

Un secolo di Fisica Moderna

Corso di formazione per docenti di fisica della scuola secondaria superiore

La crisi della meccanica classica

Esperto
Edoardo Piparo

La crisi della meccanica classica

La crisi della meccanica classica

Alla fine del XIX secolo la teoria ondulatoria della luce sembrava poggiare su solide basi. Tutti gli esperimenti confermavano le previsioni teoriche; infine, le prime applicazioni tecnologiche facevano la loro comparsa.

Tuttavia, proprio all'inizio del 1900 questo grandioso edificio cominciò a vacillare. Tre furono le tappe fondamentali che portarono a una radicale rivoluzione nella descrizione dei fenomeni elettromagnetici:

- **1900: Lo spettro del corpo nero**
- **1905: L'effetto fotoelettrico**
- **1923: L'effetto Compton**

Quest'ultima diede la prova definitiva che *la luce, accanto alle proprietà ondulatorie classiche, manifesta anche proprietà corpuscolari.*

La crisi della meccanica classica

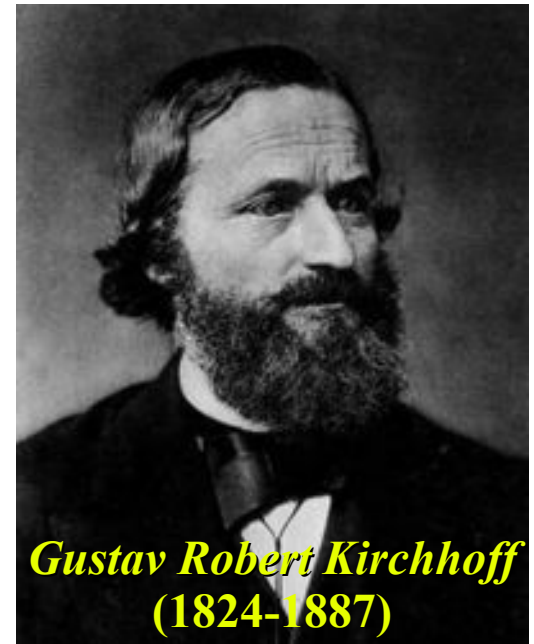
Il corpo nero

Quando una certa quantità di energia E_i incide sulla superficie di un corpo opaco, una parte E_r di essa viene riflessa, mentre la rimanente parte E_a viene assorbita:

$$E_r/E_i + E_a/E_i = r + a = 1$$

dove $r = E_r/E_i$ è il **potere riflettente** e $a = E_a/E_i$ è il **potere assorbente**.

Per corpi con $r = 1$ e $a = 0$ tutta l'energia incidente viene riflessa. Per corpi con $a = 1$ e $r = 0$ tutta l'energia incidente viene assorbita: questo caso limite corrisponde al cosiddetto **corpo nero** (termine introdotto da Gustav Robert Kirchhoff nel 1862).



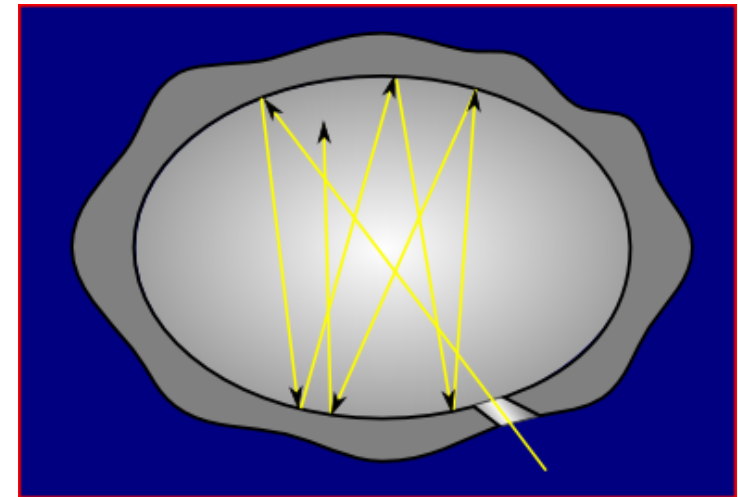
Gustav Robert Kirchhoff
(1824-1887)



La crisi della meccanica classica

Il corpo nero

Si può ottenere un dispositivo che si comporti come un corpo nero mantenendo a temperatura uniforme le pareti di un contenitore cavo nel quale è praticato un forellino. Le pareti emettono, diffondono ed assorbono continuamente onde elettromagnetiche. Solo una minima parte di tale radiazione può sfuggire dalla cavità attraverso il piccolo foro.



Si può, pertanto, affermare che praticamente tutta la radiazione che cade dall'esterno sull'apertura ed entra nel contenitore, viene completamente assorbita, dopo ripetute riflessioni sulle pareti. La radiazione all'interno, e quindi anche la radiazione che esce nuovamente dall'apertura, deve perciò possedere esattamente la stessa distribuzione spettrale della radiazione di corpo nero.

La crisi della meccanica classica

Distribuzione spettrale e radianza

A temperatura diversa dallo zero assoluto i corpi emettono radiazioni elettromagnetiche con un spettro continuo.

La *distribuzione spettrale* della radiazione emessa (spettro) è una funzione $R_\lambda(\lambda, T)$ della lunghezza d'onda λ e della temperatura T corrispondente alla potenza che fuoriesce dal foro, sotto forma di onde elettromagnetiche nell'intervallo di lunghezze d'onda $(\lambda, \lambda + d\lambda)$, divisa per l'area del foro e per l'intervallo (infinitesimo) di lunghezze d'onda $d\lambda$.

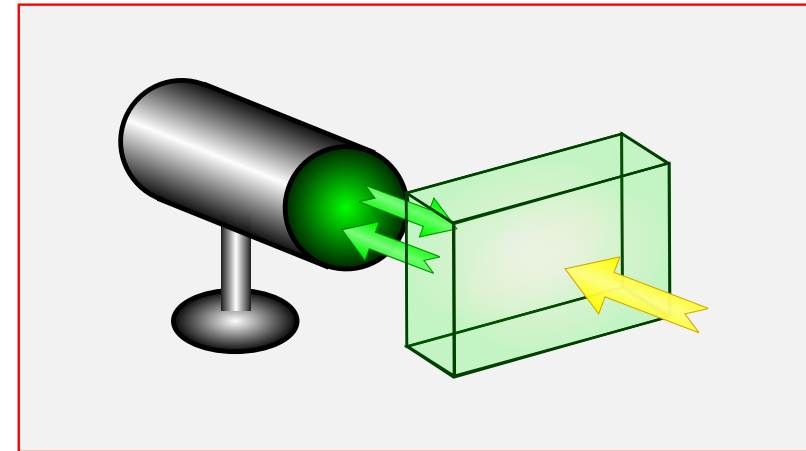
La potenza irradiata, dall'unità di superficie, a tutte le lunghezze d'onda è detta *potere emissivo* o *radianza* ed è data da:

$$R(T) := \int_0^{+\infty} R_\lambda(\lambda, T) d\lambda$$

La crisi della meccanica classica

Teorema di Kirchhoff

- Si consideri un corpo, all'equilibrio termico a una temperatura T , di *radianza spettrale* $R_{1\lambda}$ e *potere assorbente spettrale* $a_{1\lambda}$.
- Sia $R_{0\lambda} d\lambda$ l'energia incidente dall'ambiente, nell'unità di tempo, sull'unità di superficie del corpo, nell'intervallo di lunghezze d'onda $(\lambda, \lambda + d\lambda)$.
- Il corpo è separato dall'ambiente con un filtro che permette il trasferimento di energia solo alla lunghezza d'onda λ .



La crisi della meccanica classica

Teorema di Kirchhoff

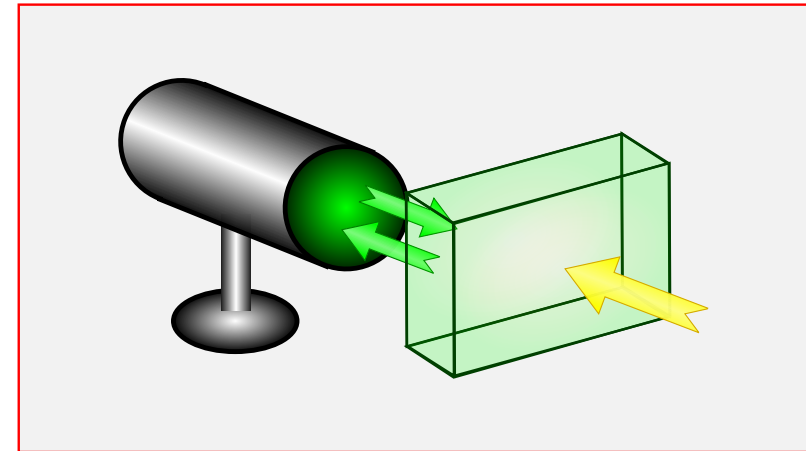
Per il *secondo principio della termodinamica*, l'energia emessa dall'unità di superficie del corpo, nell'unità di tempo, dovrà essere uguale a quella assorbita e pertanto:

$$R_{1\lambda} d\lambda = a_{1\lambda} R_{0\lambda} d\lambda \Rightarrow \frac{R_{1\lambda}}{a_{1\lambda}} = R_{0\lambda}$$

Teorema di Kirchhoff (1859):

Il rapporto tra la radianza e il potere assorbente spettrali di un corpo dipende solo dalla temperatura e dalla lunghezza d'onda e non dalla natura del corpo.

Tale rapporto definisce pertanto una *funzione universale* che coincide con la distribuzione spettrale del corpo nero.



La crisi della meccanica classica

La legge di Stefan-Boltzmann

Nel 1879 Josef Stefan determinò sperimentalmente che *il potere emissivo risulta direttamente proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta*:

$$R = \sigma T^4$$

dove $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W / (m}^2 \text{ K}^4)$ è la *costante di Stefan*.



Il risultato trovato da Stefan fu giustificato teoricamente da Boltzmann nel 1884, considerando una cavità cilindrica a pareti riflettenti, di cui una mobile. Facendo compiere al sistema un *ciclo di Carnot*, Boltzmann dedusse il lavoro effettuato dalla pressione di radiazione e da questo ottenne la *densità di energia* u del campo, che differisce dal potere emissivo per un fattore moltiplicativo costante.

La crisi della meccanica classica

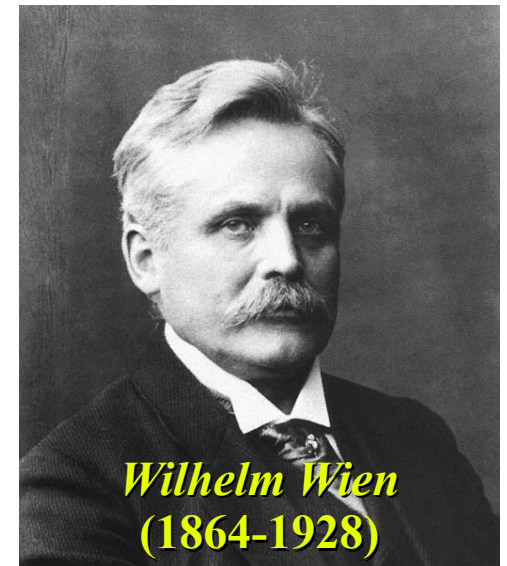
La legge dello spostamento di Wien

La *legge dello spostamento di Wien* (1893) stabilisce che la *distribuzione spettrale della densità di energia* u_λ di un corpo nero (definita in modo che $u_\lambda d\lambda$ sia la densità di energia della radiazione nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra λ e $\lambda + d\lambda$) è data da un'equazione della forma:

$$u_\lambda = \frac{F(\lambda T)}{\lambda^5}$$

dove $F(\lambda T)$ è una funzione del prodotto della lunghezza d'onda e della temperatura la cui forma non è determinabile con i metodi della termodinamica.

Wien analizzò, nel sistema termodinamico considerato da Boltzmann, il cambiamento di lunghezza d'onda delle varie componenti spettrali della radiazione dovuto allo *spostamento Doppler* causato dal moto dello specchio.



La crisi della meccanica classica

La legge dello spostamento di Wien

La *legge dello spostamento di Wien* include quella di *Stefan-Boltzmann*; infatti, con la sostituzione $x = \lambda T$:

$$u = \int_0^{+\infty} u_\lambda d\lambda = \int_0^{+\infty} \frac{F(\lambda T)}{\lambda^5} d\lambda = T^4 \int_0^{+\infty} \frac{F(x)}{x^5} dx \propto T^4$$

La ragione per cui la legge di Wien è chiamata «*legge dello spostamento*» è la seguente. Sperimentalmente si trovò che l'intensità della radiazione emessa da un corpo incandescente presenta un massimo in corrispondenza di una determinata lunghezza d'onda λ_{\max} . Al variare della temperatura, però, la posizione del massimo si sposta, in modo che il prodotto della lunghezza d'onda del massimo per la temperatura si mantiene costante:

$$\lambda_{\max} T = b$$

dove $b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ è detta *costante di spostamento di Wien*.



La crisi della meccanica classica

La legge dello spostamento di Wien

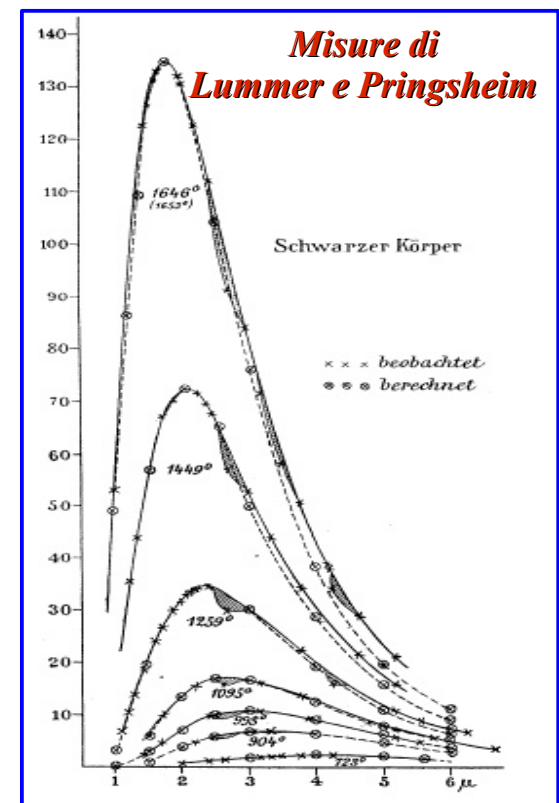
Per provare la *legge dello spostamento*, basta calcolare la lunghezza d'onda per cui u_λ è massima. La condizione è $du_\lambda/d\lambda = 0$, ovvero:

$$\frac{du_\lambda}{d\lambda} = -\frac{5}{\lambda^6}F(\lambda T) + \frac{T}{\lambda^5}F'(\lambda T) = 0$$

da cui:

$$\lambda T F'(\lambda T) - 5F(\lambda T) = 0$$

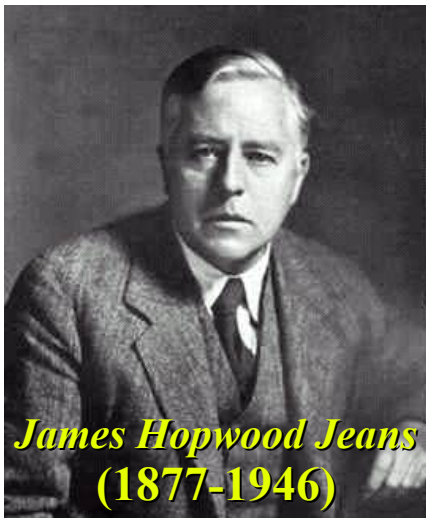
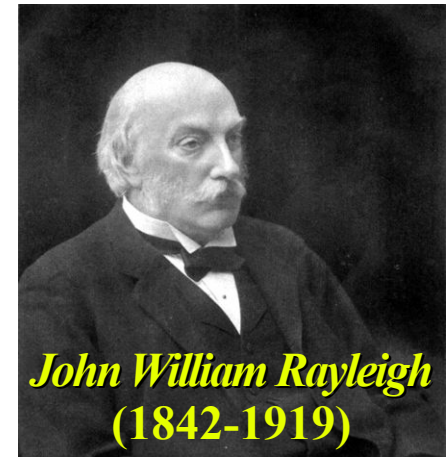
La soluzione di tale equazione deve, evidentemente, avere la forma $\lambda T = \text{costante}$, conformemente alla legge dello spostamento del massimo d'intensità con la temperatura.



La crisi della meccanica classica

Il cubo di Rayleigh-Jeans

Per determinare la forma della funzione $F(\lambda T)$, che compare nella *legge di Wien*, è necessario esaminare nel dettaglio le caratteristiche di un corpo nero mediante un opportuno modello. Risulta a tal fine conveniente riferirsi alla *teoria di Rayleigh e Jeans*, che non richiede una descrizione dettagliata dell'origine della radiazione di corpo nero.



Si consideri una cavità cubica, a pareti metalliche, in equilibrio termico alla temperatura T . Dato che le pareti della cavità sono conduttrici, le componenti tangenziali del vettore campo elettrico E devono annullarsi in corrispondenza delle loro superfici, il che pone delle limitazioni ai possibili valori che possono assumere le lunghezze d'onda della radiazione elettromagnetica contenuta nella cavità.

La crisi della meccanica classica

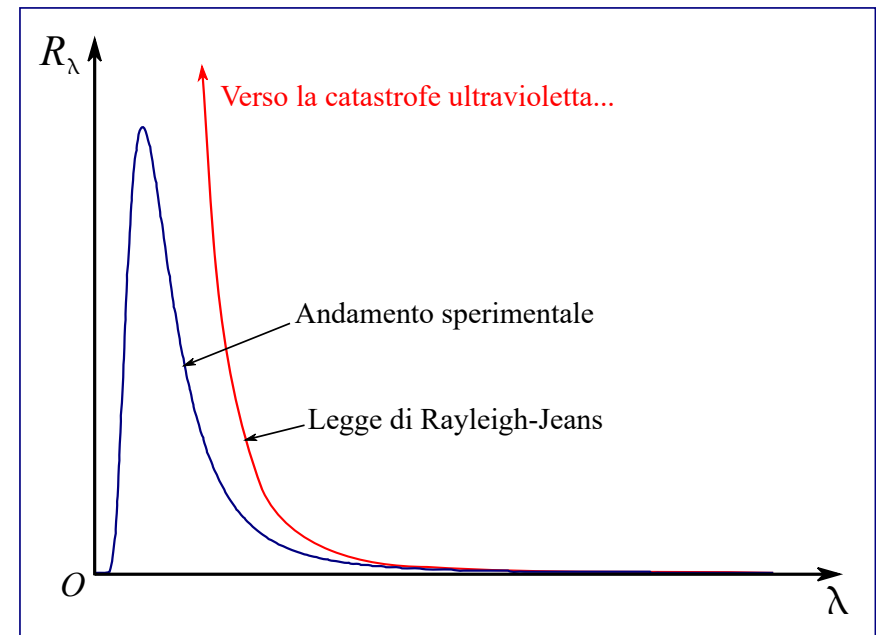
La catastrofe ultravioletta...

Rayleigh e Jeans ottennero la seguente distribuzione spettrale della densità di energia:

$$u_\lambda = \frac{8\pi k_B}{\lambda^5} \lambda T$$

Il risultato è però in contrasto con l'esperienza e il buon senso comune. Esso, infatti, prevede che l'energia irradiata da un corpo nero dovrebbe essere infinita a qualsiasi temperatura.

La radiazione emessa, inoltre, dovrebbe essere prevalentemente costituita da onde di altissima frequenza (raggi X e raggi γ). **Paul Ehrenfest** chiamò tale palese fallimento della fisica classica «*catastrofe ultravioletta*» (1911).



La crisi della meccanica classica

La teoria di Planck

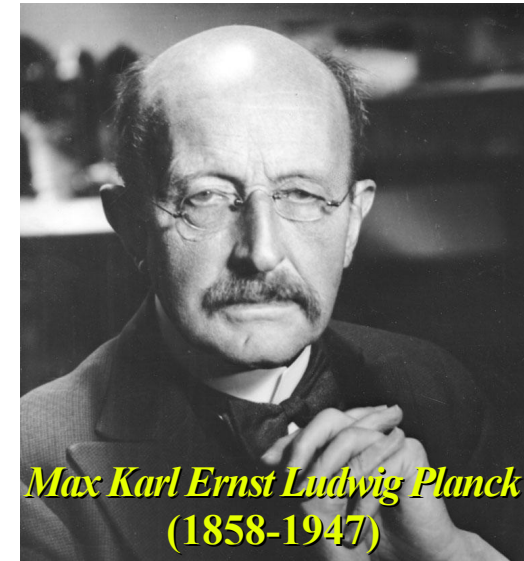
La *legge di Rayleigh-Jeans* presentava, però, aspetti corretti:

1. Era della forma prevista dalla *legge di Wien*;
2. Corrispondeva all'andamento sperimentale nel limite di grandi lunghezze d'onda.

Nel 1899, *Max Planck* decise di rianalizzare il procedimento utilizzato per ricavare tale legge, fissando la propria attenzione sul calcolo dell'energia media per modo di oscillazione.

A tale scopo, effettuò i calcoli assegnando a ogni modo di oscillazione un'energia multipla di un valore costante ε_0 . La *legge di Wien* imponeva che il **quanto d'energia** ε_0 fosse direttamente proporzionale alla frequenza ν della radiazione:

$$\varepsilon_0 = h\nu$$



La crisi della meccanica classica

La teoria di Planck

In tali ipotesi Planck ottenne la seguente espressione per la *distribuzione spettrale del corpo nero*:

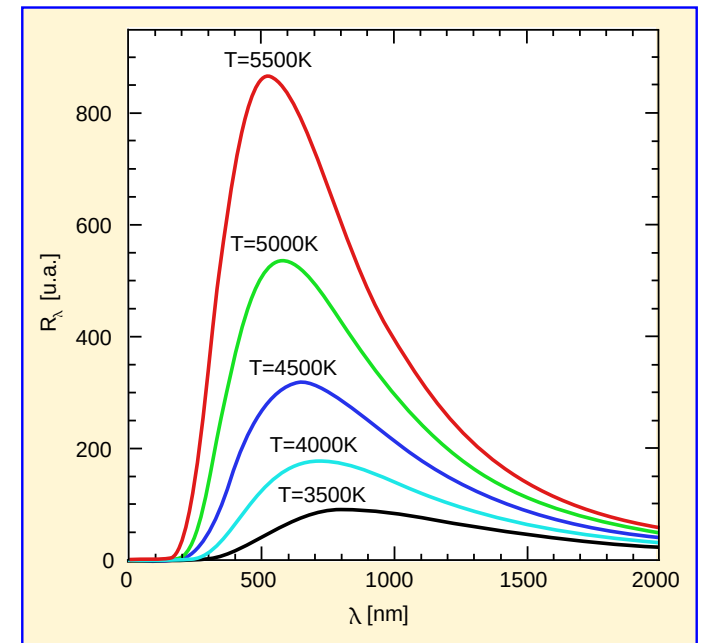
$$R_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(k_B T \lambda)} - 1}$$

Le funzione di Planck tende a zero sia quando λ tende a zero sia quando tende all'infinito e si adatta perfettamente ai dati sperimentali quando si ponga:

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Per integrazione (non semplice...) della distribuzione di Planck si ottiene un'espressione per la *costante di Stefan*:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15c^2 h^3}$$

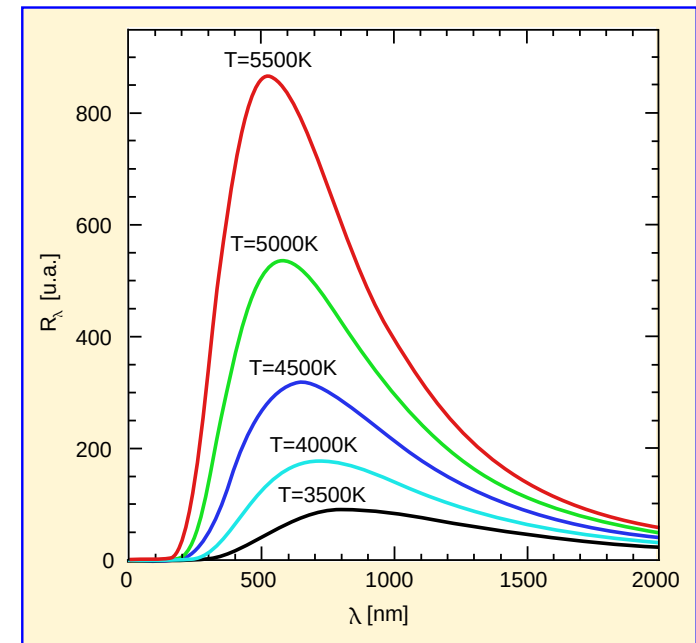


La crisi della meccanica classica

La teoria di Planck

La *distribuzione di Planck* evita la *catastrofe ultravioletta* perché al crescere della frequenza (ovvero per piccole lunghezze d'onda) l'energia dei quanti aumenta ma la probabilità degli scambi diminuisce, tendendo a zero, facendo tendere a zero anche l'emissione stessa.

A basse frequenze (cioè per grandi lunghezze d'onda), invece, gli scambi coinvolgono piccole quantità d'energia che, però, avvengono con grande probabilità, cosicché l'emissione ha un ritmo praticamente continuo che obbedisce alle leggi classiche.



La crisi della meccanica classica

La teoria di Planck

Il 14 dicembre 1900 Planck presentò la propria rivoluzionaria teoria alla Società di Fisica di Berlino, consapevole di essere rimasto egli stesso stupito per le conclusioni a cui era giunto.



Si legge a tal proposito nelle sue memorie: *«Mi sono visto costretto, quasi contro la mia volontà, ad ammettere un fatto ancora insospettato nella fisica: l'energia associata a un'onda elettromagnetica emessa da una sorgente non è continua, bensì suddivisa in determinate porzioni, in quanti che si susseguono l'uno all'altro».*

Turbato dalle proprie conclusioni, Planck per parecchio tempo tentò, invano, di modificare quella teoria che «rovinava le fondamenta» della fisica classica, considerata fino al 1900 una struttura concettuale sicura e definitiva. L'evidenza sperimentale dimostrava, però, la validità di quelle idee che egli stesso rifiutava.

La crisi della meccanica classica

L'effetto fotoelettrico

Nel 1887 **H. Hertz** scoprì casualmente che la scarica elettrica tra due elettrodi è molto più nutrita quando gli elettrodi sono illuminati con luce ricca di raggi ultravioletti.

Dopo la scoperta degli **elettroni**, (J.J. Thomson, 1897) si capì che il fenomeno, chiamato poi **effetto fotoelettrico**, era dovuto all'emissione di elettroni provocata in un metallo dall'assorbimento di radiazioni elettromagnetiche di frequenza opportuna.



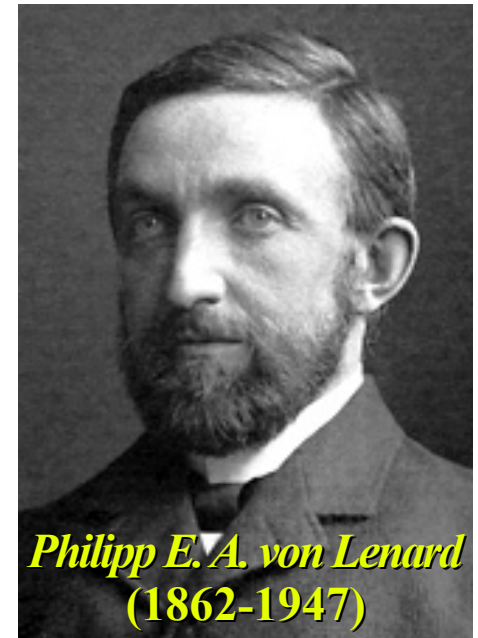
Heinrich Rudolf Hertz
(1857-1894)

La crisi della meccanica classica

L'esperimento di Lenard

L'origine dell'effetto *fotoelettrico* fu confermata dalle misurazioni del rapporto carica su massa dei *fotoelettroni* emessi, eseguite da *Philipp Lenard* nel 1900.

Esperimenti più approfonditi sull'effetto *fotoelettrico* furono condotti, sempre da *Lenard*, nel 1902, al fine di determinare la dipendenza dell'energia degli elettroni emessi dalla frequenza della radiazione luminosa. I risultati più importanti ottenuti furono, poi, pubblicati sul n.8 di *Annalen der Physik*.



*Philipp E. A. von Lenard
(1862-1947)*

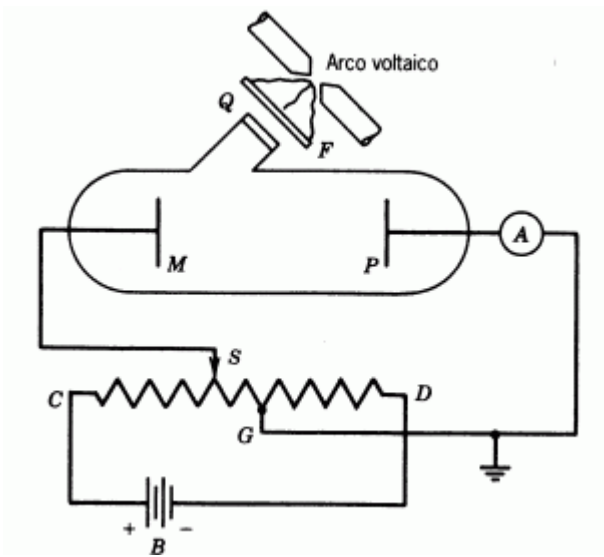


La crisi della meccanica classica

L'esperimento di Lenard

Lo schema dell'apparato sperimentale di *Lenard* è rappresentato nella figura accanto, dove:

- *M*: lastra di metallo (*catodo*), su cui incide la luce di un *arco voltaico*, passante attraverso la finestra di quarzo *Q*. *M* è connessa al contatto strisciante *S* della resistenza variabile *CD* collegata alla batteria *B*
- *F*: filtro che rende la luce monocromatica
- *P*: elettrodo (*anodo*) connesso al punto di mezzo *G* della resistenza *CD*
- *A*: *galvanometro*

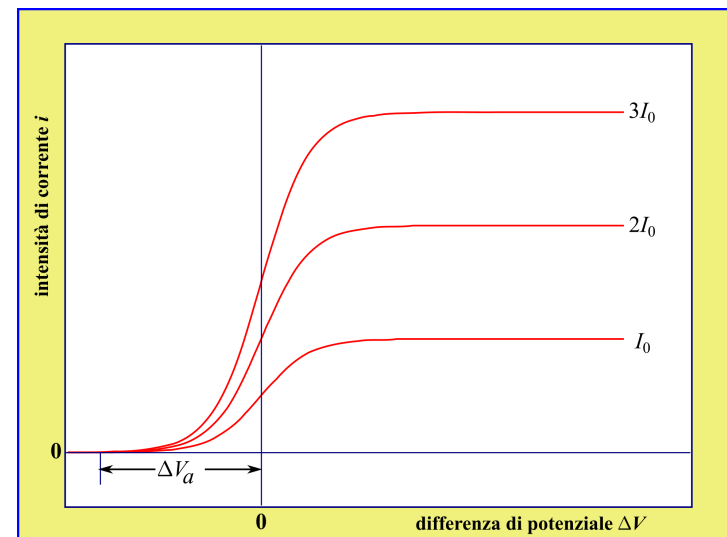


Tra *M* e *P* vi è una d.d.p. $\Delta V = V_P - V_M$, variabile in valore e segno, in modo che i *fotoelettroni* emessi dalla lastra *M* possano essere sia accelerati sia rallentati.

La crisi della meccanica classica

I risultati dell'esperimento di Lenard

Se la d.d.p. lo permette, gli elettroni emessi da M possono raggiungere la placca P e l'amperometro A segnala il passaggio di una corrente elettrica i . Rappresentando graficamente il legame tra i e ΔV , al variare dell'intensità I della radiazione E.M. incidente, si ottennero curve analoghe a quelle rappresentate in figura, da cui si rileva che:



- Per valori abbastanza grandi e positivi della differenza di potenziale ΔV , i tende a un valore (**corrente di saturazione**) praticamente indipendente da ΔV e direttamente proporzionale all'intensità I della radiazione E.M. incidente;
- Applicando un'opportuna d.d.p. negativa di **arresto** ΔV_a , la corrente si annulla del tutto, indipendentemente dall'intensità della radiazione I .

La crisi della meccanica classica

Le leggi dell'effetto fotoelettrico

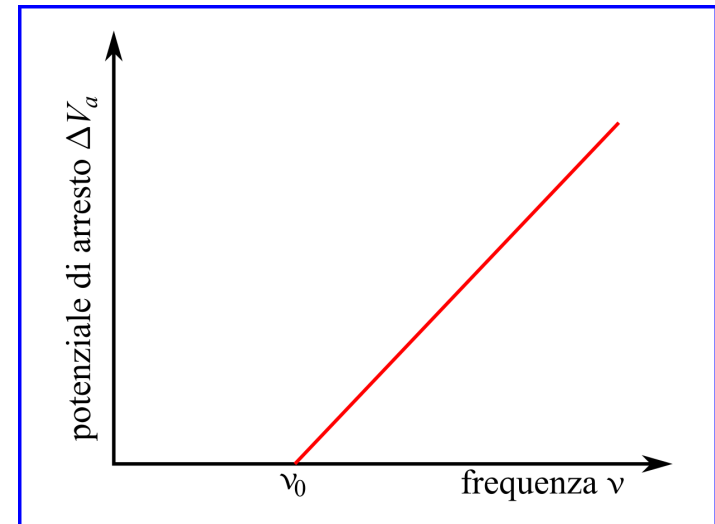
Si hanno le seguenti leggi:

1. Si ha emissione elettronica solo se la *frequenza* della radiazione incidente è maggiore della **soglia fotoelettrica** ν_0 , dipendente dalla natura del metallo.
2. L'*energia cinetica* massima K_{\max} dei *fotoelettroni*:

$$K_{\max} = e \Delta V_a$$

(e : carica dell'elettrone, ΔV_a : potenziale di arresto) dipende dalla frequenza della radiazione incidente e non dalla sua intensità.

3. Il numero degli elettroni emessi per unità di tempo aumenta in maniera direttamente proporzionale all'intensità della radiazione E.M. incidente.



La crisi della meccanica classica

Le difficoltà dell'elettromagnetismo classico

Secondo la teoria elettromagnetica di *Maxwell* l'elettrone viene emesso quando l'energia trasferita a esso dalla radiazione, proporzionale alla sua intensità, supera il **lavoro di estrazione** W_e del metallo (minima energia necessaria per estrarre un elettrone dal metallo: dipende dal tipo di metallo e dalla temperatura). Ci si dovrebbe aspettare, pertanto, che:

- L'effetto fotoelettrico avvenga a qualsiasi frequenza;
- L'energia degli elettroni emessi aumenti con l'intensità della radiazione incidente;
- L'emissione degli elettroni avvenga con un certo ritardo rispetto all'inizio dell'irraggiamento.

Gli esperimenti di *Lawrence e Beams* [E.O. Lawrence and J.W. Beams, *Phys. Rev.*, **32**, 478-485 (1928)] dimostrarono, invece, che l'emissione di elettroni è pressoché istantanea.

La crisi della meccanica classica

La quantizzazione della luce secondo Einstein

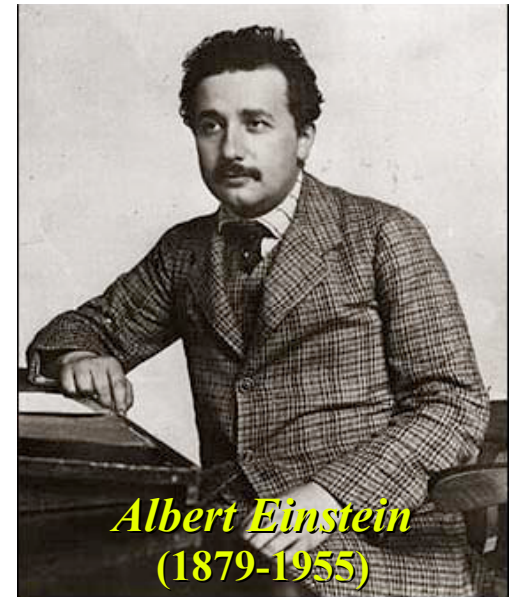
Ancora una volta, l'evidenza sperimentale non era spiegabile dall'elettromagnetismo classico.

Ipotesi di *Einstein* (1905), che *Millikan* giudicò «audace, per non dire avventata»:

La luce incide sul metallo con energia concentrata in pacchetti d'onda tanto localizzati nello spazio da poter essere assorbiti da singoli elettroni

Un fascio di luce pertanto corrisponde a un flusso di **fotoni** (come furono chiamati in seguito i pacchetti d'onda) proporzionale all'intensità luminosa. Ogni **fotone** ha massa nulla e un'energia E direttamente proporzionale alla sua frequenza ν :

$$E = h \nu$$



Albert Einstein
(1879-1955)

La crisi della meccanica classica

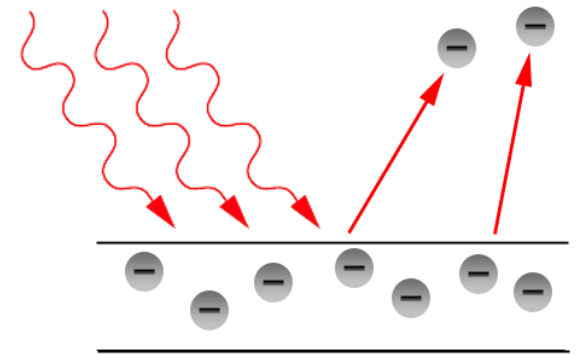
La spiegazione dell'effetto fotoelettrico

Gli elettroni, investiti dalla radiazione E.M., assorbono i *fotoni*, utilizzando parte dell'energia ricevuta per vincere il legame atomico e liberarsi dal metallo: il resto rimane loro come energia cinetica. L'energia cinetica massima che può acquisire un elettrone fuori dal metallo è, quindi, data dalla differenza tra l'energia del *fotone* assorbito e il *lavoro di estrazione*:

$$K_{\max} = h \nu - W_e$$

In particolare affinché l'emissione avvenga è necessario che la frequenza superi la *soglia fotoelettrica* ν_0 , per la quale si ha:

$$h \nu_0 = W_e$$



La crisi della meccanica classica

La spiegazione dell'effetto fotoelettrico

Dalle relazioni precedenti si ottiene:

$$\Delta V_a = \frac{h}{e}(\nu - \nu_0)$$

in perfetto accordo con i dati sperimentali. Inoltre:

- Dalle pendenze delle rette si ottengono stime molto precise del valore della *costante di Planck* h .
- Dalle *soglie fotoelettriche*, si determinano stime dei *lavori di estrazione* in accordo a quelle trovate per altra via.
- L'emissione degli elettroni, dovuta a processi d'urto, è immediata e il flusso di fotoelettroni è proporzionale al flusso di fotoni ovvero all'intensità luminosa.

Per la teoria dell'*effetto fotoelettrico* Albert Einstein ricevette il premio Nobel per la Fisica nel 1921.

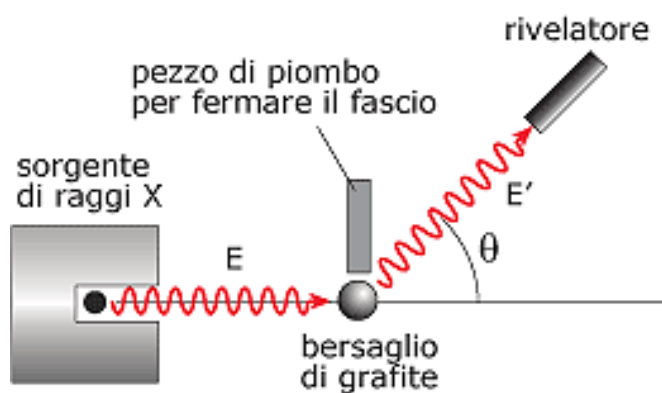


La crisi della meccanica classica

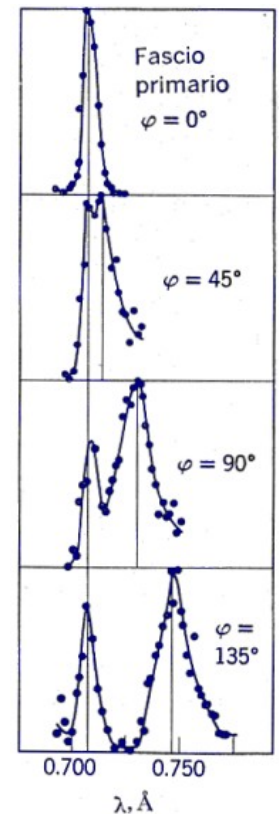
L'effetto Compton

I precedenti fenomeni, però, provano soltanto che lo scambio d'energia tra luce e materia avviene per **quanti**. La natura corpuscolare della luce è provata in maniera inconfutabile dalle leggi dell'**effetto Compton**.

Nel 1923 *Compton* scoprì che inviando un fascio di raggi X di lunghezza d'onda λ_0 contro un bersaglio di grafite, la radiazione diffusa contiene una componente di lunghezza d'onda λ_1 maggiore di λ_0 .



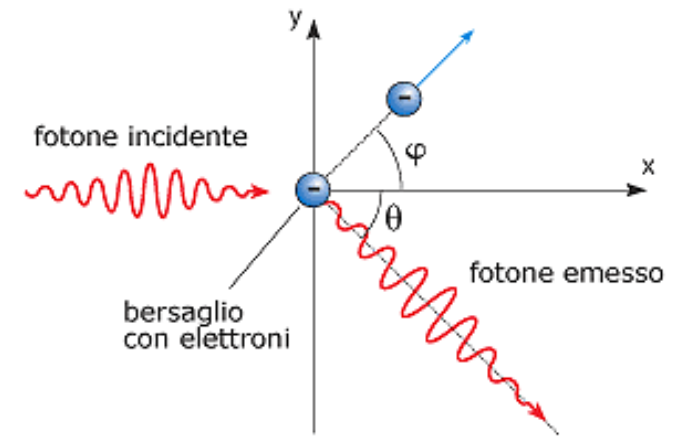
Il fenomeno, incomprensibile in base ai principi della teoria ondulatoria, può essere spiegato (*Compton e Debye*) se si considera il processo come una collisione elastica di due particelle: l'**elettrone** ed il **quanto di luce**.



La crisi della meccanica classica

L'effetto Compton

Il *fotone* incidente, colpendo un *elettrone*, gli trasferisce energia cinetica e ne perde esso stesso. La frequenza del quanto di luce, quindi, diminuisce – e la lunghezza d'onda aumenta – e il *fotone* subisce una deviazione θ dalla direzione originale. L'elettrone viene, invece, emesso con un angolo φ rispetto alla direzione di provenienza del fotone.



Sperimentalmente si osserva che la frequenza del fotone diffuso non dipende dal materiale costituente il bersaglio. Per tale motivo *Compton* suppose che l'urto avvenisse con elettroni *quasi liberi* e sostanzialmente in quiete. L'ipotesi semplificativa si giustificava considerando l'elevata energia dei fotoni incidenti.

La crisi della meccanica classica

L'analisi dell'effetto Compton

L'analisi dell'urto viene condotta in base alle leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto.

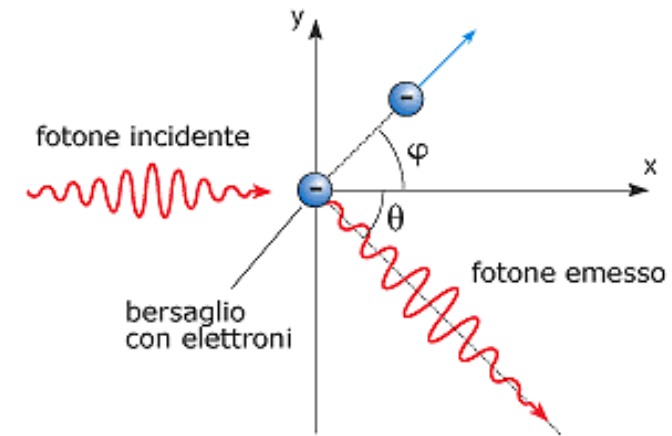
La *teoria della relatività ristretta* consente di attribuire ai fotoni una quantità di moto di modulo:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Il fotone incidente, di energia E_0 e quantità di moto p_0 , colpisce un elettrone fermo di massa a riposo m_e . Dopo l'urto l'energia del fotone diventa E_1 e la sua quantità di moto p_1 ; mentre l'elettrone acquisisce un'energia cinetica K e una quantità di moto p .

Si impone che nell'urto si conservino quantità di moto ed energia:

$$\begin{cases} \vec{p} &= \vec{p}_0 - \vec{p}_1 \\ K &= E_0 - E_1 \end{cases}$$



La crisi della meccanica classica

L'analisi dell'effetto Compton

Calcolando il quadrato del modulo di ambo i membri della prima equazione ed esprimendo le energie del fotone in termini di quantità di moto, si ottiene:

$$\begin{cases} p^2 &= p_0^2 + p_1^2 - 2p_0p_1 \cos \theta \\ K &= c(p_0 - p_1) \end{cases}$$

Poiché l'energia del fotone incidente è molto elevata, per esprimere il legame tra l'energia cinetica K dell'elettrone e la sua quantità di moto p , è necessario far uso delle leggi della dinamica relativistica. L'uso della relazione classica $K = p^2 / 2m_e$, peraltro, non semplifica affatto la trattazione, e porta a risultati errati.

La *relazione energia-quantità di moto* per l'elettrone dopo l'urto assume la forma:

$$(K + m_e c^2)^2 = (cp)^2 + (m_e c^2)^2 \Rightarrow K^2 + 2m_e c^2 K - c^2 p^2 = 0$$



La crisi della meccanica classica

L'analisi dell'effetto Compton

Da tali relazioni si ottiene:

$$p_0 - p_1 = \frac{p_0 p_1}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

Da cui si deduce, in base alla relazione tra quantità di moto e lunghezza d'onda del fotone, la **formula di Compton**:

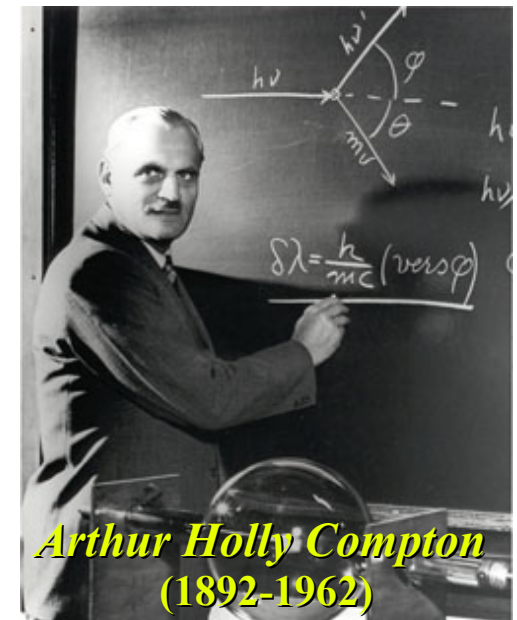
$$\lambda_1 - \lambda_0 = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

dove

$$\lambda_C := \frac{h}{m_e c} = 2,426 \times 10^{-12} \text{ m}$$

è la cosiddetta **lunghezza d'onda di Compton dell'elettrone**.

In base a tale formula l'incremento della lunghezza d'onda è indipendente dalla lunghezza d'onda stessa e dipende solo dall'angolo θ di diffusione del fotone, in pieno accordo con i fatti sperimentali.



Arthur Holly Compton
(1892-1962)

La crisi della meccanica classica

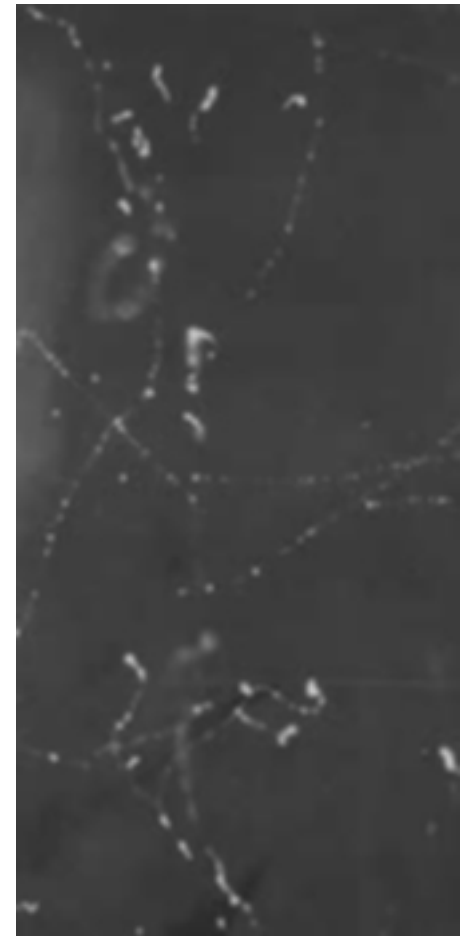
Vedere l'invisibile

L'elettrone di rinculo è stato osservato da *Bothe* e *Wilson*, nel 1923, utilizzando una **camera a nebbia**, un recipiente a tenuta ermetica pieno di vapor d'acqua soprassaturo, nel quale una particella carica in moto lascia una traccia formata da minutissime gocce (nebbia).

Imponendo la conservazione delle componenti x e y della quantità di moto, si ha:

$$\begin{cases} p \sin \varphi & = & p_1 \sin \theta \\ p \cos \varphi & = & p_0 - p_1 \cos \theta \end{cases}$$

Da tali equazioni, mediante la *formula di Compton*, è possibile determinare il legame esistente tra l'angolo θ di diffusione del fotone e l'angolo φ di emissione dell'elettrone.



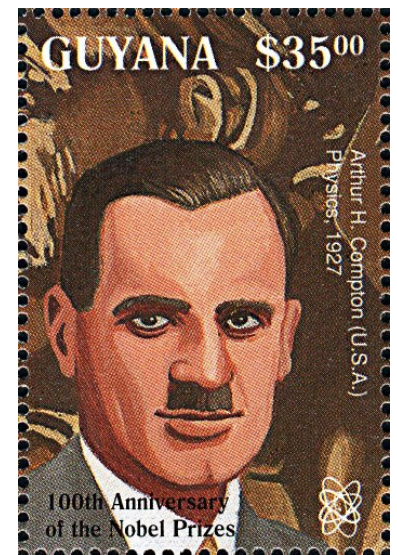
La crisi della meccanica classica

Vedere l'invisibile

Si ottiene:

$$\tan \varphi = \frac{\cot \theta/2}{1 + \lambda_C/\lambda_0}$$

Compton e *Simon* verificarono sperimentalmente la validità di tale relazione. A tale scopo, non potendo osservare direttamente il fotone diffuso fissarono l'attenzione a quegli eventi, anche se più rari, in cui il quanto diffuso produce un secondo elettrone di rinculo: la direzione del fotone è allora data semplicemente dalla congiungente i punti da cui partono le tracce lasciate dai due elettroni di rinculo.



La crisi della meccanica classica

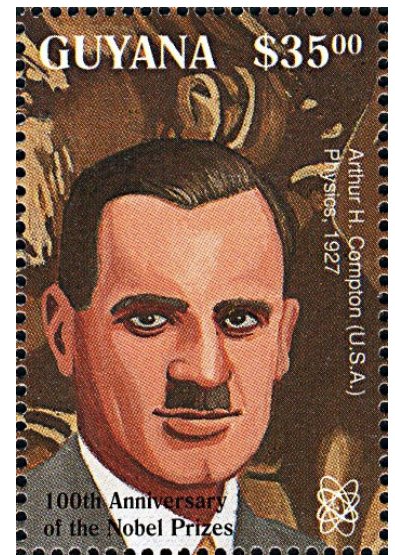
Vedere l'invisibile

Nonostante gli ampi margini di incertezza del metodo, *Compton* e *Simon* riuscirono a stabilire l'accordo tra teoria ed esperienza [A.H. Compton and A.W.Simon, *Phys. Rev.*, **25**, 306-313 (1925)].

Bothe e *Geiger* (1925), dimostrarono sperimentalmente che il fotone diffuso e l'elettrone di rinculo compaiono simultaneamente.

Bless (1927) misurò l'energia dell'elettrone di rinculo trovandola in accordo con la teoria.

La natura corpuscolare della luce era stata, pertanto, provata in maniera inconfutabile.



La crisi della meccanica classica

Che cos'è la luce?

La luce è un'onda?

Sì: perché il *legame tra indice di rifrazione e velocità* nei due mezzi, i fenomeni di *interferenza* e quelli di *diffrazione* sono interpretabili solo nell'ambito del modello ondulatorio

No: perché lo *spettro del corpo nero*, l'*effetto fotoelettrico*, l'*effetto Compton* sono interpretabili solo nell'ambito del modello corpuscolare



La crisi della meccanica classica

Che cos'è la luce?

La luce è un fascio di particelle?

Sì: perché lo *spettro del corpo nero*, l'*effetto fotoelettrico*, l'*effetto Compton* sono interpretabili solo nell'ambito del modello corpuscolare

No: perché il *legame tra indice di rifrazione e velocità* nei due mezzi, i fenomeni di *interferenza* e quelli di *diffrazione* sono interpretabili solo nell'ambito del modello ondulatorio



Nessuno dei due modelli riesce a fornire una descrizione completa!

La crisi della meccanica classica

Riferimenti bibliografici

- U. Amaldi, *L'Amaldi per i licei scientifici.blu*, vol. 3, Zanichelli, 2016
- M. Born, *Fisica atomica*, Boringhieri, 1976
- A. Caforio, A. Ferilli, *Nuova Physica 2000*, voll. 2 e 3, Le Monnier, 2000
- R.M. Eisberg, *Fundamentals of Modern Physics*, John Wiley & Sons, 1961
- M. Fazio, M.C. Montano, *Fisica per i Licei Scientifici*, vol. 3, Arnoldo Mondadori Scuola, 1996
- Wikipedia [<http://it.wikipedia.org/>]