

Il corpo nero” e la “costante di Planck”

Se facciamo passare della luce bianca attraverso un gas, notiamo che quest'ultimo assorbe un pò di luce. Non di tutti i colori, ma solo di alcuni colori ben precisi.

Per esempio, i vapori di sodio assorbono molto la luce gialla.

Ora, riscaldiamo i vapori di sodio. Ci accorgeremo che cominciano a emettere luce. Per la precisione, luce gialla, esattamente come quella che assorbono.

Più in generale si osserva che un corpo il quale, quando è freddo, assorbe luce di un certo colore, riscaldato emetterà proprio quello stesso colore. Più avanti ne potremo capire il perchè; per ora accettiamo questo fatto come una legge fisica sperimentale.

Prendiamo ora una boccia da biliardo bianca ed esponiamola alla luce. Essendo la sua superficie levigata, ne rifletterà un bel pò.

Adesso tingiamola di nero con una normale vernice “nero opaco”. Se la esponiamo alla luce, specie a quella radente, vedremo che una parte è assorbita, ma una certa frazione continua a essere riflessa.

Mescoliamo del nerofumo alla vernice e riproviamo. Stavolta, la quantità di luce riflessa sarà veramente piccola. Infatti, la superficie della boccia non è più liscia, e le piccole concavità presenti aiuteranno molto a intrappolare la luce.

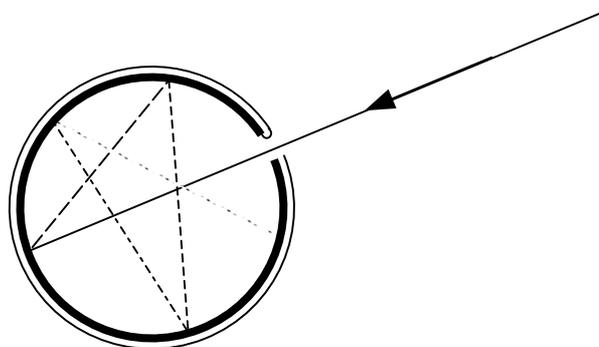
Altra cosa importante: l'oggetto assorbirà con la stessa efficienza luce di qualsiasi colore. Infatti, una volta che l'onda arriva sulla sua superficie, rimane intrappolata qualunque sia la sua lunghezza d'onda.

Ci domandiamo allora: se riscaldiamo questa boccia, che tipo di luce ne verrà emessa? La risposta è : di tutti i colori.

Abbiamo costruito un “corpo nero” rudimentale. Assorbe e, se riscaldato, emette luce di ogni colore. E siccome assorbe la maggior quantità di luce possibile, sarà anche l'oggetto che, portato a una certa temperatura, emette più luce di qualsiasi altro.

Perfezioniamolo. Costruiamo una cavità metallica le cui pareti interne siano dipinte di nero opaco, e che comunica con l'esterno solo per mezzo di un buchino piccolissimo.

Qualsiasi raggio di luce riesca a entrare attraverso il buchino, avrà probabilità quasi zero di poterne uscire di nuovo. Infatti, anche se non sarà subito assorbito dalla parete e verrà riflesso, lo sarà sempre all'interno della sfera, e prima o poi verrà comunque assorbito.



Questo è un corpo nero praticamente perfetto. Dunque, se lo riscaldiamo, dal buchino uscirà luce di ogni colore, nella maggior quantità possibile per quella temperatura.

Estate del 1899: Max Planck e gentile signora sono in visita da un collega per il tè. Mentre le consorti spettegolano, il collega mostra a Planck i risultati delle sue ultime misure: quanta luce viene emessa da un corpo nero a diverse frequenze ν (ricordiamo che $\nu = c/\lambda$, dove λ è la lunghezza d'onda).

Planck si mette al lavoro e, nel giro di una settimana, trova una formula matematica che mette in perfetta relazione la temperatura del corpo nero con lo spettro di luce emessa.

La formula è perfetta, e dunque non può essere una approssimazione trovata per puro caso. Deve contenere in sé qualche significato fisico. Ma siccome Planck ci è arrivato per tentativi, non gli è affatto chiaro che cosa significhi quella formula.

In fig. 1, vediamo un diagramma in cui c'è la lunghezza d'onda sulle ascisse, e l'intensità di luce emessa sulle ordinate, per una temperatura di 6000°K . I punti rappresentano (idealmente) i risultati alle misure, la curva a tratto continuo è quel che si ottiene dalla formula di Planck.

Le Equazioni di Maxwell, che descrivono ogni fenomeno elettromagnetico, erano già note da un quarto di secolo. Applicandole all'emissione di luce da un corpo nero, però, sorgeva un problema. Mentre tutto andava bene a grandi lunghezze d'onda, e le previsioni della teoria erano rispettate dagli esperimenti, a basse lunghezze d'onda (ultravioletti) la teoria prevedeva una crescita fino all'infinito, mentre gli esperimenti mostravano una diminuzione fino a zero.

Questo problema prendeva il nome di "catastrofe ultravioletta".

Planck era ormai in possesso della formula finale per l'emissione di luce dal corpo nero. Sapeva dunque da dove partire (Eq. di Maxwell) e dove doveva arrivare (la sua formula), ma non riusciva a trovare i passaggi intermedi. Anche per lui, nell'UV la luce doveva tendere all'infinito.

Provò allora a ragionare in questo modo: Supponiamo che la luce non sia emessa in modo continuo, ma solo a "granelli", e che l'energia di ciascun granello non possa essere inferiore a un certo valore. Poniamo l'esistenza di una costante di proporzionalità che per ora chiameremo "h", e diciamo che a ogni frequenza ν l'energia **E** di un granello di luce sia uguale a **E = h ν**

Il trucco che aveva in mente Planck era di riuscire a riprodurre la sua formula e poi, per tentativi, far tendere **h** a zero per ripristinare la "continuità" nell'emissione di luce (granellini di energia piccola quanto si vuole, fino a zero, vogliono dire emissione continua)

In effetti, riuscì a riprodurre la sua formula, ma si accorse che **h** non poteva scendere sotto un certo valore, altrimenti la luce tornava a crescere fino all'infinito nell'ultravioletto

Si chiese cosa potesse significare tutto ciò e, nel 1900, tenne alcune conferenze ai suoi colleghi fisici raccontando cosa aveva trovato. Per molti sembrò una curiosità e nient'altro; altri non ci credettero, e anche quelli che presero sul serio la cosa non riuscirono a spiegarsela.

Sta di fatto che, nel 1900, Planck aveva trovato la prima prova che la luce non viene emessa in modo continuo, ma per granelli o "quanti" (dal latino: "quantum" ovvero: un certo ammontare, una quantità finita).

Chi prese veramente sul serio questo fatto fu Einstein il quale, nel 1905, dimostrò come l'effetto fotoelettrico richiedeva proprio la presenza di "pacchetti" di luce di energia proporzionale alla frequenza, esattamente in base alla formula proposta da Planck.

“Effetto Fotoelettrico”: inviando luce su una lastra metallica, quest’ultima libera elettroni.

Se la luce è un’onda elettromagnetica, questo è comprensibile. Nel metallo ci saranno elettroni liberi e l’onda, facendoli vibrare col suo campo elettrico, cederà loro energia finché non riescono a uscire.

Ma l’energia di un’onda è proporzionale al quadrato dell’ampiezza dell’onda. Dunque, una luce più intensa è composta da onde più “alte” di una luce debole. Inviando sul metallo luce più intensa, gli elettroni dovrebbero venirne fuori con più energia.

Invece, finché non si mandava sul metallo luce di λ abbastanza piccola non veniva fuori nulla, anche se l’intensità della luce era enorme.

Esempio pratico. Prendiamo una lastrina di rame e mandiamogli sopra luce rossa. Non esce nessun elettrone. Intensifichiamo il flusso di luce. Continua a non uscire niente.

Passiamo a luce verde. Escono elettroni, ma con una energia molto bassa. Intensifichiamo la luce. Escono più elettroni, ma ciascuno continua ad avere energia bassa.

Ora usiamo luce blu. Gli elettroni escono con maggiore energia.

Tutto ciò non è spiegabile se l’energia dell’onda elettromagnetica va con il quadrato dell’ampiezza dell’onda.

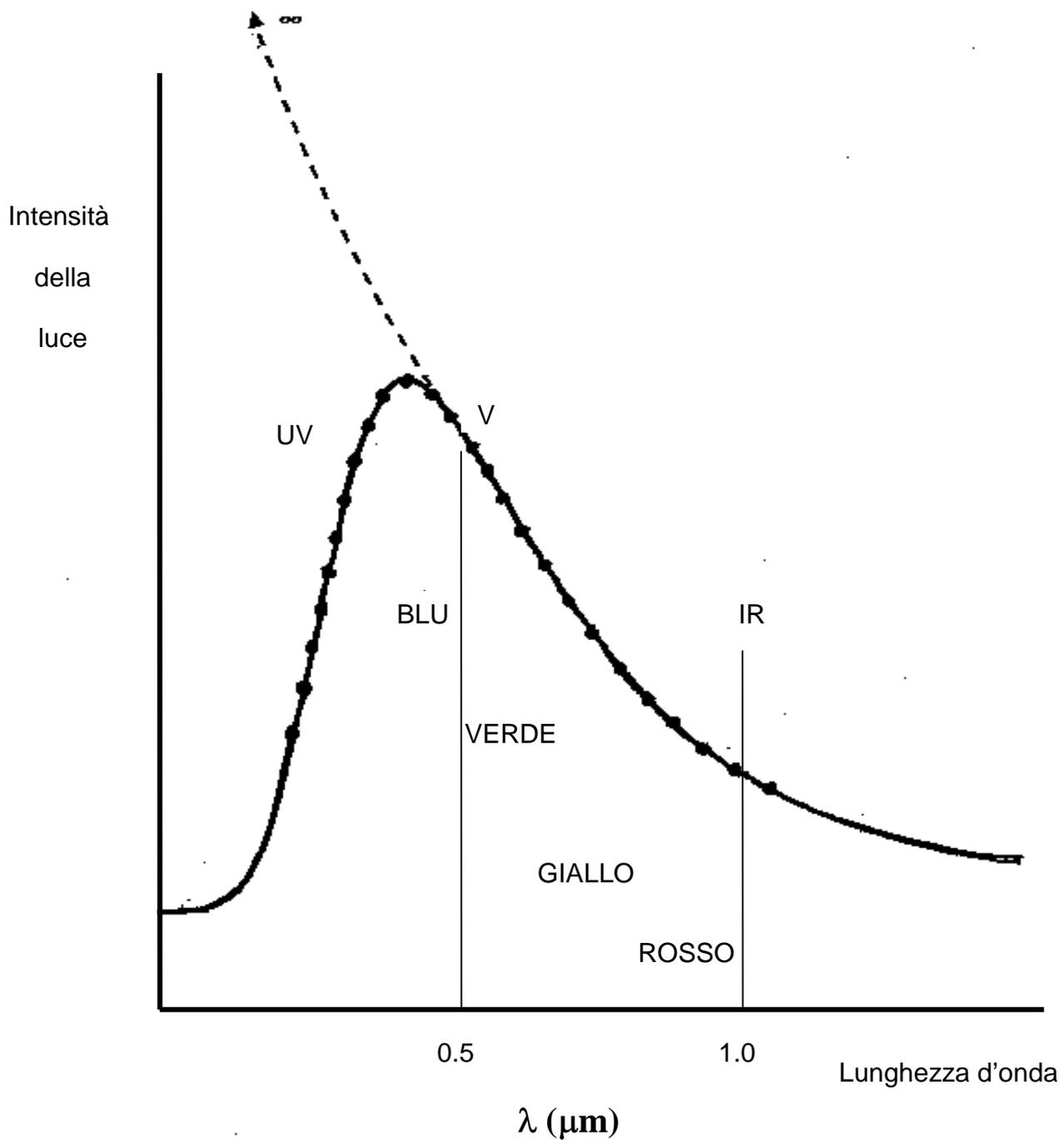
Ora supponiamo che la luce sia composta da corpuscoli, ciascuno dei quali abbia energia proporzionale alla frequenza. I corpuscoli rossi avranno tutti la stessa energia, piuttosto bassa. Quelli verdi avranno energia un pò maggiore, e quelli blu ancora maggiore.

Se è così, l’energia di un granellino di luce rossa non è sufficiente per tirar fuori un elettrone. Intensificando la luce, aumentiamo il numero di granellini, ma non la loro energia.

Ogni granellino di luce verde, invece, ha l’energia sufficiente a tirar fuori un elettrone e poco più. Aumentando l’intensità della luce, i granellini sono più numerosi e tirano fuori più elettroni, ma sempre con la stessa energia.

Con la luce blu i granellini hanno molta energia. Non solo tirano fuori gli elettroni, ma cedono ad essi l’energia residua. Gli elettroni che vengono fuori sono più energetici.

Dunque, dal 1905 era noto che in alcuni casi la natura si comporta “a salti”. Prima che fossero compiuti ulteriori passi, però, fu necessario aspettare quasi vent’anni.



$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ metri} = 10^{-3} \text{ mm}$ (1 micron)

$$\nu = c/\lambda = \text{frequenza}$$

Figura 1

Bohr e De Broglie

Abbiamo visto i primi due passi della MQ: nel 1900 Planck è forzato ad ammettere che la luce viaggia in "pacchetti" o "fotoni", nel 1905 Einstein, per mezzo dell'effetto fotoelettrico, dimostra che i fotoni non sono solo un artificio matematico ma una realtà fisica.

Passa del tempo. Nel 1912, il giovane Niels Bohr comincia a lavorare nei laboratori in cui Rutherford aveva dimostrato che l'atomo è composto da un nucleo centrale molto piccolo, ma che contiene quasi tutta la massa, da elettroni che - in prima approssimazione - possono essere pensati come ruotanti attorno al nucleo, in analogia al modello di un piccolo sistema planetario.

C'è però un problema gravissimo: un elettrone è, per definizione, una particella che trasporta con sé una carica elettrica. E il moto di rotazione è, come abbiamo visto a suo tempo, un tipo particolare di accelerazione: una in cui non varia l'intensità della velocità, ma varia la sua direzione.

Le Equazioni di Maxwell prevedono che, se una carica elettrica è soggetta ad accelerazione, deve cedere parte della sua energia sotto forma di onde elettromagnetiche. A conti fatti, gli elettroni in un atomo potrebbero ruotare solo per un millesimo di miliardesimo di secondo prima di perdere tutta la loro energia emettendo luce, e cadere sul nucleo, annullando quindi l'atomo stesso. Come va che gli atomi sono stabili?

Ricordiamo poi un altro fatto sperimentale: gli atomi di un determinato elemento chimico non assorbono/emettono luce di ogni colore, ma solo alcune lunghezze d'onda ben precise. Abbiamo visto, per esempio, che il sodio emette molta luce in due "righe spettrali" nel giallo.

Già nella seconda metà dell'800 Balmer, un maestro di scuola svizzero, aveva trovato in modo del tutto empirico una formuletta di una semplicità incredibile, per mezzo della quale si potevano prevedere le lunghezze d'onda delle righe spettrali dell'idrogeno. Ma il problema era: su quali principi fisici si basava questa formuletta?

La pensata di Bohr a noi può sembrare quasi banale e scontata a tanto tempo di distanza, ma per la sua epoca fu rivoluzionaria. Anche se la soluzione al problema della stabilità atomica aprì all'improvviso tutta una serie di problemi che, per la maggior parte, restano aperti ora ai nostri giorni, e c'è il sospetto che possano restare tali per sempre.

L'idea era la seguente: se la luce si propaga in "fotoni", ciascuno dei quali con una energia ben definita che dipende dalla lunghezza d'onda, l'elettrone attorno a un nucleo non potrà emettere luce in modo continuo, cadendo sul nucleo con traiettoria a spirale. Sarà costretto ad emettere anche lui luce "a pacchetti".

Dunque, per spiegare le righe spettrali dell'idrogeno, supponiamo che l'elettrone, in un certo istante, si trovi a una ben definita distanza dal nucleo, cui corrisponde una certa energia. Per emettere il fotone di una certa linea spettrale, l'elettrone dovrà liberarsi di una quantità precisa di energia: quella del fotone

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

Se è così, l'elettrone non potrà "scivolare" con continuità da un'orbita all'altra, ma sarà costretto a saltare da una certa orbita ad un'altra orbita ben definita, in modo che la differenza di energia tra e due orbite corrisponda esattamente all'energia che si porta via il fotone.

L'analogia tra il modello dell'atomo e quella di un sistema solare in miniatura, dunque, non è precisa. Mentre i pianeti possono avvicinarsi e allontanarsi con continuità dal sole, gli elettroni possono orbitare solo su orbite ben determinate, distanti l'una dall'altra di una certa quantità.

Ripetiamo. Gli elettroni non possono “cadere” sul nucleo perdendo energia con continuità; possono solo “saltare” da un’orbita all’altra. E finché rimangono su un’orbita tra quelle consentite, non possono neppure perdere energia in modo continuo, perché l’energia dei fotoni è “quantizzata”.

Sulla base di queste ipotesi, e conoscendo le lunghezze d’onda delle righe spettrali emesse dall’idrogeno, Bohr fu in grado di calcolare le energie delle orbite elettroniche permesse in questo elemento. Sorprendentemente, trovò due risultati importantissimi:

1) Riuscì a ritrovare la formula di Balmer, ma stavolta spiegandola in base alla fisica, e non solo in modo empirico.

2) Dato che esiste una relazione matematica ben precisa tra l’energia di un elettrone che ruota attorno al nucleo e il suo momento angolare rispetto al nucleo stesso, si accorse che il momento angolare di ogni orbita consentita era un multiplo intero della costante di Planck divisa per 2π

Esiste dunque un’orbita più piccola di qualsiasi altra, per cui il momento angolare è $h/2\pi$. La seconda orbita, più grande, avrà momento angolare doppio, e così via.

In queste condizioni, un elettrone non può cadere sul nucleo. Infatti, orbite più vicine al nucleo rispetto alla prima dovrebbero avere un momento angolare pari a una frazione di $h/2\pi$. Era un grosso passo avanti, ma ancora si basava su fatti molto empirici: una chiara nozione del “perché” questo dovesse accadere, mancava.

Il passo successivo fu fatto da De Broglie all’inizio degli anni ’20. Nella sua tesi di dottorato di ricerca, egli si basò sulla “dualità” della luce, la quale è a tutti gli effetti un’onda, ma a volte si può presentare sotto forma di “particelle”. La domanda era: non sarà che anche le particelle (come per esempio l’elettrone) possono, in alcuni casi, comportarsi come “onde”?

Per mezzo di analogie tra l’energia e la lunghezza d’onda dei fotoni, De Broglie riuscì anche a prevedere quale lunghezza d’onda dovesse essere associata alle particelle.

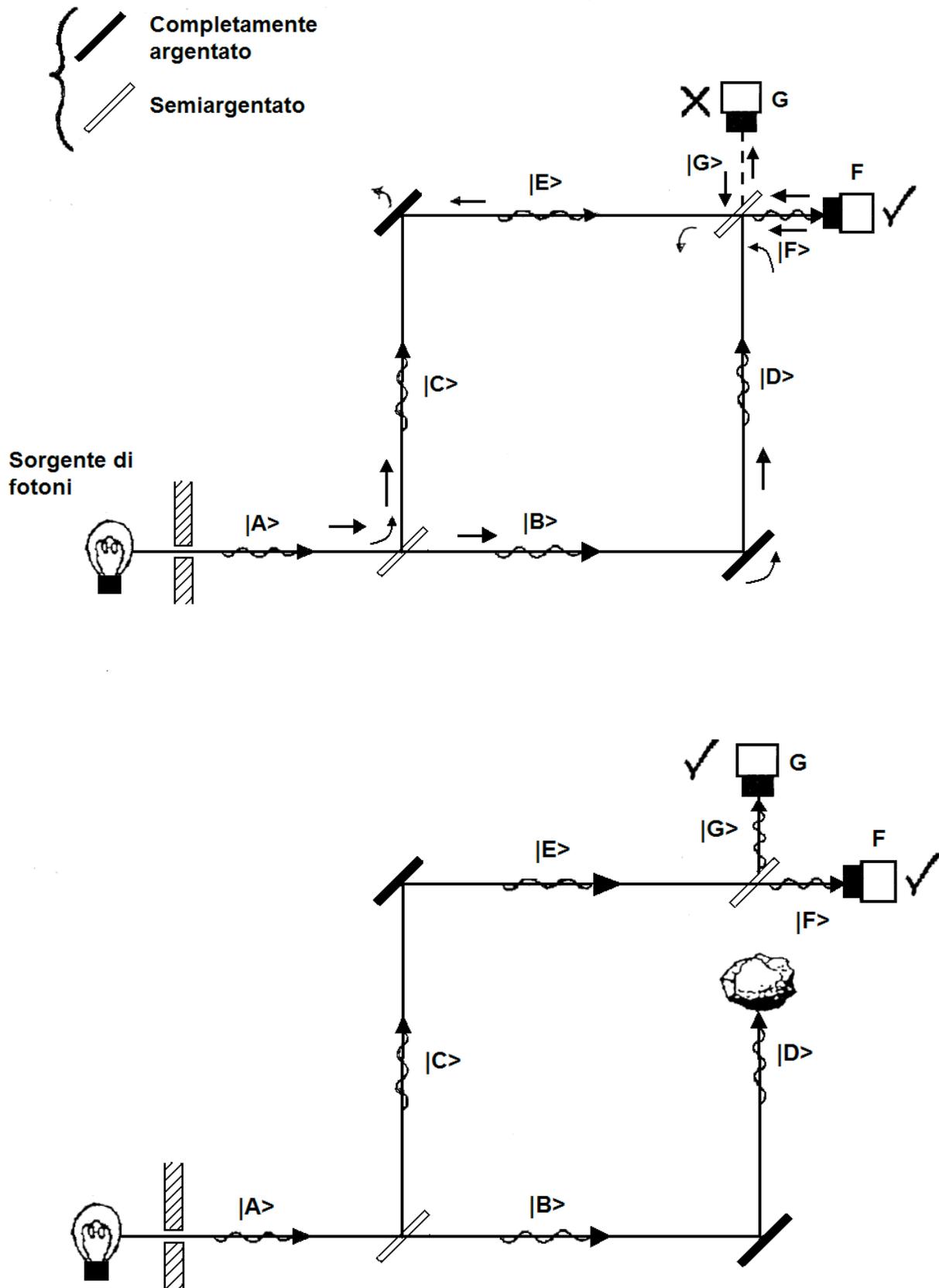
Questa lunghezza d’onda è pari a h/mv . Dunque, per particelle di massa o velocità molto alte, la lunghezza d’onda è brevissima. Questo spiega perché non ci siamo mai accorti del comportamento “ondulatorio” della materia normale in laboratorio. Per oggetti di grandi dimensioni, la lunghezza d’onda è più piccola dello spessore di un atomo.

Bohr applicò subito l’idea di De Broglie al suo modello di atomo, e scoprì che la prima orbita elettronica ha una circonferenza tale da contenere esattamente una e una sola onda associata all’elettrone. La onda orbita ne contiene due, ecc.

Ecco perché gli atomi sono stabili: un elettrone non può essere più corto della lunghezza d’onda a lui associata. Raggiunta la prima orbita, non può “restringersi” più di tanto e lì si deve fermare.

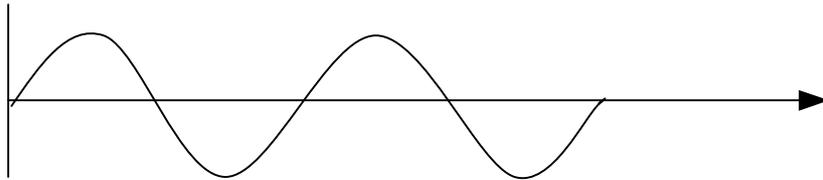
L'Interferometro di Elitzur

Sembra un'apparecchiatura complicata, ma non lo è. Seguiamo il disegno.

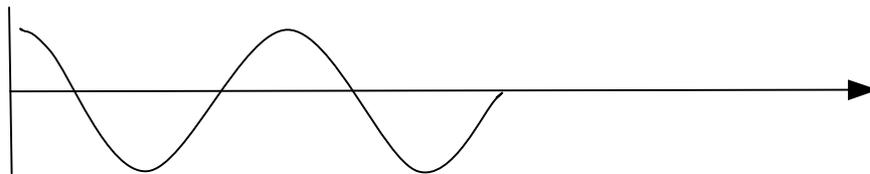


A sinistra c'è una sorgente di fotoni che - attenzione - lancia *un solo* fotone alla volta. Prima che venga lanciato il successivo, il fotone fa in tempo a percorrere tutto l'apparato ed essere raccolto da uno dei rivelatori come vedremo più avanti. Seguiamo il percorso del fotone che indicheremo con $|A\rangle$, la cui direzione viene indicata dalla piccola sinusoidale sotto il simbolo.

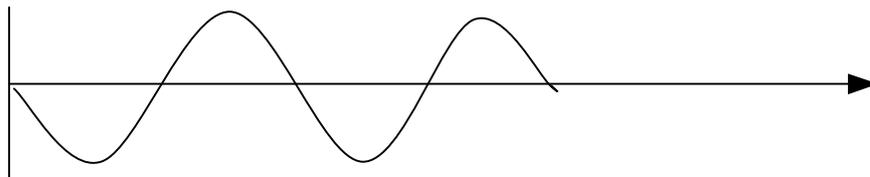
Il fotone è lanciato dalla sorgente, e percorre il tratto fino allo specchio semi-argentato. Consideriamolo come un'onda: la sua "fase" è indicata dalla freccetta punteggiata disegnata sopra il percorso. Ricordiamo il concetto di "fase" aiutandoci con i disegni che seguono. L'onda n. 1 ha fase 0° (zero gradi) perchè comincia proprio all'inizio dell'asse x



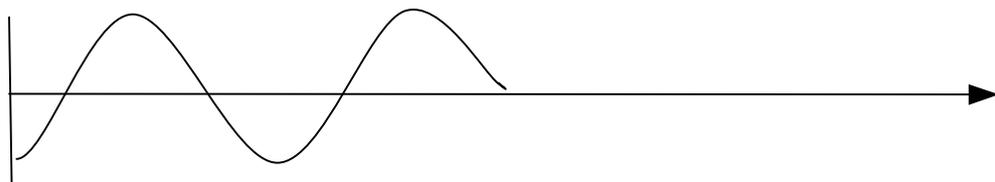
L'onda n. 2 è invece "sfasata" di 90° rispetto alla prima, perchè l'inizio dell'asse x comincia già al massimo.



L'onda n. 3 è sfasata di 180° rispetto alla prima. Notiamo che sommando la prima e la terza, le onde si annulleranno a vicenda. In generale, due onde sfasate tra loro di 180° si annullano a vicenda.



L'onda n. 4 è invece sfasata di 270° rispetto alla prima. Se la sommiamo all'onda n. 2, si annulleranno a vicenda.



E così via. Aggiungiamo un'informazione: ogni volta che un'onda viene riflessa su uno specchio, la sua fase viene cambiata di 90°

Dunque, la freccetta punteggiata prima di ogni specchio indica di quanto è ruotata la fase prima della riflessione; vicino a ogni specchio c'è l'indicazione della direzione in cui ruota durante la

riflessione, e dopo ogni specchio la successiva freccetta punteggiata indica di quanto è ruotata la fase dopo la riflessione.

Vediamo dunque quello che succede al primo specchio semi-argentato: per definizione uno specchio semi-argentato fa passare metà della luce incidente senza modificarla, e riflette l'altra metà. In pratica, fa passare il 50% dei fotoni incidenti, e ne riflette l'altro 50%. Supponiamo che il primo fotone passi attraverso lo specchio. Lo ritroviamo in $|B\rangle$ senza che sia cambiato nulla.

Ora, il fotone $|D\rangle$ urta lo specchio completamente argentato. L'unica cosa che può fare è di essere riflesso verso l'alto, e la sua fase cambia di 90° : come indicato dalla freccetta lungo il lato $|D\rangle$.

Seguiamo ancora il fotone $|D\rangle$. Arriva all'ultimo specchio, quello in alto, che di nuovo è semi-argentato. Nel 50% dei casi va verso il rivelatore **F**, nell'altro 50% verso il rivelatore **G**: cerchiamo di capire come.

Il fotone riflesso $|F\rangle$ è ruotato di nuovo di 90° . La sua fase è indicata dalla freccetta punteggiata che si trova disegnata proprio sopra la scritta $|F\rangle$.

Il fotone $|G\rangle$ che passa inalterato non viene ruotato. Si dirige verso il rivelatore **G** con la fase data dalla freccetta punteggiata a destra della scritta $|G\rangle$.

Chiediamoci adesso quale dei due rivelatori scatterà per segnalare l'arrivo del fotone, sempre nell'ipotesi che al primo specchio, quello basso a sinistra, il fotone sia passato senza essere riflesso.

Bene: se il fotone viene riflesso verso **F**, dovrebbe scattare il rivelatore **F**; altrimenti quello **G**. Siamo d'accordo? Siccome, poi, l'ultimo specchio è semi-argentato, ci aspettiamo che nel 50% dei casi scatti **F**, nell'altro 50% scatti **G**.

Vediamo invece quello che succederebbe se il fotone che viene da $|A\rangle$ fosse riflesso dal primo specchio. In questo caso, il suo percorso sarebbe $|C\rangle$ e poi $|E\rangle$, ribaltandosi di fase in modo che la sua fase ruoti verso sinistra.

Che accade al fotone $|E\rangle$ quando anche lui va a sbattere sull'ultimo specchio? Ha il 50% di probabilità di essere inviato verso **G** ruotando ancora la fase come disegnato proprio sotto la scritta $|G\rangle$, e l'altro 50% di passare dritto verso **F** con la fase diretta sempre verso sinistra.

Quindi, anche in questo caso, c'è una probabilità del 50% che scatti **F** o **G**. Dal momento che abbiamo esaminato tutti i percorsi possibili, ne dobbiamo dedurre che, per ogni fotone che parte dalla lampadina, sia che passi verso $|B\rangle$ o che sia riflesso verso $|C\rangle$, o scatterà **F** o scatterà **G** con probabilità uguali. Rivediamo il ragionamento e siamo d'accordo.

Ma è questo che succede? No. Scatta sempre e soltanto **F**! . **G** non scatta mai!

Non è possibile!

Bene: proviamo a ragionare in un altro modo. Sappiamo che la luce si propaga per fotoni, perchè ce lo dice l'effetto fotoelettrico. Ma supponiamo che, per un qualsiasi motivo, in questo esperimento la luce si comporti come "onda" e basta.

Allora, sul primo specchio semiargentato, l'onda si divide in due: una parte seguita verso $|B\rangle$ e l'altra viene riflessa in $|C\rangle$, con le opportune fasi.

Le due "mezze onde" vengono poi riflesse completamente, una in $|D\rangle$ e l'altra in $|E\rangle$. Si "ricongiungono" sull'ultimo specchio, dove però possono di nuovo prendere direzioni diverse: due "quarti d'onda" vanno verso **G** altri due verso **F**.

Vediamo cosa succede a $|G\rangle$. I due “quarti di onda” che provengono rispettivamente da $|B\rangle$ e da $|C\rangle$ hanno “fase” opposta (una freccia punta verso l’alto, una verso il basso). Si annullano a vicenda, e il contatore **G** non scatta mai.

Invece, i due “quarti di onda” che vanno verso **F**, hanno la stessa fase (le due frecce puntano nella stessa direzione), si sommano, e il contatore **F** scatta.

In questo modo, dunque, si spiegherebbe come mai scatta solo e sempre **F** mentre **G** non scatta mai. Ma un momento: si spiegherebbe davvero tutto?

Neanche per sogno! Infatti, il contatore **F** può essere, per esempio, un pezzetto di metallo che, per effetto fotoelettrico, emette elettroni. E i fotoni che inviamo nell’apparato potrebbero essere appena appena dell’energia giusta per far uscire un elettrone.

Se dunque il contatore **F** scatta, vuoi dire che gli è arrivata l’energia di un intero fotone. Mentre invece, per spiegare come mai **G** non scatta, abbiamo dovuto supporre che metà (due quarti) del fotone vada verso **F** (in fase), e metà verso **G** (in opposizione di fase).

Dunque, né supponendo che il fotone tutto intero passi o per $|B\rangle$ o per $|C\rangle$, né supponendo che due “mezzi fotoni” passino contemporaneamente per $|B\rangle$ e per $|C\rangle$, siamo riusciti a spiegare perché **F** scatta sempre e **G** non scatta mai.

Allora, come funziona la cosa? Come l’esperimento delle due fenditure. Il fotone tutto intero passa **CONTEMPORANEAMENTE** attraverso $|B\rangle$ e $|C\rangle$. E quando si ricongiunge, **SI COMPONE CON SE’ STESSO!** Andando verso **G**, si compone in modo distruttivo e **G** non scatta mai. Andando verso **F** si compone in modo costruttivo, e **F** scatta sempre.

Pensandoci bene, un conto sono due fenditure senza niente che le separi, per cui possiamo immaginare l’onda che va a colpire tutte e due contemporaneamente; un conto è immaginare due percorsi ben distinti, per cui uno si svolge in una serie di ambienti e l’altro in un’altra serie, senza che ci sia nessuna possibile connessione tra i due ambienti lungo il percorso intermedio, che può essere di lunghezza qualsiasi.

Ma non basta. Torniamo all’interferometro di Elitzur e scopriremo informazioni ulteriori, che francamente non ci aspettavamo.

Abbiamo visto nella parte superiore della figura che, se scatta sempre e solo il contatore **F**, vuol dire che **IL FOTONE TUTTO INTERO PASSA SEMPRE ATTRAVERSO TUTTI E DUE I PERCORSI $|B\rangle$ E $|C\rangle$** . Nulla si può spiegare supponendo che, per esempio, mezzo fotone passi attraverso entrambi i percorsi, oppure supponendo che metà dei fotoni passino attraverso $|B\rangle$ e l’altra metà attraverso $|C\rangle$.

Questo è il concetto di “non-località” della MQ. Eseguendo certi tipi di esperimento, si trova che “è come se” una singola particella si trovasse contemporaneamente in posti diversi dello spazio, anche molto lontani l’uno dall’altro.

Adesso passiamo all’esperimento descritto nella parte inferiore della figura. Lungo il tragitto $|D\rangle$ mettiamo un oggetto che assorbe l’eventuale fotone che vada a sbattergli contro. Un sasso, per esempio.

Cosa succede? Che, facendo una media su tanti fotoni, il 50% dei fotoni viene assorbito e quindi nessun rivelatore scatta, Nell’altro 50% dei casi scattano o il rivelatore **F** o quello **G** con uguale probabilità.

Cerchiamo di capire cosa sta succedendo Per un momento dimentichiamo quello che è successo nel primo esperimento. Seguiamo nel modo più ingenuo possibile le vicende del fotone che viene emesso dalla sorgente.

Il fotone arriva sul primo specchio semiargentato. Siccome sappiamo che il fotone non è separabile in due, l'intuizione ci suggerisce che l'azione dello specchio sia quella di far passare, statisticamente, la metà dei fotoni, e di rifletterne l'altra metà.

Supponiamo allora che il nostro fotone passi attraverso lo specchio e percorra il tragitto $|B\rangle$. Al secondo specchio viene riflesso verso $|D\rangle$ e, quando arriva sul sasso viene assorbito. Nessun rivelatore scatta. Ciò succederà in media nel 50% dei casi. Fin qui ci siamo.

Supponiamo invece che il fotone sia riflesso verso $|C\rangle$. Sarà riflesso ancora verso $|E\rangle$ dopodiché raggiungerà un nuovo specchio semiargentato. Potrà passare dritto verso **F** nella metà dei casi, mentre nell'altra metà sarà riflesso verso **G**. Dunque, per il 50% dei fotoni che partono dalla sorgente, scatterà uno dei rivelatori, e la probabilità che scatti **F** o **G** è la stessa.

Con questa interpretazione abbiamo spiegato tutti i risultati del secondo esperimento. Sembra che non ci siano problemi: basta supporre che il fotone viaggi tutto intero in una direzione o in un'altra. Semplice, no?

Adesso togliamo il sasso e riportiamoci nelle condizioni del primo esperimento. Disastro! Ricomincia a scattare sempre e solo **F**!

Dunque, la semplice interpretazione del secondo esperimento non funziona. Le cose vanno in modo diverso. D'altra parte, il primo esperimento ci aveva già detto che non era possibile che il fotone passasse tutto verso $|B\rangle$ o fosse riflesso tutto verso $|C\rangle$.

Allora riprendiamo il primo esperimento: abbiamo concluso che l'unica spiegazione possibile è che il fotone passi tutto attraverso i due percorsi contemporaneamente, come se si dividesse in due "fantasmi di fotone intero" che riacquistano realtà solo nel momento in cui si incontrano di nuovo.

Cerchiamo di capire il secondo esperimento sulla base di questa interpretazione. Funziona come segue.

Il fantasma che va verso $|B\rangle$ riesce a mantenersi in contatto con il fantasma che va verso $|C\rangle$. Se il primo fantasma viene assorbito dal sasso (diventando di nuovo reale, perché se è assorbito cede al sasso la sua energia, e noi la possiamo misurare), avverte istantaneamente il doppio fantasma che percorre l'altro ramo. «Sparisci subito perché siamo stati assorbiti »

Se invece il fantasma che va verso $|C\rangle$ "decide" di passare e di arrivare ai rivelatori, è lui ad avvertire l'altro: «Fa come se non ci fossi e ignora il sasso, perché andiamo verso i rivelatori.»

Dunque, non solo il fotone si trova in tutte e due i tragitti allo stesso tempo ma, se si "materializza" lungo uno dei tragitti, invia al suo "doppio spiritico" di sparire come se non fosse mai esistito. In un modo o nell'altro, gli invia un segnale a velocità infinita, in violazione alla Teoria della Relatività. Questo un secondo aspetto della "non località". Oltre che percorrere strade diverse, la particella è in grado di "comunicare" con sé stessa a velocità infinita.

C'è un'altra spiegazione possibile? Proviamo a pensarne una veramente strana: nello stesso istante in cui il fotone lascia la sorgente, e quindi prima ancora di passare per il primo specchio semiargentato, il fotone stesso "esplora" tutto lo spazio davanti a sé. Se si accorge che prima o poi potrebbe incontrare un sasso, decide di passare o per una strada o per l'altra. Se invece il sasso non c'è, decide di passare attraverso le due strade contemporaneamente

Sembra un po' campato per aria, ma i fisici ci hanno pensato lo stesso per evitare questo ipotetico "segnale fantasma" a velocità infinita, e hanno inventato un esperimento per capire se, magari, le cose vanno a questo modo. Sarebbe un po' come dire che, invece di prendere in considerazione quello che fa il solo fotone, bisogna considerare anche tutto il resto dell'apparecchiatura sperimentale, perché l'esperimento stesso ha influenza su quello che "decide" il fotone.

In fin dei conti, il gedankenexperiment di Heisenberg sull'osservazione al microscopio di un elettrone ci dice proprio questo: il risultato dell'esperimento è influenzato da come viene eseguito l'esperimento stesso; "perturba" la particella.

Perciò bisogna prendere in considerazione non solo la particella, ma tutto l'apparato sperimentale. Magari, il fotone sa già come sarà il suo percorso ancora prima di passarci. Allora facciamo una cosa. Non mettiamo il sasso lungo il percorso $|D\rangle$ e facciamo partire il fotone dalla sorgente. Aspettiamo che sia passato oltre il primo specchio e che si trovi quindi in $|B\rangle$ e/o in $|C\rangle$. Solo a questo momento decidiamo se mettere o no il sasso in mezzo. Se non lo mettiamo, i risultati saranno gli stessi che nel primo caso; se lo mettiamo, saranno come nel secondo caso.

Dunque, non basta considerare tutto l'apparato sperimentale alla partenza del fotone. Bisogna anche considerare cosa succederà più tardi nel corso dell'esperimento. In pratica, è come se il fotone, già nell'istante in cui parte, avesse esplorato non solo tutto lo spazio davanti a sé, ma anche **tutto il tempo** davanti a sé, e già sapesse se lo sperimentatore deciderà di mettere il sasso o no. Anche **se lo stesso sperimentatore non lo sa ancora, e si riservasse di decidere più avanti magari lanciando una moneta!**

Questo è proprio strano, non è vero?