

L'Esperienza di Davisson e Germer

Pasta Rebecca, Mucaj Deva
5B Iso, Relazione di Fisica

Realizzato in collaborazione con Bell Telephone Labs dal Physical Science Study Committee, questo breve filmato vede la partecipazione di Alan Holden e Lester Germer.

Il film è stato realizzato nel 1961 e fornisce una visione sia storica che scientifica della natura ondulatoria delle particelle elementari a livello atomico. Il film inizia con un esame dell'ipotesi di Louis de Broglie. Alan Holden mostra i modelli di diffrazione elettronica su uno schermo fluorescente, rendendo gli schemi di diffrazione delle onde comprensibili presentando un analogo ottico, il quale mostra schemi quasi identici. Holden descrive gli esperimenti di diffrazione elettronica di Sir George Thomson e presenta brevi prove del comportamento ondulatorio di altre particelle, come neutroni e atomi di elio.

Materiale

Microscopio elettronico, reticoli di diffrazione, fasci di luce ed elettroni, filtro rosso e filtro blu, biglie, apparato di Davisson e Germer (la composizione, per una maggiore linearità dei contenuti, viene descritta in seguito), cristallo di nichel.

Premessa Teorica

L'ipotesi di De Broglie

Secondo le equazioni di Maxwell, alla fine del diciannovesimo secolo, si credeva che la luce consistesse di onde di campi elettromagnetici e che la materia fosse costituita da particelle localizzate. Ma questo fu contestato nel lavoro di Albert Einstein del 1905 sull'effetto fotoelettrico, che descriveva la luce come quantità discrete e localizzate di energia (ora chiamate fotoni), confermando l'ipotesi di Max Planck, e che gli valse il premio Nobel per la fisica nel 1921. Nel 1924 Louis de Broglie presentò la sua tesi di laurea sulla teoria della dualità onda-particella, che proponeva l'idea che tutta la materia possedesse la dualità onda-particella dei fotoni. Secondo De Broglie, per tutta la materia e la radiazione, l'energia E della particella è legata alla frequenza f della sua onda associata attraverso la relazione di Max Planck:

$$E = hf$$

Secondo De Broglie, ad ogni particella è associata un'onda (non un'onda elettromagnetica): se l'onda associata è monocromatica e di lunghezza d'onda λ , allora quest'ultima è espressa da:

$$\lambda = h/mv$$

dove m è la massa e v è la velocità.



Nel 1927 ai Bell Labs, Clinton Davisson e Lester Germer bombardarono elettroni su un bersaglio di nichel cristallino. È stata misurata la dipendenza angolare dell'intensità degli elettroni riflessi ed è stato verificato che aveva lo stesso modello di diffrazione di quelli previsti da Bragg per i raggi X. Allo stesso tempo, George Paget Thomson dimostrò indipendentemente lo stesso effetto bombardando elettroni attraverso film metallici per produrre un modello di diffrazione; Davisson e Thomson condivisero il premio Nobel per la fisica nel 1937.

L'esperimento di Davisson e Germer confermò l'ipotesi di Broglie che la materia avesse un comportamento ondulatorio. Questo, in combinazione con l'effetto Compton scoperto da Arthur Compton (che vinse il premio Nobel per la fisica nel 1927), stabilì l'ipotesi della dualità onda-particella, il che fu un passo fondamentale nella fisica e meccanica quantistica.

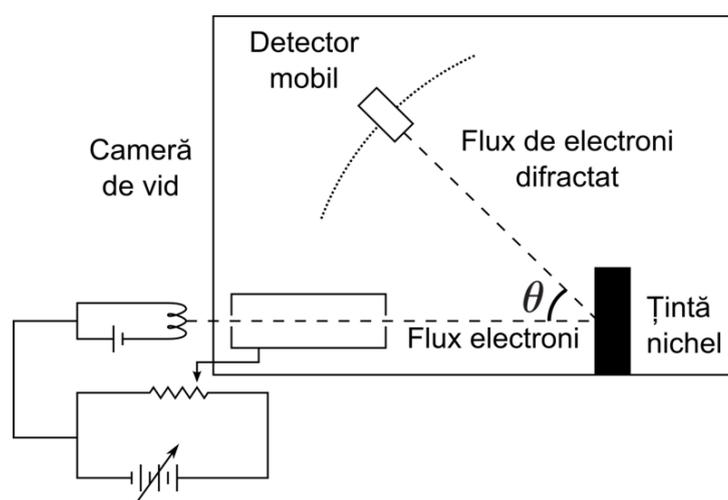
Un importante contributo all'esperimento Davisson-Germer fu dato da Walter M. Elsasser a Gottinga nel 1920, che notò che la natura della materia ondulatoria poteva essere studiata mediante esperimenti di scattering elettronico su solidi cristallini, proprio come la natura ondulatoria dei raggi X era confermata da esperimenti di scattering a raggi X su solidi cristallini.

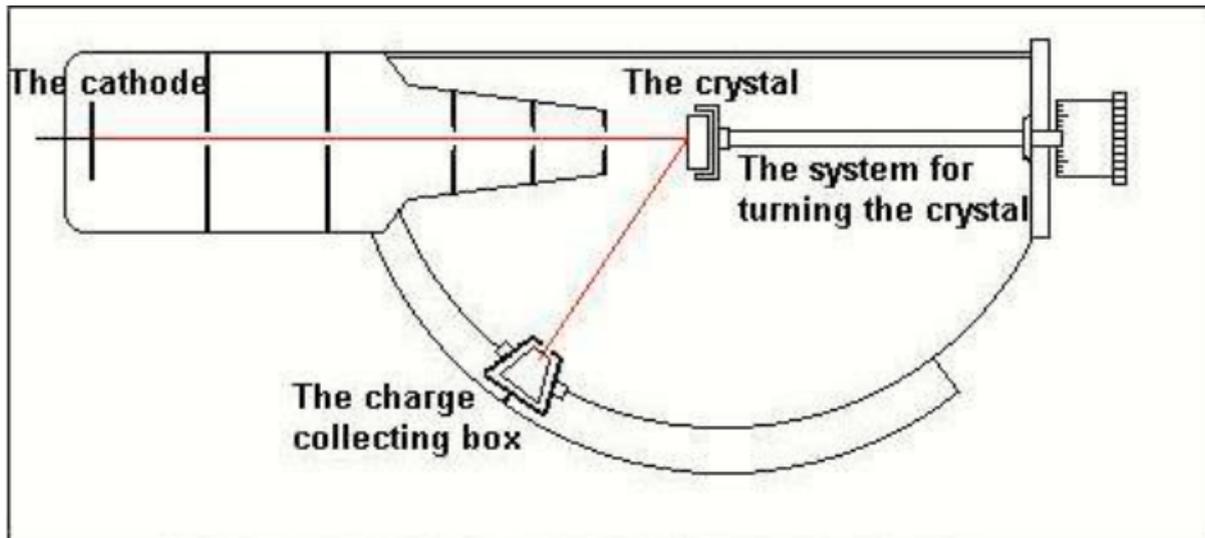
Questo suggerimento di Elsasser fu poi comunicato dal suo collega anziano (e in seguito premio Nobel) Max Born ai fisici in Inghilterra. Quando fu condotto l'esperimento di Davisson e Germer, i risultati dell'esperimento furono spiegati dalla proposta di Elsasser. Tuttavia, l'intenzione originale dell'esperimento di Davisson e Germer non era quella di confermare l'ipotesi di Broglie, ma piuttosto di studiare la superficie del nichel.

I Primi esperimenti

Il vero obiettivo di Davisson e Germer, come detto prima, era quello di studiare la superficie di un pezzo di nichel dirigendo un fascio di elettroni verso la superficie e osservando quanti elettroni avevano deviato a diverse angolazioni. Si aspettavano che, a causa delle piccole dimensioni degli elettroni, anche la superficie più liscia del cristallo sarebbe stata troppo ruvida e quindi il fascio di elettroni avrebbe subito una riflessione diffusa.

L'esperimento consisteva nel dirigere un fascio di elettroni (da un cannone elettronico, un acceleratore di particelle) a un cristallo di nichel, perpendicolare alla superficie del cristallo, e misurare come il numero di elettroni riflessi variasse con l'angolo tra il rivelatore e la superficie di nichel. Il cannone elettronico era un filamento di tungsteno riscaldato che rilasciava elettroni eccitati termicamente, che venivano poi accelerati da una differenza di potenziale elettrico, dando loro una certa quantità di energia cinetica, verso il cristallo di nichel. Per evitare collisioni di elettroni con altri atomi nel loro cammino verso la superficie, l'esperimento è stato condotto in una camera a vuoto. Per misurare il numero di elettroni che sono stati sparsi ad angoli diversi, è stato utilizzato un rivelatore di elettroni a tazza di Faraday che poteva essere spostato su un percorso ad arco attorno al cristallo.





Durante l'esperimento, l'aria entrò accidentalmente nella stanza, producendo un film di ossido sulla superficie del nichel. Per rimuovere l'ossido, Davisson e Germer riscaldarono il campione in un forno ad alta temperatura, ignari del fatto che ciò causava la precedente struttura policristallina del nichel a formare grandi aree monocristalline con piani cristallini continui attraverso la larghezza del fascio di elettroni.

Quando hanno ricominciato l'esperimento e gli elettroni hanno colpito la superficie, essi sono stati dispersi dagli atomi di nichel in piani cristallini (gli atomi erano regolarmente distanziati) dal cristallo. Questo, nel 1925, generò un modello di diffrazione con picchi inaspettati.

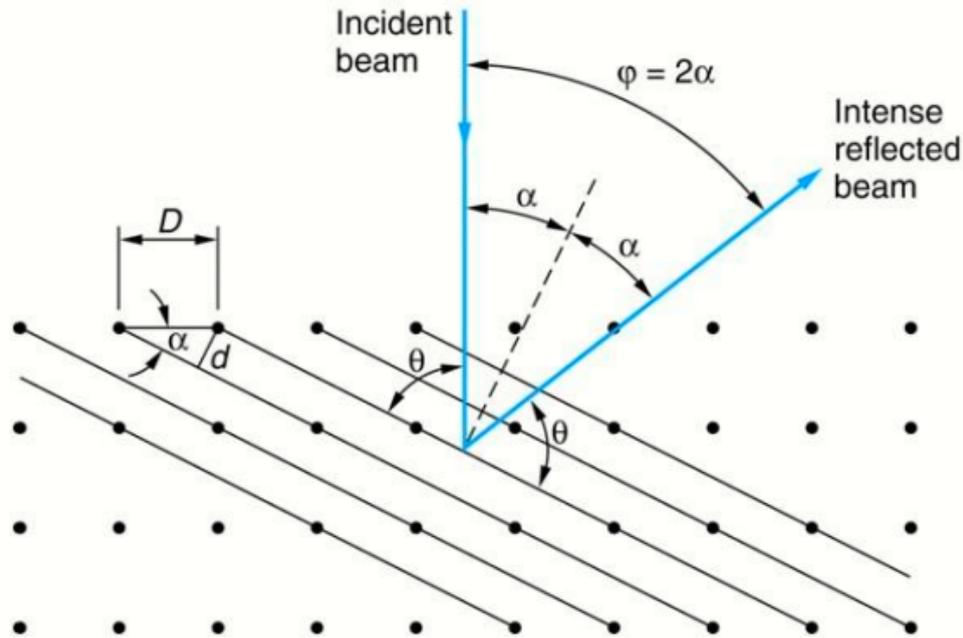
C'erano ancora domande che avevano bisogno di risposte, quindi gli esperimenti continuarono fino al 1927.

Variando la tensione applicata al cannone elettronico, l'intensità massima degli elettroni diffratti dalla superficie atomica è stata trovata a diverse angolazioni. La massima intensità è stata osservata con un angolo $\theta = 53^\circ$ con una tensione di 54 V, quindi una energia cinetica di 54 eV.

Gli angoli di massima riflessione sono dati dalla condizione di Bragg per l'interferenza costruttiva, la legge di Bragg:

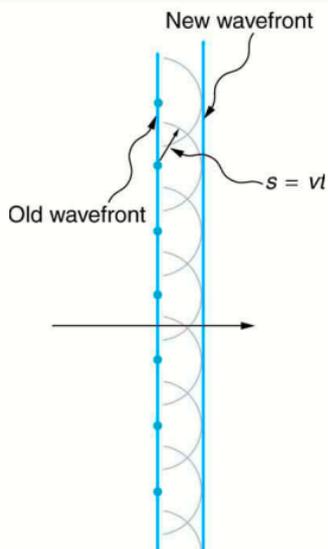
$$n\lambda = 2d \sin (90^\circ - \theta/2),$$

per $n = 1$, $\theta = 53^\circ$ e per la spaziatura dei piani di nichel cristallino ($d = 0,091 \text{ nm}$) ottenuta da precedenti esperimenti di scattering di raggi X sul nichel cristallino.



Secondo la relazione di Broglie, gli elettroni con energia cinetica di 54 eV hanno una lunghezza d'onda di 0,167 nm. Il risultato sperimentale fu di 0,162 nm secondo la legge di Bragg, che corrispondeva molto alle previsioni.

Analisi del video - La Premessa teorica di Alan Holden

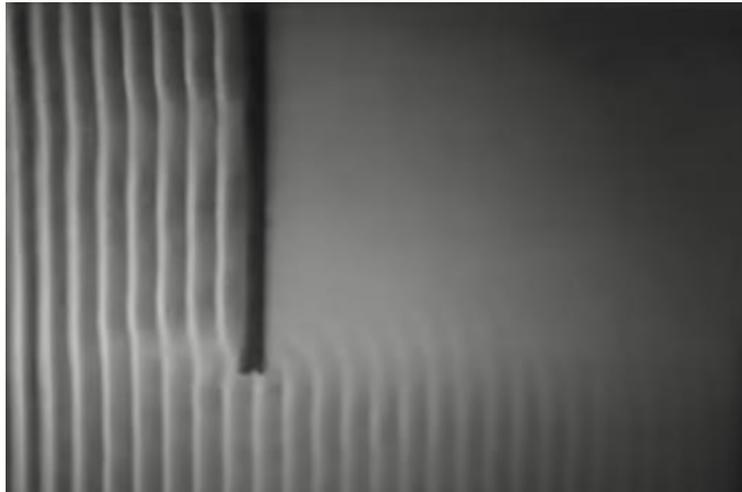


Innanzitutto, è bene ricordare il fenomeno della diffrazione delle onde (se necessario, si invita a guardare la relazione sull'ondoscopio).

Nella fisica classica, il fenomeno della diffrazione è descritto dal principio di Huygens-Fresnel, che tratta ogni punto in un fronte d'onda che si propaga come un insieme di singole wavelet sferiche, ossia oscillazioni ondulatorie con un'ampiezza che inizia a zero, aumenta e poi diminuisce di nuovo a zero (vedi immagine a fianco). Il caratteristico modello di flessione è più pronunciato quando un'onda proveniente da una sorgente coerente (come un laser) incontra una fessura/apertura di dimensioni paragonabili alla sua lunghezza d'onda, infatti, all'allargarsi della fessura, l'effetto è meno pronunciato, fino a diventare inesistente.

Ciò è dovuto all'interferenza di diversi punti sul fronte d'onda (o, equivalentemente, ogni wavelet) che viaggiano per percorsi di diverse lunghezze alla superficie di registrazione.

Ecco che, nel video, Alan Holden ci ricorda l'effetto della diffrazione delle onde meccaniche:



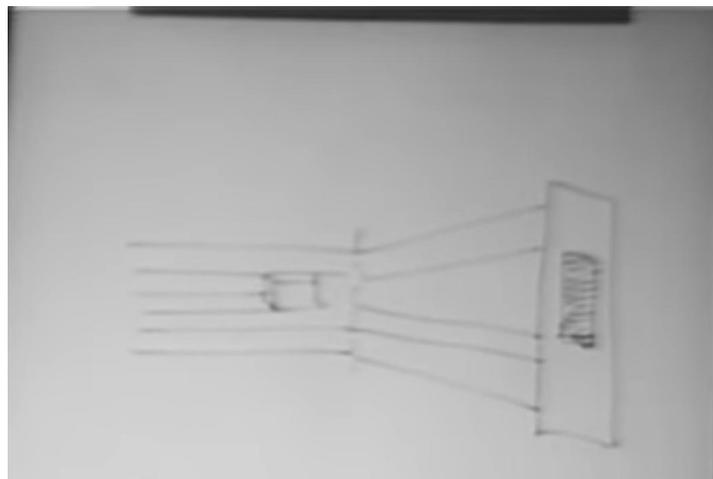
L'effetto della diffrazione viene usato nei **microscopi elettronici**.

Il microscopio elettronico utilizza un fascio di elettroni al posto della luce visibile, utilizzata nei normali microscopi ottici, e le lenti sono sostituite da elettromagneti che deviano il fascio di elettroni, permettendo di ottenere l'ingrandimento e la messa a fuoco dell'immagine.

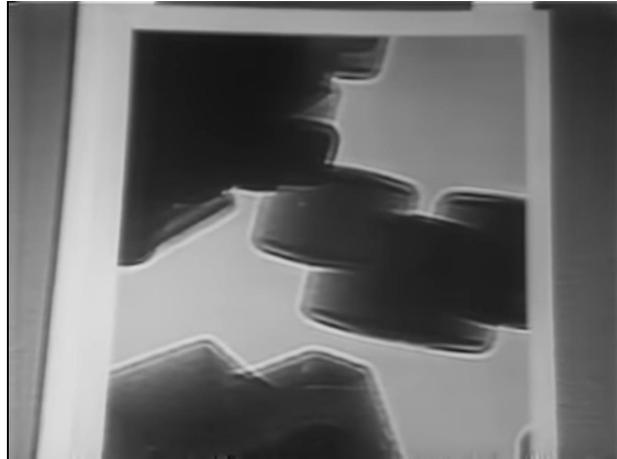
Il principio di funzionamento è questo: inviamo sul campione da analizzare un fascio di elettroni e analizziamo poi le figure di diffrazione che ne scaturiscono.

Il microscopio elettronico è formato da, per l'appunto, una sorgente di elettroni, da una lente che svolge la funzione di condensatore magnetico e che serve a indirizzare il fascio di elettroni sul campione che si desidera osservare, da una lente magnetica che ha la funzione di obiettivo, e infine, da un elemento che serve a raccogliere le immagini restituite dal microscopio, che può quindi essere una lastra fotografica, una pellicola o uno schermo fluorescente.

In un microscopio elettronico la sorgente degli elettroni è rappresentata da un filamento di tungsteno molto sottile. Gli elettroni poi passano nel condensatore magnetico. Il fascio elettronico va poi a colpire il campione da osservare, su cui poi subisce la diffrazione.



Replicando questa azione sul proiettore si può regolare l'ingrandimento stesso dell'immagine. Ecco un'immagine ottenuta dall'analisi di un campione di fumo osservato attraverso un microscopio elettronico che Holden ci mostra:



I contorni dell'ombra, tuttavia, non sono definiti. Gli elettroni non sembrano comportarsi come semplici particelle, ma come onde.



La stessa cosa avviene con la luce: se illumino un oggetto, osservo che i contorni dell'ombra che proietta sono indefiniti, questo perché i fotoni hanno anche natura ondulatoria.

Possibile quindi che gli elettroni abbiano natura ondulatoria?

(Si noti come la lezione segua un procedimento inverso: si è partiti utilizzando il microscopio elettronico, il cui funzionamento si basa sulla natura ondulatoria dell'elettrone, per poi dimostrare come la suddetta natura venne scoperta).

Prendiamo un foglio di plastica dotato di fessure molto piccole, e posizioniamolo sotto uno strato di vetro. Spariamo ora un fascio di luce alla griglia: la superficie rigata riflette alcuni dei raggi luminosi con un angolo uguale a quello di incidenza, ma anche in altre direzioni, dove l'angolo dipende dalla lunghezza d'onda (quindi il colore della luce). Si è dato vita ad un fenomeno di **scattering**.

La luce si disperde formando quindi uno spettro.

Proviamo a filtrare la luce attraverso un filtro rosso: osserviamo solo la parte di spettro rosso; invece, se mettiamo un filtro blu, osserviamo solo la parte di spettro blu.



Rosso (maggiore λ)



Blu (minore λ)

A questo punto, come notato da Alan Holden, se il fascio di particelle si riflette in tutte le direzioni allora la materia ha solo natura corpuscolare, se si riflette all'indietro sotto forma di un raggio, allora le particelle potrebbero avere natura ondulatoria.

Per verificare il comportamento, e quindi la natura delle particelle, utilizziamo una griglia con fessure la cui distanza è comparabile alla lunghezza d'onda cercata.

La luce è, come bene sappiamo, formata da fotoni con ognuno un momento angolare $p=h/\lambda$, quindi $\lambda=h/p$, questo per la legge di De Broglie.

Troviamo quindi la lunghezza d'onda cercata.

Dato che $p=mv$, avremmo bisogno di una massa e una velocità molto piccole: elettrone possiede una massa piccolissima, dell'ordine di 10^{-31} kg.

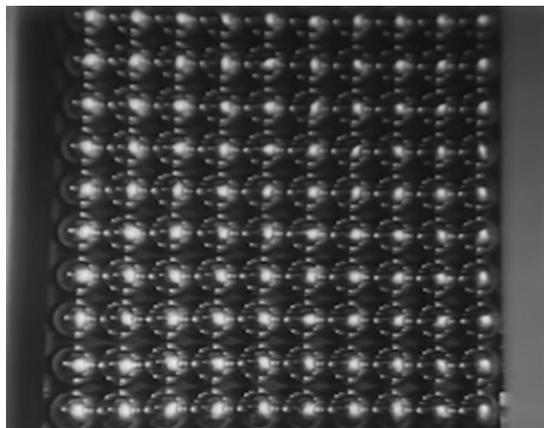
Se accelero un elettrone tramite una differenza di potenziale di 100V allora ottengo che la sua velocità sarà pari a 10^7 m/s.

Quindi si ha una quantità di moto $p=10^{-24}$ kgm/s

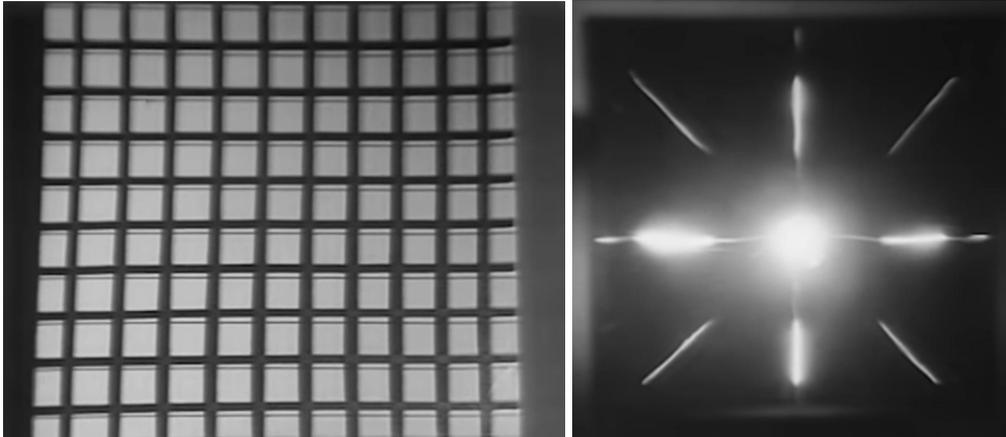
$$\lambda = 10^{-34} \text{ m} / 10^{-24} \text{ m} = 10^{-10} \text{ m}, \text{ che è circa la grandezza di un atomo.}$$

Pertanto, ci servirà una griglia con le righe distanti 10^{-10} m tra loro.

Anche se sembra impossibile ottenere una griglia del genere, essendo che comunque la materia è composta da più atomi, essa si può ottenere considerando semplicemente uno schema di atomi ben ordinato, ossia un cristallo: lo spazio tra gli atomi, infatti è grande più o meno come l'atomo stesso, ed ha quindi una misura dell'ordine di 10^{-10} m.



Se ripeto l'esperimento con la diffrazione della luce di prima con un'altra griglia, che possa esemplificare lo schema del reticolo cristallino, osserviamo uno schema quadrato di questo tipo.



Oltre alle linee di diffrazione orizzontali e verticali, notiamo che vi sono anche quattro linee oblique.

Se pongo un filtro rosso al fascio di luce allora osserverò solo la parte esterna dello schema, quello dello spettro che corrisponde ad una maggiore lunghezza d'onda, quindi al rosso.

Viceversa, con il blu, osservo la parte più interna dello schema, corrispondente ad una minore lunghezza d'onda, quella della luce blu.



Rosso

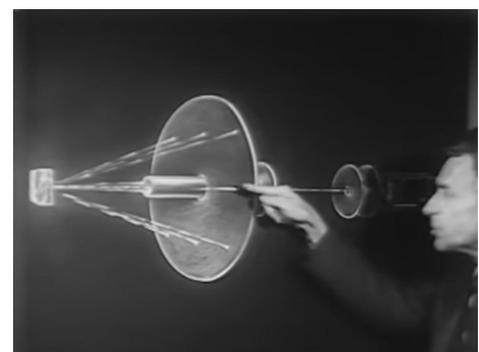
Blu

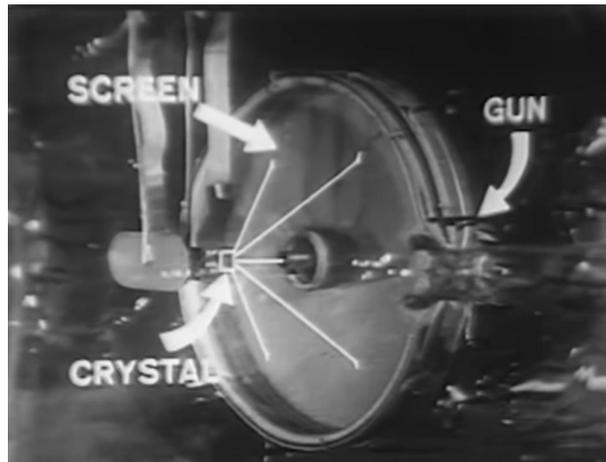
Adoperando un procedimento analogo per gli elettroni, allora, dovremmo osservare un atteggiamento simile: quando acceleriamo gli elettroni, aumentando la loro velocità ed energia, diminuendo così la loro lunghezza d'onda, ci aspetteremmo di osservare solo la parte esterna dello schema di diffrazione.

Procedimento ed elaborazione dei dati

Descriviamo l'apparato (non originale) usato per dimostrare la natura ondulatoria dell'elettrone

Esso è costituito da un cannone elettronico dal quale gli elettroni vengono sparati in un fascio collimato. Questi poi attraversano un tubo. Infine, gli elettroni colpiscono un cristallo, venendo da esso riflessi, e vanno a colpire uno schermo fluorescente. Qui è possibile osservare le posizioni nelle quali gli elettroni si trovano, una volta colpito lo schermo, grazie a dei puntini luminosi.





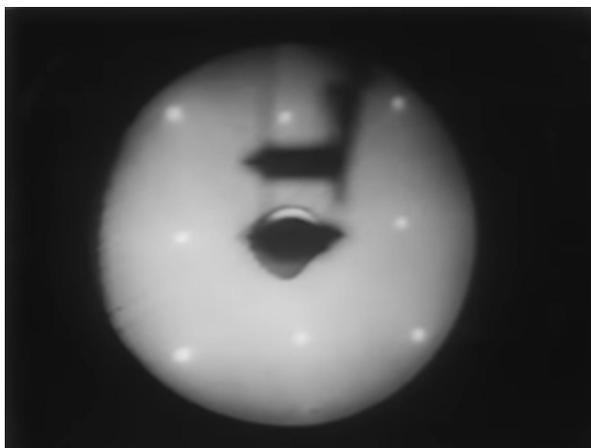
I diversi angoli con i quali vengono riflessi sono determinabili dalle posizioni nelle quali si trovano quando vanno a colpire lo schermo fluorescente.

Con questo dato, è possibile determinare lo schema secondo il quale gli atomi dello strato più esterno del cristallo sono posizionati.

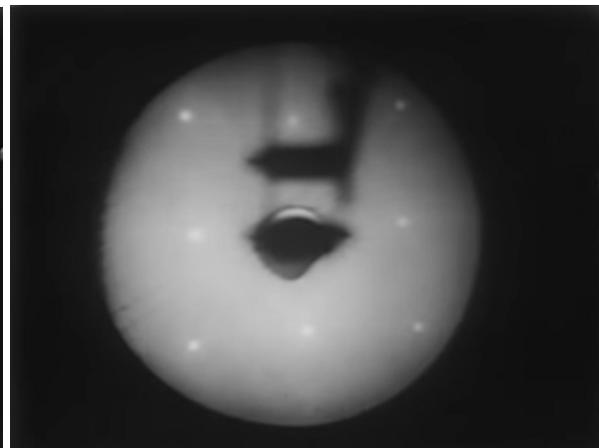
Spegnere le luci quindi per vedere lo schema di diffrazione degli elettroni.

Osserviamo la seguente figura di diffrazione con $\Delta V=40\text{ V}$: è una figura simmetrica, che replica quella degli atomi che compongono lo strato più esterno del cristallo.

Se aumento la ΔV a 47V la figura di diffrazione si stringe.



$\Delta V=40\text{V}$



$\Delta V=47\text{V}$

Il rapporto tra la grandezza dei due schemi osservati è uguale a $\frac{\sqrt{40\text{V}}}{\sqrt{47\text{V}}}$, generalizzando: $\frac{\sqrt{V_1}}{\sqrt{V_2}}$.

Questo è perché l'energia varia in modo direttamente proporzionale al variare del voltaggio, e il momento, invece, varia in base alla radice quadrata del voltaggio.

La lunghezza d'onda quindi varia in modo inversamente proporzionale al variare della radice quadrata del voltaggio.

Posso quindi calcolare la lunghezza d'onda degli elettroni trovando gli angoli con i quali essi vengono riflessi da cristallo (e quindi in base alla posizione che hanno sullo schermo fluorescente), e sapendo la distanza tra gli atomi del cristallo, che è dato noto.

L'esperimento originale

Ora Germer ci mostra l'apparato originale, meno sofisticato, ma altrettanto ingegnoso, utilizzato per condurre l'esperimento che confermò la dualità onda-particella della materia.

La configurazione sperimentale per l'esperimento di Davisson e Germer è racchiusa all'interno di una camera a vuoto. In questo modo la deflessione e la dispersione degli elettroni da parte del mezzo sono impediti. Le parti principali del setup sperimentale sono le seguenti:

Un cannone elettronico, ossia un filamento di tungsteno che emette elettroni tramite emissione termoionica, cioè emette elettroni quando è riscaldato a una particolare temperatura.

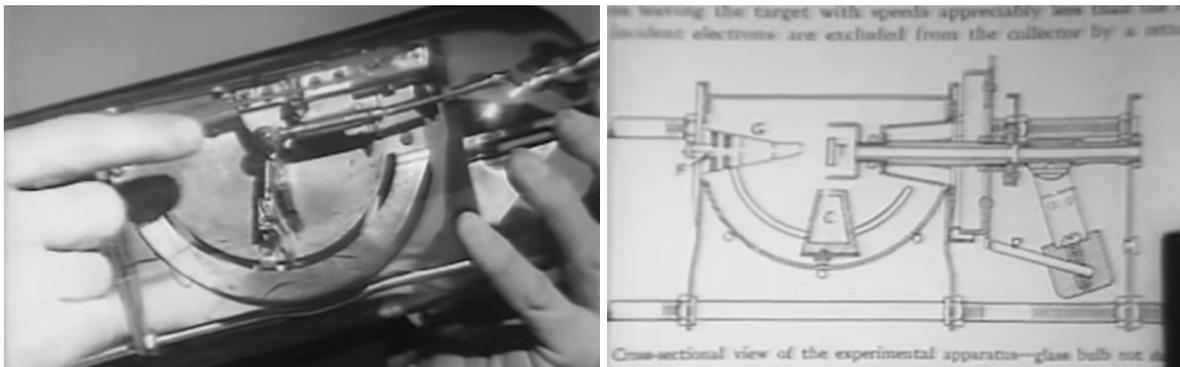
Acceleratore di particelle elettrostatico: due piastre cariche opposte (piastra positiva e negativa) vengono utilizzate per accelerare gli elettroni ad un potenziale noto.

Collimatore: l'acceleratore è racchiuso all'interno di un cilindro che ha uno stretto passaggio per gli elettroni lungo il suo asse. La sua funzione è quella di rendere un fascio stretto e rettilineo (collimato) di elettroni pronto per l'accelerazione.

Un bersaglio, in questo caso un **crystallo di nichel**. Il fascio di elettroni viene sparato normalmente sul crystallo di nichel.

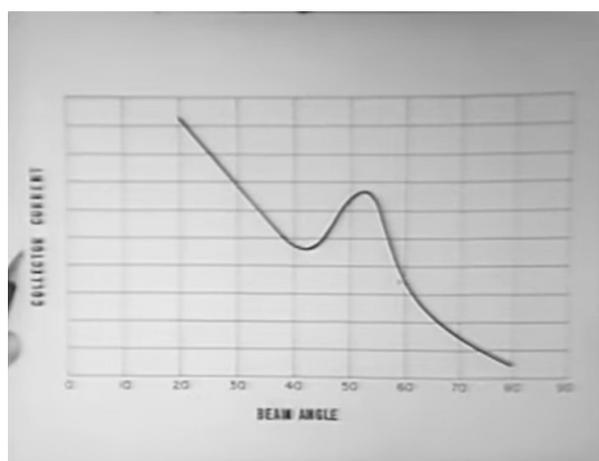
Infine, un **rivelatore** viene utilizzato per catturare gli elettroni dispersi dal crystallo di nichel.

Il rivelatore, che si presenta come una scatoletta, può essere spostato in un arco semicircolare con la semplice forza di gravità.



Il rivelatore utilizzato qui può rilevare solo la presenza di un elettrone sotto forma di particella. Di conseguenza, il rivelatore riceve gli elettroni sotto forma di corrente elettronica. Viene studiata l'intensità (forza) di questa corrente elettronica ricevuta e l'angolo di diffusione. Chiamiamo questa corrente come l'intensità dell'elettrone.

L'intensità degli elettroni diffusi non è continua, ma mostra un valore massimo e un valore minimo corrispondenti ai massimi e ai minimi di un modello di diffrazione prodotto dai raggi X. Per una particolare tensione (54V) si riscontra il massimo valore dell'intensità degli elettroni.

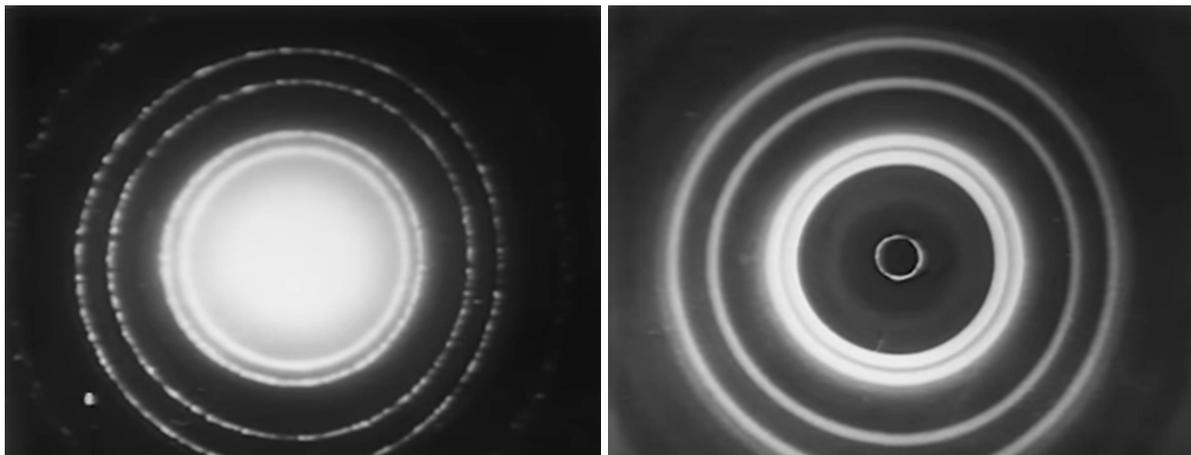


Questo picco nella corrente sarebbe stato evidente, con uno schermo fluorescente, grazie ad un punto luminoso ben nitido.

L'esperimento di G. P. Thomson

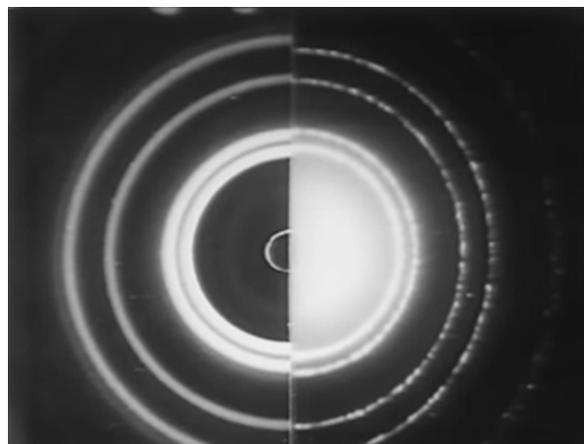
Sempre nel 1927, G. P. Thomson, figlio di J. J. Thomson, riportò i suoi esperimenti, in cui un fascio di elettroni sparati ad alto voltaggio veniva diffratto da una sottile lamina d'oro (policristallina).

Thomson osservò uno schema di diffrazione molto simile a quello dei raggi X realizzato con campioni in polvere (policristallini).



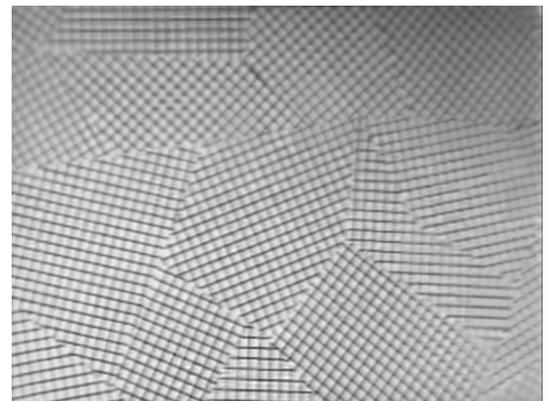
Elettroni

Raggi X



Questo tipo di diffrazione, da molti cristalli orientati casualmente (esemplificato nella figura a fianco) produce, per l'appunto, figure ad anelli.

Se la lunghezza d'onda degli elettroni viene modificata cambiando la loro energia incidente, i diametri degli anelli di diffrazione cambiano proporzionalmente, come previsto dalla legge di Bragg.



Conclusione e osservazioni finali

La visione di questo filmato ci ha permesso di capire da vicino e “dal vivo” una scoperta fondamentale per lo sviluppo della fisica e della meccanica quantistica, nonché di approfondire le conoscenze già acquisite.

La dualità onda-particella è un tassello basilare della teoria quantistica, ma che ancora risulta affascinante e anche alquanto controintuitiva, pertanto è importante conoscerne la base teorica e sperimentale.