

Dalla Scoperta dei raggi X all'effetto Compton

- R. A. Foglietta, giugno 2000 -

Non c'è probabilmente in tutte le scienze materia che mostri l'importanza per l'intera umanità della ricerca scientifica quale furono i raggi X.

Tre mesi dopo la fortunata scoperta di Roentgen i raggi X erano già utilizzati in un ospedale di Vienna durante un intervento chirurgico.

—pag. 515

1895 – Roentgen



"Se la mano é posta fra il tubo di scarica e lo schermo fosforescente compare una leggera ombra della mano e le ombre scura delle ossa."

L'opacità di una sostanza non dipende solo dalla sua densità ma anche da altre proprietà perché il rapporto dello spessore di due fogli di sostanze diverse con il medesimo potere assorbente é diverso dal rapporto delle loro densità.

Riguardo alle proprietà dei raggi X scrisse nel suo primo articolo:

1. Tutte le sostanze sono più o meno trasparenti ai raggi X
2. Le lastre fotografiche e le pellicole dimostrano di essere suscettibili ai raggi X e rappresentano un valido strumento di indagine.
3. I raggi X non posso essere rifratti o riflessi quindi non posso essere concentrati da una lente.
4. I raggi X diversamente dai raggi catodici non sono deflessi da un magnete e viaggiano in linea retta.
5. I raggi X scaricano i corpi sia quelli carichi positivamente che negativamente.
6. I raggi X sono prodotti quando i raggi catodici impattano contro un qualsiasi corpo solido.

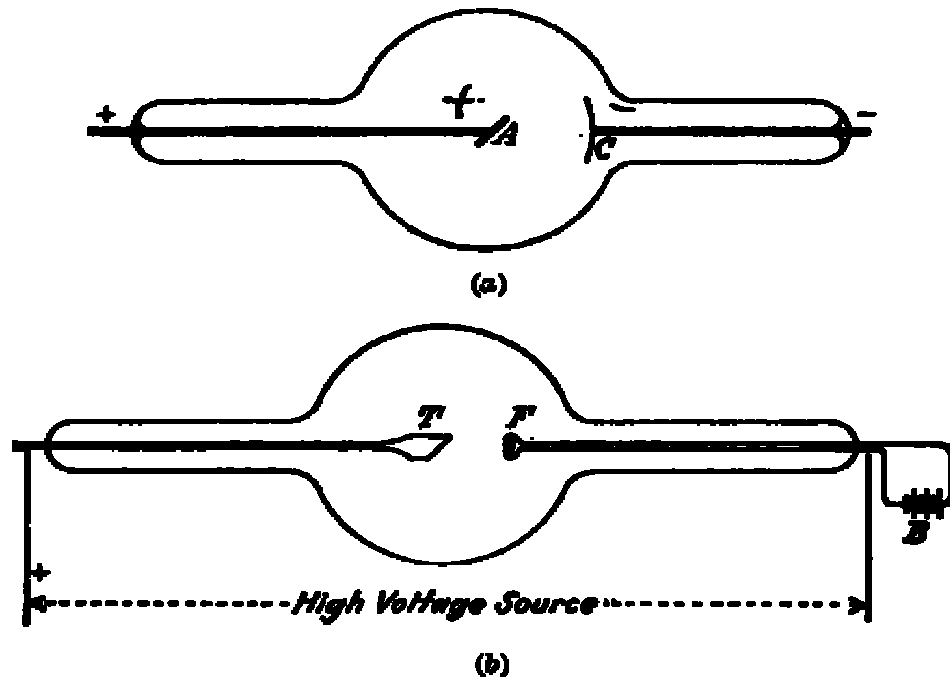
Comunque gli elementi pesanti come il platino sono migliori produttori di raggi X di quanto non lo siano elementi più leggeri quali l'alluminio.

—pagg. 516, 517

1913 – W. D. Coolidge

Il tubo di Coolidge introdotto dal Dr. Coolidge nel 1913 differisce dai comuni tubi a gas per due particolari importanti:

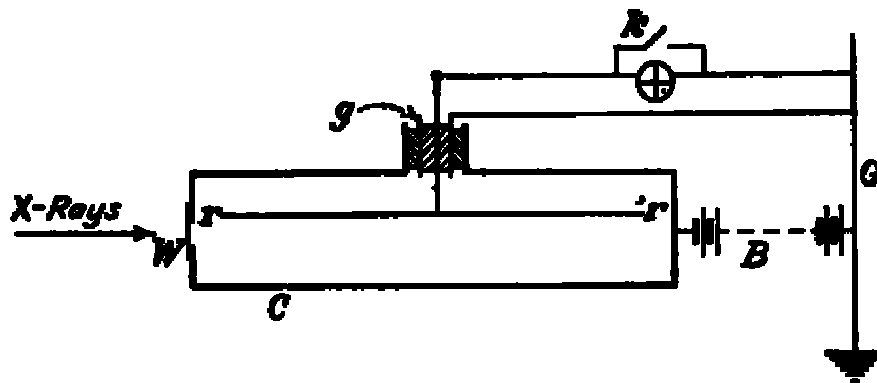
- (1) Nel tubo a gas gli elettroni del flusso catodico sono forniti dal gas residuo che si ionizza mentre nel tubo di Coolidge gli elettroni sono prodotti per effetto termoionico dal catodo.
- (2) Il tubo di Coolidge può essere messo sotto il più spinto vuoto disponibile e la corrente in esso può essere posta a qualsiasi valore entro i limiti ammissibili dalla tensione applicata.



(a) uno dei primi tubi a raggi X

(b) il tubo di Coolidge

La proprietà dei raggi X di rendere conduttore un gas che attraversano é stata usata fin dal principio come una misura quantitativa dell'intensità del fascio.



Camera di ionizzazione usata per la misura dell'intensità di un fascio di raggi X

Nei lavori sull'assorbimento dei raggi X una quantità conosciuta come coefficiente di assorbimento specifico (per massa) è spesso usata.

Prendiamo l'equazione dell'assorbimento: dividiamo e moltiplichiamo l'esponente per la densità di massa per centimetro quadro otteniamo che

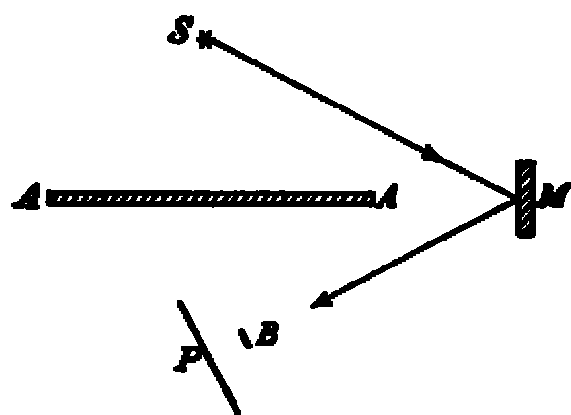
$$I = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x}$$

La quantità $\frac{\mu}{\rho}$ è chiamata, appunto, coefficiente di assorbimento specifico. Mentre ρx è la massa di una porzione di un centimetro quadro di lamina spessa x centimetri.

--pag. 523

1896 – Imbert e Bertin-Sans

Uno specchio piano M è posizionato in modo che il raggio se riflesso finisca sulla lastra fotografica P lasciando l'ombra dell'ostacolo B



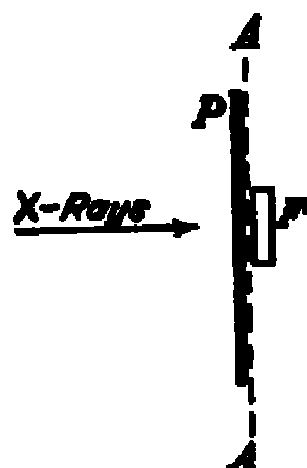
Questa ombra è ottenuta indipendentemente dall'angolazione dello specchio M.

Invece una piastra di paraffina funziona realmente da specchio. Da questo Bertin-Sans conclusero che i raggi X sono diffusi e sparpagliati da M, invece che riflessi, perché probabilmente sono onde di lunghezza d'onda troppo piccola per essere riflessi da una superficie artificialmente levigata.

--pag. 524

1896 – Winkelmann e Straubel

Un'importante osservazione fu fatta da Winkelmann e Straubel: un fascio di raggi X attraversa una lastra fotografica la cui emulsione giace sulla faccia opposta. Se si pone sul retro della lastra una lamina di fluorspar F allora nello sviluppare la lastra si trova che essa è maggiormente impressionata nelle vicinanze del fluorspar.



Roentgen fece osservare la possibilità che il fluorspar riflettessero i raggi X ma Winkelmann e Straubel mostrarono che

non si trattava di riflessione: frapposero fra la lastra e il fluorspar un foglio di carta che sicuramente non era in grado di bloccare i raggi X ma che invece bloccava la radiazione di fluorspar perché le lastre sottoposte a questo trattamento erano impressionate in modo uniforme.

Il cui coefficiente di assorbimento specifico di questa radiazione stimato nella carta dimostrava il basso potere penetrante della radiazione di fluorspar ed escluse che fosse della stessa qualità di quella incidente.

In altre parole il fascio incidente di raggi X era stato trasformato in una radiazione caratteristica del fluorspar, di diversa qualità e di minore potere di penetrazione, quindi di maggiore lunghezza d'onda.

--pag. 524

1896 – Goucy e Forum

Goucy e indipendentemente Forum indagarono sulla diffrazione con risultati negativi. Conclusero che se i raggi X fossero stati onde soggette alle stesse leggi di quelle della luce allora la loro lunghezza d'onda non avrebbe potuto essere più grande di 10^{-6} centimetri.

--pag. 525

1895 / 1896: dalla scoperta all'ipotesi classica di Thomson

Le conclusioni che furono tratte dagli esperimenti di questo periodo sono sostanzialmente le seguenti:

1. I raggi X sono prodotti dal flusso dei raggi catodici quando impattano con un ostacolo solido dentro al tubo di scarica messo sotto vuoto.
2. Questi raggi X producono fluorescenza, impressionano le lastre fotografiche e ionizzano l'aria come i raggi ultravioletti.
3. A differenza dei raggi ultravioletti i raggi X non vengono né rifratti né riflessi e nemmeno diffranti inoltre penetrano facilmente i materiali opachi alla radiazione ultravioletta.
4. L'aria e gli altri gas, come i corpi solidi, scatterano i raggi X.

--pag. 525

1897 – J. J. Thomson e Stoney

La scoperta dell'elettrone da parte di Sir J. J. Thomson chiarì che i raggi catodici in un tubo di scarica sono un flusso di elettroni.

Se questi elettroni che si muovono a forte velocità e trasportano carica negativa, come sembra essere, hanno un impatto improvviso contro un ostacolo solido che li ferma, allora sono soggetti, per un breve intervallo, ad una forte accelerazione negativa.

In accordo con la teoria elettromagnetica questi corpuscoli accelerati devono irraggiare energia.

L'improvviso fermarsi di ognuno di questi elettroni per via di una collisione con l'ostacolo presente nei tubi a raggi X produce un disturbo elettromagnetico o impulso chiamato comunemente "impulso d'etere".

Dal punto di vista di questa teoria i raggi X sono una sequenza molto rapida e casuale di questi impulsi.

È stato mostrato da Stoney che se di un simile fenomeno si analizza lo spettro delle frequenze si trova che le componenti a lunghezza d'onda corta sono più abbondanti tanto maggiore è la velocità degli elettroni prima di fermarsi sull'ostacolo.

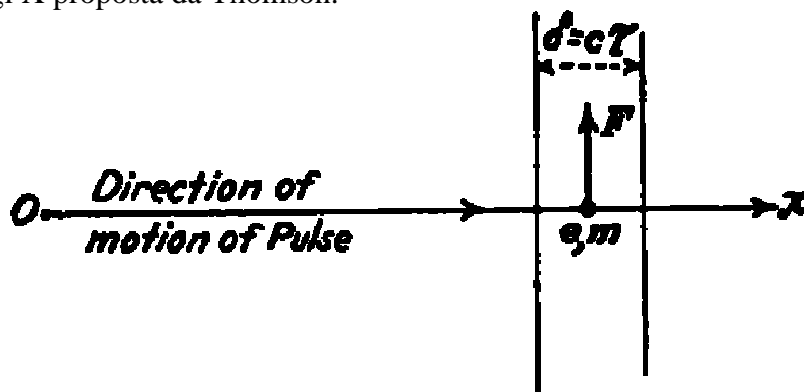
Stoney mostrò che la materia generalmente si presta ad essere maggiormente trasparente alle lunghezze d'onda più piccole.

Raggi X più penetranti, dovrebbero quindi, essere prodotti da elettroni più veloci che si ottengono applicando alte tensioni al tubo di scarica.

--pagg. 526, 527

Gli esperimenti di Imbert e Bertin-Sans mostrarono che i raggi X vengono scatterati passando attraverso la materia, sia solida che in forma gassosa.

La teoria degli impulsi d'etere insieme all'idea di una natura elettrica della materia, che si era decisamente consolidata con la scoperta dell'elettrone, formarono le basi per la teoria dello scattering dei raggi X proposta da Thomson.



Come risultato della collisione un impulso sferico di larghezza $\delta = ct$, dove t è il tempo impiegato

dall'elettrone per fermarsi a seguito dell'impatto con l'ostacolo, viene emesso dal punto O.

Se questo impulso passa su un altro elettrone questo subisce una forza F. Questa forza causa un'accelerazione e quindi l'elettrone accelerato irradia energia sotto forma di un impulso secondario risultante dal passaggio dell'impulso primario.

L'elettrone, quindi, scattera parte dell'energia dell'impulso primario

--pagg. 528, 529

1911 – Barkla



Il lavoro di Barkla nella decade precedente il 1912, che aveva studiato a fondo il fenomeno dei raggi X, preparerò, in larga misura, la strada per una serie di rimarchevoli scoperte che cominciarono a partire dal 1912.

Barkla e i suoi collaboratori iniziarono uno studio approfondito e sistematico della radiazione secondaria generata da un fascio di raggi X.

Barkla mostrò che la radiazione X secondaria emessa da una sostanza irradiata dal fascio primario é fatta in parte da radiazione scatterata della stessa qualità (penetrazione) di quella incidente e in parte da una radiazione di fluorescenza caratteristica della sostanza di cui é composto il bersaglio.

Le conclusioni di Barkla furono basate sullo studio del coefficiente di assorbimento specifico della radiazione primaria e secondaria in alcune sostanze campione prendendo come riferimento l'alluminio.

--pagg. 536, 538

Se assumiamo che il processo di scattering sia l'unico motivo di dissipazione dell'energia dal fascio primario allora possiamo ricavare σ , il coefficiente di scattering, misurando I_0 , I e lo spessore x .

Dalla misura di σ si può ricavare n . Barkla fu il primo a determinare, mediante l'uso di questo metodo, il numero di elettroni per centimetro cubico e da questo il numero di elettroni per atomo.

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 e^4} n \qquad \frac{\sigma}{\rho} = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 c^4} \frac{n}{\rho}$$

Questo fu una fra le prime misure del numero di elettroni per atomo come risultato dell'applicazione esclusiva e diretta della teoria classica.

--pag. 531

La distribuzione di energia sulla superficie dell'impulso secondario, emesso quando l'elettrone decelera, non é uniformemente distribuita in tutte le direzioni ma proporzionale a $\sin^2\theta$, dove θ é l'angolo fra la direzione dell'accelerazione e quella da cui si misura l'intensità:

$$I'_{\theta} = I \cdot \frac{e^2}{m^2 c^4} \frac{1}{R^2} \sin^2 \theta$$

Questo vuol dire che l'intensità dell'impulso secondario é proporzionale all'intensità di quello primario ed a $\sin^2\theta$.

Se consideriamo il caso più generale in cui un fascio di raggi X consiste, non solo di un singolo impulso polarizzato su un piano, ma di una rapida successione di questi impulsi allora l'intensità del raggi X scatterati dovrebbe essere simmetrica tanto in avanti quanto all'indietro rispetto alla direzione di propagazione del fascio primario.

In seguito esperimenti più accurati e generali mostreranno una fenomenologia in forte contraddizione con questa previsione.

Se il fascio primario di raggi X é completamente polarizzato su un piano allora l'intensità dell'emissione secondaria sarà nulla nella direzione ortogonale a questo piano.

Il primo a fare questo tipo di esperimento fu Barkla e trovò che in quella direzione l'intensità non era nulla ciò indicava che non tutta la radiazione del fascio primario era polarizzata sul piano.

Qualche piccola considerazione fu sufficiente a mostrare che in effetti questo risultato era quello che ci si sarebbe dovuto aspettare: la brusca decelerazione dell'elettrone difficilmente avrebbe potuto essere completamente all'indietro perché molto più probabilmente avrebbe rimbalzato a zig-zag prima di fermarsi.

Nel caso che il fascio secondario incida su un elettrone ci si aspetta che il fascio terziario sia completamente polarizzato su un piano per via della natura trasversale della radiazione elettromagnetica.

Compton e Hagenow mostrarono che entro gli errori sperimentali il fascio terziario di raggi X era completamente polarizzato come la teoria elettromagnetica aveva previsto.

La teoria degli impulsi d'etere ebbe molto successo nello spiegare molti dei fenomeni osservati riguardo ai raggi X ma gradualmente si stavano accumulando esperienze che questa teoria classica non avrebbe più potuto spiegare.

—pagg. 532, 535

L'evidenza che i raggi X fossero onde simili ma più corte di quelle della luce visibile si erano accumulate nonostante non fosse stata ancora provata la diffrazione.

Dall'esperimento di Haga e Win che fallì nel misurare la diffrazione conclusero che la lunghezza d'onda fosse molto piccola 10^{-8} cm circa.

Un'altro tentativo di misurare la diffrazione fu fatto da Walter e Pohl i quali ottennero di stabilire che la lunghezza d'onda dei raggi X non doveva superare i 10^{-9} cm.

Sommerfeld, dagli esperimenti sopracitati, concluse che i raggi X avrebbero dovuto avere dimensione dell'ordine di $3 \cdot 10^{-9}$ cm.

Wien misurando la velocità degli elettroni espulsi per effetto fotoelettrico dal bersaglio sottoposto ad radiazione X, e utilizzando l'ipotesi quantistica di Planck, che la lunghezza d'onda dei raggi X doveva essere $6.7 \cdot 10^{-9}$ cm

1912 – Laue, Friederich e Knipping



Nel 1912 nonostante che si fosse stabilito che i raggi X erano una radiazione intorno 10^{-8} a 10^{-9} cm si sentiva il bisogno di prove sperimentali dirette per confermare questa ipotesi.

Questo esperimento fu fatto da Friederich e Knipping come risultato di un brillante suggerimento di Laue: che i cristalli essendo composti da un reticolo regolare di atomi si sarebbero comportati con i raggi X alla stessa stregua dei reticoli utilizzati nel campo ottico.

Questo esperimento segnò definitivamente l'apertura di una nuova era nella sperimentazione nel campo dei raggi X e i risultati ottenuti nei laboratori avrebbero stravolto la teoria dello scattering.

—pag. 541

Nei loro carteggi originali Friederich, Knipping e Laue, dall'analisi di una serie di fotografie di un cristallo di zinco orientato a varie angolazioni rispetto al fascio incidente di raggi X, conclusero che si trovavano in presenza di un fascio di raggi X la cui lunghezza d'onda variava fra 1.27 e $4.83 \cdot 10^{-9}$ centimetri: valori in perfetto accordo con le stime previste.

Questo risultato positivo provò ancora una volta la correttezza dei due postulati che sottostavano all'esperimento:

- 1) i raggi X sono onde elettromagnetiche di definita lunghezza d'onda,
- 2) gli atomi dei cristalli sono disposti in un reticolo regolare tridimensionale come si può inferire dalla simmetria esterna del cristallo.

Come risultato di questo famoso esperimento due nuove e importanti strade furono aperte: lo

studio dello spettro dei raggi X e lo studio dei cristalli con particolare riferimento alla disposizione atomica nella cella.

—pagg. 546, 547

1913 – Bragg

Immediatamente a seguito dell'annuncio di Friederich, Knipping e Laue riguardo al loro successo sperimentale molti altri cominciarono ad investigare questo fenomeno.

Fra questi vi furono W. H. e W. L. Bragg con i quali siamo chiaramente in debito per la così precoce nascita della spettroscopia a raggi X.

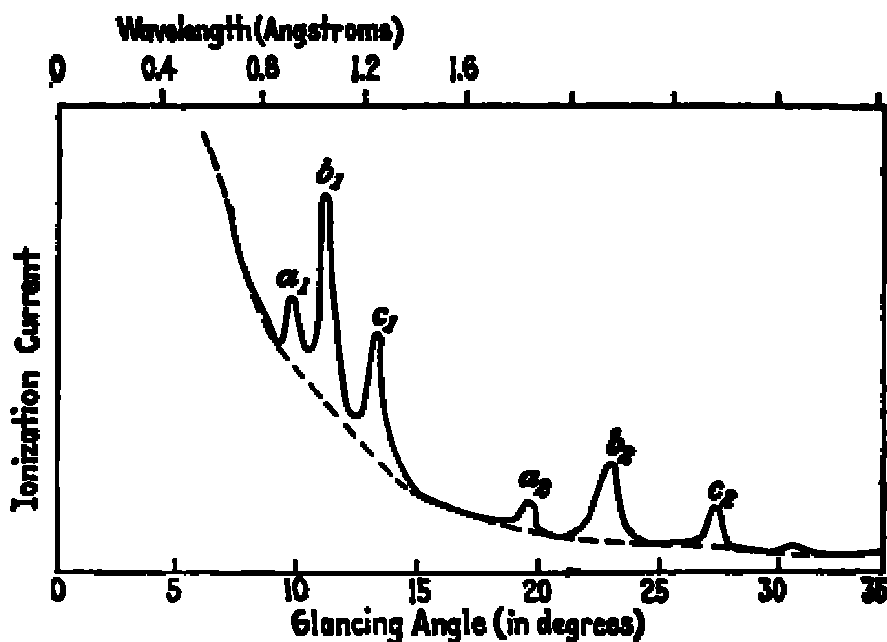
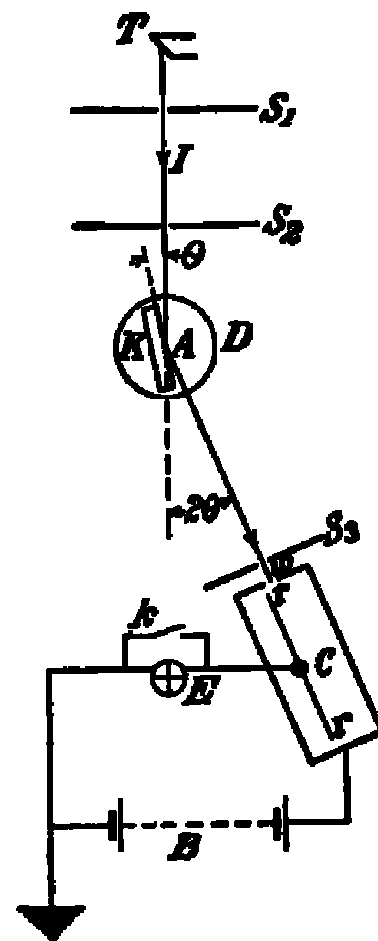
—pag. 548

La scoperta della radiazione monocromatica caratteristica.

Con il fascio di raggi X puntato sulla faccia levigata di un cristallo pose, nell'esatta posizione in cui prevista dalla teoria se il raggio fosse stato riflesso dal cristallo, una camera di ionizzazione e verificò che quando in essa entrava il raggio riflesso si produceva una corrente di ionizzazione, dalla quale corrente era possibile fare una misura d'intensità del fascio.

Usando un cristallo di sale di roccia e un tubo a raggi X con la placchetta di platino, egli investigò l'intensità del fascio riflesso a vari angoli.

Trovò che l'intensità non variava uniformemente con l'angolo ma che a certi angoli essa cresceva improvvisamente verso un massimo.



La curva di Bragg della distribuzione di energia dello spettro dei raggi X mostra le caratteristiche linee

Un gruppo di tre massimi a_1 , b_1 e c_1 fu osservato ai rispettivi angoli 9.9, 11.6 e 13.6 gradi. Un secondo gruppo di massimi a_2 , b_2 e c_2 fu osservato a circa il doppio di questi angoli.

Questo secondo gruppo di massimi aveva intensità relative paragonabili con il primo gruppo.

Bragg interpretò i massimi a_1 , b_1 e c_1 come tre linee monocromatiche e il secondo gruppo come la riflessione di secondo ordine di queste prime.

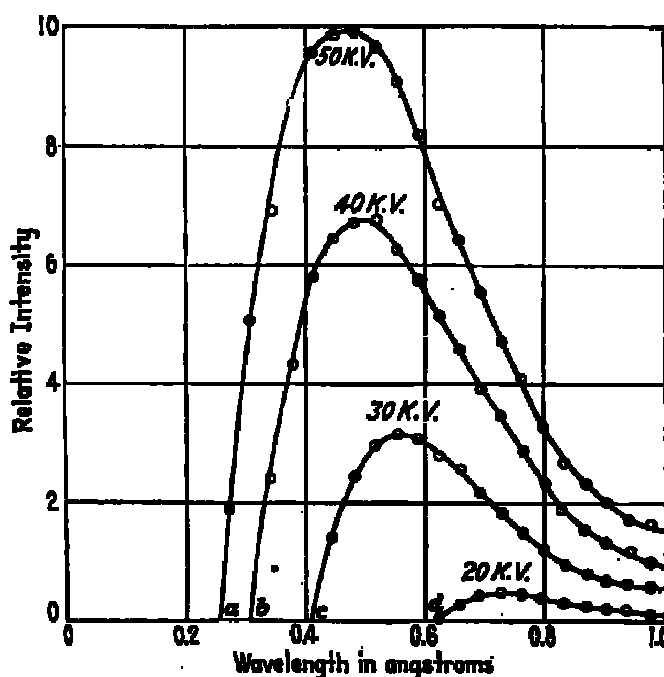
Curve simili a quella qui rappresentata furono ottenute con altri cristalli –calcite, pirite di ferro, zinco– la sola differenza era che i massimi si trovavano a differenti angoli, il che indicava (ma non era la sola risposta plausibile) che ogni cristallo avesse un suo proprio passo di reticolo.

Bragg si convinse che questi diversi massimi nei vari cristalli erano sempre la stessa radiazione monocromatica poiché, ad esempio per il picco b_2 il coefficiente di assorbimento nell'alluminio era sempre lo stesso per tutti i cristalli usati.

In breve l'interpretazione della curva di Bragg divenne chiara: i picchi erano delle linee di spettro caratteristiche della placchetta su cui impattavano gli elettroni catodici.

Queste linee monocromatiche era sovrapposte ad un fondo continuo di radiazione.

—pagg. 552, 553



Spettro continuo dei raggi X generati da un tubo con placchetta di tungsteno a varie tensioni

1913 – Moseley

In due suoi scritti Moseley presentò uno studio sistematico della radiazione caratteristica emessa da vari bersagli.

A differenza dello spettro ottico, lo spettro caratteristico dei raggi X fu trovato simile da elemento a elemento con la seguente caratteristica: linee analoghe si trovavano, in generale, a più piccole lunghezze d'onda per gli elementi con peso atomico maggiore.

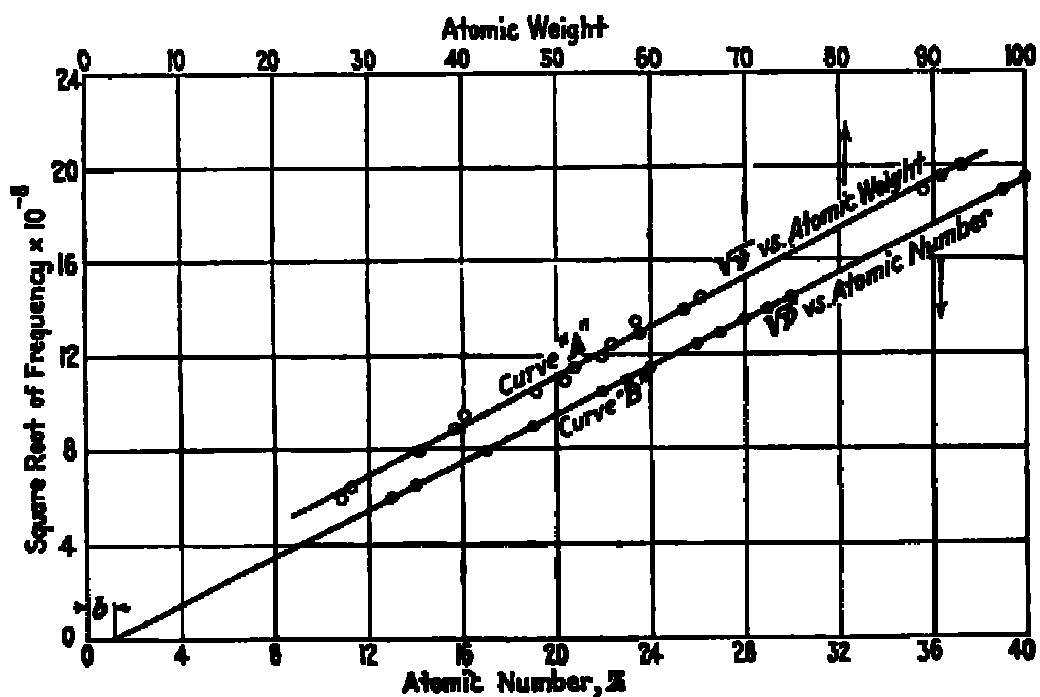
Moseley per primo notò che la frequenza non variava regolarmente con il peso atomico

Bohr aveva recentemente proposto una teoria sull'origine dello spettro, nella quale il numero atomico di carica Z giocava un ruolo di fondamentale importanza.

Rutherford mostrò mediante i suoi esperimenti sullo scattering delle particelle α , che il valore

della carica nucleare, per un dato atomo, era molto vicino a $\frac{1}{2}$ del peso atomico e Barkla mostrò con i suoi esperimenti sullo scattering dei raggi X, che il numero degli elettroni intorno al nucleo era, anch'esso, circa $\frac{1}{2}$ del peso atomico.

Divenne presto ovvio, come si vede dal grafico, che per quanto concerne la determinazione delle frequenze caratteristiche, il numero atomico Z è una quantità fondamentale rispetto al peso atomico.



La curva di Moseley mostra la relazione fra la frequenza delle linee nei raggi X e il numero atomico

Dentro ad un tubo a raggi X gli elettroni emessi dal catodo accelerano fino a collidere con la placchetta. Quando qualcuno di questi elettroni collide con un atomo e se ha sufficiente energia un elettrone della shell K, la più interna, viene espulso dall'atomo

Per riempire l'orbita su cui si è formata la lacuna un elettrone delle orbite più esterne decade e quindi emette una radiazione monocromatica.

Seguendo il lavoro di Moseley la tecnica di spettroscopia dei raggi X si sviluppò rapidamente. Nuove linee spettrali furono scoperte e classificate, e la loro origine in termini di elettroni decaduti fu sistematicamente studiata.

—pagg. 556, 557

Esiste una semplice radiazione fra la frequenza limite e il voltaggio applicato.

Questa relazione si mostra graficamente come una linea retta passante per l'origine. La frequenza

limite é strettamente proporzionale al voltaggio applicato.

L'equazione empirica della curva é:

$$\nu_m = 2.43 \cdot 10^{14} V$$

dove ν_m é la frequenza massima che il voltaggio applicato può generare.

Dare una spiegazione di questo taglio netto alla frequenza limite illustra in maniera diretta l'ineguatezza della teoria classica

Secondo la teoria classica degli impulsi d'etere sulla produzione dei raggi X l'analisi di Fourier farebbe prevedere per l'intensità un andamento asintotico verso lo zero per lunghezze d'onda sempre più piccole, mentre l'evidenza sperimentale richiedeva che ci fosse un taglio netto.

Nonostante i vari tentativi la teoria classica non offrì spiegazione a questo fenomeno.

Di nuovo la teoria quantistica ebbe più successo.

Dal punto di vista dell'andamento del processo, la produzione dei raggi X dovuta al bombardamento elettronico di una placchetta é il reciproco dell'effetto fotoelettrico.

Poiché vi é una grande similarità fra questi due fenomeni ci si aspetta che l'equazione dell'effetto fotoelettrico di Einstein:

$$V e = h\nu - w_0,$$

che ha avuto così tanto successo nel spiegare quel fenomeno, possa essere invertita ed applicata anche al fenomeno della produzione dei raggi X.

Il termine w_0 é il lavoro di estrazione dalla superficie della placchetta di un elettrone. Poiché il valore numerico é di 1 o 2 volt questo termine risulta trascurabile per almeno due ordini di grandezza rispetto alla tensione applicata ai tubi a raggi X.

$$h \nu_m = V e$$

dove ν_m é la massima frequenza dei raggi X prodotta quando un elettrone impatta e si ferma bruscamente contro un atomo della placchetta.

—pagg. 559, 561

La determinazione dell'intensità totale e della distribuzione dello spettro continuo dei raggi X non era così soddisfacente quanto la misura della frequenza limite.

Questo era dovuto ad una serie di problemi di correzione che andavano fatti sulla distribuzione energetica osservata.

Prima di ottenere la vera curva erano necessario tenere conto delle seguenti correzioni:

1. La differenza di assorbimento sul cammino fra la sorgente e la camera di ionizzazione i funzione della lunghezza d'onda.
2. La potenza riflessa dal reticolo cristallino, anch'essa funzione della lunghezza d'onda.
3. Non tutta la radiazione penetrata nella camera di ionizzazione veniva assorbita.
4. Riflessioni di secondo ordine.

La misura del coefficiente di assorbimento era fatte usando un spettrometro a camera di ionizzazione.

Per un dato cristallo ad un certo angolo θ , e quindi per una certa lunghezza d'onda, la corrente di ionizzazione era misurata con e senza una sottile lamina di materiale assorbente di cui erano note le caratteristiche e che veniva posta fra il cristallo e la camera di ionizzazione.

Misurando le due intensità I e I_0 , conoscendo ρ e lo spessore del lamina mediante l'equazione

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho x}$$

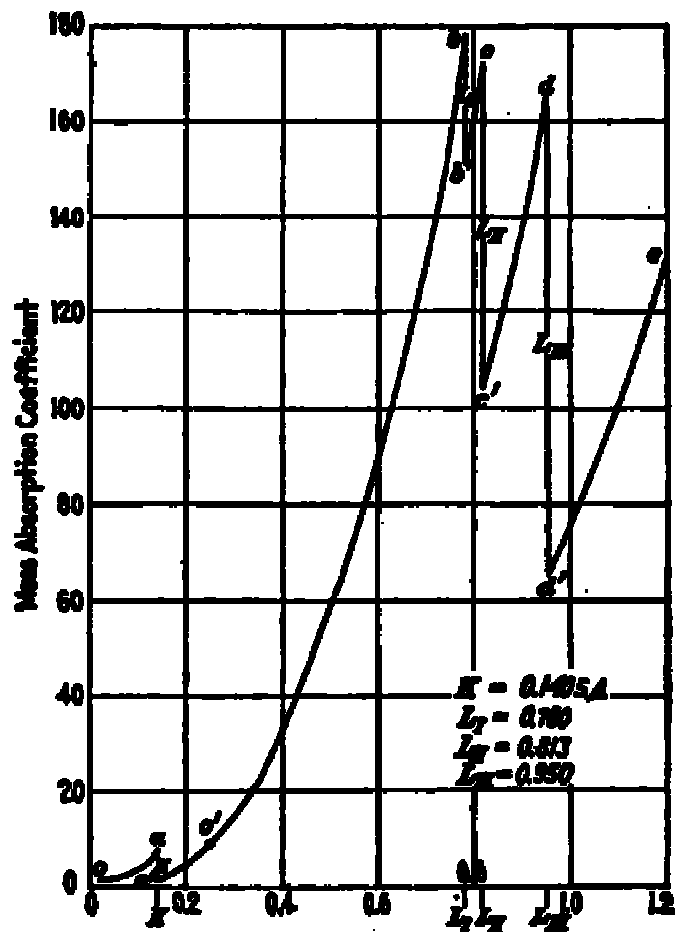
veniva ricavato il coefficiente specifico di assorbimento μ/ρ .

Per evitare la riflessione di secondo ordine si utilizzava una tensione abbastanza bassa da non generare la seconda lunghezza d'onda ma soltanto la prima.

Queste rotture o discontinuità sono chiamate rispettivamente discontinuità K, L, M... per via del loro intimo legame con le serie di righe caratteristiche K, L, M ...

—pagg. 564, 567

Curve simili a quella a fianco sono ottenute misurando l'assorbimento in varie sostanze, le rispettive discontinuità si ritrovano a lunghezze d'onda maggiore per elementi di numero atomico Z più piccolo.



Infatti considerata una certa discontinuità si trova che la frequenza a cui compare é proporzionale al quadrato del numero atomico Z .

Questa regolarità non é l'unica infatti per un fissato elemento il coefficiente di assorbimento specifico é proporzionale alla lunghezza d'onda al cubo, fatta eccezione per le discontinuità di pendenza alle frequenze caratteristiche K, L, M...

Si può dare un descrizione al fenomeno più chiara se si ridefiniscono alcune quantità in funzione del numero atomico:

$$\frac{\mu}{\rho} = k\lambda^3 + \frac{\sigma}{\rho}$$

$$\Rightarrow \mu_a = k_a\lambda^3 + \sigma_a$$

$$k_a = k \frac{A}{N_0} \quad \text{e} \quad \mu_a = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_0}$$

Dove N_0 é il numero di Avogadro mentre A é il peso atomico. Posto in questi termini si riscontra che il coefficiente k_a é funzione della quarta potenza del numero atomico Z

$$k_a = KZ^4 \Rightarrow \mu_a = KZ^4\lambda^3 + \sigma_a$$

Il termine $K_a\lambda^3$ é chiamato assorbimento di fluorescenza.

--pagg. 568, 570

Le righe spettrali della serie K sono intimamente legate fra loro e con il coefficiente di assorbimento K fenomeno facilmente dimostrabile considerando il voltaggio applicato al tubo a raggi X.

Lo spettro continuo del tungsteno non mostra affatto i caratteristici picchi che invece compaiono nella curva di Bragg che egli aveva osservato per il platino.

Ma se la tensione ai capi del tubo a raggi X con placchetta di tungsteno fosse stata innalzata ulteriormente, la frequenza limite si sarebbe spostata verso valori più grandi in accordo con la legge $h\nu_m = Ve$, allora si sarebbero presentati tutti i picchi associati alla serie K.

In sostanza quando la frequenza limite ν_m diventa maggiore della frequenza ν_k allora tutte le linee della serie K compaiono contemporaneamente e se si aumenta ulteriormente il voltaggio crescono

di intensità mantenendo la medesima proporzione.

Le frequenze delle linee nei raggi X sono la differenza fra due delle frequenze limite. Utilizzando questo principio e partendo dalle osservazioni é possibile costruire lo schema completo dello spettro discreto dei raggi X e dei limiti di assorbimento.

$$\nu_{ab} = \nu_a - \nu_b$$

--pagg. 572, 575

Volendo collegare questo schema con la disposizione degli elettroni nelle shell si scopre che non tutte le possibili combinazioni ν_{ab} si verificano sperimentalmente.

Evidentemente occorre tenere presente il principio di esclusione di Pauli il quale distribuisce gli elettroni nelle shell impedendo di fatto alcune transizioni.

Le transizioni ammissibili sono quelle per cui la variazione del momento angolare totale $\Delta L = \pm 1$ e del momento magnetico totale $\Delta J = \pm 1, 0$.

Non vi é alcuna restrizione sul numero quantico n ma a differenza di quanto accade per lo spettro ottico non vi sono transizioni che prevedano $n = 0$.

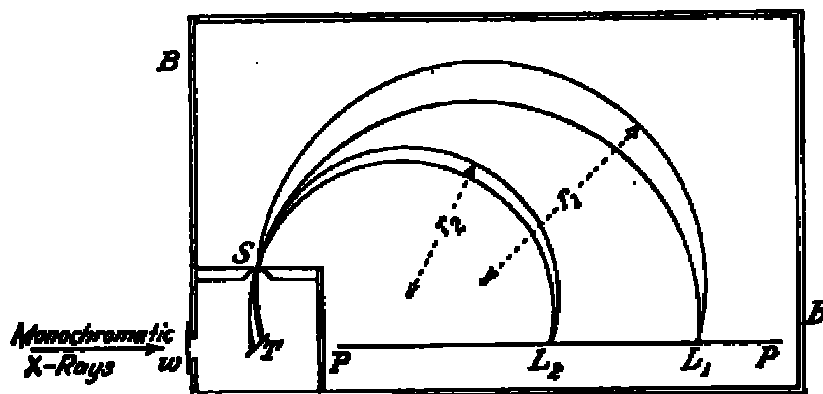
VEDERE IL GRAFICO A PAGINA 18

In un bersaglio che viene bombardato da raggi X si verifica, per effetto fotoelettrico, l'espulsione di un elettrone della shell K da alcuni atomi.

Questo elettrone proiettato all'esterno dell'atomo lascia una lacuna che viene colmata da un elettrone delle shell più esterne che nel decadere emette radiazione monocromatica.

Quando la frequenza massima dello spettro continuo dei raggi X incidenti sul bersaglio non é maggiore della frequenza ν_K allora sono gli elettroni delle shell L, M ... ad essere espulsi. La radiazione emessa in questo caso avrà grande lunghezza d'onda e viene detta di fluorescenza.

Questo fenomeno fotoelettrico e l'esistenza all'interno dell'atomo dei vari livelli di energia K, L, M ... ebbe presto conferma diretta mediante l'esperimento di Robinson.



Spettrometro magnetico di Robinson per lo studio dell'effetto fotoelettrico dei raggi X

Questo esperimento condotto da Robinson, insieme ai suoi collaboratori, permise di verificare:
 (1) che all'interno dell'atomo esistono elettroni a diversi livelli energetici
 (2) che le misure fatte mediante spettroscopia erano da considerarsi numericamente attendibili.

Le misure fatte da Robinson erano in perfetto accordo con quelle raccolte mediante indagine spettroscopica, inoltre fatto rimarchevole Robinson trovò proprio un livello K, tre livelli L, cinque livelli M e nel caso dell'uranio 92 cinque dei sette livelli N (due coppie di livelli sono quasi degeneri e non erano distinguibili con la risoluzione dell'apparato di Robinson).

—pagg. 579, 591

Barkla dalle misure del coefficiente di scattering prodotte da Robinson calcolò il numero di elettroni per atomo usando la formula dello scattering di Thomson basata sulla teoria classica degli impulsi d'etere.

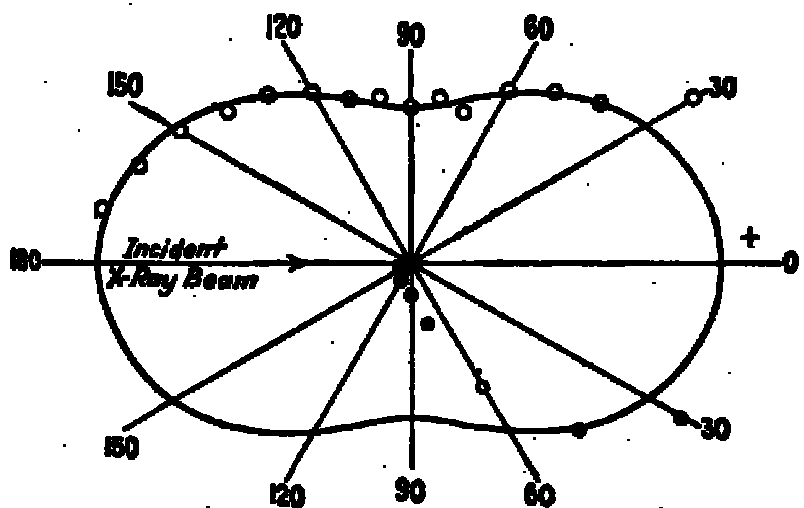
Questo fu il primo, non ambiguo, calcolo del numero di elettroni per atomo.

Nonostante questo successo non si trova nella storia della moderna fisica momento migliore che dimostri l'inesattezza della teoria classica sullo scattering dei raggi X.

Per i materiali di peso atomico leggero usati come bersagli di fasci di raggi X di lunghezza d'onda moderata il coefficiente di scattering approssima il valore 0.2 richiesto dalla teoria classica. Ma per i raggi X duri per i quali $\lambda = 0.1 \text{ \AA}$ il valore sperimentale è di tre volte inferiore a quello previsto.

Quindi non solo il coefficiente varia con la lunghezza d'onda, mentre per la teoria classica dovrebbe rimanere costante, ma ha per i raggi X duri un valore troppo basso.

$$I'_{\phi} = I \cdot \frac{e^4}{m^2 c^4} \frac{1}{R^2} (1 + \cos^2 \phi)$$



La distribuzione angolare della radiazione X scatterata dal carbonio.

La linea continua è la previsione della teoria classica.

I pallini pieni sono le misure di Compton con raggi γ mentre i pallini vuoti sono le misure di Barkla e Ayres per raggi X moderatamente morbidi.

Le misure di Barkla e Ayres per lo scattering dal carbonio a vari angoli, usando raggi X moderatamente morbidi, sono graficati con cerchi bianchi.

Le osservazioni ricalcano veramente bene le predizioni tranne che per angoli inferiori a 45 gradi per i quali si presenta un'asimmetria nella direzione in avanti rispetto al fascio incidente.

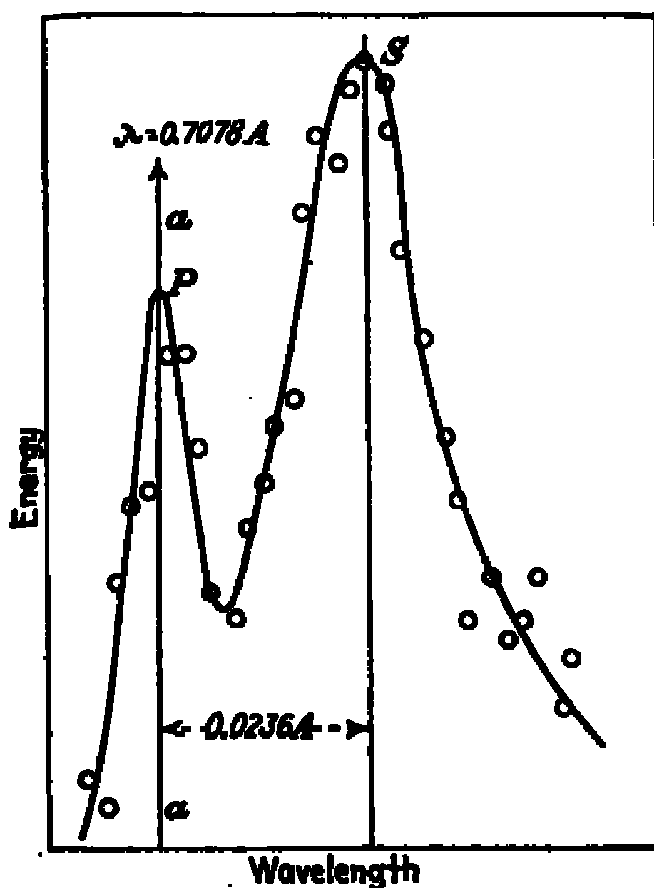
L'asimmetria aumenta con l'aumentare della frequenza dei raggi X e lo scattering all'indietro diventa sempre più esiguo.

Per i raggi γ l'asimmetria diventa enorme come si vede dai pallini neri che rappresentano le misure di scattering, dal ferro sottoposto a bombardamento γ derivante d Radio C, fatte da Compton nel 1921.

In questo ultimo caso lo scattering é quasi totalmente in avanti. Anche la discrepanza per quanto riguarda l'intensità osservata e quella prevista dalla teoria classica é molto grande.

Inoltre gli ultimi esperimenti di scattering nel carbonio indicavano che il fascio secondario risultava essere meno penetrante e quindi presumibilmente di lunghezza d'onda inferiore di quello incidente: un fatto inspiegabile per la teoria classica.

Con i suoi esperimenti di spettroscopia della radiazione di scattering Compton mostrò che se una radiazione monocromatica incide su un elemento leggero allora il fascio secondario risulta essere composto da due linee: una corrispondente in lunghezza d'onda a quella incidente e una seconda di lunghezza d'onda superiore.

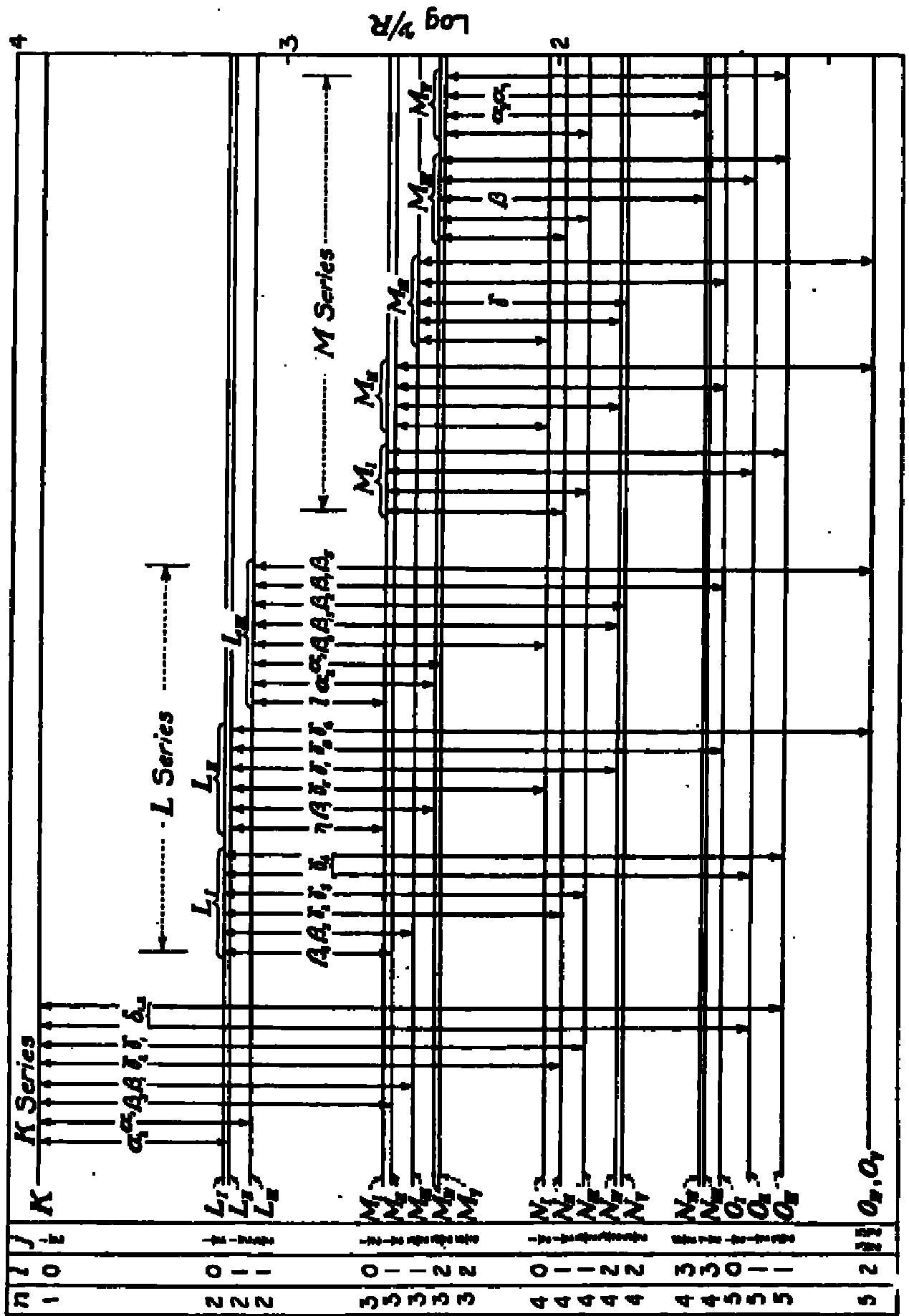


Lo spettro dello scattering di raggi X osservato a 90 gradi rispetto al fascio incidente

La differenza fra la lunghezza d'onda della linea non modificata e quella spostata fu stimata in 0.0236 Åmström.

La teoria classica non poteva prevedere l'esistenza di una linea spostata. La spiegazione che sarà data da Compton sarà una diretta conseguenza dell'applicazione della teoria quantistica.

—pagg. 592, 594



L'effetto Compton

brevissimo vedere presentazione articolo

I quanti di luce, poiché sono in moto (alla velocità della luce) e possiedono energia, devono possedere anche un momento cinetico.

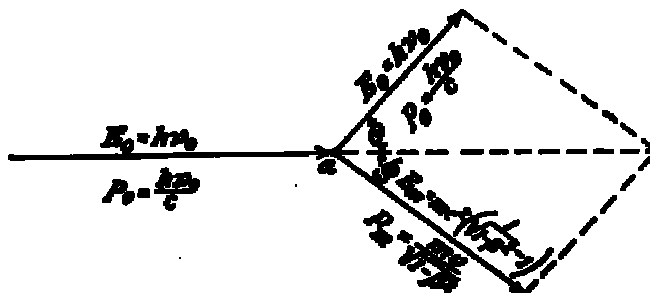
Quando questi collidono con delle particelle materiali, come gli atomi o gli elettroni, è logico aspettarsi che la collisione sia governata dalle due leggi della meccanica:

- (1) la conservazione dell'energia;
- (2) la conservazione del momento cinetico.

Dobbiamo calcolare il momento cinetico di un quanto che possiede energia $h\nu$ e si muove di velocità c . Nel fare questo calcolo ci serviremo della teoria cinetica dei gas.

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

Avendo ora l'energia e il momento associati al quanto possiamo calcolare la collisione fra questo quanto e un elettrone. Le leggi di conservazione sono esattamente le stesse che useremo per risolvere il problema dell'urto fra due palle da biliardo.



Il diagramma vettoriale mostra la conservazione del momento quando un quanto è scattato da un elettrone.

Fatte le sopraccitate ipotesi appare evidente come l'elettrone rinculi in avanti e che complessivamente ci si aspetti un'asimmetria in favore della direzione in avanti rispetto al fascio di quanti incidente.

Seguendo le previsioni di Compton gli elettroni di rinculo furono scoperti da C. T. R. Wilson e W. Bothe nel 1923.

Bless nel 1927 utilizzando uno spettrografo simile nel concetto a quello di Robinson misurò l'energia cinetica massima per gli elettroni di rinculo e la trovò in perfetto accordo con le previsioni di Compton.

Il fatto che esista una linea non spostata nella lunghezza d'onda è spiegato così: se un quanto non possiede energia sufficiente a strappare via l'elettrone con cui collide allora la massa efficace nel

calcolo dell'urto non é più quella del leggero elettrone libero ma quella dell'intero atomo a cui resta legato. Dato la massa dell'atomo é enorme rispetto a quella dell'elettrone lo spostamento in lunghezza d'onda per questo urto é così piccola da essere molto al di sotto della risoluzione di spettro disponibile.

Si può prevedere che l'intensità relativa sia funzione della lunghezza d'onda incidente e del numero atomico dell'elemento scatterante. Queste predizione furono confermate qualitativamente dagli esperimenti.



Liberamente tratto e tradotto da:

INTRODUCTION TO MODERN PHYSICS

by F. K. RICHTMYER

seconda edizione

McGRAW-HILL BOOK COMPANY inc

NewYork and London

1934

Immagini prese da:

libro sopraccitato

INTRODUCTION TO MODERN PHYSICS

fonti internet

Famous Physicists <http://cnr2.kent.edu/~manley/physicists>

Biography of A. H. Compton <http://www.nobel.se/laureates/physics-1927-1-bio.html>

Articolo originale:

A QUANTUM THEORY OF THE SCATTERING OF X-RAYS

BY LIGHT ELEMENTS

The PHYSICAL REVIEW Second Series May, 1923 Vol. 21, No. 5