

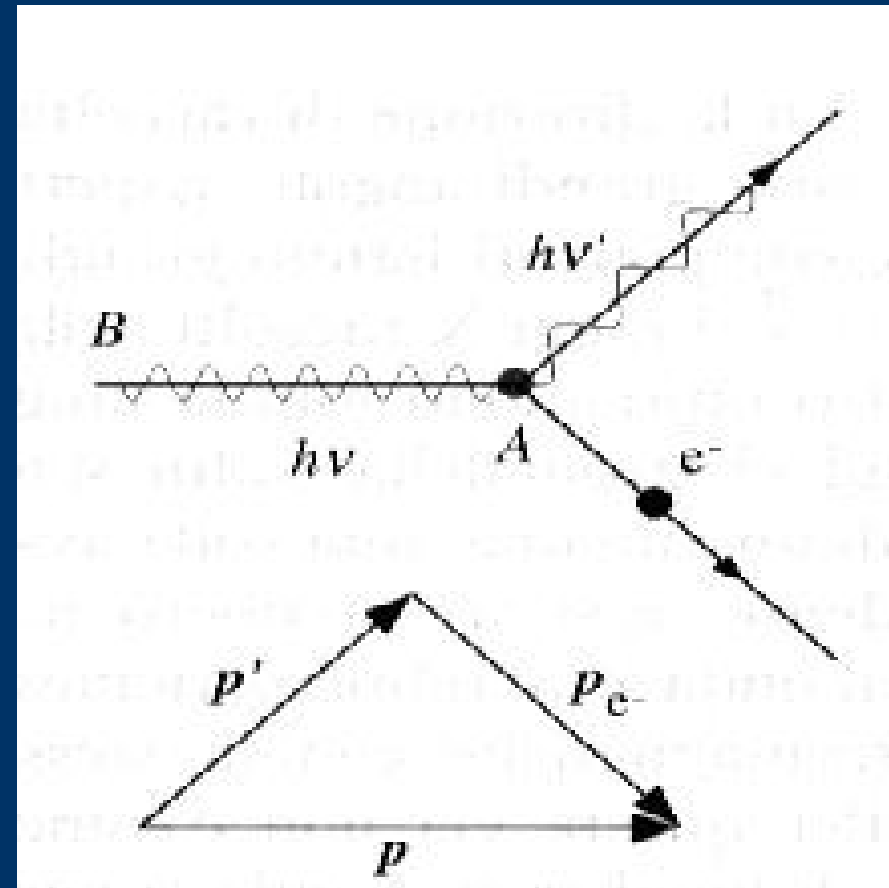
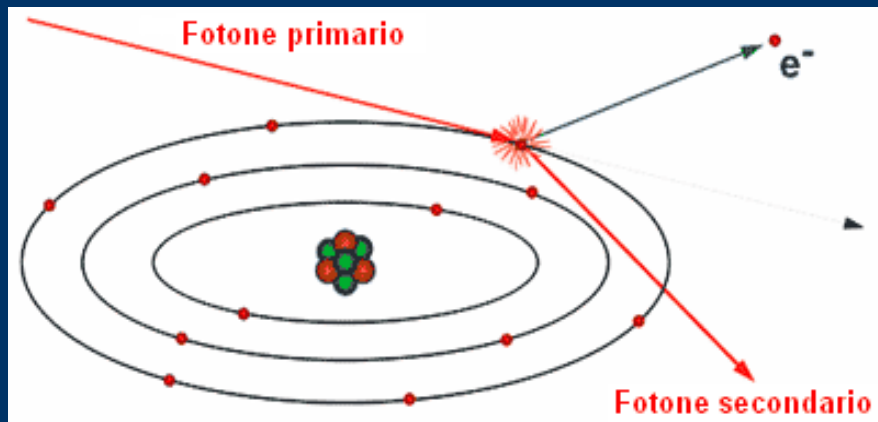
L'effetto Compton (1923)

- Conferma la natura **quantizzata** della radiazione elettromagnetica (raggi X)
- Conferma la natura “**corpuscolare**” dei quanti di radiazione che si comportano come particelle dotate di energia E e di quantità di moto “ p ”:

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

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

Un fascio di raggi X viene indirizzato contro un bersaglio di grafite. I “quanti” che colpiscono un elettrone sono diffusi ad energia minore: l'elettrone acquista quantità di moto. Il fenomeno rispetta la conservazione dell'energia e della quantità di moto “p” come se fosse avvenuto un **URTO ELASTICO tra **DUE PARTICELLE !!!****



Le “onde” di de Broglie (1924)

(La natura è simmetrica e ordinata...)

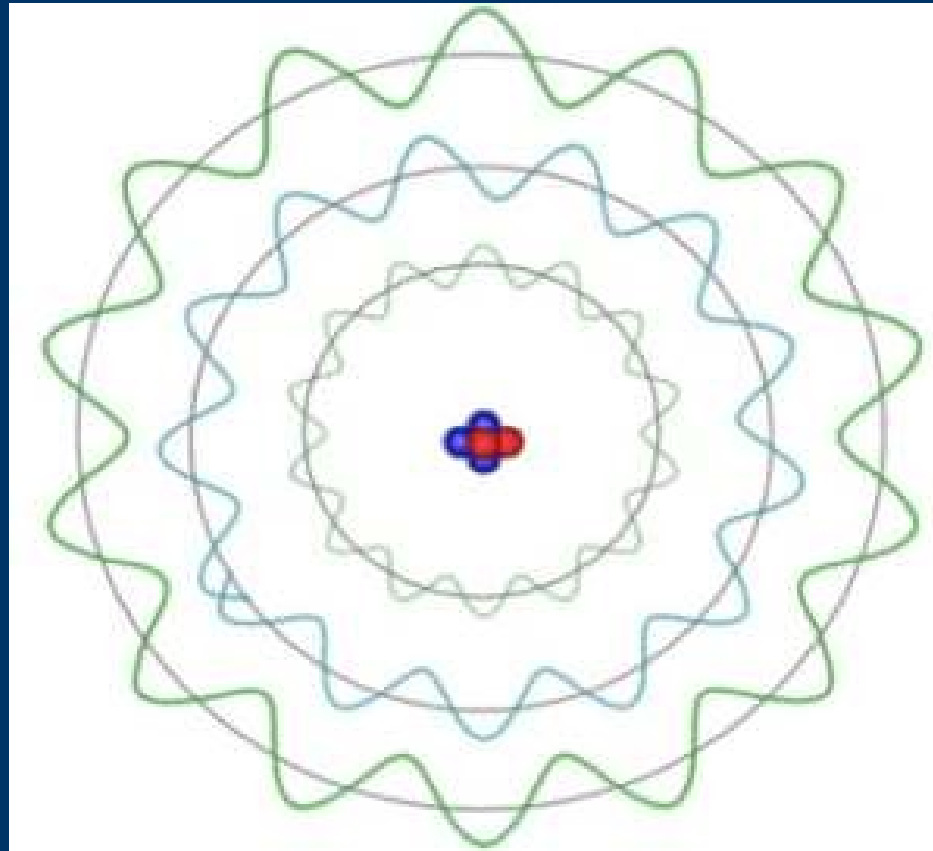
- Se la radiazione e.m. (luce, raggi X ...) che è sempre stata considerata un'onda (interferenza e diffrazione, doppia fenditura, Young 1801) manifesta una natura “corpuscolare” al punto da avere una quantità di moto “ $p = mv$ ” ...

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

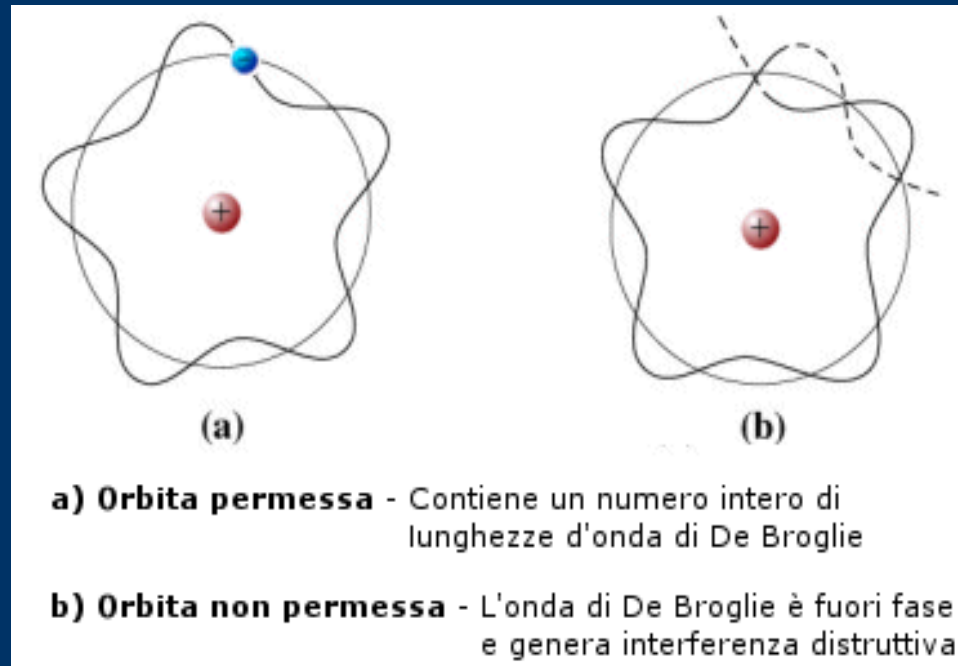
- ... allora le particelle di massa “m” potrebbero manifestare una natura “ondulatoria” ed essere associate ad un'onda di lunghezza d'onda:

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

- L'elettrone “in orbita” attorno al nucleo dell'atomo potrebbe essere pensato come un'**onda stazionaria** ...



Ritroviamo la quantizzazione del momento angolare !!!!!!!!!!!



$$2\pi R = n\lambda \quad \text{Sostituendo: } p = \frac{h}{\lambda}$$

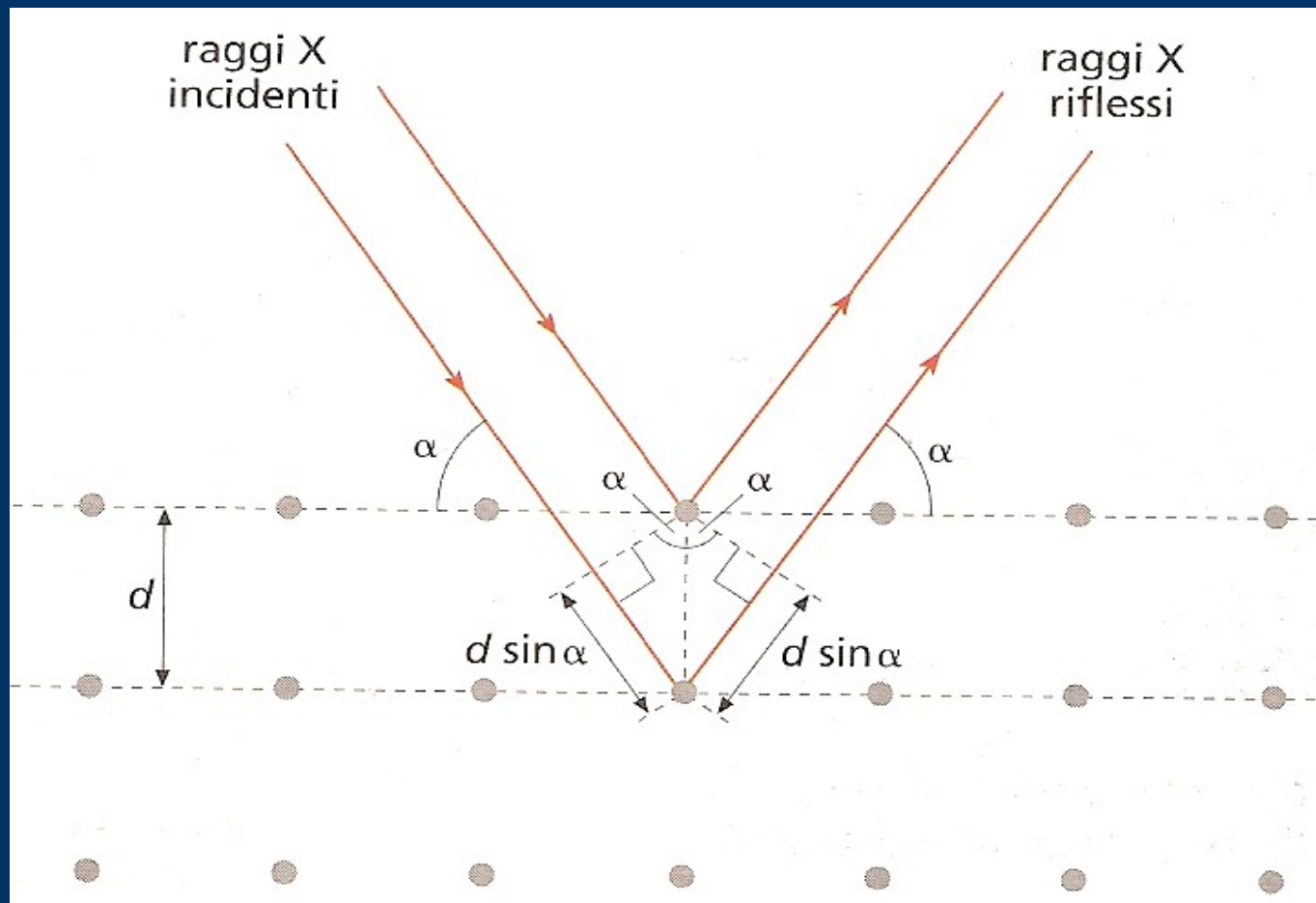
$$\frac{2\pi R p}{h} = \frac{2\pi R m v}{h} = n \rightarrow \text{condizione di Bohr di quantizzazione del momento angolare !!}$$

$$m v R = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Onde di che cosa ??

- Come **dimostrare** l'ipotesi di de Broglie ??
 - Che tipo di “onde” sono quelle associate ai corpuscoli ?? **NON SONO ONDE e.m. !!!**
 - Perché non ci accorgiamo delle onde associate ai “corpuscoli” ?? (risposta facile: a un corpo di 10 kg è associata un'onda con lunghezza d'onda di **10^{-34} m** e per visualizzarne gli effetti di interferenza occorrerebbero fenditure di dimensione analoga ...)
-
-

- I raggi X hanno λ di circa 1 \AA o anche meno
- I reticoli cristallini hanno atomi separati da distanze analoghe e quindi si possono comportare come fenditure alla Young
- Raggi X che colpiscono cristalli, mostrano fenomeni di diffrazione



Diffrazione degli elettroni (1927)

(Esperimento di Davisson- Germer e di George Thomson)

Un fascio di ELETTRONI viene sparato su un **sottile cristallo di Nichel** che, per la sua disposizione ordinata degli atomi, distanti tra loro circa 10^{-10} m, si comporta come una successione di fenditure alla Young. Si ottiene una figura di DIFFRAZIONE in accordo con l'equazione di de Broglie.....gli elettroni si possono comportare come onde

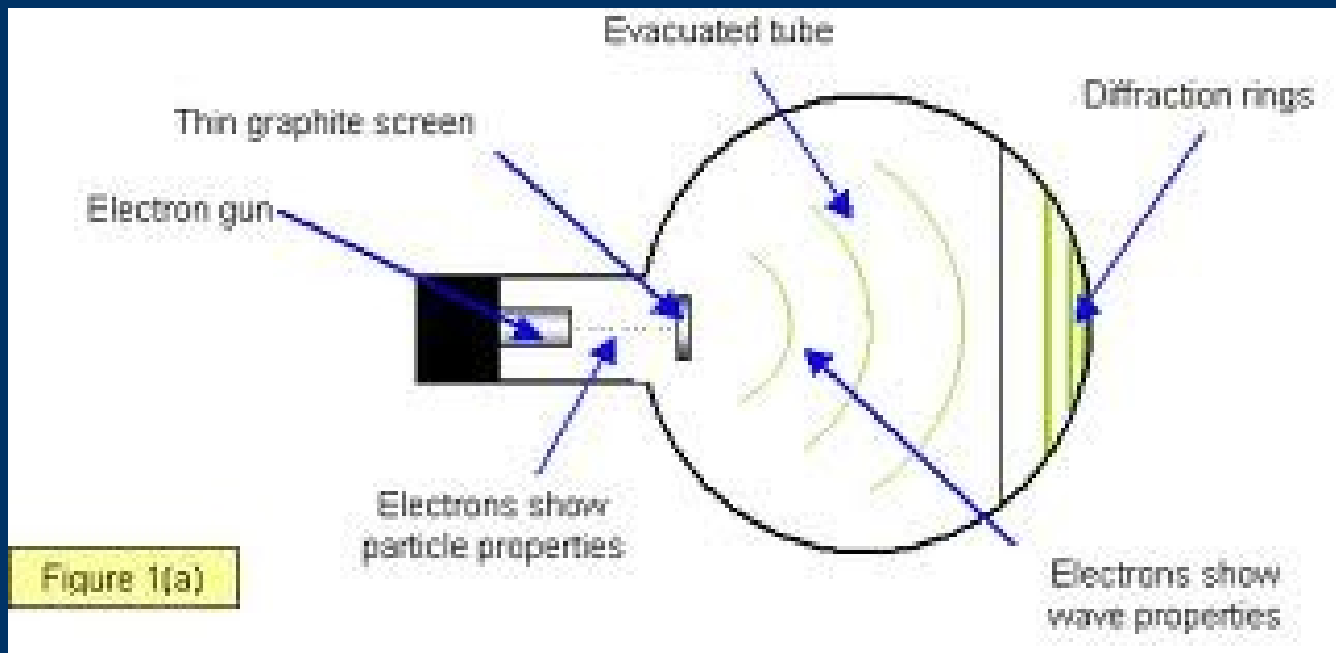
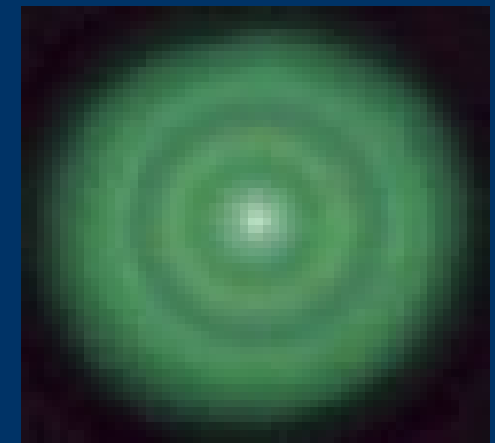


Figure 1(a)

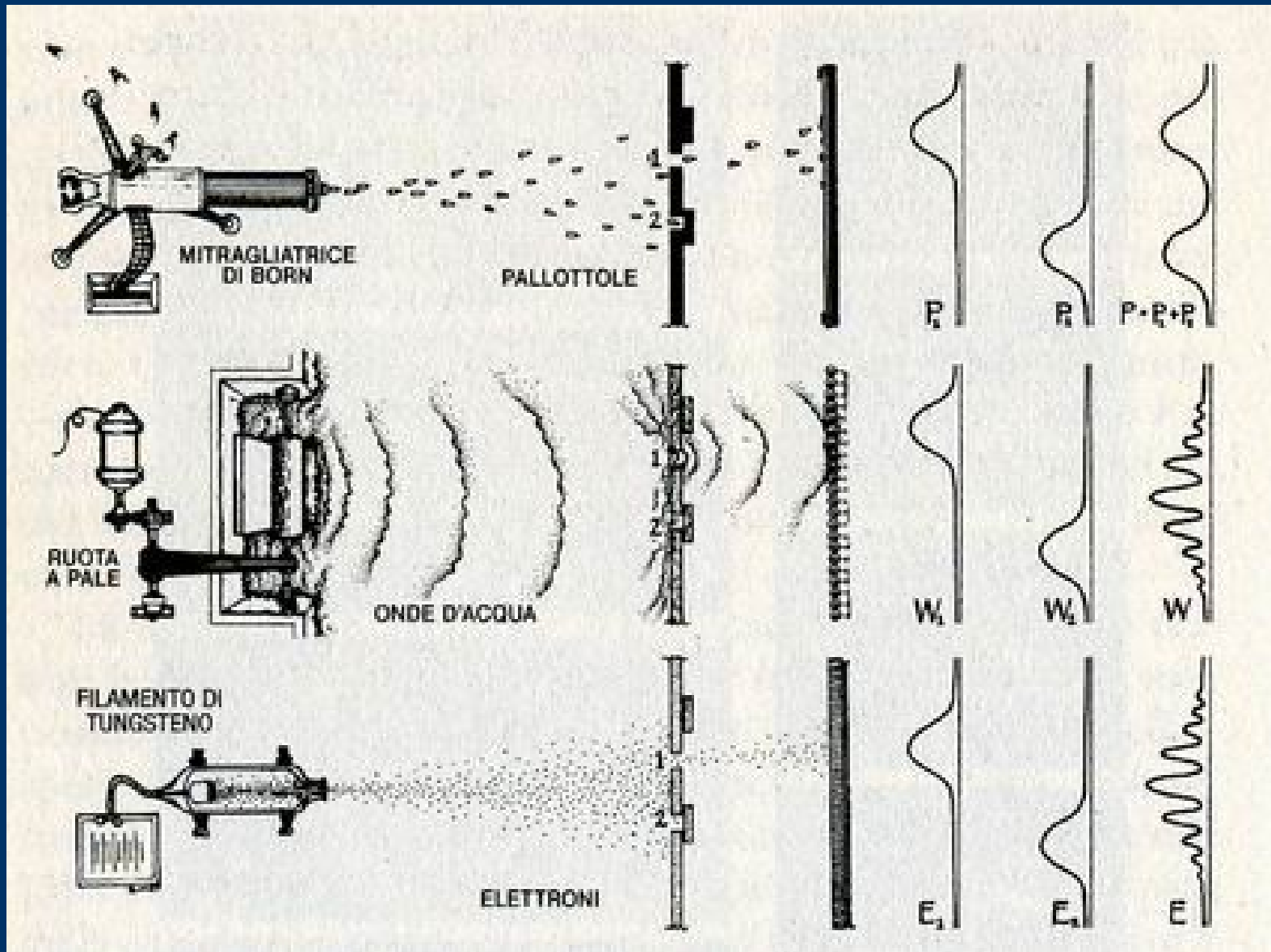


... curiosità quantistiche

- Nel 1906 *Joseph J. Thomson* ricevette il premio Nobel per aver dimostrato l'esistenza dell'elettrone e la sua natura **corpuscolare**.
 - Nel 1937 suo figlio, *George P. Thomson*, ricevette il premio Nobel per aver dimostrato che l'elettrone é **un'onda**.
-
-

Dualismo onda-corpuscolo

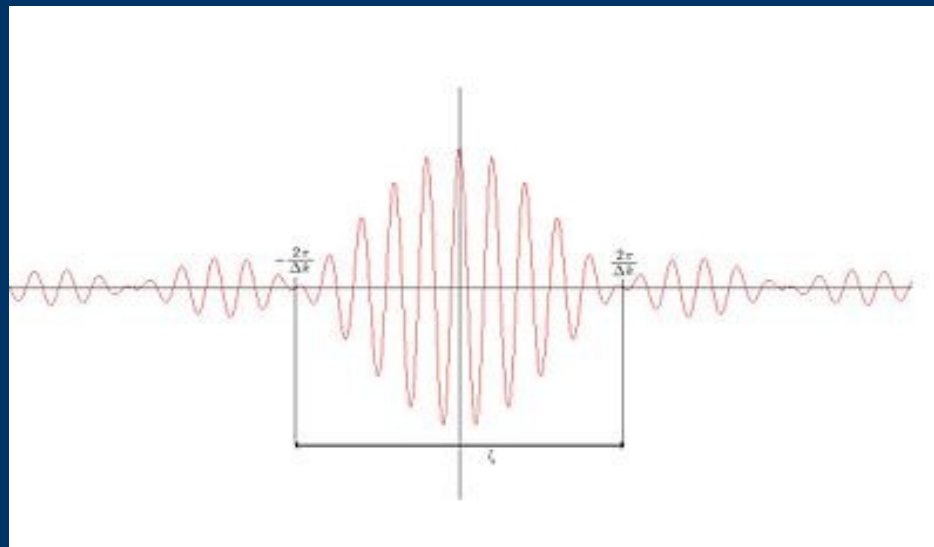
(come passare contemporaneamente per due porte ...)



L'equazione d'onda di Schrödinger (1926)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

- Ogni particella quantistica non è solo un corpuscolo materiale puntiforme, ma anche un “**pacchetto d'onda**” (NON elettromagnetiche...) **localizzato** in un segmento limitato di spazio (un'onda “localizzata” è un paradosso in fisica classica).



Onde di ... probabilità !!!

- La soluzione di questa equazione si dice FUNZIONE D'ONDA $\Psi(x,t)$ e contiene l'informazione sull'evoluzione spazio-temporale dell'onda-particella nel tempo
 - Ma...di che tipo di onde si sta parlando ??
Sono **ONDE DI PROBABILITA'** !!!!!
 - Il modulo al quadrato della funzione d'onda $|\Psi|^2$ ha il significato di **PROBABILITA'** di trovare il corpuscolo-onda in un dato punto (un volume unitario) in un dato istante (intervallo di tempo).
-
-

- La meccanica quantistica rinuncia al DETERMINISMO della fisica classica: non si può dire **dove E'** una particella in un dato istante, ma solo **dove E' PROBABILE che sia...**

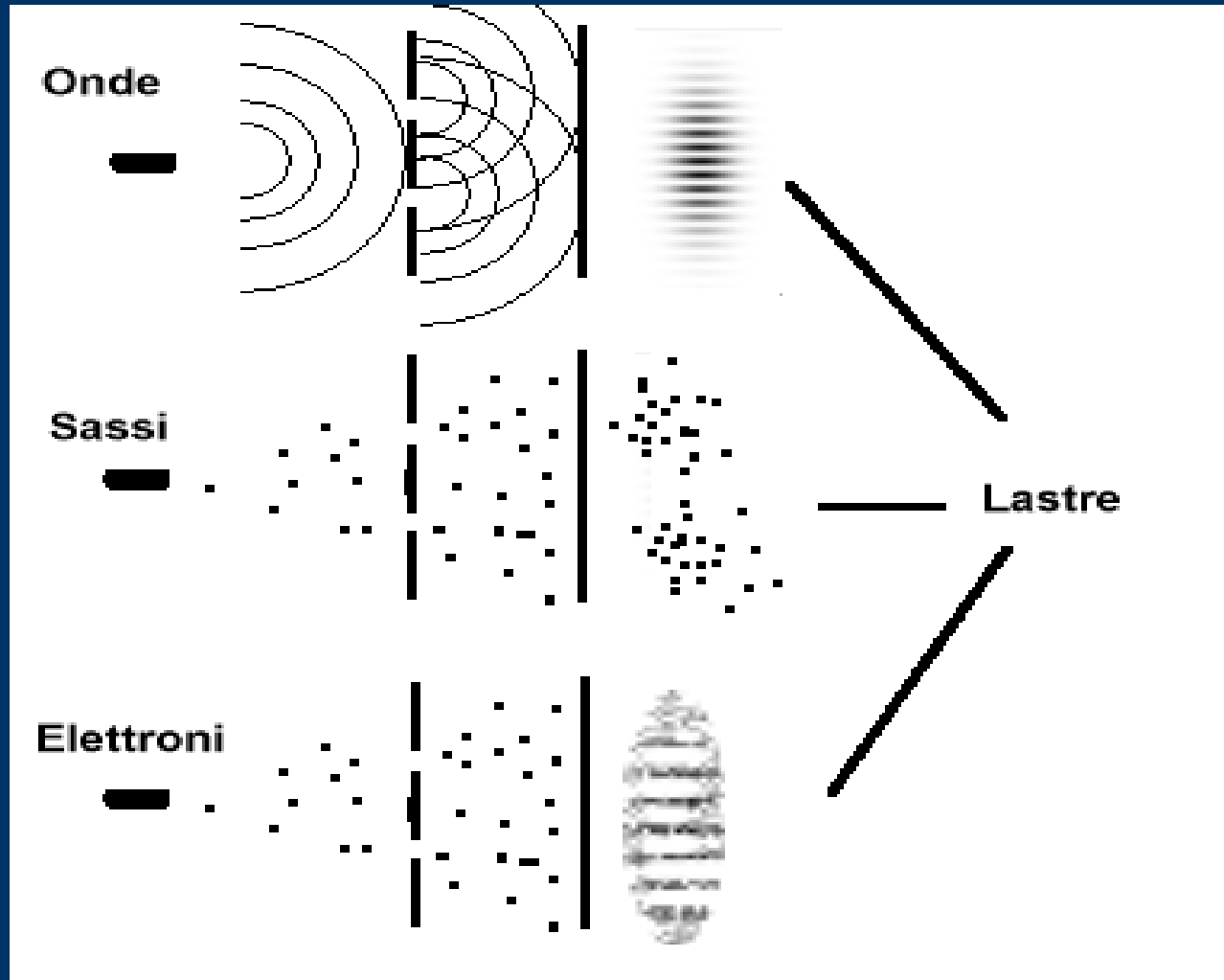
Il modulo quadro della funzione d'onda $|\Psi(x,t)|^2$ ci fornisce questa probabilità.

- L'intervento di uno sperimentatore che tenti di misurare la posizione di una particella con uno strumento **perturba però la funzione d'onda**: tutte le probabilità possibili si riducono ad una sola, relativamente al punto dove la particella è stata individuata.
Si parla, in questo caso, di COLLASSO DELLA FUNZIONE D'ONDA $\Psi(x,t)$ che ora fornisce un UNICO valore (probabilità = 100% di trovare la particella lì dove è stata “osservata”).
-
-

- La TRAIETTORIA di una particella non esiste prima dell'osservazione (natura ondulatoria). Viene determinata solo dall'osservazione, e contemporaneamente **DISTRUTTA** da essa.
 - Nel passaggio da due fenditure, l'elettrone crea una figura di interferenza come se passasse contemporaneamente da entrambe (**natura ondulatoria di fronte alle fenditure**). Ciò avviene anche se la sorgente sparasse UN SOLO ELETTRONE ALLA VOLTA. Si crea anche così, per accumulo di punti successivi sullo schermo (**natura corpuscolare all'arrivo sullo schermo**) una figura di interferenza.
Ma ... da quale fenditura passa l'elettrone ??
-
-

Dualismo onda-corpuscolo

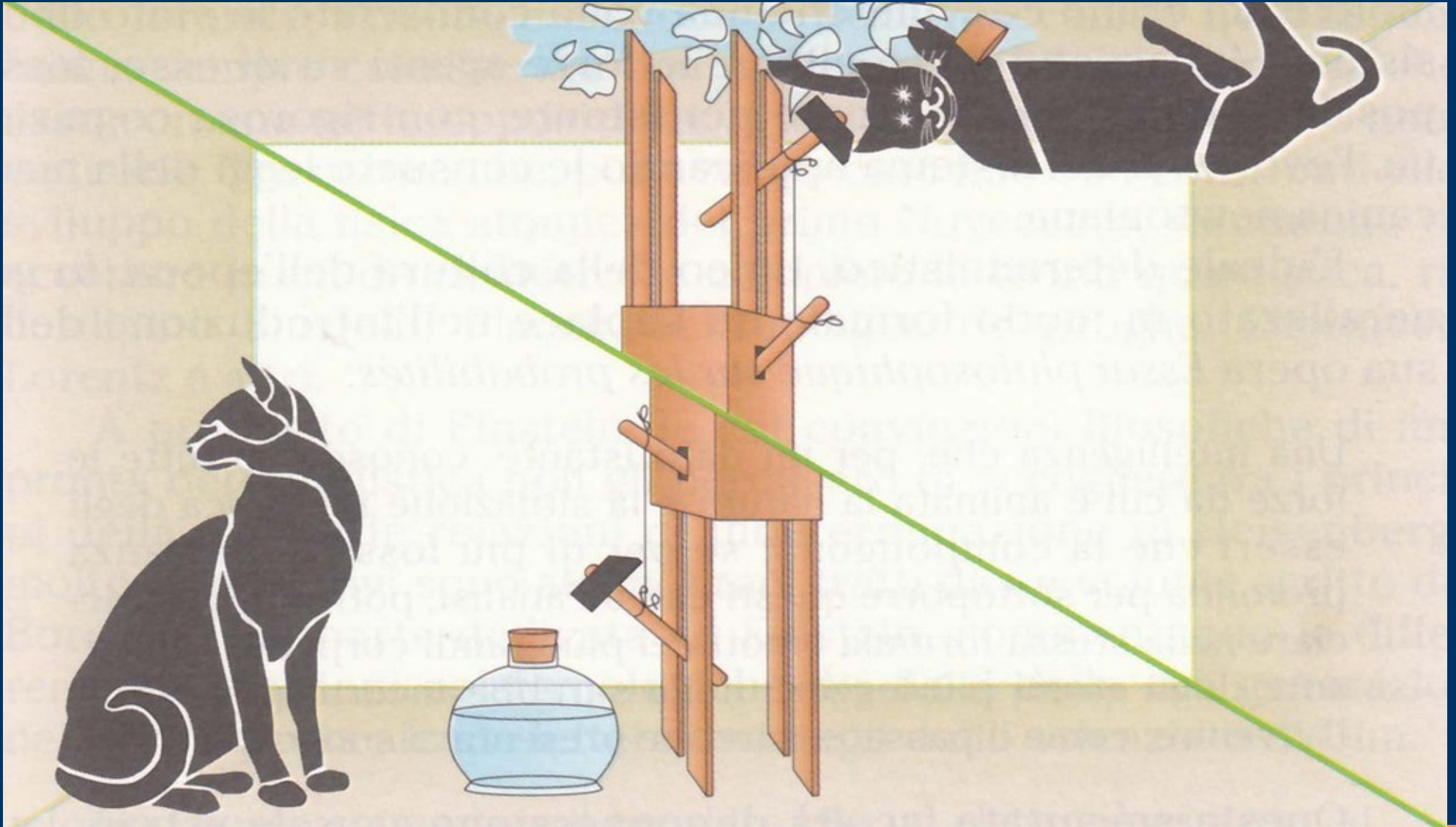
(anche se gli elettroni arrivano uno alla volta, sullo schermo si forma una figura di interferenza)



- Se cerco di scoprire da quale fenditura passa l'elettrone mettendo un rilevatore PRIMA delle due fenditure, la misura fa collassare la funzione d'onda, l'elettrone manifesta natura corpuscolare e la figura di interferenza viene **DISTRUTTA**
 - E' quindi l'**osservatore che determina** la NATURA delle particelle o del quanto di radiazione e.m. (effetto fotoelettrico, effetto Compton, doppia fenditura).
Siamo quindi in presenza di un DUALISMO ONDA-CORPUSCOLO in cui l'**osservatore gioca un ruolo fondamentale** in una descrizione fisica di stampo PROBABILISTICO !!!
-
-

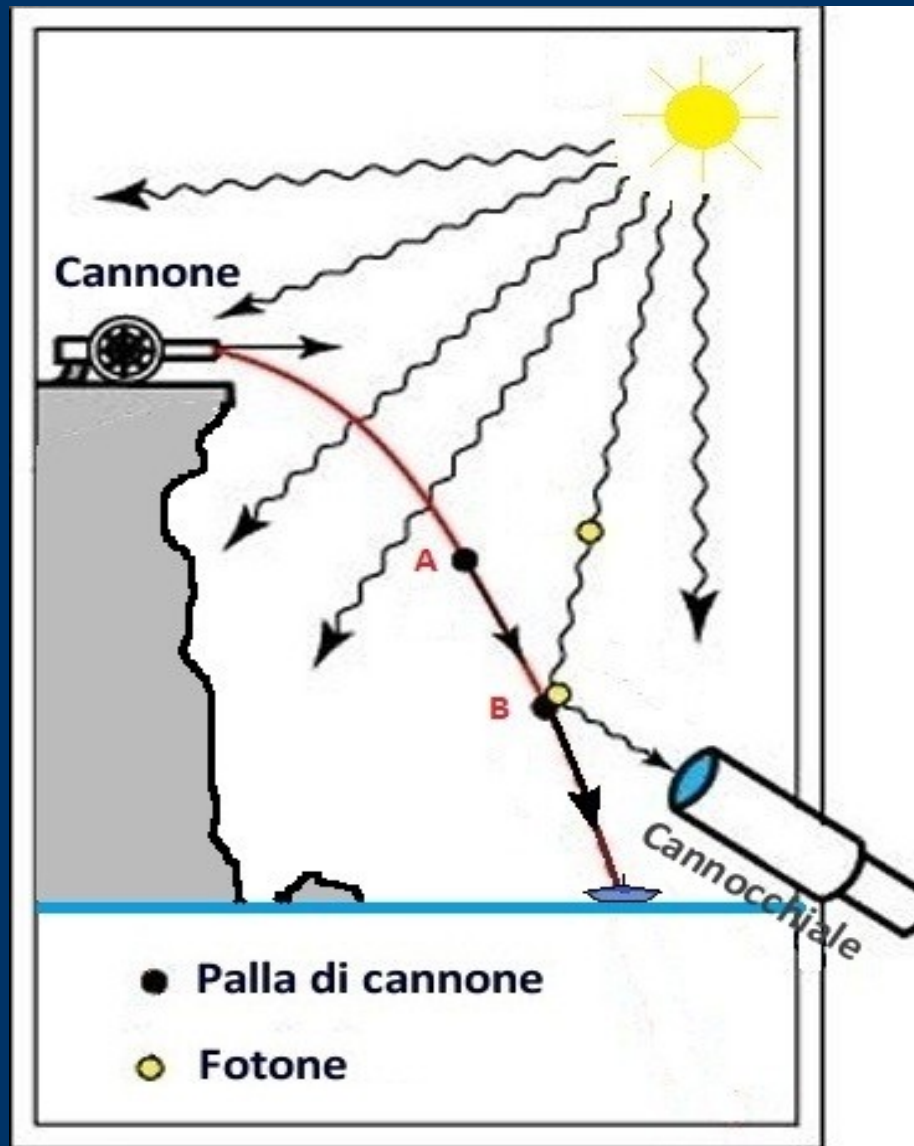
Il “gatto di Schrodinger”

(Il ruolo dell'osservatore)



- Fino a quando non si apre la scatola non si potrà sapere se la fiale di cianuro si è rotta e se il gatto è vivo o morto.
 - Per la meccanica quantistica le probabilità gatto-vivo e gatto-morto sono del 50% . Le due possibilità coesistono fino a quando non viene compiuta l'osservazione
 - Il gatto, quindi, è **contemporaneamente mezzo vivo e mezzo morto** perché la sua funzione d'onda contiene le due possibilità in egual misura (uguale probabilità).
 - **La sorte del gatto è decisa solo quando l'OSSERVATORE apre la scatola**
 - In quel momento avviene il COLLASSO DELLA FUNZIONE d'onda: un suo termine algebrico si annulla cancellando contemporaneamente la probabilità ad esso associata (o gatto-vivo, o gatto-morto)
 - Planck, de Broglie, Einstein e Schrodinger stesso **rifiutarono** decisamente il significato probabilistico annesso alla meccanica quantistica.
-
-

Principio di indeterminazione di Heisenberg (Osservare significa perturbare...)



- Il cannone “spara” una particella di cui voglio studiare la TRAIETTORIA (posizione e velocità in funzione del tempo)
 - Se la particella è molto piccola, di dimensioni atomiche (pochi Å), devo “illuminarla” con una “luce” di lunghezza d'onda paragonabile alle sue dimensioni (raggi X o lunghezze d'onda ancor più piccole...)
 - Un fotone X porta con sé molta energia e una grande quantità di moto !!
 - Nell'urto tra fotone e particella la posizione e la velocità del corpuscolo vengono alterati in modo altrettanto grande !!!
 - Quando il fotone X viene raccolto dal rilevatore, fornisce valori di posizione e velocità che **non corrispondono più al vero** (la particella, ormai, non è più lì, proprio per l'urto con il fotone)
 - **La TRAIETTORIA, quindi, viene costruita dall'osservazione, ma anche DISTRUTTA da essa!!!**
-
-

Principio di indeterminazione di Heisenberg (1927)

E' impossibile misurare SIMULTANEAMENTE con infinita precisione una coppia di grandezze CONIUGATE (posizione-quantità di moto, oppure energia-tempo)

$$\Delta x \Delta p_x > \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta E \Delta t > \frac{h}{2\pi}$$

Principio di “complementarietà” di Bohr

Quello corpuscolare e quello ondulatorio sono aspetti complementari della realtà microscopica.

“Se un esperimento permette di osservare uno di questi aspetti (ad es: effetto fotoelettrico, aspetto corpuscolare), allo stesso tempo impedisce di osservare l'aspetto ad esso complementare.”



Principio di “corrispondenza” di Bohr

In qualche modo bisogna evitare una rottura netta tra mondo classico e modo quantistico.

“Le previsioni della meccanica quantistica devono concordare con quelle della meccanica classica man mano che il sistema quantistico si ingrandisce verso dimensioni macroscopiche.”



“Non credo che Dio giochi a dadi con il mondo...”
A. Einstein

“Albert, smettila di dire a Dio cosa deve fare con i suoi dadi...”
N. Bohr

“Non mi piace, e mi dispiace averci avuto a che fare...”
E. Schrodinger

“Penso si possa tranquillamente affermare che nessuno capisce
davvero la meccanica quantistica...”
R. Feynman
