

FAM

Interferenze quantistiche

Christian Ferrari

Liceo di Locarno

Anni 1920: messa in evidenza di uno strano comportamento degli oggetti del mondo microscopico.

- Esperienze con la luce in cui si osserva un comportamento tipicamente *particellare nel senso classico*:

effetto fotoelettrico.

- Esperienze con elettroni e neutroni in cui si osserva un comportamento tipicamente *ondulatorio nel senso classico*

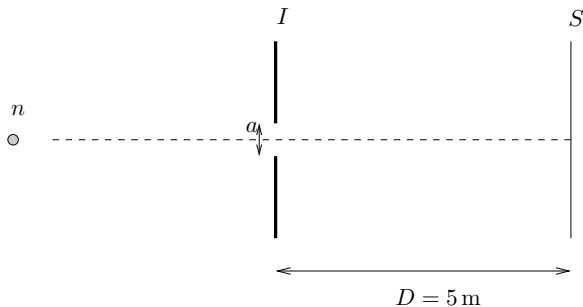
diffrazione di elettroni/neutroni.

Classicamente:

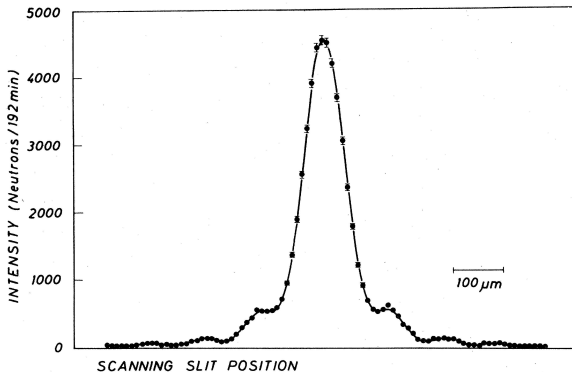
sistema	quantità	spazialità
luce	continua	continua
elettroni/neutroni	discreta	discreta

Neutroni: prodotti dalla fissione dell'uranio

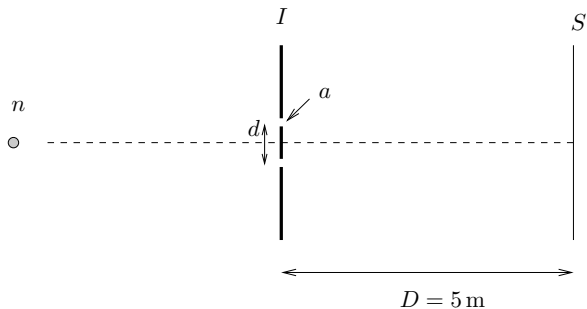
Interferometro: $a \approx 90 \mu\text{m}$.

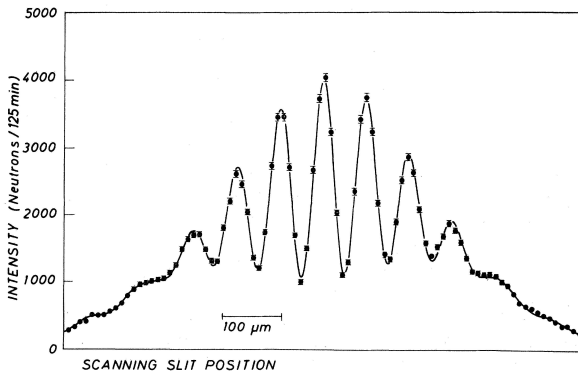


Risultati sperimentali (1988):



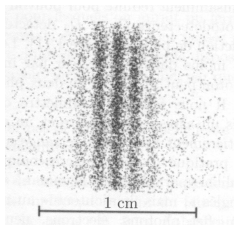
Interferometro: $a \approx 22 \mu\text{m}$, $d = 104 \mu\text{m}$.



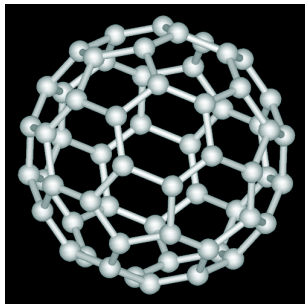
Risultati sperimentali (1988):

Alcune considerazioni:

- L'accordo tra i dati sperimentali e le previsioni teoriche è eccellente.
- Nell'interferometro è inviata **una particella alla volta**.
- **Tra queste esperienze di diffrazione/interferenza e quelle classiche vi è una differenza cruciale:** la figura di interferenza è costruita a partire dagli impatti dei singoli neutroni isolati ed è ricostituita quando l'esperienza è terminata (durata dell'esperienza più di 200 ore!)

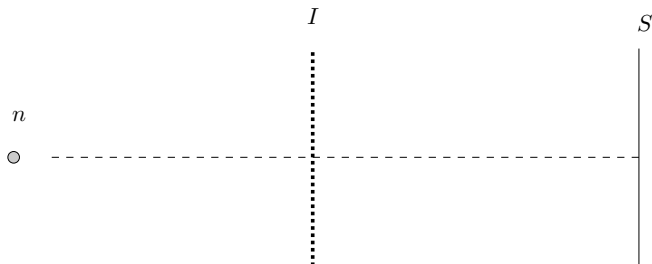


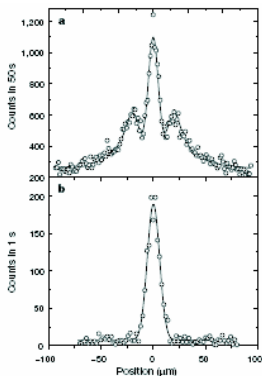
Fullereni: molecola di C_{60} : circa 720 volte “più grande” del neutrone!!!



Tra le molecole più grandi in cui si sono osservate interferenze!

Interferometro: $a \approx 50$ nm, $d \approx 100$ nm.



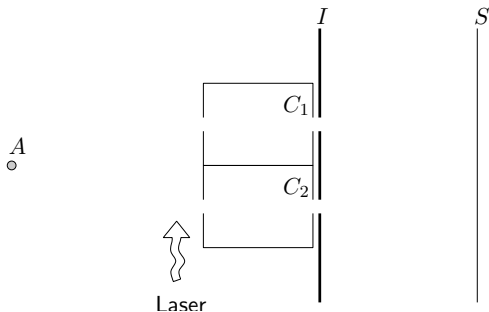
Risultati sperimentali (1999):

Sopra: effetti di interferenza,
Sotto: confronto senza interferometro.

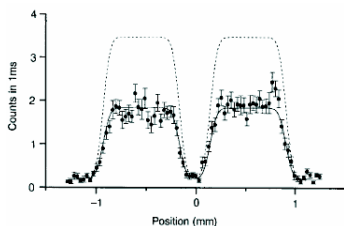
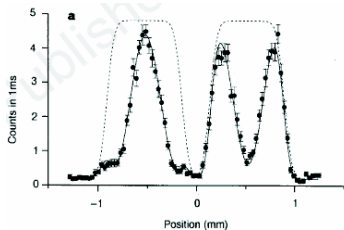
- Perché se si osserva da dove passa la particella si distruggono le interferenze?
- Risposta storica: la determinazione della “traiettoria” non poteva essere così “delicata” da non modificare in modo essenziale la “traiettoria” e quindi la figura di interferenza.
- Dal 1998: la determinazione della “traiettoria” può essere “delicata” al punto da non modificare in modo essenziale la “traiettoria”.
- La risposta storica non è corretta, se ne ha la prova sperimentale 70 anni dopo!!!

1991: **Gedanken experiment** con **atomi**

Interferometro con dispositivo “which-way”



In questo esperimento il fatto di poter determinare la “traiettoria” dell’atomo non influenza in modo determinante l’atomo.

Risultati sperimentali (1998):

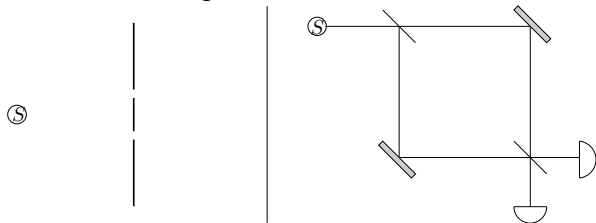
Sinistra: senza dispositivo “which-way”;

Destra: con dispositivo “which-way”.

I risultati sperimentali mostrano che le interferenze quantistiche spariscono quando è possibile determinare da che parte passa l'atomo, anche se esso non viene perturbato.

- Le esperienze di interferenza quantistica sono state realizzate con una grande varietà di particelle quantistiche: neutroni, elettroni, fotoni, atomi, molecole \implies **risultati universali**.
- Aspetto sorprendente: **si osserva una figura di interferenza unicamente se non è possibile sapere da che fenditura passa la particella**; se è di principio possibile determinare da che fenditura passa le interferenze quantistiche sono distrutte, **indipendentemente** dal fatto che un'osservatore decida o meno di determinare ciò.
- Quale **interpretazione**?
- **Frontiera classico – quantistico**?

- **Interferometro di Young:** infinità di detettori e di cammini tra sorgente e detettore.
- **Interferometro di Mach-Zehnder:** due detettori e due possibili cammini tra sorgente e detettore.



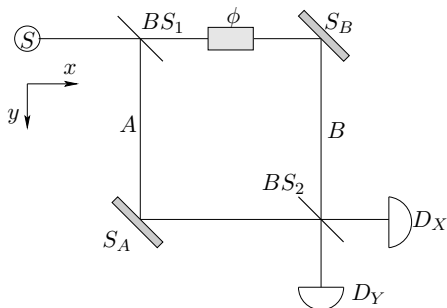
- In ogni caso: **una sola particella alla volta** è inviata nell'interferometro.

- Se i cammini A e B sono identici si osserva

$$D_X = 100\% \quad \text{e} \quad D_Y = 0\%$$

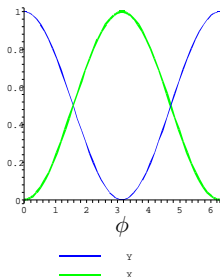
- Se si modifica (box ϕ) in modo appropriato uno dei due cammini si inverte il risultato

$$D_X = 0\% \quad \text{e} \quad D_Y = 100\%$$



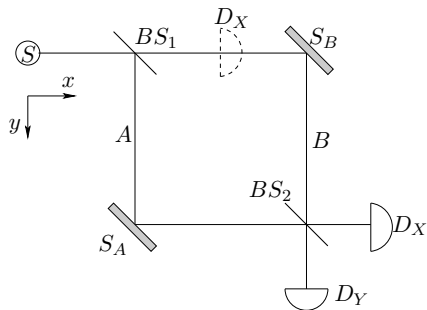
- Questi strani effetti sono chiamati **interferenze quantistiche ad una particella**.
- In generale la probabilità (che dipende da ϕ) di osservare la particella in D_X (resp. D_Y) è

$$\text{Prob}(D_X) = \frac{1}{2}(1 + \cos \phi) \quad \text{Prob}(D_Y) = \frac{1}{2}(1 - \cos \phi)$$



- Indipendentemente dalla modifica ϕ , se si vuole determinare da che parte passa la particella si osserva

$$D_X = 50\% \quad \text{e} \quad D_Y = 50\%$$



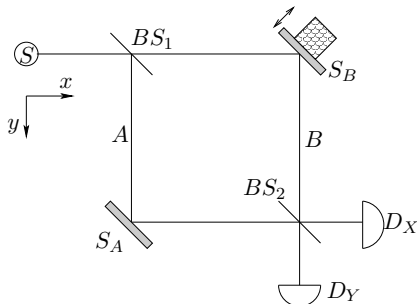
- **La conoscenza del cammino cancella le interferenze quantistiche.**

- Conosciuto il risultato nel caso $\phi = 0$, per il caso $\phi = \pi$, intuitivamente diremmo che, essendo la modifica su un **solo** cammino (B), almeno le particelle che nel caso $\phi = 0$ *dovrebbero* essere passate dal cammino A per giungere al detettore D_X non *dovrebbero* essere state influenzate dalla modifica inserita nel cammino B , ovvero ci aspettiamo almeno qualche particella anche in D_X . Ma ciò non è ne quanto osservato ne quanto predetto dalla fisica quantistica.
- La modifica di un solo cammino **modifica il risultato di tutte le particelle**, benché presente solo su un possibile cammino.
- Si deve perciò concludere che **la modifica sul cammino B ha influito anche sul cammino A .**

- In termini quantistici si dice che la particella **si delocalizza** nei due cammini A e B : **potenzialmente è come se essa esplorasse entrambi i cammini**, se non fosse così sarebbe impossibile influenzare tutte le particelle modificando solo un cammino.
- Ma attenzione la particella **non** si divide in due.
- **La conoscenza del cammino e gli effetti di interferenza sono due aspetti complementari**, che non possono manifestarsi contemporaneamente. Se si misura da dove passa la particella si distruggono gli effetti di interferenza, che invece si hanno in assenza di determinazione del cammino.
- È un'illustrazione del **principio di complementarità di Bohr**.

- Le *interferenze ad una particella* appaiono quando una particella può utilizzare più cammini per arrivare allo stesso detettore, e che questi cammini sono **indistinguibili** dopo la rilevazione.
- Questo è conosciuto come **principio di indiscernibilità** e permette di prevedere, in un'esperienza di interferenza quantistica, se si avranno gli effetti di interferenza.

- Esperienza che permette di controllare se qualcosa *avrebbe potuto* accadere ma non è accaduto.



- Obiettivo: sapere se in un dato luogo vi è un oggetto, ma senza guardare se esso vi si trova.

- Supponi che l'oggetto è sostituito da una bomba il cui meccanismo di detonazione è uno specchietto come lo "specchio" S_B . Se la bomba è difettosa lo specchietto è bloccato.
- Se hai N bombe di cui una parte difettose come potresti fare per decidere se una bomba è funzionante senza però provare a farla esplodere?
- Delle N bombe che percentuale è possibile "salvare"?