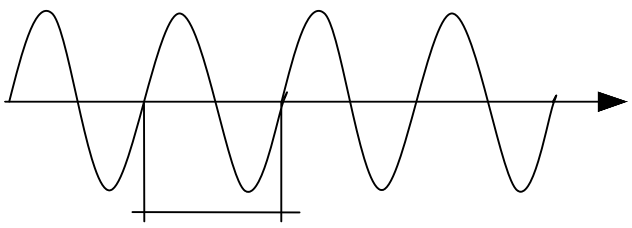
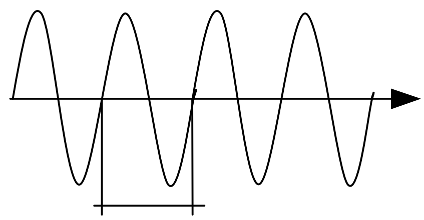
LA LUCE: ONDE O PARTICELLE?

Sappiamo che la luce è formata da onde elettromagnetiche. Le lunghezze d'onda possono essere varie, ma la velocità è la stessa: **c**. Disegniamo queste onde in modo un po' semplificato, tralasciando l'oscillazione del campo magnetico che è perpendicolare al piano del foglio.

Luce Rossa



Luce Blu



Che la luce sia composta da onde, lo aveva intuito Huygens contemporaneo di Newton (il quale, invece, propendeva per corpuscoli), e fu dimostrato definitivamente da Young nell'anno 1801, per mezzo del fenomeno detto "diffrazione".

Immaginiamo di vedere dall'alto una serie di onde che si propagano in una certa direzione, provenendo da molto lontano (vedi figura a fine capitolo). Le linee rappresentano il "picco" di ogni onda, ovvero il punto in cui l'oscillazione (che può essere di una superficie d'acqua o di qualsiasi altra cosa) raggiunge il valore massimo. Poiché stiamo disegnando archi di cerchio il cui centro è molto lontano, questi archi saranno "quasi" segmenti di retta.

Ora, le onde urtano contro una barriera (un muretto nel lago in cui stiamo svolgendo l'esperimento) che ha due aperture. Riescono a passare solo due piccoli frammenti d'onda.

Se pensiamo all'attrito dovuto ai bordi di ciascuna apertura, è poi facile convincersi che dalle aperture non passeranno frammentini di onde piane, ma le aperture stesse funzioneranno come sorgenti, e ne usciranno onde circolari centrate nell'apertura.

Dunque, dopo il muretto l'acqua sarà ancora percorsa da onde, ma in modo diverso da prima. Ci saranno due gruppi di onde, che vanno a interferire l'uno con l'altro.

In particolare, ci saranno regioni dell'acqua in cui il massimo di un'onda va a sommarsi al massimo dell'altra; in queste regioni, l'ondulazione sarà a sua volta massima (o minima, se due minimi coincidono) . Si dice che le onde sono "in fase".

Ci saranno poi regioni in cui il massimo di un'onda va a sommarsi al minimo dell'altra onda. In queste regioni, le due ondulazioni si annulleranno e non ci sarà presenza di onde. "Opposizione di fase".

Immaginiamo ora la parete di fondo del laghetto. Su di essa, ci saranno zone in cui va a infrangersi l'ondulazione massima; su altre zone, invece, l'acqua resterà sempre allo stesso livello.

In sostanza, a causa del sommarsi e sottrarsi delle intensità delle onde lungo traiettorie ben precise, riportando sui muretto finale le intensità delle onde che arrivano giungeremo a una situazione “a bande”. Da qualche parte arriva tanta energia delle onde, da qualche parte non ne arriva nulla.

Per la luce è la stessa cosa: se si prende luce di un solo colore e si passare attraverso due fenditure, una lastra fotografica posta oltre le fenditure mostrerà le bande con massimi e minimi tipiche di ogni onda.

Avendo Young visto e misurato le “bande di diffrazione” della luce, il problema era risolto. La luce è un’onda e, nel 1876, Maxwell dimostrò pure che è un’onda elettromagnetica.

Tutti furono felici e contenti, fin quando non fu scoperto il cosiddetto “effetto fotoelettrico”. Inviando luce su una lastra metallica, quest’ultima libera elettroni.

Fin qui, niente di male. Nel metallo ci saranno elettroni liberi e un’onda elettromagnetica, facendoli vibrare col suo campo elettrico, cederà loro energia finché non riescono a uscire.

Ma l’esperimento forniva risultati imbarazzanti.

Come si calcola l’energia di un’onda? Secondo le leggi di Newton, essa è proporzionale al quadrato dell’ampiezza dell’onda (attenzione: non alla “lunghezza d ‘onda”!)

Secondo questo modello, 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.

Il risultato sperimentale era stranissimo. Finché non si mandava sul metallo luce di lunghezza d’onda abbastanza piccola (quanto piccola varia da metallo a metallo) non veniva fuori nulla, anche se l’intensità’ della luce era enorme.

Esempio pratico (anche se inventato) . 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, con una energia molto bassa. Intensifichiamo la luce, aspettandoci che gli elettroni escano con energia maggiore. Invece escono più elettroni, ma ciascuno continua ad avere energia bassa.

Ora usiamo luce blu. Gli elettroni escono con maggiore energia. Intensifichiamo la luce, e anche stavolta escono più elettroni, ma sempre con la stessa energia.

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

Ora facciamo un’ipotesi diversa. Torniamo a Newton e diciamo che la luce è composta da corpuscoli. Aggiungiamo che ciascun corpuscolo ha energia tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d’onda che si associa (in uno schema ondulatorio) al colore di quella luce.

Allora, i corpuscoli rossi avranno tutti la stessa energia, piuttosto bassa. Quelli verdi avranno energia un po’ maggiore, e quelli blu ancora maggiore.

Vediamo cosa succede all’effetto fotoelettrico in questa ipotesi.

Inviamo luce rossa. L’energia di ciascun granellino di luce non è sufficiente a tirar fuori un elettrone. Se intensifichiamo la luce, aumentiamo il numero di granellini, ma non l’energia di ciascuno di essi.

Adesso proviamo cori la luce verde. Ogni granellino ha l’energia sufficiente a tirar fuori un elettrone e poco più. Gli elettroni verranno fuori cori quel poco in più di energia. Aumentiamo l’intensità’ della luce: i granellini sono più luminosi, quindi colpiscono e tirano fuori più elettroni, ma sempre con la stessa energia.

Che succede con la luce blu? I granellini hanno molta energia. Non solo tirano fuori gli elettroni, ma cedono a essi l’energia residua. Gli elettroni che vengono fuori sono più energetici.

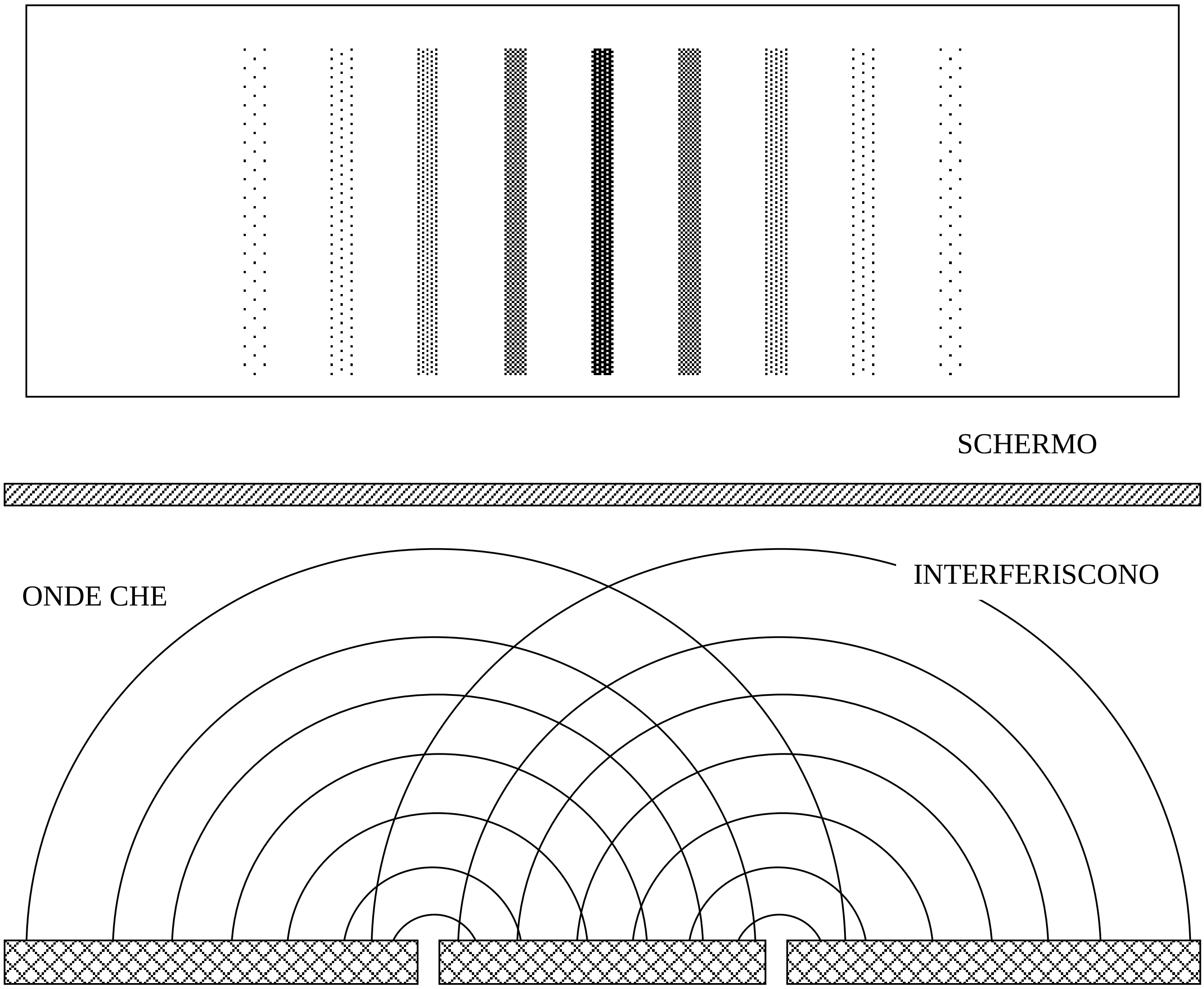
Questa fu la pensata di Einstein nel 1905. Gli valse il Premio Nobel.

Ma allora, la luce è onda o corpuscolo? Dipende dall’esperimento che si compie. Se cerchiamo di evidenziare le proprietà ondulatorie (come nel caso della diffrazione) si comporta da onda. Se invece l’esperimento è più adatto a “particelle” (come per l’effetto fotoelettrico), la luce acquista un aspetto particellare. E in questo secondo caso, le particelle di luce prendono il nome di “fotoni”.

Se “**f**” è la frequenza di ripetizione dell’onda (f ondulazioni al secondo), l’energia del fotone sarà **E = hf**, dove h è la “costante di Planck”.

Da qui a dire che anche gli elettroni, in casi particolari, possono comportarsi come onde, il passo è breve. Ci pensò De Broglie nel 1913.

IMMAGINE SULLO SCHERMO
(BANDE DI INTERFERENZA)



LA VELOCITA’ DELLA LUCE

La volta scorsa abbiamo visto gli aspetti ondulatori e particellari della luce. In particolare, abbiamo capito come e perché le onde producono il fenomeno detto interferenza.

Proviamo a ripensare all’esperimento con due fenditure. E’ abbastanza intuitivo che, se dopo le fenditure, una delle due onde fosse in qualche modo “rallentata” rispetto all’altra, le bande di interferenza finali sarebbero modificate in qualche modo.

Ricordiamo questo fatto, e torniamo indietro nel tempo, al 1887. Le equazioni di Maxwell erano già note, e quindi era possibile calcolare e prevedere ogni fenomeno relativo alla luce.

In particolare, si presentava un problema strano. Nelle equazioni di Maxwell, la velocità della luce compare come una costante assoluta. Ma noi sappiamo che non esistono velocità assolute: solo velocità relative.

Infatti, secondo le leggi galileiane per la trasformazione delle velocità due osservatori che si muovono a una certa velocità V l’uno rispetto 1’altro, non possono misurare la stessa velocità per un’onda elettromagnetica.

Se il primo osservatore trova C, il secondo osservatore deve trovare C-V o C+V a seconda che si allontani o si avvicini. Ma nelle equazioni c’è posto solo per C e nient’altro.

I fisici dell’epoca, per risolvere questo problema, pensarono all’”etere”. Infatti, se la luce è un’onda, deve propagarsi in qualche materiale. Cosa siano le onde d’acqua è chiaro; il suono è un’onda che si trasmette nell’aria. Ma qual è il materiale (meglio dire “il mezzo”) in cui si trasmette la luce?

Appunto, l’etere. Un ipotetico fluido che permea tutto l’universo, non infastidisce i corpi che l’attraversano, ma è il supporto che trasmette luce.

Se è cosi, si capisce pure perchè la velocità della luce compaia nelle equazioni di Maxwell come un valore assoluto “C”. Infatti, “C” sarà il valore della velocità rispetto all’etere. Rispetto ad altri getti che si muovono rispetto all’etere, la sua velocità sarà quindi, come visto prima, la somma di “C’, e della velocità dell’oggetto rispetto all’etere.

La soluzione, però, faceva sorgere un altro problema. Infatti, dalle leggi di Newton è possibile calcolare la velocità di un’onda in qualsiasi mezzo. In particolare, la velocità è tanto maggiore quanto più “rigido” è il mezzo. La velocità del suono nel terreno è tre volte maggiore di quella nell’aria. Nell’acciaio, è dieci volte maggiore.
Si può quindi, all‘inverso, calcolare la rigidità dell’etere in base alla velocità della luce. L’etere deve essere un milione di volte più rigido dell’acciaio!

Ma come fanno, allora, i corpi celesti a passarci attraverso senza nessun problema ?
Nel 1887, Michelson e Morley decisero di realizzare un esperimento .basato su questo concetto: La Terra si nuove attorno al Sole, a una velocità di circa 30 km/s. Ciò vuol dire che, se in un certo giorno dell’anno la Terra si muove in una certa direzione a 30 km/s, sei mesi esatti dopo si muoverà in direzione opposta sempre a 30 km/s.

Stando così le cose, qualunque sia la velocità della Terra rispetto all’etere, misurando la velocità della luce rispetto alla Terra a sei mesi di distanza, si deve trovare una differenza di 60 km/s.

Ma come si misura una differenza di velocità della luce? Proprio con un esperimento di interferometria. E’ quello che vedremo la prossima volta.

L'ESPERIMENTO DI MICHELSON E MORLEY

Nel 1887, Michelson e Morley eseguirono un esperimento fondamentale che viene descritto in figura. Si parte da una sorgente di luce A che invia luce verso uno specchio semi-argentato B. Il raggio di luce, giunto a B, si divide in due: una parte è riflessa verso lo specchio D che si trova distanza L, un'altra va verso lo specchio E che si trova anch'esso a distanza L.

Immaginiamo che l'apparecchiatura sia ferma rispetto all'etere. Ciò che succede viene descritto dalle linee a tratto pieno. Consideriamo anzitutto la luce che continua dritta verso E.

Essa percorre il tragitto due volte, avanti e indietro, e torna allo specchio B dopo un tempo T = L/C, essendo C la velocità della luce.

Vediamo invece cosa accade al raggio che viene riflesso verso lo specchio D Anch'esso va e torna, e si trova allo specchio B dopo un tempo T = L/C.

I due raggi, dunque, si trovano di ritorno su E dopo tempi uguali. E' chiaro che, avendo percorso distanze uguali in tempi uguali, sia il raggio proveniente da D e che attraversa B seguitando verso il basso, sia il raggio che proviene da E e che viene riflesso verso il basso da B, saranno "in fase", e cioè la loro intensità si sommerà

Ora immaginiamo invece che tutta l'apparecchiatura si muova orizzontalmente rispetto all'etere, con velocità V. Vediamo cosa succede ai due raggi nel momento in cui si dividono su B.

Seguiamo anzitutto il raggio orizzontale. Mentre si dirige verso E, lo specchio E si sposta un po' a destra. Quando la luce lo raggiunge, sarà in E'. Se il tempo impiegato dalla luce a raggiungerlo è T_1 (che ancora non conosciamo, ma vogliamo calcolare), lo specchio si sarà spostato nel frattempo di una quantità $V * T_1$. Dunque, la distanza totale percorsa dalla luce da B ad E' non sarà più L, ma $L + V * T_1$. Possiamo calcolare il tempo T_1 in modo semplice. Poiché la luce ha viaggiato a velocità C, avremo:

$$C * T_1 = L + V * T_1$$

e cioè

$$T_1 = L/(C - V)$$

Vediamo invece il tempo T_2 impiegato dal raggio a tornare da E' a E, considerando che nel frattempo anche lo specchio B si è mosso. In analogia a prima, avremo che il percorso, stavolta, è più breve, perchè lo specchio B si muove incontro alla luce. La distanza da percorrere sarà allora $L - V * T_2$. Quindi $C * T_2 = L - V * T_2$

$$T_2 = L/(C + V)$$

Il tempo totale $T_1 + T_2$ lo potremo scrivere perciò (i passaggi sono lasciati come compito per casa).

$$T_1 + T_2 = \frac{2LC}{\left(C^2 - V^2\right)} = \frac{2 \, {}^{L}\!/\!{}_{C}}{1 - \frac{V^2}{C^2}}$$

Adesso dobbiamo calcolare il tempo T_3 impiegato dalla luce che parte da B verso lo specchio D. Ovviamente, lo specchio D si sposta nel frattempo in D', che dista V * T_3 da D. Dunque, la luce dovrà percorrere l'ipotenusa di un triangolo rettangolo i cui cateti sono rispettivamente L e V * T_3.

Dal teorema di Pitagora avremo:

$$(C * T_3)^2 = L^2 + (V * T_3)^2$$

Per cui, sempre con passaggi che vanno fatti per esercizio,

$$T_3 = L/VC$$

al ritorno verso lo specchio B', la situazione è simmetrica, e il tempoT_4 sarà uguale a T_3. In sostanza, nel suo viaggio da B a B', il raggio di luce avrà impiegato un tempo

$$T_3 + T_4 = \frac{2L}{\sqrt{\left(C^2 - V^2\right)}} = \frac{2 \, {}^{L}\!/\!{}_{C}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

Confrontiamo il tempo impiegato dal raggio di luce orizzontale e da quello verticale per andare e tornare da B a B' . Siccome il rapporto V/C è piccolo ma positivo, in entrambi i casi il denominatore sarà minore di 1. Ma nel caso del raggio verticale, dovremo farne la radice quadrata, nel caso orizzontale no.

Ora, la radice quadrata di un numero minore di 1, è sempre maggiore del numero. Per esempio, se

$$V^2 / C^2 = 0{,}1$$

quindi

$$1 - V^2/C^2 = 0{,}9$$

si avrà

$$\sqrt{1 - V^2 / C^2} = 0{,}94868...$$

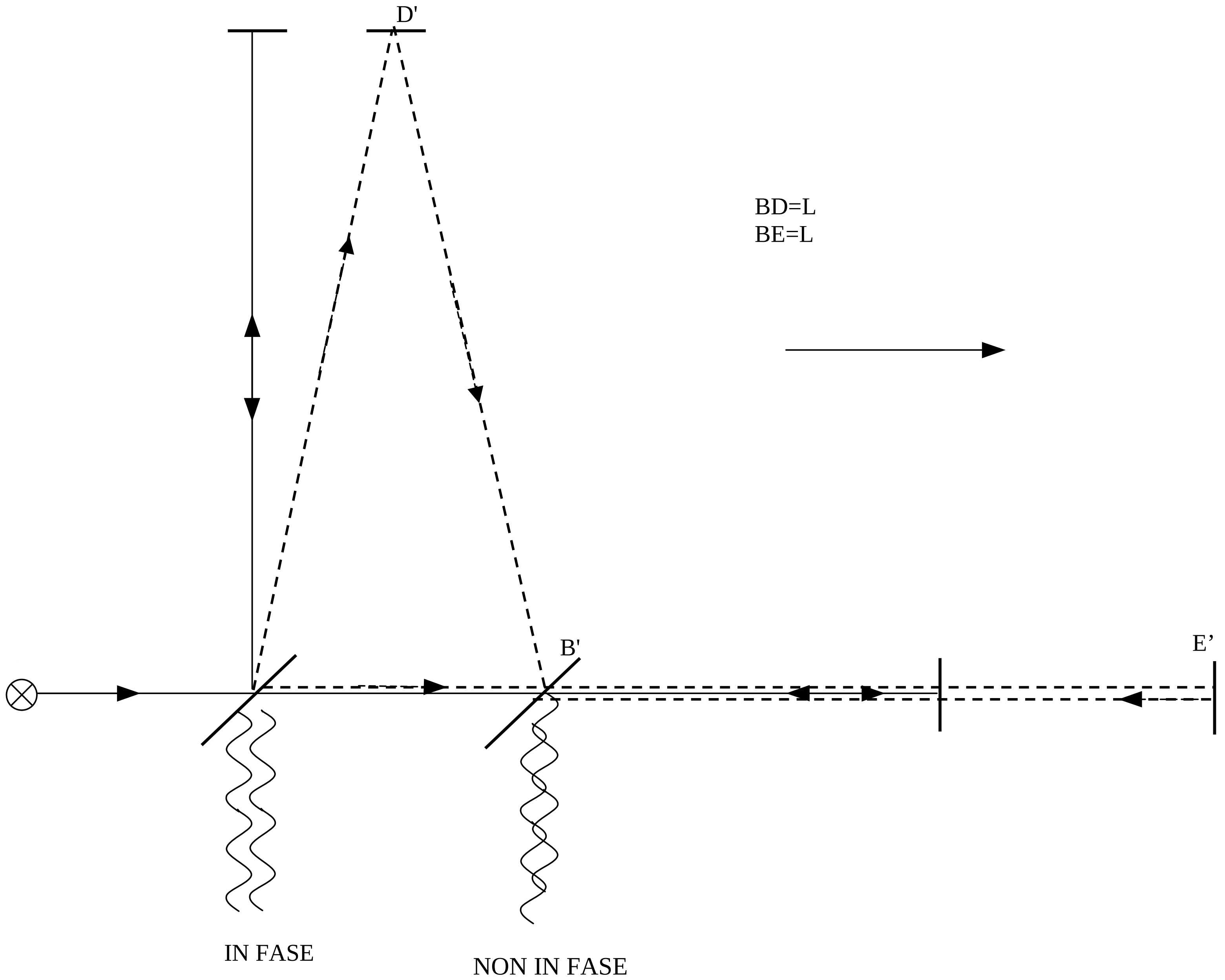
Dunque, il denominatore è un pò maggiore nel caso del raggio di luce verticale; di conseguenza, il raggio verticale percorre il tratto da B a B' in un tempo un po' minore di quello impiegato dal raggio orizzontale.

I due raggi che partono da B’ e vanno verso il basso, dunque, non saranno più in fase come nel primo caso, in cui l’apparato era fermo. A seconda di V, di L e della lunghezza d’onda della luce usata, essi saranno più o meno fuori fase, e quindi la loro somma darà un‘intensità più bassa rispetto al primo caso.

Detto in altro modo, sul rivelatore finale che raccoglie la luce, e che non è disegnato in figura, i due raggi che si separano in B e si congiungono in B o in B’ interferiranno in modo diverso a seconda che l’apparato sia fermo o in movimento rispetto all’etere. Vedremo bande di diffrazione spostate le prime rispetto alle seconde .

Se poi eseguiamo la prima misura in un certo giorno dell’anno, e la seconda sei mesi dopo, già sapremo che la differenza di velocità tra due misure è di 60 km/s e quindi, conoscendo L e la lunghezza d’onda della luce usata, potremo calcolare in modo semplice di quanto dovrebbero essere spostate le bande di diffrazione tra la prima misura e la seconda. Risultato: le bande di diffrazione non si spostano affatto, esattamente come se in entrambi i casi l’apparato fosse immobile rispetto all’etere.

La prossima volta (fra 3 settimane) vedremo come si può risolvere il mistero. Nel frattempo, buona Pasqua.


D'
BD=L
BE=L
B'
E'
IN FASE
NON IN FASE

LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

Di fronte al problema derivante dai risultati di Michelson, due fisici cominciarono a lavorare, senza sapere l'uno dell'altro, arrivando a conclusioni identiche per motivi diversi.

Il primo fu George FitzGerald a Dublino. La sua linea di pensiero era la seguente: "Se i due percorsi della luce nell'interferometro sono di lunghezza diversa, ma i tempi di percorrenza sono uguali, non sarà che il braccio che si muove nella direzione dell'etere subisce una specie di attrito" e si accorcia?"

In fin dei conti, l'etere dovrebbe rappresentare la sede naturale dei fenomeni elettromagnetici. Ora, le forze cosiddette "di stato solido", che tengono assieme la materia ordinaria, sono anche loro di origine elettromagnetica. Pensare a una "frizione" dell'etere su queste forze non è del tutto irragionevole.

Riprendendo le formule della volta scorsa, si vede che i due raggi di luce percorrono i due bracci dell'interferometro in tempi che differiscono tra loro di un fattore

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

dunque, se il braccio dell'interferometro che viaggia parallelo all'etere si accorciasse di una quantità uguale, i tempi finali di percorrenza risulterebbero gli stessi. Anno 1889.

Contemporaneamente o poco dopo, l'olandese Hendrik Lorentz, oltre a fare lo stesso ragionamento, aveva ampliato il discorso. Si era chiesto quali fossero le "trasformazioni" di coordinate spaziali e temporali per cui le equazioni di Maxwell rimanessero della stessa forma.

Breve corso sulle trasformazioni. Ricordiamo la "relatività" di Galileo"? I due osservatori sono in movimento l'uno rispetto all'altro con velocità relativa V, e questa velocità è diretta lungo l'asse delle x; le misure di distanze e tempi seguiranno queste leggi:

$$dx' = dx - V * dt$$
$$dy' = dy$$
$$dz'\ dz$$
$$dt' = dt$$

per i dettagli, guardiamo la figura all'ultima pagina.

Applicando queste leggi di trasformazione alle leggi di Newton, che contengono soltanto accelerazioni, le leggi stesse non cambiano forma. Si dice quindi che la meccanica "classica" è "invariante" rispetto alle trasformazioni di Galileo.

E' importante capire bene questo: già sappiamo che le distanze sono relative e così le velocità. Le accelerazioni, però, sono assolute. Ora, siccome nei tre principii della dinamica compaiono solo accelerazioni, spostare lo zero delle distanze o delle velocità non fa nessuna differenza. Le forze restano le stesse, ecc.

Invece applichiamo le trasformazioni di Galileo alle equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo, per capire cosa cambierebbe in un qualsiasi fenomeno elettromagnetico visto da due osservatori con velocità relativa V, le equazioni cambiano.

Infatti, in esse non compaiono solo forze e accelerazioni, ma anche una velocità : quella della luce C. Per un osservatore le equazioni resterebbero invariate; per l'altro, al posto di C ci sarebbe C - V. Ma abbiamo visto che l'esperimento di Michelson richiede che C non si sommi mai a nessun'altra velocità.

Lorentz ragionava così: "cerchiamo di capire come si scrivono delle leggi di trasformazione da un sistema O a un'altro O' in moto con velocità V rispetto a O, in modo tale che le equazioni di Maxwell restino identiche per i due sistemi".

Per l'asse X, ovviamente trovò lo stesso risultato di FitzGerald, ma la cosa interessante fu che non cambiava solo la X, ma anche la coordinata tempo T!

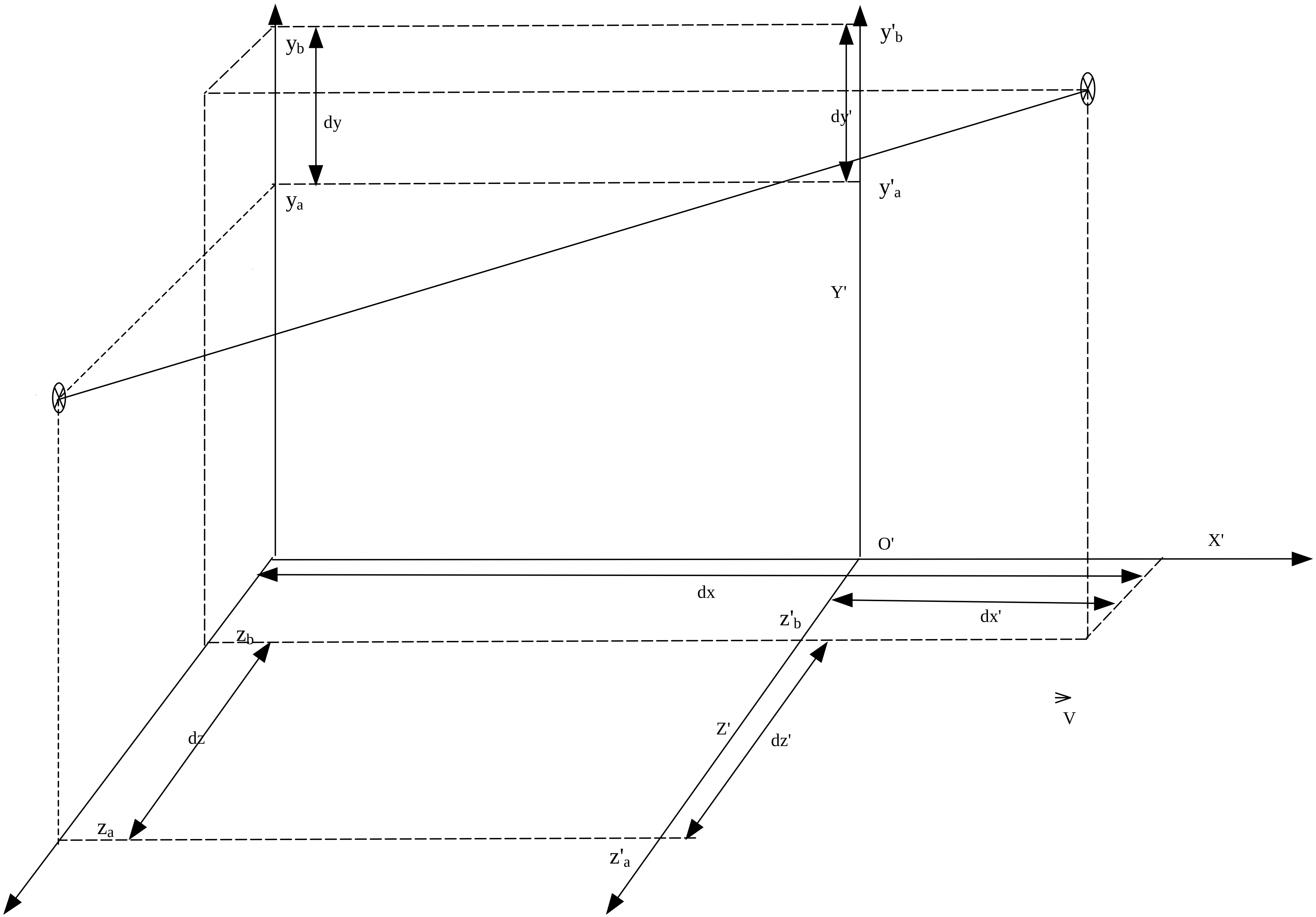
$$dx' = \frac{dx - v \cdot dt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$dy' = dy \qquad dz' = dz$$

$$dt' = \frac{dt - dx\, v/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Quindi, affinché la velocità della luce rimanesse una costante, non bastava solo accorciare le distanze; bisognava anche accorciare i tempi!   Anno 1900.

Le cose erano ferme a questo punto, quando Einstein, nel 1905, riuscì a inquadrare l'insieme delle teorie e delle osservazioni nella Teoria della Relatività Speciale, che vedremo la prossima volta.



y_b
y'_b
dy
dy'
y_a
y'_a
Y'
O'
X'
dx
dx'
z'_b
z_b
V
dz
Z'
dz'
z_a
z'_a

IL SIGNIFICATO FISICO DELLA RELATIVITA'

Ora che siamo in possesso delle trasformazioni di Lorentz, facciamo un altro piccolo passo. Ricordiamo il secondo principio della dinamica

F = ma

che, siccome conosciamo i rudimenti del calcolo differenziale, possiamo scrivere anche:

F= mdv/dt

essendo l'accelerazione nient'altro che la derivata della velocità rispetto al tempo (quanto varia la velocità in un secondo, in termini semplici).

Supponiamo che questa formula sia sempre valida. Applicando una forza costante a un oggetto di massa "m", non c'è limite a quanto la sua velocità possa aumentare.

Ma sappiamo pure che non si può superare la velocità della luce. Come risolviamo questa contraddizione? La risposta di Einstein è

F = d(mv)/dt

cioè la forza non è più il prodotto della massa per la derivata della velocità, ma la derivata del prodotto (massa per velocità).

Sembra un gioco di parole, ma non lo è. Infatti, mentre nella meccanica di Newton la massa è costante, in quella di Einstein anche la massa varia. Quindi, deve entrare nella derivata.

Per comodità, d'ora in poi scriviamo:

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

In questo modo, risulta:

$$m = \gamma \cdot m_0$$

dove "m_0" rappresenta la massa di un oggetto fermo o, come più propriamente si dice, "a riposo". Si vede che all'aumentare di V aumenta che la massa dell'oggetto. Il grafico di λ in funzione di V/C è in ultima pagina.

Dunque, se esercitiamo una forza costante su un oggetto che abbia una massa a riposo m_0 , finché la velocità non supera l'80% di quella della luce, la maggior parte dell'energia va ad aumentare la velocità (e diventa quindi normale energia cinetica) . Quando però si raggiunge circa l'86% di C, la massa è già aumentata del doppio. Aumentando ancora V, al 98% di C la massa è aumentata di 5 volte, e praticamente tutta l'energia spesa va ad aumentare la massa. Infatti, tra il

98% e il 100% di C, la massa aumenta da 5 volte m_0 a infinito. Quando V = C e la massa è infinita, possiamo continuare a spingere quanto vogliamo, ma la variazione di velocità sarà zero.

Ora, per pura curiosità, domandiamoci cosa succede se la velocità di un oggetto è superiore a C. Potrebbero infatti essere stati 'creati" nel Big Bang alcuni oggetti direttamente a velocità superiori a C.

Questi ipotetici oggetti prendono il nome di "tachioni", dal greco che significa "veloci". Applichiamo il fattore λ . Risulta la radice quadrata di un numero negativo, e cioè un numero immaginario. I tachioni hanno massa "immaginaria", qualunque posa ci voglia significare. Ora cominciamo a riflettere sul significato di quanto abbiamo visto. Ci troviamo di fronte a due ordini diversi di problemi:

1) La velocità della luce non si somma a nessun altra velocità (che è equivalente a dire che non si può superare la velocità della luce)

2) La velocità della luce è finita. Grande ma finita.

Pensiamo al punto 1). Esiste, in matematica, una quantità tale che, anche se le sommiamo o le sottraiamo qualcosa, rimane uguale a se stessa?

Certo che esiste: è l'infinito.

Dunque, la velocità della luce, in base al punto 1) , ha alcune delle caratteristiche di un infinito. In effetti, se C fosse infinito, le trasformazioni di Lorentz si ridurrebbero a quelle di Galileo, e spazio e tempo sarebbero due assoluti non correlati l'uno all'altro.

Però c'è il punto 2) : anche se ha alcune caratteristiche di un infinito, C non è infinita.

Per dirlo in termini molto grossolani, c'è dunque bisogno di qualcosa che, quando si raggiunge C, vada all'infinito. Questo "qualcosa" è proprio il fattore che "corregge" sia gli spazi che i tempi.

In questo senso, le trasformazioni di Lorentz sono proprio quelle che assegnano a C alcune delle "caratteristiche" dell'infinito.

Ora se ricordiamo la trasformazione del tempo, ci accorgiamo che essa non dipende solo dalla velocità; dipende pure dallo spazio.

Riassumendo, possiamo quindi affermare che il legame tra spazio e tempo deriva proprio dai requisiti 1) e 2), e in particolar modo dal fatto che sia finita.

Ecco che abbiamo perso lo spazio e il tempo "assoluti", ma abbiamo in cambio lo "spaziotempo". Attenzione, però : ciò complica molto le cose. Per esempio: la velocità è la derivata dello spazio rispetto al tempo. Certo, ma ora tempo dipende a sua volta dallo spazio!

Per questo motivo, gli sviluppi successivi della Relatività non sono spiegabili in modo matematicamente semplice. In particolare, l'energia di un oggetto in moto è data da

$$E = \lambda\, m_0\, C^2$$

ciò vuol dire due cose:

1) Anche se un oggetto è fermo (λ =1) ha un'energia "di riposo";

2) Quando l'oggetto è in moto, basta calcolare il valore di λ e si ha direttamente la somma dell'energia di riposo e quella cinetica.

Quando poi V << C, il fattore λ si può approssimare in modo tale che risulti:

$$E = m_0\, C^2 + 1/2\, m_0\, V^2 \text{ +termini trascurabili}$$

E, per l'energia cinetica, ritroviamo il termine che già conosciamo.