

EFFETTO COMPTON

PREMESSA

La concezione di Einstein della luce, nonostante i successi, fu accolta con scetticismo dagli altri fisici. Lo stesso Planck nel 1913, in occasione della presentazione di Einstein all'Accademia delle Scienze Prussiana ebbe a dire: <<...**che possa aver mancato il bersaglio nelle sue congetture, come, per esempio, nel caso dell'ipotesi dei quanti di luce, non può essere in realtà considerato troppo grave: è impossibile infatti introdurre idee veramente nuove, neppure nelle più esatte delle scienze, senza ricorrere a volte qualche rischio.**>> Einstein, non venne influenzato dai giudizi critici, nonostante fosse isolato nel credere ai corpuscoli della radiazione e alle onde vuote. Anzi, lavorò molto a queste sue idee tra il 1909 al 1917, riuscendo a dimostrare che tutta l'energia assorbita da un atomo o da un elettrone (nella loro interazione con la radiazione elettromagnetica) proveniva da una stessa direzione, per cui all'energia $h\nu$ doveva essere associata una **quantità di moto** $\frac{h\nu}{c}$ nella direzione di propagazione della luce. Queste sue idee furono clamorosamente confermate negli anni tra il 1923 – 25 dagli esperimenti Compton e Compton e Simon. Ancora più convincente, da un punto di vista realista, fu **l'esperimento di Compton e Simon (1925)** che prese in considerazioni lo studio di eventi generati da un fascio di **raggi X** che interagivano con una lamina materiale posta in una **camera a nebbia**. Essi osservarono 18 eventi di emissione di elettroni secondari (poteva accadere infatti che l'inosservato fotone propagandosi nel vapore della camera a nebbia mettesse in moto urtandolo un secondo elettrone) e **il punto iniziale della traiettoria dell'elettrone secondario era sempre sulla traiettoria calcolata del fotone**. Nel 1927 Compton scrisse: << **Non possiamo trovare alcuna interpretazione della diffusione se non in termini di deviazioni di corpuscoli o fotoni della radiazione.** >>

I. EFFETTO COMPTON

Compton inviò dei raggi X,(onde e.m. di λ piccolissima, $\approx 10^{-10}$ m, quindi p grande) su di un solido (grafite), e misurò la λ' dei raggi X deviati dal bersaglio, in funzione dell'angolo θ .(Fig.1)

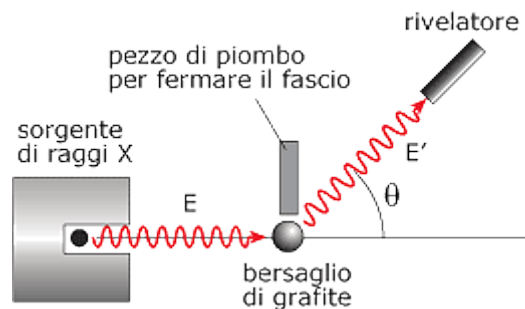


Fig. 1

Per $\theta > 0$, nella curva di distribuzione dei raggi X, esiste un secondo picco a λ' maggiore della λ iniziale. C'è una regolarità: $\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda)$ cresce come $(1 - \cos(\theta))$. Perché?

Classicamente un'onda deflessa può cambiare intensità ma non λ .

Compton ipotizzò che il fotone subisse un urto "meccanico" (non frontale) con un elettrone del solido.

Applichiamo le regole dell'urto elastico, tra un fotone (di $E = hv$ e momento $p = hv/c$) e un elettrone, praticamente fermo. (Fig.2)

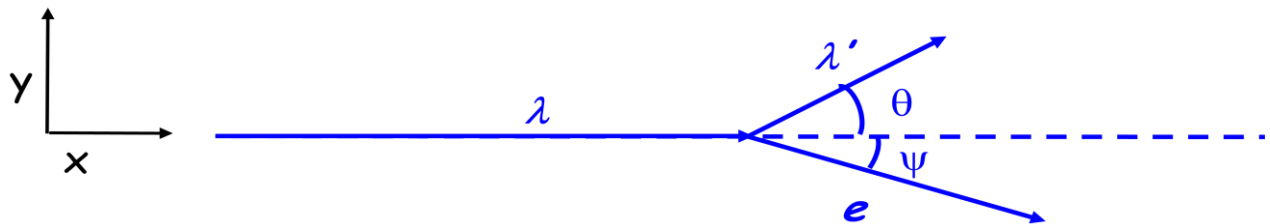


Fig.2

Dopo l'urto il fotone ha energia hv' e l'elettrone $K_{cin} = m_e c^2(\gamma - 1)$ (formula relativistica con $\gamma = 1/\sqrt{1-(v/c)^2}$)

Applicando ora la **Conservazione dell'energia (scalare)**:

$$hv = hv' + m_e c^2(\gamma - 1) \Rightarrow h(v - v') + m_e c^2 = m_e c^2 \gamma$$

Applicando anche la **Conservazione della q.d.m. (vettore)**:

$$x) \quad hv/c = (hv'/c) \cos(\theta) + p_e \cos(\psi);$$

$$y) \quad 0 = (hv'/c) \sin(\theta) - p_e \sin(\psi)$$

cioè:

$$x) \quad hv/c - (hv'/c) \cos(\theta) = p_e \cos(\psi); \quad y) \quad (hv'/c) \sin(\theta) = p_e \sin(\psi)$$

Elevando al quadrato le espressioni x) ed y) e sommando membro a membro, si ottiene:

$$(hv/c)^2 + (hv'/c)^2 - 2(h^2 vv'/c^2) \cos(\theta) = p_e^2$$

moltiplicando per c^2

$$(hv)^2 + (hv')^2 - 2(h^2 vv') \cos(\theta) = p_e^2 c^2$$

Riprendiamo la cons. dell'energia: $h(v - v') + m_e c^2 = \gamma m_e c^2$ ed eleviamo al quadrato:

$$h^2(v - v')^2 + m_e^2 c^4 + 2h(v - v') m_e c^2 = \gamma^2 m_e^2 c^4$$

$$(hv)^2 + (hv')^2 - 2h^2 vv' + m_e^2 c^4 + 2h(v - v') m_e c^2 = m_e^2 c^4$$

Sottraiamola alla cons. q.d.m.: $(hv)^2 + (hv')^2 - 2h^2 vv' \cos(\theta) = p_e^2 c^2$

si ottiene:

$$2h^2 vv' (1 - \cos(\theta)) - m_e^2 c^4 - 2h(v - v') m_e c^2 = -m_e^2 c^4 \quad (\text{per l'Invar. Dinam. Rel.})$$

$$2 h^2 v v' (1 - \cos(\theta)) = 2 h(v - v') m_e c^2$$

Quindi con un po' di algebra:

$$m_e c^2 (v - v') = h v v' (1 - \cos(\theta)) \Rightarrow c(v - v')/v v' = (h/m_e c) (1 - \cos(\theta))$$

$$c(1/v' - 1/v) = h/(m_e c) (1 - \cos(\theta)) \Rightarrow (\lambda' - \lambda) = \lambda_{Ce} (1 - \cos(\theta))$$

con $\lambda_{Ce} = h/m_e c = 2,4263102175 \times 10^{-12} \text{ m}$ ≡ Lunghezza d'onda Compton dell'elettrone

Pertanto utilizzando **le formule della relatività speciale e il concetto di fotone** introdotto da Einstein, Compton pervenne al risultato:

$$\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda) = \lambda_{Ce} (1 - \cos(\theta))$$

in perfetto accordo con i risultati sperimentali:

$\Delta\lambda$ **non dipende** dalla lunghezza d'onda incidente **dipende** dall'angolo di scattering θ e varia tra 0 e $2h/(m_e c)$ corrispondente a $\theta = 180^\circ$ cioè tra 0 e $0,049 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

Le lunghezze d'onda alle quali è **apprezzabile** lo shift Compton sono: raggi X ($\approx 1 \text{ \AA}$); raggi γ ($\approx 0,01 \text{ \AA}$).

Inoltre, **l'effetto Compton sta a dimostrare che, anche al livello quantistico, al livello atomico e delle particelle elementari, si conservano rigorosamente la quantità di moto e l'energia.**

II. CONSIDERAZIONI SULLA NATURA DELLA LUCE

I fotoni si formano all'atto dell'emissione della luce, a spese di altre forme di energia, e, spariscono all'atto dell'assorbimento, trasformandosi, secondo precise regole, in energia cinetica dell'oggetto con cui interagivano. All'inizio del Novecento non si era mai visto nulla di simile, anche se oggi a questi processi (formarsi e dissolversi di grumi di materia) sono considerati ordinaria amministrazione. Tuttavia, nel 1905 i corpuscoli di Einstein che nascevano e sparivano diventando movimento puro dovevano sembrare molto strani.

Sia l'effetto fotoelettrico che quello Compton mostrano una natura "**corpuscolare**" della luce. Mentre l'esperimento di Young con l'interferenza-diffrazione?

a) L'ESPERIMENTO DI YOUNG (1801)

Un raggio di luce viene fatto incidere su di uno schermo recante una piccola fenditura, poi su un secondo schermo con due fenditure vicine (Fig.3).

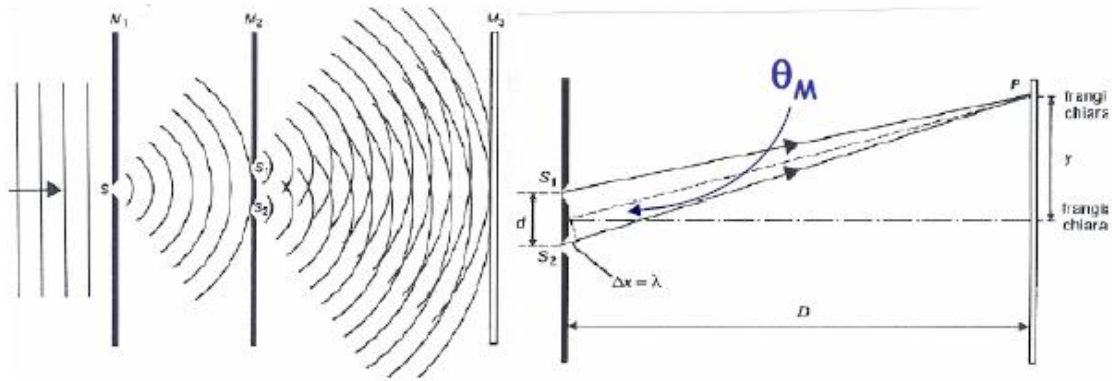


Fig.3

Sullo schermo si ha una sequenza di **zone chiare e zone scure**.

La spiegazione è che si ha **INTERFERENZA** e quindi la luce è un'onda.

I massimi si hanno quando la differenza di cammino per giungere sullo schermo:

$$\Delta x = d \sin(\theta_M) = n \lambda \Rightarrow \theta_M = \arcsin(n \lambda / d) = \arctan(y/D)$$

I minimi per

$$\Delta x = d \sin(\theta_m) = (2n+1)\lambda/2 \Rightarrow \theta_m = \arcsin((2n+1)\lambda/2d)$$

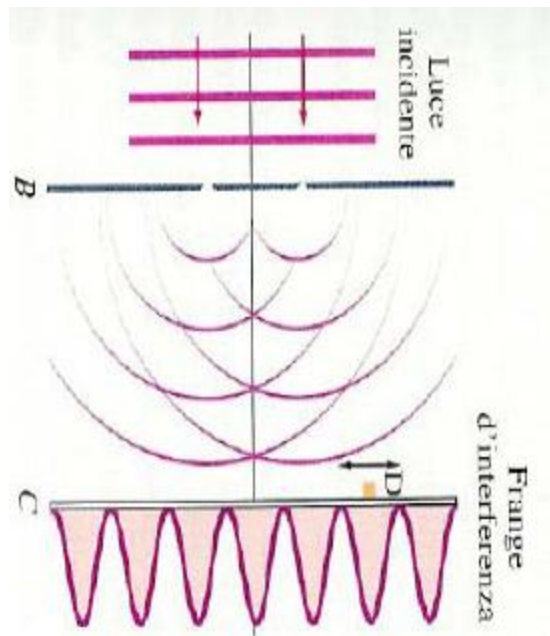


Fig.4

b) I NUOVI ESPERIMENTI DI YOUNG

L'esperimento di Young è stato ripetuto con la moderna tecnologia.

Mettiamo una schiera di piccolissimi rivelatori di fotoni (~ cellule fotoelettriche) davanti allo schermo. Ogni rivelatore dà un impulso ogni volta che viene colpita da un fotone. In ogni istante qualche rivelatore dà un impulso. Dopo un tempo lungo, grafici chiamo il numero di impulsi in funzione della posizione del rivelatore. Quello che si ottiene è un istogramma con andamento tipo $\sin^2(\theta)$ (Fig.5).

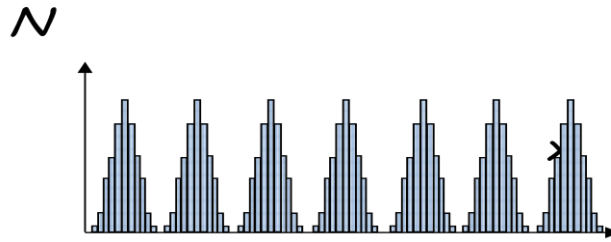


Fig.5

Si ottiene un risultato identico a quello mostrato in Fig.4.

Se ne deduce che **l'intensità dell'onda luminosa è la probabilità per unità di tempo che un fotone si trovi in quel punto!** Non possiamo sapere dove andrà a cadere il singolo fotone ma possiamo dire che, dopo l'arrivo di un grande numero di fotoni, molti saranno in corrispondenza dei massimi del quadrato della funzione d'onda (ampiezza del campo elettrico) e pochi nei minimi.

In un dispositivo d'interferenza con fascio di luce così poco intenso da avere **singoli fotoni in volo**, il singolo fotone si comporta come tutto il fascio. Le frange d'interferenza risultano dalla successiva accumulazione di eventi puntiformi (Fig.6).

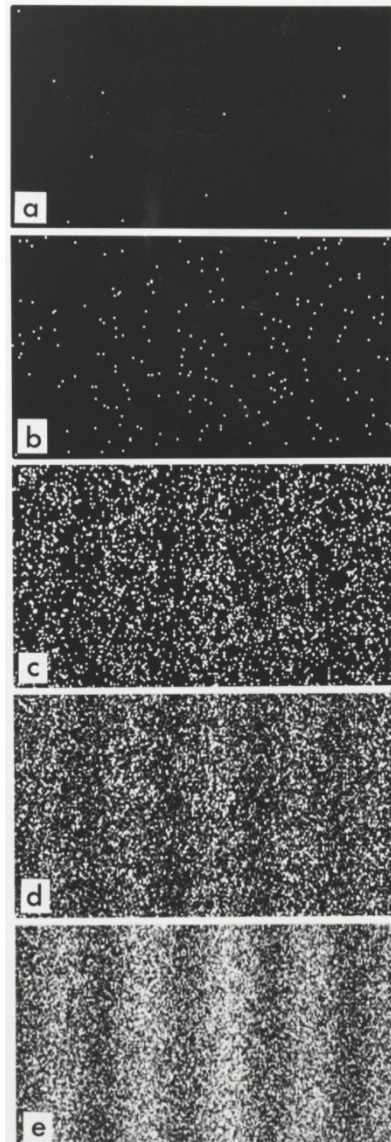


Fig.6

Qual è la “vera” natura della Luce? **Onda o corpuscolo?**

La **distinzione** tra “onda” o “corpuscolo” è un modo di indicare quale è l’equazione che ne descrive il moto!

Oggi la maggior parte dei fisici concorda nel ritenere che la luce quando **interagisce con la materia** si comporta da “corpuscolo”, quando si **propaga** si comporta da “onda”.

Questa, tuttavia, non era il modo di concepire la luce per Einstein. Nell’effetto fotoelettrico abbiamo visto che Einstein credeva, nell’esistenza di un’onda che accompagnasse il corpuscolo energetico nella sua propagazione e che ne determinasse il comportamento. Questa era **un’onda vuota di energia e quantità di moto**, con caratteristiche completamente nuove rispetto a tutte le onde studiate dalla fisica classica. D’altra parte, i fenomeni d’interferenza e diffrazione non possono essere certo spiegati da una concezione puramente corpuscolare.

Le onde di Einstein erano onde prive di energia, ma nella sua teoria dei quanti di luce, queste onde dovevano essere **onde reali**. In tutta la storia della fisica precedente, un’onda non era mai stata considerata una cosa in sé, ma una proprietà oscillatoria di un sistema esteso. Le onde degli oggetti subatomici avrebbero dovuto essere allora oscillazioni dello spazio fisico (**etere**), ma, ironia della sorte, proprio Einstein, sempre nel 1905, con la Teoria della Relatività, dichiarava completamente equivalenti tutti sistemi inerziali ed escludeva l’esistenza di un sistema privilegiato nel quale l’etere potesse essere considerato mediamente immobile (anzi, l’etere non aveva più l’attributo dell’esistenza). Veniva, così, a mancare **un supporto** per la propagazione delle onde elementari, né alcuna seria possibilità di comprendere la dualità onda-corpuscolo in termini spazio temporali e causali. Questa è probabilmente la ragione per cui Einstein non è riuscito a risolvere le onde quantistiche. Su questo problema oggi siamo ancora al punto d’inizio. Infatti, dal 1924-27 è prevalsa un’interpretazione matematica di tutte le onde della MQ. Eppure la concezione di corpuscoli più onde vuote è molto affascinante :nessuna altra idea spiega in modo semplice e razionale l’effetto fotoelettrico. <<**Se, come abbiamo mille ragioni per credere, il mondo materiale è coerente ed autoconsistente, la precedente conclusione significa che abbiamo trovato la chiave che apre il forziere di tutti i fenomeni quantistici.**>>¹

¹ F.Selleri, *La Fisica tra paradossi e realtà*, Progedit Bari Seconda edizione 2003