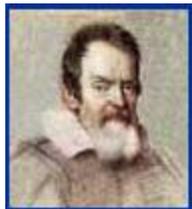


La meccanica quantistica: una nuova concezione della realtà fisica

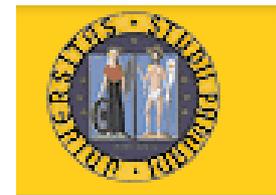
Pieralberto Marchetti

Universita' di Padova

Dipartimento G. Galilei di Fisica e Astronomia

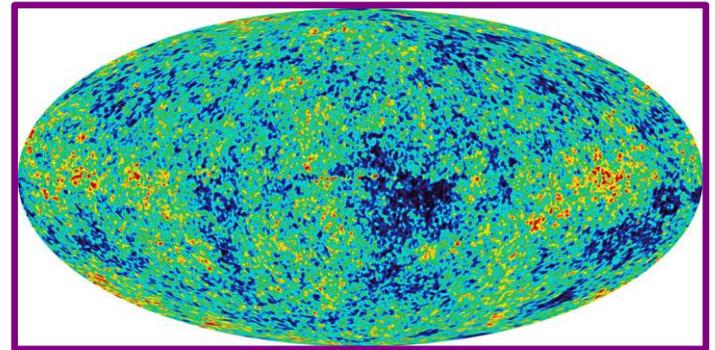


Galilei a Padova, 1592-1610 - "Li diciotto anni migliori di tutta la mia età".



Meccanica Quantistica

- La Meccanica Quantistica (MQ) e' la teoria fisica che descrive le leggi che governano i fenomeni fisici a livello microscopico (atomico o subatomico), 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...

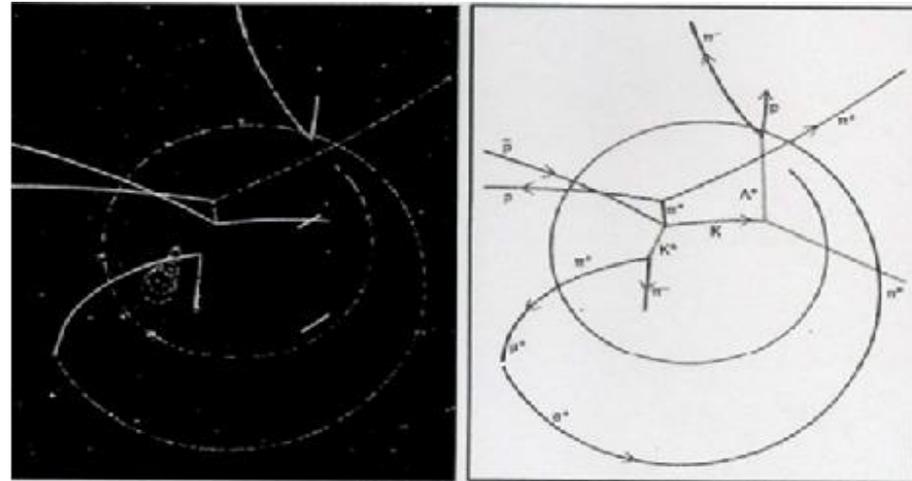


e del funzionamento dei telefonini....

Particelle quantistiche

- Referenza: G. Ghirardi "Un'occhiata alle carte di Dio" Saggiatore
- La Meccanica Quantistica mette in crisi il nostro concetto di particella e onda, e più in profondità di «realtà fisica», almeno su scale atomiche o subatomiche

- Le particelle quantistiche sono «particelle» -> si possono osservare le loro traiettorie in una camera

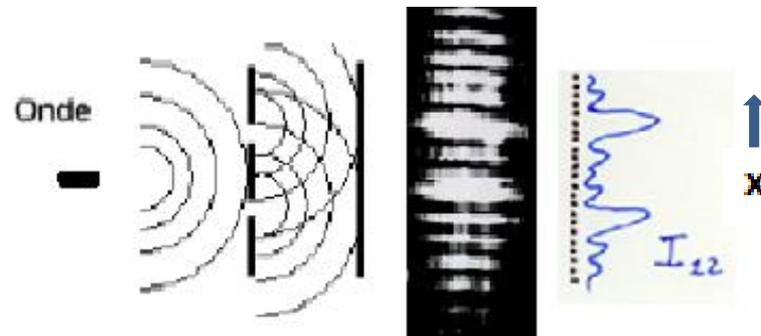


a bolle (vapore soprassaturo+particella carica-> condensazione di goccioline d'acqua->traiettoria)

Onde e Interferenza



- Ma fasci di particelle quantistiche mostrano il fenomeno di interferenza tipico 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') $I(x) = (a(x))^2$ 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

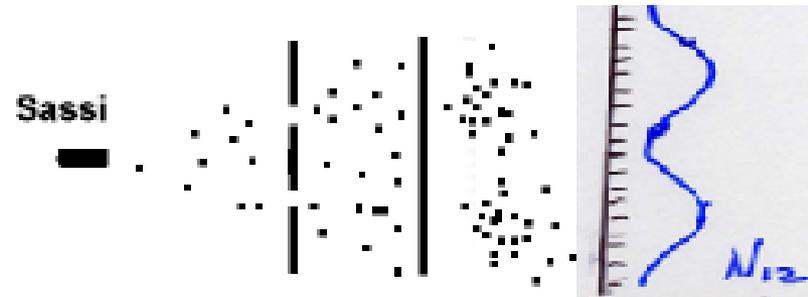
- Nessuna interferenza invece compare nel caso di particelle classiche (se interpretiamo come analogo di $I(x)$ il numero di particelle $N(x)$ che arrivano nella posizione x e con il pedice 1,2, 12 i casi con aperta solo le fenditure 1,2,1+2)

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

Dividendo per il numero totale N di particelle otteniamo

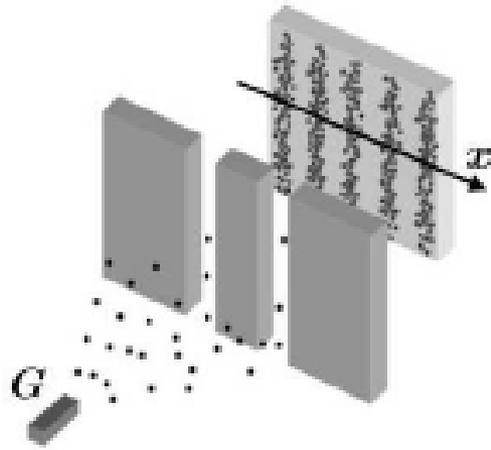
le probabilità $p(x) = N(x)/N$ e $p_{12}(x) = p_1(x) + p_2(x)$

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?

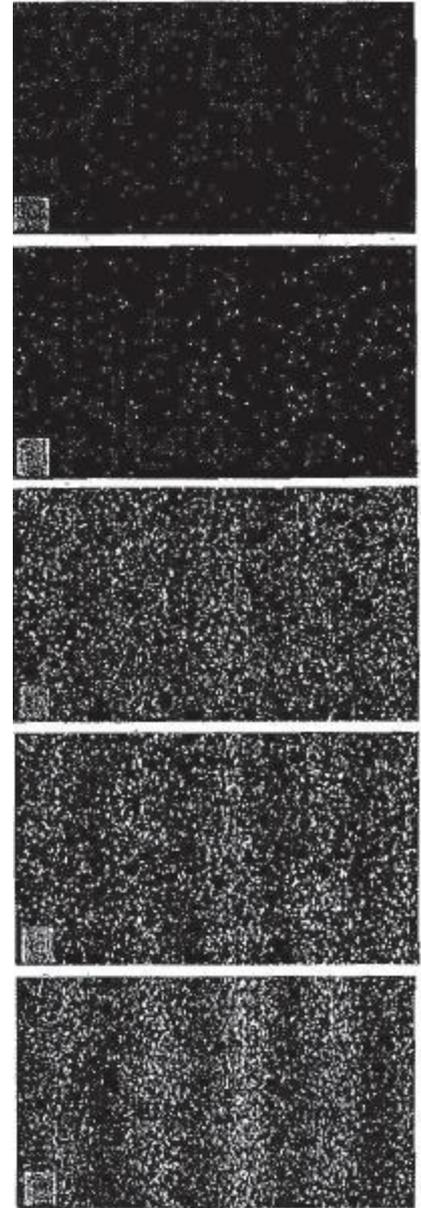
- Ma allora le particelle quantistiche sono particelle, visto che (sembra) possiamo osservare le loro traiettorie o onde, visto che mostrano il fenomeno di interferenza?
- Per capire la situazione rifacciamo **l'esperimento delle due fenditure con un fascio di particelle quantistiche** (es. elettroni...) 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
 $p_{12}(x) = p_1(x) + p_2(x) + \text{interferenza}$

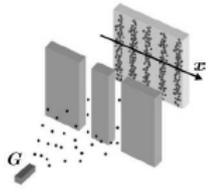
- **Quindi cosa sono le particelle quantistiche?**
Sono onde o particelle?

Particelle quantistiche

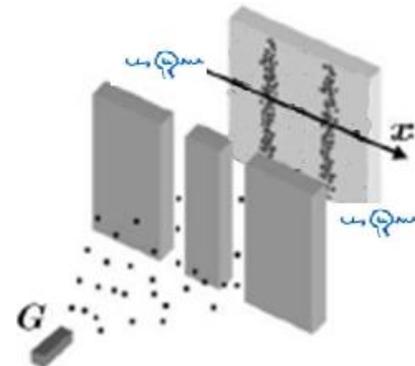
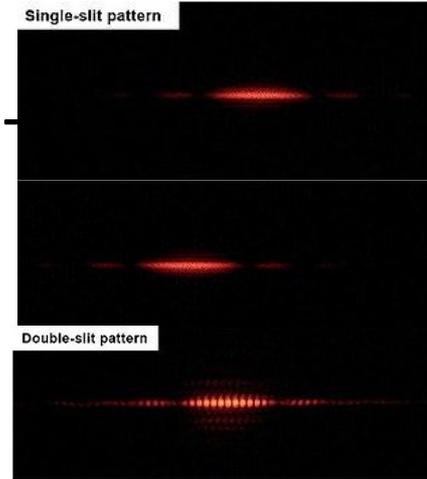
Sono “particelle” la cui probabilita' di essere trovate in una certa posizione x [o con un certo impulso p o ...] e' determinata dall'intensita' di un'onda $\psi(x)$ [$\varphi(p)$ o...].

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)

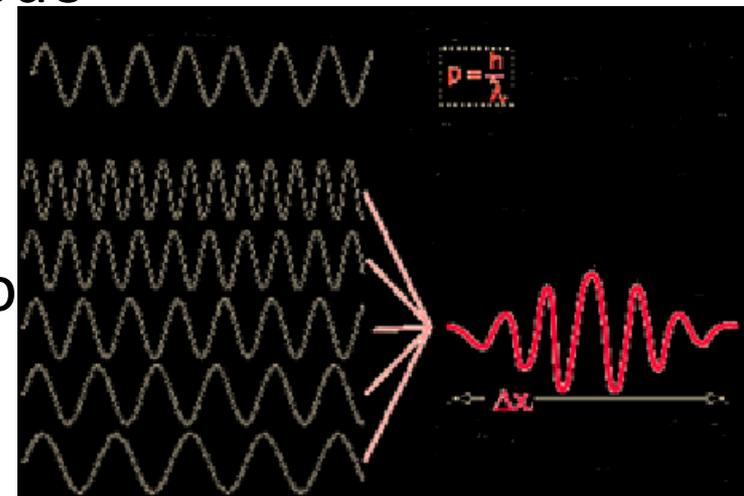
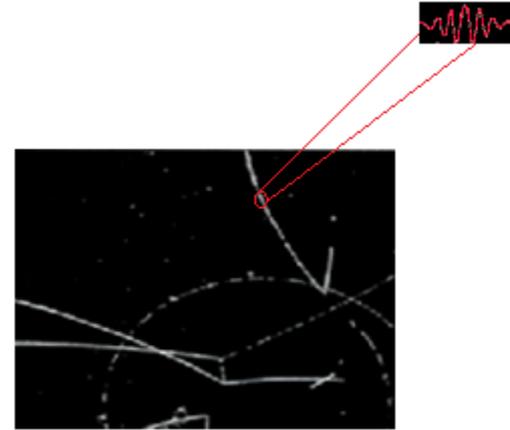
Nessuna traiettoria ... se non osserviamo

- 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...")



Localizzazione onda/particella

- E' evidente però che la localizzazione spaziale di una particella (quasi un punto) è completamente diversa da quella di un'onda, che se ha lunghezza d'onda ben definita è infinitamente estesa!
Consideriamo allora una «traiettoria» di una **particella quantistica** in una camera a bolle, la **funzione d'onda** che la descrive deve essere **ben localizzata**, ma questo si può ottenere solo **sommando onde di diversa lunghezza d'onda λ** , corrispondenti a **impulsi diversi** della particella quantistica (pacchetto d'onde) **perché $p = h / \lambda$** .



Indeterminazione spazio-impulso

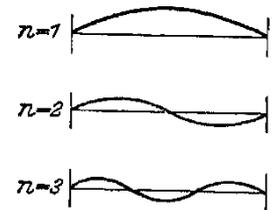
- Più vogliamo localizzare l'onda (Δx piccolo) più λ dobbiamo sommare ($\Delta \lambda$ grande) e più precisamente $\Delta x \Delta(1/\lambda) \geq 1$. Ma per una particella quantistica $p = h/\lambda$, perciò se ne conosciamo a un tempo fissato la posizione con una indeterminazione Δx e l'impulso con una indeterminazione Δp allora vale il **principio di indeterminazione di Heisenberg**:

$$\Delta x \Delta p \geq h$$

- **Ecco il significato profondo di h : è un limite alla nostra conoscenza simultanea di x e p per una particella quantistica!** dovuto alla natura ondulatoria di ψ
- Questo implica che posizione, impulso e in effetti tutte le quantità fisiche non possono essere descritte da "funzioni", che per definizione "assumono" valori conoscibili con precisione a priori arbitraria

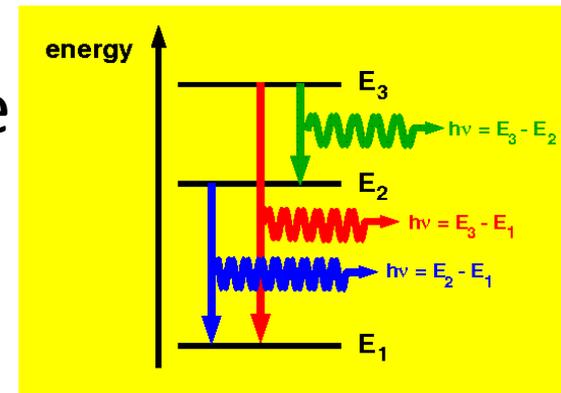
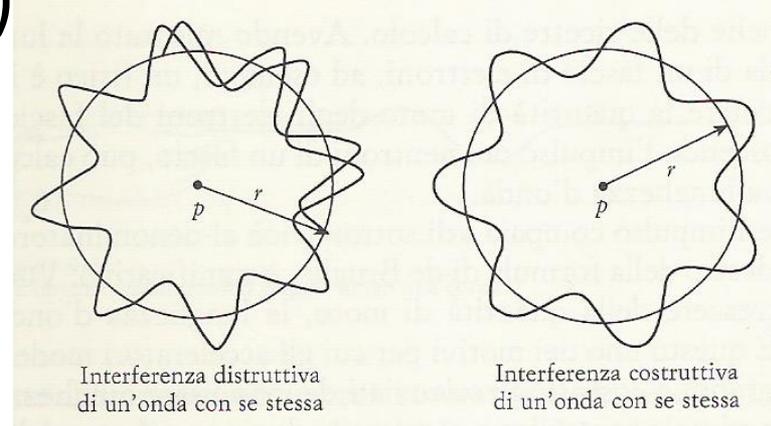
Energie discrete & stabilità di atomi e colori

- La **natura ondulatoria delle particelle quantistiche** permette la comparsa di un insieme di **valori discreti per alcune quantità osservabili** come l'energia di un atomo. Essendo discreta l'energia non può modificarsi in modo continuo con gli urti, questo garantisce la **stabilità degli atomi** (ad esempio dei gas) e **dei colori** della luce che emettono, nonostante i loro urti.
- Infatti la lunghezza di una corda che oscilla in modo stazionario deve essere un multiplo (semi)intero della lunghezza d'onda λ .



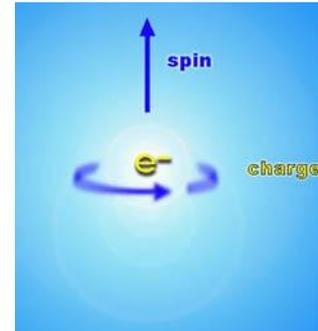
Energie discrete & stabilità di atomi e colori

- Per una ψ oscillante in un atomo (es. di H) attorno a una circonferenza di raggio r varrà allora $2\pi r = n\lambda = nh/mv$ (ricordiamo $p = mv = h/\lambda$)
- Se chiediamo con Bohr che valga anche l'equazione di Newton come legame tra v e r ($mv^2/r = e^2/r^2$) ricaviamo che le velocità possibili sono date dall'insieme discreto $v_n = 2\pi e^2/nh$ e quindi **discrete sono pure le energie possibili** $E_n = -2me^4\pi^2/n^2h^2$
- **I colori sono dati dalle v dei fotoni emessi** nei salti tra le energie permesse $\nu_{mn} = (E_m - E_n)/h$ (ricordando $E = h\nu$) e **la discretezza ne garantisce la stabilità**



FERMIONI & BOSONI

- Referenza: B.S. Chandrasekhar "Perché il vetro è trasparente" Saggiatore-Net
- Le particelle quantistiche sono caratterizzate dalla massa (in quiete) e da una quantità solo quantistica correlata alle rotazioni...lo spin s che rappresenta (in unità di $\hbar=h/2\pi$) il loro momento angolare intrinseco (idea intuitiva di spin: particella ruotante attorno a un asse, ma falsa: puntiforme non può ruotare su se stessa)
- Particelle suddivise in 2 categorie:
- **Fermioni** -> spin semintero (elettroni, quarks ...) **particelle di materia**
- **Bosoni** -> spin intero (fotoni, Higgs...) trasmettono le interazioni = **radiazione** (elettromagnetica...)



Rotazioni e spin

- Per rotazioni di 2π le coordinate o piu' in generale sia vettori che scalari sono invarianti. Ma ci sono enti che non sono invarianti per una rotazione di 2π ma lo sono per una di 4π (spinori)

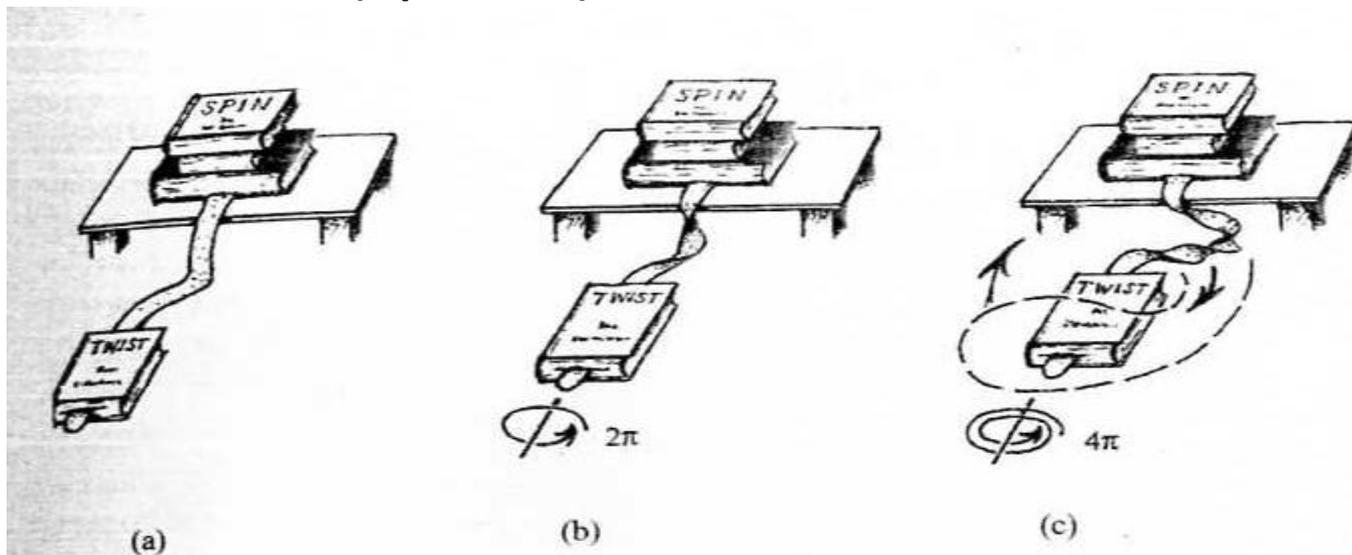
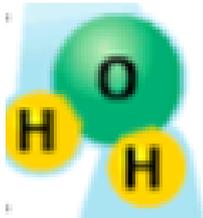


Fig. 11.3 - Un oggetto spinoriale, rappresentato dal libro di fig. 11.2. Un numero pari di rotazioni di 2π deve essere equivalente a nessuna rotazione, mentre non è così per un numero dispari di simili rotazioni. (a) Teniamo conto della parità del numero di rotazioni di 2π del libro attaccandolo, in modo allentato con l'impiego di una lunga cintura, a un oggetto fisso (qui, a una pila di libri). (b) Una rotazione di 2π del libro torce la cintura in un modo che non può essere eliminato senza un'ulteriore rotazione. (c) Una rotazione di 4π del libro dà una torsione che può essere completamente eliminata avvolgendo la cintura sopra il libro.

FERMIONI & incompenetrabilita'

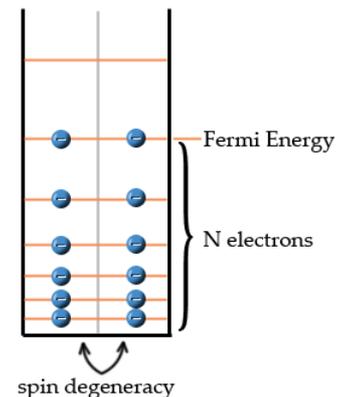
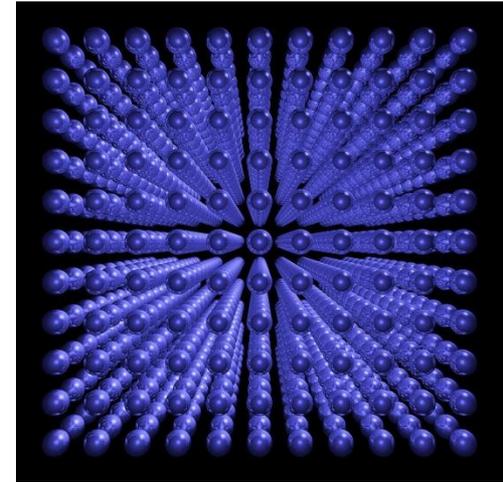
- Per gli elettroni, $s=1/2$. Consideriamo la Ψ per 2 di essi. $\Psi(x_1, x_2) = -\Psi(x_2, x_1)$ ma se sono entrambi nello stesso punto x , $\Psi(x, x) = -\Psi(x, x)$, quindi $\Psi=0$. Principio di esclusione di Pauli: non ci possono essere due elettroni nello stesso punto \rightarrow le orbite elettroniche di due atomi non possono sovrapporsi troppo

L'elettrone e' puntiforme ma le orbite hanno dimensioni di circa 10^{-10} m quindi gran parte dello "spazio" in un atomo è vuoto, ma per il principio di Pauli per la compenetrabilità contano le orbite e le distanze tra di loro nella materia sono comparabili alle loro dimensioni \rightarrow incompenetrabilita'



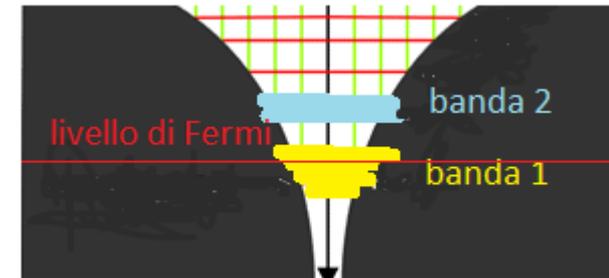
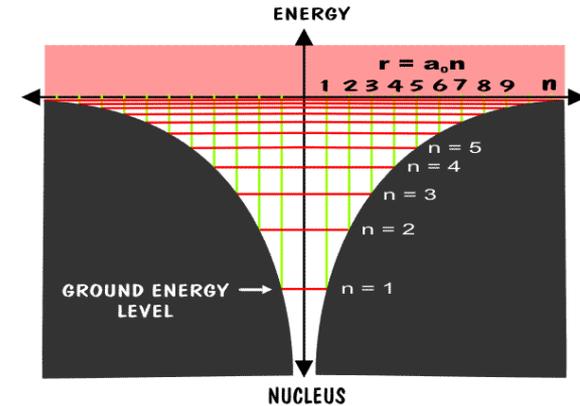
FERMIONI & Metalli, isolanti... cellulari

- In un solido con N_a ($\sim 10^{23}$) atomi a distanza a abbiamo impulsi permessi che sono multipli di $h/N_a a$.
- Per il principio di Pauli non ci può essere più di un elettrone (per spin) per ogni impulso disponibile. Quindi se ci sono N_e elettroni in un materiale, ci deve essere un impulso massimo $N_e h/N_a a$, e quindi una energia massima (livello o energia di Fermi)



FERMIONI & Metalli

- Abbiamo visto che per un solo atomo le energie permesse formano un insieme discreto. E se avviciniamo N atomi come in un solido? Allora si creano delle "bande" di energia permesse, intorno ai valori per gli atomi singoli, che possono contenere N elettroni.
- Se il livello di Fermi sta in una banda, ci sono immediatamente sopra in energia stati permesse e quindi ogni campo elettrico che aumenta l'energia degli elettroni crea corrente, perché gli elettroni trovano stati permesse. Questi sono i metalli.



FERMIONI & isolanti...e... cellulari

- Se il livello di Fermi sta invece in mezzo a due bande di energia permessa, allora immediatamente sopra in energia gli elettroni non hanno stati permessi e un campo elettrico non riesce a muoverli. Questi sono gli isolanti.
- Se la distanza tra la banda riempita e quella vuota è piccola allora un piccolo campo elettrico induce una corrente. Questi sono i semiconduttori che stanno alla base dei circuiti elettronici in computer e cellulari...

