

**Corso di Fisica moderna di base**  
**Modulo 1: Elementi di Struttura della Materia**

**ATTENZIONE: LE SEGUENTI PAGINE SONO INTESE COME UNO SCHEMATICO  
RIASSUNTO DI QUANTO TRATTATO IN AULA, NON PRETENDONO DI ESSERE  
ESAURIENTI O SOSTITUTIVE ALLE LEZIONI STESSE**

## **Lezione 4 Interazione radiazione - materia**

### **4.1 Una parentesi sulla radioattività (argomento che verrà approfondito nei prossimi moduli del corso)**

Alla fine del 1895, Wilhelm Röntgen scopriva i raggi X. Pubblicò i suoi risultati prima della fine dell'anno, e la notizia delle sue scoperte si diffuse rapidamente. Henri Becquerel ne venne a conoscenza pochi mesi più tardi, quando Henri Poincaré descrisse la scoperta ad un meeting dell'Accademia Francese delle Scienze. I raggi X di Röntgen erano stati osservati sulle pareti di vetro fluorescente di un tubo a raggi catodici, e Becquerel voleva sapere se altri oggetti luminescenti potevano produrre radiazione X. Becquerel fece un primo esperimento con l'Uranio nel Febbraio del 1896. Dopo aver esposto il minerale alla luce del sole per renderlo luminescente, lo depositò sopra una lastra fotografica, osservando che questo provocava una immagine annebbiata. La scoperta della radioattività avvenne il 1 marzo 1896. Becquerel aveva preparato l'esperimento il Venerdì precedente, ma il tempo era stato nuvoloso e l'Uranio non aveva potuto diventare luminescente. Egli aveva riposto l'Uranio e le lastre in un cassetto per il fine settimana, ma trovò sulle lastre le stesse immagini annebbiate. I sali di Uranio stavano irraggiando anche senza una "attivazione" dovuta alla luce solare.

Il fenomeno fu denominato 'radioattività' da Pierre e Marie Curie all'inizio del ventesimo secolo. Essi avevano iniziato a studiare tale fenomeno nel 1898, scoprendo che anche il torio, il polonio e il radio mostravano tale effetto. Nel 1903 i Curie divisero il Premio Nobel con Becquerel per i loro studi. Contemporaneamente anche Rutherford stava indagando sulla radioattività. Nel 1898 egli confermò le osservazioni di Becquerel riguardo al fatto che ci fossero almeno due tipologie di radiazione emessa dall'uranio. Rutherford chiamò  $\alpha$  la radiazione più facilmente assorbita, e  $\beta$  quella più penetrante. Successivamente scoprì che queste "radiazioni" erano in realtà costituite da particelle (come si studierà molto meglio in seguito, le  $\alpha$  si rivelarono coincidere con i nuclei di elio, ovvero essere formate da 2 protoni + 2 neutroni legati dalla forza forte nucleare, mentre le radiazioni  $\beta$  coincidevano con gli elettroni).

### **4.2 Effetto fotoelettrico**

Fu osservato per la prima volta nel 1887, studiato da diversi scienziati per quasi 20 anni, prima che Einstein lo interpretasse introducendo il FOTONE (anche se questo termine verrà introdotto molto più avanti).

#### Da Hertz( 1887) a Millikan (1915)

È lo stesso H.Hertz a raccontare la propria, casuale osservazione dell'effetto fotoelettrico, nel corso dell'esperimento con cui stava dimostrando la natura ondulatoria del campo elettromagnetico: "*In modo occasionale racchiusi la scintilla del ricevitore in una scatola scura in modo da osservarla più facilmente, e così osservai che la lunghezza massima della scintilla diveniva più piccola rispetto a prima. Rimuovendo successivamente le varie pareti della scatola, vidi che l'unica parete che causava questo strano effetto era quella che schermava la scintilla del ricevitore dalla scintilla del trasmettitore. Tale parete mostrava questo strano effetto non solo quando era nelle immediate vicinanze della scintilla del ricevitore, ma anche quando essa era posta*

tra il trasmettitore e il ricevitore a grande distanza dallo stesso ricevitore. Un fenomeno così notevole richiedeva una ulteriore indagine".

Allora Hertz cominciò una analisi approfondita. Egli trovò che:

- la scintilla indotta nella spira ricevente era più intensa (come misurata dal micrometro per scintille) quando la luce della scintilla più lunga della bobina ad induzione illuminava la scintilla indotta;
- le scintille delle due bobine si rafforzavano quando la luce di ciascuna scintilla illuminava l'altra;
- questo effetto poteva essere bloccato o ridotto interponendo tra le due scintille materiali tipo vetro o legno, mentre era indisturbato se si interponeva quarzo o gesso.

Hertz moltiplicò gli studi, deducendone che *"La luce ultravioletta. facilita l'aumento della lunghezza della scintilla in un apparato ad induzione...Mi sono limitato, attualmente, a comunicare i risultati ottenuti, senza tentare alcuna teoria rispetto alle cause che hanno determinato i fenomeni osservati"*.

Successivamente, Hallwachs, nel 1888/89 osservò come, in condizioni normali, un elettroscopio carico negativamente si scarica lentamente, mentre, se viene illuminato con luce ultravioletta, si scarica molto più rapidamente. L'interpretazione che ne diede è che la luce UV "stacca dei granelli di polvere carica" dalle lamine dell'elettroscopio. Seguirono, negli anni 1888-1892 i contributi di Righi, Stoletov, Elster e Geitel.

Nel 1899 J.J. Thomson misurò il rapporto  $q/m$  tra la carica  $q$  e la massa  $m$  delle particelle emesse da un metallo irradiato con luce ultravioletta. Misurando la deflessione degli ioni nel campo magnetico noto, egli trovò un valore di  $q/m$  in accordo col valore ricavato per gli elettroni.

Pertanto l'esperimento mostrò che l'effetto fotoelettrico consiste nell'**emissione di elettroni da un metallo quando su questo incide luce di opportuna frequenza**.

Nel 1902 Lenard effettuò altre misure, per osservare le caratteristiche dell'eff. fotoelettrico: il numero degli elettroni emessi, e quindi la corrente che raggiungeva l'anodo, era proporzionale all'intensità della luce, mentre l'energia cinetica degli elettroni emessi dipendeva dalla frequenza della luce incidente, ma non dalla intensità luminosa.

Fu Einstein a dare una svolta fondamentale allo studio di questo effetto, con il famoso articolo del 1905. Qui avanzò un principio "euristico", ovvero che ci conduce verso la verità: *A me sembra in effetti che le osservazioni sulla «radiazione di corpo nero», la fotoluminescenza, la generazione dei raggi catodici tramite luce ultravioletta e altre classi di fenomeni concernenti la generazione o la trasformazione della luce appaiano più comprensibili nell'ipotesi di una distribuzione spaziale discontinua dell'energia luminosa. Secondo l'ipotesi che sarà qui considerata, quando un raggio luminoso uscente da un punto si propaga, l'energia non si distribuisce in modo continuo in uno spazio via via più grande; essa consiste invece in un numero finito di quanti di energia, localizzati in punti dello spazio, i quali si muovono senza dividersi e possono essere assorbiti e generati solo nella loro interezza. Nel seguito esporrò il ragionamento e citerò i fatti che mi hanno condotto su questa strada, nella speranza che il punto di vista qui illustrato possa dimostrarsi utile alle ricerche di qualche studioso.* Einstein, A. "un punto di vista euristico...", 1905, trad it. in Einstein, Opere Scelte, Bollati Boringhieri, 2004.

Oltre alle perplessità sull'interpretazione di alcuni fenomeni, Einstein ha a disposizione i seguenti risultati sperimentali sull'effetto fotoelettrico (anche se all'epoca molto approssimativi, non come nei grafici qui presentati):

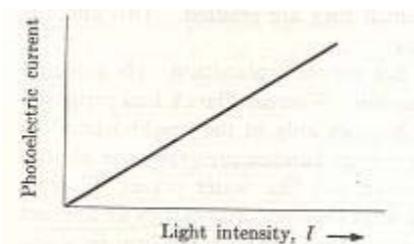
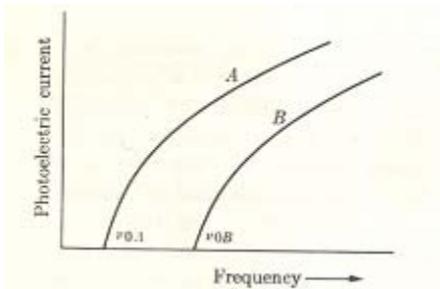
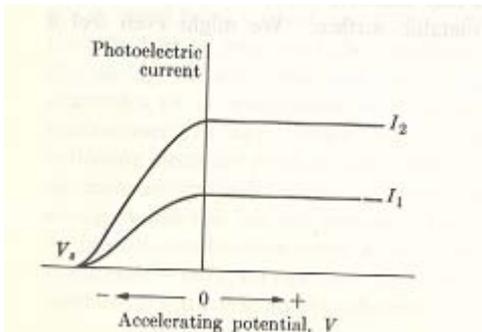


Figura 1: La corrente aumenta con l'intensità della luce



**Figura 2:** Al di sotto di una certa frequenza (frequenza di soglia, tipica del materiale), pur aumentando l'intensità, non osservo corrente



**Figura 3:** L'energia cinetica dei fotoelettroni non dipende dall'intensità, ma solo dalla frequenza

Einstein propose che la luce sia formata da quanti che vengono ceduti agli elettroni, e che non possono "accumulare" la propria azione. Inoltre ipotizzò come una difficoltà nell'estrarre ciascun elettrone, arrivando a scrivere:

$$E_{MAX} = h\nu - w_0 \quad \text{Equazione 1}$$

Dove  $w_0$  prenderà poi il nome di "lavoro di estrazione", o "funzione lavoro", relativo ad una "frequenza di soglia"  $\nu_0$  che si ricava dall'immaginare il caso limite, quando l'energia del fotone è proprio appena sufficiente per strappare l'elettrone, ovvero:  $w_0 = h\nu_0$

$w_0$  è caratteristico del materiale irraggiato e corrisponde all'energia minima richiesta per "liberare" un fotoelettrone.

Esperimenti sempre più accurati vengono portati avanti da Millikan, nell'intento di dimostrare che l'interpretazione quantistica introdotta da Einstein NON è corretta. In tutta sincerità, Millikan dovrà infine ricredersi, e i suoi lavori, che proseguono fino al 1916, rappresentano la miglior dimostrazione della validità delle tesi di Einstein. In particolare Millikan, con una accuratezza del tutto nuova, mostra le caratteristiche principali (e non spiegabili dalla teoria classica) dell'effetto fotoelettrico:

- 1- al crescere dell'intensità della luce incidente, aumenta il numero degli elettroni, ma non la loro energia cinetica (lo dimostrò con l'utilizzo di un potenziale ritardante)
- 2- esiste una frequenza di soglia tipica di ciascun materiale, per cui una luce di frequenza inferiore, di qualsiasi intensità, non è in grado di estrarre elettroni

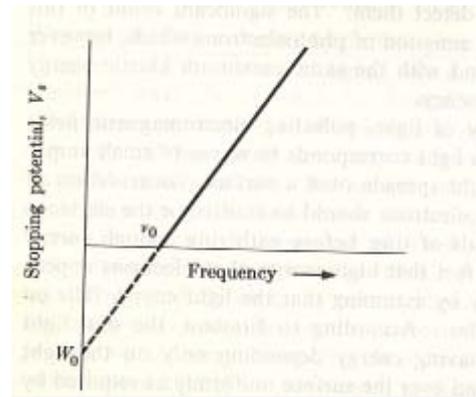
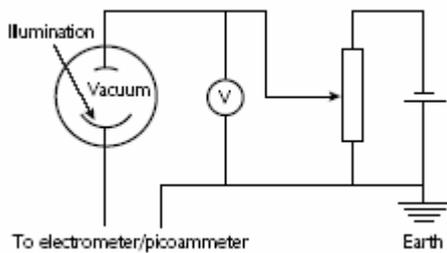
Dai dati, Millikan ottiene una retta che descrive l'energia cinetica massima degli elettroni emessi in funzione della frequenza, secondo la eq.ne 1; in primo luogo applica un potenziale ritardante, che gli permette di calcolare l'energia cinetica degli elettroni emessi, osservando il valore di  $V$  per cui non si osserva più corrente:

$$E_{MAX} = eV = h\nu - w_0$$

Quindi scrive una retta di  $V$  in funzione di  $\nu$ :

$$V = (h/e)\nu - w_0/e \quad \text{Equazione 2}$$

Nota  $e$ , la carica dell'elettrone, il coefficiente angolare della retta, ovvero la sua pendenza, mi permette di calcolare  $h$ .



**Figura 4: Apparato con potenziale ritardante e retta simile a quella ottenuta da Millikan. La pendenza della retta mi permette di misurare  $h$ , la costante di Planck**

*Commento sulla diversa accoglienza dei lavori "quantistici" di Planck e Einstein, dal Pais*

Ho l'impressione che la resistenza all'idea del quanto di luce fosse così forte che la cautela di Einstein fu scambiata per esitazione da quanti speravano che così fosse. Tuttavia, a giudicare dai suoi scritti e dalle lettere, non vi è alcuna prova che in un qualsiasi momento egli abbia ritrattato qualcuna delle affermazioni fatte nel 1905.

La memoria del marzo 1905 di Einstein fu il secondo contributo di carattere rivoluzionario alla vecchia teoria dei quanti: il primo, naturalmente, era stato quello di Planck del dicembre 1900. Entrambi gli articoli contenevano proposte che si facevano beffe dei concetti classici. Eppure la resistenza alle idee di Planck, anche se certo non mancò, fu assai meno decisa e violenta che nel caso di Einstein. Perché?

Quando Planck introdusse il quanto per descrivere le proprietà spettrali della radiazione pura, lo fece tramite una procedura di quantizzazione applicata alla materia, ai suoi oscillatori materiali. Non si rese conto del fatto che la sua proposta implicava di necessità una revisione dello stesso campo di radiazione classico. Il suo ragionamento pretendeva di comportare solo una modifica dell'interazione tra materia e radiazione. Ciò non appariva troppo strano, dato che il problema dell'interazione era comunque pieno di punti oscuri. Viceversa, quando Einstein propose il quanto di luce, egli aveva osato mettere le mani sulle equazioni di Maxwell per i campi liberi, che si riteneva (non senza ragione) di comprendere assai meglio. Ecco perché appariva meno ripugnante accettare le stravaganze di Planck che non quelle di Einstein.

La differente valutazione dei due problemi teorici, di quello sollevato da Planck e di quello sollevato da Einstein, è del tutto evidente negli scritti dei maggiori fisici dell'epoca. Planck stesso aveva profonde riserve sui quanti di luce. Nel 1907 scrisse ad Einstein: "Non cerco il significato del quanto di azione [quanto di luce] nel vuoto, ma piuttosto nei punti in cui si verificano assorbimento ed emissione, e presumo che ciò che accade nel vuoto sia descritto rigorosamente dalle equazioni di Maxwell".

Le prime tre memorie realmente rivoluzionarie, nella storia della vecchia teoria dei quanti, furono quella di Planck, quella di Einstein e quella di Bohr. Tutte e tre avanzavano proposte che facevano a pugni con i concetti classici. Eppure la resistenza alle idee di Planck e di Bohr, anche se certo non mancò, fu assai meno decisa e violenta che nel caso di Einstein. Perché? La risposta è che ciò fu dovuto all'influenza degli esperimenti.

Per il momento, passo a discutere l'influenza degli sviluppi sperimentali sull'accettazione delle idee di Planck, Bohr ed Einstein.

Anzitutto Planck: la vicinanza agli esperimenti di prim'ordine sulla radiazione del corpo nero che si stavano conducendo alla Physikalische Technische Reichsanstalt di Berlino fu senza dubbio un fattore cruciale nella sua scoperta del 1900 (anche se sarebbe del tutto erroneo dire che questo fu l'unico fattore decisivo).

Da parte sua, Einstein aveva, al confronto, ben poche prove sperimentali da esibire. E vero che nell'articolo del 1905 aveva indicato un certo numero di conseguenze empiriche della sua ipotesi, ma non aveva curve da accordare con i dati, né valori numerici esatti da esibire. Einstein aveva rilevato che, nell'effetto fotoelettrico, l'energia  $E$  dell'elettrone è costante per un dato valore della frequenza della luce. Ciò spiegava i risultati di Lenard, le cui misure tuttavia non erano tanto precise da impedire che uomini come J.J. Thomson e Sommerfeld proponessero teorie alternative dell'effetto fotoelettrico, nelle quali la legge di Lenard non valeva in modo rigoroso. L'equazione di Einstein dell'effetto fotoelettrico,  $E = h\nu - W$  prevede una dipendenza lineare di  $E$  dalla frequenza. All'epoca in cui Einstein propose il suo principio euristico, nessuno sapeva in che modo  $E$  dipendesse dalla frequenza, al di là del fatto che l'una cresce con l'altra. A differenza di Bohr e di Planck, Einstein dovette attendere un decennio prima di vedere confermata la propria previsione, di una dipendenza lineare. Una conseguenza immediata e salutare di queste scoperte sperimentali fu che le teorie alternative dell'effetto fotoelettrico scomparvero dalla scena.

Tuttavia l'isolamento di Einstein non cessò neppure allora. Ho già ricordato che Millikan apprezzò la sua formula per l'effetto fotoelettrico, ma dichiarò che, comunque, la teoria del quanto di luce sembrava "insostenibile". La cosa

continuò fino all'inizio degli anni venti, come dimostra nel modo più chiaro la motivazione del premio Nobel di Einstein del 1922: "Ad Albert Einstein per i suoi contributi alla fisica teorica e specialmente per la scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico". Questo non è solo un giudizio storico riduttivo, ma anche un'immagine fedele dell'opinione generale nella comunità dei fisici.

Riassumendo: l'eccezionale resistenza ai quanti di luce ebbe le proprie radici nei paradossi del dualismo onda-particella. La resistenza fu accresciuta dal fatto che l'idea del quanto di luce sembrava sovvertire proprio la parte della teoria elettromagnetica che si riteneva meglio compresa: la teoria del campo libero. Per di più il sostegno degli esperimenti tardava a venire, e anche dopo che le previsioni sull'effetto fotoelettrico furono verificate i quanti di luce continuarono a essere considerati inaccettabili dai più. La sottolineatura, da parte di Einstein stesso, della natura provvisoria dell'ipotesi del quanto di luce tendeva a rafforzare le riserve degli altri fisici.

### 4.3 Effetto Compton

L'effetto Compton descrive l'urto elastico di un fotone su un elettrone. Il fenomeno osservato per la prima volta da Arthur Compton nel 1923, divenne ben presto uno dei capisaldi per la descrizione quantistica della luce.

L'esperimento di Compton consisteva nell'inviare un fascio di luce su un oggetto ed osservarne la diffusione. Il fisico statunitense osservò che la luce passata all'interno del materiale, poteva subire una perdita di energia. In pratica, ad ogni angolo  $\alpha$  a cui si osservava la lunghezza d'onda della radiazione diffusa, si osservavano due picchi, corrispondenti a due lunghezze d'onda differenti: una eguale a quella in ingresso, una maggiore, il cui valore aumenta al crescere dell'angolo considerato.

La lunghezza d'onda invariata poteva essere spiegata classicamente (si tratta del cosiddetto "scattering alla Rayleigh<sup>1</sup>"), ma non si spiegava il secondo picco.

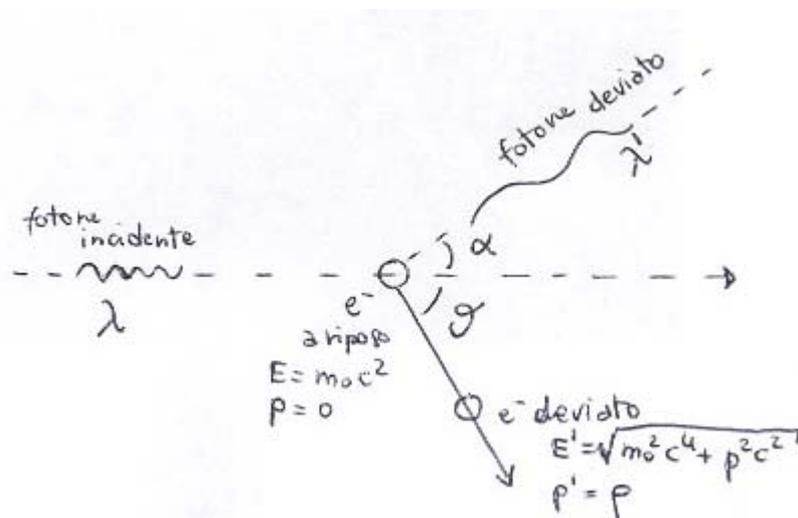


Fig.1: (a) Lo scattering di un fotone da parte di un elettrone è chiamato *effetto Compton*. L'energia ed il momento si conservano e come risultato il fotone scatterato ha una minore energia (maggiore lunghezza d'onda) che il fotone incidente. (b) Diagramma vettoriale dei momenti. **L'angolo in figura chiamato  $\Phi$ , nei nostri appunti è stato battezzato  $\alpha$ .**

Compton ipotizza che la radiazione x incidente si comporti come una successione di fotoni, a ciascuno dei quali è assegnata una energia ed un momento. Il fotone arriva lungo l'asse x, e dopo aver colpito l'elettrone si allontana con un angolo che decidiamo di chiamare  $\alpha$ , mentre l'elettrone rincula, rispetto all'asse x, con un angolo  $\theta$ . Il fotone ha ceduto all'elettrone parte della propria

<sup>1</sup> L'effetto Rayleigh, chiamato anche **scattering elastico** o coerente, avviene quando gli elettroni dell'atomo ritornano al loro stato iniziale dopo l'interazione con i fotoni incidenti. In questo caso i fotoni saranno diffusi in tutte le direzioni con un'energia pari a quella incidente

energia, mettendo quest'ultimo in movimento. Dalle leggi di conservazione del momento e dell'energia, riuscirò a trovare una legge che mi indica la variazione di lunghezza d'onda in funzione dell'angolo a cui "raccolgo" il fotone scaterato.

Inizio considerando la conservazione del momento.

Per il fotone, all'inizio ho un momento  $h/\lambda$ , alla fine un momento  $h/\lambda'$ ; per l'elettrone, inizialmente fermo, si passa da un momento iniziale nullo, a uno finale pari a  $p$ .

Lungo la direzione iniziale del fotone, e lungo la direzione ortogonale a questa, valgono le due equazioni:

$$\begin{cases} \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \alpha + p \cos \vartheta \\ 0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \alpha + p \sin \vartheta \end{cases} \quad \text{Equazione 3}$$

Isolo  $p$ :

$$\begin{cases} p \cos \vartheta = \frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \alpha \\ p \sin \vartheta = -\frac{h}{\lambda'} \sin \alpha \end{cases}$$

Elevo entrambi al quadrato e le sommo:

$$p^2 = \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2 + \left(\frac{h}{\lambda'}\right)^2 - \frac{2h}{\lambda\lambda'} \cos \alpha$$

Per la conservazione dell'energia, osservando che per il fotone si passa da una energia  $hc/\lambda$ , alla energia finale  $hc/\lambda'$ , mentre per l'elettrone dall'energia a riposo  $m_e c^2$  all'energia  $E = (m_0^2 c^4 + p^2 c^2)^{1/2}$ , posso scrivere:

$$\frac{hc}{\lambda} + m_e c^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \sqrt{m_e^2 c^4 + p^2 c^2} \quad \text{Equazione 4}$$

Se ora semplifico tutto per  $c$ , isolo la radice, elevo al quadrato e sostituisco il valore di  $p^2$  trovato dalla eq. 15, con pochi passaggi ottengo la legge per l'effetto Compton:

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \alpha) \quad \text{Equazione 5}$$

La quantità:

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$$

è conosciuta come *lunghezza d'onda Compton* di una particella scaterata. Tale valore risulta indipendente dalla frequenza del fotone incidente e per un elettrone vale  $\lambda_C = 2.426 \cdot 10^{-12}$  m.

Aumentando l'angolo  $\alpha$  aumenterà la grandezza  $\Delta\lambda$  e possiamo facilmente capire che la più grande variazione possibile si ha quando  $\alpha = 180^\circ$ . In questo caso  $\Delta\lambda = 2\lambda_C$

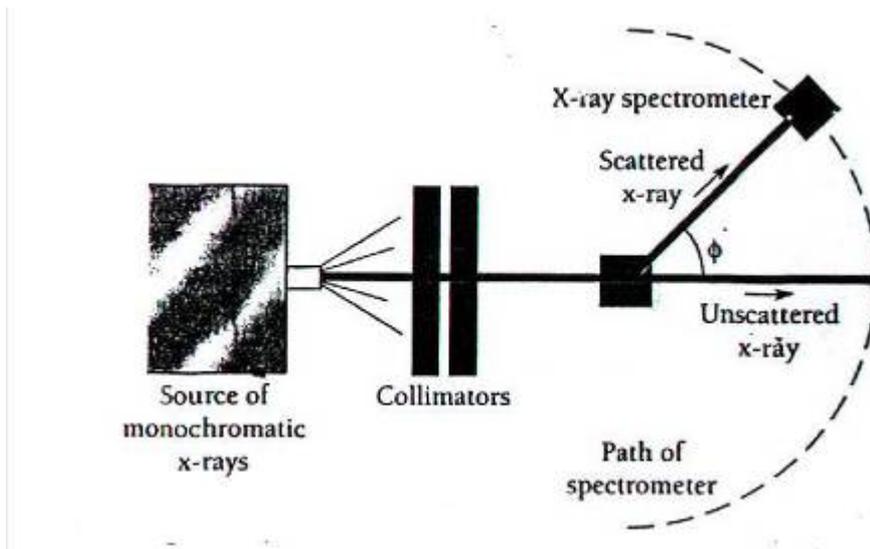


Fig. 2: Apparato sperimentale usato per la dimostrazione dell'effetto Compton

Nota: Il nome fotone

Il termine *fotone*, per il quanto di luce introdotto da Einstein, fu proposto dal chimico americano Gilbert Lewis nel 1926, anche se egli scelse questo nome per una entità di sua invenzione: **"Mi prendo perciò la libertà di proporre per questo nuovo atomo... il nome di fotone.. una nuova specie di atomo... non creabile e indistruttibile, che agisce come portatore dell'energia radiante"**.

Il fotone di Lewis, quindi, era diverso da quello definito modernamente. Tuttavia il nome piacque, e fu adottato nel 1927 al V Congresso Solvay.

#### 4.4 Bremsstrahlung = radiazione da frenamento

Il termine Bremsstrahlung deriva dal tedesco, ed indica la radiazione elettromagnetica emessa quando gli elettroni vengono decelerati, ovvero "frenati" da un bersaglio di metallo. Se l'energia degli elettroni che arrivano sul bersaglio è sufficiente, lo spettro dell'energia emessa, **caratterizzato dall'essere uno spettro continuo**, si trova nella regione dei raggi x. La frequenza (ovvero l'energia) corrispondente alla intensità massima dello spettro di emissione si sposta al crescere dell'energia cinetica degli elettroni in arrivo.

Vale infatti che, chiamata  $E_K$  l'energia cinetica degli elettroni incidenti:

$$E_K = h\nu_{MAX} = hc/\lambda_{min}$$

**Equazione 6**

E quindi  $\nu_{MAX}$  e  $\lambda_{min}$  sono rispettivamente la massima frequenza o la minima lunghezza d'onda che può possedere il fotone riemesso dal bersaglio in cui è stato frenato l'elettrone. Questi valori corrispondono al fatto che l'elettrone abbia perso TUTTA la propria energia cinetica. Nel caso sia stato solo rallentato, il fotone emesso avrà energie minori, dando origine appunto a tutta una serie CONTINUA di valori, tipica di questo fenomeno.

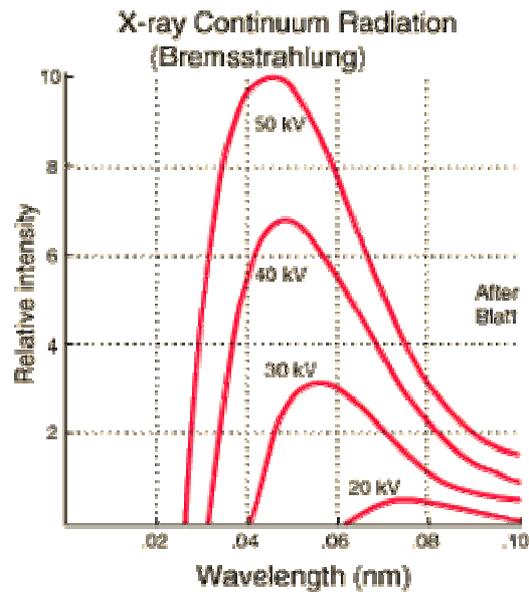
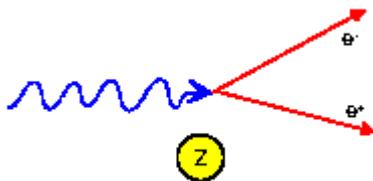


Figura 5: Ulrey ottenne queste curve nel 1918, bombardando bersagli di tungsteno con elettroni di 4 differenti energie.

#### 4.5 Produzione di coppie



La creazione di coppie implica la trasformazione del fotone incidente in una coppia elettrone-positrone<sup>2</sup>. Il processo può avvenire solo quando l'energia del fotone è pari almeno alla somma delle masse delle particelle create, cioè per  $E_\gamma > 2m_e c^2$  (1.022 Mev nel caso della creazione della coppia elettrone-positrone) e in presenza di un terzo corpo, in genere un nucleo, affinché ci sia conservazione della quantità di moto.

Per la conservazione dell'energia si ha:

$$E_K(e^-) + E_K(e^+) = h\nu - 2m_0c^2$$

dove  $E_K$  è l'energia cinetica,  $h\nu$  è l'energia del fotone incidente e la differenza a secondo membro fornisce l'energia cinetica che viene ripartita fra le particelle. La sezione d'urto per creazione di coppie cresce rapidamente all'aumentare dell'energia dei fotoni incidenti, divenendo ad alte energie l'unico processo efficace per l'assorbimento dei fotoni.

Oltre all'energia ed alla quantità di moto, devono conservarsi anche altre grandezze, come ad esempio la carica totale. Per questo vengono create coppie di particelle, composte da una particella e dalla antiparticella corrispondente.

<sup>2</sup> Un positrone (o antielettrone) è una particella che ha massa eguale a quella dell'elettrone, ma carica opposta in segno.

## 4.6 Sezione d'urto per assorbimento e scattering di fotoni.

Un fascio di fotoni può interagire in modi diversi con la materia, dando origine a diversi fenomeni: effetto fotoelettrico, produzione di coppie, scattering Compton e scattering Rayleigh. Nei primi due casi il fotone viene completamente assorbito, negli altri due viene deviato.

Ciascuno di questi fenomeni ha una propria probabilità di avvenire, che dipende da parametri quali l'energia del fotone incidente, o la struttura del materiale su cui è diretto il fascio.

Ad esempio, definiamo la probabilità che un fotone interagisca con effetto fotoelettrico con un atomo del mezzo che sta attraversando come  $\sigma_{PE}$ , che è detta "sezione d'urto fotoelettrica". Essa è definita in modo che il numero di fotoni assorbiti  $N_{PE}$  da un fascio incidente di  $I$  fotoni si scrive:

$$N_{PE} = \sigma_{PE} I n$$

Dove  $n$  è il numero di atomi per unità di area del materiale che il fotone attraversa. Il bersaglio deve essere abbastanza sottile da far sì che la probabilità di essere assorbito è comunque minore di 1 (cioè, non si è "assolutamente certi" che il fotone venga assorbito).

Il numero di fotoni assorbiti da effetto fotoelettrico cresce ovviamente con il crescere del numero dei fotoni incidenti e del numero di atomi con cui ciascun fotone può interagire; quindi  $N_{PE}$  è proporzionale a  $I$  ed  $n$ . Il fattore che definisce questa legge di proporzionalità è proprio la sezione d'urto di quel particolare fenomeno.  $I$  e  $N_{PE}$  sono adimensionali, mentre  $n$  si misura in  $m^{-2}$ ; pertanto la sezione d'urto ha le dimensioni di un'area (per una interpretazione più concreta, ricordare l'idea di sezione d'urto per collisione in un gas).

In maniera analoga a quanto visto per l'effetto fotoelettrico, è possibile parlare di sezioni d'urto di scattering (Rayleigh + Compton)  $\sigma_S$ , e di sezione d'urto per la produzione di coppie,  $\sigma_{PR}$ .

Per sezione d'urto totale si intende la somma delle singole sezioni d'urto. La sezione d'urto totale  $\sigma_T$  (o semplicemente  $\sigma$ ) è la probabilità che il fotone interagisca con la materia, a prescindere dalla modalità.

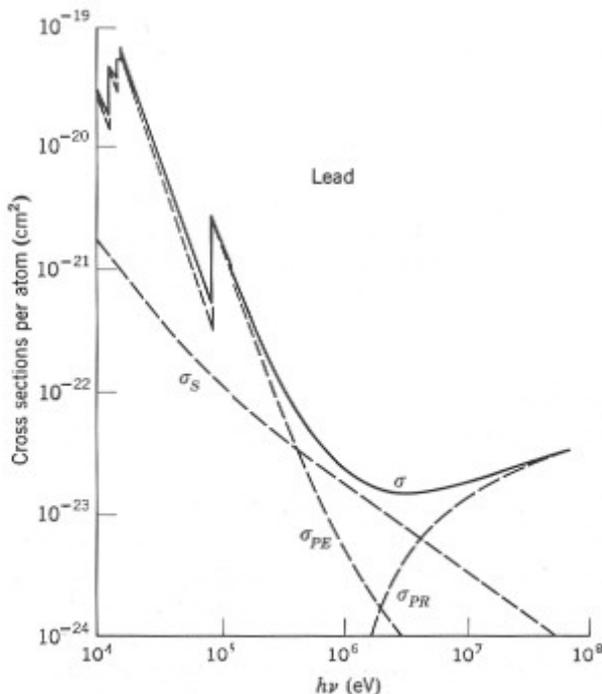
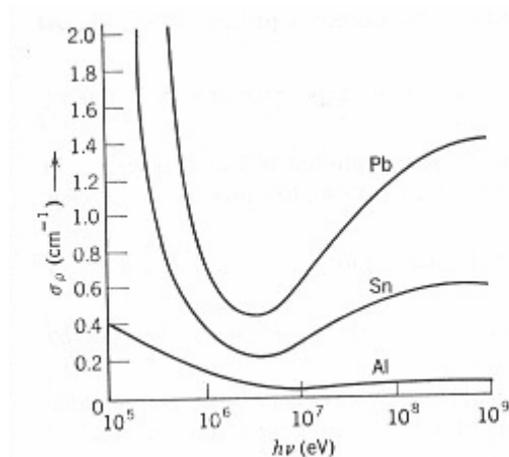


Figure 2-17 The scattering, photoelectric, pair production, and total cross sections for a lead atom.

Figura 6: Un grafico per le sezioni d'urto del piombo. Si può osservare come, per uno stesso materiale, a diverse frequenze prevalga una particolare modalità di interazione.



**Figura 7:** Anche al variare del materiale, varia la percentuale dei fotoni che interagiscono nelle varie modalità.

N.B. Si ricordi che la produzione di coppie avviene solo per **fotoni di energia superiore a 1.022 MeV**, corrispondente alla massa a riposo della coppia elettrone e positrone. La sezione d'urto per creazione di coppie cresce rapidamente all'aumentare dell'energia dei fotoni incidenti, divenendo ad alte energie l'unico processo efficace per l'assorbimento dei fotoni.

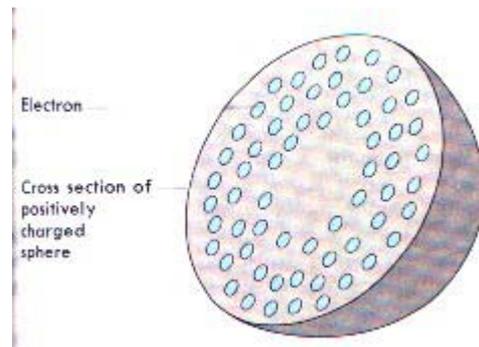
## ***Anteprima lezione 5: Primi modelli atomici***

### Cenni storici

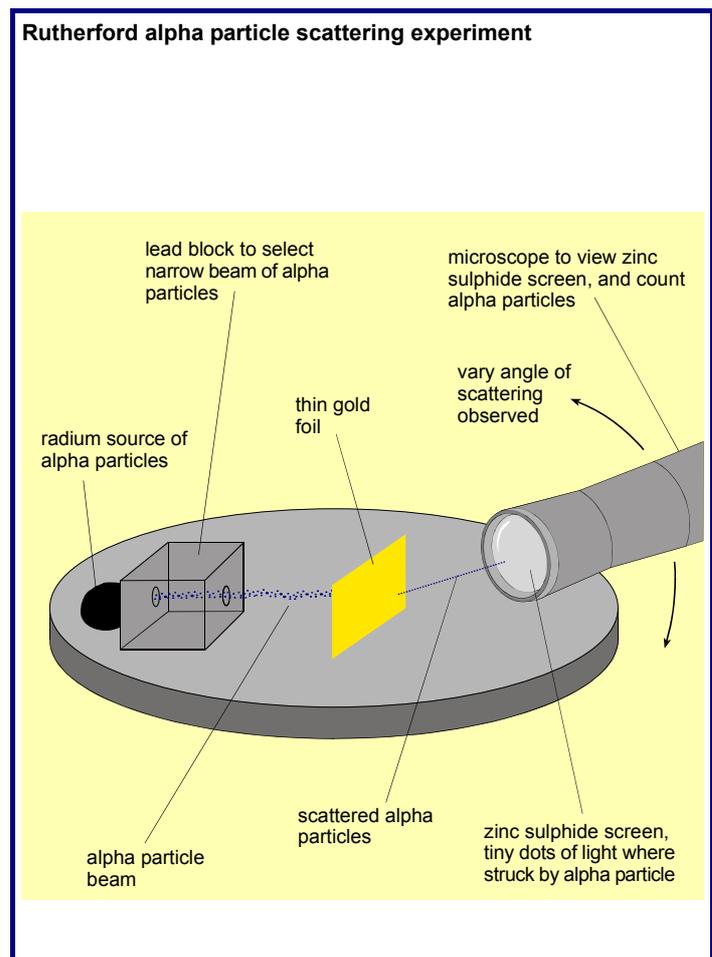
- dal IV secolo a.C. Leucippo e Democrito (filosofi greci) e Lucrezio (filosofo romano), i cosiddetti “atomisti” : materia costituita da particelle minuscole e indivisibili (atomòs = indivisibile). Si trattava di considerazioni derivate da semplici intuizioni filosofiche e non da una corretta analisi sperimentale dei fenomeni. L'idea atomistica fu invece avversata da Aristotele, che influenzò moltissimo il pensiero dei secoli successivi.
- Avvalendosi delle teorie chimiche del tempo Dalton nel 1803 formulò una propria teoria atomica :
  - la materia è formata da particelle elementari chiamate atomi;
  - gli atomi di uno stesso elemento sono tutti uguali tra loro;
  - gli atomi non sono ulteriormente scomponibili;
  - gli atomi non possono essere né creati né distrutti.

### Thomson (1904/06)

Il modello proposto da J.J. Thomson era innovativo, perché superava la visione dell'atomo come un ente indivisibile e introduceva gli elettroni, le particelle da lui stesso scoperte pochi anni prima. Immaginava l'atomo come una sfera positiva, in cui erano distribuiti gli elettroni, in numero tale da rendere neutro l'atomo nel suo complesso. Viene chiamato modello a “panettone”, e vi si immaginano gli elettroni come le uvette e i canditi.



## Rutherford

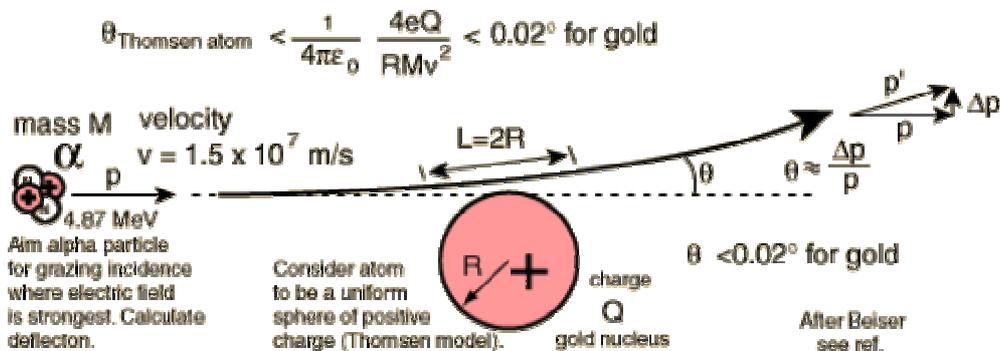


**Figura 8: L'apparato di Rutherford per lo studio dello scattering alpha**

Allievo di Thomson, grande scienziato sperimentale, nel primo decennio del Novecento era impegnato a studiare la radioattività; decise di incaricare due suoi studenti, Geiger e Marsden, di osservare la deflessione che le particelle  $\alpha$  mostravano attraversando una lamina d'oro. I risultati lo lasciarono allibito: *It was quite the most incredible event that ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you! Era come sparare una palla di cannone su un foglio di carta velina e vederla rimbalzare.* Rutherford aveva già vinto un Nobel per la chimica, grazie alle proprie ricerche sulla radioattività, ma non ne era soddisfatto. Al discorso per la premiazione aveva sottolineato: “di tutte le trasformazioni che ho studiato, la più repentina è stata la mia, da fisico a chimico!” A breve sarà ricompensato con un nuovo Nobel per la fisica.

Nel laboratorio di Ernest Rutherford, Hans Geiger and Ernest Marsden prepararono un esperimento per studiare lo scattering delle particelle  $\alpha$  attraverso una lamina d'oro. Nel 1909 osservarono che le particelle  $\alpha$  talvolta potevano deviare ad angoli maggiori di  $90^\circ$ , il che sembrava fisicamente impossibile, assumendo per valido il modello atomico di Thomson. Ciò portò Rutherford a dedurre che la carica positiva nell'atomo era concentrata in un piccolo nucleo compatto. Negli anni seguenti (1911-1913) il team bombardò le lamine con  $\alpha$  ad alte energie, registrando il numero di deflessioni in funzione dell'angolo. Secondo il modello di Thomson si sarebbero dovute osservare deviazioni nell'ordine della frazione di grado, ma i risultati riportavano scattering addirittura fino a  $180^\circ$ ; veniva così avvalorata l'ipotesi di un nucleo concentrato. Negli esperimenti Rutherford utilizzò come sorgente per gli  $\alpha$  un campione di radio, che emetteva circa 4 miliardi di particelle al secondo.

Rutherford aveva calcolato che una particella  $\alpha$ , attraversando una lamina d'oro costituita da atomi alla Thomson, avrebbe deviato la propria traiettoria al massimo di  $0,02^\circ$ , con una probabilità che crollava rapidamente per deviazioni maggiori, e si stimava, per angoli maggiori di  $90^\circ$ , dell'ordine di circa  $10^{-3500}$ .



In realtà gli esperimenti mostravano che circa 1 particella ogni  $10^4$  devitava ad angoli maggiori di  $90^\circ$  (la probabilità era quindi  $10^{-4}$ ), risultato che non poteva spiegarsi neppure immaginando che le particelle fossero soggette a una somma di piccole deviazioni, a cui sarebbero state soggette mano a mano che attraversavano la lamina d'oro. La forza che faceva deviare le  $\alpha$  era la forza coulombiana, e dipendeva dal raggio della carica positiva. Thomson immaginava che l'atomo fosse una sfera di raggio dell'ordine di  $10^{-10}$  m. Rifacendo i calcoli come se la carica positiva fosse tutta concentrata in un "nucleo" di raggio dell'ordine dei  $10^{-14}$  m, si ottenevano i valori corretti.

Dall'ipotesi di Rutherford, di una interazione di tipo coulombiano che produceva una traiettoria iperbolica, si deduceva un numero di  $\alpha$  deflesse ad un certo angolo  $\theta$ :

$$N(\theta) \div Z^2 (\sin^4 \theta / 2)^{-1}, \quad \text{Equazione 7}$$

secondo una formula che ben si accordava con i dati... "fino ad un certo limite".

( $Z$  è il numero atomico del bersaglio).

Rutherford vide che aumentando l'energia cinetica delle  $\alpha$ , e studiando deviazioni ad angoli prossimi a  $180^\circ$ , i dati sembravano di nuovo discordare. Questo perché, in quel caso, egli osservava urti in cui le  $\alpha$  "si avvicinavano troppo al nucleo", ovvero si osservavano urti in cui alle forze coulombiane si aggiungevano le forze nucleari. Da queste osservazioni, sui casi in cui sembrava non più valere il modello di Rutherford per lo scattering delle  $\alpha$ , si poté ulteriormente stimare la dimensione del nucleo atomico, dell'ordine come si è detto dei  $10^{-14}/10^{-15}$  m.

NOTA: in fisica nucleare spesso si utilizza come unità di misura il Fermi, equivalente a  $10^{-15}$  m.

Grazie ad esperimenti di scattering, l'equazione 7 fu in seguito utilizzata per calcolare  $Z$  per atomi in cui tale valore non era ancora noto.

## **Bibliografia lezione 4**

- Eisberg-Resnick, Quantum Physics, Wiley, cap. 2 (tranne passaggi algebrici effetto Compton)
- Il brano riportato nella dispensa è tratto da : Pais, A. “Sottile è il Signore”, Bollati Boringhieri.

### Materiali

NB come per le lezioni precedenti, i materiali sono solo consigliati, per un approfondimento personale o la preparazione di future unità didattiche. Per la preparazione del presente esame non sono richiesti contenuti disciplinari maggiori di quanto spiegato nelle dispense e nelle lezioni.

Un articolo **molto bello**, lungo ma utile anche per altre unità di studio, è quello del Pais:

[http://prola.aps.org/pdf/RMP/v51/i4/p863\\_1](http://prola.aps.org/pdf/RMP/v51/i4/p863_1)

nota: per gli articoli che richiedono autorizzazione o abbonamenti, è possibile utilizzare i computer della biblioteca di Fisica.

Applet sull'effetto fotoelettrico osservato da hertz:

[http://oldserver.ba.infn.it/~garuccio/didattica/fotoelettrico/storia/hertz\\_applet.htm](http://oldserver.ba.infn.it/~garuccio/didattica/fotoelettrico/storia/hertz_applet.htm)

applet di hallwachs

[http://oldserver.ba.infn.it/~garuccio/didattica/fotoelettrico/storia/hallwachs\\_applet.htm](http://oldserver.ba.infn.it/~garuccio/didattica/fotoelettrico/storia/hallwachs_applet.htm)

applet effetto fotoelettrico

[http://www.lucevirtuale.net/percorsi/b2/effetto\\_fotoelettrico.html](http://www.lucevirtuale.net/percorsi/b2/effetto_fotoelettrico.html)

per “disegnare” la retta fotoelettrica di Millikan, consiglio:

[http://dipastro.pd.astro.it/progettoeducativo/2006-07/UnitaDidattiche/UniDid\\_2.pdf](http://dipastro.pd.astro.it/progettoeducativo/2006-07/UnitaDidattiche/UniDid_2.pdf)

da pag. 14 a pag. 17 (ma anche prima viene introdotto l'effetto fotoelettrico).

Per la storia dei modelli atomici:

estratto articolo di Thomson sul proprio modello di atomo:

<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/webdocs/Chem-History/Thomson-Structure-Atom.html>

applet rutherford:

[http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/nucleus/nucleus\\_exp.htm](http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/nucleus/nucleus_exp.htm)