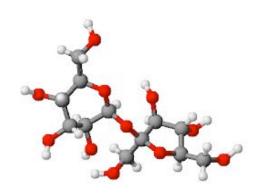
LFN – Incontri di Fisica 2014

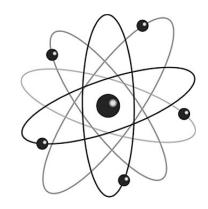
Angelo Bassi – Università di Trieste & INFN



La meccanica quantistica

È la teoria che utilizziamo per descrivere **atomi**, **molecole** e le loro **interazioni**





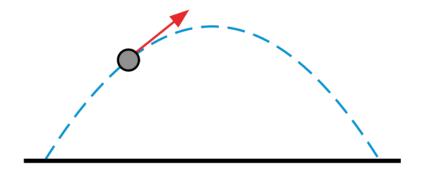
Riguarda principalmente i sistemi microscopici, mentre quelli **macroscopici** di diretta esperienza quotidiana sono adeguatamente descritti dalla **fisica classica**



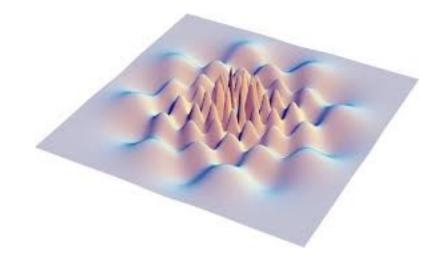
La meccanica quantistica ha comunque un impatto sempre più importante nella nostra vita, grazie alle nuove **tecnologie** basate sui principi della meccanica quantistica (laser, transistor, RMN...).

Struttura della teoria

Meccanica classica: punti che si muovono nello spazio secondo le leggi di Newton

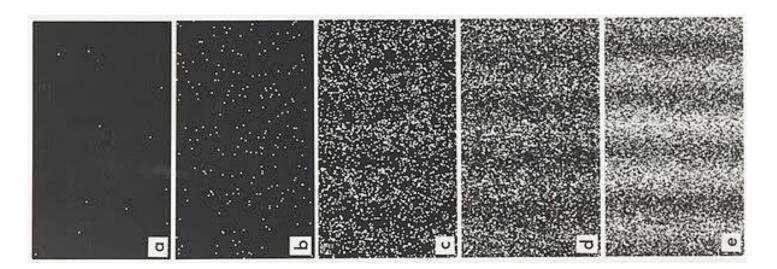


Meccanica Quantistica: ogni sistema fisica è descritto da una funzione d'onda che evolve secondo l'equazione di Schrödinger



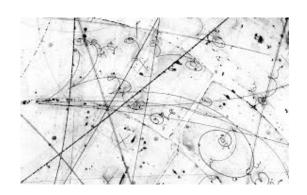
Perchè la funzione d'onda? Non è possibile continuare a utilizzare il formalismo classico, ovvero particelle che si muovono nello spazio lungo traiettorie, evidentemente obbedendo a nuove leggi?

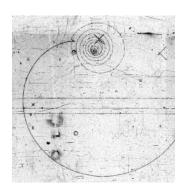
Motivazione: Con le particelle non è facile giustificare i fenomeni di diffrazione e interferenza.

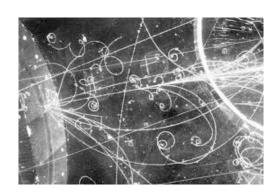


Cosa rappresenta la funzione d'onda? La funzione d'onda non descrive il sistema, ma (tramite il suo modulo quadro) la <u>probabilità</u> di trovare il sistema in un punto dello spazio, qualora si effettui una misura della sua posizione.

Motivazione: non è possibile spezzare un sistema un due o più parti, come una descrizione di tipo ondulatorio prevedrebbe. Al termine di una misura, il sistema è sempre localizzato nello spazio.

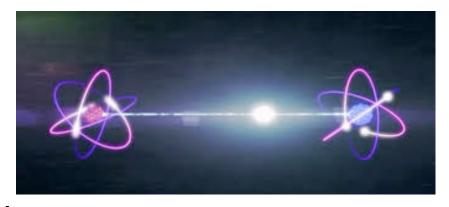






Sovrapposizione quantistica di una particella (o sistema):

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\psi_{\text{LEFT}}(x) + \psi_{\text{RIGHT}}(x) \right]$$



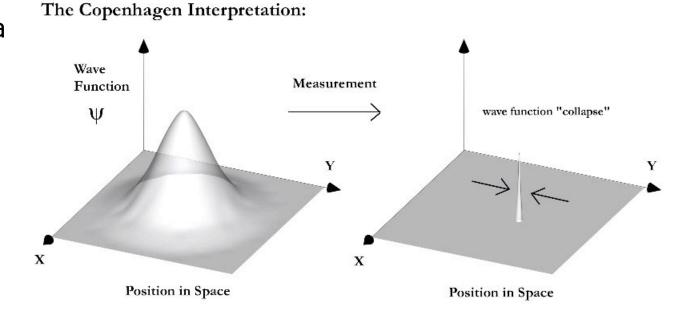
La particella si trova con probabilità ½ a sinistra e con probabilità ½ a destra, se si effettua una misura di posizione.

Non possiamo dire nulla sulla posizione della particella prima di fare la misura. **Non c'è alcun fatto** relativo alla posizione della particella prima della misura. È come chiedersi se la particella sia sposata (cit. David Albert)

Se si ammette che la particella abbia una posizione anche prima di compiere la misura, allora **la teoria è incompleta**, perché non è in grado di descrivere tutto quello che c'è da dire sulla particella (la sua posizione nello spazio)

Cosa succede al termine di una misura? La funzione d'onda collassa attorno al punto in cui è stato trovato il sistema.

Motivazione: Se la funzione d'onda non collassasse, allora se ripetessi la stessa misura immediatamente dopo potrei trovare il sistema da un'altra parte. Questo non accade.



La Meccanica Quantistica

- 1. Ogni sistema fisica è descritto da una funzione d'onda $\psi(x)$
- 2. La funzione d'onda evolve secondo l'equazione di Schrödinger
- **3.** Il modulo quadro $|\psi(x)|^2$ rappresenta la (densità di) probabilità di trovare il sistema in x, in seguito ad una misura della sua posizione
- 4. Al termine della misura, la funzione d'onda collassa attorno al punto in cui è stato trovato il sistema

Il problema della misura

Consideriamo i seguenti postulati

- 2. La funzione d'onda evolve secondo l'equazione di Schrödinger
- 4. Al termine della misura, la funzione d'onda collassa attorno al punto in cui è stato trovato il sistema

implicano due tipi diversi (opposti) di evoluzione per la funzione d'onda: una in assenza di misure (Schrödinger) e uno al termine delle misure (collasso).

Problema: Cos'è una misura? Come definirla rigorosamente?

Solo l'equazione di Schrödinger?

Tutto il mondo è quantistico. Tutto evolve linearmente. Allora sono possibili sovrapposizioni macroscopiche.



Entanglement

$$\psi(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\psi_{\text{LEFT}}^{(1)}(x) \psi_{\text{RIGHT}}^{(2)}(y) + \psi_{\text{RIGHT}}^{(1)}(x) \psi_{\text{LEFT}}^{(2)}(y) \right]$$

- 1. Con probabilità ½ la particella 1 si trova a sinistra, e con probabilità ½ si trova a destra, se si misura la posizione. Stessa cosa per la particella 2.
- 2. Supponiamo di misurare la posizione della particella 1 e di trovarla a sinistra. Allora per effetto del collasso, la funzione d'onda diventa

$$\psi_{\text{COLL}}(x,y) = \psi_{\text{LEFT}}^{(1)}(x)\psi_{\text{RIGHT}}^{(2)}(y)$$

Se misuriamo la posizione della particella 2, allora la troveremo con certezza a destra.

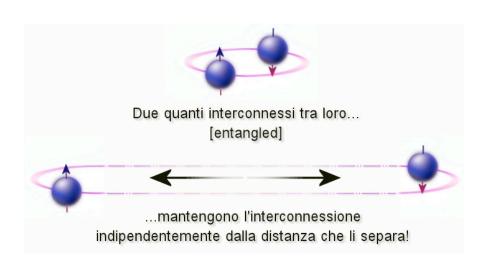
C'è perfetta correlazione tra le posizioni delle due particelle

Entanglement

$$\psi(x,y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\psi_{\text{LEFT}}^{(1)}(x) \psi_{\text{RIGHT}}^{(2)}(y) + \psi_{\text{RIGHT}}^{(1)}(x) \psi_{\text{LEFT}}^{(2)}(y) \right]$$

Prima della misura, nessuna delle due particella ha una posizione definita nello spazio.

Se la posizione di una delle due particelle viene misurata, anche la posizione dell'altra viene automaticamente determinata, indipendentemente dalla distanza tra le due particelle.



Entanglement: sistemi correlati a distanza. Correlati, non interagenti tramite forze! Le correlazioni sono indipendenti dalla distanza. C'è un componente nonlocale!

E_{instein} P_{odolski} R_{osen} - 1935

- 1. In uno stato entangled di due particelle, la misura della posizione di una delle due particelle determina anche la posizione dello'altra particella, che può trovarsi arbitrariamente lontana dalla prima.
- 2. La relatività speciale insegna che non è possibile modificare un sistema a distanza. Tutti i segnali si propagano al massimo alla velocità della luce.
- **3.** Si deve concludere che la seconda particella possiede una **posizione definita** indipendentemente dalla misura effettuata sulla prima particella.
- 4. La meccanica quantistica è incompleta.

Le disuguaglianze di Bell - 1964

John S. Bell era impressionato dalla teoria di Bohm: la



meccanica quantistica è riformulata in termini di particelle che si muovono nello spazio lungo traiettorie, che obbediscono a nuove equazioni.

Quello che sembrava impossibile, è stato realizzato.

La meccanica di Bohm è nonlocale.

Bell cercò di riformulare la teoria in termini locali, senza riuscirci.

Allora si pose il problema: è forse impossibile rendere la teoria locale? La meccanica quantistica è intrinsecamente nonlocale?

Un interludio da music-hall (Mermin & Squires)

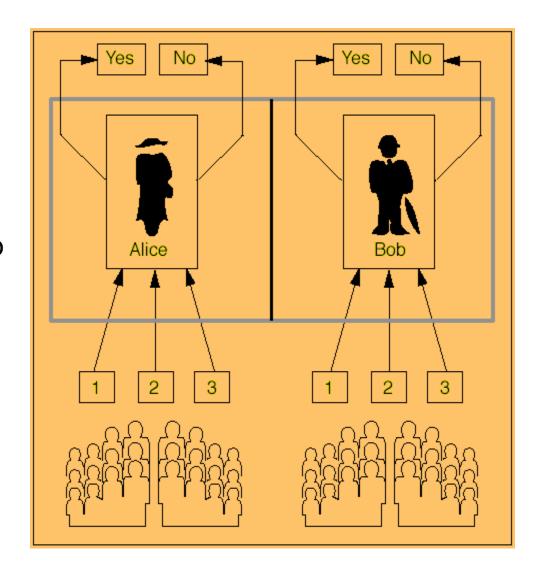
Personaggi: Alice e Bob.

Due gruppi di persone. Un gruppo consegna un biglietto a Alice, l'altro un biglietto a Bob.

Su ciascun biglietto è scritto un numero: **1, 2 o 3**.

Alice e Bob devono scrivere "Sì" oppure "No" su ciascun biglietto che ricevono.

Alice e Bob **non possono comunicare** l'uno con l'altra.



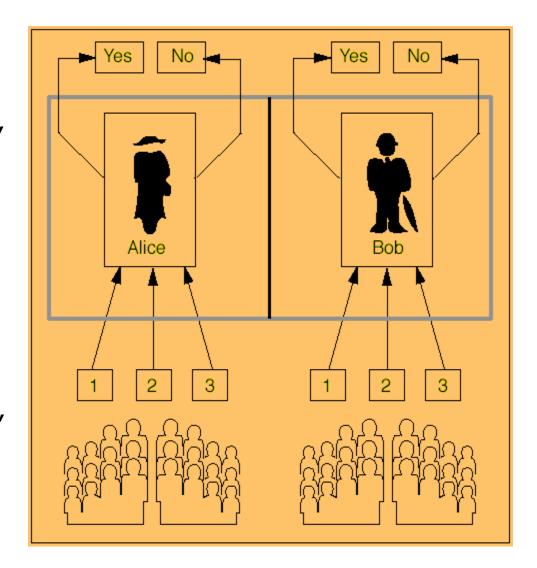
Esito

Il procedimento viene ripetuto più e più volte.

La sequenza di "sì" e di "no" è completamente casuale.

In media, c'è lo **stesso numero** di "sì" e di "no".

Quando Alice Bob ricevono ciascuno un biglietto con lo stesso numero, scrivono sempre la **stessa cosa**: "sì" oppure "no".



Conclusione (provvisoria)

- 1. Alice a Bob non possono comunicare tra loro
- 2. In certe situazioni, si comportano esattamente nello stesso modo

Sono telepatici!

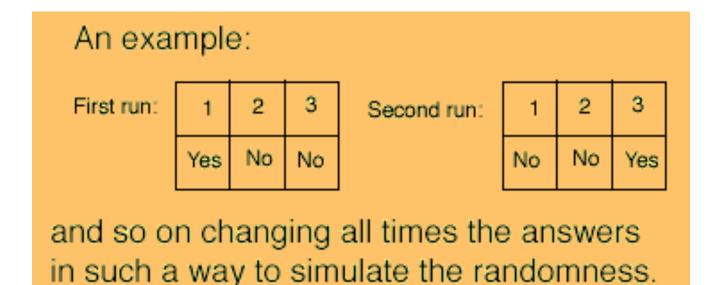
Meccanica quantistica: due particelle entangled (esempio precedente) si comportano come Alice e Bob. Sono arbitrariamente distanti tra loro, non interagiscono tramite forze.

Tuttavia se si misura la loro posizione, si comportano sempre nello stesso modo: una particella a sinistra, l'altra a destra.

C'è un effetto nonlocale

Einstein - 1935

Qualcuno tra gli spettatori non è d'accordo: "Alice e Bob usano un trucco. Si sono accordati in precedenza sulle risposte da dare. La sequenza di risposte cambia di volta in volta"



Meccanica quantistica: le due particelle hanno una posizione definita e correlata – a noi sconosciuta – ancora prima di effettuare la misura

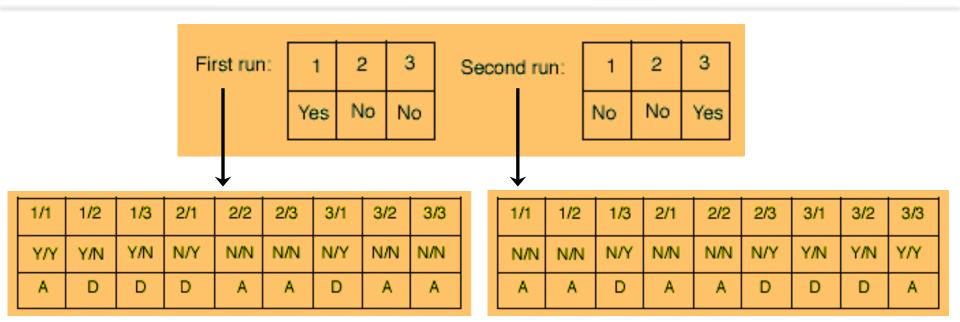
Bell - 1964

Qualcun altro tra gli spettatori, pedante, si è segnato tutte le risposte di Alice e Bob, e ha analizzato le correlazioni. In base a risultati dell'analisi, può concludere

Alice e Bob sono davvero telepatici!

Meccanica quantistica: l'analisi di Bell non decide sul fatto che le due particelle abbiano o non abbiano una posizione definita prima della misura, me decide sul fatto che particelle in stati entangled si comportano in maniera nonlocale

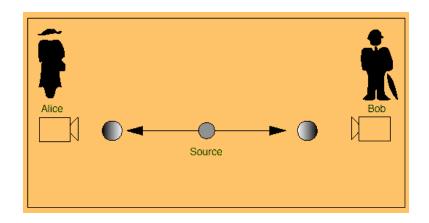
Spiegazione



Se Alice e bon si sono messi d'accordo in precedenza, allora ci sarebbero 5 casi di risposta concorde (A) contro i 4 di risposta discorde (D). Tuttavia, nell'esperimento A e D si verificano con eguale probabilità! Quindi Alice e Bob non si possono essere messi d'accordo in precedenza.

"5 contro 4" invece di "5 contro 5" è un esempio di disuguaglianza di Bell

L'esperimento quantistico



N. 1: misura di polarizzazione verticale

N. 2: misura di polarizzazione a 60°

N. 2: misura di polarizzazione a 120°

Coppie di fotoni entangled vengono create. Un fotone va a sinistra verso Alice, il secondo a destra verso Bob.

Alice e Bob utilizzano misure sullo spin del fotone per decidere cosa scrivere sui biglietti.

Alice e Bob misurano lo spin del fotone lungo opportune direzioni. A seconda dell'esito ("su" o "giù"), scrivono sul biglietto "sì" oppure "no".

Le misure vengono effettuate "istantaneamente", senza possibilità di comunicare

Predizioni della teoria

In base alle regole della meccanica quantistica, si può predire che:

- 1. Gli esiti degli esperimenti di spin del fotone di Alice e Bob sono casualmente distribuiti, con una eguale probabilità di "su" e di "giù"
- 2. Se Alice e Bob misurano lo spin lungo la stessa direzione, ottengono sempre lo stesso risultato (casuale)
- **3.** Se misurano lo spin lungo direzioni diverse, la probabilità di accordo è ¼.

Predizioni della teoria

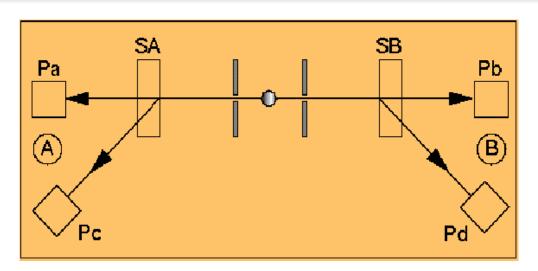
Poiché 3/9 delle volte Alice e Bob ricevono lo stesso numero, e 6/9 delle volte ricevono numeri diversi, la probabilità totale di accordo è:

$$(3/9) \times 1 + (6/9) \times (1/4) = 1/2$$

Alice e Bob daranno risposte concordi nel 50% dei casi La meccanica quantistica è nonlocale

Questa è la predizione teorica. Che cosa succede in natura?

L'esperimento – Aspect 1981-82



In **SA** e **SB** ci sono due interruttori controllati da generatori di numeri random. Gli interruttori servono a deviare la direzione dei **fotoni** e quindi a decidere che il tipo di esperimento.

P sono polarizzatori, che misurano la polarizzazione (spin) dei fotoni lungo quattro direzioni a, b, c, d.

La scelta sulle misure da fare (ovvero l'attivazione degli interruttori) viene compiuta "istantaneamente" cioè in modo che non ci sia tempo per inviare segnali da una parte all'altra.

L'esperimento conferma le predizioni della meccanica quantistica: la natura è nonlocale !!!

Commenti

- 1. La natura è nonlocale. Questa è la conclusione dell'analisi di Bell e degli esperimenti di Aspect
- 2. Si può dimostrare che non è possibile utilizzare questi effetti per comunicare in maniera superluminale. Questa è una conseguenza del carattere casuale degli esiti degli esprimenti.
- 3. Una curiosa coincidenza: gli effetti casuali cancellano esattamente quelli nonlocali
- **4. La relatività in qualche modo è salva.** Ma questo non toglie il fatto che ci sono effetti nonlocali che sono vietati dalla relatività

Non abbiamo ancora capito cosa sta succedendo

Nuove tecnologie quantistiche

Le proprietà peculiari degli stati entanlged, e in particolare le correlazioni nonlocali in essi contenuti, sono al centro di una nuova "rivoluzione" tecnologica:

- Informazione quantistica
- Crittografia quantistica
- Teletrasporto
- Computazione quantistica

È presto per capire quanto di tutto questo entrerà a far parte della nostra vita quotidiana. Certamente, le nuove tecnologie si baseranno sempre di più sugli effetti quantistici.