

Il fotone

Emanuele Pugliese, Lorenzo
Santi – URDF Udine

Interpretazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico

Esistono «particelle»* di luce: i **fotoni**! La luce è composta da quantità indivisibili di energia (*quanti di luce*) **localizzati** in punti dello spazio che si muovono **senza suddividersi** e che possono essere prodotti e assorbiti solo come **entità complete** (in «pacchetti»). Essi interagiscono in modo discreto con la materia e in tal modo vengono rivelati. **Hanno $m = 0$.**

Esistono **altre proprietà**, oltre all'energia, che possono essere associate ai fotoni?

* Particelle “speciali”, non come il protone o l'elettrone. I fotoni mostrano sia una natura corpuscolare sia ondulatoria, a seconda dell'esperimento in cui vengono osservati.

Evidenza sperimentale dell'esistenza di *quanti di luce*

- Per approfondire, **dal minuto 6' 40''**:
<http://www.youtube.com/watch?v=8iGOQCeBbEA>

La pressione di radiazione

Alla fine dell'Ottocento venne formulata da Maxwell l'ipotesi la luce esercitasse una «spinta» sui materiali su cui essa incide.

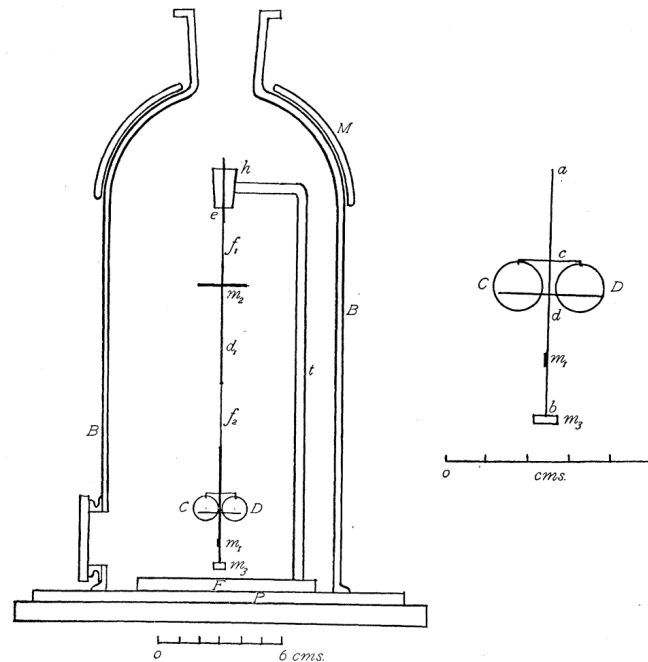
- L'hp, formulata a partire dal suo studio della **luce come radiazione elettromagnetica**, prevedeva che **la luce scambiasse quantità di moto con la materia** oltre che energia.
- La supposta espressione della q.d.m. da associare alla luce era

$$p = E / c$$

ove E è l'energia luminosa incidente.

Indagini sperimentali

- Lebedev (1901) e Nichols (1903) effettuarono degli esperimenti per controllare tale ipotesi.
- Utilizzarono una bilancia di torsione equipaggiata con due specchi. Su uno degli specchi viene inviato un fascio di luce, che provoca la rotazione dell'equipaggio mobile.



Indagini sperimentali

I 2 esperimenti hanno mostrato (con diversi gradi di precisione):

- La forza F esercitata dalla luce sullo specchio (impulso trasmesso per unità di tempo) è **proporzionale** alla potenza P (energia trasmessa per unità di tempo) associata al fascio luminoso;
- Tale costante di proporzionalità risultava essere, entro gli errori, pari a **$2/c$** . Quindi

$$\mathbf{F = P * (2 / c) \quad [legge empirica]}$$

- $F = \Delta p / \Delta t$; $P = E / \Delta t \Rightarrow \Delta p = 2 p$ (è una riflessione) = $E * (2 / c)$
- Alla luce incidente allora deve venire associato un impulso

$$\mathbf{p = E / c}$$

E è l'energia trasportata dalla luce. Tale risultato deve essere esteso anche ai **singoli fotoni** che compongono il fascio.

Domande sul fotone

- “La luce scambia la sua energia con la materia in modo continuo o discreto? Da che cosa è fatta la luce?”
- “Perché risulta che i fotoni trasportano q.d.m?”

Massa ed energia

Emanuele Pugliese – URDF
Udine

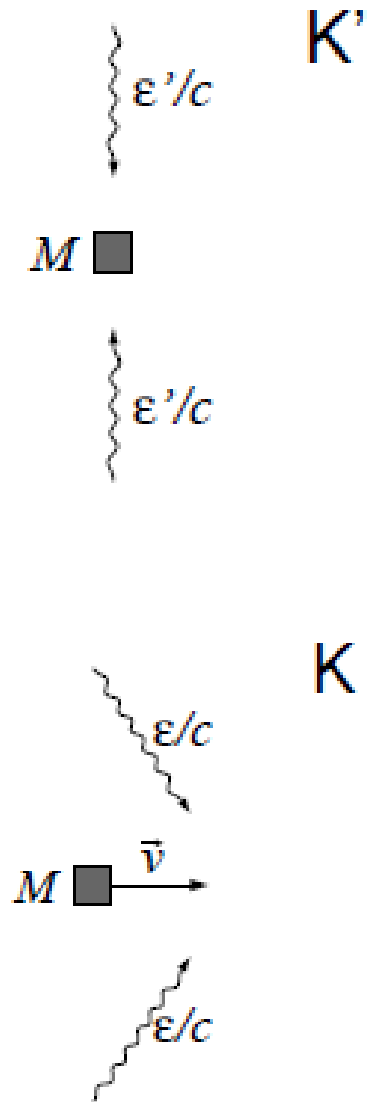
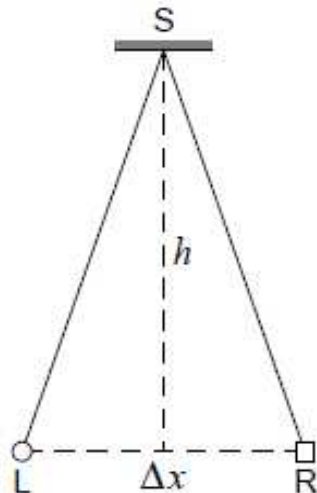
L'assorbimento di fotoni: un esperimento mentale

Due fotoni incidono collineari su un corpo in quiete. In questo sistema di riferimento PRIMA e DOPO l'assorbimento la quantità di moto del corpo è nulla.

In un sistema di riferimento in moto con velocità v rispetto al primo l'energia dei fotoni è diversa.

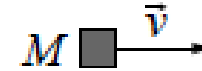
La quantità di moto del corpo PRIMA è

$$P = M \gamma v + 2\varepsilon/c (v/c)$$



La quantità di moto DOPO è

$$P' = M \gamma_f v_f$$



K

MA

Nel primo sistema di riferimento il corpo è fermo prima e dopo, e quindi la velocità v_f nell'altro sistema di riferimento sarà pari a v : **il sistema fisico assorbe energia senza variare la sua velocità**

Quindi DOPO

$$M \gamma v = M \gamma v + 2\varepsilon v / c^2$$

ASSURDO

L'unico modo per risolvere l'assurdo è supporre che la massa DOPO l'assorbimento sia diversa da quella PRIMA

$$\text{Conservazione q.d.m.: } M \gamma_f v_f = M \gamma v + 2\varepsilon v / c^2$$

$$\text{Manteniamo l'hp } v_f = v \Rightarrow \gamma_f = \gamma$$

$$M' \gamma v = M \gamma v + 2\varepsilon v / c^2$$

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

Ma 2ε è l'energia assorbita dal corpo: ΔE .

Perciò possiamo affermare se un corpo assorbe energia senza variare la sua velocità, la sua massa varia di

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

Nel SI in cui il corpo è fermo $\gamma = 1 \Rightarrow$ un input di energia ΔE in un corpo a riposo nel lab. **può** far aumentare la sua massa di

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

mantenendolo a riposo nel SI del lab.

Domanda

- Prima dell'assorbimento, il fotone ha massa?
- Con l'assorbimento il sistema (fotone + scatola) ha aumentato la sua massa? Perché?

Che cos'è l'energia posseduta da un sistema ?

Se consideriamo un oggetto di massa iniziale **trascurabile** ($m < \varepsilon$, ε arbitrariamente piccolo) **l'input di energia necessaria perché esso acquisti una massa m è dato da**

$$\Delta E = (\Delta m) c^2 = (m - 0) c^2 = m c^2$$

$$\Rightarrow m c^2 \equiv E_0$$

può essere vista come **l'energia necessaria per la creazione di una particella di massa m a riposo.**

$m = E_0 / c^2$ è la massa che l'oggetto ha assunto per il solo fatto che abbiamo fornito un'energia E_0 al vuoto \rightarrow creazione di particelle negli acceleratori: basta che ci sia energia a disposizione $\geq m c^2$

- **La massa** misura l'energia complessiva posseduta da un sistema o particella **a riposo**: $E_0 = m c^2$.

Energia totale

- E_0 è detta **energia a riposo**. Ma finora abbiamo ragionato in un solo SI; prendiamo ora in considerazione l'energia dovuta al moto del SI solidale all'oggetto rispetto al SI del lab: essa è **l'energia cinetica del corpo** nel SI del lab.
- Per ottenere **l'energia totale** di un sistema dovrò quindi sommare il contributo di energia a riposo a quello cinetico:

$$E = E_0 + K$$

La massa misurata nel SI solidale è la stessa che si misura nel lab perché per misurare m ci si riferisce sempre al riferimento co-movente (solidale). In esso si eseguono misure a basse velocità tramite cui si trova il valore di m utilizzando la $F = ma$.

La massa è quindi un **invariante relativistico**: la sua misura dà lo stesso risultato per tutti i SI. Perciò possiamo sommare:

$$E = m c^2 + m c^2 (\gamma - 1) = m c^2 + \gamma m c^2 - m c^2 = \gamma m c^2$$

$$E = \gamma m c^2 \text{ (energia totale relativistica)}$$

Domande

- “Se compio lavoro su un corpo esteso in modo da accelerarlo, la sua massa varia? E nel caso di una particella?”
- Come si possono interpretare i comportamenti dei nuclidi osservati? (1) è distrutta massa; (2) la massa si trasforma in qualcos'altro; (3) la massa rappresenta, solo nello stato iniziale ma non in quello finale, qualcos'altro che si conserva; (4) la massa totale non è data dalla somma delle masse dei costituenti. Motiva le tue scelte.