



Pieralberto Marchetti
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università di Padova

Meccanica Quantistica
Una introduzione...
problematica...



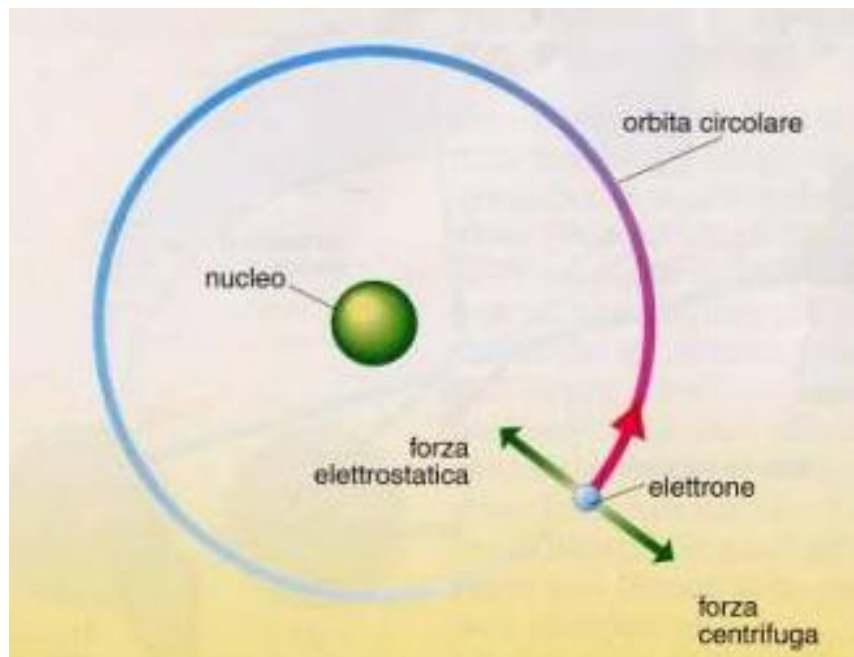
Fisica Quantistica

La fisica quantistica descrive le leggi che governano i fenomeni fisici a livello microscopico (atomico o sub-atomico), ma ha anche conseguenze a livello macroscopico, quali l'incompenetrabilità dei corpi, la stabilità della materia e dei colori, l'esistenza del laser, della superconduttività, della superfluidità., della radioattività...

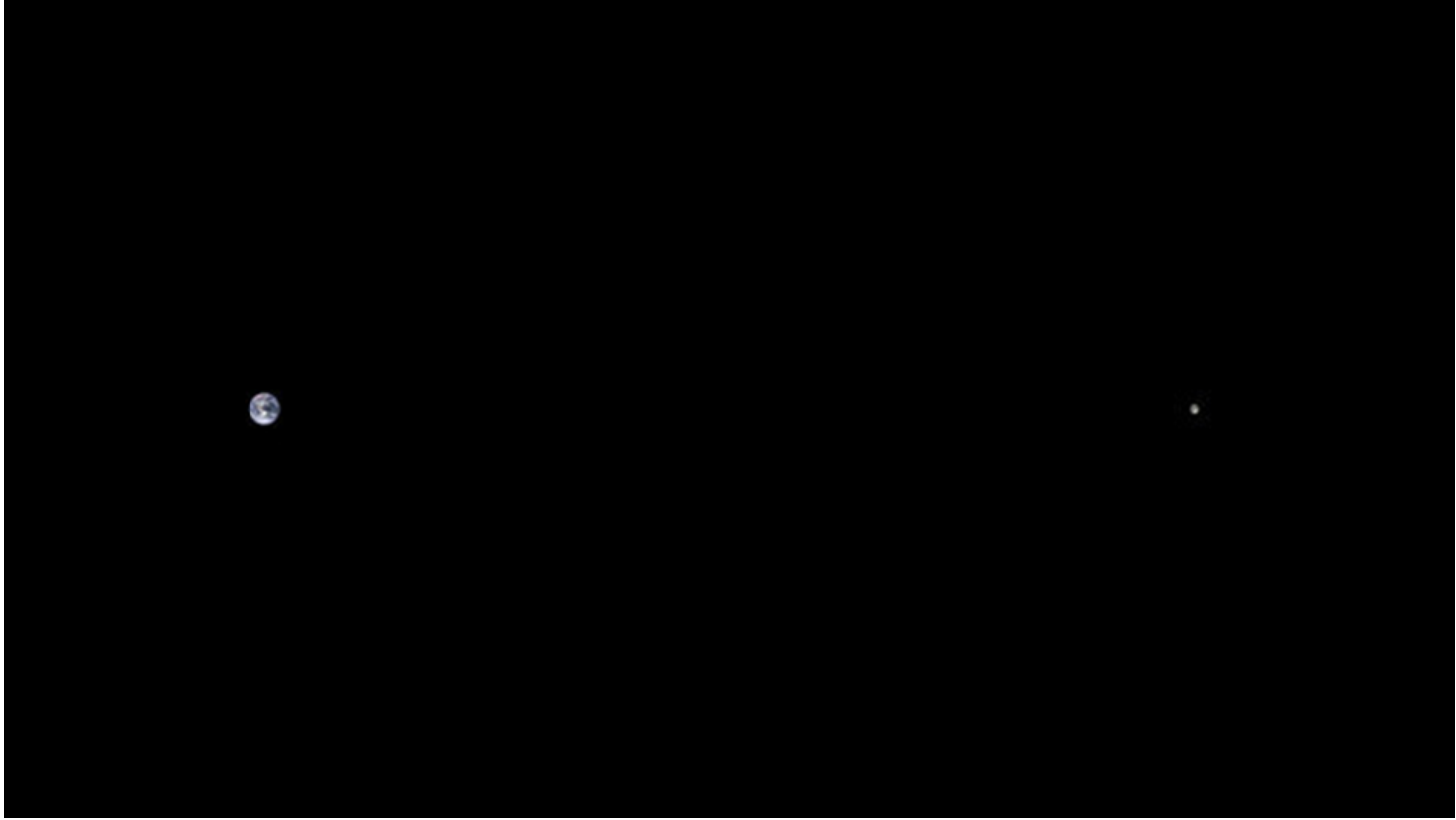


Incompenetrabilità dei corpi

Rutherford (1911) mostrò che l'atomo è fatto di un nucleo carico positivamente e di elettroni che gli ruotano attorno, ad una distanza di circa 100.000 volte la dimensione del nucleo



La distanza Terra-Luna è solo 50 volte il raggio della Terra e sembra che ci sia solo vuoto!

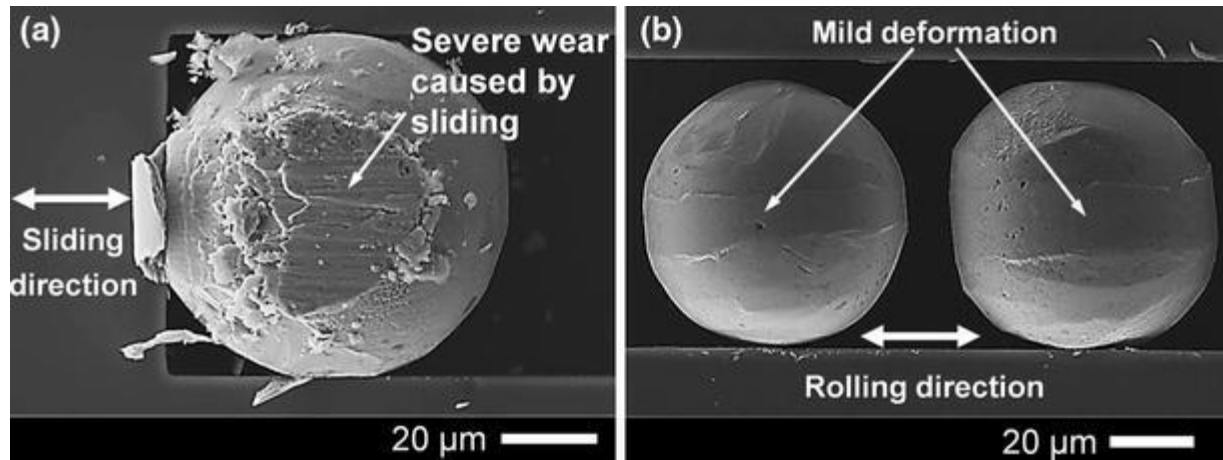


Ancor più questo accade nell'atomo e poiché tutta la materia è fatta di atomi, essa è ...essenzialmente vuota... Come mai non passiamo attraverso i muri?

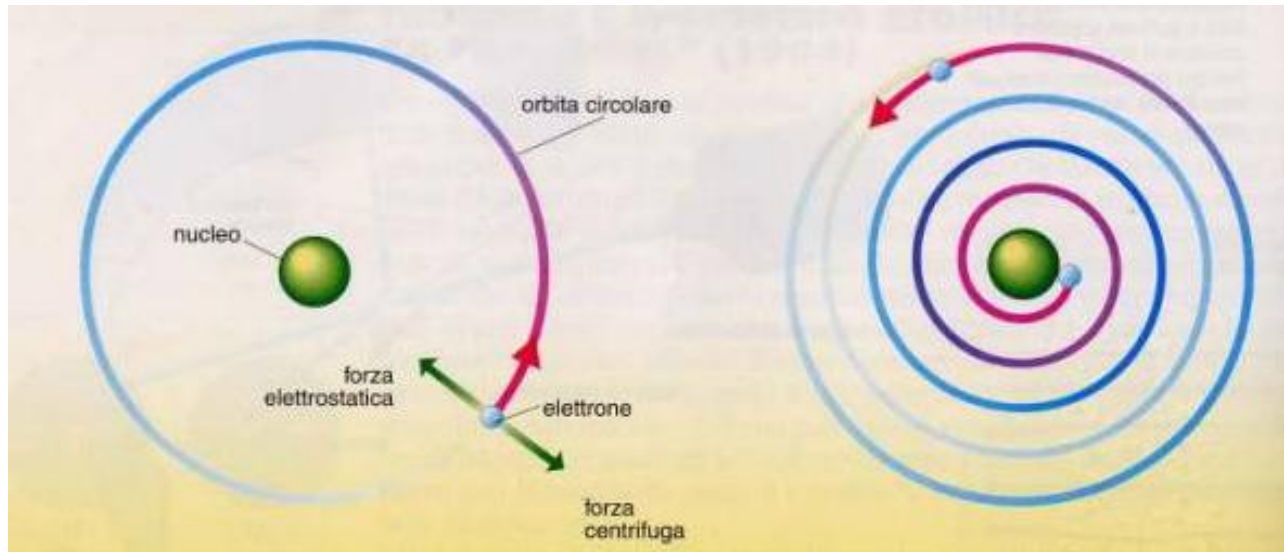
Stabilità della materia

Le molecole d'aria attorno a noi si scontrano e urtano noi 7 miliardi di volte al secondo con una velocità media di 1700 Km/h eppure sono tutte perfettamente identiche tra loro, non si «ammaccano» mai...

Com'è possibile? Con un tale numero di urti delle palle «classiche» si ammaccherebbero di sicuro!



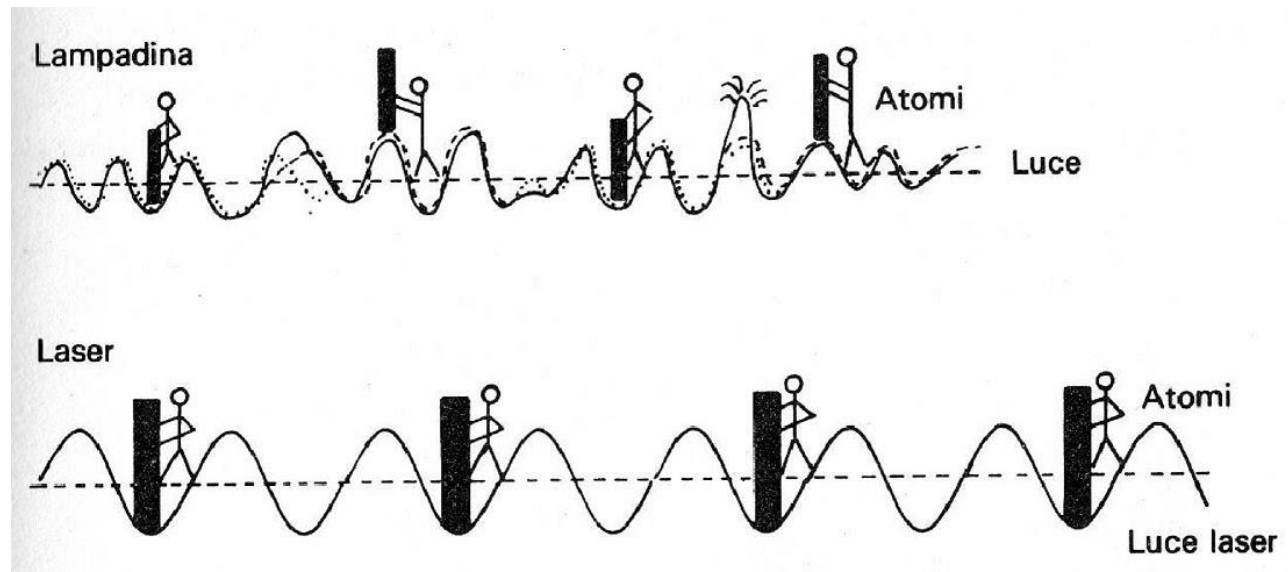
- Inoltre l'elettrone che nel modello dell'atomo di Rutherford ruota attorno al nucleo, essendo il suo moto accelerato emette radiazione, perdendo quindi energia...



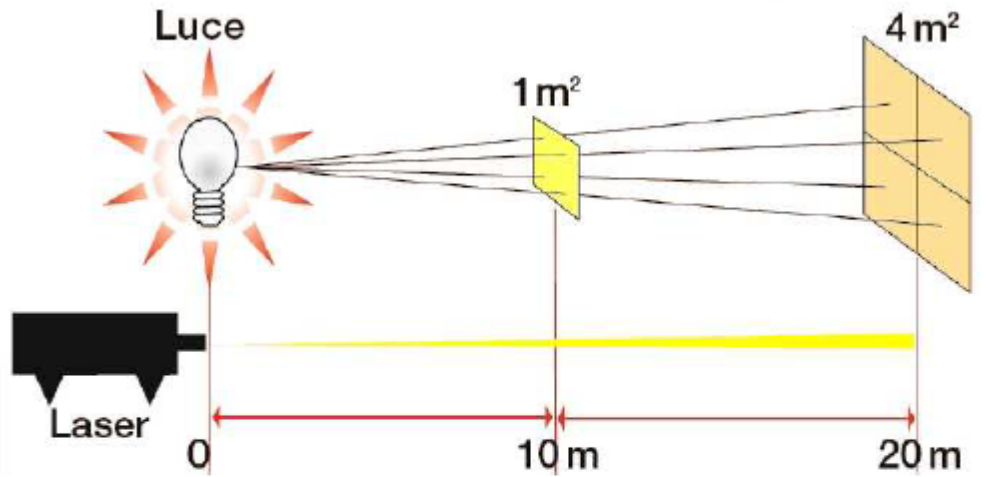
- In quanto tempo dimezzerebbe il suo raggio? Un miliardesimo di secondo! Come fanno allora gli atomi ad essere stabili?

Il laser

La luce emessa dalle lampadine non è mai nella forma di una onda perfetta, è incoerente. Quella emessa dal laser invece è un'onda regolarissima cioè coerente. Ma come fanno i miliardi di miliardi di miliardi di atomi a sincronizzarsi così perfettamente da emettere esattamente la stessa onda?

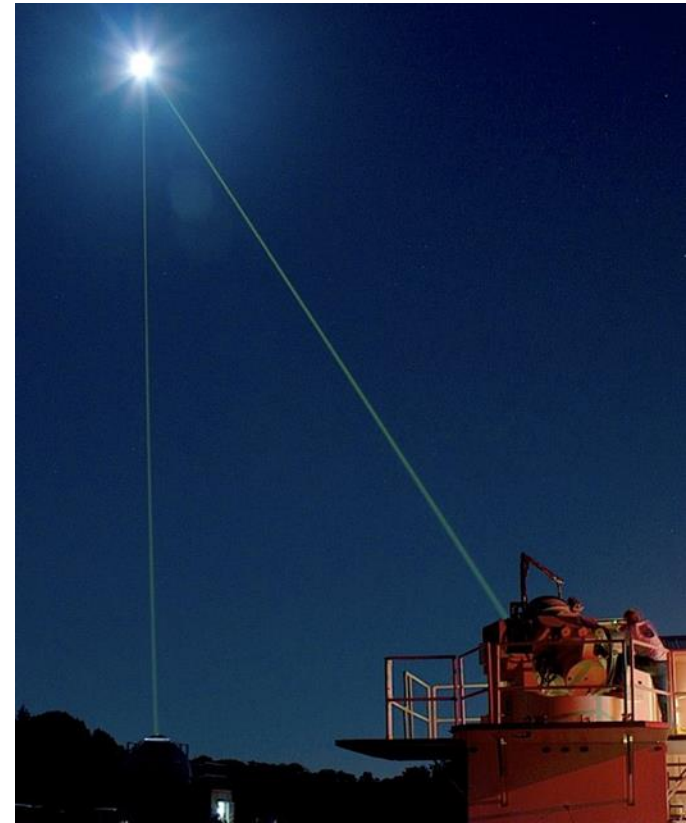


Propagazione



- Luce non coerente: si propaga col quadrato della distanza
- Luce laser: si disperde con la sola divergenza (spesso trascurabile anche alle grandi distanze)

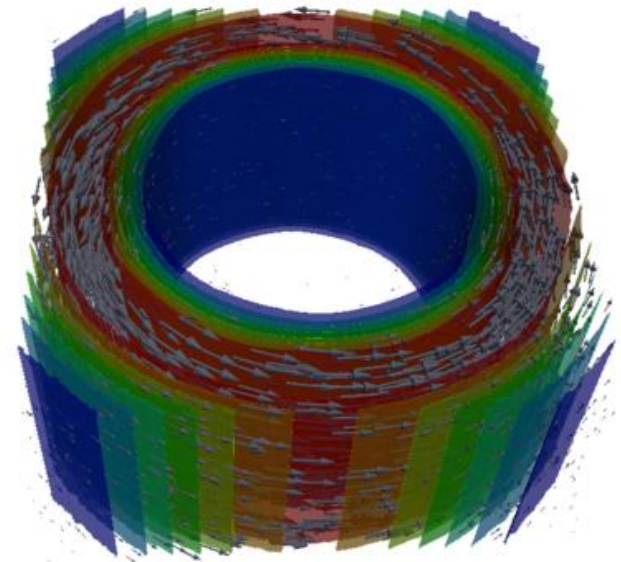
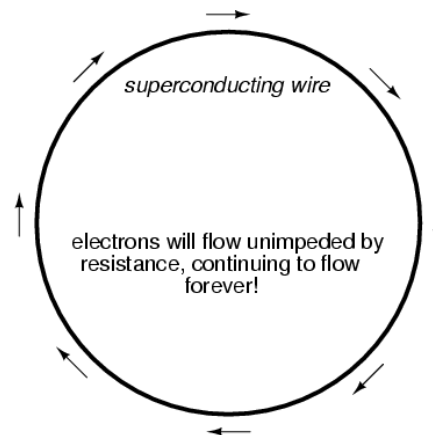
arriva come un raggio persino sulla Luna!



Superconduttività

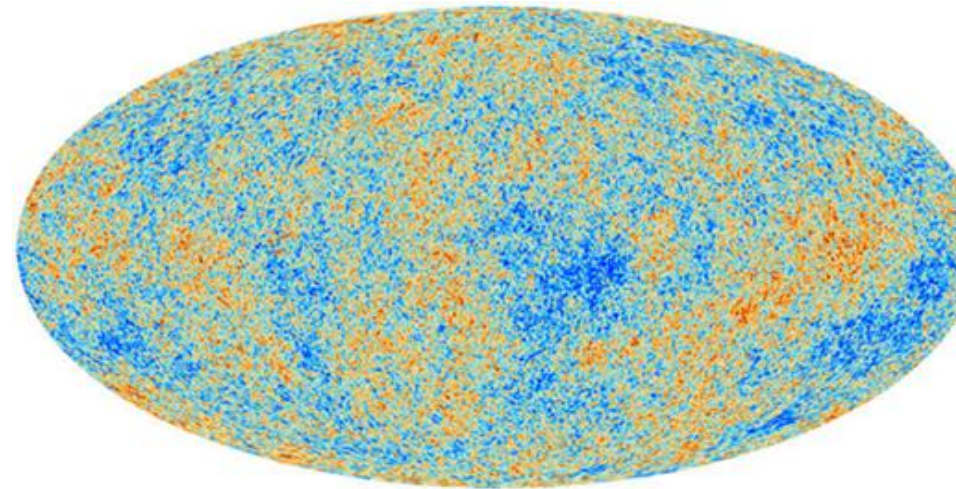
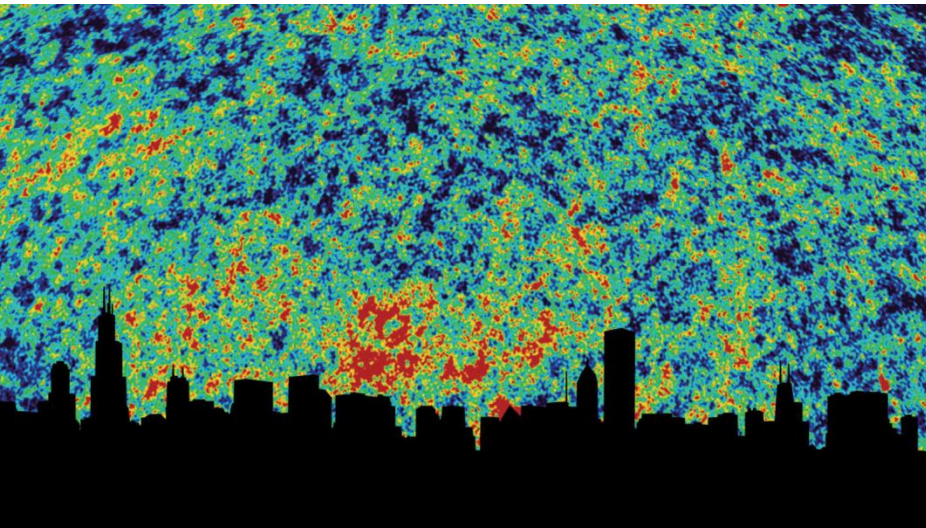
Quando spegniamo la luce la corrente elettrica che fluisce nei fili di rame si arresta istantaneamente e questo succederebbe con i fili di altri metalli. Ma all'inizio del '900 fu scoperto che in alcuni metalli, come lo stagno o l'alluminio, se raffreddassimo i fili di circa 270 gradi la corrente continuerebbe a fluire dopo aver "spento l'interruttore" per migliaia di anni...è la superconduttività.

Com'è possibile?



Scale e ...

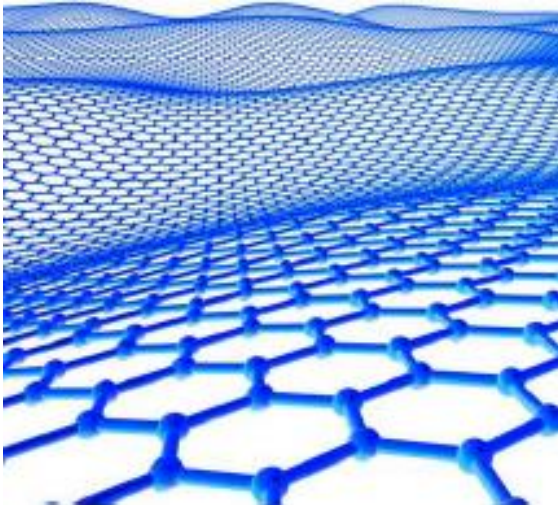
La fisica quantistica funziona dalle più piccole scale microscopiche a cui arriviamo, dallo studio delle quali ha avuto origine, fino alle più grandi scale conosciute, infatti sta alla base delle teorie attuali sull'origine delle strutture cosmiche... che si pensano nate da fluttuazioni del vuoto quantistico!!!



*La prima immagine del cielo: microonde
380.000 anni dopo il Big Bang
colori diversi segnalano temperature diverse
(differenze di un decimiliardesimo di grado)*

...tecnologia

La fisica quantistica sta alla base della tecnologia presente, senza di essa non esisterebbero computers e cellulari...basati sui semiconduttori, e la probabile tecnologia del futuro basata sul grafene...



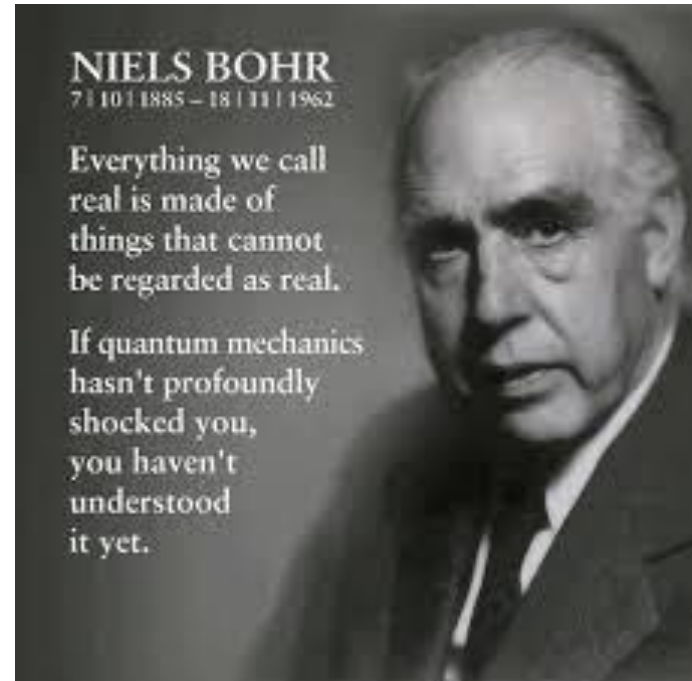
Ma come la Relatività ha messo in crisi il nostro concetto di spazio e tempo, così la fisica Quantistica mette in crisi il nostro concetto di “particella” riferito alle particelle del mondo atomico, come gli elettroni, o di “onda” sulla stessa scala, come le onde elettromagnetiche, ma anche, più in profondità, 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.

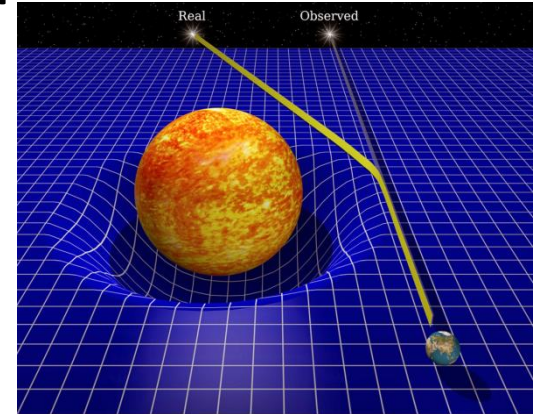
If quantum mechanics
hasn't profoundly
shocked you,
you haven't
understood
it yet.



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 quantistiche

Gli 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)



Abbiamo detto che gli elettroni sono
particelle...ma fasci di elettroni mostrano
fenomeni di interferenza tipici delle onde...

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: Intensita' (luminosita') $I(x) = (\text{ampiezza } A(x))^2$ 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 (non ha segno definito)

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 aperta,

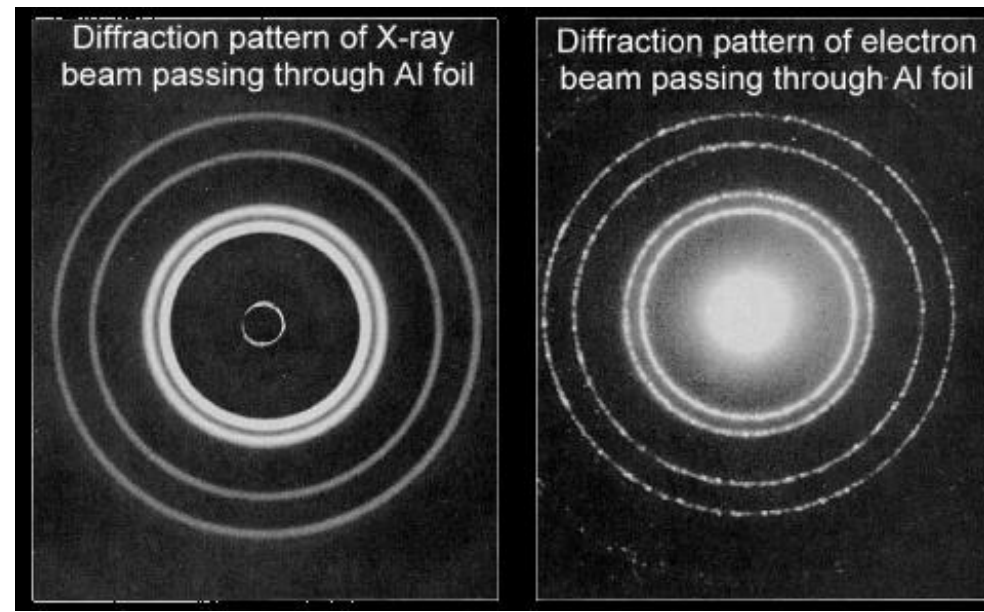
quindi la particella è passata o da 1 o da 2



Poiché le particelle passano dalla fenditura 1 o dalla fenditura 2 se chiudiamo una delle due è totalmente impossibile che in un punto x arrivino più particelle con una fenditura chiusa!

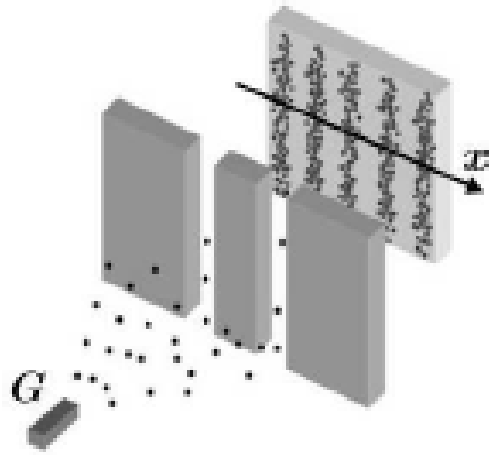
Ma per le onde nei minimi di interferenza non arriva luce, quindi arriva meno luce con due fenditure aperte che con una!

Eppure guardate queste figure di interferenza e diffrazione (circolare) una è fatta con la luce l'altra con gli elettroni!



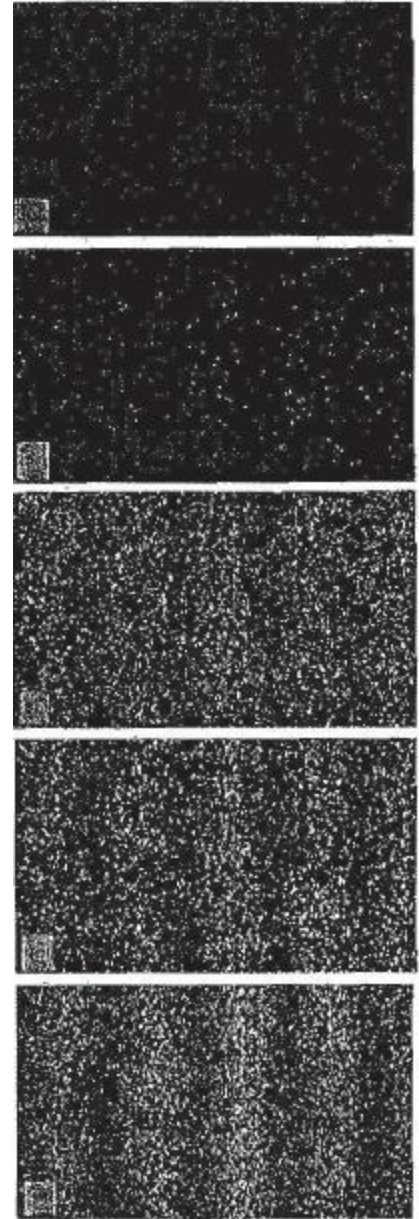
Onde o particelle?

- 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.**

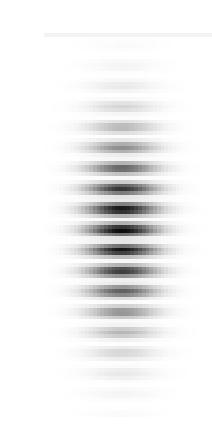
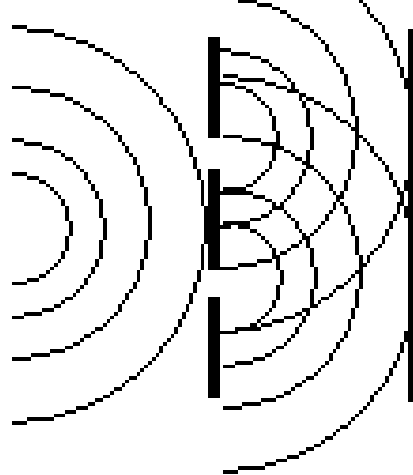


1. Gli elettroni compaiono nei rivelatori in **numeri interi come con particelle**
2. Contandoli ($N_{12}(x)$) otteniamo la figura di **interferenza come con onde.**

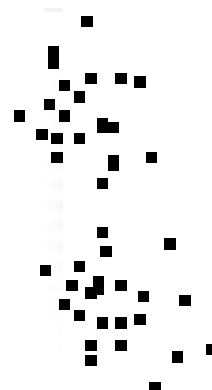
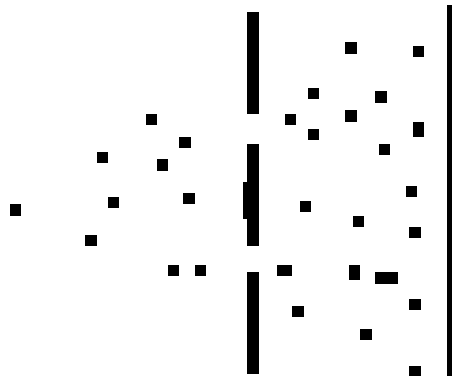
Dividendo per il numero totale (N) di elettroni del fascio otteniamo la probabilità $p_{12}(x) = N_{12}(x)/N$ che presenta quindi il fenomeno dell'interferenza



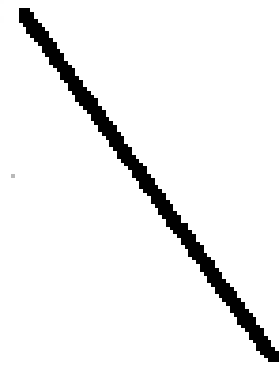
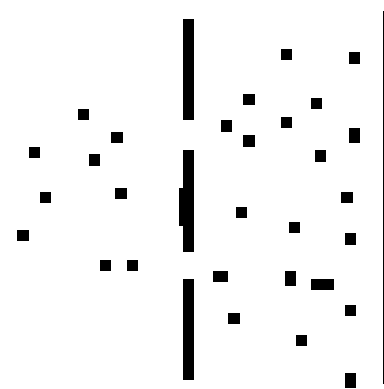
Onde



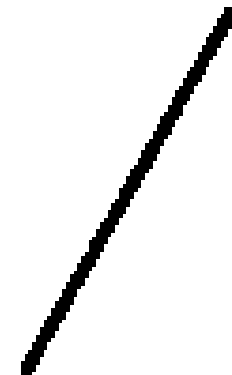
Sassi



Elettroni



Lastre



Onde di probabilita'

Il comportamento degli elettroni sembra folle! In alcuni punti (minimi d'interferenza) arrivano meno elettroni con due fenditure aperte che con una! Come possiamo razionalizzarlo?

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 somonavano. 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 Schroedinger interpretata probabilisticamente da Born)

Onde di probabilità

Allora se poniamo $\psi_1(x)$ =ampiezza dell'onda di probabilità con solo la fenditura 1 aperta e analogamente $\psi_2(x)$ per la fenditura 2 e con le fenditure 1+2 aperte poniamo

$\psi_{12}(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x)$ per le corrispondenti probabilità abbiamo

$p_{12}(x) = |\psi_{12}(x)|^2 = |\psi_1(x)|^2 + |\psi_2(x)|^2 + \text{interferenza} = p_1(x) + p_2(x) + \text{interferenza}$

• **Quindi cosa sono le particelle quantistiche?**

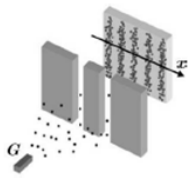
Sono onde o particelle?

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




Torniamo all'esperimento delle due fenditure... Gli elettroni sono rivelati sullo schermo come unita', quindi diremmo:

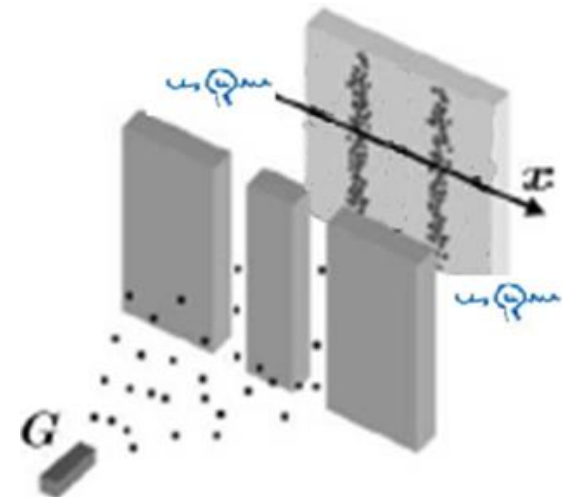
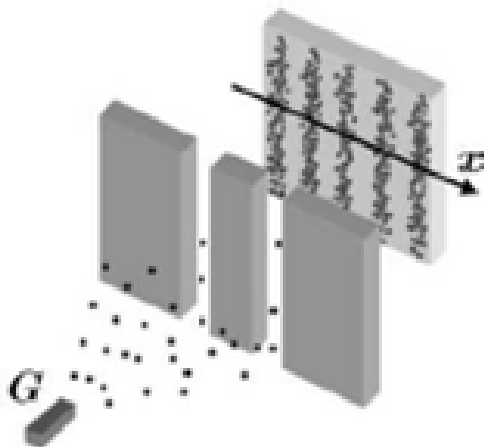
L'elettrone e' passato o dalla fenditura 1 o dalla fenditura 2, ma la somma delle probabilita' con una sola fenditura aperta (senza interferenza)



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?

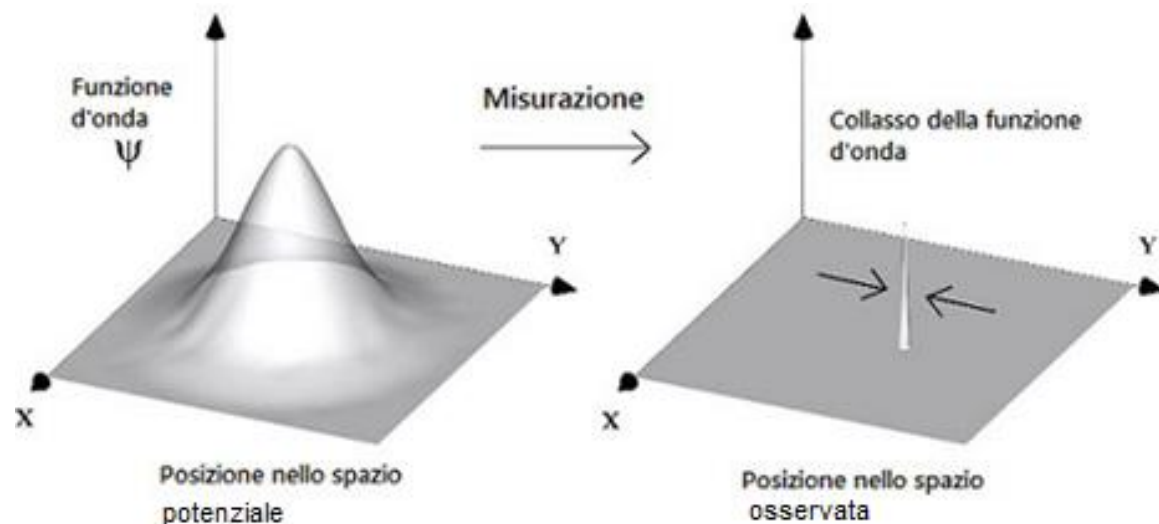
- Nessuna di queste affermazioni per gli elettroni descritti da $\psi_{12} = \psi_1 + \psi_2$ e' quindi corretta:
- L'elettrone passa da una fenditura o dall'altra (esclusa perche' se sommiamo il contributo dei due casi con una sola fenditura aperta non riproduciamo quello con due fenditure aperte)
- 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 è 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 probabilità determinata dalla funzione d’onda.

La posizione non osservata non ha un valore definito, ma solo valori potenziali...



Nessuna traiettoria ... se non osserviamo

- Con tale interpretazione (di Copenhagen 1927) la probabilità di trovare la particella in un punto non è dovuta alla nostra ignoranza su una posizione esistente, perché una posizione (come valore) non preesiste alla misura. La probabilità quantistica cioè è intrinseca, non epistemica.

Detto in linguaggio immaginifico: non siamo solo noi che non sappiamo dove è l'elettrone se non lo osserviamo, ma non lo sa

neppure lui...Questo è dovuto a proprietà strabilianti delle quantità fisiche scoperte da Heisenberg e...



