

Kopenhagener geist

- 🌀 **L'interpretazione di Copenaghen** della meccanica quantistica si ispira fondamentalmente ai lavori svolti da Niels Bohr e da Werner Karl Heisenberg attorno al 1927, all'epoca della loro collaborazione a Copenaghen.
- 🌀 Essa riguarda l'interpretazione del dualismo onda-corpuscolo e la descrizione probabilistica della meccanica quantistica
- 🌀 **L'interpretazione di Copenaghen** comprende:
 - 🌀 il principio di complementarità di Bohr
 - 🌀 il principio di indeterminazione di Heisenberg
 - 🌀 il problema della misura.

(2)



Werner Heisenberg
(1901 – 1976)
premio Nobel nel 1932

Il principio di indeterminazione 1927

- 🌀 Se si esegue una misura di posizione di una particella con incertezza Δx e una simultanea di quantità di moto con incertezza Δp_x , allora il prodotto delle due indeterminazioni non può mai essere minore di $\hbar/2$

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

- 🌀 Se si misura con molta precisione una delle due grandezze, allora si commette un grosso errore nella misurazione dell'altra
- 🌀 **Ciò accade perché misurando si interferisce con la grandezza del sistema che vogliamo misurare (non per problemi tecnici)**
- 🌀 Questo porta al definitivo superamento della concezione deterministica dell'atomo, in cui l'elettrone percorre traiettorie fisse con moto regolare.

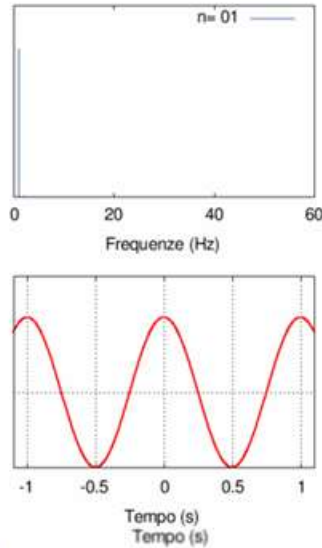
È possibile vedere la particella quantistica, localizzarla, tracciarne il movimento?

"i modelli che vengono dal mondo visibile, trasportati nell'interpretazione della fisica microscopica, appaiono sfuggenti ed ambigui e non riescono più a spiegare la realtà [...] Poiché lo strumento di misura è stato costruito dall'osservatore [...] dobbiamo rammentare che ciò che osserviamo non è la natura in sé ma la natura sottoposta al nostro metodo d'indagine."

(3)

Altro enunciato del principio di indeterminazione

La misura precisa dell'energia E della particella (errore di misura ΔE molto piccolo) comporta che l'istante t in cui la particella ha tale energia è molto incerto (Δt grande) $\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$



Esempio: usiamo l'analogia con il suono

- 🔊 Uno strumento musicale emette un suono su una determinata frequenza
- 🔊 Se questo suono è emesso da un pianoforte la frequenza è definita ma la nota dura nel tempo (energia definita con precisione, tempo non definito)
- 🔊 Se il suono è emesso da un tamburo allora la durata è breve (localizzato nel tempo) ma il suono non è puro essendo la sovrapposizione di tante frequenze
- 🔊 Dal grafico si vede che per restringere la durata del suono occorre aumentare il numero di frequenze sovrapposte
- 🔊 Heisenberg in meccanica quantistica dice proprio questo:
Non si può determinare con precisione sia l'energia di un elettrone sia l'istante di tempo in cui l'elettrone possiede tale energia.



(4)

Esempio del primo enunciato

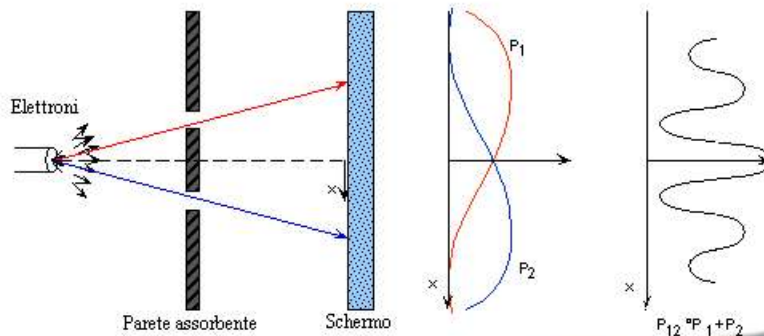
- 🔊 Vogliamo tracciare la traiettoria (posizione e velocità) di una pallina e di un elettrone
- 🔊 per tracciare la posizione istante per istante bisogna fotografare l'oggetto o illuminarlo
- 🔊 Allora sono necessari molti scatti 'a raffica' cioè bisogna inviare molti fotoni sull'elettrone o sulla palla
- 🔊 L'energia dei fotoni esercitata sulla palla trascurabile
- 🔊 Ma i fotoni inviati sull'elettrone ne cambiano la velocità: siamo riusciti a sapere dov'è ma abbiamo distrutto l'informazione sulla sua velocità



(5)

Principio di indeterminazione ed esperimento di Young (o della doppia fenditura)

- Esperimento con elettroni: (o anche fotoni, protoni, neutroni, atomi)
- P_1 = distribuzione degli elettroni sullo schermo quando solo la fenditura in alto è aperta.
- P_2 = distribuzione degli elettroni sullo schermo quando solo la fenditura in basso è aperta.
- P_{12} = distribuzione degli elettroni sullo schermo quando sono aperte entrambe le fenditure.
- $P_{12} \neq P_1 + P_2$ infatti si osserva interferenza, e gli elettroni mostrano un comportamento ondulatorio
- Però gli elettroni vengono rivelati uno alla volta, con dei "clic" sul rivelatore, identici tra di loro, che si verificano a tempi casuali, quindi si comportano in modo localizzato come particelle quando interagiscono con lo strumento di misura.

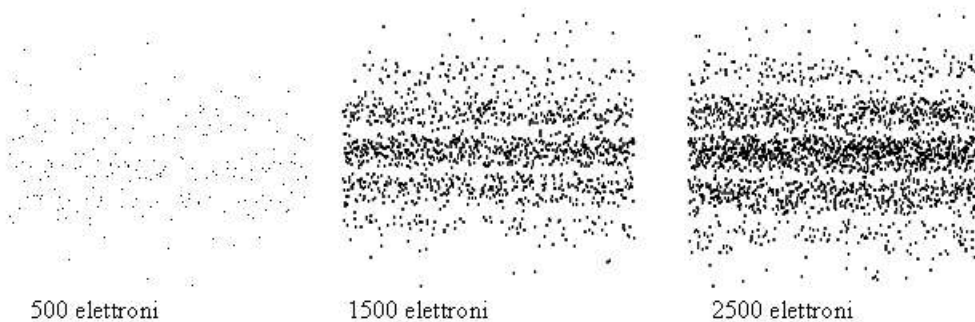


(6)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

Facciamo passare un elettrone alla volta

- La figura di interferenza si forma lentamente, man mano che, uno per volta, gli elettroni si accumulano sullo schermo.



500 elettroni

1500 elettroni

2500 elettroni

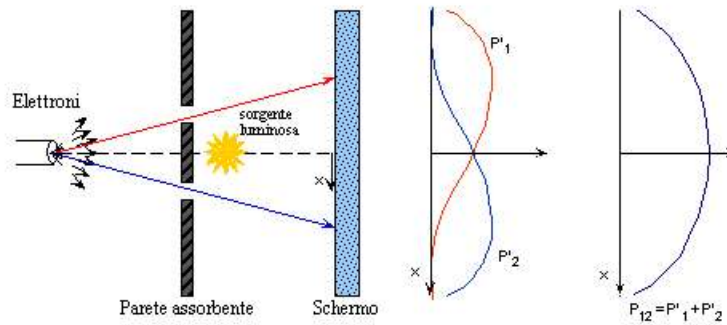
- Non si può affermare che ciascun elettrone passa o nella fenditura in alto o in quella in basso. Quando anche l'altra fenditura è aperta, essa influenza in modo complicato la distribuzione risultante sullo schermo: alcuni punti (ad esempio al centro) ricevono molti più elettroni a causa dell'interferenza costruttiva; altri punti, per interferenza distruttiva, ne ricevono meno.

(7)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

Illuminiamo l'elettrone mentre passa

- Modifichiamo ora l'esperimento per cercare di **sapere dove passa l'elettrone**. Aggiungiamo una sorgente luminosa dopo le due fenditure. L'elettrone diffonde la luce: se passa in alto, la luce è deviata verso l'alto, se l'elettrone passa in basso, la luce è deviata verso il basso (luce = rivelatore di cammino).
- Non si ha interferenza!**
- Stavolta P_{12} è semplicemente la distribuzione degli elettroni sullo schermo comunque sia stata deviata la luce, ed è uguale a P_1+P_2 .
- Si ottiene di nuovo l'interferenza se si spegne la sorgente luminosa.**



(8)

Illuminiamo l'elettrone mentre passa

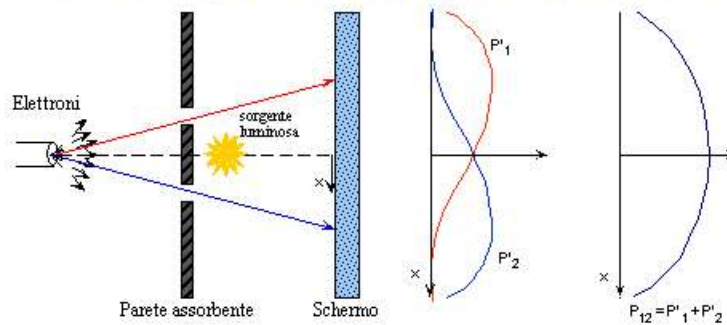
Come si spiega?

In questo caso l'elettrone si manifesta come corpuscolo, l'apparato sperimentale ci fornisce posizione e velocità e perdiamo l'informazione sulla sua natura ondulatoria.

Proviamo ad immaginare così!



I proiettili esplosi hanno posizione e velocità definite (passano dalla prima o dalla seconda fenditura) e non danno una figura di interferenza sul muro.



(9)

Spieghiamo con il principio di indeterminazione

- PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE: Non si può misurare nello stesso momento con arbitraria precisione la posizione e la quantità di moto di una particella.

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

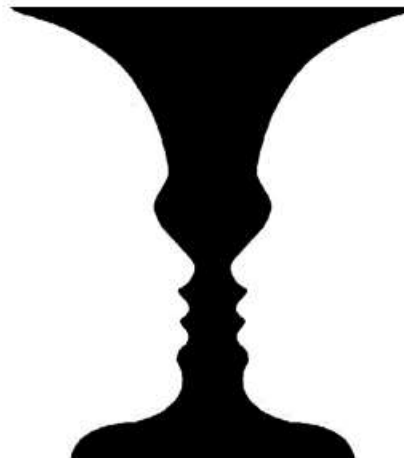
- Infatti la luce "misura" la posizione dell'elettrone con una incertezza $\Delta x \approx \lambda$ lunghezza d'onda della radiazione usata. Tale localizzazione produce una incertezza nel momento $\Delta p = h/\lambda$.
- Per 'vedere' l'elettrone occorre usare luce con λ piccola, perché l'elettrone deve 'diffondere' il fotone: la posizione dell'elettrone è determinata con alta precisione, ma esso cambia la propria quantità di moto e segue una traiettoria che l'apparato sperimentale ha determinato. Di conseguenza la figura di interferenza è distrutta.

Ma da questi esperimenti emerge anche il PRINCIPIO DI COMPLEMENTARITÀ

(10)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

PRINCIPIO DI COMPLEMENTARITÀ di Bohr - 1927



Le due descrizioni, onda e corpuscolo, sono complementari. Se un esperimento ne mette in luce una, ne esclude l'altra.

Tuttavia entrambi gli aspetti sono necessari per una completa descrizione della particella quantistica (radiazione o materia).

(11)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

Il problema della misura

Negli esperimenti le proprietà corpuscolari delle particelle quantistiche si manifestano al momento della **misura** della posizione: si osserva sempre un "puntino" (macchia in una lastra fotografica, "clic" di contatori Geiger)

Allora il processo di misura assume un'importanza fondamentale, che non aveva in fisica classica, perché **costringe il sistema microscopico all'interazione con un apparato, cioè con un sistema macroscopico.**

A causa della macroscopicità dell'apparato, **la misura perturba lo stato di una particella**; ad esempio la misura della posizione localizza la particella e porta al "collasso" della funzione d'onda.

Kopenhagener geist

- ☞ L'interpretazione di Copenaghen, in sintesi, afferma che:
 - ☞ Le previsioni probabilistiche della meccanica quantistica sono il frutto della **nostra conoscenza limitata** di qualche variabile nascosta.
 - ☞ **L'atto della misurazione influenza il risultato** poiché causa il «collasso della funzione d'onda», nel senso che la funzione d'onda è costretta, dal processo di misurazione, ad assumere i valori di uno a caso dei possibili stati permessi (**casualità e non causalità**).
 - ☞ Quindi in meccanica quantistica i **risultati delle misurazioni** di variabili coniugate (posizione e quantità di moto, tempo ed energia) **sono non deterministici** ossia anche conoscendo tutti i dati iniziali è impossibile conoscere a priori il risultato di un esperimento, **poiché l'esperimento stesso influenza il risultato**.
 - ☞ Sono prive di senso domande come: «Dov'era la particella prima che ne misurassi la posizione?», in quanto **la meccanica quantistica studia esclusivamente quantità osservabili**, ottenibili mediante processi di misurazione e la traiettoria di una particella-onda non è misurabile.

von Neumann 1932

"Se volete visualizzare un quanto come un puntino allora siete in trappola. Lo state plasmando con la logica classica. Il punto è che non esiste alcuna rappresentazione classica di esso ..."

(14)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci

Cosa hanno detto i fisici a proposito della MQ

Quelli che non rimangono scioccati, la prima volta che si imbattono nella meccanica quantistica, non possono averla compresa (Niels Bohr).

Se credete di aver capito la teoria dei quanti, vuol dire che non l'avete capita (R. Feynman).

Penso si possa tranquillamente affermare che nessuno capisce la meccanica quantistica. (R.Feynman)

Cosa hanno detto i fisici a proposito della descrizione probabilistica

Dio non gioca a dadi con l'universo. (A. Einstein)

Piantala di dire a Dio che cosa fare con i suoi dadi. (Niels Bohr)

Dio non solo gioca a dadi, ma bara. (J. Bell)



Io devo sapere. (Galileo - B. Brecht).

(15)

Pina Di Vito - Liceo Scientifico Leonardo da Vinci