

1924 Louis de Broglie: dualismo onda-particella

Ipotesi di de Broglie: la materia può comportarsi come un'onda. Ad ogni particella che si muove con quantità di moto p , viene associata un'onda piana di lunghezza d'onda

$$\lambda = \frac{h}{p}$$



Louis-Victor de Broglie (1892 – 1987), premio Nobel nel 1929

- La radiazione presenta aspetti ondulatori e corpuscolari.
- Per simmetria ci si può aspettare che anche la materia si comporti sia come corpuscolo sia come onda.
- **Ma da dove si ricava la relazione di de Broglie?**

Ricaviamo la relazione di de Broglie per il fotone: mettiamo a confronto la formula relativistica della conservazione dell'energia $E = mc^2$ con la formula di Planck $E = h\nu$

$$\begin{aligned}
 mc^2 &= h\nu & \nu & \text{frequenza} & \nu &= c/\lambda \\
 mc^2 &= hc/\lambda \\
 mc &= h/\lambda \\
 \lambda &= h/mc & (mc = p & \text{è la quantità di moto del fotone!!}) \\
 \lambda &= h/p
 \end{aligned}$$

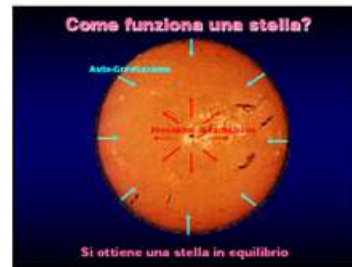
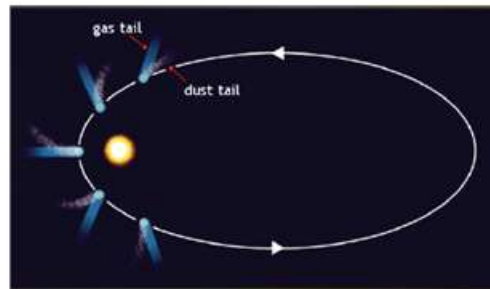
(2)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

Il fotone possiede una quantità di moto? La pressione di radiazione

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mc}$$

- Il fotone possiede una massa? Sì, è massa-energia
- Ma allora il fotone possiede una quantità di moto? Sì, è la massa-energia moltiplicata per la velocità della luce.
- Ma allora il fotone può esercitare una pressione! Sì.
 - Così si spiega il verso della coda delle comete
 - Così si spiega l'equilibrio delle stelle nella sequenza principale HR
 - Così vengono raffreddati gli atomi fino a temperature dell'ordine del millikelvin



(3)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

... torniamo all'elettrone

Qual è la lunghezza d'onda associata a una particella?

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Esempio: qual è la lunghezza d'onda associata a un elettrone che si muove alla velocità $v=10^7$ m/s ?

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js})}{(9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(10^7 \text{ m/s})} = 7.28 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Più piccola della dimensione di un atomo!!
In un atomo l'elettrone si può comportare come un'onda.

Da notare la dipendenza da m : maggiore è la massa, minore è la lunghezza d'onda della particella, minore è la possibilità che si comporti come un'onda



Louis-Victor Pierre Raymond de Broglie

Perché a de Broglie venne in mente che l'elettrone potesse comportarsi come onda

Cenni biografici

Laureatosi in Storia all'età di diciotto anni, passò alla fisica teorica e si laureò nel 1913.

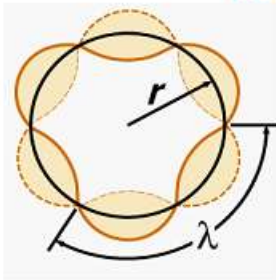
Esperto di telecomunicazioni (onde), durante la 1ª guerra mondiale si arruolò come addetto telegrafico, prestando servizio alla stazione della Torre Eiffel. Successivamente collaborò con il fratello fisico Maurice agli **studi sui raggi X (onde)**.

Ottenne il dottorato in Fisica nel 1924 con la tesi **Recherches sur la théorie des quanta** dove avanzava la sua ipotesi delle onde di elettroni e la cosiddetta dualità onda-particella.

Il comportamento ondulatorio degli elettroni fu confermato sperimentalmente nel 1927 da Davisson, Germer e Kunsman negli Stati Uniti e da G. P. Thomson (figlio di J. J. Thomson) in Scozia. Per questo suo lavoro De Broglie ottenne il *Premio Nobel* nel 1929.

Per inciso: J.J.Thomson, padre, ebbe il premio Nobel nel 1906 per aver dimostrato le proprietà corpuscolari dei raggi catodici, cioè degli elettroni, George Paget Thomson, figlio, fu premiato con il Nobel nel 1937 per aver dimostrato ... le proprietà ondulatorie dell'elettrone.

Le onde di materia spiegano la quantizzazione delle orbite!



Per l'elettrone su un'orbita l'ipotesi di de Broglie equivale ad imporre la condizione di **onda stazionaria lungo la circonferenza**: sono **permesse solo le orbite che hanno una lunghezza pari a un multiplo intero di λ** .

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$n\lambda = 2\pi r$$

Ma così si ottiene la giustificazione teorica del modello di Bohr, cioè la quantizzazione delle orbite:

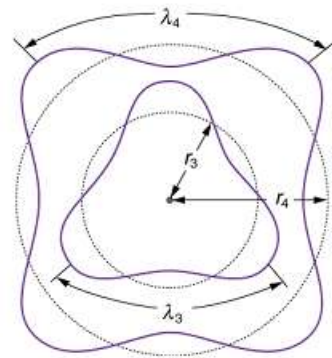
$$n\lambda = n \frac{h}{mv}$$

$$2\pi r = n \frac{h}{mv}$$

$$r = n \frac{h}{2\pi mv}$$

$$r_n = n \frac{\hbar}{mv}$$

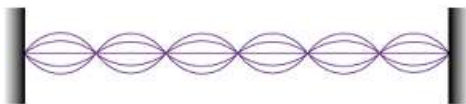
I raggi sono quantizzati, cioè non tutte le distanze dal nucleo sono permesse



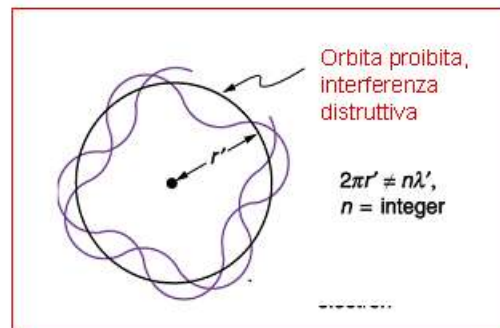
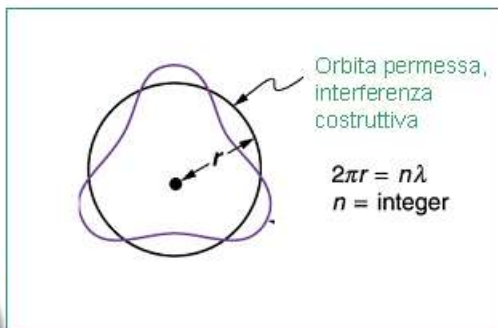
(6)

Onde stazionarie

Onde stazionarie su una corda vincolata agli estremi e ...



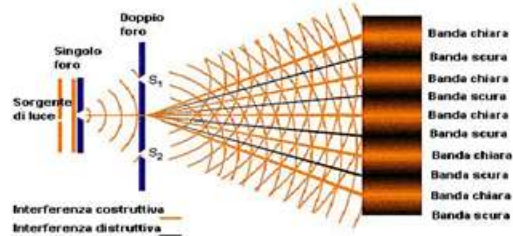
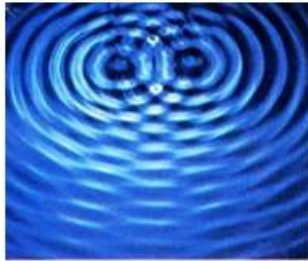
... onde stazionarie su un'orbita di Bohr



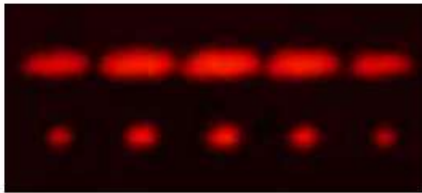
(7)

Se un elettrone fosse un'onda dovrebbe produrre interferenza o diffrazione

interferenza



diffrazione



Ma quale fenditura possiamo usare per l'elettrone?

- Quanto può essere larga la fenditura perché l'elettrone passando attraverso formi una figura di diffrazione? Deve essere di dimensioni paragonabili alla λ dell'elettrone ...
- Calcolo la lunghezza d'onda λ di un elettrone mediante la formula di de Broglie $\lambda = h/mv$. Supponendo che l'elettrone abbia energia cinetica $E_c = 100 \text{ eV}$

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} \quad mv = \sqrt{2mE_c}$$

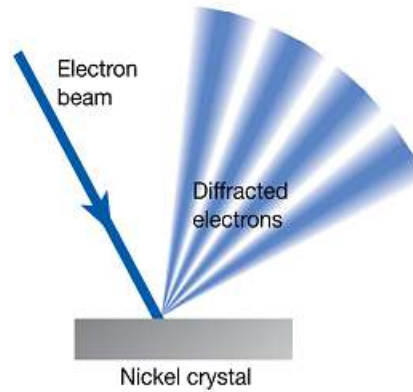
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}}$$

$$\lambda = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{\sqrt{2 \cdot 9 \cdot 10^{-31} \cdot 100 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}} = 0,12 \text{ nm} = 1,2 \text{ \AA}$$

Quindi gli elettroni hanno λ paragonabili a quella delle distanze interatomiche!
Davidson e Germer usarono i cristalli come reticoli di diffrazione.

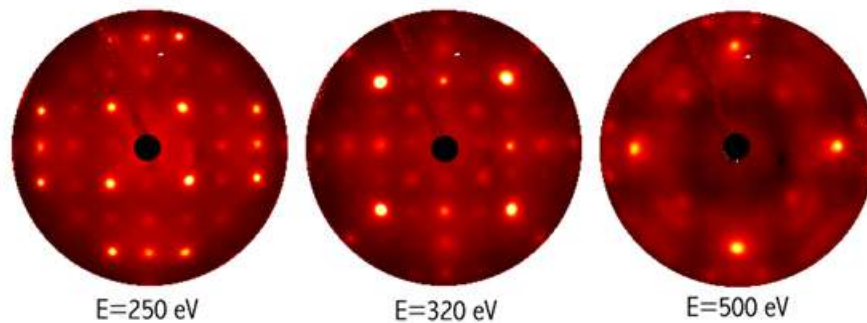
1927 Davidson e Germer esperimento di diffrazione degli elettrone

Davisson e Germer nel 1927 inviarono un fascio di elettroni su un cristallo di Nichel e misurarono la distribuzione degli elettroni diffusi.

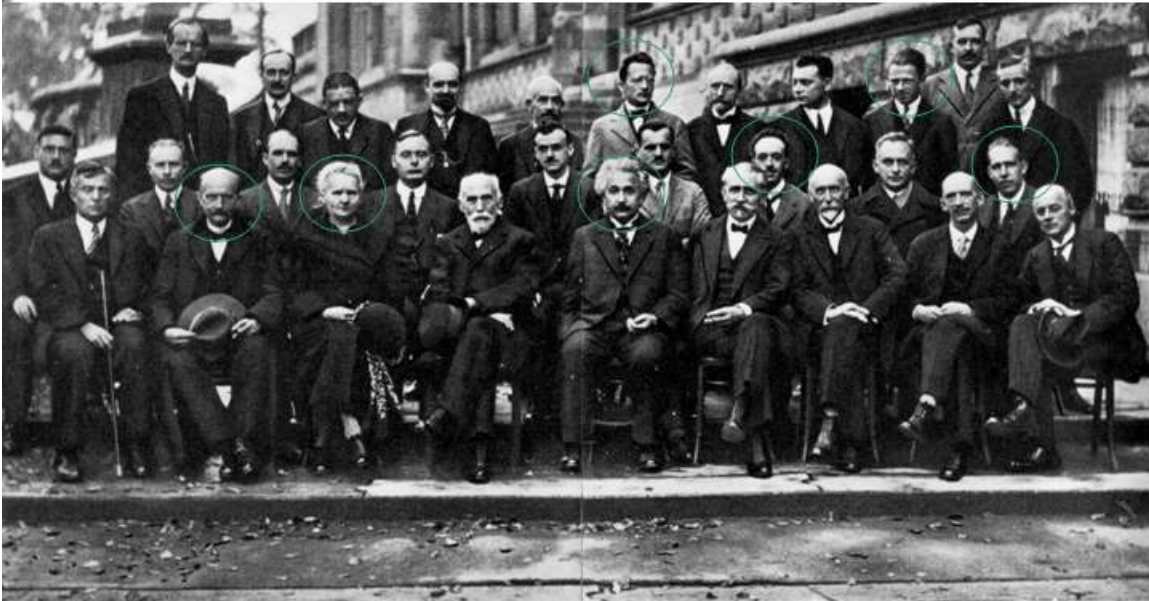


Trovarono una distribuzione di elettroni con dei massimi e dei minimi disposti regolarmente.

Figure di diffrazione di elettroni lenti da un cristallo di MgO.



Congresso Solvay Elettroni e fotoni Bruxelles, ottobre 1927



Photographie Benjamin Coupria

28, Avenue Louise, Bruxelles

A. PICCARD	E. HENRIOT	ED. HERZEN	TH. DE DONDER	E. SCHROEDINGER	W. PAULI	W. HEISENBERG	L. BRILLOUIN
	P. EHRENFEST			E. VERSCHAFFELY			
F. DEBYE	M. KNUDSEN	W. L. BRAGG	H. A. KRAMERS	P. A. M. DIRAC	A. H. COMPTON	L. V. DE BROSLIE	M. BORN
N. BOHR							
L. LANZMEIR	M. PLANCK	MADAME CURIE	H. A. LORENTZ	A. EINSTEIN	P. LANGEVIN	CH. E. GUYE	C. T. R. WILSON
							O. W. RICHARDSON



Per approfondire

Stessa λ degli elettroni

I misteriosi raggi di frenamento: onde o particelle?

Nel 1895 il fisico tedesco Röntgen studiando le proprietà dei raggi catodici trovò che questi, decelerati bruscamente da un ostacolo, davano origine a radiazioni sconosciute che chiamò raggi X.

Wilhelm Conrad
Röntgen
(1845 - 1923)

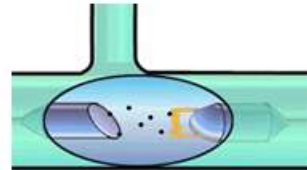
La scoperta dei raggi X

I raggi X rendevano fluorescenti alcuni composti e impressionavano le pellicole fotografiche e non venivano deviati da campi elettrici o magnetici.

I raggi X vengono anche detti **radiazione di frenamento** o **Bremsstrahlung**.



la mano di Bertha Röntgen 1895



Per approfondire

Dato che la λ degli elettroni è confrontabile con quella di raggi X di uguale energia si possono confrontare le figure di diffrazione create da due fasci di e^- e raggi X inviati sullo stesso bersaglio:

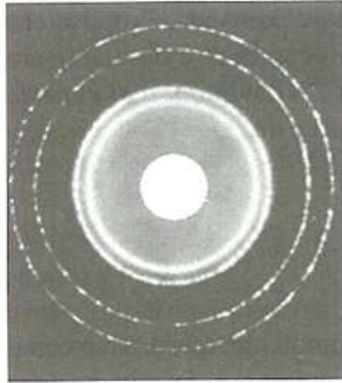


Figura di diffrazione di un fascio di raggi X

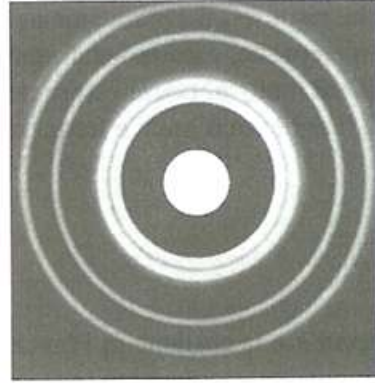


Figura di diffrazione di un fascio di elettroni