

FISICAST

SxT
per

La meccanica quantistica
nel mio cellulare
di
Giovanni Organtini



La Meccanica Quantistica nel mio Cellulare

Giovanni Organtini

Abstract:

Tutti credono che gli strani fenomeni previsti dalla meccanica quantistica si possano osservare solamente in complicati laboratori scientifici e che, tutto sommato, questa fisica non abbia alcuna applicazione pratica. In realtà, in ogni apparato elettronico ci sono milioni di componenti che non potrebbero funzionare senza meccanica quantistica.

INIZIO

Introduzione: In questo podcast sfatiamo un altro mito: che la Meccanica Quantistica sia qualcosa di molto lontano dalla vita quotidiana e che i suoi effetti si possono osservare solo in complicati esperimenti di laboratorio. In realtà la Meccanica Quantistica è alla base del funzionamento di ogni apparecchio elettronico...

Rumore di traffico in sottofondo

Q: Ciao Giovanni!

A: Ciao Chiara, come mai da queste parti?

Q: Ti ricordi di avermi promesso di parlarmi della meccanica quantistica l'ultima volta che ci siamo sentiti? È stato quando mi hai spiegato l'effetto fotoelettrico.

A: Sì, mi ricordo. Sono pronto a mantenere la promessa.

Q: Bene, allora prendiamoci un caffè e cominciamo...

Il rumore di traffico sfuma, come se entrassimo in un locale

A: cosa sai della meccanica quantistica?

Q: poco, naturalmente. So solo che prevede fenomeni molto bizzarri, per non dire assurdi...

A: per esempio?

Q: non farmi domande imbarazzanti :-). So però che i fenomeni previsti dalla meccanica quantistica, per quanto bizzarri, si possono sperimentare nei vostri laboratori, perciò, come tu insegni, se le previsioni si verificano sperimentalmente devono essere vere, anche se strane.

A: guarda che non serve entrare in un laboratorio per sperimentare la meccanica quantistica. Sono sicuro che nella borsa hai qualcosa che senza meccanica quantistica non funzionerebbe: il cellulare, per esempio, o il telecomando dell'auto, il tuo lettore MP3...

Q: ma dai? Io ho sempre pensato che quelli funzionassero grazie all'elettronica.

A: sì, ma l'elettronica è fatta con dispositivi quantistici. Come tutto, del resto, perché tutto è fatto di atomi, che sono oggetti di natura quantistica.

Q: Sì, lo so. Tutta la materia è fatta di atomi: nuclei formati da protoni e neutroni, attorno ai quali ruotano elettroni.

A: ecco il primo errore. Questo modo di concepire gli atomi risale agli inizi del secolo scorso, quando ancora non si conosceva la Meccanica Quantistica. Gli elettroni non girano attorno ai nuclei come fossero dei pianeti.

Q: ah no? Eppure, ricordo di aver studiato questo sui libri di scuola...

A: no. Quello è il modello noto come "Modello di Bohr". Che però è stato superato. Gli elettroni di un atomo sono più simili a un'onda che oscilla attorno al nucleo che a pianeti che gli ruotano attorno. Secondo la meccanica quantistica, infatti, così come le onde possono diventare particelle (ricordi l'effetto fotoelettrico?), può succedere anche il contrario: le particelle diventano onde.

Q: Cioè? Gli elettroni che stanno attorno al nucleo si muovono su e giù come le persone che fanno la hola in uno stadio?

A: Non proprio. Se immagini gli elettroni disposti attorno al nucleo che si alzano e si abbassano, vuol dire che ogni elettrone si trova in un punto preciso, appunto come gli spettatori di uno stadio. Immagina invece un nucleo come un pianeta simile alla Terra, ma completamente ricoperto da un Oceano, senza terre emerse. Quest'Oceano (intendo l'intero Oceano) è un elettrone.

Al di sopra di questo ce n'è un altro, e così via. Ci sono tanti oceani uno sopra l'altro quanti sono gli elettroni di un atomo. E talvolta le loro superfici si compenetrano l'una nell'altra. Ciascuno di questi oceani si chiama "orbitale". Quindi devi immaginare un elettrone non come una particella puntiforme, una pallina, ma come la superficie dell'oceano corrispondente, con tutte le sue onde e increspature.

Q: ma che dici? Com'è possibile?

A: Il fatto è che l'elettrone non è né una particella, né un'onda, ma entrambe le cose allo stesso tempo. E la natura corpuscolare o ondulatoria si manifesta in condizioni diverse. Come accadeva con la luce nel caso dell'effetto fotoelettrico di cui abbiamo parlato l'altra volta. Lo so, è difficile immaginarlo, ma tutte le evidenze sperimentali dicono che è così e noi dobbiamo accettare per vero tutto quello che misuriamo, indipendentemente dalla nostra capacità di comprenderlo.

Secondo la meccanica quantistica, questi elettroni in forma di onde possono assumere solo certi valori discreti, cioè non continui, della loro energia. Se l'elettrone fosse come un pianeta che ruota attorno al Sole, potrebbe avere un'energia qualunque, perché l'energia dipende dalla distanza alla quale il pianeta si trova dal Sole. Nel caso degli elettroni, invece non è così. Gli elettroni di un atomo possono avere solo certe energie. Tutte le altre sono proibite.

Q: quindi gli elettroni possono trovarsi solo ad alcune distanze dal nucleo?

A: non esattamente, perché la distanza di un elettrone dal nucleo è una grandezza mal definita in meccanica quantistica. Come ti ho appena detto l'elettrone non è un punto. Devi piuttosto immaginarlo come qualcosa di "spalmato" attorno al nucleo. In un certo senso però, sì. Puoi immaginare l'energia di un elettrone come una grandezza che ne determina la distanza "media" dal nucleo.

Q: e perché mai questa distanza, e quindi l'energia, non può essere qualunque?

A: proprio perché l'elettrone è un'onda come quella sulla superficie di quell'oceano di cui parlavamo. Infatti, stabilita quella che si chiama "lunghezza d'onda", cioè la distanza tra due creste successive, le possibili onde che puoi disegnare devono trovarsi a distanze particolari.

Q: non capisco...

A: facciamo così: disegna una circonferenza sul tovagliolo che rappresenta la superficie di un pianeta, che a sua volta rappresenta il nucleo atomico.

Q: fatto...

A: adesso prova a disegnare un oceano al di sopra di questa circonferenza. Devi disegnare, tutt'intorno al pianeta, una linea ondulata, con le creste che si susseguono in maniera regolare, che si richiuda su sé stessa una volta compiuto un giro.

Q: comincio...

A: vedi? se non scegli bene la distanza, l'onda non si richiude su sé stessa. Quando torni al punto di partenza la linea che hai disegnato potrebbe essere più in alto o più in basso rispetto al punto di partenza. E questo non va bene. L'onda deve essere continua. Non può esserci un salto brusco.

Q: in effetti è vero...

A: Puoi disegnare solo quelle onde che si dispongono a formare una circonferenza la cui lunghezza sia un multiplo intero della loro lunghezza d'onda.

Ricordi l'effetto fotoelettrico? In quel caso avevamo capito che l'energia delle particelle che formano la luce, i fotoni, dipendeva dalla frequenza dell'onda associata. Anche nel caso degli elettroni la loro energia (e quindi la loro "distanza" media dal nucleo) dipende dalla frequenza dell'onda associata. Per inciso, frequenza e lunghezza d'onda sono tra loro "parenti": a piccole lunghezze d'onda corrispondono grandi frequenze e viceversa.

Q: forse ho capito: un elettrone di una certa energia lo posso rappresentare come un'onda di una certa frequenza. Ma non sempre posso disegnare un'onda di quella frequenza alla distanza che corrisponde a quell'energia. E così, l'elettrone può assumere solo i valori dell'energia che mi permettono di disegnare queste onde continue attorno al nucleo...

A: bravissima! Noi diciamo che le energie sono "quantizzate", per questo chiamiamo questa fisica "meccanica quantistica". Un'interessante conseguenza del fatto che gli elettroni sono come onde è il "principio di esclusione" di Pauli. Secondo questo principio due elettroni non possono mai stare nello stesso stato.

Q: E chi glielo impedisce?

A: è appunto una conseguenza del fatto che gli elettroni sono come onde e che le onde possono interferire. Se sommi due onde, in certi casi, puoi ottenere un'onda nulla. La forma d'onda degli elettroni è tale da produrre questo caso. Se vuoi, però, non è una cosa così strana. In fondo anche in meccanica classica due particelle non possono trovarsi nello stesso stato. Il fatto è che in meccanica classica lo stato di una particella dipende dalla posizione e dalla velocità di questa. E due particelle possono senz'altro avere la stessa velocità, ma non possono stare esattamente nello stesso posto contemporaneamente, quindi non possono stare nello stesso stato! In meccanica quantistica la posizione è un concetto non ben definito, e lo stato è determinato (anche) dall'energia dell'elettrone. Perciò, a parità di tutte le altre condizioni, due elettroni non possono avere la stessa energia.

Q: faccio fatica a comprendere cosa significhi "stato" ...

A: lo stato di una particella è determinato da tutte quelle grandezze che puoi misurare su una particella, che non dipendono l'una dall'altra e dalle quali puoi determinare tutto il resto. Ad esempio, come ho già detto, lo stato di una particella classica è determinato dalla sua posizione e dalla sua velocità. Se conosci queste due grandezze, puoi sapere tutto su quella particella (ad esempio la sua energia). Lo stato di un gas è determinato quando conosci la sua temperatura e la sua pressione. Se conosci queste due grandezze puoi sapere tutto: il suo volume, per esempio. Lo stato di una particella subatomica, che si comporta secondo la meccanica quantistica, è perfettamente determinato quando ne conosci l'energia e il momento angolare.

Q: momento che?

A: lascia perdere. Fai finta di non aver sentito :-)) tanto non c'interessa per ora...

Q: (ride) va beh, ok. Non ho sentito...

A: Una conseguenza interessante del principio di esclusione si ha quando tanti atomi si dispongono l'uno vicino all'altro a formare un cristallo, come nel caso del silicio.

Q: perché proprio il silicio?

A: perché è di silicio che sono fatti i dispositivi elettronici. Stiamo parlando del fatto che la meccanica quantistica è onnipresente nella tua vita attraverso questi dispositivi.

Quindi prendiamo questa sostanza come esempio, così ci concentriamo sul caso particolare.

Q: Ok. Che ha di speciale un cristallo di silicio? Sarà un insieme di atomi di silicio...

A: È utile immaginare il processo di formazione del cristallo. Prendi un atomo di silicio. Per semplicità immagina che abbia un solo elettrone, tanto le cose non cambiano nella sostanza.

Q: ok

A: avvicina un altro atomo di silicio

Q: ok

A: ricorda che l'elettrone è ovunque. In particolare, in una regione relativamente piccola di spazio si trovano adesso due elettroni.

Q: bah. Uno dei due elettroni appartiene a un atomo di silicio. L'altro elettrone al secondo atomo...

A: Non proprio. Poiché gli elettroni sono ovunque non possono sapere a quale atomo appartengono. Si trovano entrambi attorno a due nuclei, quindi attorno a una carica elettrica doppia rispetto a quella alla quale si troverebbero se fossero molto lontani l'uno dall'altro.

Q: e allora?

A: e allora, anche se si trovano entrambi nelle stesse condizioni, non possono avere la medesima energia per effetto del principio di esclusione: non possono stare nello stesso "stato".

Q: ah, e allora?

A: allora ciascuno modifica un pochino la sua energia in modo che ogni elettrone abbia un'energia diversa da quella dell'altro. Sempre quantizzata, ma diversa da quella di prima. Quello che succede è che l'energia di ogni elettrone ora non dipende più da un solo nucleo di silicio, ma anche dalla presenza dell'altro atomo, fatto di un nucleo e dai suoi elettroni. I possibili stati di energia di questo sistema sono diversi (anche se di poco) da quelli di prima e gli elettroni vi si dispongono in modo da non occupare lo stato di un altro.

Q: ah!

A: ora avvicina un terzo atomo di silicio

Q: immagino che al terzo elettrone succederà lo stesso. Non potendo avere la stessa energia del primo e del secondo, ne assumerà una diversa.

A: immagina bene. Continua ad aggiungere atomi...

Q: man mano che aggiungo atomi si producono stati di energia diversa, in ciascuno dei quali si trova un elettrone

A: sai quanti atomi ci sono in un grammo di silicio? ventimila miliardi di miliardi.

Q: che? non riesco neanche a immaginarlo questo numero. Quindi in un cristallo di un grammo ci sono ventimila miliardi di miliardi di stati di energia diversi...

A: esatto. Questi stati hanno ciascuno un'energia diversa, tuttavia non possono essere troppo diversi l'uno dall'altro, perché tutto sommato le condizioni in cui si vengono a trovare gli elettroni che li "abitano" non sono così diverse, perciò si addensano talmente tanto che praticamente formano una "banda" continua di energie permesse, che si chiama "banda di valenza".

Q: quindi un elettrone che dovesse cambiare la sua energia in modo da passare da un estremo della banda all'altro estremo potrebbe passare per tutti gli stati intermedi, come farebbe Marte passando nell'orbita di Giove.

A: sì.

Q: e allora vedi che avevo ragione io? Gli elettroni si comportano come i pianeti di un sistema solare.

A: niente affatto. Perché adesso un elettrone che sta in questa banda non appartiene a uno dei ventimila miliardi di miliardi di nuclei, ma all'intero cristallo. Si trova ovunque, in una regione di spazio macrosocopica costituita dal cristallo. Se attacchi una pila elettrica ai capi di una barretta di silicio, non passerà corrente, perché la corrente consiste in un flusso di elettroni che si muovono in un conduttore, come un filo elettrico. Immagina il processo in questo modo: dal polo negativo della pila "escono" degli elettroni (non è proprio così, ma non fa niente), che cercano di muoversi attraverso il cristallo per raggiungere il polo positivo dalla parte opposta. Per farlo devono "spostare" gli elettroni presenti nel cristallo. Ma se tutti gli stati sono pieni, gli elettroni del cristallo non si possono spostare (se lo facessero cambierebbero il loro stato e si troverebbero ad avere la stessa energia di un altro elettrone, il che è vietato dal principio di Pauli). Per questo il cristallo di silicio è isolante: non conduce elettricità.

Q: Ma se il silicio così formato è un isolante, come mai si trova in abbondanza nel mio cellulare? Non funziona con l'elettricità?

A: se nel processo di formazione del cristallo di silicio, ogni tanto inseriamo un atomo di arsenico, che ha un elettrone in più rispetto al silicio, l'elettrone in eccesso possiede un'energia ben diversa da quelle comprese nella banda di valenza del silicio. Se inseriamo tanti atomi di arsenico accade lo stesso fenomeno che accade col silicio puro. Gli elettroni in più cominciano a disporsi su energie diverse formando una banda. Ma questa banda, che si chiama "di conduzione" comprende energie molto maggiori di quelle della banda di valenza del silicio ed è separata da questa da un intervallo di energie proibite, che nessun elettrone può assumere.

Q: scommetto che questa banda si chiama "di conduzione" perché le sostanze che ce l'hanno sono conduttori di elettricità. Quindi gli elettroni in questa banda si possono muovere liberamente.

A: brava. In effetti questa banda non è piena e se connetti i poli di una pila a questo cristallo, attraverso di esso passa una corrente, perché gli elettroni nella banda di conduzione sono abbastanza liberi di muoversi, attraversando stati di energia non occupati. Aggiungendo qualche atomo di arsenico, dunque, un cristallo di silicio diventa conduttore.

Q: e non potrei usare un conduttore qualunque, come il rame?

A: no, perché un conduttore farebbe scorrere la corrente in tutte le possibili direzioni. Invece, per costruire certi dispositivi elettronici, devi poter scegliere in che verso far circolare la corrente. Ti serve una specie di "valvola" che faccia passare la corrente in un verso e non nell'altro.

Q: allora spiegami come fai.

A: costruisco un altro cristallo di silicio, ma questa volta, invece di mescolare atomi di arsenico, aggiungo atomi di boro, che hanno un elettrone in meno rispetto al silicio. Quello che succede è che nella banda di valenza restano degli stati vuoti, che non sono occupati da elettroni, perché questi elettroni mancano.

Q: ok

A: se colleghi una pila elettrica a questo cristallo, a differenza di prima, gli elettroni del cristallo si muovono, anche se sono nella banda di valenza. Immagina i diversi elettroni in un cristallo come a una fila di persone, a ciascuna delle quali daremo un nome. Di tanto in tanto nella fila c'è un posto vuoto. L'elettrone Giovanni esce dalla pila, all'estremo sinistro della fila, e vuole muoversi verso destra, verso il polo positivo. Trova il posto occupato dall'elettrone Lorenzo, che chiede al suo vicino, Giulia, di spostarsi. Poiché a destra di Giulia non c'è nessuno Giulia prende il posto alla sua destra e lo spazio vuoto si sposta verso sinistra, dov'era prima Giulia. A questo punto Lorenzo può fare un passo verso destra, lasciando lo spazio vuoto alla sua sinistra. Questo spazio può ora essere occupato da Giovanni. Il risultato netto è che la "lacuna", come la chiamiamo noi, cioè il posto vuoto nella fila, si è spostata da destra verso sinistra. In pratica si è mossa come avrebbe fatto una carica elettrica positiva, che si muove in modo contrario a come si muove un elettrone, che ha carica negativa.

Q: ho capito. Avere questi spazi vuoti tra gli elettroni (queste "lacune", come le chiami tu), è un po' come avere cariche elettriche positive, che vanno al contrario.

A: se ora metti un cristallo con l'arsenico, che chiamiamo di tipo n per indicare che contiene cariche negative mobili, vicino a un cristallo con il boro, che invece chiamiamo p perché contiene cariche positive mobili, succede che un po' delle cariche negative che stanno nel cristallo di tipo n, vicino alla giunzione tra i due cristalli, possono occupare il posto delle lacune nell'altro cristallo.

Q: così lasciano una lacuna nella loro posizione originale.

A: esatto. Quindi in corrispondenza della giunzione tra i due cristalli si trova uno strato di cariche negative nel cristallo di tipo p e di cariche positive nel cristallo di tipo n. È questo doppio strato a funzionare come una valvola.

Q: Ah! E come fa?

A: collega il polo positivo della pila al cristallo di tipo n e quello negativo al cristallo di tipo p. Dal polo negativo vengono fuori elettroni che spingono quelli del cristallo di tipo p ad attraversare la giunzione. Nel cercare di farlo, però, gli elettroni s'imbattano nello strato di cariche negative che si è prodotto alla giunzione tra i due cristalli e ne sono respinti. Ricorderai da quello che hai studiato a scuola che due cariche dello stesso segno si respingono. Il risultato è che la corrente non passa.

Q: se invece collego la pila al contrario?

A: se colleghi il polo negativo della pila al cristallo di tipo n, gli elettroni in uscita spingono quelli nel cristallo di questo tipo a muoversi verso la giunzione. Qui gli elettroni trovano uno strato di cariche positive ad attenderli che, non solo non li respinge, ma li attrae e quindi li accelera. In questo modo gli elettroni attraversano la giunzione favorendo il passaggio di corrente.

Q: quindi questo cristallo funziona come una valvola idraulica

A: sì: montata in un modo favorisce il passaggio di corrente; montata nell'altro l'impedisce.

Q: e a che può servire?

A: per esempio per rivelare il segnale elettrico prodotto da una cellula fotoelettrica o dal sensore di una fotocamera digitale.

Q: e perché?

A: se ricordi bene, illuminando certe sostanze con della luce da queste venivano fuori degli elettroni.

Q: sì, ricordo. È l'effetto fotoelettrico. Ne abbiamo parlato l'altra volta: si sfrutta per fare le cellule fotoelettriche dei cancelli automatici e le macchine fotografiche digitali...

A: ...e non solo. Questi elettroni, una volta liberati, se ne vanno in tutte le direzioni. Se tu volessi "raccolgerli" per sapere se il tuo oggetto è stato illuminato dovresti convincerli ad andare verso un misuratore di elettroni.

Q: e come si fa?

A: basta collegare una pila agli estremi della cellula fotoelettrica o del pixel della tua fotocamera. In questo modo, una volta emesso, l'elettrone tenderà a muoversi in direzione del polo positivo della pila e così potrai raccogliarlo.

Q: facile no?

A: peccato che se fai così, oltre agli elettroni prodotti per effetto fotoelettrico, al tuo misuratore arrivano anche gli elettroni che escono dalla pila, che sono molti di più. Immagina la corrente che vien fuori dalla pila come il fiume Po, e a quelli provenienti dall'effetto fotoelettrico come a un misero affluente. Poco più a valle è impossibile distinguere gli elettroni del Po da quelli dell'affluente. Vedrai esattamente lo stesso segnale che avresti visto a monte dell'affluente.

Q: scommetto che usando un cristallo di silicio risolvi il problema

A: esatto. Il diodo, come si chiama questa specie di valvola, impedisce alla corrente della pila di fluire, se viene montato nella direzione giusta. La cellula fotoelettrica, o il pixel di una fotocamera, di fatto è un diodo. Se all'interno di questo si produce un elettrone fotoelettrico, questo migrerà verso il polo positivo senza essere fermato e tu potrai misurarne il passaggio in qualche modo. La corrente della pila, invece, non può passare.

Q: fantastico. Ma non sarà tutto qui.

A: no di certo. Puoi usare un diodo per impedire di danneggiare un circuito nel caso in cui monti le pile al contrario, per esempio. Ma il fatto è che il diodo è il componente base per costruire i transistor, di cui ci sono milioni di esemplari nel tuo lettore Mp3 e nel tuo cellulare.

Q: si, ne ho sentito parlare. Mi spieghi come funzionano?

A: non adesso. Si è fatto tardi. Magari un'altra volta, eh?

Q: e va bene. Aspetterò, ma adesso sono proprio curiosa di sapere. Solo una cosa: perché per tutto questo è necessaria la meccanica quantistica?

A: perché, come hai visto, senza le regole della meccanica quantistica, che impongono l'esistenza di energie discrete per gli elettroni in un atomo e senza il principio di esclusione di Pauli, la struttura a bande non esisterebbe e non potresti costruire alcun diodo. Facendo crescere un cristallo di silicio gli elettroni si disporrebbero come pianeti attorno a tanti soli e non avremmo una distinzione netta tra lo stato di isolante e quello di conduttore che è alla base del principio di funzionamento dei diodi. Come vedi, dunque, la meccanica quantistica funziona proprio sotto i tuoi occhi, tra le tue mani, e tu non te ne sei mai resa conto.

FINE