Insegnare la fisica moderna

Relatività - terza puntata

Il redshift gravitazionale

Si tratta di una delle previsioni “classiche” della RG.

Nella forma approssimata, valida per campi deboli, Einstein ci arriva per la prima volta nel 1911, quando ancora non ha costruito la teoria completa. Usa solo il PE.

Nello stesso articolo è anche descritto un esperimento ideale che usa l'inerzia dell'energia, e dal quale si può dedurre una seconda prova.

(Di questo non parleremo: v. [11] cap. 14.)

Seguiremo il ragionamento di Einstein partendo da un problema.

Problema: l'astronave accelerata

([5] `lez06.pdf`, probl. 5)

Un'astronave nello spazio vuoto ha i motori accesi, che producono un'accelerazione $a = 9.8\ \mathrm{m/s^2}$.

Un trasmettitore posto nella coda lancia onde e.m. verso prua.

Calcolare la variazione relativa di frequenza nelle onde ricevute a prua, se l'astronave è lunga 30 m.

Soluzione

Sia K il rif. (accelerato) dell'astronave; K_0 un rif. inerziale. Conviene ragionare in K_0.

Supporremo che all'istante in cui l'onda parte dal trasmettitore, questo, e tutto il rif. K, sia fermo rispetto a K_0.

Durante il tempo di transito t del segnale il ricevitore si muove di uno spazio $s = a\,t^2/2$.

Facciamo un'ipotesi semplificatrice: $s \ll h$ (lunghezza dell'astronave). Allora si può porre $t = h/c$.

L'ipotesi fatta richiede $ah/c^2 \ll 1$, condizione ben verificata coi nostri dati.

La velocità del ricevitore quando viene raggiunto dalla radiazione sarà $v = ah/c$, in allontanamento dalla sorgente, e si vede che $v << c$.

Possiamo quindi trascurare, nel calcolo dell'effetto Doppler, i termini di secondo ordine in v/c, e per la variazione relativa di frequenza abbiamo:

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -\frac{v}{c} = -\frac{ah}{c^2} = -3.3 \cdot 10^{-15}.$$

Uso del PE

Ciò che è vero per il rif. K (accelerato nello spazio vuoto) è vero anche per un rif. K_1, fermo in un campo gravitazionale $g = 9.8$ N/kg.

Pensiamo quindi alla stessa astronave, ferma sulla rampa di lancio.

Lo stesso esperimento mostrerà che un'onda e.m. emessa dalla base dell'astronave con frequenza ν_e verrà ricevuta in alto con frequenza $\nu_r < \nu_e$:

$$\nu_r = \nu_e + \delta\nu$$

$$\delta\nu/\nu_e = -gh/c^2.$$

È utile tenere a mente l'ordine di grandezza:

$$g/c^2 = 1.1 \times 10^{-16}\ \mathrm{m}^{-1}.$$

Si capisce che la verifica sperimentale non sarà semplice, e infatti è arrivata dopo quasi 50 anni.

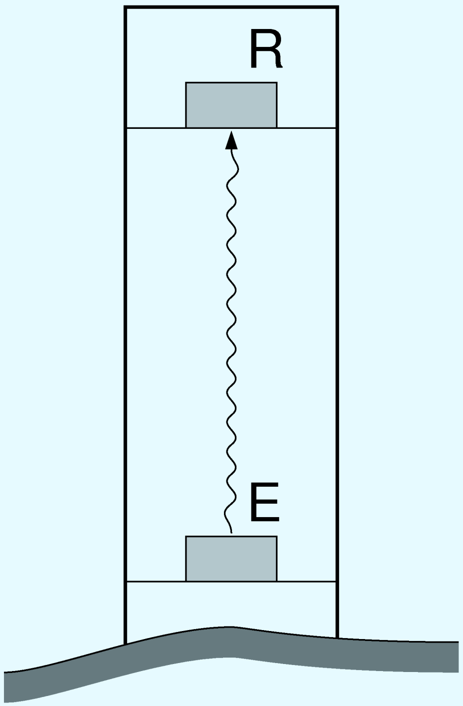
L'esperimento di Pound-Rebka

Fu eseguito nel 1959. In una torre alta 25 m, fu inviata radiazione dall'emettitore E al rivelatore R, e fu misurato lo scarto di frequenza.

La previsione, $\delta\nu/\nu = -2.7 \times 10^{-15}$, fu verificata entro l'1%.

Ma come si riesce a misurare una variazione così piccola?

Venne sfruttata una scoperta recentissima: *l'effetto Mössbauer* (1958, Nobel 1961).



Molto in breve: quando un nucleo emette o assorbe un fotone γ, parte dell'energia viene presa dal nucleo.

Ma se il nucleo fa parte di un solido, esiste una probabilità finita che il solido riceva l'impulso *come un tutto unico*, quindi con uno scambio di energia trascurabile.

Di conseguenza diviene possibile misurare l'energia (e la frequenza) del fotone con altissima precisione.

Diversa interpretazione del redshift

Consideriamo un treno d'onde di N periodi, quindi di durata all'emissione

$$\Delta\tau_e = N / \nu_e.$$

Lo stesso treno verrà ricevuto nel tempo

$$\Delta\tau_r = N / \nu_r.$$

Essendo $\nu_r = \nu_e (1 - gh/c^2)$ abbiamo al primo ordine:

$$\Delta\tau_r = \Delta\tau_e (1 + gh/c^2).$$

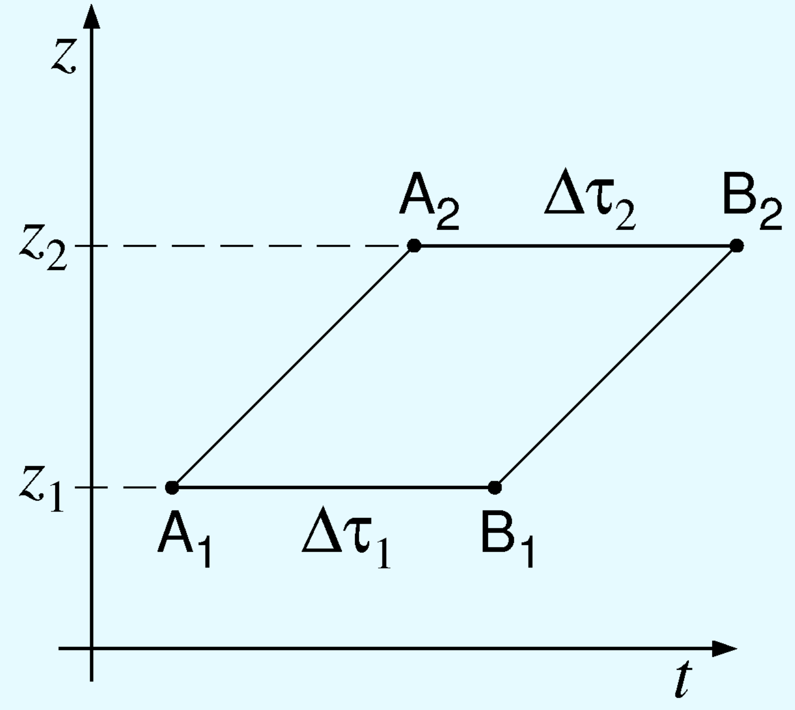
Un treno d'onde emesso in un tempo $\Delta\tau_e$ viene ricevuto in un tempo *più lungo*: $\Delta\tau_r > \Delta\tau_e$.

Il diagramma spazio-tempo

Qui eccezionalmente portiamo il tempo t in ascissa e la quota z in ordinata. Inoltre scriviamo $\Delta\tau_1$ per $\Delta\tau_e$ e $\Delta\tau_2$ per $\Delta\tau_r$.

Ci sono da considerare 4 eventi: A_1 è la partenza dell'inizio del treno d'onde, A_2 il suo arrivo; poi B_1 la partenza della fine del treno, B_2 l'arrivo.

Le linee oblique (a 45°) A_1A_2 e B_1B_2 rappresentano la propagazione fra emettitore e ricevitore.



Ed ecco un problema: la figura $A_1A_2B_2B_1$ è un *parallelogramma*, quindi ha i lati opposti *uguali*.

Eppure noi sappiamo che $\Delta\tau_2 > \Delta\tau_1$!

Le carte geografiche non sono fedeli

Lo sappiamo bene: per es. la carta qui sotto è stata disegnata coi meridiani tra loro paralleli, quindi *a distanza costante*.

Sembra che due meridiani abbiano la stessa distanza dalle parti di Trapani o di Bolzano, mentre invece sulla Terra a Bolzano *sono più vicini*.

Noi possiamo disegnare le carte come ci torna più comodo, ma come stiano le cose nella realtà ce lo possono dire *solo le misure*.

L'esperimento di Pound-Rebka ce l'ha già detto, ma esistono esperimenti *più diretti*, che hanno misurato proprio i tempi $\Delta\tau_1$ e $\Delta\tau_2$.

Esperimenti con gli orologi

Ce ne sono diversi, tutti con la stessa base concettuale.

Briatore-Leschiutta 1975, Alley et al. 1977, Vessot-Levine 1980...

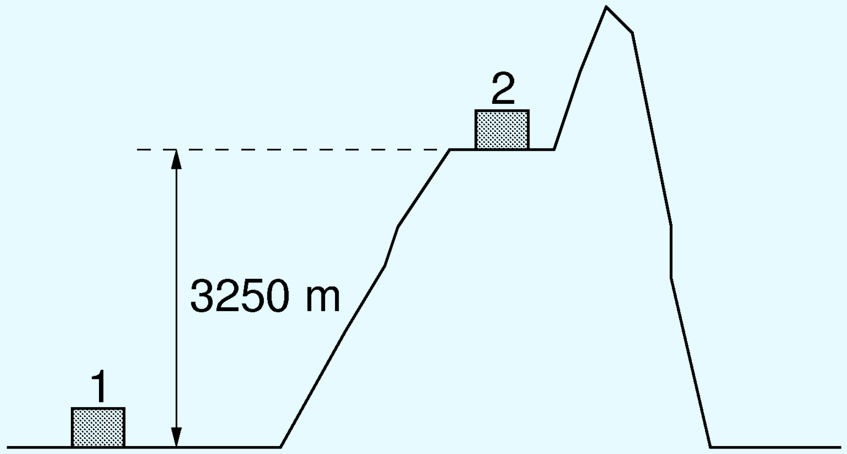
In tutti l'idea è di sistemare due orologi (atomici) a quote diverse, e confrontare i tempi.

Una versione moderna e divertente si trova in [12].

Peccato che dia un'interpretazione due volte sbagliata di quello che succede...

L'esperimento di Briatore-Leschiutta

Due orologi atomici sono posti uno a Torino (1) e l'altro sul Plateau Rosà (gruppo del Cervino) (2).



L'orologio 1 invia un segnale a 2, e cominciano a contare il tempo.

Dopo circa due mesi, 1 invia un nuovo segnale, e si ferma il conteggio.

Risultato: 2 è *avanti* rispetto a 1 di circa 2.4 μs.

Come si deve interpretare questo risultato?

Quasi sempre si dice:

“L'orologio 1 *rallenta* rispetto a 2 perché sta più in basso nel campo gravitazionale della Terra.

È il campo gravitazionale che *rallenta la marcia* degli orologi.”

Si legge perfino:

“In un campo gravitazionale *il tempo scorre più lentamente*.”

Questa seconda proposizione a me pare addirittura inconcepibile, e non la commenterò ulteriormente.

Per discutere la prima, torniamo alla carta geografica dell'Italia.

Supponiamo che qualcuno, dopo aver visto la carta qui accanto, vada a misurare la distanza tra i meridiani a Trapani e poi a Bolzano.

Troverà che la seconda misura è *inferiore* alla prima.

Dovrebbe quindi concludere che nel trasportare il suo metro da Trapani a Bolzano, questo si è *allungato*? Che la lunghezza di un metro campione *dipende dalla latitudine*?

O non dovrà piuttosto riconoscere di aver usato una carta *infedele*?

Lo stesso vale per l'esperimento B-L (e per tutti gli altri simili): il diagramma spazio-tempo che abbiamo disegnato *non è fedele*.

La dinamica relativistica

Le prime indicazioni che la meccanica newtoniana non vale per particelle veloci appiono agli inizi del '900, da una serie di esperimenti di Kaufman, Bucherer, e altri, fatti con elettroni emessi nei decadimenti β.

Poi le prove sperimentali si sono moltiplicate, e qui non dirò di più, salvo richiami in punti particolari.

La dinamica relativistica

Nei principi c'è poco da cambiare rispetto alla meccanica newtoniana.

Il primo (inerzia) resta identico.

Il secondo pure, se lo si scrive nella forma $F = dp/dt$.

Questo è un ritorno a Newton. Infatti il suo enunciato del secondo principio è:

mutatio motus = vis impressa

dove "motus" è la nostra quantità di moto.

Il terzo principio (azione e reazione) invece *non vale in questa forma*, ma deve essere sostituito dalla *conservazione della quantità di moto*.

Il terzo principio

Per un sistema isolato il principio di azione e reazione (PAR) implica la conservazione della q. di moto, ma *il viceversa non è vero*.

I motivi sono essenzialmente due:

1) il PAR non dice solo che le forze sono opposte come vettori, ma anche che *sono sulla stessa retta*

2) se il sistema consiste di più di due punti materiali, il PAR vale per *tutte le coppie* azione-reazione, e questo non si può ricavare dalla sola conservazione della q. di moto totale.

Tralasceremo questi problemi; per ragioni didattiche, e perché abbiamo cose più fondamentali di cui occuparci...

Il PAR non vale in relatività

Il punto essenziale è che nella fisica newtoniana il PAR viene enunciato per *azioni a distanza*.

Nella fisica relativistica le azioni a distanza *non possono esistere*, perché significano che le forze tra due corpi *a un stesso istante* dipendano solo dalla loro *distanza a quell'istante*.

Ma dire “stesso istante” *dipende dal rif.*, quindi un'azione a distanza *non può soddisfare il PR*.

Nella fisica relativistica le forze tra corpi distanti sono necessariamente *mediate da un campo*.

Potremo far conservare la q. di moto, ma nel bilancio dovremo includere anche la *q. di moto del campo*.

È facile trovare esempi nel caso d'interazione e.m., ma qui debbo sorvolare.

Purtroppo anche la trattazione in [5] `lez11.pdf` mi pare oggi troppo sbrigativa...

Fa eccezione il caso degli *urti*, dove l'interazione è a *brevissima distanza* ed è nulla se i corpi non sono assai vicini.

È quindi lecito conservare la q. di moto *fra un istante precedente e uno successivo* all'urto, perché a quegli istanti la q. di moto del campo non contribuisce.

Relazioni logiche e fatti sperimentali

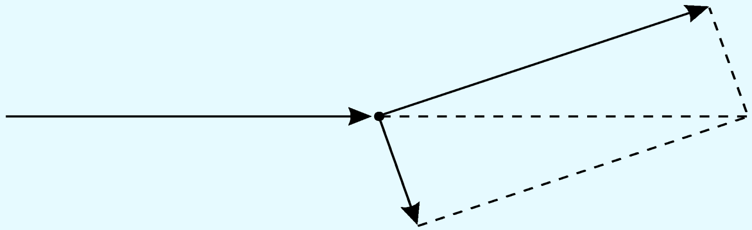
Il cambiamento essenziale nella dinamica relativistica rispetto a quella newtoniana sta nella diversa relazione tra *energia*, *impulso* e *velocità*.

Ci sono alcune leggi o proposizioni che sono logicamente connesse:

1) La legge di “composizione” galileiana delle velocità.

2) La legge dell'angolo retto nell'urto elastico tra particelle di ugual massa.

3) La relazione $T = p^2/(2m)$.



Ciascuna di queste *implica l'altra*, sotto ragionevoli ipotesi.

Il ragionamento esteso si trova in [5] `lez11.pdf`.

Si procede così:

a) La legge dell'angolo retto segue dalla relazione newtoniana tra impulso ed energia cinetica, e viceversa.

b) La legge dell'angolo retto segue dalla “composizione” galileiana, e viceversa.

c) Ci sono *evidenze sperimentali* che vanno contro la legge dell'angolo retto.

(A partire dai primi esperimenti in camera di Wilson, dove si vede che l'urto di due elettroni, di cui uno fermo, produce in uscita traiettorie che formano un angolo acuto.)

d) Il tempo *non è assoluto*, quindi la dimostrazione classica della legge di composizione non vale.

e) Esiste una *velocità limite* per una particella, e ciò *è incompatibile* con la relazione newtoniana tra impulso ed energia cinetica.

La velocità limite

Se la relazione newtoniana tra impulso ed energia cinetica (e quindi anche quella tra velocità e impulso) fosse esattamente valida a qualunque velocità, si potrebbe accrescere *senza limiti* la velocità di una particella cedendole *sufficiente energia*.

Per es. basterebbe accelerare un elettrone in un potenziale di 250 kV per fargli raggiungere la velocità della luce.

L'esperimento dimostra che *ciò non accade*: anche con energia di diversi MeV l'elettrone ha sempre velocità minore di c.

(L'esperimento è mostrato nel film PSSC *La velocità limite.)*

Conclusione provvisoria

Abbiamo dunque diverse prove sperimentali che le leggi newtoniane:

$$p = mv \qquad T = p^2/(2m)$$

non sono valide quando v non è trascurabile rispetto a c, e in generale *non sono compatibili con la relatività*.

Ma quali sono le relazioni relativistiche corrette?

Si può dimostrare (in base alla conservazione della q. di moto negli urti: [5] `lez11.pdf`) che l'espressione per p è

$$p = m\,v\,\gamma.$$

Quanto all'energia cinetica, si dimostra

$$T = E - m\,c^2$$

dove E è definita come

$$E = m\,c^2\,\gamma.$$

La relazione più importante della dinamica relativistica

Dalle due relazioni

$$p = m v \gamma \qquad E = m c^2 \gamma$$

si ricava facilmente

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4.$$

Questa relazione, che lega energia, impulso e massa, è di gran lunga *più importante* delle due precedenti.

Sia dal punto di vista *pratico* (utilità nei calcoli) sia da quello *concettuale*.

Esprime infatti l'esistenza di un *invariante*, costruito a partire da E e da p.

Ma come è definita la massa?

In tutte le relazioni compare una m, che abbiamo chiamato “massa”.

Abbiamo poi detto che in $E^2 - c^2p^2 = m^2c^4$ si vede un invariante; perché?

Le due cose sono connesse: vediamo.

Che cosa sia la m che appare in tutte le formule, lo si capisce da

$$p = m v \gamma$$

che a piccola velocità si riduce a $p = mv$ a meno di termini di secondo ordine in v/c.

Dunque m è la massa misurata nel rif. in cui il corpo è fermo (o si muove a velocità << c).

L'invariante fondamentale della dinamica relativistica

In un RI, K, misuriamo impulso p ed energia E di un corpo.

Troviamo che vale la relazione $E^2 - c^2p^2 = m^2c^4$.

Passiamo a un nuovo RI, K′ e misuriamo di nuovo energia e impulso: troveremo nuovi valori E', p'.

Anche con questi nuovi valori, vale ancora

$$E'^2 - c^2 p'^2 = m^2 c^4$$

con lo stesso valore di m.

Dunque $E^2 - c^2p^2$ è *invariante*.

L'inerzia dell'energia

Questa è la denominazione più corretta, al posto della consueta “equivalenza massa-energia.”

Einstein intitola un lavoro del 1905:

L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia?

In breve: se a un corpo *fermo* cediamo energia in modo che *resti fermo*, *la sua massa aumenta*.

Esempi:

– si scalda un corpo

– si carica la molla di un orologio

– si porta un atomo in uno stato eccitato.

Viceversa:

– un corpo cede calore all'esterno

– il Sole emette radiazione

– l'atomo torna allo stato fondamentale.

In termini quantitativi, Einstein dimostrò che in quelle condizioni si ha

$$\Delta m \;=\; \Delta E \,/\, c^2.$$

È così che si arriva alla famosa relazione

$$E \;=\; mc^2$$

che però — attenzione! — vale per un corpo *fermo*. Questa può essere definita come

“l'equazione più conosciuta e meno capita di tutta la fisica”.

Massa invariante e inerzia dell'energia

Supponiamo di avere già stabilito la relazione fondamentale

$$E^2 - c^2p^2 = m^2 c^4$$

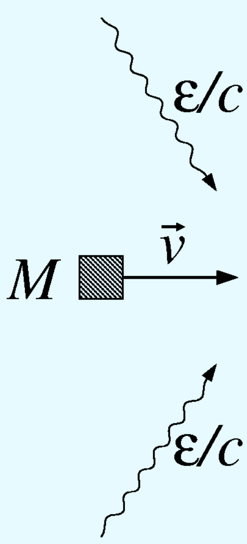
dove m è la massa *invariante*, ossia quella che si misura con $F = ma$ in un rif. nel quale la velocità è $\ll c$.

L'inerzia dell'energia si riferisce a *questa* massa. Dobbiamo ora vedere come si dimostra e che cosa significa.

Un esperimento ideale

Abbiamo un corpo di massa M, nero (assorbitore ideale). Su di esso mandiamo due pacchetti di radiazione (es. impulsi laser) uguali, che provengono da direzioni opposte nel rif. K' in cui M è fermo. Sia ε' l'energia di ciascun pacchetto.

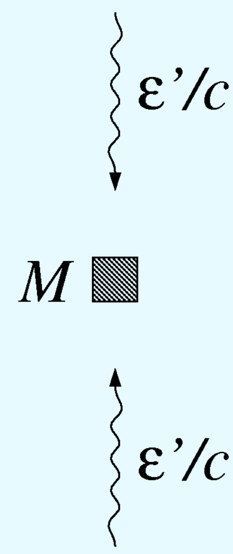
Nel rif. K (laboratorio) M si muove verso destra, con velocità v. I pacchetti di radiazione si muovono obliquamente (e hanno energia ε diversa da ε', che non occorre conoscere).



K

La radiazione viene assorbita da M. Vogliamo studiare il fenomeno da entrambi i riferimenti.

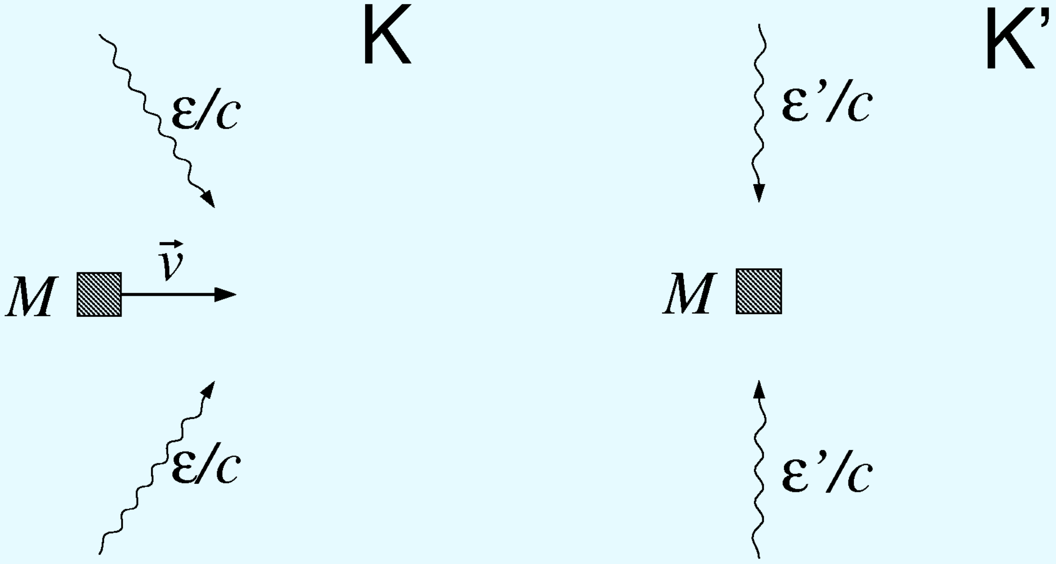
K'



Iniziamo dal rif. K'.

Qui M è inizialmente fermo; la q. di moto si conserva, quindi M *rimane fermo* anche dopo aver assorbito la radiazione.

Ne segue che anche in K la sua velocità, che era inizialmente v, dovrà restare *invariata*.

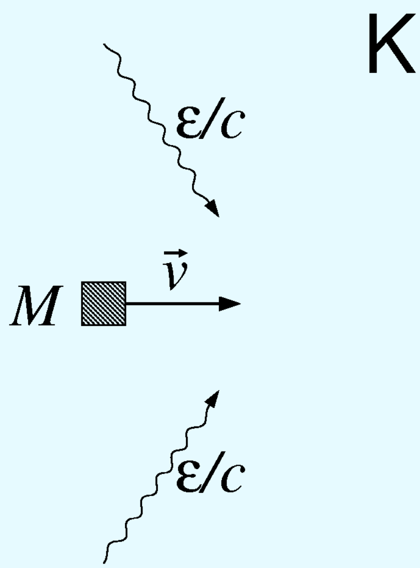


Ragioniamo invece applicando la conservazione della q. di moto in K. Sia α l'angolo che la direzione della radiazione forma con la verticale; sappiamo che un pacchetto di energia ε ha q. di moto (modulo) ε/c.

Dunque se v_f è la velocità finale di M, avremo:

$$M \gamma_f v_f = M\gamma v + 2 (\varepsilon/c) \sin \alpha$$

che è in contraddizione con $v_f = v$!



Dov'è l'errore?

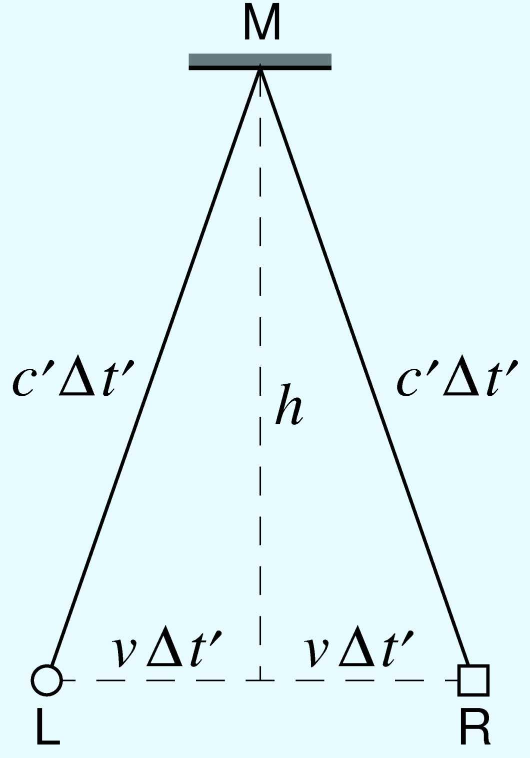
L'idea di Einstein è che l'errore stia nell'aver dato per scontato che la massa resti invariata. Proviamo infatti a supporre che la massa finale M_f sia diversa da M; allora potremo salvare $v_f = v$.

Scriviamo

$$M_f \gamma v = M\gamma v + 2(\varepsilon/c) \sin\alpha.$$

Per arrivare al risultato finale abbiamo ancora bisogno di determinare α, ma per questo basta ripensare all'orologio a luce: si vede che $\sin\alpha = v / c$. Allora

$$M_f = M + 2\varepsilon / (\gamma c^2).$$



Ma il corpo M ha giusto assorbito l'energia 2ε, che possiamo quindi sostituire con ΔE:

$$\Delta M = \Delta E / (\gamma c^2).$$

Interpretazione

Siamo arrivati a

$$\Delta M = \Delta E / (\gamma c^2) \quad (*)$$

che in parole si esprime così:

Quando un corpo che si muove con velocità v assorbe un'energia ΔE senza cambiare velocità, la sua massa aumenta come indicato dalla (*).

In particolare, dato che per un corpo fermo $\gamma = 1$:

Quando un corpo fermo assorbe un'energia ΔE restando fermo, la sua massa aumenta di

$$\Delta M = \Delta E / c^2 .$$

Nelle parole di Einstein:

L'inerzia di un corpo dipende dal suo contenuto di energia.

Commenti importanti

1. Abbiamo stabilito la relazione $\Delta M = \Delta E/c^2$ con un particolare esperimento ideale, ma la sua validità è *universale*.

Infatti possiamo dare energia al corpo per una strada e poi toglierla per un'altra strada. Se la variazione di massa non fosse sempre la stessa, ci troveremmo ad avere uno stato finale del corpo uguale a quello iniziale, ma con massa diversa...

2. Abbiamo usato un esperimento *ideale*; questo non significa che “nella realtà” le cose vadano diversamente...

Un esperimento ideale usa la fisica conosciuta: è solo un modo per descrivere una deduzione teorica.

Se accettiamo la tale e tale legge generale, allora ne segue necessariamente che ...

La cosiddetta “massa relativistica”

L'inerzia dell'energia *non ha niente a che fare* con la “massa relativistica”.

Questa viene introdotta per salvare la relazione $p = mv$, che nella dinamica relativistica non vale se m è la *massa invariante*: quella che figura in

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4.$$

In realtà la massa relativistica *non è che l'energia* di un corpo in moto, divisa per c^2.

Apparentemente sembra giustificare la “famosa relazione” $E = mc^2$.

Infatti se poniamo $m_\mathrm{r} = m\gamma$ otteniamo

$$p = m_\mathrm{r} v \quad \text{e anche} \quad E = m_\mathrm{r} c^2.$$

Ma *è del tutto inutile*: nessun fisico la usa mai, e serve solo a creare confusione.

La relazione valida in generale è

$$E = m\gamma c^2$$

dove si legge che *ci sono due modi distinti* per cambiare l'energia di un corpo:

a) cambiarne la velocità, col che cambia γ

b) cedergli energia senza cambiare la velocità (es. dell'esperimento ideale), col che cambia m.

Che succede quando si scalda un corpo?

Per es. un pezzo di ferro...

Succede che la sua massa *aumenta* (di pochissimo: nessuna bilancia potrebbe rivelarlo).

Ma a livello microscopico?

Gli atomi del ferro sono sempre in movimento: oscillano attorno alle loro posizioni di equilibrio. Se si aumenta la temperatura, l'ampiezza media delle oscillazioni cresce: crescono quindi tanto l'energia cinetica come quella potenziale.

E le masse?

Le masse (invarianti) degli atomi *non cambiano*; eppure la massa del pezzo di ferro aumenta...

Dobbiamo quindi concludere che la massa *non è additiva*:

in generale la massa di un sistema non è uguale alla somma delle masse delle parti componenti.

Un esempio più complicato: una reazione chimica

In un recipiente (a pareti robuste e isolanti) mettiamo due moli d'idrogeno e una di ossigeno, a temperatura e pressione ambienti. Il volume totale è quindi circa 67 litri.

Con la solita scintilla inneschiamo la reazione che produce acqua:

$$2\,H_2 \;+\; O_2 \rightarrow \;2\,H_2O.$$

Domanda: Confrontare la massa totale prima e dopo la reazione.

Risposta 1: Dato che due molecole di H_2O hanno massa minore di una molecola di O_2 più due di H_2, la massa sarà *diminuita*.

Risposta 2: Dato che il sistema è isolato, l'energia e quindi la massa *non cambia*.

La risposta esatta è la 2.

Spiegazione e numeri

L'entalpia di reazione è 572 kJ.

Questo è il calore che occorre sottrarre perché la reazione avvenga a temperatura e pressione costanti: in queste condizioni si formerebbero 36 g di acqua liquida (36 cm^3).

La massa diminuirebbe in corrispondenza:

$$572 \text{ kJ} / c^2 = 6.4\times10^{-12} \text{ kg} = 6.4\times10^{-9} \text{ g}.$$

La diminuzione è dovuta in buona parte al *difetto di massa* delle molecole di H_2O, ma anche all'*ulteriore legame* delle molecole nell'acqua liquida.

Se invece si lascia il sistema isolato, la temperatura e la pressione salgono moltissimo.

Ma dato che l'energia non è cambiata, non cambia neppure la massa.

N.B. L'esperimento è irrealizzabile, per varie ragioni...

L'esempio del K^0

Il mesone K^0 è una delle prime particelle “strane” che sono state scoperte.

Ha una vita media molto breve ($< 10^{-10}$ s) e diversi modi di decadimento.

A noi interessa quello in due pioni:

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-.$$

La massa del K^0 è 498 MeV/c^2; quella di ciascun pione è 140 MeV/c^2.

Come si vede, mancano 218 MeV/c^2: dov'è finita la massa mancante?

Si dice di solito che questa massa si è “convertita in energia”: infatti i due pioni non sono fermi, ma hanno un'energia cinetica, che fra tutti e due vale appunto 218 MeV.

Però attenzione: *se si vuole usare la massa relativistica*, i pioni — essendo in moto — hanno una massa *maggiore* di quella di riposo, esattamente 249 MeV/c^2 ciascuno.

Infatti l'energia si conserva, e l'energia di riposo iniziale del K^0, che è 498 MeV, si sarà ripartita tra i due pioni: 249 MeV per ciascuno.

Ma allora la somma delle masse finali è uguale alla massa iniziale, e *non c'è nessuna conversione di massa in energia*!

Se invece usiamo la *massa invariante*, allora effettivamente la somma delle masse finali è minore di quella iniziale, e la differenza si ritrova come energia cinetica.

Però l'energia si conserva comunque, e quindi non si deve parlare in ogni caso di conversione di massa in energia: se mai (ma lo sconsiglio) di conversione di *energia di riposo* in *energia cinetica*.

Massa non additiva e difetto di massa

Nel caso di un gas la massa del sistema è *maggiore* della somma di quelle dei componenti.

Ma può anche essere *minore*: è quello che accade

– in una *molecola* (o in un *solido*) rispetto agli *atomi* che la formano

– in un *atomo* rispetto a *nucleo ed elettroni*

– in un *nucleo* rispetto ai *protoni e neutroni*.

In tutti questi casi si parla di *difetto di massa*.

Che succede con la massa relativistica (m.r.)?

Nel caso del gas, in cui la massa del sistema è *maggiore* della somma di quelle dei componenti, possiamo dire che la massa del sistema torna *uguale* alla somma delle masse dei componenti, se per questi usiamo le loro m.r.

Infatti la m.r. include anche l'*energia cinetica*; quindi la somma delle m.r. fornisce l'*energia totale* del sistema e perciò anche la sua massa.

Ma il *difetto di massa* non può essere spiegato con la m.r.: qui entra in gioco anche un'*energia potenziale* (negativa per un sistema legato).

È per questo che la massa totale è *minore* della somma delle masse dei componenti!

Il difetto di massa c'è per tutti i *sistemi legati* (atomi, solidi, molecole, nuclei).

La differenza è solo che per atomi, solidi e molecole il difetto di massa è piccolissimo e non misurabile: 10^{-9} o 10^{-10} della massa.

Per i nuclei invece è dell'ordine di 10^{-3} o più, e può essere misurato con grande precisione.

Ma in linea di principio *non c'è nessuna differenza*.

Le “indicazioni nazionali”

[...] *l'aver affrontato l'equivalenza massa-energia gli permetterà di sviluppare un'interpretazione energetica dei fenomeni nucleari (radioattività, fissione, fusione).*

Ci sarebbe da capire che cosa sia una “interpretazione energetica”.

E che cosa c'entri l'equivalenza massa-energia.

Perché non hanno scritto anche

“l'aver affrontato l'equivalenza massa-energia gli permetterà di sviluppare un'interpretazione energetica delle reazioni chimiche”?

Dov'è la differenza?

Eppure quella frase lascia pensare che chi ha scritto le IN aderisca a un'idea purtroppo assai diffusa: che i fenomeni nucleari “si spieghino” con la famigerata “equivalenza”.

In realtà la differenza in *termini energetici* tra i comuni fenomeni chimico-fisici e quelli nucleari sta a indicare una cosa sola: che nei fenomeni nucleari è in gioco un'interazione diversa (l'interazione *forte*), molto *più intensa* dell'interazione e.m.

Il maggiore difetto di massa è una *conseguenza*, non una spiegazione.

Il che non toglie che il difetto di massa possa essere usato per *misurare* l'energia di legame di un nucleo...

Collegamenti (links)

[1] Indicazioni Nazionali:

`http://www.sagredo.eu/PI-14-fismod/Liceo_Scientifico.pdf`

[2] Syllabus:

`http://www.sagredo.eu/PI-14-fismod/Syllabus.pdf`

[3] Seminario al Congresso AIF 2008:

`http://www.sagredo.eu/articoli/fismod.pdf`

[4] Queste lezioni:

`http://www.sagredo.eu/PI-14-fismod/Pisa-2014-fismod-n.pdf`

(*n* sta per il n. d'ordine della lezione).

Questa è una collocazione temporanea.

[5] Relatività:

`http://www.sagredo.eu/Q16`

(esiste anche la versione stampata).

[6] Esempio di seconda prova:
http://www.aif.it/ArchivioA/AIF_seconda_prova_di_fisica.pdf

[7] Sulla “addizione” delle velocità:
http://www.sagredo.eu/articoli/addvel-2.pdf

[8] Sul paradosso dei gemelli:
http://www.sagredo.eu/divulgazione/relgem/relgem1.htm

[9] Le “mie indicazioni nazionali”:
http://www.sagredo.eu/varie/mie-indicazioni-short.pdf

[10] Obiettivi dell'insegnamento della meccanica:
http://www.sagredo.eu/varie/Pavia-2012-short.pdf

[11] Il redshift gravitazionale
http://www.sagredo.eu/varie/Ins-mod-rel-13-14-15.pdf

[12] Come accorciarsi la vita di 23 ns in un weekend
http://www.leapsecond.com/great2005/