



Naviglio Piccolo

Mercoledì 3 Dicembre 2014 - ore 21.00

... eppur si muove!

**Caccia al killer seriale delle certezze terrestri
Cronache di un mondo soltanto probabile**

Lezione a cura di

Maria Cristina Fighetti e Pierluigi Boschetti

Maria Cristina Fighetti e Pierluigi Boschetti segnalano i più gravi attentati alle certezze scientifiche con il supporto di testimonianze e immagini. Si mostrano alcuni avvenimenti in tempi storici, fino ad arrivare nel secolo scorso, prossimo e non ancora digerito, perché sconvolgente sul piano filosofico della conoscenza. E anche oggi non è finita...

Per esempio, qualcuno ha ucciso l'uomo sul trono al centro del Creato, ma è nato l'esploratore dell'Universo. Qualcuno ha incaprettato il tempo, legandolo allo spazio, per poi unire la materia e la luce nell'energia. Nel vuoto più assoluto, si aggira il fantasma dell'etere nei suoi travestimenti.

Arriviamo infine all'individuazione dei killer più pericolosi, attrezzati tecnologicamente per abbattere definitivamente le certezze, come il principio di causa – effetto, per sostituirle con una visione statistica che propone un mondo basato sulla probabilità. Qui ogni caso è possibile, qualcuno dice che tutti si realizzano, ma, di volta in volta, noi cadiamo dentro uno solo di essi:...è perché siamo proprio sfigati...?

L'idea che l'uomo si fa del mondo in cui vive subisce periodici attentati, spesso letali, ma poi risorge, come l'Araba Fenice, rivisitata o del tutto nuova, dai Greci ai contemporanei, da Copernico, Newton, Maxwell, Einstein fino ai killer più insidiosi...



Naviglio Piccolo

Eppur si muove!

La frase, che molti ritengono pronunciata da Galileo Galilei al tribunale dell'Inquisizione al termine dell'abiura dell'eliocentrismo, in realtà non si trova in alcun documento del XVII secolo. Il primo scrittore ad aver menzionato la frase è stato il giornalista Giuseppe Baretta, che aveva ricostruito la vicenda per il pubblico inglese in un'antologia pubblicata a Londra nel 1757, *Italian Library*.

La frase viene ancora oggi usata per esprimere un dubbio che resiste a tutte le rassicurazioni (o le intimidazioni) fornite dall'interlocutore. Come il dubbio di Leopardi nello *Zibaldone*: "...non solo il dubbio giova a scoprire il vero, ma il vero consiste essenzialmente nel dubbio, e chi dubita, sa, e sa il più che si possa sapere" (*Zibaldone*, p. 1655, 8 settembre 1821).

Può essere il motto della scienza di oggi, poiché dal secolo scorso le certezze della fisica classica hanno subito violenti scossoni, con la teoria quantistica e con la relatività. Ma anche di ieri, perché la ricerca non è nuova a questi shock che storicamente si ripresentano con le rivoluzioni scientifiche.

Ci occuperemo di entrambi gli argomenti, quanti e relatività. Uno alla volta per non affaticarci troppo.

Parliamo stasera di un arduo argomento di fisica che sconfinava nella filosofia. La cosa più interessante è che ci troviamo di fronte a un fatto sconcertante: la teoria quantistica funziona efficacemente dal punto di vista sperimentale applicativo: telefonini, computer, ecc. sono stati resi possibili, proprio sulla base di questa teoria. A questo punto ci si potrebbe chiedere: cosa c'è di sconcertante? Beh, il fatto è che non si sa il perché! Cosa succede davvero? Vedremo che a cent'anni dalla scoperta il quesito è ancora oggetto di discussione e di divisione, anche tra gli esperti.

Lunga gestazione

Le prime osservazioni della natura si sono rivolte a fenomeni lontani come quelli astronomici, più che a fenomeni vicini come il movimento degli oggetti terrestri.

E questo può sembrare strano, ma forse esiste una spiegazione convincente. Indubabilmente l'influenza dei fenomeni astronomici sulla vita quotidiana, in particolare sui raccolti agricoli, è molto grande. Ma c'è anche da osservare che la regolarità dei fenomeni astronomici, l'alternarsi del giorno e della notte, o il susseguirsi delle stagioni, è sotto gli occhi di tutti, evidente. La regolarità dei fenomeni di movimento invece, è nascosta e va ricercata. Per esempio, il pensiero greco credeva che a maggior forza corrispondesse maggior velocità. Si sono dovuti aspettare Galileo e Newton più di quindici secoli dopo, per arrivare a capire che a maggior forza non corrispondeva una maggior velocità, ma una maggiore accelerazione.

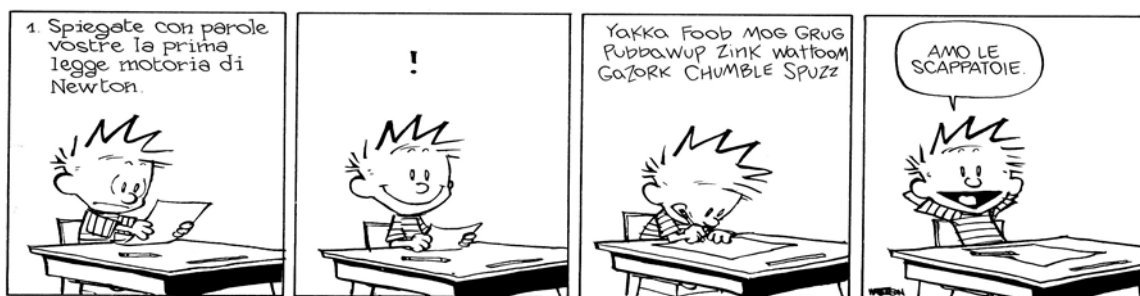
I sistemi religiosi o metafisici indiani per il fatto di considerare il mondo empirico come illusorio dal punto di vista conoscitivo e come "grande ammasso di dolore" dal punto di vista etico non permisero quella grande unione di scienza e cultura che tanto favorì lo sviluppo delle ricerche naturali in Grecia, specialmente nel periodo alessandrino.



Naviglio Piccolo

La fisica come scienza

La **fisica** è la scienza della natura nel senso più ampio. Il termine "fisica" deriva dal neutro plurale latino *physica*, a sua volta derivante dal greco τὰ φυσικά [*tà physiká*], ovvero "le cose naturali" e da φύσις [*physis*], "natura". Scopo della fisica è lo studio dei fenomeni naturali, ossia di tutti gli eventi che possano essere descritti ovvero quantificati attraverso grandezze fisiche opportune, al fine di stabilire principi e leggi che regolino le interazioni tra le grandezze stesse e rendano conto delle loro reciproche variazioni. Quest'obiettivo è raggiunto attraverso l'applicazione rigorosa del metodo scientifico e spesso si ottiene infine uno schema semplificato, o modello, del fenomeno descritto. L'insieme di principi e leggi fisiche relative ad una certa classe di fenomeni osservati definiscono una teoria fisica deduttiva, coerente e relativamente auto-consistente, costruita tipicamente a partire dall'induzione sperimentale.





Naviglio Piccolo

La luce

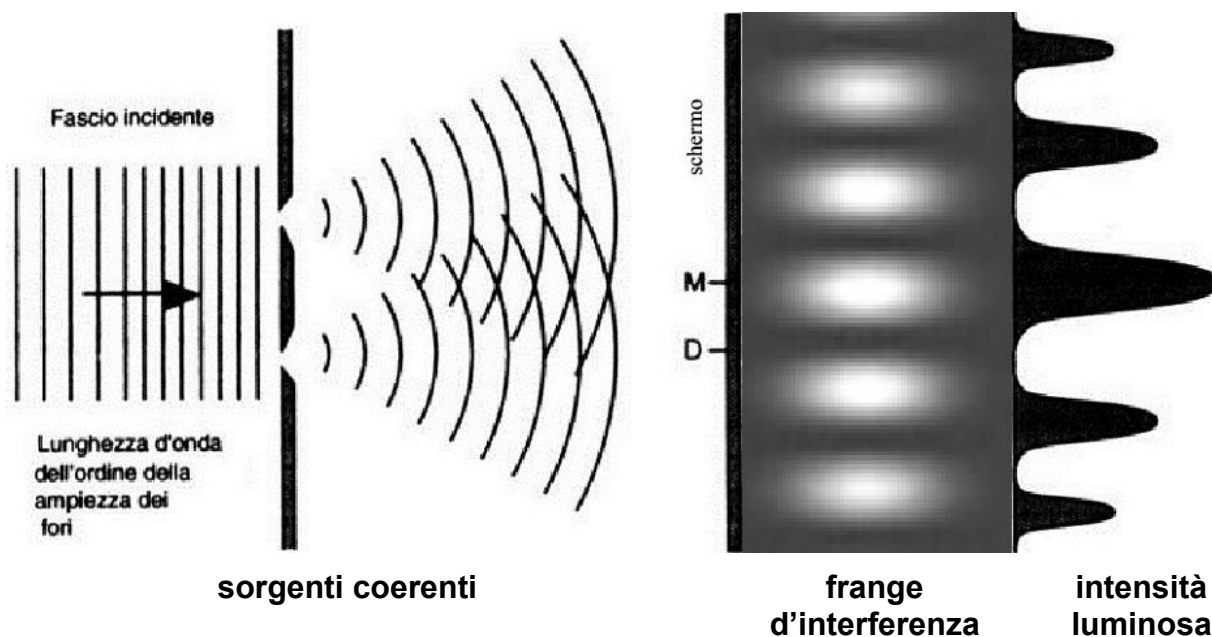
Bene o male tutti i problemi irrisolti dalla fisica classica hanno coinvolto la luce come attore di primaria importanza.

Il parlarne ci chiarirà parecchie cose ed altre ce ne suggerirà.

All'interno del suo quadro meccanico, Newton presentò la luce come fatta di corpuscoli, diversi per ogni colore. Era in attrito con Hooke, sostenitore della natura ondulatoria, più nota nella formulazione di Huygens, e sembra che per questo Newton non divulgò i fenomeni da lui stesso scoperti che avallavano tale ipotesi. Ovvio che la grande autorità di Newton fece sì che la così detta teoria corpuscolare venisse accolta da quasi tutti gli scienziati fino agli inizi dell'800.

Nel 1801 Young, un fisico inglese fece un esperimento che risolse la diatriba tra onde e corpuscoli, dando ragione a Huygens, anche contro il mostro sacro Newton.

L'esperimento è sommariamente descritto nella figura che segue:



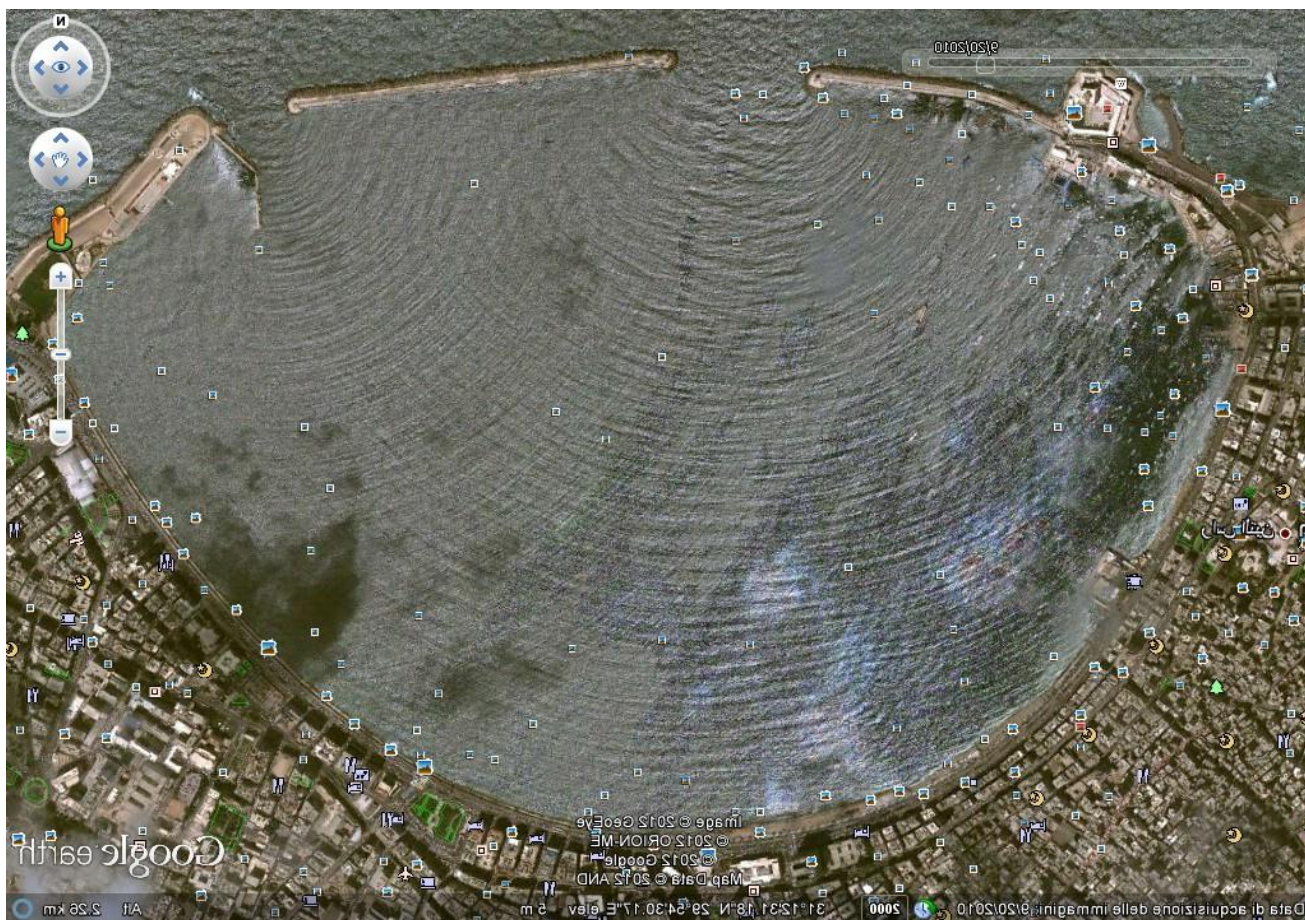
Facendo passare un fascio di luce monocromatica attraverso due fenditure e raccogliendo su uno schermo la luce risultante, si osserva, invece di una illuminazione uniforme, una serie di bande alternativamente luminose e scure. Particolare notevole: proprio nella zona centrale tra le due fenditure, la zona più coperta, si trova la fascia più luminosa.

Tale figura, chiamata frange o spettro d'interferenza, è una caratteristica di tutti i fenomeni ondulatori, che si osserva anche con le onde del mare.

Nell'immagine qui sotto si può vedere come si propagano le onde marine e come interferiscano nella zona tra i due varchi, proprio in accordo con lo schema nella figura precedente.



Naviglio Piccolo



Questo ha tolto ogni dubbio sulla natura ondulatoria della luce. I successivi sviluppi teorici, dovuti essenzialmente a Maxwell, con la formulazione delle leggi (equazioni) che descrivono la luce come onda elettromagnetica, sembravano aver definitivamente chiuso la questione.

Aggiungiamo che la rilevazione dell'interferenza, in natura o in laboratorio, è difficile da realizzare: le sorgenti, le onde, l'ambiente e la visualizzazione del fenomeno sono soggetti a condizioni speciali.

E' importante ricordare che verso la fine dell'ottocento i fisici credevano di aver raggiunto la certezza sulla spiegazione di tutti i fenomeni fisici che erano sotto il controllo diretto dei sensi, ossia fenomeni luminosi, elettromagnetici, termodinamici, meccanici, etc., che erano però considerati separati nei comportamenti e soggetti a leggi diverse.

Tutto risolto allora?

Bah! Se, come si dice, "Natura non facit saltus", certamente sembra prendersi gioco della scienza, perché nel 1887 Hertz, ha scoperto un fenomeno la cui spiegazione ha rimesso tutto in discussione.

Si tratta dell'effetto fotoelettrico: *una superficie metallica illuminata dalla luce emette particelle (elettroni)*, fenomeno su cui sono basate le cellule fotoelettriche, che proprio da questo effetto prendono il nome.

Non è il caso di addentrarci né sulle condizioni di luce che permettono il fenomeno, né sulle caratteristiche della corrente di elettroni emessi. Ci basta sottolineare che l'interpretazione corretta, dovuta ad Einstein nel 1905 e che gli valse il premio Nobel nel 1923, è basata sul fatto che, in questo caso, la luce si comporta come corpuscoli, ovvero quanti, chiamati fotoni.

Ma allora aveva ragione Newton? Beh, non proprio, anche perché i fotoni non hanno



Naviglio Piccolo

massa, ma sono “grumi” di pura energia che tuttavia agiscono proprio come se fossero particelle. Accontentiamoci di sapere che a volte la luce si comporta come onda (cioè come l'acqua nella figura) nei fenomeni d'interferenza e a volte come corpuscoli, cioè come le palline di un biliardo. Non si può dire che non sia un comportamento scioccante, se si è convinti che luce e materia siano del tutto differenti nella natura e nel comportamento. Nasce allora l'interrogativo: la luce è un'onda o un corpuscolo?

L'esperimento di Young è stato ripetuto nel 1909 da Geoffrey Ingram Taylor, quattro anni dopo la proposta della teoria einsteiniana dei quanti di luce. Riprendeva in una nuova forma l'ipotesi corpuscolare, mostrando che anche la più flebile sorgente di luce, come una candela che brucia a una distanza di circa 2 km, è in grado di produrre le medesime frange di interferenza, pur fornendo un solo fotone alla volta. Veniva così adombrata una forma anticipata di riconoscimento del carattere duale (a un tempo ondulatorio e corpuscolare) dei fenomeni luminosi che sarebbe di lì a poco sintetizzata dalla famosa affermazione di Dirac che ogni fotone interferisce solo con se stesso.

Nel caso della natura della luce si erano scontrate alternandosi nella storia della fisica due diverse concezioni e sembrava delinearsi la necessità di una qualche forma di coesistenza tra le due. Invece nel caso della materia nessuno era disposto a pensare a qualcosa di diverso da, e a mettere quindi minimamente in discussione, la sua natura corpuscolare, tanto più in una fase in cui l'ipotesi corpuscolare, con l'opera di Einstein, si era prepotentemente riproposta come interpretazione dei fenomeni della radiazione luminosa.

Ma la Natura è matrigna: si scoprirono tutta una serie di fenomeni che non trovavano spiegazione nell'ambito delle teorie note. Per esempio, vale la pena di citare la scoperta della radioattività e degli spettri atomici, anche se qui non ce ne occupiamo.

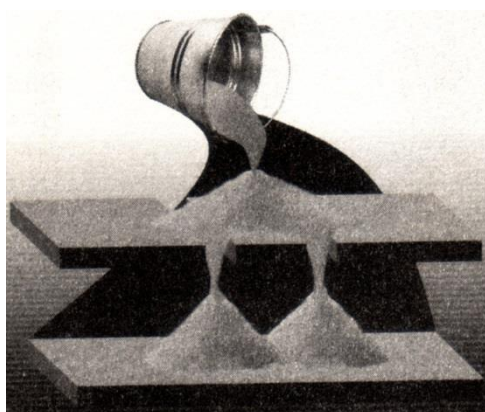
La materia

E la materia? Può sembrare strano, ma la materia ha un comportamento più simile a quello della luce di quanto non possa sembrare. Cosa succede se facciamo passare dei corpuscoli attraverso le due fenditure di cui abbiamo parlato sopra?

L'esperimento della doppia fenditura che permette di dimostrare la dualità onda-particella anche per la materia è una variante dell'esperimento di Young.

I corpuscoli potrebbero ben essere rappresentati dalla sabbia. Ora se facciamo passare della sabbia attraverso due fenditure, come illustrato nella figura qui accanto, si formano due mucchietti di sabbia.

L'analogo esperimento con corpi microscopici come elettroni, cioè "**l'interferenza da doppia fenditura di elettroni**"



non ha un "papà" unico e riconosciuto: alla sua realizzazione non è associato il nome di uno scienziato particolarmente famoso. Era considerato un "Gedankenexperiment", un esperimento concettuale - uno di quelli importanti nella storia della fisica - cioè un esperimento realizzabile solo idealmente, vuoi per difficoltà sperimentali e altro. Sparando degli elettroni attraverso una doppia fenditura e usando uno schermo che scintilla quando è colpito da elettroni, ci aspetteremmo che questi, da corpuscoli, si comportassero come la sabbia, formando due macchie luminose in corrispondenza delle due fenditure.

Ma qui interviene un fatto inaspettato: si osservano in realtà una figura a bande chiare e

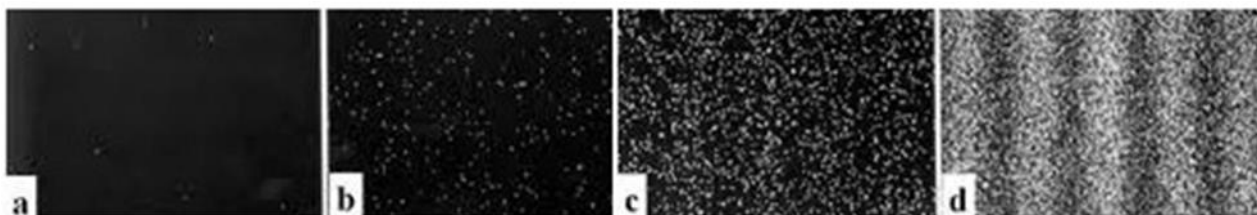


Naviglio Piccolo

scure, con una banda più luminosa al centro. Proprio una tipica figura di interferenza, caratteristica delle onde.

Chissà cosa interferisce? Forse i molti elettroni del fascio interferiscono l'un l'altro, attraverso un meccanismo non ancora noto?

Proviamo allora con un solo elettrone alla volta. Appena lo schermo scintilla, segnalando l'arrivo dell'elettrone, si lancia un altro elettrone; ma, nuova sorpresa, ogni elettrone che arriva si dispone come quando arrivano tutti insieme, come se ciascuno "sapesse" qual è il suo ruolo, a formare una figura d'interferenza, come nella successione di figure qui sotto.



a-b-c-d: immagini successive dello schermo colpito dagli elettroni

Vogliamo saperne di più sul meccanismo.

Mettiamo un rivelatore "passante" dietro una delle fenditure, per vedere da quale fenditura passa l'elettrone. Ogni volta che lo schermo scintilla, segnalando che è arrivato un elettrone, il rivelatore permette di stabilire attraverso quale fenditura è passato l'elettrone: se scatta significa che l'elettrone è passato per quella fenditura, altrimenti è passato dall'altra.

Può sembrare incredibile, ma questa violazione della privacy fa sì che l'elettrone perda il suo carattere ondulatorio e torni a manifestarsi come particella. Sparisce l'immagine di interferenza e compaiono le due righe, come nella figura qui a lato e come succede con i mucchietti di sabbia.

Sconvolgente!

L'aspetto essenziale dell'esperimento delle due fenditure sembra essere la mancanza di conoscenza di quale fenditura



la particella abbia effettivamente attraversato: l'osservazione della figura di interferenza è garantita infatti nel solo caso in cui non si aggiungano all'esperimento apparati di misura atti a determinare quale fenditura è stata attraversata. Se si interviene in tal modo si ottiene un esperimento "which-way" e il risultato finale è la scomparsa della figura di interferenza, ossia del comportamento ondulatorio, a favore di quello corpuscolare. Questo effetto ha motivato Niels Bohr ad introdurre il **principio di complementarità**, secondo il quale i due aspetti, corpuscolare e ondulatorio, non possono essere osservati contemporaneamente in quanto escludentisi a vicenda, ovvero il tipo di esperimento determina il successivo comportamento delle particelle in esso coinvolte. Sottolineiamo come in questo caso l'osservatore non lascia inalterato il fenomeno.



Potrebbe però essere il cervello umano che non sa conciliare i due aspetti.

Per esempio, guardate la figura qui a lato.

Potete riconoscere il profilo di un vaso bianco, oppure due profili umani neri, uno di fronte all'altro. Tuttavia non riuscite a vedere contemporaneamente entrambi gli aspetti della figura: se ci sono le due facce non c'è il vaso, se si vede il vaso non si vedono le due facce.



Naviglio Piccolo

Ma ritorniamo al nostro esperimento, cosa succede allora se non c'è il rivelatore che permette di stabilire da quale fenditura è passato l'elettrone? Forse una parte di elettrone "ondulatorio", se così possiamo chiamarlo, passa da una delle due fenditure, e una parte dall'altra e le due parti interferiscono al di là delle fenditure?

Perché si verifichi l'interferenza è proprio necessario che l'elettrone passi *attraverso le due fenditure contemporaneamente*. Già questa è un'affermazione quanto meno sconvolgente. Come può una pallina, sia pur piccola come l'elettrone, passare per due punti diversi contemporaneamente? Si spezza in due? Si sdoppia?

Un ultimo tentativo per capire cosa succede e come mai l'elettrone disegna una figura d'interferenza solo quando passa attraverso le due fenditure contemporaneamente è negli esperimenti così detti a scelta ritardata. Con gli apparati moderni ad alta velocità si posiziona il rivelatore abbastanza vicino alla fenditura e si permette all'elettrone di passare attraverso le due fenditure accendendo il rivelatore solo "dopo" che l'elettrone è passato. A quel punto forse sarà troppo tardi perché l'elettrone si "ritravesca" da particella. Ma invece no. L'elettrone "sa" di essere stato osservato e la figura d'interferenza non appare.

Stiamo parlando di fantasie?

Abbiamo detto che questo esperimento era considerato puramente concettuale. Ancora nelle sue lezioni tenute all'inizio degli anni '60, il premio Nobel Richard Feynman affermava che era impossibile svolgerlo ad una scala sufficientemente piccola da essere interessante. Era stato ideato e pensato nel dettaglio ben prima che fosse tecnicamente possibile realizzarlo.

Ma....quando meno ce lo si aspettava l'esperimento "reale" è stato effettuato.

La rivista Physics World, attribuì il merito del primo esperimento di questo tipo al giapponese Akira Tonomura, che lo realizzò con il suo gruppo nel 1989. La rivista nel maggio 2003 è stata però costretta a pubblicare alcune lettere di smentita, in cui viene chiarito che furono tre italiani, PierGiorgio Merli, GianFranco Missiroli e Giulio Pozzi, a portare a termine per primi l'esperimento con un singolo elettrone, nel 1974. I tre ricercatori, che ancora oggi lavorano a Bologna, studiavano all'epoca le applicazioni pratiche dell'interferometria, usata per misurare lunghezze sfruttando il fenomeno dell'interferenza. Non trascurarono però l'aspetto didattico e storico delle loro ricerche. Oggi il loro merito viene giustamente riconosciuto.

Questo comportamento vale solo per corpi microscopici? **NO !**

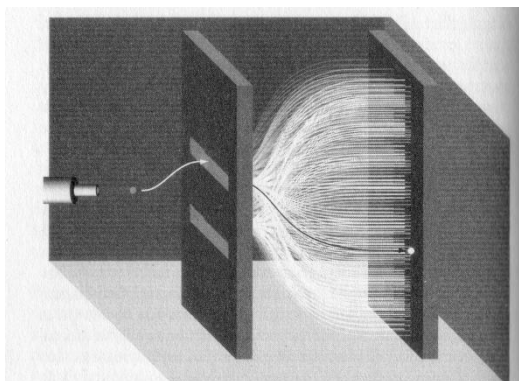
Gli esperimenti di questi tipo sono proseguiti con oggetti sempre più vicini al mondo macroscopico;

nel 2012 le molecole più grandi utilizzate erano formate perfino da centinaia di atomi.

La particolarità degli esperimenti di interferenza come quelli sin qui discussi ha motivato diverse interpretazioni dei risultati. Si tratta di risultati contro-intuitivi, in cui i concetti classici di onda e particella sembrano in qualche modo combinarsi per fornire qualcosa che sfugge al senso comune.

De Broglie

Nei primi anni '20 del secolo scorso un giovane principe francese, Louis de Broglie, di famiglia aristocratica i cui antenati discendevano niente meno che dal Re Sole, Luigi XIV, era intento a preparare la sua tesi di dottorato. Discusse la sua tesi nel 1924, e in essa fece una proposta azzardata: a ogni oggetto materiale si può associare "un'onda di materia". E di quest'onda propose anche una lunghezza d'onda inversamente proporzionale alla massa e alla





Naviglio Piccolo

velocità.

Sottolineiamo la parola "associare", perché De Broglie pensava ancora le particelle di materia come blocchi solidi, e l'onda associata come una caratteristica aggiunta, mentre per la luce fotoni o onde sono la stessa cosa.

La spiegazione di De Broglie - Bohm: l'elettrone rimane una particella classica localizzata durante tutto l'esperimento e, come tale passa solo da una delle due fenditure. Tuttavia l'influenza del così detto potenziale quantistico si estende su entrambe le fenditure e guida l'elettrone lungo una traiettoria precisa (ma non identificabile) e imprevedibile, definita dalla forma della sua funzione d'onda. Ovvio che questa "combinazione" di particella e onda permetterebbe di salvare capra e cavoli, giustificando l'immagine d'interferenza attraverso l'onda associata. Bisogna però precisare che De Broglie non propose la sua ipotesi per interpretare gli straordinari aspetti degli esperimenti di interferenza degli elettroni attraverso una doppia fenditura, ma con un ragionamento più semplice e sotto molti aspetti più profondo: se la luce, che ci sembra un'onda, può a volte comportarsi come un flusso di particelle, allora sarebbe un'elegante simmetria della natura se un flusso di particelle potessero a volte comportarsi come un'onda. D'altra parte, la famosissima equazione di Einstein $E=mc^2$ evidenzia uno stretto parallelismo tra la materia (massa m) e la radiazione (energia E) che si trasformano l'una nell'altra (c^2 è coefficiente di trasformazione, pari alla velocità della luce c al quadrato). A quel tempo l'ipotesi di De Broglie era troppo radicale per non suscitare perplessità o addirittura opposizioni. Così fino all'ultimo il suo dottorato fu in forse; perché De Broglie potesse prenderlo fu necessario un intervento all'ultimo minuto di Einstein, che convinse la commissione.

Altri scienziati hanno proseguito l'indagine sugli strani fenomeni evidenziati dalla sperimentazione fisica sul finire del secolo XIX.

Schrödinger

Schrödinger ha il grande merito di aver costruito un'equazione per le onde di De Broglie, descritte matematicamente da una funzione d'onda, universalmente nota ormai come ψ (psi). E qui interviene uno dei fatti più curiosi di tutte le teorie fisiche: tutte le previsioni sul comportamento delle particelle a livello atomico si possono dedurre dalla risoluzione dell'equazione di Schrödinger.

In meccanica classica, lo stato di una particella viene definito in ogni istante attraverso il valore esatto delle due quantità osservabili posizione e velocità (o meglio impulso, momento); in meccanica quantistica, invece, lo stato di una particella è descritto dalla funzione d'onda. Essa non ha un suo diretto significato fisico, ma permette di ottenere la distribuzione di probabilità della posizione e poi dell'impulso di una particella. Per ogni punto dello spazio, la funzione d'onda permette di calcolare la probabilità di trovare la particella in quel punto in un certo istante, e analogamente per l'impulso.

Tanto più la distribuzione di probabilità della posizione di una particella è concentrata (la particella quantistica è *ben localizzata*), tanto più la distribuzione degli impulsi si allarga, e viceversa. Si tratta di una manifestazione del **principio di indeterminazione** di Heisenberg: è impossibile costruire una funzione d'onda arbitrariamente ben localizzata sia in posizione che in impulso.

La funzione d'onda che descrive lo stato del sistema può cambiare al passare del tempo e l'evoluzione temporale della funzione d'onda è descritta dall'equazione di Schrödinger.

Benché la presenza di una funzione d'onda non permetta di prevedere *a priori* il risultato di una misura, questa, una volta effettuata, porta comunque ad ottenere un valore definito. Ovvero: prima della misura, la caratteristica da misurare può essere qualunque o non essere per niente.

Tale problema, spesso chiamato problema della misura, ha dato vita ad uno dei più



Naviglio Piccolo

profondi e complessi dibattiti intellettuali della storia della scienza.

Onde di che?

A livello matematico esiste solo una fisica quantistica basata sull'equazione di Schrödinger o altro formalismo equivalente. E funziona bene, l'abbiamo già detto. E' curioso come ci si divida al momento di descrivere il significato fisico di queste equazioni e soprattutto della funzione d'onda. La stessa ricerca di un significato fisico ha qualcosa di ambiguo perché, essendo ψ qualcosa di nuovo, è impossibile descriverla con forme di oggetti già visti.

La "funzione d'onda" che compare nell'equazione di Schrödinger è una quantità matematica, e ricopre tutto lo spazio. Permette di calcolare la probabilità di trovare l'elettrone in ciascun punto dello spazio, se si dovesse andare a cercarlo proprio in quel punto. Bisogna però osservare subito che non disponiamo di alcun processo che ne misuri direttamente il valore. Tuttavia essa contiene il massimo d'informazione che si può avere da un punto di vista quantistico sull'elettrone, o sulla struttura dell'atomo, etc.

Ma non dobbiamo pensarla come la rappresentazione di un'onda reale, fisica, analoga a un'onda di luce. Dobbiamo per forza dire che **nessuno sa cosa sia la realtà fisica della funzione d'onda.**

Le interpretazioni della fisica quantistica si sprecano, ma tuttavia possiamo a grosse linee ridurle a due filoni principali:

- il primo filone afferma che ψ non esiste, è un puro calcolo delle probabilità; esistono solo i corpuscoli, ma questi stessi acquistano realtà solo quando sono misurati (interpretazione di Copenhagen)
- il secondo filone afferma che esistono fisicamente sia ψ che i corpuscoli (interpretazione dell'onda pilota di De Broglie-Bohm)

Interpretazione di Copenhagen

Poiché la ψ viene dedotta indirettamente dal comportamento dei corpuscoli, per i fisici del primo filone tanto vale affermare che non esiste alcuna onda, esistono solo corpuscoli che si materializzano all'atto della misura. Prima della misura la realtà è solo una nebbia probabilistica accessibile alla matematica. Secondo questa interpretazione ψ non sarebbe che un calcolo delle probabilità di esistenza di un corpuscolo in un'area dello spaziotempo, sostanzialmente un'onda di niente. Una caratteristica particolare di questa funzione è di essere diffusa su tutto lo spazio, ma una osservazione sperimentale della posizione dell'elettrone la fa immediatamente cambiare (si dice che "collassa"): diventa nulla in tutto lo spazio tranne che nel punto dove si trova l'elettrone in cui assume il valore "1", ossia il 100% di probabilità.

A questo punto si conclude che l'unica legge di Natura è il caso e i corpuscoli si materializzano qua e là quando misurati.

Anche l'interpretazione di Copenhagen, che rappresenta l'interpretazione "ufficiale" o ortodossa della teoria quantistica, non ha assunto una posizione unitaria ma si è articolata in tre differenti prospettive fondamentali nei confronti di questo strano comportamento duale degli oggetti atomici:

(a) né onde né particelle, dal momento che la loro dualità rappresenterebbe un pseudo-problema, legato all'obsoleta ontologia della fisica classica, come nel caso di Heisenberg, che sosteneva una posizione radicalmente anti-realistica, basata sull'idea della necessità di "una ritirata nel formalismo matematico";

(b) solo particelle senza onde, secondo la nota interpretazione di Born (1926) della funzione d'onda di Schrödinger nei termini di un mero strumento matematico che consente di calcolare la densità di probabilità di trovare una certa particella in una data regione



Naviglio Piccolo

spaziale;

(c) o onde o particelle (in senso reciprocamente esclusivo), secondo il principio di complementarità di Bohr, in cui viene assunta la necessità del ricorso sia a una rappresentazione ondulatoria sia a una rappresentazione corpuscolare, ma nello stesso tempo l'impossibilità di conciliarle pienamente in una immagine unitaria della realtà fisica.

All'interno di questa interpretazione merita una menzione particolare la visione di Heisenberg secondo la quale l'unica cosa che ha senso è la matematica che descrive lo svolgersi degli esperimenti e che non ha senso invece domandarsi cosa succede all'infuori della capacità di descrivere i risultati degli esperimenti. Il motto dei fisici di questo gruppo è stato riassunto nel detto: "zitto! e calcola...".

La visione di Heisenberg ha inciso anche nell'educazione scientifica degli italiani. Bruno Ferretti (in quegli anni il più autorevole fisico teorico dell'ateneo bolognese) sostiene, nell'introduzione a "I principi fisici della teoria dei quanti di Heisenberg", la pressoché totale assenza di interesse scientifico delle interpretazioni alternative realistiche della meccanica quantistica, e ritiene un grave errore pedagogico consentire che i giovani si impegnassero nel loro studio, disperdendo preziose energie che avrebbero dovuto essere meglio impegnate in studi più seri e proficui: "...Questi tentativi di interpretazione deterministica della fisica quantistica, pur non avendo con ogni probabilità nessuna importanza scientifica, possono però far sorgere sterili dubbi nei giovani che si accingono al non facile studio della fisica teorica. È quindi oltremodo opportuno che tali giovani abbiano idee per quanto possibile chiare sui fondamenti fisici della meccanica quantistica, e a questo scopo la lettura dell'opera di Heisenberg è indubbiamente estremamente utile."

E' evidente che mettendosi nella scia di questa interpretazione l'esperimento della doppia fenditura diventa semplice da spiegare (non da capire!).

Non ci si deve semplicemente chiedere cosa succede nell'esperimento finché non si guarda il risultato sullo schermo. A questo punto è logico che la funzione d'onda diffusa in tutto lo spazio attraversa entrambe le fenditure e costruisce la figura d'interferenza. Se invece si cerca di stabilire da quale fenditura passa l'elettrone, la funzione d'onda collassa nel passaggio da una sola fenditura e la figura d'interferenza scompare.

Interpretazione di De Broglie-Bohm

I fisici del secondo filone affermano che i corpuscoli esistono sempre e sono guidati da una vera onda ψ (onda pilota), invisibile agli strumenti attuali ma diffusa in tutto lo spazio-tempo (onda universale). Quest'onda molto sottile (detta "potenziale quantistico" o "campo quantistico") si può evidenziare sperimentalmente su sistemi macroscopici quando i fenomeni di disturbo tacciono. Ad esempio, portando un fluido alla temperatura dello zero assoluto (-273°C), si fa tacere del tutto la furibonda agitazione termica delle molecole ed allora ψ si manifesta (sempre indirettamente attraverso il comportamento delle molecole stesse). Solo un cenno all'antigravità dell'elio superfluido (-271°C) che risale le pareti del vaso che lo contiene. L'onda pilota "non collassa" al momento della misura ma viene disturbata e si dice che diventa decoerente.

Louis de Broglie rifiutò il carattere limitativo del principio di complementarità, asserendo la possibilità di una coesistenza tra un fenomeno ondulatorio esteso con una particella localizzata (sia onde sia particelle).

L'interpretazione realistica di de Broglie è stata riproposta, in una particolare forma più debole da Franco Selleri, assumendo che alle onde "vuote" di de Broglie non possono essere attribuiti né energia né impulso, ma soltanto proprietà di relazione con le particelle: la già ben nota proprietà delle onde di produrre interferenza, unitamente alla nuova proprietà di generare, secondo la congettura di Selleri, emissione stimolata di fotoni. L'interpretazione di Selleri, ripresa da altri autori in diverse ulteriori proposte sperimentali,



Naviglio Piccolo

fu accolta con notevole favore non solo dallo stesso de Broglie, ma anche da un altro grande avversario dell'interpretazione di Copenhagen, il filosofo Karl Popper, che aderì incondizionatamente ad essa, abbandonando la sua originaria interpretazione statistica strettamente corpuscolare:

Valutazioni diverse da quella di Copenhagen cercano di dare un'interpretazione dei fenomeni osservati che si adatti anche agli schemi di comprensione più usuali. Da un punto di vista strettamente sperimentale non è oggi possibile decidere quale sia la lettura corretta, ma coesistono tutte, ognuna con i suoi pro e i suoi contro. La cosa che qui ci interessa sottolineare è che un secolo dopo la fondazione della teoria sul comportamento della materia e della radiazione abbiamo a disposizione uno strumento che ci permette di fare previsioni corrette, nonostante i dubbi d'interpretazione.

Ladro e onda di furti

Una analogia può aiutare a cogliere (per quanto è possibile) il senso della funzione, nell'interpretazione di Copenhagen.

Un ladro esce di prigione, ma la polizia non crede che voglia cambiare vita. Sulla mappa della città segnano per ogni punto la probabilità che il ladro voglia tentare il colpo in quel posto, ovviamente più alta nelle zone ricche e più bassa altrove. Abbiamo così una funzione di probabilità diffusa su tutta la città che mi dice per ogni punto qual è la probabilità che ivi si svolga un furto. Cosa succede di questa funzione nel momento in cui si verifica un furto in un punto specifico? Immediatamente la funzione si azzerà in tutti i punti e assume il valore 1 proprio dove c'è stato il furto. Nel senso che segnala probabilità 100%, cioè la certezza, di trovare il ladro proprio in quel punto e 0% di trovarlo altrove.

La differenza fondamentale è che il ladro non è diffuso su tutta la città; ma l'elettrone?

Non sappiamo bene, la sua funzione d'onda ci parla solo di probabilità, non ci dice niente sulla reale natura dei processi fisici in cui l'elettrone è coinvolto.

La maggior parte dei fisici pensa che l'elettrone non esista nemmeno come particella classica localizzata, piuttosto la sua influenza si espande nello spazio. Come è possibile? Non si sa.

La funzione d'onda è tutta l'informazione che abbiamo. Non appena osserviamo l'elettrone si dice che la funzione d'onda "collassa" e l'elettrone diventa una particella localizzata.

Alcuni fisici, Einstein in primis, non si accontentano delle previsioni effettuate tramite la funzione d'onda probabilistica e vogliono capire cosa succede realmente, ma al momento, a quasi cent'anni dalla scoperta, non esiste una risposta univoca. Visto che ψ è non locale ed estesa in tutto lo spazio-tempo, l'insieme determina una entità cosmologica universale che impressiona filosofi e mistici. Il vantaggio dell'interpretazione come onda vera e propria è che, attingendo anche al bagaglio della matematica delle onde, il numero di principi necessari diminuisce e questa è una cosa buona. Inoltre se si considerano le onde separatamente dai corpuscoli, si può rimandare a tempi futuri la comprensione di quest'ultimi o magari formulare qualche ipotesi di struttura. In conclusione questa interpretazione, seppure non definitiva, è utile e intuitiva, elimina i panorami magici e lascia scoperti i problemi reali.

Un principio base in dubbio

Ai giorni nostri la mente brillante di Afshar (dal nome del fisico americano di origine iraniana Shahriar Afshar, detto *quantum rebel*) è riuscita a immaginare un esperimento indiretto del tipo a doppia fenditura in cui si possono osservare i singoli fotoni passare da una fessura o dall'altra e nello stesso tempo mantenere la coerenza di ψ e la formazione delle bande di interferenza, dimostrando la violabilità del principio di complementarità. È detta "misura-non misura". Afshar ha effettuato l'esperimento fin dal 2001, l'ha ripetuto



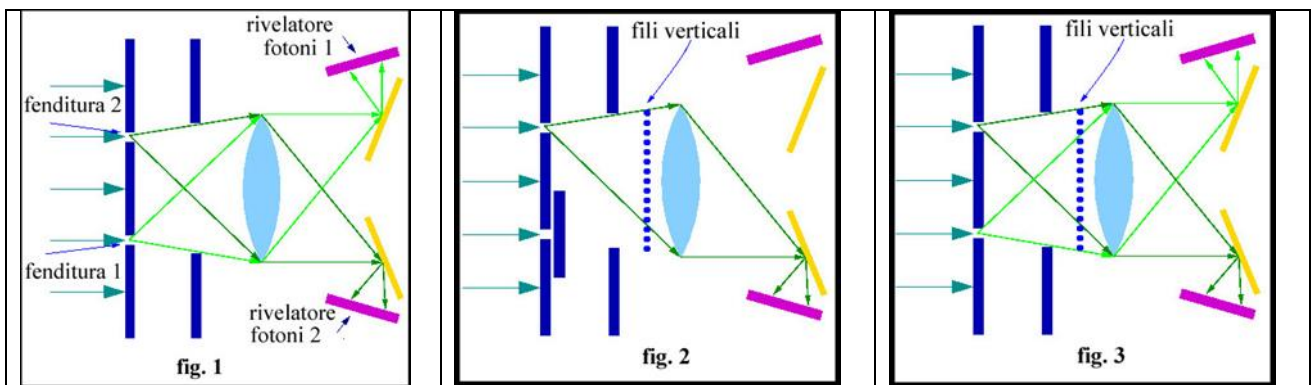
Naviglio Piccolo

presso le università che lo hanno richiesto, ha risposto pubblicamente per un certo tempo attraverso internet a chiunque desiderasse informazioni, ha partecipato a congressi ed ha proposto la sua relazione per la pubblicazione in una rivista scientifica specializzata nel 2004. La pubblicazione è avvenuta nel 2007. La comunità scientifica ha impiegato 3 anni per superare la sorpresa. Gli scienziati-filosofi cultori dell'interpretazione magica di Copenhagen hanno resistito come hanno potuto. Il polverone non si è ancora posato ma di fronte all'evidenzaEppure Afshar non ha mostrato nulla di imprevedibile dal punto di vista della fisica quantistica (la parte matematica). Ha solo trovato un varco in cui l'interpretazione probabilistica pura di tipo Copenhagen ne esce piuttosto male mentre l'interpretazione ondulatoria ne esce rinforzata.

Come ha fatto ?

L'esperimento è stato fatto sui fotoni e dà informazione su quale dei due cammini un fotone prende in un apparato a doppia fenditura, mentre permette "contemporaneamente" l'interferenza tra i due cammini, mostrato da una griglia di fili, posti ai nodi della figura d'interferenza per non alterare i fasci.

L'esperimento avviene con assenza dello schermo, che attraverso l'immagine d'interferenza tradizionale metterebbe in evidenza l'aspetto ondulatorio, inibendo l'aspetto corpuscolare.



Si usa invece una lente che permette di stabilire da quale fenditura è passato il singolo fotone, inviando il fotone all'apposito rivelatore [fig.1].

Si mette poi una griglia di fili metallici verticali che sono in grado di intercettare i fotoni prima della lente, ponendoli però nelle zone che, secondo le previsioni della teoria e le verifiche sperimentali, non saranno raggiunte dai fotoni. Si può verificare quello che avviene usando prima una sola fenditura [fig.2] e poi entrambe le fenditure [fig.3].

Visto che i fili sono posti dove è previsto che i fotoni non passino e la luce non è indebolita, come indicano i rivelatori, si deduce che certamente i fotoni passano nelle altre zone, per dare origine al noto spettro.

I rivelatori evidenziano l'aspetto corpuscolare e, contemporaneamente, i fili mostrano il comportamento ondulatorio.

Poiché si determina dove la luce non passa, l'esperimento è detto "misura non misura".

Interpretazione a molti mondi

Secondo l'interpretazione di Copenhagen ogni specifica proprietà o variabile di un sistema fisico acquisisce il suo valore rilevato solamente nello stesso momento in cui viene osservata. Il valore misurato della variabile è determinato casualmente fra tutti i possibili risultati ammessi, in base alle probabilità codificate nella funzione d'onda.

Tuttavia in questo modo le osservazioni stesse del fenomeno, e quindi anche gli osservatori, diventano protagonisti dell'evoluzione temporale dei sistemi fisici, in modo tale che non si può più assumere l'esistenza di una natura senza un osservatore che



Naviglio Piccolo

attivamente la misuri. Questa dipendenza fra osservatore e osservabile, che ha ampi riflessi nell'ambito filosofico, è contemplata nel cosiddetto "postulato di proiezione": solo l'osservazione stabilisce un preciso risultato e cambia lo stato del sistema esaminato in base alle modalità di misura (a prescindere, entro specifici limiti, dal possibile stato originario dello stesso). Resta aperto anche il problema di come una proprietà di un sistema si trovi a caso in uno dei possibili risultati esattamente solo nel momento della misura, in base al processo noto come collasso della funzione d'onda.

L'interpretazione a molti mondi ha tentato di ridurre il ruolo protagonista dell'osservatore e di rimuovere il problema del collasso della funzione d'onda. Per ottenere questo, considera sia l'osservatore che il sistema misurato assieme in uno stato, talvolta chiamato "universo", che evolve in modo deterministico senza alcuna scelta casuale dei risultati delle misure. Al momento dell'osservazione, a seguito dell'interazione fra gli apparati sperimentali o fra i sensi dell'osservatore con il sistema misurato, lo stato globale si divide in numerosi "mondi", uno per ciascun possibile risultato della misura. In questo modo nessun risultato casuale viene prodotto dalla misurazione, semplicemente ad esempio se si misura una variabile che ammette sia i valori "0" o "1", ci saranno due mondi, uno in cui l'osservatore misurerà "1" e un altro in cui invece otterrà "0". L'osservazione è un processo che modifica sempre gli stati dei sistemi misurati, ma adesso, al contrario dell'interpretazione di Copenaghen, i sistemi osservati più gli osservatori evolvono assieme secondo leggi deterministiche che stabiliscono come sono fatti i "singoli mondi", con i loro possibili risultati, e come è strutturata la totalità di essi: l'"universo".

Coerenza e decoerenza

Questo paragrafo è un po' difficile, ma è stato inserito perché si possono trovare spunti di attualità che sono *in fieri*. In fisica le particelle vengono usualmente trattate come funzione d'onda che evolve nel tempo secondo l'equazione di Schrödinger. In particolare il principio di sovrapposizione gioca un ruolo fondamentale nella spiegazione di tutti i fenomeni di interferenza osservati. In parole povere, il sistema, prima del processo di misurazione, si trova contemporaneamente in tutti gli stati "potenzialmente" possibili relativi ad una sua proprietà osservabile e soltanto come conseguenza di un atto di misurazione sul sistema stesso il suo stato diventerà unico (autostato - Schrödinger parlava di "stati puri"). Tuttavia questo comportamento è in contrasto con la meccanica classica: a livello macroscopico, infatti, non è possibile osservare una sovrapposizione di stati distinti. Un esempio ben noto è fornito dal paradosso del gatto di Schrödinger: un gatto (come qualsiasi essere vivente) non può essere contemporaneamente vivo e morto.

Sorge quindi una domanda: esiste una separazione tra regime quantistico e regime classico? L'interpretazione di Copenaghen suggerisce una risposta affermativa: effettuare una misura su un sistema quantistico equivale a renderlo osservabile, quindi "classico". Ad esempio, se in un esperimento della doppia fenditura si osserva la traiettoria di una particella, l'interferenza viene distrutta (principio di complementarità). Il meccanismo responsabile di questo fenomeno prende il nome di collasso della funzione d'onda e venne introdotto da Von Neumann.

Tuttavia, se esiste, un confine tra quantistico e classico non è affatto chiaro dove vada tracciato - né perché esso esista: il collasso della funzione d'onda viene solo postulato. Questi problemi vengono affrontati dalla teoria della decoerenza, la cui idea di base è la seguente: le leggi della meccanica quantistica, a partire dall'equazione di Schrödinger, si applicano a sistemi isolati - in linea di principio, anche a quelli macroscopici. Quando un sistema quantistico non è isolato dall'esterno - ad esempio durante una misura - esso diventa entangled (traduzione: aggrovigliato, intrappolato, impigliato,...) con l'ambiente; questo fatto, secondo la teoria, ha conseguenze cruciali sul mantenimento della coerenza,



Naviglio Piccolo

che consente la sovrapposizione degli stati.

In particolare, se il sistema viene preparato in una sovrapposizione coerente di stati, l'entanglement con l'ambiente porta alla perdita di coerenza tra le differenti parti della funzione d'onda che corrispondono agli stati sovrapposti. Dopo un tempo di decoerenza caratteristico, il sistema non è più in una sovrapposizione di stati (presenza simultanea di differenti stati), bensì in una miscela statistica (possibilità di diversi stati in alternativa).

Secondo la teoria, la differenza tra sistemi microscopici e macroscopici sta nel fatto che se i primi si possono isolare bene dall'esterno (cioè la coerenza si mantiene facilmente per un tempo sufficientemente "lungo"), lo stesso non si può dire per i secondi, per i quali invece si deve inevitabilmente tener conto dell'interazione con l'ambiente. Di conseguenza è praticamente impossibile osservare sovrapposizioni di stati macroscopicamente distinti, perché se anche si riuscisse a prepararle (cosa in sé difficile, anche se non vietata dalla teoria) avrebbero una durata troppo breve.

Esistono diversi gruppi di ricerca che si sono occupati, e si occupano tuttora, della teoria della decoerenza a livello sperimentale.

Presso l'Università di Parigi viene seguita la linea di ricerca sugli atomi intrappolati in cavità risonanti. Un altro approccio, seguito da ricercatori di Vienna, si basa sull'interferometria di molecole "grandi", come i fullereni. Un lavoro di ricercatori di Tubinga ha mostrato (anche visivamente) la decoerenza di elettroni liberi causata dall'interazione con l'ambiente.

I fisici Serge Haroche e David Wineland hanno ricevuto il Premio Nobel per la Fisica nel 2012 per i loro contributi alla "misurazione e manipolazione dei sistemi quantistici individuali".

Forse la prima cosa da capire è l'idea che non possiamo separare un oggetto che si sta misurando (osservando) dall'apparato che sta effettuando la misura stessa. Questo si vede chiaramente nel mondo quantistico, dove non si può far divorziare la proprietà che si cerca di misurare dal tipo di osservazione che si sta facendo: la proprietà dipende dalla misura.

Per esempio, quando misurate la temperatura di un oggetto usando un termometro, state togliendo una piccola parte di calore dall'oggetto stesso. L'apparecchio di misura ha alterato l'oggetto – le due entità non sono separate.

Quest'idea dell'oggetto osservato e dell'osservatore uniti assieme come un singolo sistema si rivelerà la chiave per mostrare il meccanismo alla base dell'apparente "collasso della funzione d'onda". Perché, in realtà, una particella quantistica è di rado completamente isolata dal suo ambiente.

Come l'ambiente elimina gli effetti di interferenza?

Inoltre, poiché uno stato quantico può essere visto come la sovrapposizione di diversi altri stati, la domanda può anche essere posta così "perché non vediamo mai questi altri stati negli oggetti macroscopici"?

Nell'esperimento della doppia fenditura vediamo in effetti gli altri stati della sovrapposizione, poiché provocano effetti di interferenza costruttiva e distruttiva. Perché questi "stati di interferenza" appaiono in quest'esperimento ma apparentemente svaniscono negli oggetti macroscopici?

Nelle condizioni ordinarie macroscopiche gli stati d'interferenza non si notano, ma ci sono. Infatti, i raggi luminosi s'incontrano e interferiscono tra loro in ogni punto e in ogni istante, ma la situazione è caotica nel tempo e nello spazio, le emissioni da parte degli atomi sono casuali e le onde non sono sincronizzate in partenza. Quello che vediamo è il risultato medio macroscopico e non siamo in grado di rilevare i singoli eventi microscopici nei diversi istanti e differenti posizioni.

Nell'esperienza della doppia fenditura con i fotoni le condizioni d'interferenza costruttiva e distruttiva sono ottenute con fenditure che forniscono sorgenti coerenti (emettono in modo



Naviglio Piccolo

identico e regolare), con adeguata apertura e distanza tra loro; lo strumento di osservazione o misura (lo schermo) è posto in modo opportuno rispetto ad esse e l'apparato è adeguatamente protetto da agenti esterni che possano influenzare il fenomeno.

Le condizioni necessarie per l'interferenza con elettroni sono tecnicamente ancora più complesse di quelle con la luce, tanto che si sono potute realizzare solo alla fine del secolo appena trascorso.

Ricordiamoci che uno stato quantico può essere espresso come una sovrapposizione di autostati. Ora, ecco il punto chiave essenziale: ogni autostato componente ha una fase associata. Perché i componenti si possano combinare insieme correttamente per produrre una sovrapposizione di stati, essi devono avere la stessa fase (devono essere coerenti, credeteci sulla parola). Questo è quello che succede nell'esperimento della doppia fenditura: i componenti di interferenza che possiedono la stessa fase si combinano per produrre gli effetti di interferenza.

Nel mondo reale, però, succede che una particella non è mai perfettamente isolata: interagisce inevitabilmente con l'ambiente. A causa di queste interazioni la particella "viene osservata" dall'ambiente – l'ambiente può anche essere, ad esempio, un oggetto fatto dall'uomo per la misurazione.

Quello che succede ad una particella quantistica nel mondo reale è che ognuno dei suoi stati che la compongono diventa "entangled" separatamente con diversi aspetti del suo ambiente. Quando delle particelle diventano entangled, bisogna considerarle come un solo stato entangled. Quindi ciascuna componente della nostra particella quantistica forma stati entangled separati. Le fasi di questi stati saranno alterate: questo distrugge la coerenza delle fasi fra le componenti (diventano decoerenti).

Ogni volta che una proprietà di un oggetto microscopico influenza un oggetto macroscopico, quella proprietà è 'osservata' e diventa una realtà fisica. In questo caso, se non c'è più nessun termine di interferenza allora a tutti gli effetti la particella è ora in un unico, singolo, stato quantico – uno degli autostati componenti.

Da notare come i componenti di interferenza non svaniscono veramente – semplicemente non li notiamo a livello macroscopico perché sono sfasati. In effetti, vengono semplicemente dissipati nel nostro ambiente più vasto. Li possiamo immaginare come piccole increspature nell'oceano – noi notiamo sempre e solo le grandi (macroscopiche) onde. Le piccole increspature diventano entangled con altre piccole increspature finché non diventa impossibile dire da quale grande onda provenga ciascuna piccola increspatura.

Quindi le onde (termini di interferenza) non spariscono veramente. Si dissipano nell'ambiente e diventano, a tutti gli effetti, non determinabili. In questo senso, il processo di decoerenza è irreversibile – ed è un punto chiave: non possiamo invertire il processo (per rigenerare le componenti di interferenza iniziali) – sono perse per sempre. Ed anche le "piccole onde", echi degli effetti di interferenza, sono diventate impercettibili a causa delle interazioni con l'ambiente. Quindi, a tutti gli effetti, gli effetti di interferenza (onde) sono completamente scomparsi.

Comunque, il processo di decoerenza ingannò i Fisici per molti anni perché era un processo molto efficiente – la decoerenza avviene incredibilmente velocemente (in un intervallo di 10^{-27} secondi!) – e che dava una forte impressione di discontinuità, di salto quantistico "istantaneo". Invece, recenti esperimenti sono riusciti a rallentare la decoerenza staccando delle particelle quantistiche dal loro ambiente. Se la decoerenza è rallentata allora le sovrapposizioni di stati diventano evidenti. Ad esempio, una corrente elettrica è stata fatta fluire in direzioni opposte allo stesso tempo usando un anello superconduttore.

Quindi, perché gli elettroni nell'esperimento della doppia fenditura mostrano ancora effetti



Naviglio Piccolo

di interferenza? Perché non subiscono la decoerenza? La risposta è che non si tratta di oggetti macroscopici, sono oggetti microscopici isolati. Mentre la decoerenza avviene molto rapidamente per i primi, per un elettrone il tempo di decoerenza (che viene detto coefficiente di fluttuazione) è di circa 10^7 secondi, un anno circa – abbastanza tempo per fare l'esperimento della doppia fenditura ed osservare gli effetti di interferenza.

La dissipazione dei componenti di interferenza durante la decoerenza è simile al raggiungimento dell'equilibrio termico, quando si considera la diffusione delle particelle riscaldate di un gas. L'ambiente può essere considerato un bagno termico (una sorta di riserva illimitata di calore) nel quale i termini di interferenza si diffondono e diventano completamente non orientati. È lo stato con entropia massima (massimo disordine). A quel punto, si dice che il processo è termodinamicamente irreversibile: è molto improbabile, praticamente impossibile, che la situazione ordinata iniziale si riformi spontaneamente. L'interferenza se n'è andata per sempre e per questo vediamo il collasso della Funzione d'Onda operare solo nella direzione "avanti" del tempo (per la stessa ragione non vediamo bicchieri rotti che si riaggiustano).

C'è infine l'ipotesi di una decoerenza detta *intrinseca* in quanto *non* presuppone l'interazione con *agenti esterni* al sistema (quali l'interazione con l'ambiente, con l'apparato di misura o con bagni termici costruiti più o meno *ad hoc*), poiché è legata a fluttuazioni di *parametri* interni ad esso (come, ad esempio, i tempi di interazione).

Il problema della misurazione quantistica ha confuso i fisici sin da quando la Meccanica Quantistica fu inizialmente scoperta: cosa costituisce una misurazione? Quale processo casuale seleziona i valori osservati dai possibili valori nella sovrapposizione? Cosa succede agli altri termini nella sovrapposizione?

Nel 1957, Hugh Everett propose la sua Interpretazione a Molti Mondi (MWI in inglese) della Meccanica Quantistica nel tentativo di fornire delle risposte alle domande precedenti. La MWI afferma che quando effettuiamo una misurazione, l'Universo si divide in universi paralleli differenti, ciascuno dei quali contenente uno dei possibili risultati dell'osservazione.

L'interpretazione dei Molti Mondi sembra molto un prodotto degli anni Cinquanta. Recenti risultati sulla decoerenza quantistica ci hanno dato nuove intuizioni sul problema della misurazione quantistica, e non c'è più bisogno di proporre universi paralleli per spiegare il processo. I termini di interferenza si dissipano nell'ambiente e diventano a tutti gli effetti non misurabili: non abbiamo bisogno di proporre che si teletrasportino in un universo.

Si ha ora un supporto sperimentale per questo punto di vista della decoerenza. Se le particelle possono essere isolate dall'ambiente possiamo riuscire a vedere diverse sovrapposizioni di termini di interferenza come una realtà fisica in questo universo. Come ulteriore esempio, vedi la ricerca del NIST (National Institute of Standards and Technology) che ha creato un atomo in due posti allo stesso tempo (rassegna stampa del NIST). Se i termini di interferenza scappassero realmente in un altro universo non dovremmo mai essere capaci di osservarli come realtà fisiche nel nostro.

Restando con i piedi per terra

Una buona parte delle tecnologie moderne sono basate, per il loro funzionamento, sulla meccanica quantistica. Ad esempio i lettori CD, il laser, il microscopio elettronico, la risonanza magnetica nucleare, le microsonde chirurgiche... Inoltre, molti calcoli di chimica computazionale si basano su questa teoria.

Diodi e transistor, entrambi elementi indispensabili per l'elettronica moderna, grazie a questo tipo di tecnologie possono essere realizzati in dimensioni estremamente compatte, una moderna CPU in pochi millimetri può contenere miliardi di transistor. L'uso di questi tipi di semiconduttori è alla base del funzionamento anche dei pannelli fotovoltaici.



Naviglio Piccolo

Molti sforzi sono stati fatti per sviluppare una crittografia quantistica, che garantirebbe una trasmissione sicurissima dell'informazione in quanto l'informazione non potrebbe essere intercettata senza essere modificata. Un'altra meta che si cerca di raggiungere, anche se con più difficoltà, è lo sviluppo di computer quantistici, basati sul calcolo quantistico che li porterebbe ad eseguire operazioni computazionali con molta più efficienza dei computer classici. Inoltre, nel 2001 è stato realizzato un nottolino quantistico (vale a dire un esperimento scientifico in grado di estrarre una corrente di elettroni a partire da un potenziale medio nullo) funzionante, versione quantistica del nottolino browniano, basato sul moto di agitazione termica delle molecole.

La fisica quantistica è ormai alla base di tutta la Scienza. Oggi, infatti, le proprietà dei quanti non solo spiegano il mondo atomico e subatomico ma altresì decifrano numerosi aspetti relativi all'astrofisica e alla cosmologia e recentemente interpretano anche molteplici fenomeni inerenti la biofisica, la genetica e le neuroscienze.

Nonostante ciò, malgrado il nostro mondo quotidiano sia quasi totalmente permeato dalle applicazioni della quantistica e malgrado gli sviluppi concettuali di questa teoria siano tra i più innovativi degli ultimi cento anni, la maggior parte degli italiani non sa quasi nulla di questa disciplina ed il suo insegnamento è praticamente ignorato dai programmi scolastici.

Non Conclusione

Come vedete non è possibile ancora formulare conclusioni, perché siamo chiaramente ancora in piena fase di ricerca. Potremmo anzi sostenere che sono più gli aspetti che generano dubbi, contro le rare certezze che la Natura ci lascia intravedere. Si tratta però di argomenti poco appetibili per il mercato, che preferisce decisamente accaparrarsi i risultati delle innumerevoli e ormai indispensabili applicazioni tecnologiche della teoria quantistica. È per questo che i fisici avranno sempre lavoro..., ma niente stipendio?



Naviglio Piccolo

Maria Cristina Fighetti

Mi presento: sono laureata in Fisica (qui a Milano, meglio non dire quando), ho insegnato matematica e fisica nei Licei Scientifici milanesi fino al 1999, sono socia dell'AIF (Associazione per l'Insegnamento della Fisica).

Sono profondamente convinta che una visione generale della Fisica moderna debba essere un patrimonio della conoscenza comune e non solo un argomento da addetti ai lavori, per il buon motivo che il nostro modo di vivere ne è totalmente condizionato, nel bene e nel male.

L'informazione scientifica nel nostro Bel Paese è mediamente assopita sull'800, sia a livello scolastico sia a livello divulgativo.

Anche per questo, una volta in pensione, ho proposto un progetto di diffusione della cultura della fisica moderna nei Licei, che è stato recepito dalla cattedra di Storia della Fisica dell'Università di Milano.

Ho quindi collaborato con l'università per la realizzazione di appositi seminari multimediali per le scuole medie superiori e inferiori, che sono stati tenuti sia presso l'Università (con prestigiosa sede a Brera) che, a richiesta, presso le singole scuole.

Gli argomenti proposti (relatività speciale e generale, quantizzazione della materia e della radiazione, meccanica quantistica, grandi personaggi della Fisica moderna,...) venivano scelti da gruppi di studenti e/o docenti interessati e presentati con il supporto di animazioni computerizzate per agevolarne la comprensione attraverso l'uso delle immagini. Per un paio di anni è stato possibile perfino mostrare applicazioni sperimentali della teoria nello stesso contesto.

Da qualche anno collaboro allo svolgimento delle Olimpiadi Italiane della Fisica sia a livello regionale che nazionale, con corsi di supporto per gli studenti di Milano e hinterland e con partecipazione alla realizzazione delle prove.



Naviglio Piccolo

Pierluigi Boschetti

Laureato in Fisica Teorica ... qualche anno fa (1969). Dopo un breve periodo di insegnamento e di ricerca all'Università, durante il quale ha pubblicato diversi articoli su giornali internazionali di Fisica, ha lavorato nell'informatica fino al 1994. Da piccolo aveva la passione della scultura; qualche anno dopo la laurea, in una giornata piovosa sul lago, per passare il tempo, ha ripreso l'antica passione e lasciata l'informatica si è dedicato nuovamente alla scultura e alla pittura, che ha poi praticato professionalmente. Da pensionato coltiva anche lo studio della musica suonando il flauto traverso e delle lingue antiche, greco ed ebraico biblico. Continua privatamente lo studio della matematica e della fisica.

Quota di partecipazione € 3,00

Viale Monza 140 (M1 Gorla - Turro)

Informazioni: www.navigliopiccolo.it email naviglio.piccolo@navigliopiccolo.it