



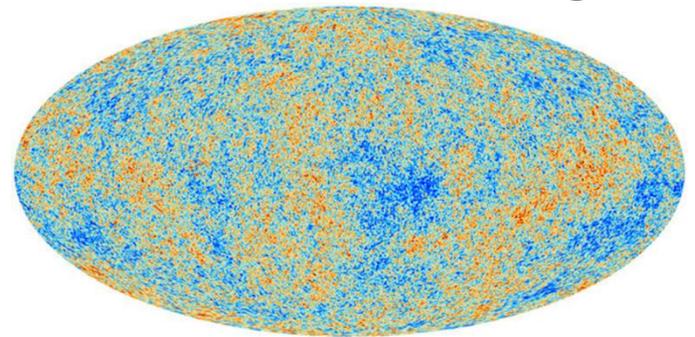
Pieralberto Marchetti
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Padova

Meccanica Quantistica
Una introduzione...
problematica...



Meccanica Quantistica

- La Meccanica Quantistica (MQ) e' la teoria fisica che descrive le leggi che governano i fenomeni fisici a livello microscopico (atomico o sub-atomico), ma ha anche conseguenze a livello macroscopico, quali l'impenetrabilita' dei corpi, la stabilita' della materia e dei colori, l'esistenza di laser, superconduttivita'...
- La MQ sta alla base delle teorie attuali sull'origine delle strutture cosmiche...



e del funzionamento dei cellulari....

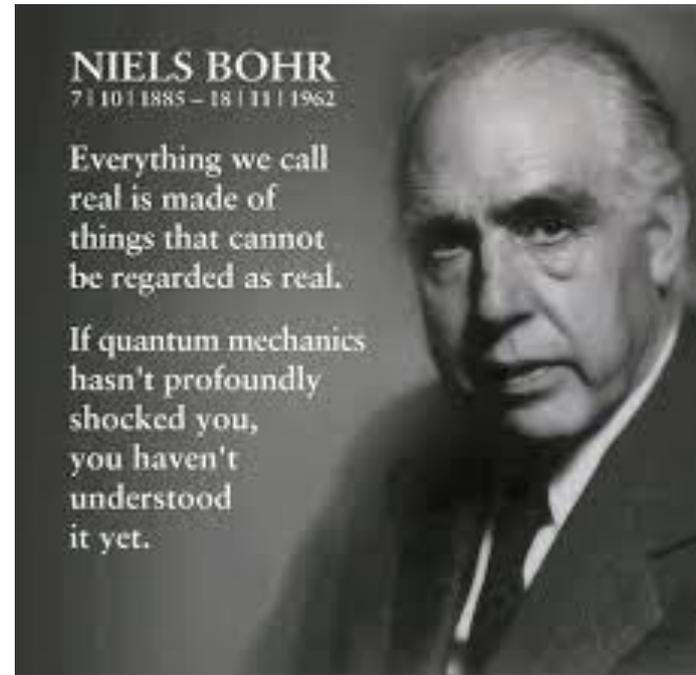
- Come la Relatività ha messo in crisi il nostro concetto di spazio e tempo, così la Meccanica Quantistica (MQ) mette in crisi il nostro concetto di “particella” riferito alle particelle del mondo atomico, come gli elettroni, o di “onda” sulla stessa scala, come le onde elettromagnetiche, ma anche, più in profondità, i nostri concetti di posizione, velocità, misura, identità ... e perfino di “realtà fisica” ...

NIELS BOHR

7 | 10 | 1885 – 18 | 11 | 1962

Everything we call
real is made of
things that cannot
be regarded as real.

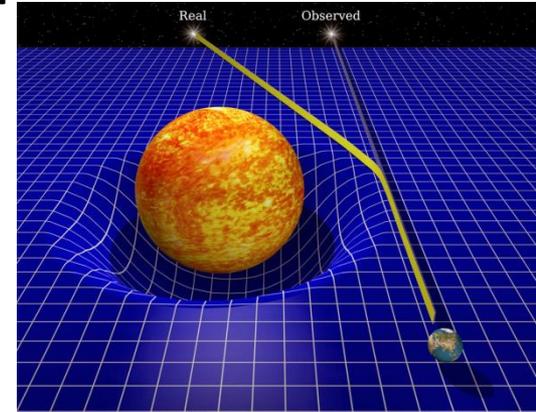
If quantum mechanics
hasn't profoundly
shocked you,
you haven't
understood
it yet.



La MQ nella storia...

- La MQ si sviluppa all'inizio del '900 in un periodo di rivoluzione non solo nella fisica, con anche la relatività che introduce una geometria dello spazio-tempo non assoluta bensì determinata dalla materia , ma in tutti i settori...rivoluzione russa... rivoluzione nell'arte... nasce l'astrattismo, una visione completamente innovativa di composizione...
- Ma iniziamo...dall'inizio...dalla crisi della fisica classica di particelle e onde

Einstein 1915



Lenin 1917

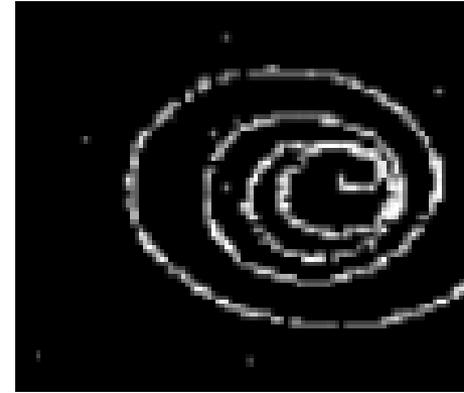


Kandinskij 1910



Particelle-onda

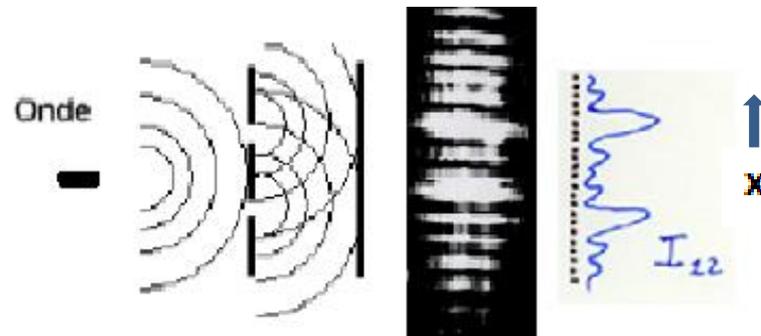
- Le particelle quantistiche (elettroni) sono “particelle” =>ad esempio si possono osservare le loro traiettorie in una “camera a nebbia” (vapore soprassaturo+particella carica -> condensazione di goccioline d’acqua -> traiettoria)
- Ma fasci di particelle quantistiche mostrano il fenomeno di interferenza tipico delle “onde”



Onde e Interferenza



- Vediamo l'origine dell'interferenza nel caso classico delle onde di luce che passano tra due fenditure producendo su uno schermo frange chiare e scure



Spiegazione: Intensità (luminosità) $I(x) = (a(x))^2$ e si sommano le ampiezze delle onde prodotte dalle fenditure, quindi

l'ampiezza totale $a_{12}(x) = a_1(x) + a_2(x)$,

ma $(a_{12}(x))^2 = (a_1(x))^2 + (a_2(x))^2 + 2 a_1(x) a_2(x)$

$I_{12}(x) = I_1(x) + I_2(x) + 2 a_1(x) a_2(x) \leftarrow$ termine di **interferenza**

Particelle classiche

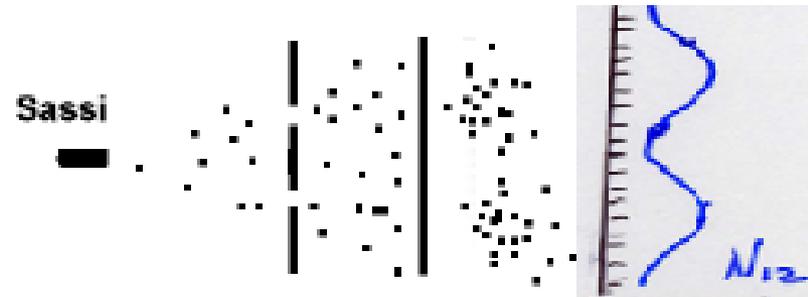
- Nessuna interferenza invece compare nel caso di particelle classiche (se interpretiamo come analogo di $I(x)$ il numero di particelle $N(x)$ che arrivano nella posizione x e con il pedice 1,2, 12 i casi con aperta solo le fenditure 1,2,1+2)

$$N_{12}(x) = N_1(x) + N_2(x)$$

Dividendo per il numero totale N di particelle otteniamo

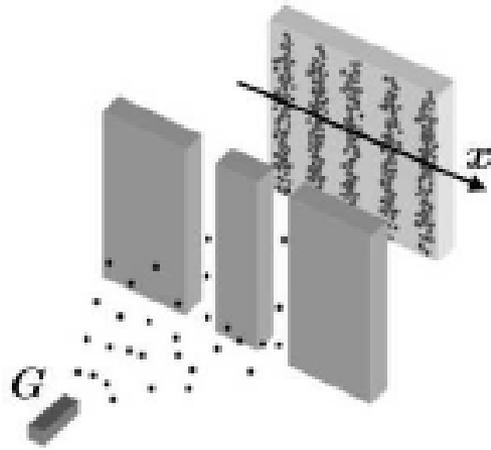
le probabilità $p(x) = N(x)/N$ e $p_{12}(x) = p_1(x) + p_2(x)$

la probabilità di trovare una particella in x con 1+2 aperte = probabilità con 1+probabilità con 2 aperte, quindi la particella è passata o da 1 o da 2



Onde o particelle?

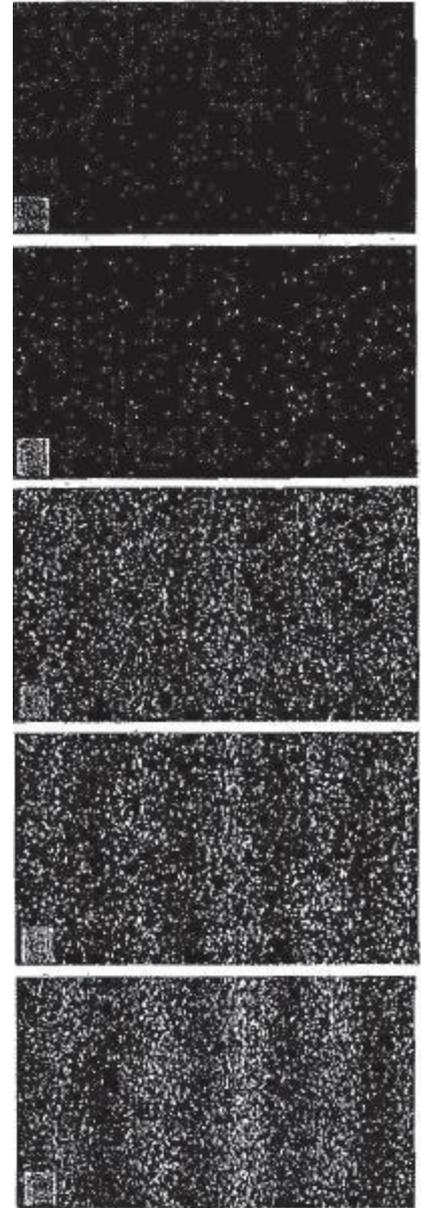
- Ma allora le particelle quantistiche sono particelle, visti che (sembra) possiamo osservare le loro traiettorie o onde, visto che mostrano il fenomeno di interferenza?
- Per capire la situazione rifacciamo **l'esperimento delle due fenditure con un fascio di particelle quantistiche** (es. elettroni...) che vengono **emessi uno alla volta**
- Per fortuna **tutte le "particelle quantistiche" (elettroni, fotoni,...) si comportano nello stesso modo anche se fortemente controintuitivo.**



◀ |

1. Gli elettroni compaiono nei rivelatori in **numeri interi come con particelle**
2. Contandoli ($N_{12}(x)$) otteniamo la figura di **interferenza come con onde.**

Dividendo per il numero totale (N) di elettroni del fascio otteniamo la probabilità $p_{12}(x) = N_{12}(x)/N$ che presenta quindi il fenomeno dell'interferenza



Onde di probabilita'

- Nel caso delle onde classiche la interferenza era dovuta al fatto che l'intensita' era il quadrato dell'ampiezza, ma erano le ampiezze delle onde delle fenditure che si sommavano. Per le particelle quantistiche allora poniamo la probabilita' $p(x) = |\psi(x)|^2$

$\psi(x)$ = ampiezza dell'onda di probabilita' detta **funzione d'onda** (introdotta da Schroedendiger interpretata probabilisticamente da Born)

$\psi_{12}(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$ e quindi
 $p_{12}(x) = p_1(x) + p_2(x) + \text{interferenza}$

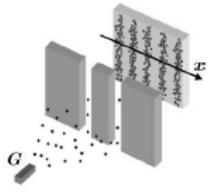
- **Quindi cosa sono le particelle quantistiche?**
Sono onde o particelle?

Particelle quantistiche

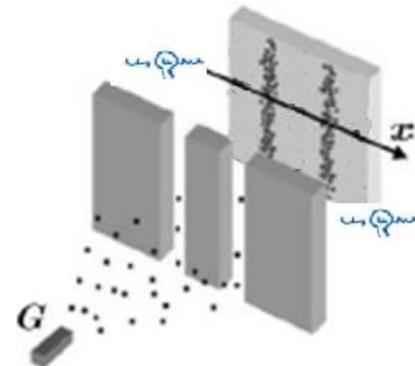
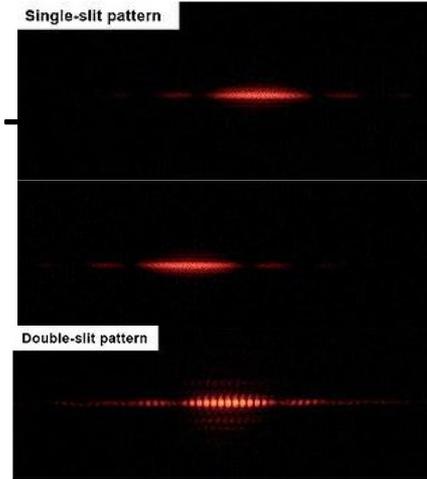
Sono “particelle” la cui probabilita' di essere trovate in una certa posizione x [o con un certo impulso p o ...] e' determinata dall'intensita' di un'onda $\psi(x)$ [$\varphi(p)$ o...].

La situazione e' dunque completamente diversa dal caso classico: la Meccanica Quantistica non assegna alle particelle di un sistema fisico una definita posizione e impulso che esse posseggono, ma solo una probabilita' (indeterminismo) di essere trovate in una posizione con una misura, neanche di “avere” una posizione...

Se osserviamo...disturbiamo



- Infatti gli elettroni nell'esperimento con le fenditure sono rivelati come unita', quindi diremmo:
- L'elettrone e' passato o dalla fenditura 1 o dalla fenditura 2, ma la somma delle probabilita' con una sola fenditura aperta (senza interferenza) non e' uguale a quella che si ottiene quando sono aperte tutte due (con interferenza)...
- Per capire da quale fenditura passa un elettrone potremmo mettere una luce  dopo le fenditure in modo che un lampo segnali la posizione dell'elettrone.
- Rifacendo l'esperimento con la luce : Ogni elettrone lo vediamo passare da una sola fenditura (o 1 o 2), ma la figura di interferenza delle intensità scompare...



Quale traiettoria?

- Nessuna di queste affermazioni per gli elettroni descritti da $\psi_{12} = \psi_1 + \psi_2$ e' quindi corretta:
- L'elettrone passa da una fenditura o dall'altra (esclusa perche' se sommiamo il contributo dei due casi con una sola fenditura aperta non riproduciamo quello con due fenditure aperte)
- L'elettrone passa da entrambe le fenditure (esclusa perche' se cerchiamo di verificare sperimentalmente troviamo l'elettrone sempre in una sola delle fenditure)
- L'elettrone arriva allo schermo finale senza passare da nessuna delle due fenditure (esclusa perche' se chiudiamo tutte due le fenditure nessun elettrone viene rivelato sullo schermo finale)

Nessuna traiettoria ... se non osserviamo

- Dalle considerazioni precedenti vediamo che non e' affatto ovvio poter assumere che le particelle quantistiche "abbiano" una posizione se non le osserviamo, ma solo che le "troviamo" in una posizione, se ne eseguiamo una misura, con una probabilita' determinata dalla funzione d'onda. Con tale interpretazione (ortodossa Bohr, Heisenberg, Born, Jordan, Dirac, Pauli 1927) la probabilita' non e' dovuta alla nostra ignoranza su una posizione esistente, perche' una posizione (come valore) non preesiste alla misura. La probabilita' quantistica cioe' e' intrinseca, non epistemica. ("Nettuno (corpo classico) avrebbe la stessa posizione anche se non fosse osservato ma l'elettrone (particella quantistica) no...")



