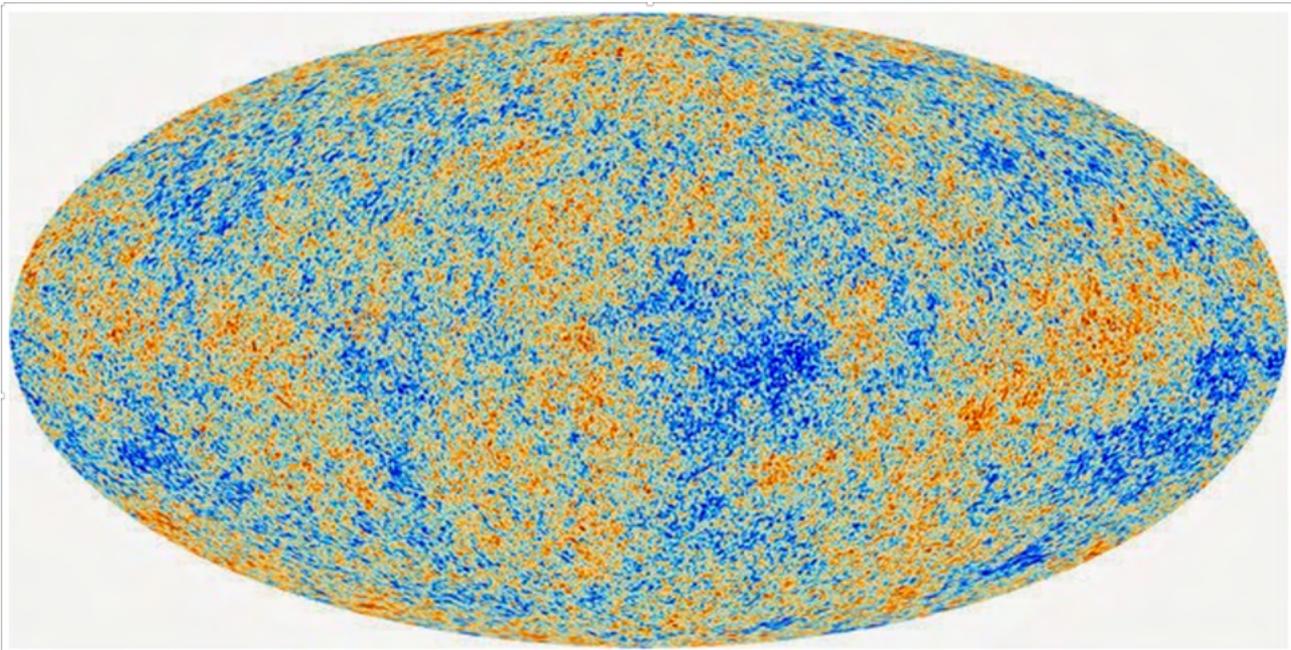
Anzi: non posso chiudere perché qualcuno mi chiede da dove provengono il carbonio, l'ossigeno e così via. Risposta: dalle stelle. Nei loro nuclei, infatti, si possono ricreare condizioni vicine a quelle susseguenti al Big Bang, ma per una durata di *centinaia di milioni di anni*. In questi casi, persino l'effimero  ${}^8\text{Be}$  può, saltuariamente, ingoiare un nuovo nucleo di elio prima di decadere, e a quel punto si forma proprio il  ${}^{12}\text{C}$ , stabilissimo, dal quale poi si possono generare gli altri elementi.

Sì: anche se può sembrarci strano, il carbonio (e l'ossigeno, l'azoto, il fosforo, lo zolfo, il ferro...) che oggi formano i nostri corpi si trovavano, circa **4,7** miliardi di anni fa, nel nucleo di una supernova la quale, esplodendo, ha distribuito questi elementi nella materia dalla quale, poco dopo, si è formato il Sistema solare.

Dicevo di essere in chiusura della parte sul Big Bang, e lo confermo perché ormai ho completato il cerchio. Finita la nucleosintesi, non c'è nient'altro d'interessante da rilevare. Il plasma seguita a espandersi e raffreddare fino a... fino a quando? Già lo sappiamo.

Circa **380.000** anni dopo il Big Bang, la temperatura scende sotto i **5000 °K**, il plasma, *opaco*, si ricombina in gas, *trasparente*. È la parete di fuoco: in Figura 20.3 ve ne presento l'ultima immagine fornita, nel **2015**, dagli scienziati addetti allo studio dei dati del satellite **PLANCK**.

Si vedono le macchie calde, in rosso più acceso, prima della loro evoluzione in ammassi di galassie, e quelle fredde, in blu scuro o nero, dalle quali si origineranno i grandi vuoti tra un ammasso e l'altro. Sembra quasi che ci siano delle *bande* dove la materia è più densa, e alcuni ci stanno studiando sopra. Collisione tra due universi del *Multiverso* (capitolo 21.4)? O solo fluttuazione statistica? Chi vivrà vedrà.



**Figura 20.3**

## 20.3) – Due chiacchiere di commiserazione

Era veramente necessaria la Sezione III così indigeribile, per introdurre tante bizzarrie? In primo luogo, la **MQ**, col rischio di lasciare il lettore almeno parzialmente a bocca asciutta, perché ci vorrebbe un libro di ben altra mole per darne il sapore vero e non solo l'*aroma*. Anche se non ho risparmiato almeno il *fetore* che essa emana...

Beh, vi potete consolare pensando che, al termine del libro, ci sarà una bibliografia, parte in italiano e parte in Inglese (così gira la ruota in questi giorni; perfino i testi *amatoriali* richiedono una buona conoscenza dell'anglico idioma). Lì si troveranno indicazioni per ottimi testi divulgativi dedicati proprio alla **MQ**, oltre a quelli specifici per la Geografia astronomica e la Relatività.

Poi, è stata la volta del **MS**, e lì le cose si sono fatte, se possibile, ancora più ostiche. I pochi diagrammi di Feynman che mi è stato possibile introdurre contengono la chiave di lettura dell'intero **MS**, questo è vero, ma mi chiedo quanto siano comprensibili per un lettore medio.

Purtroppo, mi è difficile rispondere onestamente a questa domanda, perché sono troppo abituato a *leggerli* in modo quasi automatico, ed è proprio quest'automatismo che m'induce a ritenere che, una volta superato lo scoglio di riuscire a interpretare il primo, gli altri vengano via senza difficoltà. Sarà vero? Non lo so.

E ci sono pure i problemi ancora aperti col **MS**. Badate: non mi riferisco solo alla mancata saldatura con la Relatività, o a quella, al momento troppo incerta, dell'unificazione fra interazione elettro – debole e di colore; i problemi che ho in mente adesso sono più matematici, e riguardano la struttura di base del **MS** stesso.

Per intenderci: ricordate la perplessità di Feynman nel capitolo 17.3? I suoi dubbi si alimentano tra le pieghe dei diagrammi che *non* ho disegnato, e d'altra parte, come facevo a metterci pure quelli? L'impressione generale ricavata dal lettore sarà di sicuro quella di un bailamme senza capo né coda.

Ora: non è del tutto vero che le cose vadano in questo modo, ma i problemi esistono; libri divulgativi *buoni* ci sono, ma si contano sulle dita di una mano un po' rattappita. Li citerò, ma purtroppo, secondo me, anche leggendoli, i *non addetti ai lavori* dureranno una fatica enorme a cavarne un senso compiuto. Per questo motivo, ho dedicato ben tre capitoli al **MS**. Saranno serviti a qualcosa? Non sono in grado di rispondere.

La delusione più grande, però, il lettore l'avrà incontrata leggendo il capitolo sul Big Bang. E per diversi motivi.

Uno, di metodologia, è ovvio: difficilmente sarà emerso il legame tra la *storia del Big Bang* in senso lato, e i due capitoli precedenti. Ci si chiede anzi: non si poteva raccontare il Big Bang senza prima gonfiarsi la testa con **MQ** e **MS**?

La risposta è negativa, ma non è detto che balzi fuori evidente a una prima lettura. Si trova tra le righe, direi piuttosto, e posso solo sperare nella buona volontà del lettore. Ripensandoci e rileggendo, forse mi darà ragione. Qua e là ci sono riferimenti da non lasciar cadere perché, se non si riannodassero a quanto discusso nella Sezione III, resterebbero appesi al nulla. Non li perdetevi, per favore: sono importanti per far funzionare davvero il Modello d'universo, ormai completo per quanto possibile.

Poi c'è la grossa delusione patita dal lettore, e di cui mi accollo l'onere, per non avere io saputo o potuto raccontare in modo dettagliato *cos'è stato il Big Bang* in senso stretto. Ho parlato in modo generico di una *distesa infinita di punti a densità e temperatura infinite*, ma non so se questa immagine sia stata utile a chiarire meglio il *modello di esplosione del Big Bang* o, al contrario, se l'abbia ulteriormente complicato.

Signori miei: cosa ci posso fare se nessuno è in grado di formarsi un modello intuitivo migliore di così? Per il momento ne sappiamo ancora poco o nulla; riusciamo solo ad arguire, a metà strada tra la filosofia e la fisica. Il vero e proprio *tempo zero* del Big Bang potrebbe addirittura dimostrarsi, un giorno o l'altro, uno di quei concetti che, al crescere delle conoscenze scientifiche, uscirà dal panorama della cosmologia per essere sostituito da altri dei quali, in questo momento, neanche riusciamo a immaginare le connotazioni di base.

Tra breve racconterò di qualche ipotesi, specie quando affronterò l'argomento del *Multiverso*, ma per ora dovete mettervi l'animo in pace: la scienza galileiana non è in grado di parlare del preciso istante del Big Bang.

Il tempo di Planck? Forse, in un futuro non so quanto remoto gli astrofisici potranno dire qualcosa di più preciso sul momento in cui la gravità e le altre interazioni hanno preso strade diverse ma anche qui, per ora, dobbiamo limitarci a ipotesi. Di sicuro successe qualcosa; esattamente cosa, però, vattelapesca.

Non vorrei lasciarvi con l'idea che non ne voglio parlare perché reputo questi argomenti troppo difficili per il lettore medio; semplicemente, sul piano scientifico non ho nulla da dire. Anche se non sono in pochi ad aver riempito libri di speculazioni filosofico – matematiche in proposito. Sempre speculazioni restano, però, e ho promesso: ve ne racconterò qualcuna, specie nel capitolo 21.5.

In buona sostanza, se il lettore si è fatto l'idea che i cosmologi sappiano dire qualcosa di (potenzialmente) sensato solo dal termine dell'*inflazione* in poi, ha perfettamente ragione. Le conseguenze sperimentali delle ultime fasi dell'inflazione potrebbero rientrare nel novero dell'*osservabile* in un futuro non troppo remoto, e perciò divenire progressivamente *buona scienza*.

Stando così le cose, mi pare opportuno ribadire un concetto già espresso in precedenza. E cioè: l'inflazione è stata un processo talmente smisurato e violento, da far perdere memoria (sperimentale) di eventuali fasi precedenti. Pensateci: una dilatazione di almeno  $10^{75}$  volte (e forse molto di più) non può non cambiare le carte in tavola in modo irricognoscibile.

È *come se* il vero e unico Big Bang da noi osservabile sia proprio l'inflazione. Se *prima* accade qualcosa, solo la teoria potrà un giorno dirlo. Una *teoria del quasi tutto* all'interno della quale Relatività e **MQ** siano unificate eppure, anche così, non è escluso che ogni possibilità di trovare conferme sperimentali alle previsioni di questa meravigliosa teoria rimanga vanificata dall'inflazione.

*Benedetta* inflazione, e non *maledetta*, intendiamoci, perché ha contribuito a rendere l'universo *vivibile*. Purtroppo, ha anche posto un *orizzonte* osservativo invalicabile tra noi e l'origine dell'universo stesso.

D'altra parte, almeno un elemento positivo vien fuori, dagli ultimi tre capitoli. Qualcosa di *ragionevolmente* definibile Big Bang, almeno in senso lato, *ha avuto luogo*. Trovare una segnatura *scientifica* (molto posteriore all'evento, intendiamoci) di quel che è successo  $10^{-32}$  secondi dopo il Big Bang, non mi sembra poco!

E la nucleosintesi primordiale dove la mettiamo? Quella avvenne da circa *1* a circa *100* ÷ *200* secondi dopo il Big Bang, e i suoi effetti sulla chimica primordiale sono del tutto verificabili – e verificati – dalle osservazioni.

Insomma: non è più lecito affermare ancora che il Big Bang sia solo una *teoria*, come se fosse solo un'*ipotesi pazza* escogitata da scienziati, tutti pazzi pure loro; una faccenda buffa tirata fuori dal cappello a cilindro così, tanto per stupire i profani. **Il Big Bang, o qualcosa di molto simile, c'è stato**, e basta così. E con quest'affermazione *assoluta*, posso por termine al capitolo.

## 21) – Tanta “*mediocre*” fisica

### 21.1) – Il cosiddetto “Principio Antropico”

Perché “*mediocre*” fisica? Bene: dove può arrivare la scienza oggi, e in alcuni casi dove potrà giungere in un futuro non facilmente prevedibile, lo abbiamo affrontato fino al capitolo precedente. Qui cominciamo ad avvicinarci alle le *fancies* che vi avevo promesso: idee, esperimenti controversi, speranze fatte passare come certezze, spezzoni di teorie che non sappiamo se potranno mai essere completate, test eseguiti su oggetti *analoghi* a quelli cosmici, e chi più ne ha più ne metta. Qualcosa è più *serio*, qualcosa meno, e sarà mia cura avvisarvi ogni volta, d'accordo?

Allora siamo già nella metafisica? Non ancora. Ma la sfioreremo verso il termine di questo capitolo. Nel quale verrà dimostrato in modo incontrovertibile, senza possibilità di confutazione, che l'essere umano è il centro dell'universo. Eh, già: vi vedo che rumoreggiate parlando di Copernico, Keplero, Newton... ma loro, poveretti, non disponevano ancora del completo apparato del MS e della Relatività generale, e dovevano adattarsi con quel poco che si capiva ai loro tempi. Noi, oggi, siamo molto più avanzati, e sappiamo!

Scherzo, ovviamente, ma solo al 999‰. Resta un 1‰ di dubbio legittimo, e sarei sorpreso se, leggendo tutto il capitolo, anche voi non vi trovaste un po' a disagio, come succede a me. Ma andiamo direttamente al punto lasciando da parte la ricostruzione storica di come ci siamo arrivati; già sto abusando della vostra pazienza.

Ebbene: a conclusione di decenni di ricerche scientifiche sulla cui serietà non c'è da aver dubbi, poiché sono tutte basate su leggi di natura ben conosciute, i fisici (ma ora cominciano anche i chimici e i biologi molecolari) sono giunti a una conclusione sorprendente. Per illustrarla, tirerò fuori dal cassetto una faccenduola già incontrata nel capitolo 16.2: ricordate quando parlammo dell'*intensità assoluta* della forza elettromagnetica e ne introducemmo il valore:  $\alpha_{EM} \sim 1/137$ ? Rimuginare un attimo tra i ricordi.

Ora, per essere sicuro che ci stiamo capendo bene, richiamerò anche il valore intrinseco della forza che tiene assieme i quark:  $\alpha_S \sim 0,7 \div 0,9$ . Fermiamo un attimo la nostra attenzione su questi ultimi due numeri. Il lettore potrebbe forse credere che non conosciamo bene il valore dell'ultima delle due, e perciò mettiamo quel “circa” tra 0,7 e 0,9. Nulla di più sbagliato. All'interno di un nucleone, la forza è ben misurabile, e ne padroneggiamo con approssimazione eccellente il valore. Solo: esso dipende dalla distanza tra due quark, e la legge che lega il valore della forza  $\alpha_S$  alla distanza tra quark ci è ben nota.

Ragioniamo su  $\alpha_{EM}$  e su  $\alpha_S$ . Due protoni, avendo carica elettrica uguale, si respingono appena appena un po' più di quanto si attraggano per forza nucleare, e perciò non possono formare da soli un nucleo atomico. Serve qualche neutrone per rinforzare la *colla*. Ma, se quest'ultima fosse di *qualche percento* più *appiccicosa*, i due protoni ce la farebbero ad attaccarsi l'un l'altro formando un isotopo dell'Elio che non esiste in natura: l' ${}^2\text{He}$ . Fin qui potrebbe sembrare un gioco di numerologia, ma non lo è. Infatti, questo nucleo un po'

esoterico, per decadimento di un quark *down* in *up*, si trasformerebbe in tempi ragionevolmente brevi (se rapportati ai miliardi d'anni di vita di una stella) in normale deuterio  $^2\text{D}$ .

Se ciò avvenisse all'interno di una stella, da qui in poi le cose procederebbero come già sappiamo nel centro del Sole. Il deuterio mangia un protone e si trasforma in  $^3\text{He}$ , dopodiché due nuclei di quest'ultimo s'incontrano, restano appiccicati, buttano fuori due protoni e siamo giunti al normale  $^4\text{He}$ . Domandiamoci: farebbe poi tanta differenza rispetto alla situazione *vera*, e cioè quella che si ha in Natura senza *aumentare artificialmente* la forza nucleare *forte*? Misericordia se ne farebbe!

Difatti, di tutte le reazioni sopra citate, di gran lunga la più lenta è proprio la prima, e seguite bene il ragionamento: due protoni non possono restare attaccati dopo una collisione, ma rimbalzano e tornano liberi a meno che, per puro caso, *proprio nell'istante dell'incontro*, uno dei due protoni non decada in un neutrone come già spiegammo parlando della nucleosintesi primordiale. E questo è un evento *rarissimo*. Così raro, da far durare le riserve d'idrogeno nel nucleo centrale del Sole quasi una decina di miliardi d'anni. Mentre, potendo mettere le nostre dita attorno alla *manopola di sintonia* di  $\alpha_s$  e aumentandola di pochi percento, l'intero gioco si consumerebbe in qualche milione d'anni o forse anche meno, secondo quanto ci fossimo divertiti a cambiare la legge dell'*interazione di colore*.

Considerando che la vita sulla Terra, per nascere ed evolversi fino a noi, ha impiegato la bellezza di quasi *quattro miliardi d'anni*, sarebbe possibile un'evoluzione così complessa aumentando  $\alpha_s$  di pochi percento e riducendo i tempi di mille volte? Mi pare improbabile, e non sono il solo a pensarla così: la quasi totalità degli scienziati è d'accordo. Anche perché il Sole diventerebbe milioni di volte più luminoso, e vaporizzerebbe ogni pianeta.

E se, per dispetto, decidessimo di *ridurre*  $\alpha_s$ , sempre di pochi percento? Peggio che andar di notte! Stavolta, la prima reazione della catena che genera energia nel Sole diventerebbe *impossibile*. In ogni collisione i due protoni rimbalzerebbero *sempre*, non si formerebbe deuterio, niente reazioni nucleari di fusione, e le stelle resterebbero in eterno globi oscuri di materia. Non emetterebbero luce e calore e, di conseguenza, niente vita da nessuna parte.

Ma ora viene il bello. Fin qui abbiamo parlato di modificare  $\alpha_s$  di pochi percento. E se spingessimo il gioco al limite, aumentando il coefficiente intrinseco di forza nucleare solo dell'*un per mille*? Stavolta le reazioni nucleari procederebbero *poco più velocemente* di come succede in realtà, e le stelle avrebbero vita lunga. Tutto bene, dunque, tranne che...

...per un dettaglio molto importante. Su quale elemento si basa la vita? Sul carbonio, poiché solo questo riesce a formare le catene chimiche complesse fino alle proteine e al DNA necessarie alla bisogna. Di conseguenza, poiché nel Big Bang non si è formato carbonio, bisogna bene che esso venga fuori da qualche parte. Difatti sono proprio le stelle a formarlo, e a metterlo in giro per il cosmo dove potrà contribuire a formare nuove stelle e soprattutto pianeti, durante *le ultime fasi* della loro evoluzione.

Cosa succede? Lo abbiamo già accennato in precedenza, ma ora lo discutiamo di nuovo. Quando l'idrogeno, nelle zone centrali di una stella, si è trasformato tutto in elio, questa zona di puro elio comincia a contrarsi e si scalda finché, a circa 100 milioni di °K, *tre nuclei di  $^4\text{He}$  riescono a fondersi assieme prima che il nucleo di  $^8\text{Be}$  si scomponga*, e danno vita proprio al  $^{12}\text{C}$ : giusto il normale carbonio che ci serve per la vita. Ma noi abbiamo

aumentato  $\alpha_s$  dell'un per mille, ricordate? E che volete che sia mai, se il bruciamento dell'idrogeno si è solo leggermente accelerato? Perbacco se è importante! Infatti, per uno strano gioco che avviene all'interno dei nuclei atomici, stavolta il  $^{12}\text{C}$  appena generato si mangia subito un altro nucleo di  $^4\text{He}$  e si trasforma in  $^{16}\text{O}$ : il normale ossigeno che respiriamo. Già, ma chi lo respirerebbe, se il carbonio fosse sparito tutto per trasformarsi in ossigeno?

D'altronde, chi dice che  $\alpha_s$  debba per forza avere *esattamente* il valore giusto per assicurarci stelle che riescano a generare energia, e durino abbastanza a lungo affinché, su pianeti nei quali è presente il carbonio, si generi la vita e possa evolvere fino a forme così complesse come gli animali *superiori*, e l'essere umano in particolare? Il valore di  $\alpha_s$ , in linea di principio avrebbe potuto essere qualsiasi: un milione o un miliardo di volte maggiore o minore. Questa è una *coincidenza cosmica* che ci dà da pensare.

Senza farla troppo lunga, i fisici si sono sbizzarriti a cambiare le costanti di natura, incluse le masse delle particelle elementari e addirittura le *forme* stesse delle leggi di natura (se la forza di gravità fosse inversamente proporzionale al *cubo*, anziché al *quadrato* della distanza, non esisterebbero orbite planetarie stabili, per dirne una), e pian pianino sono emerse talmente tante *coincidenze cosmiche* da far pensare che, all'atto del Big Bang, è come se ci fosse stato *qualcuno* che si è messo a girare almeno una ventina di *manopole di sintonia* affinché le leggi di natura fossero quelle che sono, e non diverse anche di una piccolissima parte. Attenzione: ho scritto “è come se...”.

Poiché questo ordine di cose suggerisce interpretazioni *metafisiche* (e ciascuno è libero di costruirsi le proprie) mentre la fisica deve procedere per una strada diversa, si è cominciato dapprima a parlare di *costatazione antropica* e, infine, di *Principio Antropico* scritto con le maiuscole, ma sempre a livello di esito di esperimenti, di misurazioni. Di *“buona” fisica*, o almeno *“discreta”*, se volete.

Purtroppo, è difficile mantenere un'assoluta oggettività di fronte a un tale cumulo di coincidenze cosmiche: è come se avessimo vinto il primo premio della **Lotteria Universale** senza neanche aver acquistato il biglietto (non c'eravamo ancora). Di conseguenza, il Principio Antropico è stato interpretato in svariati modi dai diversi scienziati. Trascurando i giudizi più estremi, di seguito mi limiterò a esporre le versioni ormai *canoniche* del Principio stesso: quella cosiddetta *debole* e successivamente la *forte*.

Principio Antropico nella versione *“debole”*: «*I valori di tutte le quantità fisiche e cosmologiche non sono equamente possibili, ma assumono valori limitati dal requisito che esistano luoghi dove la vita basata sul carbonio possa evolvere a lungo*».

Il Principio Antropico nella sua versione *“forte”*, invece, recita: «*L'universo deve per forza avere quelle proprietà che permettono alla vita di svilupparsi al suo interno a un certo punto della sua esistenza, e abbastanza tempo da evolvere fino alla vita intelligente*».

Riuscite a intendere la differenza tra le due formulazioni? La prima è, tutto sommato, abbastanza *asettica*; riporta i fatti come sono senza aggiungerci fronzoli. La seconda, al contrario, non vi pare che contenga un pizzico di *finalismo*? Per me la forma *debole* è, a suo modo, un'ovvia constatazione che non posso fare a meno di accettare così come accetto ogni legge di natura; la forma *forte* mi fa storcere il naso, perché fa entrare dalla finestra qualcosa che è stato fatto uscire dalla porta. In ogni caso, da ogni Principio è lecito trarre deduzioni e, pur restando nella forma *debole*, che ne dite di questa previsione per l'evoluzione della fisica?

«Ogni legge di natura oggi ancora del tutto sconosciuta, e che sarà scoperta in futuro oppure, mancandone i mezzi per motivi di principio, non sarà mai scoperta, dovrà per forza di cose ricadere nei vincoli posti dal Principio Antropico debole.» E tutto ciò, pur essendo inevitabile, non farà che aumentare il numero di *manopole* da sintonizzare con precisione all'atto del Big Bang (o *prima?*).

Non vi pare una buona deduzione, e una grossa restrizione per gli sviluppi futuri della fisica, pur non volendo infilare le mani in quella melassa che è la metafisica? Oppure, se preferite, possiamo ribaltare il ragionamento e dire: «Dal momento che siamo qui a meravigliarci delle numerose coincidenze cosmiche, vuol dire che tutto l'universo, pure quello ancora sconosciuto, deve essere *antropico*». *À votre plaisir*.

Teniamo in caldo il Principio Antropico (ci tornerà buono prima o poi) e cominciamo a prendere in considerazione un paio di *cosette da niente* che abbiamo lasciato in sospeso nei capitoli da 12.2) a 12.6). Si possono interpretare alla luce del Principio Antropico, ma anche per conto proprio, nei consueti termini di ricerca scientifica.

## 21.2) – Il “lato oscuro” dell’universo

Che la forza sia con noi, nell’affrontare questo argomento. Anzi: due forze; quella attrattiva e quella repulsiva. Entrambe *oscur*e che più non si potrebbe, almeno fino a tutto il 2021.

Mi riferisco, ovviamente, a quelle strane entità alle quali sono stati assegnati i nomi provvisori di: *materia oscura* ed *energia oscura*. Considerando che, assieme, costituiscono il **96%** di *ciò che esiste* in senso lato (infatti derivano dalla *pesa diretta*, e dalla *piattezza* della geometria cosmica, oltre che dall’espansione accelerata dell’universo), vale la pena di spenderci due parole, no?

E perché ne discuto solo qui, in 21), dove avevo promesso di raccogliere tutte le *fancies* cosmiche? Non si tratta forse di *realtà* che agiscono in tutto l’universo? Ebbene: la triste verità è che non ne sappiamo nulla, assolutamente nulla, a parte il fatto che *esistono* e *dominano il funzionamento del cosmo*. La materia visibile ci dice tante cose, certo; è bella da osservare e fotografare con i telescopi, è colorata e via discorrendo, ma si limita a *fare la spia*. Col suo comportamento ci dice: «Bada che io sono *attratta* da qualcosa che è almeno *cinque volte* più *pesante* di me, e *respinta* da qualcosa che, se le potessimo applicare un *peso equivalente*, vale *diciotto volte* più di me».

Sono numeri certi, non speculazioni filosofiche. E nessuno ci vieta di avanzare ipotesi sulla natura di questi due *fenomeni*. Ora, nessuno sa meglio di me quanto possa essere psicologicamente *rassicurante* avere in testa un’ipotesi; ci fa sembrare *familiare* qualcosa che, al contrario, è *sconosciuto*. È come andare dal medico, in preda a dolori lancinanti allo stomaco, e sentirsi dire: «Sì, è tutto chiaro. Lei soffre di quella rara forma di *gastralgia essenziale* che prende il nome da Otto Von Baumann, il suo scopritore nel 1876. Posso aggiungere che si tratta di un dolore idiopatico cronico, la cui eziologia è in via di definizione. Nella sua particolare circostanza essa è classificabile tra i livelli 7 e 8 nella scala di dolore numerica NRS, per cui le prescrivo una TAC, una RMN, una gastroscopia, e intanto mi assuma due aspirine al giorno. Sono **500 €**, e purtroppo ho dimenticato a casa il libretto delle ricevute fiscali».

Uscendo così alleggeriti (non dal dolore), si ha l’impressione di poter dire: «Questo medico sa il fatto suo. Conosce esattamente la patologia e, con le analisi in mano, mi prescriverà la terapia più adatta». Mentre, riducendo all’osso, il medico ha detto: «Lei ha un dolore allo stomaco sul quale non sappiamo nulla se non che c’è, ed è molto forte. Facciamo un po’ di accertamenti a casaccio per prendere tempo sperando sempre che emerga qualcosa, sennò il dolore se lo tiene, e si legge il Libro del Qohèlet, dove si ripete in continuazione che ogni cosa è vanità di vanità, anche il dolore (e la sua vita). E mi sganci **500 €** in nero, mazzetta in bocca».

Per analogia col caso precedente, a lungo si è pensato alla materia oscura come costituita da *particelle supersimmetriche pesanti* (*quid in irrumabo sunt?*); ora che la supersimmetria, però, sta perdendo colpi, si parla di *assioni* (e pure questi cominciano a diventare poco credibili, per cui non ci spendo parole) oppure si cerca di modificare la stessa legge di gravità in modo che non ci sia più bisogno della materia oscura.

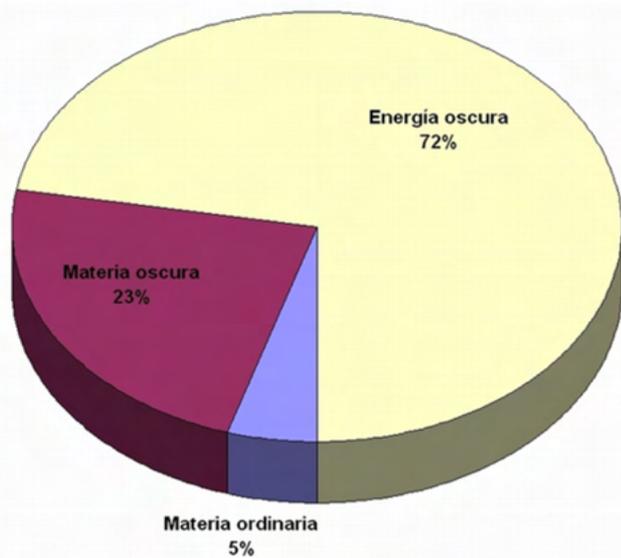
In alternativa, dopo l'evento di emissione di onde gravitazionali da parte di due stelle di neutroni, di cui dirò qualcosa in più in 21.4, sono balzati sulla ribalta i **neutrini pesanti**. Come sarebbe a dire "pesanti"? Bene: ricordate il discorso un po' contorto accennato in 16.5, sul fatto che solo le particelle **sinistrorse** sono soggette all'interazione debole? Se, dunque, esistessero **neutrini destrorsi pesanti** non avremmo alcun modo di accorgercene nei nostri acceleratori e rivelatori di particelle, poiché queste bestie strane non interagirebbero con nulla, proprio con nulla, tranne che attraverso la gravitazione. Non è un gioco, ma una possibilità che diversi fisici stanno prendendo in considerazione seriamente.

Anche perché, l'esistenza di questi esemplari **irregolari** dello zoo cosmico, potrebbe rendere ragione, oltre che della materia oscura, anche di un paio di dati osservativi, di cui uno fondamentale e l'altro più **debole** (almeno per ora). Il primo è l'esistenza di sola materia e niente antimateria, e si possono immaginare belle teorie nelle quali i neutrini pesanti giocano un ruolo fondamentale. Il secondo dato è un apparente eccesso di emissione di raggi  $\gamma$  dal centro delle galassie, dove si presume che questi neutrini siano concentrati, e possano scontrarsi annichilandosi a vicenda e dando luogo a un lampo di luce. Ma ne parlo solo perché,

a volte, sui **media**, si trovano elucubrazioni di questo tipo: il lettore è avvisato; sono solo ipotesi.

Sia quel che sia, vediamo di capire come funzionano questi **vagoni fantasma** del nostro Modello d'universo (ne abbiamo fatta di strada, rispetto alla locomotiva giocattolo, vero?).

Senza bisogno di risalire al 1930 e a Zwicky, il quale si accorse per primo di anomalie nelle curve di rotazione della Galassia che richiedevano molta massa in più rispetto a quella osservata, e a Vera Rubin di cui abbiamo già parlato, consideriamo la situazione attuale.



**Figura 21.1**

I moti delle galassie e dei gruppi di galassie, e la loro distribuzione lungo **filamenti** e **nuclei** di dimensioni cosmiche, sono spiegabili solo se esiste molta materia in più rispetto a quella visibile: almeno **4 o 5** volte. È proprio questa **materia oscura**, così definita perché non emette luce ma si scopre solo grazie alla sua forza di gravità, ad avere costruito l'incastellatura per la struttura a filamenti e nuclei dell'universo sulla quale si è poi **adagiata** la materia normale. La quale, in assenza della gravità esercitata dalla materia oscura, dopo il Big Bang si sarebbe sparpagliata per ogni dove senza dare origine alle galassie e, di conseguenza, alle stelle. Niente materia oscura, niente vita, perciò.

Ma di cosa è composta questa materia oscura? Nessuno lo sa, e non perché siano mancati gli esperimenti volti a catturarne almeno una particella facendo ipotesi sulla sua massa, e sulla probabilità di sua cattura da parte di una particella di materia **normale**. Vent'anni fa sembrava di aver acciuffato qualcosa, ma esperimenti sempre più delicati,

sensibili e *costosi* hanno mostrato che si trattava solo di pie speranze. Oggi come oggi, i fisici sono in lutto perché, dagli esperimenti su **LHC**, sta sfumando la **supersimmetria** (come dicevamo, la materia oscura avrebbe potuto essere stata composta da particelle *supersimmetriche*), forse gli *assioni* non esistono e anche se ci sono i neutrini pesanti, neanche uno straccio di **particella oscura** è stata finora catturata nonostante l'enorme sensibilità delle apparecchiature che ne vanno alla caccia. E allora? Fanno **500 €** senza ricevuta, grazie...

La disperazione, come è noto, gioca brutti scherzi. E sono stati eseguiti alcuni tentativi (teorici) di esorcizzare la materia oscura. Come? Semplice a dirsi, quasi (o del tutto) impossibile a farsi. Cambiando la forma della legge di gravità: della Relatività generale. E qui mi sto inoltrando in un campo a me poco noto, per cui riassumerò l'intera faccenda per sommi capi.

Nel 1981, fu avanzata da Milgrom la prima teoria **MOND** (*Modified Newtonian Dynamics*) o **Dinamica Newtoniana Modificata**, cambiando la forma della legge di gravità newtoniana su grandi distanze; interstellari e galattiche. Il che, in prima battuta, era nei limiti di quanto fosse lecito ipotizzare, poiché a quell'epoca si riusciva a sperimentare la gravità newtoniana al massimo nel Sistema solare che, su queste scale, è piccolissimo e non mostrerebbe alcun effetto dovuto alle modifiche proposte da Milgrom.

Aggiungendo una nuova costante (un'accelerazione), Milgrom dimostrò che, almeno all'interno della Galassia, le cose potevano mettersi a posto (più o meno) senza bisogno di



**Figura 21.2**

materia in eccesso. Uscendo dalla Galassia e considerando anche gli **ammassi globulari**, però, la nuova ipotesi avrebbe funzionato solo violando un principio fondamentale della fisica: quello della conservazione dell'energia. E questo fece storcere il naso a molti. Al giorno d'oggi, l'ipotesi di Milgrom è stata ripresa e modificata in modi diversi da numerosi ricercatori, ma quando si fanno i conti con le osservazioni, ogni ipotesi di tipo **MOND** finora avanzata si trova in difficoltà. Altre ipotesi sono più fantascientifiche, lasciamole da parte.

Il punto singolare è che, ormai, i grandissimi telescopi terrestri e quelli spaziali sono in grado di "**vedere**" come è distribuita la materia oscura nell'universo. Può sembrare un'affermazione peregrina, ma non lo è proprio per nulla. Torniamo alla Relatività generale. Essa afferma che, attorno a una concentrazione di materia, lo spaziotempo si deforma. Vi ricordate di quando giocavamo in laboratorio con un piccolo Buco Nero nel capitolo 12.3? Ebbene: per la Relatività, la differenza tra materia ordinaria e oscura non esiste: entrambe hanno massa, e perciò contribuiscono alla deformazione dello spaziotempo.

Ciò vuol dire che, se esiste un addensamento di materia oscura, la luce proveniente dalle stelle e galassie che stanno dietro verrà modificata nel passaggio attraverso questo

addensamento, e sappiamo come calcolare la perturbazione, per poi risalire a *quanta* materia oscura c'è in quella zona. È una tecnica sofisticata, che prende il nome di “*weak lensing*”, e ormai la padroneggiamo con sicurezza.

Così, per strano che possa sembrare, ormai disponiamo di mappe ragionevolmente buone della distribuzione della materia oscura nel cosmo. E scopriamo che, effettivamente, essa è disposta in *filamenti e centri di agglomerazione* dove si trovano anche le galassie e gli ammassi di galassie. Ma non è tutto: esistono “*granuli*” di materia oscura di dimensioni anche notevoli, dove non ci sono galassie proprio per nulla.

Insomma: la tecnica del weak lensing ci sta facendo scoprire il *cielo oscuro*, nonostante non si riesca a sapere di cosa è costituito. Della materia oscura sappiamo quant'è, dov'è e come è posizionata, ma non sappiamo cosa sia! Fanno sempre **500 €** senza ricevuta, grazie.

In figura 21.2 vi mostro uno degli esempi più convincenti che la materia oscura sia proprio materia, e non qualche strana legge fisica. In rosso vedete le immagini in luce visibile, in blu c'è la distribuzione di materia oscura ricavata per mezzo del weak lensing. Ora vi dico anche di cosa si tratta.

La foto ritrae lo scontro più o meno frontale di due ammassi di galassie: eventi che si verificano abbastanza spesso nel cosmo. Semplificando liberamente, le nubi di gas che accompagnavano le galassie hanno come rallentato i due ammassi di stelle, la cui materia *normale* è rimasta *impegolata dalla viscosità delle nubi stesse* che, solo adesso, si stanno liberando l'uno dall'altro. Sono le zone in colore *rosso*, fotografate direttamente dai telescopi. Ma gli accumuli di materia oscura che accompagnavano i due ammassi *non hanno percepito affatto il frenamento*, ed hanno continuato la loro corsa come se nulla fosse, un po' ritardati solo dalla gravità reciproca. E stiamo parlando delle zone in *blu*.

Sono le immagini come questa a lasciare dubbiosi sulle ipotesi **MOND**: sì, forse potrebbero essere spiegabili con l'aggiunta di una gran quantità di altre congetture e parametri liberi, ma è difficile non convincersi a prima vista che là c'è sul serio della materia oscura, qualunque cosa sia, che ha *tirato* durante la collisione. Come avviene quando due amiche (*la materia visibile*) s'incontrano per strada e si fermano a chiacchierare, mentre i mariti (*la materia oscura*) che non se n'erano accorti seguitano a procedere guardando le vetrine, finché non si rendono conto della mancanza della consorte. E scusate la frase *apparentemente* sessista: *non vuole e non può esserlo* perché, se così non succedesse, non ci sarebbe stata l'evoluzione della società umana.

Non sarebbe corretto terminare questo paragrafo senza notare che, nel 2017, le onde gravitazionali di cui parlerò più diffusamente in 21.4 hanno cancellato con un colpo di spugna molte teorie **MOND**. In che modo? Lo vedremo.

Insomma: della materia oscura sappiamo molto e poco. Ne conosciamo la quantità e come si distribuisce nello spazio; cosa sia, ci sfugge totalmente. Ipotesi più moderne parlano della legge di gravità come di un'*illusione*, e ritengono di poter spiegare la materia e l'energia oscura contemporaneamente. Forse, più che come vere e proprie strade per giungere alla soluzione del problema, sono elementi importanti per far riflettere i fisici sull'*impasse* nel quale ci troviamo, e sulla necessità di tenere la mente aperta, poiché Madre natura potrebbe essere sul punto di costringerci a cambiare nuovamente i paradigmi seguiti finora. Chissà?

## 22.3) – E quello ancora più “*tenebroso*”

Così, scherzando e ridendo, tra materia normale e materia oscura siamo arrivati a spettegolare su un quarto di ciò che popola il cosmo, decimale più o meno, e porta il suo contributo a rendere *euclidea* la sua geometria. Restano i tre quarti, ovvero l'*energia oscura*. Come sappiamo che esiste, e cos'è?

Nel capitolo 12.5, e in particolare grazie alla Figura 12.4, abbiamo già risposto alla prima delle due domande: per spiegare l'andamento del tempo nell'espansione dell'universo, è necessario introdurre nelle equazioni di Einstein un termine  $\Lambda$  che contrasta la forza di gravità fra le masse (visibili e oscure) e si presenta invece come una sorta di *repulsione tra spazio e spazio*. E poi rende  $\Omega_T = 1$ . È tutto qui il gioco? Ma anche se fosse, cosa rappresenta *fisicamente* quel termine  $\Lambda$ ?

Due belle domande, e non c'è dubbio che chi riuscirà a rispondere ad almeno una di esse, *dimostrando* che le cose vanno come dice lui, dovrà recarsi a Stoccolma, noleggiare un abito da pinguino e stringere la mano al re di Svezia. Ad allontanare nel tempo questo avvenimento, c'è quel “*dimostrando*”, che non sarà affatto semplice da realizzare.

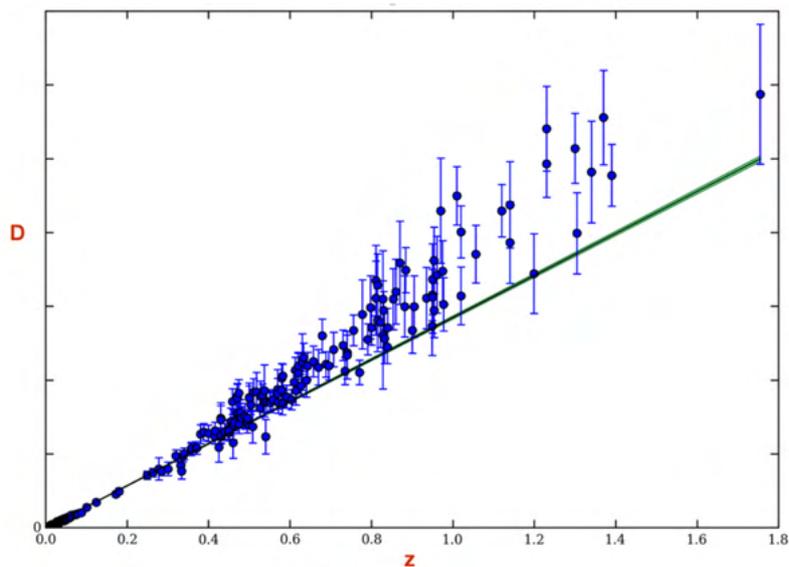
Proviamo a spiegare meglio il perché di un atteggiamento così dubitativo nei confronti della possibilità di giungere, in tempi ragionevolmente brevi, a capire cos'è davvero l'energia oscura. In fin dei conti, parlando di *materia* oscura, abbiamo lasciato qualche strada aperta per una comprensione della sua natura se non addirittura della sua rivelazione sperimentale. Qui, invece, stiamo brancolando *nel buio del buio* e sospettiamo che le cose non cambieranno presto.

Ritorniamo alla Figura 12.4: lì ho mostrato pochi punti sperimentali, un po' sparpagliati ma che, nell'insieme, già mostravano un certo andamento. Cerchiamo di non allontanarci troppo dai dati empirici; l'espansione accelerata dell'universo fu dimostrata per la prima volta, nel 1998, da una manciata di risultati, e il grafico somigliava molto a quello che vi ho mostrato. Da allora in poi, però, molta luce è passata nei nostri telescopi e ci si domanda: come si presenta quel grafico?

Ecco: quello che segue (Figura 21.3) è stato tratto da un recente lavoro scientifico. Come il solito, sull'asse delle ordinate c'è la distanza  $D$  dell'oggetto osservato (una galassia), e su quello delle ascisse il parametro “*spostamento verso il rosso*” della luce o, più semplicemente  $z = \text{redshift}$ : non esattamente la velocità, ma un dato osservativo molto preciso che è funzione della velocità di allontanamento della galassia rispetto a quella della luce. La linea verde mostra quel che ci si aspetterebbe con una espansione *uniforme*, mentre i pallini in blu sono le osservazioni. Le barre verticali sono le incertezze nella determinazione della distanza poiché, come ricorderete, quest'ultima si ricava osservando le supernove di tipo **Ia**, che sono l'anello debole nella catena osservativa.

In ogni caso, anelli deboli o no, gettando sul diagramma qualche centinaio di dati osservativi di galassie lontane è piuttosto difficile dubitare che queste si allontanino sempre di più da quanto vorrebbe un'espansione uniforme dell'universo. Per darvi un'idea: il punto più a destra, avente  $z \approx 1,8$ , si riferisce a una galassia che, quando ha lanciato la luce che oggi raggiunge i nostri strumenti, si trovava a circa **12 miliardi** di anni-luce di distanza da noi, e si allontanava a **200.000 km/s**, che sarebbe  $2/3c$ .

Stando così le osservazioni, abbiamo la certezza che qualcosa stia accadendo, ma che



cosa? Poiché la Relatività generale ha mostrato di funzionare con precisione extra, teniamocela buona e vediamo se, al suo interno, ci sia posto per giustificare questa accelerazione nell'espansione. Pure di questo abbiamo già detto qualcosa: aggiungendo una costante  $\Lambda$  nelle sue equazioni, al posto giusto che già ci indicò lo stesso Einstein, è possibile ottenere una “*repulsione cosmica*”, presunta responsabile (?) dell'espansione accelerata.

Figura 21.3

Fin qui le equazioni, ma l'espansione osservata (per esempio quella in Figura 21.3) va d'accordo con le equazioni? E, soprattutto, *cos'è  $\Lambda$* ? Proviamo a rispondere alla prima delle due domande. Se osservate nuovamente la figura (ma lo avrete già notato), capirete bene che, date le incertezze sperimentali nelle distanze, attraverso quella selva di punti è possibile far passare non una, ma numerose curve per valori leggermente diversi di  $\Lambda$ , e perfino qualche curva che, pur curvando verso l'alto, non obbedisca *esattamente* alle equazioni di Einstein.

Teniamo a mente quest'ultima considerazione, pur ricordando che, in ogni caso, la Relatività generale è *perfettamente compatibile* con le osservazioni. Di conseguenza, Einstein potrebbe aver avuto ragione perfino quando aveva torto e perciò, *forse*, abbiamo almeno la legge fisica che descrive l'espansione accelerata dell'universo. Cosa significhi questa legge, però, è un altro discorso.

E qui veniamo proprio a discutere su cosa potrebbe rappresentare  $\Lambda$  in un contesto general-relativistico. Il *vuoto*, tra le sue tante proprietà, andrebbe considerato come un *fluido* molto speciale; esso, infatti, eserciterebbe una *pressione* su se stesso, che lo spingerebbe a dilatarsi sempre di più. Ma c'è un “ma” ...

Infatti, dato che il coefficiente  $\Lambda$  compare, nelle equazioni della Relatività generale, con davanti un segno negativo, affinché la *pressione del vuoto* spinga nel modo giusto anch'essa deve avere un segno negativo davanti poiché, come ben sappiamo, (*negativo per negativo uguale positivo*). Ho ridotto a poco più di una battuta un discorso più complicato; ne chiedo scusa ai più *evoluti* tra i miei lettori. Così, però, abbiamo almeno un modellino piuttosto rozzo da inserire a sua volta nel nostro Modello d'universo e possiamo procedere col discorso.

In natura non esiste pressione senza *energia* corrispondente (pensate all'energia cinetica delle molecole di un gas chiuso in una scatola, che esercitano pressione sulle sue pareti a causa dei continui urti). Il *vuoto cosmico* non fa eccezione a questa regola e perciò

possiamo dire che anch'esso è riempito di **un campo di energia costante nello spazio e nel tempo** (così la vuole la Relatività). Il che fa sorgere immediatamente una domanda.

«Se quest'argomentazione ha qualche valore» chiede un lettore, «via via che si forma **nuovo spazio vuoto**, dobbiamo concludere che **si crea nuova energia**. Ora: che fine fa, in questo contesto, in Principio di conservazione dell'energia?». Giusto, e bisognava parlarne. La risposta è disarmante: «E chi ha mai detto che il Sacro Principio valesse per tutto l'infinito universo? Noi lo vediamo all'opera in laboratorio, lo applichiamo anche a oggetti astronomici estremi (le stelle di neutroni binarie perdono energia per onde gravitazionali), ma l'intero cosmo? E perciò, nel nostro Modello d'universo aggiungeremo anche questo pezzo: via via che il plastico si dilata, **per ciò stesso nasce nuova energia**». O viene da qualche altra parte che non abbiamo ancora capito. O, come è più probabile, non abbiamo capito nulla...

Difatti, qui potrebbe tentarsi la saldatura tra **MQ** e Relatività generale. Ricordate, nel Capitolo 16.1, le “**Particelle virtuali**”? Ebbene: lo spazio dovrebbe essere gremito di questi **fantasmi di fantasmi**, e allora – ci si chiede – l'energia del vuoto non potrebbe essere dovuta proprio a queste particelle? Fortunatamente, il **Modello Standard** è precisissimo, e consente una valutazione accurata dell'energia del vuoto causata dalle particelle virtuali.

Come già notato in precedenza (*repetita iuvant*), Einstein e Bohr fanno a pugni anche nella tomba. Il “**Modello a particelle virtuali**” predice, per l'energia del vuoto da mettere nelle equazioni della Relatività, un valore in eccesso di un fattore  $\sim 10^{120}$ . Un po' troppo anche se cerchiamo di mandarlo giù col bicarbonato, non vi pare?

Passiamo oltre: ora traiamo alcune conseguenze dalla presenza di questa **pressione negativa** che permea lo spazio. La sua azione sta conducendo a una **crescita esponenziale** delle dimensioni dell'universo (e non interrompetemi con piccole molestie, quali per esempio il rilevare che esso è già **infinito**), per cui anche le distanze all'interno del nostro **UC** stanno aumentando a un ritmo crescente – come confermano le osservazioni.

Da un certo momento in poi, però, il ritmo diventerà frenetico, e anche gli ammassi di galassie a noi più vicini verranno trascinati via a velocità superiore a quella della luce. Cosa vedranno gli astronomi di quell'epoca? Solo buio pesto al difuori del Gruppo Locale? Non proprio all'istante. Ricordate i capitoli 10.4 e 10.5, dove si descrive una situazione in un certo senso analoga: il trascinamento di un oggetto all'interno di un buco nero?

Così, anche gli astronomi dell'epoca vedranno un progressivo – ma veloce – trasformarsi delle immagini delle galassie esterne, allora già lontanissime, in macchie rosse, infrarosse, radio, e di luce di lunghezza d'onda sempre maggiore, fino a sparire completamente. Allora sì, che ci sarà buio attorno al nostro Gruppo Locale. E quando succederebbe? Tra sei o sette miliardi di anni. Ci vorrà pazienza, per sapere come andrà a finire.

C'è chi si chiede: «Ma l'espansione non potrebbe essere così **intensa** da “**scardinare**” anche il Gruppo Locale, vale a dire trascinare via anche le galassie che si troveranno al suo interno, e le stelle dalle galassie, e i pianeti dalle stelle, e gli atomi dai pianeti, e gli elettroni dagli atomi, e i quark...» devo continuare?

Per nostra fortuna, questo è un altro dei pochi casi nei quali disponiamo di una risposta univoca e dirimente: **non lo sappiamo**. Tutto dipende da un numeretto che si trova all'interno dell'equazione che regola i rapporti tra pressione ed energia del vuoto: se è maggiore di un certo valore, ciò che è gravitazionalmente legato lo resterà in eterno; altrimenti, tutto schizzerà

via in un istante, e se non sarà quella la *Fine del mondo* con la maiuscola, non so proprio come altrimenti definirla. Gli astronomi la chiamano *Big Rip* (grande strappo) in opposizione al Big Bang. Come? Quant'è, sperimentalmente, il valore finora accertato di quel numeretto chiave? Ah: è ancora incerto, ma oscilla attorno *al valore limite*...

Un momento, però: abbiamo trascurato una possibile alternativa a tutti i discorsi sull'energia oscura. E se essa non avesse nulla a che fare con una proprietà intrinseca dello spaziotempo, ma fosse un diverso campo denominato provvisoriamente "*Quintessenza*"? La Figura 21.3 mostra come, entro le incertezze di misura, ci sia spazio non solo per una linea retta, ma anche per linee dotate di qualche curvatura.

In tal caso, brancoleremmo ancor più nel buio nello spiegare la natura fisica della quintessenza: la costante cosmologica potevamo *almeno* metterla in relazione con la Relatività, pur senza riuscire a capire cosa fosse; se ci sganciamo completamente da Einstein, andiamo alla deriva.

Già, perché la quintessenza potrebbe essere anche lei *costante nello spazio e nel tempo* (ma allora si identificherebbe a tutti gli effetti pratici con la costante cosmologica) oppure *variabile qua e là, oggi e domani* (dico per dire: su distanze spaziali e temporali pur sempre enormi, altrimenti ce ne saremmo già accorti). E questa sua (ipotetica) variabilità condurrebbe a scenari diversi. Potrebbe esserci anche in questo caso un Big Rip, ma non è detto che sarebbe definitivo: magari, dopo un tempo lunghissimo, il valore della quintessenza cambierebbe segno e tutto tornerebbe indietro da dove era finito, per crollare nel *Big Crunch* che, come avrete capito, è il *contrario* del Big Bang.

Poi partirebbe di rimbalzo un nuovo Big Bang? E chi lo sa! Come vedete, già eravamo nelle peste parlando di *materia oscura*, ma da quando siamo arrivati all'*energia oscura* le cose sono, se possibile, peggiorate. In ogni caso, una speranza di poter *misurare* se è solo una noiosa *A*, oppure una sconosciuta *Quintessenza*, potrebbe esserci, e come me lo hanno venduto ve lo dico.

Abbiamo parlato di onde gravitazionali, e bisogna aggiungere che la loro rivelazione è ancora una specialità all'inizio del suo sviluppo. Nel 2017 è entrata in funzione una terza antenna a Pisa (*VIRGO*) e seguiranno altre antenne in India e in Cina. La vera svolta epocale sarà una sonda spaziale (*LISA*) prevista per il 2034 se va bene. Ma già per mezzo di *VIRGO* dovrebbe cominciare a essere possibile misurare la *velocità* delle onde gravitazionali (sorpresa, l'abbiamo misurata, ma ve lo dirò nel capitolo seguente).

Ebbene: se essa risultasse pari a quella della luce, vorrebbe dire che la "*roba*" attraverso la quale viaggiano le onde è sempre e solo il vuoto descritto dalla Relatività generale, e di conseguenza l'energia oscura andrebbe identificata con la solita *A*. Se, però, le onde risultassero *un po' più lente di c*, allora l'universo sarebbe riempito da *qualcosa che le ostacola*, e tornerebbe in ballo la *Quintessenza*. Ah, mi scordavo: sono sempre 500 € in banconote di piccolo taglio.

Conclusione: il *MS*, con tutti i suoi successi, si applica al 4 ÷ 5 % di ciò che esiste. Del restante, non ne sappiamo ancora proprio nulla. Ma c'è gente che ci lavora sia sul piano teorico sia su quello sperimentale (per quel poco che è lecito tentare), e prima o poi qualche novità salterà fuori; possiamo esserne *ragionevolmente* certi.

## 21.4) – Eppure, Einstein ha *sempre* ragione

Ogni anno che passa si porta appresso un nuovo capitolo, e speriamo che sia così a lungo. Manco a farlo apposta, è ovvio che non si tratti neanche per nulla del capitolo che *io* avrei voluto scrivere, ma di uno del tutto diverso, perché quella gran *cocotte* di Madre natura decide lei secondo il proprio gusto, e noi ci dobbiamo stare.

Vi spiego, anticipando un pochino: nella prossima Sezione parleremo, tra l'altro, di *particelle elementari*. Ebbene, come capirete più avanti, il grande acceleratore di particelle di Ginevra “**Large Hadron Collider**” aveva promesso di regalarci, in pochi anni, almeno una manciata di nuove particelle elementari che avrebbero fatto la gioia dei fisici. E io mi ripromettevo di darne precisa nozione ai lettori. Manco per niente! E ciò mi costringerà a rimettere le mani anche su qualche capitolo della prossima Sezione. Pazienza!

Invece, con che se n'è venuta fuori quella Signora dalla morale discutibile (mi riferisco sempre a Madre natura)? Con le onde gravitazionali, e questo l'avevamo capito; abbiamo la prova sperimentale, osservativa, dell'esistenza dei Buchi Neri, ci fa piacere, grazie, ne abbiamo accennato, Premio Nobel a Penrose (a mio avviso ben meritato, poiché è il cranio più brillante della mia generazione) ma: e allora?

Ecco: un 17 agosto, mentre tutti erano in ferie, sono arrivati sul pianeta Terra contemporaneamente:

- a) Onde gravitazionali provenienti dalla fusione di due *stelle di neutroni*
- b) Un violentissimo lampo di raggi  $\gamma$  proveniente dallo stesso evento.

Per essere precisi: la radiazione elettromagnetica è giunta con 1,7 secondi di ritardo, ma questo è compatibile col fatto che, in un evento del genere, si crea una nube densissima di materia attorno al centro della supernova in esplosione, e ci vuole un secondo o due prima che questa nube si rarefaccia, e la luce riesca a passare. Mentre le onde gravitazionali, non essendo impedita da nulla, arrivano per prime. In pratica: onde gravitazionali e onde luminose hanno impiegato lo stesso tempo a percorrere i 130 milioni di anni-luce che ci separano da quella fusione. Per inciso, stavolta l'interferometro italiano **LISA** ha giocato un ruolo fondamentale nella scoperta.

A questo punto, è lecito domandarsi perché tanto clamore per due oggettini così piccoli che, a stento, ce l'hanno fatta a collassare in un Buco Nero di massa modesta (circa  $3 M_{\odot}$ ). In fin dei conti, tutti gli altri eventi di onde gravitazionali rivelati fin ora sono stati causati da Buchi Neri di massa ben maggiore. E quindi?

Qui vi voglio: se due buchi neri, anche giganteschi, coalescono in uno più grande, a parte le onde gravitazionali, a noi cos'altro giunge? Nulla; assolutamente nulla.

Ma se si tratta di due stelle di neutroni, la materia di cui sono composte, prima di crollare sul nuovo buco nero centrale, cosa fa? Un casino di roba. In primo luogo, secondo una teoria ormai ben credibile, in quel momento si formano gran quantità di elementi pesanti (i *media* hanno parlato solo di **oro**), presenti anche sulla Terra, ma per i quali è molto difficile immaginare un'origine diversa.

E poi, che succede? Ebbene, l'abbiamo detto una pagina fa: arriva *luce*; *onde elettromagnetiche*. E, guarda caso, onde gravitazionali ed elettromagnetiche arrivano *contemporaneamente*. Ora: cosa vi avevo raccontato in 21.2 e 21.3? Che alcune teorie

**MOND**, e in parte anche quelle sull'*energia oscura*, prevedono velocità diverse tra la luce e le onde gravitazionali.

Invece, su una distanza di **130** milioni di anni-luce, e concedendo un secondo e mezzo di ritardo per la luce, impedita dalla materia circostante opaca, le due onde sono arrivate assieme. Questa coincidenza nei tempi di arrivo ha cancellato *ipso facto* una gran quantità di teorie alternative alla pura e semplice Relatività Generale, dimostrando che luce e gravità viaggiano alla stessa velocità con una precisione migliore di **1** parte su **10<sup>15</sup>**. E scusate se è poco!

In effetti, in precedenza non avevamo misure dirette della validità delle Teorie di Einstein su distanze galattiche, se non addirittura stellari, e quindi c'era spazio per ciurlare un po' nel manico. Ora ce n'è molto di meno: non dico che non si possa costruire qualche teoria alternativa compatibile con le misurazioni, ma di sicuro non sarà facile, e mi ci gioco la cravatta (la porto solo ai funerali, compreso il mio) che teorie alternative non saranno *pulite* come la Relatività Generale.

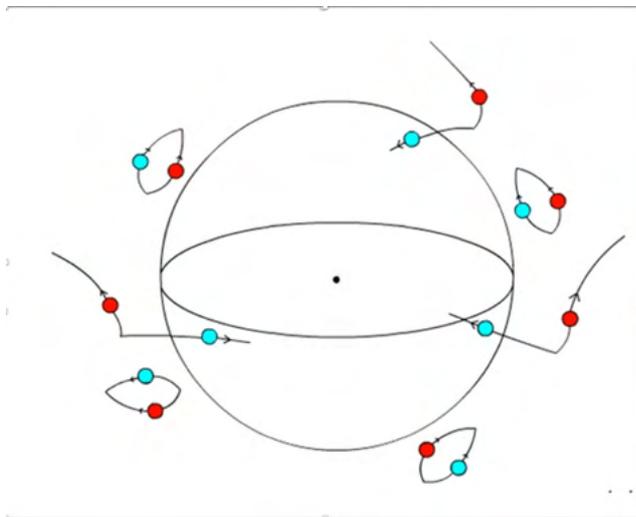
Di conseguenza, anche se le esigenze logiche mi hanno costretto a inserire queste poche chiacchiere nel Cap. 21, qui si parla di "buona" fisica, anzi: "ottima e abbondante", per parafrasare Alberto Sordi ne: "La Gande Guerra".

## 21.5) – Ai confini del plausibile

Tratterò qui un argomento che è comparso di sfuggita in un capitolo precedente: l'*evaporazione dei Buchi neri*. Per strano che sia, non sono pochi i fisici che danno come scontato o quasi questo strano comportamento di oggetti che sembrano fatti per assorbire tutto senza lasciare la possibilità di uscita (a parte il caso particolare di Kerr–Newman con rotazione violentissima, ma qui ci riferiamo a pacifici Buchi neri a simmetria sferica). Sarà forse perché Hawking, un nome di alto pregio nella fisica del XX secolo, vi ha messo il suo suggello, o magari a causa dell'*apparente* semplicità del modello intuitivo che conduce a questa conclusione. Vediamo con calma.

È meglio se parto col mostrarvi subito una immagine che compendia la situazione, e con lo spiegarla. Potrà sembrarvi un gioco da illusionisti, ma *forse* non lo è (notate il “forse”)

Ecco la Figura 21.4, che mostra cosa ci si attende attorno al Buco nero, la cui superficie



è schematizzata dalla grande circonferenza. Sappiamo che il *vuoto* non è realmente tale, ma rappresenta il *playground* in cui giostrano le *particelle virtuali*, rappresentate nella figura come coppie di colore diverso (particella e antiparticella).

Finché le *coppie virtuali* nascono abbastanza lontano dal Buco nero, esse percorrono il breve tratto loro consentito dalla Banca di Heisenberg, dopodiché s'incontrano di nuovo e svaniscono, restituendo il prestito di energia. Non vi sto raccontando nulla di diverso da quanto avevamo appreso in vari passi della Sezione III.

Figura 21.4

Il problema sorge quando una coppia particella / antiparticella nasce *troppo* vicino alla Superficie di Schwarzschild. Nella Figura 21.4 vediamo tre esempi di quanto avviene. Una particella (o antiparticella; fa lo stesso) viene ingoiata dal Buco nero, l'altra fugge via lontano. Per quale motivo è un problema? Accipicchia se lo è; pensateci un po': cosa se ne sta facendo nello *spazio normale* una particella *virtuale* tutta sola? (Attenzione: non è una frase adatta per abordarla in un Bar di periferia.)

La verità è che la particella virtuale è rimasta sola, e non ha più il partner con cui annichilarsi trascorso il suo tempo, in modo da restituire il prestito energetico. Ma gli esattori dell'Ufficio delle Impo... scusate; volevo dire: della Banca di Heisenberg sono inflessibili: tanto è stato dato, tanto deve rientrare in cassa. A chi rivolgersi?

Il *colpevole* dell'ammanco è presto individuato: il Buco nero. Sarà lui a dover rifondere il debito energetico, ma come? Bene: la faccenda si svolge come segue. In primo luogo, la particella *virtuale* fuggita via nello spazio diventa *reale*, poiché la Banca le fornisce l'energia

sufficiente. Questo Istituto di Credito cosmico, infatti, non è interessato a *chi* paghi; basta che *qualcuno* paghi. Esattamente come l'Ufficio delle Imposte. E perciò, gli esattori **strappano via** dal Buco nero l'energia equivalente.

Cosa vuol dire ciò? In termini semplici, si potrebbe affermare quanto segue: poiché alla particella *virtuale* sfuggita è stata assegnata un'energia **positiva** affinché divenisse *reale*, si desume che l'altra particella *virtuale*, e cioè quella caduta nel Buco Nero, sarà caricata di un uguale ammontare di **energia negativa** per saldare il debito. Facile ed elegante, no?

Certo: facile ed elegante sulla carta, ma in termini pratici, intuitivi, cosa significa? Ebbene: quell'**energia negativa** potremmo leggerla (dividendola per  $c^2$ ) come **massa negativa**, anche se un purista della Gravità Quantistica mi fucilerebbe solo per averlo pensato. Però, in soldoni, è proprio così: il Buco Nero ingoia una particella virtuale, e noi, che stiamo lontano, cosa vediamo? Che il Buco nero ha **emesso** una particella (quella che è sfuggita), e in contemporanea la sua massa è **diminuita** in proporzione.

Ridotta ai termini estremi, questa è l'evaporazione dei Buchi neri: il primo punto d'incontro tra Relatività generale e **MQ**. Se consideriamo pure che le particelle virtuali più frequenti sono i fotoni a causa della loro piccolissima energia (non hanno quella di massa), di gran lunga la maggior parte della **emissione di Buco nero** sarà paragonabile, con ampio margine di precisione, a quella di **Corpo nero**. Chi l'avrebbe mai detto?

Qui, però, bisogna tirare fuori qualche numeretto perché, tanto maggiore è la massa del Buco nero, tanto minore la sua *temperatura equivalente*. A conti fatti, Hawking trova che:

$$T = \frac{h \times c^3}{16 \times \pi^2 \times G \times M \times k_b}$$

dove conosciamo il significato di tutti i simboli tranne  $k_b$ , che è la "Costante di Boltzmann" che s'incontra in termodinamica. Calcolando con tutte queste costanti, si ha che la temperatura  $T_{Bn}$  in gradi  $^{\circ}K$  di un Buco nero è pari a  $\sim 1.23 \times 10^{26}/M$ , essendo quest'ultima la massa della stella espressa in grammi.

Proviamo ad eseguire il conto per una stella di massa solare (di solito indicata con  $M_{\odot}$ ). Poiché  $1M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33}g$ , risulta  $T_{Bn\odot} \approx 6,15 \times 10^{-8} ^{\circ}K$ . Piuttosto freddino, non vi pare? Specie se lo raffrontiamo ai  $2,73 ^{\circ}K$  della temperatura dell'universo in questo momento. Vale a dire che, fino ad ora (e per lungo tempo a venire) un Buco nero di massa solare *assorbe* dalla radiazione di fondo molto più di quanto riesca a emettere. Bisognerà attendere miliardi e miliardi di anni prima che l'universo, grazie anche all'espansione che un giorno diventerà esponenziale, scenda al disotto di  $T_{Bn\odot}$  e, finalmente, il Buco nero possa cominciare a evaporare. Campa cavallo!

Allora, a che serve ragionare su queste "temperature"? Un motivo potrebbe esserci. Lasciando perdere le formule, i calcoli mostrano che il **tempo di evaporazione**  $t_{ev}$  di un Buco nero è circa:  $t_{ev} \approx 2,66 \times 10^{-33} \times M^3$  **anni**, sempre calcolando la massa in grammi. Per il Sole, verrebbe uno sproposito: qualcosa come  $2 \times 10^{67}$  **anni**. Ora, però, torniamo con la mente al Big Bang: chi ci dice che, in questo evento, non siano stati sparati fuori anche *piccoli* Buchi neri di, diciamo,  $1,729 \times 10^{14} g$ . Meno di un decimiliardesimo della massa terrestre; diciamo circa la massa di una grossa catena montuosa, va bene? E perché proprio quel numero preciso? Semplice: inseritelo nel calcolo di  $t_{ev}$  e cosa viene fuori? Bravi! Esattamente **13,75** miliardi di anni, l'età attuale dell'universo.

Se così fosse, oggi potremmo osservare saltuariamente violenti lampi di raggi  $\gamma$  che corrispondono agli ultimi istanti di vita di questi Buchi neri primordiali, quando la loro temperatura sale verso l'infinito o, per meglio dire, verso un valore che non sappiamo determinare, poiché occorrerebbe una teoria della *gravità quantistica* ancora di là da venire. E le osservazioni cosa dicono? Vattelapesca! Le sonde spaziali segnalano, anche piuttosto di frequente, lampi di raggi  $\gamma$ , ma spesso le sorgenti sono individuate come oggetti di altro tipo, anche se l'identificazione non sempre è certa. Che ci fosse in mezzo anche qualche Buco nero primordiale? Se così sarà, prima o poi riusciremo a scovarlo; speriamo bene.

## 21.6) – E anche un po' oltre

Quindi facciamola breve. La domanda è: «Nel capitolo precedente mi sono limitato a vendere aria fritta, oppure c'è un fondamento di verità?». Magari sapessi rispondere! Perciò, a scanso di equivoci, continuerò a vendere in modo acritico quel che leggo e sento dire, non essendo in grado di giudicare.

Il primo punto su cui richiamo la vostra attenzione l'ho appena accennato nella Sezione II, e si tratta di questo: le Equazioni di Einstein dalle quali si ricava tutto ciò che sappiamo di certo sui Buchi neri, possiedono una certa struttura matematica ben definita. Ma, in fisica, esse non sono le sole ad avere quel tipo di assetto; lo condividono, per esempio, con le equazioni che governano il moto dei fluidi. Allora ci si chiede: non sarà che, nella cosiddetta *Meccanica dei fluidi*, si possono incontrare situazioni analoghe a quelle di Buco nero? Un *Buco nero fluido* o, se preferite, anche *acustico* perché, tanto, le equazioni sono sempre simili? La risposta è affermativa.

Diciamo subito che gli esperimenti non sono facili, poiché l'ideale sarebbe eseguirli con *superfluidi* a temperatura prossima allo zero assoluto. Infatti, la normale viscosità che ben conosciamo nella vita di tutti i giorni confonde i risultati, per cui non è ancora possibile capire se dal *Buco muto* esce l'analogo (sempre acustico) della Radiazione di Hawking. In ogni caso, qualunque sia la difficoltà, prima o poi sapremo se i *Buchi muti* possono essere davvero fornirci informazioni sperimentali utili a capire cosa succede sulla superficie dei Buchi neri. Con una riserva cui accennerò alla fine di questo capitolo.

Prima vorrei parlarvi di *Informazione* con la maiuscola. E seguitemi nel ragionamento.

Supponiamo di gettare in un Buco nero una gran quantità di lumache (perché lumache? Non so: mi sono venute in mente per prime), e poi chiedere a un nostro amico sperimentatore, che non abbia assistito al *cocleicidio* di massa (dal Latino: lumaca = cochlea) cosa abbiamo gettato nella voragine senza fondo. L'amico conosceva la massa del Buco nero prima che procedessimo alla nostra mala azione (ricordo agli animalisti che si tratta solo di un *gedankenexperiment*), e ora misura la nuova massa. Risultato: pesa quattro o cinque tonnellate di più.

Senza qualche suggerimento, difficilmente l'amico potrà indovinare cosa vi abbiamo scaricato dentro, e noi gli diciamo gentilmente che si trattava di animali. E qui comincia la lista: un elefante? No. Due ippopotami? No... e probabilmente, se non glie lo dicessimo, difficilmente l'amico giungerebbe a convergere sulle lumache. Perché? Perché un Buco nero *classico*, vale a dire senza complicazioni dovute alla **MQ**, si mangia tutto, compresa l'*Informazione* su quel che ha ingoiato. Televisori, orologi, pianeti, stelle, banconote, una volta dentro il confine è chiuso, e chissà cosa lo ha attraversato.

Vorrei chiarire che il concetto scientifico di "*Informazione*" è più specifico e quantitativo di come lo sto descrivendo qui, mentre parlo solo di *oggetti*; non vorrei però partire per la tangente, e ribadire soltanto che, in presenza di un Buco nero, l'informazione presente nell'universo diminuisce, perché il mostro mangia pure lei. E qui mi fermo.

Cioè: qui vorrei fermarmi, ma gli esperti di *gravità quantistica* ci fanno notare che, nella **MQ**, l'*informazione si conserva* indipendentemente da come la martelliamo sulla testa. Di conseguenza – affermano essi – anche l'informazione che cade dentro un Buco nero si

conserva e, in qualche modo, dovrebbe essere possibile recuperarla via via che il mostro, evaporando, restituisce quanto ingoiato lungo tutta la sua esistenza. È un argomento sul quale Hawking ha scommesso un'enciclopedia del baseball e, una volta convintosi che l'informazione viene recuperata, ha pagato il suo debito.

Ma siamo proprio sicuri che abbia fatto bene a pagare? Penrose, il Premio Nobel – fisico di grande spessore intellettuale, ad esempio, è di opinione diversa. Secondo lui, quando interviene la gravità, specialmente dove sappiamo che le Equazioni di Einstein funzionano bene (per esempio sulla superficie di Buchi neri di grande massa) la **MQ** deve cedere il passo, e l'informazione è ingoiata per sempre.

In effetti, se è vero che la radiazione di un Buco nero è quella di Corpo nero, non si vede proprio come sia possibile estorcerle informazioni. A meno di non inventare qualcosa di molto esoterico, e vi assicuro che i tentativi in questa direzione non mancano. Però ve l'ho raccontato solo per mostrarvi quanto, appena si cerca di far dialogare anche pochino pochino Relatività generale e **MQ**, ne venga fuori un bailamme. E su questo argomento, ora mi fermo sul serio.

Annodo, invece, un filo lasciato pendente prima d'introdurre il discorso sull'informazione. Torno alla pura e semplice evaporazione dei Buchi neri. Un giorno o l'altro le simulazioni idrodinamiche ci diranno forse che, in un *Buco muto*, esiste qualcosa di analogo alla Radiazione di Hawking. Benissimo, ma un conto è la situazione in un fluido con un flusso continuo di particelle, altro è un Buco nero disperso nello spazio profondo, dopo che l'inflazione abbia trascinato via ogni altro oggetto materiale.

Pensateci un attimo: da cosa dipende l'evaporazione di un Buco nero? Dall'oceano di *particelle virtuali* che lo circondano. Benissimo, ma cosa è successo quando abbiamo cercato di applicare il modello a particelle virtuali nel calcolo della costante cosmologica  $\Lambda$ ? Che abbiamo sbagliato *solo* di un fattore  $10^{120}$ . E allora, cosa ci fa pensare che attorno a un Buco nero ci sia il mare di particelle virtuali necessario a farlo evaporare? Attenzione: questa è una cogitazione tutta mia e me ne assumo la responsabilità: non voglio scommettere (tanto, chi vivrebbe abbastanza a lungo da pagare?). Soprattutto, non mi assumo la responsabilità di affermare che Hawking e tanti altri che, prima e dopo di lui, hanno lavorato su questo argomento, abbiano torto. Mi piace solo lasciare il lettore con una pulce nell'orecchio...

## 22) – Tanta “*discutibile*” fisica

### 22.1) – Un *Multiverso*, finalmente!

E adesso apriamo la porta alla *metafisica* pura, con tanto di maiuscola, di quel genere che vi promisi tanti capitoli fa. Ricordate? Non c’entra nulla la teologia e la religione, ma anche la fisica c’entra ben poco, se non *per non essere incompatibile a priori* con ciò che andrò a raccontarvi. Di qui, il titolo: “*discutibile*”. Quivi si troveranno meraviglie inenarrabili, quali lo cerebro (vostro, spero) senza appoggio veruno giammai, eccetera eccetera.

A cosa tira questa premessa? Ebbene: rammentate di quando vi parlai di teorie (meglio sarebbe dire *ipotesi*) fisiche impossibili da verificare per motivi di principio ai tempi nostri e, con ogni probabilità, anche in un futuro remoto – sempre lasciando aperto uno spiraglio a scoperte scientifiche e sviluppi tecnologici oggi inimmaginabili? Teorie che, però, si presentano come *possibili* estensioni di quelle già note, e comunque non in collisione con esse. Siamo in dirittura d’arrivo: vi parlerò di due soli modelli (ce ne sono tanti, ma a parte quelli davvero *indecenti* a me preme solo darvi un’idea del *sapore* delle idee con le quali si trastullano i fisici quando vorrebbero scandagliare l’*oltre*). In questo capitolo si tratterà dell’*Inflazione continua*, nel prossimo *del Panorama delle superstringhe*. Poi concluderò, state tranquilli.

Bene: immaginiamo di risalire a *prima* del Big Bang. Dove ci troviamo? E, soprattutto, *quando* ci troviamo? La risposta è che entrambe le domande non hanno senso. Infatti, il *Multiverso* o *luogo in senso generico* in cui siamo capitati non ha inizio né fine nello spazio e nel tempo. Peggio del nostro universo nel quale, per lo meno, c’è un *inizio*. Ma il Multiverso (continuo a usare la maiuscola per enfatizzare la sua natura) è gremito di un’infinità di bolle e bollicine di spazio che, all’improvviso, cominciano a gonfiarsi perché l’*inflazione cosmica* le costringe a fare ciò. Proviamo a introdurre un’immagine su cui, poi, spettegolare.

Ecco: la Figura 22.1 è una veduta (d’artista) del Multiverso, dove da sempre e per sempre continuano a generarsi nuove bolle. Ciascuna di esse, poi, evolverà in un universo nel quale esisterà un *orizzonte di osservabilità*, dovuto proprio alla crescita tumultuosa durante la breve fase di *inflazione*. Proprio come nel nostro universo, d’altronde. Mi chiedete se ci credo sul serio? Bah, ci creda chi vuole.

Ma: un momento: tutte queste bolle, gonfiandosi, non finiranno per *toccarsi* le une con le altre? In linea di massima no, poiché il Multiverso stesso si gonfia a un ritmo tale che due bolle, a meno che non siano nate vicinissime tra loro nello spazio e nel tempo, vengono comunque trascinate via a velocità superiore a quella della luce. Però, sebbene sia improbabile che due bolle si tocchino, non è neppure escluso a priori, e alcuni astrofisici hanno cercato, nella radiazione di fondo a **380.000** anni, *signature* di un evento del genere. E qualcuno, giocando con la statistica e i vuoti e i pieni dell’universo primordiale, ha ritenuto di poter riconoscere configurazioni correlate a una simile *collisione tra il nostro universo e un altro, inizialmente molto vicino*.



**Figura 22.1**

Inutile dire che questa sarebbe, se confermata, una *prova sperimentale* dell'esistenza del Multiverso. Purtroppo, però, la statistica su un solo oggetto può sempre dire tutto e il contrario di tutto, quindi non si tratta di conclusioni molto affidabili. Anche se non è neppure il caso di lasciar cadere il problema, delegandolo però a fisici che abbiano raggiunto una miglior comprensione dei problemi teorici e pratici legati all'inflazione.

Ma restiamo nel Multiverso. Poiché si suppone che anche laggiù vigano le leggi della **MQ**, che tra l'altro presiedono alla nascita casuale di sempre nuove bolle – universo, ci si chiede se tutti gli universi che vi nascono siano in qualche modo *fotocopie* l'uno dell'altro. Ovvero se siano tutti, vuoto più, vuoto meno, somiglianti al nostro universo. E perché mai dovrebbero? Cosa ci autorizza a pensare che le costanti di natura, le stesse leggi fisiche, addirittura il *numero di dimensioni spaziali che vi si srotola*, debba essere congruente con quel che conosciamo qui nei nostri dintorni? Già: non vi ho detto che il Multiverso può possedere tante dimensioni spaziali quante ne vuole (con le limitazioni imposte nel prossimo capitolo) pur se alcuni Principi che sembrano difficili da superare sembrano suggerire che la dimensione temporale debba sempre essere una sola.

Ciò vuol dire che questo Multiverso, che esiste da sempre ed esisterà per sempre, padre di infiniti universi, o forse di infiniti elevati all'infinitesima potenza, o chissà quanti saranno, non produce solo universi *antropici*, adatti alla vita intelligente. Anzi: di gran lunga la maggioranza degli universi saranno talmente ostili alla vita, da essere difficile, per noi, immaginare cosa vi si trovi e come funzionino, e solo una sparuta minoranza, così microscopica che neanche sappiamo come calcolarla, sarà *vivibile*.

Questa, se ci pensate, è una considerazione importante. E non in negativo, come sembra io abbia voluto impostarla, ma in *positivo*. Infatti, il concetto che ne deriva è che, seppur saltuariamente, è inevitabile che in questa congerie di universi dove si può trovare tutto e il contrario di tutto, si generi ogni tanto un *universo antropico*. In questo senso, l'insieme di coincidenze cosmiche in base al quale noi possiamo esistere è niente di più e niente di meno che quel che ho appena detto: un *insieme di coincidenze cosmiche e basta!*

Più di così, a me non sembra lecito procedere: siamo già ben oltre i limiti della fisica, accettiamo che il concetto che vi ho raccontato sia metafisica, ma non in contrasto con le leggi fisiche oggi conosciute, e questo è il massimo che si possa dire. Piuttosto, volendo fare un po' di *metafisica di ordine superiore*, potremo dire che il Multiverso, per attraente che sia il suo esistere da sempre e per sempre, e per il generare *infiniti universi antropici* (pur se questi saranno una sparuta minoranza del totale), non risolve il problema dell'esistere. Difatti, spingere addietro nel tempo fino all'infinito il problema, non lo risolve affatto come vi spiegherebbe meglio Kant: *il Multiverso non contiene in sé il "Principio della propria m esistenza"*. E qui mi fermo per immergermi nell'oscenità fisico–matematica delle *superstringhe*".

## 22.2) – Stringhe a bizzeffe (e superstringhe)

Nel capitolo 18.1 avevo cominciato a buttare le mani avanti, cercando di ricordare al lettore che quando si arriva ai limiti del conoscibile – o forse solo del *conosciuto* – può darsi che s’incontrino ipotesi futuribili la cui solidità scientifica è ancora tutta da dimostrare, e che potrebbero essere spazzate via in un batter d’occhio da nuove osservazioni. In alcuni casi, poi, gli esperimenti richiesti per “*provare o riprovare*” tali ipotesi sarebbero, a causa della natura intrinseca delle idee da verificare, rinviati a un futuro così lontano e nebuloso da rendere lecito parlare di (Meta)fisica almeno con la parentesi, se non addirittura senza.

Domanda: perché il Mazzitelli ripete qui le cose già dette nel capitolo precedente? Risposta: perché c’è una differenza sostanziale. Infatti, è altamente probabile che non sia mai possibile, neppure nel futuro più remoto, provare sperimentalmente che l’Inflazione continua è all’opera. Invece, venendo a ragionare di superstringhe, le cose potrebbero essere diverse.

Difatti, esse sono eleganti costrutti matematici, almeno per quei pochissimi che riescono a ficcarci il naso (io non sono tra costoro), e l’avvertimento prima di entrare un po’ più in dettaglio è: oggi come oggi, *crederci* o no è ancora *ad libitum*. Io stesso, per diverso tempo, ho trovato l’idea allettante e mi è parsa la vera strada verso una *Teoria del Tutto* con le maiuscole. Poi è intervenuto un periodo di forte dubbio, che è stato spazzato via da nuovi successi teorici e quindi da una incredulità pressoché totale. Ma forse...

Ciò non toglie che la teoria delle superstringhe – in realtà, d’ora in poi tenderò a usare solo “*Stringhe*” – sia *potenzialmente* scientifica ovvero suscettibile, in un futuro remoto, di dimostrazione o confutazione sperimentale. metafisica oggi ma, forse, non più domani. È chiara, adesso, la differenza con l’Inflazione continua? E allora perché ho parlato prima della *più metafisica* delle due? Perché le stringhe sono un argomento che richiede un capitolo più lungo. Pazientate, perciò.

Pure in questo caso, non mi metterò a raccontare *tutte* le vicissitudini degli “eroi” delle stringhe: coloro che per primi vi si sono imbattuti, superando scogli enormi che si frapponavano sul percorso della teoria (grazie alla sua imponente struttura matematica, accordiamole almeno provvisoriamente lo status di “teoria” anziché “ipotesi”). Qualche nome e qualche cenno salteranno fuori qua e là, ma fatemi cominciare con una frase un po’ *a effetto* di Edward Witten (da molti venerato, non ho mai capito perché, come il diretto successore di Einstein): «*La teoria delle stringhe è un pezzo di fisica del XXI secolo che ci è caduto sulla testa nel XX*». Perché questa affermazione?

Bene: i prodromi risalgono a Kaluza: un fisico che, già nei primi anni della Relatività generale, inviò a Einstein un suo lavoro teorico nel quale si dimostrava che, in uno spaziotempo a *cinque* dimensioni anziché a *quattro* come il nostro, anche le Equazioni dell’elettromagnetismo, quelle di Maxwell, per intenderci, si comportavano in modo analogo a quelle della gravitazione.

Einstein fu molto colpito dall’articolo, e seguì uno scambio epistolare. Ma il problema era: noi vediamo solo le quattro dimensioni usuali; dove si nasconde la quinta (che sarebbe la *quarta dimensione spaziale*)? Comunque, dopo qualche anno Einstein autorizzò la pubblicazione dell’articolo di Kaluza su una importante rivista scientifica. Poi, la cosa restò lettera morta finché, negli anni ’30 dello scorso secolo, un fisico–matematico di grande

talento, tale Oskar Klein, ipotizzò che la dimensione nascosta fosse molto, molto piccola e *arrotolata su sé stessa* in ogni punto dello spaziotempo, così piccola che gli esperimenti dell'epoca – e men che meno la percezione umana – fossero in grado d'individuare. Nasce così il concetto di “**Dimensione nascosta**”.

Siamo ora negli anni '60 del secolo scorso. Lavorando al CERN (il grande laboratorio europeo di fisica nucleare e subnucleare) il fisico Gabriele Veneziano si rese conto che alcuni risultati sperimentali sulle collisioni tra *nucleoni* ricalcavano una curva teorica conosciuta come “Funzione Beta di Eulero”, dal nome del matematico svizzero che la ricavò nel '700. Pochi anni dopo, il giapponese Nambu cominciò ad approfondire il concetto, e si rese conto che la funzione di Eulero, applicandosi alla vibrazione di stringhe, poteva suggerire una natura “*string-like*” per le particelle elementari.

Ragioniamo un attimo: sappiamo che Feynman non era contento del processo di *rinormalizzazione* applicato all'elettrone come particella puntiforme. Ma: e se le particelle elementari non fossero altro che microscopiche *stringhe* che vibrano in un insieme di *dimensioni nascoste*, e a ciascuna frequenza di vibrazione corrispondesse una *diversa particella*, così come in uno strumento a corde ogni diversa vibrazione dà origine a una nota differente? Applicare la rinormalizzazione a qualcosa di *non puntiforme* potrebbe forse risolvere il problema.

E qui comincia un lungo percorso, con scoperte mirabolanti (niente niente, le stringhe descrivessero perfino l'elusivo e quantisticamente inconcepibile *gravitone*? Sembrerebbe...) e scogli che fanno scuotere il capo agli altri fisici (occorrono *ventisei* dimensioni, tra visibili e nascoste). Poi un balzo d'ingegno, ed ecco che la Teoria si accontenta di *dieci* dimensioni in tutto: in questo modo diventa possibile applicarla a ogni particella conosciuta, ma la *Supersimmetria* diventa *conditio sine qua non*, “*Super*”.

Da ultimo, ci si rende conto che non esiste una sola teoria delle *superstringhe* (perché tali sono diventate) ma ne esistono almeno cinque, più almeno una teoria concorrente, la “*Gravità quantistica*” – alternativa alle stringhe e acerrima nemica di essa. Ma Witten dimostra finalmente che ciascuna delle cinque è un caso estremo di un'altra, e anzi può fornire risultati quantitativi per l'altra, e viceversa, e chissà che perfino la gravità quantistica non possa rientrare in questo schema, essendo la sesta. Inoltre, dovrebbe esistere ancora una dimensione nascosta aggiuntiva, ma la sua natura sarebbe *di tipo diverso* (?) rispetto a quelle canoniche.

Lo stesso Witten, che non è stato il solo matematico-fisico a doversi inventare nuovi pezzi di matematica per promuovere la teoria delle superstringhe, dimostra infine nel 1995 che tutte le teorie finora sviluppate sono *approssimazioni* di quella che dovrebbe essere la cosiddetta “*Teoria M*”, stavolta a *undici* dimensioni come dicevamo prima, dove quella “*M*” è lasciata *libera* senza spiegare cosa voglia dire. Se al lettore piace, potremmo definirla “*Teoria Madre*”; alternativamente, ciascuno ha il diritto di scegliersi il nome che vuole. Anche il Generale Cambronne.

Abbiamo detto 1995: da allora a oggi sono passati oltre 25 anni, ma la ricerca delle equazioni della teoria *M* non ha fatto passi avanti sostanziali. Ciò non vuol dire che tutto sia bloccato e non possano esserci, da un momento all'altro, grandi progressi, ma ciò sembra sempre meno probabile, poiché molti fisici che vi hanno lavorato sopra ritengono ormai la teoria delle superstringhe *sufficientemente avanzata*, e non c'è più la rincorsa delle varie

università e centri di ricerca da cui, una volta, era possibile ottenere borse di studio e posizioni lavorative solo a patto che si lavorasse sulle superstringhe.

Con tutto ciò, non vogliamo dare al lettore l'idea di aver perso di vista il Modello d'universo e, più in particolare, il Multiverso: stiamo per tornarci. Prima, però, siamo obbligati a discutere un punto fondamentale: cosa ci aspettiamo da una teoria, come per esempio quella delle superstringhe, che si ponga come possibile Teoria del Tutto? Come minimo, che essa riesca a ritrovare, come sue approssimazioni "*a bassa energia*", le equazioni del *Modello Standard*, in quanto sappiamo con certezza che esso è in grado di catturare la quasi totalità degli aspetti conosciuti del mondo delle particelle elementari e, parlando all'inizio del 2020, con già alle spalle una grossa statistica di eventi di LHC fino a un'energia di 13 Tev (o 13.000.000 Mev) o, se si preferisce, fino a poter sperimentare ciò che avviene a meno di un millesimo del raggio di un protone. Ce la fa la teoria (o modello) delle superstringhe a stare al gioco?

Non ce la fa, ma per motivi di principio, e ciò è di conseguenza un ottimo paravento per affermare che le superstringhe, probabilmente, sono la teoria giusta, ma ci sono troppi ordini di grandezza tra le energie e le distanze coinvolte nella teoria, e quelle sperimentabili nei più avanzati dei nostri laboratori. Infatti, le dimensioni *tipiche* delle superstringhe dovrebbero essere circa  $10^{14}$  volte *più piccole* di quelle che si raggiungono in LHC, e in proporzione le energie dovrebbero essere  $10^{14}$  volte *superiori*.

A conti fatti, non basterebbe neppure costruire un anello di accelerazione di particelle grande quanto il Sistema solare per raggiungere queste energie, e capirete che hanno buon gioco coloro che affermano: «Noi siamo nel giusto, ma voi fisici sperimentali non siete in grado di dimostrarlo, o di dimostrare che abbiamo torto». Però...

Da una Teoria del Tutto che abbia un senso, pure se resterà indimostrabile a lungo (o per sempre) dati i motivi nel paragrafo precedente, ci si aspetta almeno una cosa. Che la sua costruzione proceda "*a imbuto*", vale a dire: cominciando con concetti assolutamente generali, e poi escluderne a fasci la stragrande maggioranza in quanto matematicamente inconsistenti, fino a convergere a una e una sola teoria che sia perciò – dimostrabile o meno – quella che segna il nostro universo. È successo così?

Al contrario: le soluzioni matematicamente possibili non hanno fatto altro che moltiplicarsi, e il colpo di grazia è stato assestato dallo stesso Witten quando ha dimostrato che le *stringhe* in senso stretto erano solo un limite inferiore del bestiario che popola il suo mondo a 11 dimensioni. Difatti esistono anche *membrane* di 2, 3, 4... dimensioni. Quelle a due dimensioni possiamo pensarle vagamente come *superfici*; a tre dimensioni sono *volumi*, e non oso pensare a cosa siano quelle a quattro, cinque, sei dimensioni, che si avvolgono in spazi sovradimensionali... basta! Il succo del discorso è che, in pratica, *ogni soluzione* alle equazioni delle stringhe è matematicamente consistente, e di conseguenza *fisicamente possibile*.

E così, ridendo e scherzando, abbiamo ritrovato il *Multiverso*. Anzi, quanti ne abbiamo trovati? Infiniti è solo un limite inferiore, e il *nostro* universo è uno dei meno probabili, a causa della sua costante cosmologica piccola ma comunque diversa da zero. A tal proposito, in un suo libro molto popolare, il noto fisico delle superstringhe Leonard Susskind ha quantificato la probabilità di esistenza del nostro universo in una su  $10^{500}$ . Peccato che, per

giungere a una valutazione così ottimistica, egli abbia dovuto *tagliare* arbitrariamente infinite altre possibilità con costante cosmologica *positiva*.

E poi c'è in sospeso il problema della *supersimmetria*. Tutti speravamo (mi ci metto dentro) di trovarla appena acceso LHC, ma finora i fisici di Ginevra hanno solo trovato che molti degli spazi matematici nei quali tale caratteristica della materia avrebbe dovuto trovarsi sono del tutto vuoti, al punto che ormai sono in tanti a cambiare lavoro. Certo: si può sempre affermare che essa potrebbe manifestarsi a energie molto maggiori di quelle sviluppabili in LHC, ma ormai il lettore ha ben capito come la teoria delle stringhe, o superstringhe, o membrane, o l'intera teoria *M*, appartengano molto più al campo della metafisica che della fisica.

Una volta, le favole si concludevano con la strofetta: “*Stretta è la foglia, larga è la via / Dite la vostra, ché ho detto la mia*”. Ma ormai le favole non si usano più, e sono in pochi a ricordarsene. D'altra parte, dopo un intero libro dedicato alla costruzione di un Modello d'universo serio, gli ultimi due capitoli li ho lasciati in libera uscita a far correre la mente (e il trenino–modello) ben al di fuori dei binari! Ragion per cui, concludo qui col mio: “*Stretta è la foglia, larga è la via...*”.

**FINE**  
**Finis. Tempus erat, ius?**  
**C'est la Fin**  
**Ende**  
**The end**

## Appendice 1: Breve glossario

**Antimateria**: nulla di trascendentale. Sappiamo che le particelle elementari reagiscono alle varie interazioni secondo le cariche da esse possedute. Esemplichiamo con un quark **up**, supponiamo che la sua *carica di colore* sia **verde**, sappiamo che la sua *carica elettrica* è  $+2/3$  e la sua *massa* o *carica gravitazionale*, espressa nelle unità di misura preferite dai fisici, è circa **5 Mev**. Ora immaginiamo l'**antiquark up** corrispondente. La sua *carica di colore* sarà **antiverde** che, secondo la teoria dei colori illustrata in Figura 15.1, corrisponde al **viola**. Trattandosi, poi, di un'antiparticella, la carica elettrica sarà l'opposto di quella del quark **up**, e cioè  $-2/3$ . La massa, invece, ha sempre e solo segno positivo, poiché l'**antimassa** non esiste. Di conseguenza, anche l'**antiquark up** avrà una massa di **5 Mev**. Non ho parlato della carica relativa all'interazione debole, ma anche qui possiamo stare certi che le due particelle l'avranno di segno contrario. Cosa avviene, dunque, quando il quark e l'antiquark *si toccano*? Che tutte le cariche si neutralizzano tra loro, e resterà solo una *massa* di circa **10 Mev**. Ma questa massa, a cosa sarà *agganciata*? A nulla, poiché la sola massa, privata di ogni altra *carica*, non esiste. E perciò, si trasformerà immediatamente in energia, secondo la ben nota relazione  $E = mc^2$ . Fine del gioco! (Capitolo 17.1 e seguenti.)

**Big Bang**: oggi come oggi, possiamo dire soltanto che si è trattato dell'evento che ha dato origine all'universo in cui viviamo. Le osservazioni dirette di questo evento sono impossibili per motivi teorici (la successiva **Inflazione** [v.] ha talmente dilatato lo spazio iniziale – forse di un fattore  $10^{75}$  – che ogni traccia di quanto esisteva prima è stata cancellata irrimediabilmente) e sperimentali (la radiazione elettromagnetica esistente prima di **380.000** anni di età, quando possiamo cominciare a osservare la **Parete di fuoco** [v.], è irrimediabilmente rimescolata). Anche sul piano teorico è attualmente impossibile trattare gli eventi relativi al Big Bang, poiché servirebbe un modello unificato che contenesse la **MQ** e la Relatività generale; cosa di là da venire. In questo senso possiamo solo dire che l'universo si comporta come se fosse uscito dal Big Bang, e la **Nucleosintesi primordiale** [v.] ci permette di risalire a pochi secondi dopo il Big Bang. Questo evento, dunque, è alla base del “**Modello Cosmologico di concordanza**” attuale (capitolo 17.1 e seguenti).

**Big Rip e Big Crunch**: le due possibili “morti dell'universo” per quel che ci pare di capire oggi. Il Big Rip, favorito dalle osservazioni, è il “Grande Strappo” dovuto al crescere sempre più tumultuoso dell'Inflazione. Gli Ammassi di galassie si allontaneranno tra loro a velocità superluminale, e via via che le stelle evolveranno e si spegneranno anche le galassie si spegneranno fino a raggiungere la temperatura del fondo cosmico, che a quell'epoca sarà frazioni di °K sopra lo zero assoluto. L'impossibilità di scambiare calore ed energia, ovvero il massimo di entropia, coinciderà con la fine di ogni possibilità di vita. In ogni caso, non è escluso a priori – anche se sembra improbabile – che tutto ciò che esiste nell'universo smetta di allontanarsi e, cambiando il segno dell'energia oscura, torni indietro verso il Big Crunch: l'analogo del Big Bang, ma a rovescio. Ne potrebbe rimbalzare un Big Bang rinnovato, all'infinito? Non tutti sono d'accordo. Infatti, l'entropia di ogni nuovo Big Bang sarebbe

superiore a quella del precedente a causa del **Secondo principio della Termodinamica**, e dopo un po' di rimbalzi il gioco si fermerebbe (capitolo 21.3).

**Bosone di Higgs:** La particella teorizzata fin dagli anni '60 dello scorso secolo, e individuata sperimentalmente solo nel **2012** in LHC. Il "Campo di Higgs", di cui il bosone è solo la **eccitazione** ad alte energie, è una specie di **melassa** attraverso le quali si muovono tutte le particelle. Interagendo con questa **viscosità cosmica** le particelle non riescono a muoversi alla velocità della luce e noi, vedendole "da fuori", interpretiamo questa viscosità come **massa**, poiché è noto che una particella dotata di massa non può raggiungere la velocità della luce. In questo senso, il Campo di Higgs, con la sua viscosità, è definito come "il campo che dà massa alle particelle", e la scoperta del Bosone di Higgs dimostra che questa ipotesi è corretta, poiché è la prova che il Campo di Higgs esiste veramente.

**Buco nero:** luogo inadatto a trascorrervi le vacanze. Al centro geometrico di un Buco nero non ruotante, Relatività generale e **MQ** s'incontrano per cui, non disponendo a tutt'oggi di una buona teoria che metta assieme queste due manifestazioni della fisica, non sappiamo dire nulla, mentre qualcosa è possibile dire delle regioni immediatamente esterne, e interne fino a una (piccola) distanza dal centro. Ma siccome ogni Buco nero, che sia il relitto di una supernova o un mostro al centro di una galassia, è dotato di rotazione, al suo interno esiste una zona (definita di Kerr-Newman) in cui la "**forza centrifuga**" (mi si perdoni il paragone) vince sulla gravità. Se questa zona cresce con la rotazione fino a uscire dalla Superficie di Schwarzschild, il Buco nero si trasforma in una vera e propria **macchina del tempo** con esiti imprevedibili. Anche se c'è chi dice che, con la **MQ**, si potrebbe porre rimedio... (capitolo 10.3 e seguenti).

**Comoving distance:** quando osserviamo una bella mappa a colori della Radiazione di fondo, e cioè luce emessa circa **380.000** anni dopo il Big Bang, siamo soliti affermare – giustamente – che le macchie calde da cui avranno origine, nel tempo, galassie e Ammassi, hanno emesso i fotoni che giungono ora ai nostri occhi circa **13,75** miliardi di anni fa. Però non riflettiamo mai che quando emisero quei fotoni, le macchie stesse erano *trascinate via da noi a causa dell'espansione dell'universo*, a una velocità **già prossima a quella della luce**. Al passare del tempo, la loro velocità di allontanamento è divenuta **superluminale**, e oggi gli Ammassi di galassie nati da ciascuna macchia calda si trovano a una distanza da noi che è la bellezza di **quarantasei miliardi di anni luce**. Ecco: le distanze che si calcolano tenendo conto anche dell'espansione dell'universo prendono il nome di "**Comoving distances**" (capitolo 12.7).

**Costante di struttura fine:** il suo valore numerico è  $\approx 1/137$ . Rappresenta, nelle unità scelte da Madre Natura, la **forza intrinseca** dell'interazione elettromagnetica (capitoli 15.1, 16.1 e 16.2).

**Curvatura del tempo:** in Relatività generale sarebbe più corretto parlare sempre di *curvatura dello spaziotempo*, ma in moltissime circostanze la curvatura dello spazio è molto piccola o trascurabile, mentre si fa sentire quella del tempo. In questi casi, è possibile stabilire

un'identità quasi perfetta tra *la vecchia gravitazione newtoniana* e *la curvatura del tempo* che, in soldoni e sperando che nessun purista mi fulmini, si percepisce come la **consueta accelerazione di gravità**. Quando, però, la curvatura dello spazio comincia a diventare importante, bisogna considerare lo spaziotempo nel suo assieme, e l'analogia con l'accelerazione comincia a cedere (capitolo 9.6).

**Dimensioni nascoste:** nel cosiddetto “*Modello delle superstringhe*” (qualcuno, allargando un po' troppo il piumaggio, parla di “*Teoria M*”, capitolo 22.2) lo spaziotempo, per unificare tutte le interazioni di natura inclusa la gravitazione, dovrebbe avere sei (sette?) dimensioni spaziali. Ma noi ne vediamo solo tre: dove sono le altre? Si fa allora l'ipotesi *ad hoc* che esse siano arrotolate in maniera così stretta ( $< 10^{-30}$  cm) da non essere percepibili da nessuna strumentazione esistente oggi e, verosimilmente, neanche in un futuro medio – lontano. Comodo per i teorici, vero?

**Distanza, massa ecc. di Planck:** quando Planck scoprì la costante che oggi porta il suo nome, si rese conto che, combinandola opportunamente con altre costanti naturali, era possibile definire una distanza, un tempo, una massa, una temperatura che sarebbero stati **valori universali** di queste grandezze per noi, per i Vulcaniani, per i Klingon... Senza passare per le formulette, elenco qui sotto questi valori: **Lunghezza =  $1,616 \times 10^{-33}$  cm; Tempo =  $5,391 \times 10^{-44}$  s; Massa =  $2,176 \times 10^{-5}$  g; Temperatura =  $1,416 \times 10^{32}$  °K**

**Effetto Doppler:** in astrofisica è lo **spostamento verso il rosso**, oppure **verso il blu**, secondo che la sorgente luminosa si **allontani** da noi, o si **avvicini**. Se si allontana emettendo luce, e cioè *onde elettromagnetiche*, quando i campi elettrico e magnetico raggiungono il **massimo**, la sorgente è un po' più lontana da noi rispetto a quando la luce aveva raggiunto il **massimo precedente**. Di conseguenza la distanza tra massimi dell'onda, vale a dire la **lunghezza d'onda** che misuriamo al telescopio, è un po' **maggiore** di quella che ci aspettiamo (capitolo 8.3). Ma lunghezza d'onda maggiore significa luce tendente **verso il rosso**. Il contrario avviene se la sorgente si avvicina a noi, e la luce è schiacciata verso lunghezze d'onda minori, vale a dire **verso il blu**. Misurando l'Effetto Doppler è dunque possibile calcolare *con precisione enorme* **la velocità di avvicinamento o allontanamento** di una sorgente astronomica.

**Energia oscura:** magari lo sapessi, cos'è! Posso dirvi solo che è **qualcosa** che spinge lo spazio ad allontanarsi da altro spazio e perciò, in ultima analisi, è la **forza** che oggi fa **espandere l'universo**. Ma che sia solo una **costante** da aggiungere alle Equazioni di Einstein (e perché?) oppure un'**energia sconosciuta** (ad alcuni piace chiamarla “*Quintessenza*”) che pervade l'universo (cos'è? e perché?), oggi come oggi nessuno lo sa (capitolo 21.3).

**Entanglement:** fenomeno puramente quantistico, che *apparentemente* viola la Relatività speciale, per mezzo di un **segnale nascosto** che viaggia a velocità infinità. Se due particelle si sono trovate a contatto, esse mantengono memoria di questo contatto per quanto possano allontanarsi (in assenza di altri disturbi esterni), e appena una delle due viene **misurata** facendo *collassare la sua funzione d'onda* in uno stato ben preciso, immediatamente

anche la funzione d'onda dell'altra collassa nello stato **giusto** affinché non vi siano violazioni delle leggi fisiche. Si dimostra che l'entanglement non può essere utilizzato per comunicazioni superluminali, ma ha applicazione (ormai anche pratica) nella crittografia su rete di computer, poiché ogni tentativo di *ascolto* da terze parti viene immediatamente individuato (capitolo 14.1).

**Etere:** ipotetica sostanza che dovrebbe riempire lo spazio, ed essere il *medium* attraverso il quale viaggiano le onde elettromagnetiche, così come l'acqua è il *medium* per le onde del mare. La Relatività speciale ha dimostrato che tale sostanza non è richiesta, e che le onde luminose possono viaggiare nel vuoto.

**Fermioni e bosoni:** distinzione tra particelle secondo il valore del loro spin. I fermioni hanno tutti spin semi-intero ( $1/2, 3/2, \dots$ ) in termini di  $\hbar/2\pi$ . Tutte le particelle di **materia** (quark e leptoni) finora conosciute sono fermioni. I bosoni, invece, hanno spin intero ( $0, 1, 2, \dots$ ), e tutte le particelle portatrici di **forze** in senso lato sono bosoni (fotone, gluoni, Higgs,  $W^\pm$  e  $Z^0$ ). I fermioni non possono essere **ammucchiati** nello stesso stato quantico, e questo è il motivo per cui esiste la materia in fase solida. I Bosoni, all'incontrario, possono farlo, e in un certo senso questo spiega l'esistenza delle "Forze a distanza" come vedremo nella prossima voce.

**Forze a distanza:** non esistono, anche se pare a prima vista. La gravità è nient'altro che curvatura dello spaziotempo, e quasi sempre quella dello spazio è trascurabile mentre quella del tempo simula la gravità newtoniana, come spiegato nel capitolo 9.6. La forza elettrica e le altre forze quantistiche sono mediate da "calci" impartiti da **particelle virtuali** come spiegato in capitolo 16.1 e seguenti. Di conseguenza, se veniamo a patti con le stramberie ivi raccontate, ciò che pareva *assurdo* a Newton trova una sua spiegazione semplice e logica... per modo di dire.

**Funzione d'onda e probabilità:** la prima delle due è la soluzione dell'equazione di Schrödinger per una qualsiasi particella: è composta di una parte *reale* e di una *immaginaria*, e rappresenta **tutto ciò che esiste** in merito a quella particella. A scanso di equivoci, faccio notare che *non ho* scritto "**tutto ciò che possiamo conoscere**", ma proprio "**tutto ciò che esiste**", e cioè l'*indeterminazione* insita nella MQ è di ordine **ontologico** e quindi **non epistemologico**. Vigge poi la regola di Born: elevando al quadrato la funzione d'onda, si ottiene la *distribuzione di probabilità* che la particella si trovi in un luogo anziché in un altro. Questa distribuzione di probabilità soggiace, poi, al vincolo che, su un numero tendente all'infinito di particelle tutte provenienti dalle medesime condizioni sperimentali, la probabilità quantistica tenda alla probabilità classica. Ma sulla singola particella, possiamo conoscere solo probabilità e nient'altro (capitolo 14.3).

**Gatto di Schrödinger:** ormai è passato a miglior vita di serena vecchiaia, ma è stato invocato in un **gedankenexperiment** per mostrare come la cosiddetta "Interpretazione di Copenaghen" della MQ faccia acqua, nel momento in cui si deve passare dalla misura della singola particella quantistica all'apparato sperimentale e al risultato macroscopico della

misura. Il racconto non è banale, ed è meglio rinviare il lettore al capitolo 14.2, dove si spiega in modo disteso come funziona la faccenda senza destare lo sdegno di alcun animalista.

**Gedankenexperiment**: esperimento che avviene solo nella testa dello scienziato, senza bisogno di eseguirlo sul serio. Come, per esempio, gettare una palla di cannone dalla sommità della Torre di Pisa e ***cronometrare il tempo di caduta***. Poi, spaccare la palla in due pezzi, di cui uno più grande e uno più piccolo (secondo Aristotele, il pezzo più piccolo dovrebbe cadere più lentamente di quello grande), ma unire i due pezzi con un tratto di catena. Aristotele afferma che il pezzo più piccolo dovrebbe rallentare la caduta dell'altro: però, sempre Aristotele dice che il peso ***palla + catena*** è maggiore di quello della palla iniziale, e perciò l'insieme dovrebbe cadere più velocemente di prima. Nell'un caso, Aristotele ha torto; nell'altro ha torto lo stesso. Se Galileo si fosse limitato a queste critiche ingegnose al "Maestro di color che sanno", probabilmente la sua esistenza sarebbe trascorsa molto più pacificamente...

**Geometrie non euclidee**: ne parliamo nel capitolo 12.1 e seguenti. Andando a scuola, abbiamo appreso i rudimenti della geometria di Euclide: quella del ***piano*** dove ogni retta ha una e una sola parallela, e le due non s'incontrano mai, neppure all'infinito. Ma, per esempio, la superficie di una sfera (***solo la superficie: non ragioniamo sull'interno della sfera***) non obbedisce alla geometria euclidea, poiché ciò che più si approssima a due rette parallele sono due archi di meridiano. Ma essi s'incrociano al Polo nord, si allontanano fino all'Equatore, poi si incrociano di nuovo al Polo sud. E qualunque triangolo disegnato su una sfera, ha la somma degli angoli interni **maggiore di 180°**. Poi c'è l'inverso della geometria sferica: quella ***iperbolica*** trovata da Girolamo Saccheri e respinta in quanto orripilante, e ritrovata due secoli dopo da Lobacevskij. In essa, esistono ***infinite rette parallele*** a ciascuna retta, e la somma degli angoli interni di un triangolo è **inferiore a 180°**

**Gluoni**: sono le particelle di massa nulla che, trasportando ***colori*** e ***anticolori***, scambiano la forza di colore (o ***Interazione forte***) tra quark (capitolo 15.3). Il loro effetto attrattivo è così intenso che, al di fuori di situazioni particolarissime (per esempio in **LHC**), è impossibile trovare un quark singolo; sono tutti uniti a gruppi di tre, di ***colore*** diverso, e si scambiano furiosamente gli otto tipi di gluoni esistenti. Così, per esempio, accade nei protoni e neutroni: le basi per la costruzione dei nuclei atomici e, aggiungendo gli elettroni, la materia ordinaria. Si noti bene: solo i quark e le particelle da essi costituite (***protoni*** e ***neutroni***, per esempio) sono sensibili alla forza di colore.

**Inflazione (continua?)**: fenomeno invocato per spiegare la quasi totale ***uniformità*** dell'universo a **380.000** anni di età (parete di fuoco), mentre vi sono motivi eccellenti ed ovvi perché esso debba essere molto più ***eterogeneo*** (capitolo 19.2). Dopo il Big Bang, in una frazione di secondo così piccola che neanche vale la pena di scriverla, parti di universo che erano a contatto tra loro, e quindi omogenee, sono state dilatate di circa **10<sup>75</sup>** volte, e perciò non si sono trovate più a contatto causale, come le vediamo oggi. L'Inflazione continua

(capitolo 22.1), poi, è una bella favola (almeno per ora) che ipotizza la nascita di sempre nuovi universi, da sempre e per sempre. Difficile, e forse impossibile da dimostrare.

**Interazione debole ed elettrodebole:** per questa voce, un breve sommario non basta, e bisogna rinviare ai capitoli 16.4 e 16.5. Aggiungiamo però che ormai è assodato che l'interazione debole, e quella elettromagnetica, ad altissime energie (ma raggiungibili e sperimentabili nel grande acceleratore di particelle) diventano due facce di una stessa medaglia, poiché i mediatori dell'interazione debole perdono la massa e si *mescolano* col fotone. È una faccenda di estremo interesse, ma se desiderate approfondirla non posso che rinviarvi alla bibliografia.

**Interpretazione di Copenaghen:** è la prima interpretazione *completa* dei fenomeni quantistici che si costruì, a poco a poco, attorno a Bohr il quale, per l'appunto, lavorava a Copenaghen. In questo libro, più o meno, ho sempre aderito *abbastanza* a tale interpretazione modellistica, pur non ignorando che essa ha punti deboli grossolani quale, ad esempio, il *problema della misura*. Questo si esprime nel momento in cui si cerca di passare dall'oggetto quantistico sul quale ha luogo la misura, all'intero apparato di misura che fornisce una risposta *classica* (un numero, una lancetta e così via). Ho accennato, per esempio nel capitolo 14.2, a quanto sia irrisolvibile tale problema in questa interpretazione, ma ogni diversa interpretazione non fa che spostare il mucchietto di polvere da un angolo all'altro del tappeto, senza mai liberarsene, per cui una irrazionalità vale l'altra, o per lo meno questo è il mio parere.

**Large Hadron Collider (LHC):** in questo momento, e ancora per diversi anni, esso costituirà il più potente strumento di misura per la fisica delle particelle elementari. Ha consentito la scoperta del Bosone di Higgs, col quale si completa il Modello Standard (v. più avanti), e ha permesso di imporre limitazioni severissime ai più semplici modelli di *Supersimmetria* ideati negli ultimi trent'anni, tanto che molti fisici stanno abbandonando quest'ultima teoria per cercare qualcosa di diverso. La macchina, situata a Ginevra e che passa in parte sotto il territorio svizzero, in parte sotto quello francese, è – tra le tante cose – un *microscopio* che consente di *vedere* oggetti aventi dimensione pari a  $10^{-17}$  cm; sarebbe a dire **10.000** volte più piccoli di un protone.

**Materia oscura:** è presente in quantità pari a circa **5** volte la materia normale, e la sua forza di gravità è fondamentale perché quest'ultima, dopo il Big Bang (e l'Inflazione?) non si disperda senza formare galassie e stelle. Purtroppo, anche per essa vale un discorso analogo a quello dell'energia oscura: nessuno sa di cosa si tratti. Fino a poco tempo fa si pensava a particelle *supersimmetriche* ma, purtroppo, **LHC** sembra aver dimostrato che almeno il tipo di supersimmetria corrispondente era solo una bella pensata. Ora si cerca di scoprire indizi grazie ad anomalie nella radiazione cosmica (eccesso di raggi  $\gamma$  oppure di antiprotoni), poiché nei più recenti e poderosi esperimenti in profondità, sottoterra, non si è mai rivelata neanche una sola particella di materia oscura (capitolo 21.2).

**Modello Standard (MS)**: ce ne sono due: il primo è la teoria delle particelle elementari e delle loro interazioni così come la conosciamo oggi, e come sembra *tenere* anche alle più alte energie raggiungibili in LHC. Il secondo è quello cosmico: il *Modello Standard* del Big Bang (con o senza inflazione secondo il gradimento di chi se ne occupa) e che, anch'esso, sembra *tenere* fin dove le osservazioni astronomiche più accurate riescono a raggiungere. Per precauzione, a quello cosmologico viene aggiunto “di concordanza”. Occhio, dunque: attenzione a quale **MS** ci si riferisce, secondo l'ambito del discorso.

**Multiverso**: altra bella ipotesi, che con ogni probabilità non sarà mai possibile verificare sul piano scientifico. Se ne parla solo perché, oggi come oggi, ancora *sembra* non cozzare frontalmente con tutta la fisica conosciuta. L'idea generale è che *là fuori* possano esistere infiniti altri universi, che si generano da sempre e per sempre, alcuni dei quali somigliano al nostro come leggi fisiche e costanti di natura, altri possono essere enormemente differenti. Chi li genera, e come? Sono stati proposti diversi modi (qualcuno si è dato la pena di contarli, ed è giunto a una decina di origini diverse) ma, come dicevo, ipotesi sono e ipotesi rimangono (capitolo 22.1 e seguente). Amen.

**Neutrini**: sono le particelle di materia più elusive a causa del fatto che “parlano” col resto del mondo solo per mezzo dell'*Interazione debole* (capitolo 16.4), talché non sappiamo ancora quale sia la loro massa (comunque, pochi milionesimi di quella dell'elettrone). Proprio per tale difficoltà di rivelazione, passano inalterati nel cosmo, e sono ormai stati costruiti dei veri e propri *telescopi per neutrini*, il cui prototipo è **IceCube** in Antartide: un chilometro cubo di ghiaccio riempito di rivelatori di luce pronti a cogliere il lampo dovuto a un neutrino che urta un nucleo atomico.

**Nucleosintesi primordiale**: insieme di reazioni nucleari che hanno avuto luogo da circa 1 s a circa 200 s dopo il Big Bang. Prima, la radiazione luminosa era così “dura” che avrebbe smembrato qualsiasi nucleo (considerando che i protoni si stavano appena formando); dopo, temperatura e densità erano scese troppo per avere ancora reazioni nucleari (capitolo 20.2). Poiché i calcoli teorici coincidono in modo convincente con le abbondanze degli elementi leggeri osservati nelle stelle più antiche, a chi non crede al Big Bang si può far presente che l'universo ha *almeno* attraversato una fase *identica a quella che avrebbe vissuto se fosse uscito dal Big Bang un minuto prima*, e questo è un dato sperimentale che ci permette di dare un'occhiata a ridosso del Big Bang.

**Onde gravitazionali**: così come l'accelerazione di una carica elettrica produce onde elettromagnetiche, l'accelerazione di una massa produce onde gravitazionali, che sono idealizzabili in quanto *increspature dello spaziotempo*. La loro osservazione diretta è ostacolata da un gran numero di fenomeni che causano “rumore”, ma ormai si riesce a tenerne conto, ed è stato possibile osservare senza equivoco le onde provenienti da numerose di buchi neri i quali, ruotando l'uno attorno all'altro e perdendo energia per emissione di onde, hanno finito per ingoiarsi a vicenda producendo un flash di energia in onde gravitazionali, superiore in quell'attimo all'energia emessa da tutte le stelle dell'Universo Causale messe assieme.

**Orizzonte:** dizione vaga che, per analogia con l'orizzonte terrestre che impedisce di vedere oggetti che si trovino al disotto di esso, si applica in tutti quei casi in cui ci sono motivi di principio che impediscono di “vedere” qualcosa in senso lato (capitolo 2.3). L'esempio più ovvio è l'Universo Causale: il suo *orizzonte* è a **13,75** miliardi di anni–luce, e non è possibile vedere oggetti più lontani (a parte i discorsi relativi alla *comoving distance*).

**Paradosso di Olbers:** se l'universo fosse eterno e infinito, poiché gli astri aumentano col **cubo** della distanza (vale a dire: col volume di spazio) mentre la loro luce si attenua solo col **quadrato** della distanza, da ogni parte del cielo dovrebbe pioverci addosso *infinita luce*. Ma l'universo, per fortuna, non è infinito almeno nel tempo, e questa è una prima soluzione (apparente) al Paradosso. In realtà, da ogni parte siamo circondati da una parete di fuoco a **5000 °K** (vedi capitolo 11.2), ma per fortuna questa si allontana da noi a una velocità prossima a quella della luce, e i **5000 °K** di partenza si riducono a soli **2,73 °K**. Quindi, il Paradosso di Olbers si ripropone in termini molto più miti.

**Parete di fuoco:** circa 380.000 anni dopo il Big Bang, dove un po' prima, dove un po' dopo, la temperatura del plasma scende a circa **5000 °K**, e finalmente gli elettroni possono unirsi ai protoni formando atomi di idrogeno. Non c'è più *plasma* (opaco alla luce), ma *gas*, e il gas è trasparente alla luce. Di conseguenza, la parete di fuoco rappresenta l'orizzonte (vedi) più vicino al Big Bang che sia possibile osservare *per mezzo di radiazione elettromagnetica*. Per una spiegazione dettagliata vedi il capitolo 11.2, ma anche la voce di glossario “Paradosso di Olbers”.

**Particelle virtuali:** rappresentano un “modello” di ciò che avviene in **MQ** nel momento in cui si vogliono spiegare le *forze a distanza* per mezzo di *spinte* dovute a trasferimento di “oggetti” (capitolo 16.1). Grazie al Principio d'Indeterminazione (vedi), è possibile estrarre dal *vuoto* un'energia  $\Delta E$  purché essa venga restituita entro un tempo  $\Delta t$  tale che  $\Delta E \times \Delta t < h/4\pi$ . In tal modo *non c'è abbastanza tempo per misurare l'energia  $\Delta E$* , e se questa viene *restituita al vuoto* prima che scada  $\Delta t$ , non c'è violazione sostanziale del Principio di conservazione dell'energia. Nel frattempo, però, quell'energia può manifestarsi sotto forma di *particelle non misurabili per motivi di principio*, e tali *particelle virtuali* sono in grado di trasportare quantità di moto da una parte all'altra, simulando una *forza a distanza*.

**Pianimali:** animali immaginari che è lecito torturare. Essi vivono nel *piano* e sono perciò a due sole dimensioni (capitolo 4.3, ma anche altrove). Ci aiutano a *intuire*, seppure non *capire del tutto*, come si presenterebbe una geometria a quattro dimensioni spaziali o, per meglio esprimersi, come sarebbe il nostro universo se la sua geometria non fosse *euclidea*, bensì *curvilinea* (come in effetti avviene in prossimità di una massa).

**Principio antropico:** constatazione quasi banale (a posteriori): le leggi che regolano il cosmo sono compatibili con la possibilità di esistenza di una vita in grado di *evolvere per miliardi di anni* (capitolo 21.1). Esso diventa meno banale quando si prova a calcolare cosa succederebbe spostando anche di poco il valore delle varie costanti naturali che compaiono nel **Modello Standard**. Sembra esistere un equilibrio delicatissimo, per cui gli universi che

si otterrebbero da piccole variazioni di queste costanti sarebbero *del tutto inadatti alla vita*. Si presta alle speculazioni filosofiche più selvagge, per cui si raccomanda al lettore di tenersi sempre ben aderente al *Metodo scientifico*.

**Principio di costanza di  $c$** : nelle Equazioni di Maxwell, la velocità di un'onda elettromagnetica è sempre  $c$ . Per tale motivo, pur essendo all'oscuro dei risultati sperimentali di Michelson che confermavano l'*assoluta costanza* di  $c$  qualsiasi fosse *il moto della sorgente*, Einstein decise di elevare questa *costanza* al valore di *Principio universale*. Da qui, gli fu poi possibile sviluppare l'intera Teoria della Relatività speciale (o "ristretta", capitolo 6.1 e seguenti).

**Principio d'Indeterminazione (PdI)**: analogamente al caso precedente, questo è il Principio di base sul quale si fonda tutta la MQ (capitolo 16.3). Esso afferma che la "posizione" e la "velocità" di ogni particella quantistica siano quantità *nebulose* nel senso che *non esistono nel senso comune del termine* ma si *materializzano* solo all'istante della loro misura. Inoltre, maggiore è la precisione con cui misuriamo una delle due, più elevata diventa l'*incertezza* con cui possiamo conoscere l'altra. Più di così, in un Glossario non lice dire.

**Principio d'inerzia**: chi ci dice che la massa su cui si basa la dinamica newtoniana, e la massa che compare nella legge di gravità, siano la stessa quantità fisica? Anche qui intervenne Einstein, ponendo come Principio universale *l'identità di queste due quantità*. Ciò fu la prima delle basi (il processo fu assai più lungo e faticoso che per la Relatività speciale) che, in dieci anni di lavoro, gli consentì di giungere all'enunciazione della Teoria della Relatività generale, la quale sostituisce la dinamica e la gravitazione newtoniana (capitolo 9.1 e seguenti).

**Quark e leptoni**: sono le *particelle ultime* costituenti la materia (capitolo 17.1). Come facciamo a sapere che non sono divisibili anch'esse? Ci sono molte prove sperimentali, ma soprattutto la maggioranza dei fisici ne è convinta in base a considerazioni teoriche. Il caso buffo è che per costruire *tutta la materia esistente* basterebbero *due quark e due leptoni*, ma se raduniamo queste quattro particelle in una "*famiglia*", la natura ha deciso che debbano esistere *tre famiglie* con particelle sempre più massicce e instabili, che finiscono per decadere in quelle della prima famiglia. Perché? Indovinala grillo!

**Quintessenza**: nome assegnato a un'ipotetica energia che riempirebbe il vuoto, e sarebbe responsabile dell'*espansione accelerata* dell'universo (capitolo 21.3 e seguenti). Ma non solo non sappiamo di che tipo di energia si tratti: per il momento non sappiamo neppure *se esista*.

**Rinormalizzazione**: *sporczia matematica* inventata da Feynman, grazie alla quale il Modello Standard funziona meglio di un orologio delle Ferrovie svizzere. Consiste nell'imporre:  $\infty - \infty = \text{il valore (finito) che ci serve}$ . Ma è una procedura del tutto arbitraria, come lamentato dallo stesso Feynman in epoche successive, per cui l'intero Modello Standard è *sospeso nel vuoto* (capitolo 16.2).

**Sovrapposizione di stati:** le particelle quantistiche possono esistere contemporaneamente in più *stati* differenti. Per esempio, un elettrone, almeno finché non venga *misurato*, non possiede una precisa orientazione del suo spin. Nel momento della misura, però, esso è costretto (e questo è un punto ancora piuttosto oscuro della MQ) a “scegliere” la direzione del suo spin; direzione che manterrà per tutta la durata dell’esperimento (poi lo perdiamo di vista e non ne sappiamo più niente). Questa sovrapposizione, che non riusciamo a visualizzare, corrisponde a una ben precisa caratteristica matematica dell’Equazione di Schrödinger (capitolo 14.4).

**Spaziotempo:** secondo Kant, lo spazio e il tempo sono due categorie *innate* nella nostra mente e, se ci pensate, è proprio così. Soprattutto, sono due *entità separate*. Ma la Relatività mostra che, per mantenere costante la velocità della luce  $c$ , due *osservatori* (sperimentatori) che viaggiano con velocità relativa diversa da zero, misurano in modo diverso lo spazio e il tempo quasi che si trasformassero un pochino *l’uno nell’altro*. Di qui il concetto di “Spaziotempo”, poiché quelle che a noi appaiono come *due categorie distinte*, sono in realtà *una sola*, come spiegato meglio nel capitolo 6.1 e seguenti.

**Supernove di tipo Ia:** sono le “Candele standard” che ci permettono di misurare le distanze a cui queste strane stelle esplodono, essendo così luminose da essere visibili ai più moderni telescopi fino a distanze cosmiche. Si tratta di *nane bianche* in un sistema binario (di solito con un’altra nana bianca come compagna) che succhiano materia dall’altra stella. Quando la loro massa supera  $1,44 M_{\odot}$ , la gravità le costringe a implodere fino a *stelle di neutroni*, rilasciando una quantità di energia enorme, il cui valore è ben conosciuto. Poiché sono (quasi) tutte identiche tra loro, la curva di luminosità è la stessa, e dalla *luminosità apparente* è possibile dedurre la loro distanza assoluta (capitolo 8.3).

**Supersimmetria:** teoria tanto bella che avrebbe *dilatato* il MS assegnando a ogni sua particella una *superparticella*. Per elegante che fosse, l’acceleratore LHC sta ormai ponendo limiti improponibili alla sua esistenza. *De profundis...* peccato! E adesso non sappiamo più cosa cercare.

**Superstringhe:** ipotesi in base alla quale le particelle elementari sarebbero minuscole *stringhe* che vibrano, e a ogni modo di vibrazione corrisponde una particella diversa (v. capitolo 22.2). Potrebbe essere la Teoria del Tutto, poiché ha posto anche per la gravitazione. Attenzione, però: il modello corrente ha bisogno che esista la *supersimmetria*, e questa sembra allontanarsi dall’orizzonte della fisica. Certo: poiché le stringhe apparirebbero solo a energie miliardi di miliardi di volte quelle raggiungibili negli acceleratori, i teorici possono sbizzarrirsi e trovare soluzione anche a questo problema. Vedremo!

**Teoria M:** ultima evoluzione del modello delle superstringhe. Le sue equazioni costitutive non sono note, e il significato della lettera “M” è lasciato alla discrezione di chi ci lavora (v. capitolo 22.2). Sta di fatto che è stata proposta vent’anni fa, non ha prodotto ancora

nulla sulle superstringhe, e tutt'al più la sua struttura matematica è stata utilizzata in altri campi della fisica che non hanno nulla a che fare con le stringhe. Meglio di niente...

**Tesseratto:** designazione convenzionale per il *cubo a quattro dimensioni* (v. capitolo 4.3). Ragionarci sopra può essere utile a capire come funziona la quarta dimensione spaziale, e a diventare matti.

**Unimali:** i più umili tra gli animali esistenti (nella fantasia). Hanno una sola dimensione: la lunghezza, e quindi la loro monotona esistenza (pur se sono dotati di elevate capacità matematiche) si svolge lungo una retta. Il loro punto di forza è che, essendo in genere piuttosto corti, possono essere approssimati, sui vari diagrammi, da un solo punto: il loro baricentro. Sono descritti nel capitolo 7.1, e faremo la conoscenza con due *unimatematici* dai nomi molto evocativi: *Unitagora* ed *Euniclide* che chiameremo più familiarmente “U” ed “E”.

**Universo Causale (UC):** è la frazione di universo dalla quale la luce può fare in tempo a giungere fino a noi, considerando che il **Big Bang** ha avuto luogo circa **13,75** miliardi di anni fa. Di conseguenza, l'Universo Causale è una sfera che si estende attorno a noi, e la sua dimensione corrisponde all'età dell'universo espressa in anni-luce. Perché “causale”? Come spiegato nel capitolo 3.1, da questa frazione di universo possono giungere sulla Terra “**influenze**” che possono avere effetto sulla Terra medesima e sui suoi abitanti. Da *fuori*, invece, non può giungere nulla.

## Appendice 2: Testi consigliati

In primo luogo, ritengo opportuno che il lettore prenda familiarità con la “Geografia astronomica” pur se, a stretto rigore, per comprendere la cosmologia cui è dedicato questo volume ciò non sarebbe del tutto indispensabile. E comincio parlando di immagini astronomiche. Questo è un punto dolente: in primo luogo gli atlanti ad esse dedicati *invecchiano* rapidamente via via che entrano in funzione nuovi strumenti di osservazione; in secondo luogo, la stampa ad alta risoluzione e quadricromia rende un buon atlante estremamente costoso. Ma c'è una soluzione. La NASA mette a disposizione una pagina Web intitolata *A Picture A Day (APOD)* al seguente indirizzo:

<https://apod.nasa.gov/apod>

Collegandosi ogni giorno, vi si può trovare un'immagine astronomica in senso lato (per lo più nebulose e galassie, ma anche pianeti, Sole, comete ecc.) che si può scaricare in alta risoluzione per costruirsi il proprio Atlante sempre aggiornato, e che per di più è corredata da una breve spiegazione da parte di un astronomo professionista. È una pagina da non mancare.

Occorre, invece, un buon Atlante celeste, magari da appendere a una parete. Ho trovato utile, a tale scopo, la “*Carta del cielo – Geoposter. Ed. Geo4Map*”, distribuita da Hoepli e su Amazon. La Geo4Map produce, se qualcuno le desiderasse, anche una carta della Luna, e una del Sistema solare.

Ora bisogna prendere familiarità con gli oggetti celesti più comuni, per sapere *cosa sono*. Suggerisco “*L’astrofisica è facile*” di Mike Inglis. Ed. Springer. D’ora in avanti, se non esplicitato, va da sé che i testi consigliati si trovano anche su Amazon.

A questo punto inserisco tre libri di Brian Greene, che è uno dei migliori divulgatori di questo arco storico. Sono in ordine di complessità crescente, e contengono già i primi riferimenti alla Relatività e alla Meccanica Quantistica. Il lettore dovrà decidere da solo fin dove leggere, per poi fermarsi e riprendere dopo essere andato avanti col presente volume. 1) “*L’universo elegante*” di Brian Greene; Ed. Einaudi. 2) “*La trama del cosmo. Spazio, tempo, realtà*” di Brian Greene; Ed. Einaudi. 3) “*La realtà nascosta. Universi paralleli e leggi profonde del cosmo*” di Brian Greene; Ed. Einaudi. Attenzione: Greene è un eccellente divulgatore, e occorre un po’ di giudizio da parte del lettore per capire quando sta partendo per la tangente e illustra (bene) idee (fasulle).

È tempo di affrontare direttamente la Relatività. Ho trovato buono: “*Capire davvero la Relatività*” di Daniel F. Stier; Ed. Zanichelli

Quivi comincian le dolenti note. Vi propongo un libro in inglese di John Gribbin, che è un *discreto* divulgatore, ma qui ha prodotto il suo capolavoro. Il libro è del 1984 ma, come introduzione alla Meccanica Quantistica, secondo me è ancora insuperato. Lo troverete su Amazon. “*In search of Schrödinger cat*” di John Gribbin; Ed. non specificato.

Una soluzione di compromesso *discreto* è: “*Il mondo dei quanti: La fisica quantistica per tutti*” di Kenneth W. Ford; Ed. Boringhieri

Un libro per chi vuole approfondire un po’ di più il dissenso tra le visioni della fisica di Einstein e Bohr: “*I dadi di Einstein e il gatto di Schrödinger. Due menti geniali alle prese con gli enigmi della fisica contemporanea*” di Paul Halpern; Raffaello Cortina Editore.

Questo è un libro originale, che spezza un po' l'aridità della fisica pura e semplice: **“Quadri di un'esposizione. Le grandi idee della fisica attraverso 32 capolavori della pittura”** di Leonardo Colletti; Ed. Lindau.

Vogliamo affrontare il Modello Standard? Esiste questo unico libro in italiano, che non è proprio il massimo, ma è almeno *dignitoso*: **“La teoria del quasi tutto”** di Robert Oerter; Ed. Codice. Purtroppo, non ho trovato null'altro di *abbordabile* all'argomento, neppure in inglese.

Qualche lume in più, ma sempre in inglese, è: **“Particle physics: a very short introduction”** di Frank Close; Ed. non specificato. È un buon libro, e molto economico.

Il Principio Antropico. Ottima introduzione in: **“I numeri dell'universo. Le costanti di natura e la Teoria del Tutto”** di John D. Barrow. Ed. Mondadori

E finalmente siamo ai confini con la fantascienza. **“Gravità, stringhe e particelle. Una escursione nell'ignoto”** di Maurizio Gasperini; Ed. Springer. Secondo me è un po' dispersivo, ma può essere divertente.

Da ultimo, segnalo la mia **“Bibbia”**, che è un po' *tosta* ma *remunerativa* per chi abbia il coraggio di affrontarla. **“Deep down things”** di Bruce A. Schumm; Ed. Johns Hopkins Univ. Press. C'è la risposta a ogni domanda sulla Sezione III. O *quasi*...

Concludo con due testi di tipo un po' differente: sono suggeriti solo a chi abbia qualche reminiscenza del calcolo differenziale appreso al Liceo (bastano pochi ricordi lontani), ma non sono cosette da sfogliare distrattamente. Il primo riguarda la **Relatività generale** e s'intitola “L'irresistibile attrazione della gravità”. L'Autore è Luciano Rezzolla, l'Editore è Rizzoli. Ho trovato molto interessante la sua lettura approfondita.

Il secondo, molto diverso come concezione, riguarda la **Meccanica Quantistica** e ha come sottotitolo: “Il minimo indispensabile per fare della (buona) fisica”. Gli Autori sono Susskind e Friedman, e il libro va letto, riletto, ricominciato se necessario, e digerito, ma gli Autori hanno compiuto uno sforzo molto serio per riuscire a rendere comprensibile l'approccio di Dirac alla Meccanica quantistica, che contiene pressoché tutto quello che è necessario per “capire” questo pilastro della fisica. Ma bisogna che il lettore dimentichi tutto ciò che crede di sapere di MQ, proprio come in questo libro ha dovuto far finta di scordare tutto ciò che già conosceva di cosmologia.

**Poiché non sembra che resterò a lungo qui,  
un caldo saluto a tutti i miei estimatori.  
Italo Mazzitelli.**