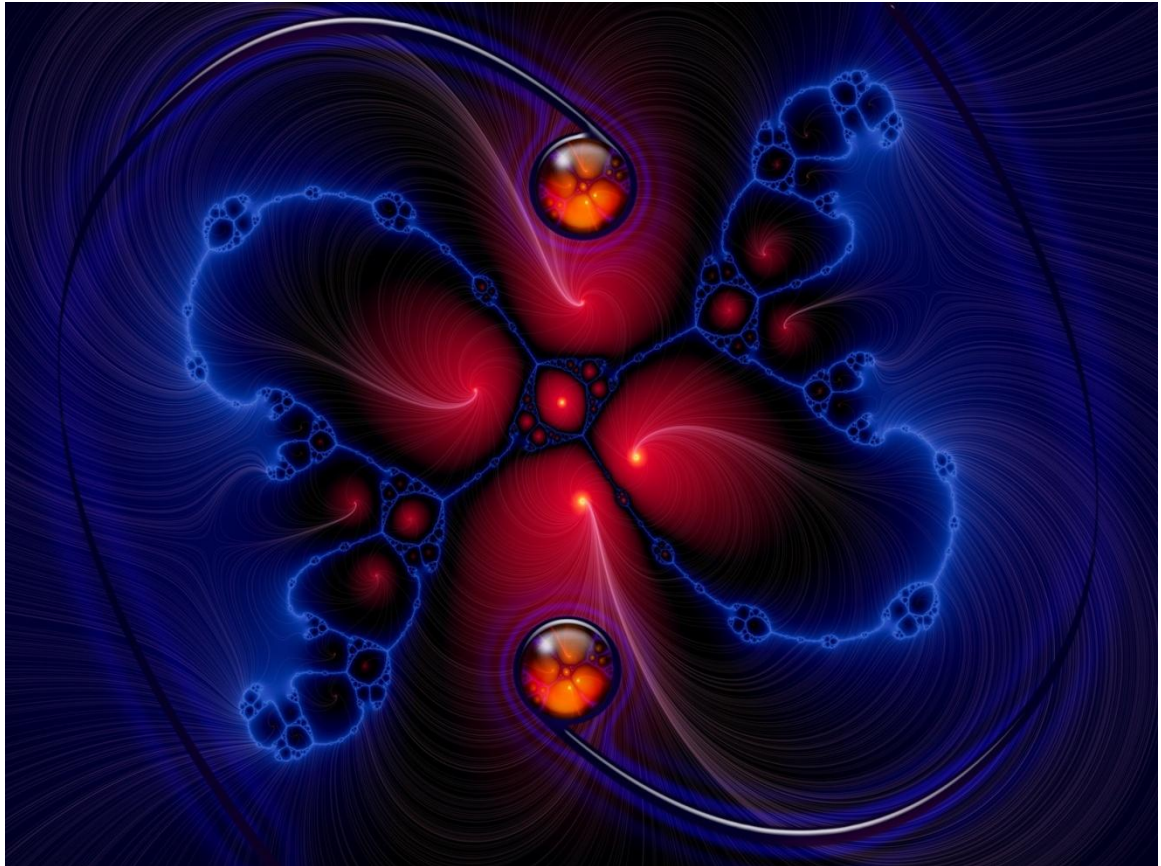


FISICA QUANTISTICA: alcune osservazioni interpretative

di Claudio Caracci
Università degli Studi di Urbino “Carlo Bo”



Riassunto.

Da molti anni lo studio della Fisica Quantistica è spesso accompagnato da alcune affermazioni che la inquadrano come una delle teorie più bizzarre mai concepite dall'uomo. Si fa la conoscenza di una lunga serie di esperimenti che vengono raccontati come paradossali.

Questo punto di vista ha assunto delle proporzioni tali che oggi si può parlare addirittura di "deriva irrazionale" della Meccanica Quantistica.

Troppo a lungo, però, non ci si è resi conto che tutto quanto c'è di paradossale può dipendere fortemente dal tipo di interpretazione filosofica che viene data a questi esperimenti. Spesso, come anche la maggioranza dei moderni osservatori affermano, le problematiche da affrontare non sono di tipo conoscitivo, bensì di tipo interpretativo.

Quanto segue in questo lavoro, al contrario, non vuole perseguire nessuna aprioristica convinzione filosofica e, soprattutto, non vuole confutare nulla di quanto già provato o stabilito dall'apparato sperimentale. La meccanica quantistica è una scienza che funziona. E' confermato che sia una delle teorie i cui risultati sperimentali si avvicinano di più a quelli teorici.

Non è detto, però, che non si possano aggiungere alcune osservazioni in grado di valutare in modo leggermente diverso i vari esperimenti, ovviamente inserendo un nuovo apparato interpretativo che riesca a eliminare, nelle intenzioni, quanto di straordinario sembrerebbe esserci nella teoria stessa.

La presente trattazione si divide in due parti: nella prima vengono sorvolati molto sommariamente i principali argomenti della meccanica quantistica, mettendo in risalto i punti chiave, specialmente quelli più controversi e che danno adito a interpretazioni diverse; nella seconda parte, sulla base di alcune ipotesi supplementari, che comunque non costituiscono una base preconcepita, bensì soltanto uno spunto per ulteriori approfondimenti, essi vengono rivisitati mettendo in luce alcune nuove indicazioni sulla natura del substrato quantistico che esulino dal cosiddetto sensazionalismo.

Abstract.

For many years the study of Quantum Physics is often accompanied by some statements that indicate it as one of the most bizarre theories ever devised by man. A long series of experiments are introduced that are considered as paradoxical.

This view has assumed such proportions that even today we can speak of "irrational drift" of Quantum Mechanics.

For too long, however, the scientific community didn't realized that all that is paradoxical may depend greatly on the philosophical interpretation that is given to these experiments. Often, as even the most modern observers say, the issues involved are not of the type of knowledge, but of interpretation.

What follows in this work, by contrast, will not pursue any a priori philosophical conviction, and especially does not want to refute anything that has already been tried or determined from the experimental apparatus. Quantum mechanics is a science that works. It was confirmed as one of the theories whose experimental results come closer to the theoretical ones.

For this reason, however, we can add a few observations that can assess a bit differently the various experiments, obviously entering a new interpretative apparatus that could eliminate, in its intentions, what would seem to be extraordinary in such theory.

This discussion is divided into two parts: first they are overlooked very briefly the main topics of quantum mechanics, highlighting key points, especially the most controversial and which give rise to different interpretations, in the second part, based on certain further assumptions, which however do not provide a basis for prejudicial, but only a starting point for more studies, they are revisited highlighting some new information on the nature of the quantum substrate which lies outside the so-called sensationalism.

Introduzione

Da molti anni lo studio della Fisica Quantistica è spesso accompagnato da alcune affermazioni che la inquadrano come una delle teorie più bizzarre mai concepite dall'uomo. Si fa la conoscenza di una lunga serie di esperimenti che vengono raccontati come paradossali ovvero “al di fuori dell'ordinario”.

Questo punto di vista ha assunto delle proporzioni tali che oggi si può parlare addirittura di “deriva irrazionale” della Meccanica Quantistica.

Troppo a lungo, infatti, non ci si è resi conto che tutto quanto c'è di paradossale può dipendere fortemente dal tipo di interpretazione filosofica che viene data a questi esperimenti.

Spesso, come anche la maggioranza dei moderni osservatori affermano, le problematiche da affrontare non sono di tipo conoscitivo, bensì di tipo interpretativo. Alla struttura matematica di equazioni, che formano la teoria stessa, si possono dare tutta una serie di interpretazioni che dipendono, il più delle volte, dalle credenze filosofiche di chi si accinge a studiarle.

Talvolta, sembra, addirittura, che qualcuno si diverta a trovare spiegazioni bizzarre più per un gusto sensazionalistico che per una convinzione razionale.

Quanto segue nei prossimi paragrafi, al contrario, non vuole perseguire nessuna aprioristica convinzione filosofica e, soprattutto, non vuole confutare nulla di quanto già provato o stabilito dall'apparato sperimentale. La meccanica quantistica è una scienza che funziona. E' confermato che sia una delle teorie i cui risultati sperimentali si avvicinano di più a quelli teorici.

Non è detto, però, che non si possano aggiungere alcune osservazioni in grado di valutare in modo leggermente diverso i vari esperimenti, ovviamente inserendo un nuovo apparato interpretativo che riesca a eliminare, nelle intenzioni, quanto di “magico” o straordinario sembrerebbe esserci nella teoria stessa.

Inoltre non è escluso che, a sua volta, le diverse interpretazioni possano sollevare ulteriori problematiche auspicabilmente non superiori a quelle che si sarebbe voluto risolvere e tutti sono invitati, eventualmente, a cercare di falsificarle con esperimenti.

La presente trattazione si propone di dare rilievo a queste argomentazioni con un linguaggio che, pur privo di formule matematiche, risulti semplice senza semplificare. La terminologia è pur sempre quella scientifica e si invita il lettore digiuno di matematica ad approfondire e a non considerarne il significato letterale. Si divide in due parti: nella prima vengono sorvolati molto sommariamente i principali argomenti della meccanica quantistica, mettendo in risalto i punti chiave, specialmente quelli più controversi e che danno adito a interpretazioni diverse; nella seconda parte, sulla base di alcune ipotesi supplementari, che comunque non costituiscono una base preconcepita, bensì soltanto uno spunto per ulteriori approfondimenti, essi vengono rivisitati mettendo in luce alcune nuove indicazioni sulla natura del substrato quantistico che esulino dal cosiddetto sensazionalismo.

In definitiva, la presunzione sta nel voler trovare un modo per leggere un libro di meccanica quantistica senza ricorrere ad eccessive ipotesi bizzarre o che non siano verificabili. Il famoso esempio della teiera volante di Roger Penrose è esaustivo sull'argomento e qualunque obiezione verrà formulata sarà per me più accettabile di alcune interpretazioni che faccio fatica a considerare razionali, quali quelle a “molte menti” o a “molti universi”.

1° parte: Problematiche della Meccanica Quantistica

La luce e la nascita della Meccanica Quantistica

Il secolo 19° è stato un secolo di grandi rivoluzioni e la Fisica sembrava aver trovato la strada maestra nel tentativo di dare una spiegazione a tutti gli eventi naturali, grazie soprattutto alla unificazione tra elettricità e magnetismo. La luce, fonte di grande mistero nel passato, risultò essere un'onda elettromagnetica e la teoria ondulatoria fornì una spiegazione esauriente per la maggior parte degli esperimenti. Ma questa spiegazione non risultò adeguata per tutti i possibili esperimenti. Dal tentativo di conciliare quegli esperimenti che necessitavano una spiegazione corpuscolare con tutti gli altri, nacque la meccanica quantistica. Questa nuova teoria fisica forniva e fornisce tuttoggi una descrizione accurata dei risultati sperimentali. Questi risultati sono incontrovertibili. Da mettere in discussione sono esclusivamente le ipotesi supplementari, tutti quei concetti di natura interpretativa che sembrano fornire la base della teoria stessa.

Dualità onda-particella

Dalla volontà di unificare gli esperimenti che storicamente mettevano in luce l'aspetto ondulatorio con quelli che, invece, evidenziavano l'aspetto corpuscolare, nacque per la prima volta il concetto di binomio onda-particella, o meglio onda-corpuscolo.

Secondo questa storica interpretazione la luce si comporta in maniera diversa a seconda del tipo di esperimento che stiamo effettuando. Infatti, i fenomeni di riflessione, rifrazione e diffrazione evidenziano il suo aspetto ondulatorio, mentre se effettuiamo un esperimento di assorbimento da parte di una superficie, possiamo osservare un comportamento di tipo corpuscolare.

Per tentare una sorta di unificazione, si è introdotto anche il concetto di pacchetto d'onde, che permette una sorta di localizzazione di alcune proprietà fisiche, ma che è, comunque, lontano dal concetto di corpuscolo. Il corpuscolo dovrebbe, infatti, avere tutte le sue proprietà fisiche concentrate in un'unica posizione allo stesso istante di tempo.

I primi esperimenti in cui si evidenziò storicamente l'aspetto corpuscolare furono l'effetto fotoelettrico e quello Compton. Furono il punto di partenza, mostrando che l'interpretazione ondulatoria, da sola, non era in grado di spiegare la totalità dei fenomeni.

Effetto fotoelettrico

Se si invia un raggio di luce su di una superficie metallica, si può osservare che dalla parete vengono emessi degli elettroni. Di per sé questo fatto non è sorprendente, ma si è osservato che l'energia di questi elettroni è indipendente dall'intensità della luce inviata e dipende, invece, dalla frequenza della luce stessa.

Gli elettroni vengono emessi, infatti, solo a partire da una certa frequenza in poi.

Dal punto di vista classico, ci saremmo aspettati che all'aumentare dell'intensità della luce, aumentasse l'energia degli elettroni emessi. Invece, l'intensità fa aumentare solo il numero di elettroni emessi. Inaspettatamente l'energia dipende dalla frequenza della radiazione incidente.

La luce sembra dunque essere assorbita dall'elettrone solo sotto forma di pacchetti discreti, che prendono il nome di quanti. Ogni quanto è caratterizzato da una certa frequenza: quindi, l'aumento dell'intensità fa aumentare il numero dei quanti assorbiti, ma è la loro frequenza che determina l'energia finale dell'elettrone.

I quanti di luce sono anche chiamati fotoni e risulta evidente che questo comportamento di tipo particellare entra in conflitto con gli esperimenti tipici dell'ottica geometrica che rivelano una natura ondulatoria.

Effetto Compton

Nell'effetto Compton un fotone di una certa energia urta un elettrone a riposo. Il fotone viene diffuso dall'elettrone senza essere assorbito.

Questo effetto, che rimaneva oscuro se si cercava di interpretarlo con la teoria ondulatoria, poteva essere, invece, facilmente spiegato ipotizzando la presenza di pacchetti discreti, che potessero rimbalzare come palle di biliardo.

Il principio di indeterminazione: interpretazione a disturbo

Il principio di indeterminazione, formulato per la prima volta da Heisenberg, stabilisce l'accuratezza che si può raggiungere nella determinazione di una misura.

Inizialmente il problema della determinazione di una misura con il massimo valore di accuratezza sembrava connesso solamente ad un processo perturbativo. Quando si tenta di misurare un sistema quantistico, ovvero di dimensioni infinitesime quale può essere ad esempio la posizione di una particella, inevitabilmente si invia un raggio di luce su di esso, che in ultima analisi risulta avere all'incirca le medesime dimensioni dell'elettrone, e che quindi interagisce con esso modificandone inesorabilmente la velocità. Quindi la dimensione minima che si raggiunge è quella legata alle dimensioni stesse del raggio di luce incidente e quindi alla sua lunghezza d'onda. Se poi oltre a conoscere la posizione di suddetta particella, volessimo conoscere la sua velocità nella suddetta posizione, notiamo che l'aver determinato dove si trovi la particella ne ha distrutto inevitabilmente la velocità e che quindi la sua determinazione è impossibile.

La stessa cosa, ma in situazioni opposte, avviene nel caso in cui si voglia conoscere per prima la velocità di un elettrone. Questo perché ogni interazione fisica tra strumento misuratore e microoggetto misurato implica sempre uno scambio di energia per un certo intervallo di tempo, oppure la cessione di una certa quantità di moto su una certa distanza spaziale.

Il principio di indeterminazione si enuncia dicendo dunque che le due osservabili posizione e velocità soddisfano la seguente condizione: quantopiù è "determinato" il valore della prima, tantopiù è "indeterminato" il valore della seconda, in base ad una precisa relazione numerica che definisce la cosiddetta costante di Plank.

Questa costante mette in luce la precisa relazione che lega alcune coppie di osservabili, relegando tali fenomeni solo ad un certo ordine di grandezze. Chiaramente se la precisione non arriva a valori dell'ordine di grandezza microscopici, entrambe le osservabili sono determinate, come avviene comunemente nella fisica classica. Quindi il Principio di Indeterminazione è valido per qualsiasi oggetto, ma in pratica ha conseguenze importanti solo se applicato a particelle di dimensioni atomiche o subatomiche, perché quando si tratta di corpi ordinari, data la piccolezza della costante coinvolta, esso perde gran parte del suo significato.

Dato che, normalmente, si ritiene un sistema noto quando se ne conoscano le posizioni e le velocità di tutti i suoi componenti, si può vedere come esistano dei grossi limiti al nostro grado di conoscenza di un sistema atomico.

Ad esempio di quanto detto finora possiamo tentare di determinare simultaneamente la traiettoria e la posizione di un oggetto in movimento:

Proviamo a determinare, per mezzo di una foto, la posizione di un oggetto in moto quale può essere una palla di cannone. Se la palla percorre la propria parabola a notevole velocità, è ovvio che la fotografia risulterà mossa, a meno che non si usi un otturatore ad alta velocità. Più velocemente si fa scattare l'otturatore, più l'oggetto risulterà immobile. Ma in tal caso si sarà pagato un prezzo nella definizione della traiettoria, visto che la palla di cannone risulta ferma.

Se invece usassimo un otturatore a bassa velocità, potremmo ottenere una linea indistinta che rappresenta fedelmente la traiettoria che la palla ha perseguito, ma senza ottenere alcuna indicazione sulla sua posizione.

Potremmo dunque concludere che più si tenta di stabilire la traiettoria dell'oggetto, più si perde l'informazione sulla sua posizione e viceversa.

Il principio di indeterminazione oggi

La precedente interpretazione cosiddetta “a disturbo” del principio di indeterminazione è stata sostituita da una versione più moderna, che comprende, però, anche alcune caratteristiche di tipo interpretativo. Si suppone la non esistenza in contemporanea delle osservabili, chiamate coniugate, del mondo microscopico. Le particelle si suppongono “non possedere” affatto quegli elementi di realtà legati alla coppia di osservabili che, secondo il principio di indeterminazione, non sono determinabili contemporaneamente. Pertanto, secondo questa interpretazione, fintantochè non si esegue una misura, la particella non ha posizione o non ha velocità. Queste “proprietà” quali la posizione e la velocità, vengono assunte nel momento della misura.

Le limitazioni imposte dal principio di indeterminazione, dunque, non derivano solo dall’invasiva interazione del mondo macroscopico sul mondo microscopico effettuata dai dispositivi di rilevazione, ma sono proprietà intrinseche, ovvero ontologiche, della materia. In nessun senso sembra che si possa ritenere che una microparticella possieda in un dato istante una posizione e una velocità. In altri termini la particella allo “stato naturale” non ha oggettivamente una velocità e una posizione.

Questo nasce essenzialmente dalla doppia natura ondulatorio-corpuscolare della materia: dal fatto di dover mettere insieme onde e corpuscoli per la rappresentazione di una stessa entità.

Il Principio di Indeterminazione, inoltre, è applicabile anche ad altre coppie di osservabili, quali ad esempio l’energia legata ad una certa particella e l’istante in cui avviene l’interazione. Se l’energia posseduta è ben definita, allora questa energia è distribuita in qualche modo in un certo intervallo di tempo. Se prendiamo un istante qualsiasi ben definito allora la sua energia risulta, in qualche modo, definita in un certo intervallo e non determinabile in maniera precisa.

Più in generale, qualunque coppia di osservabili i cui operatori non commutano non sono misurabili simultaneamente.

Riduzione Del Pacchetto

Tra gli aspetti della meccanica quantistica che possono essere definiti quantomeno peculiari se non straordinari, ci sono quelli in cui troviamo definita la famosa “riduzione del pacchetto” che interviene in tutte le misurazioni, a partire dall’esperimento di Stern e Gerlach.

In ogni ambito in cui è definita una misurazione, nel famoso esperimento della doppia fenditura, nell’esperimento mentale del Gatto di Schroedinger, nell’Entanglement, essa determina il comportamento particellare da contrapporre a quello ondulatorio.

La straordinarietà consiste nel fatto che una funzione d’onda che procede linearmente in tutto lo spazio, possa decadere istantaneamente, nel momento in cui noi compiamo un’osservazione, in uno stato invece che in un altro, seguendo le leggi probabilistiche. Questo decadimento istantaneo coinvolge, secondo alcuni, persino l’osservatore nell’atto della misura.

Ma alcune di queste interpretazioni, non solo non risultano convincenti, ma portano addirittura a delle situazioni concettuali che risultano impossibili da verificare, anche se in futuro possedessimo mezzi ora sconosciuti, o a situazioni che sono addirittura palesemente in contraddizione con la realtà. Questo fatto ci deve dissuadere anche solo dal prenderle in considerazione, tantomeno accettarle. Mi riferisco ad esempio all’interpretazione a molti universi di Everett e all’interpretazione delle “molte menti” dell’osservatore formulata da Albert-Loewer.

Altre teorie, come ad esempio quella dell’onda pilota di Bohm, che contemplano un dualismo contemporaneo di onda-corpuscolo, non convincono fino in fondo e aggiungono molti più problemi interpretativi di quanti non ne risolvano.

Per quanto riguarda una lista riassuntiva delle principali interpretazioni della meccanica quantistica si veda, ad esempio, “La Strada che Porta alla Realtà” di Roger Penrose [3].

La misurazione in Meccanica Quantistica tramite l'esperimento di Stern-Gerlach

Si fa passare un elettrone in un campo magnetico non omogeneo. L'elettrone viene deviato dal campo magnetico a seconda del proprio spin intrinseco in una direzione o nella sua opposta. Quando una particella passa attraverso il dispositivo di Stern-Gerlach viene "osservata".

L'osservazione in meccanica quantistica è equivalente alla misura.

Lo strumento di osservazione è il rivelatore, e in questo caso possiamo osservare uno dei due possibili valori, o spin su o spin giù; questi sono descritti dal numero quantico del momento angolare generico che può assumere due valori distinti.

L'operazione di misura di un'osservabile viene effettuata applicando l'operatore corrispondente all'osservabile sulla funzione d'onda, secondo la base determinata dai due numeri quantici prefissati. In termini matematici la funzione d'onda può essere espressa come combinazione lineare dei due autovettori corrispondenti.

Filtri polarizzatori

Introduciamo l'uso dei filtri polarizzatori in quanto la stragrande maggioranza degli esperimenti può essere descritta grazie ad essi.

Se vogliamo evidenziare l'aspetto corpuscolare della luce possiamo considerare il raggio di luce come un insieme di fotoni e, nel caso l'energia irradiata sia bassa, lo possiamo considerare come formato da un solo fotone al secondo.

Nel caso rappresentassimo il raggio di luce come un'onda è utile definire, invece, il piano di polarizzazione di quest'onda, ovvero quel piano lungo il quale l'onda stessa oscilla. Nel caso della luce naturale tutte le direzioni sono presenti contemporaneamente e la luce si dice diffusa. Il laser costituisce un esempio di luce naturale polarizzata.

Un filtro polarizzatore è un dispositivo tale che, dato un raggio di luce sul suo percorso, esso fa passare soltanto la luce lungo una determinata direzione che è quella caratteristica del filtro. Ovvero dopo aver passato il filtro la luce risulta polarizzata lungo quella direzione.

Una volta ottenuto un fascio di luce polarizzata in una certa direzione possiamo applicare nuovamente il filtro per vedere cosa accade.

Naturalmente se il secondo filtro ha la stessa direzione del primo tutta la luce lo attraversa e quindi tutti i fotoni passano attraverso il secondo filtro. Se invece la direzione è quella perpendicolare rispetto alla prima nessun fotone attraverserà il secondo filtro.

Vediamo ora il caso particolare che la direzione del filtro sia a metà strada tra le due viste precedentemente, ovvero a 45 gradi. Il risultato è sorprendente: metà dei fotoni, a caso, passeranno il filtro e saranno tutti polarizzati secondo la nuova direzione, ovvero a 45 gradi.

La meccanica quantistica asserisce che la casualità insita in questi processi microscopici non è di tipo epistemico, ovvero non è dovuta ad ignoranza, ma ad una genuina indeterminazione.

Filtro a 45° inserito tra due filtri a 0° e 90°

Un caso interessante è costituito dall'esperienza seguente.

Abbiamo osservato che se si dispone un filtro polarizzato a 90° successivamente ad uno polarizzato a 0° la luce viene completamente bloccata e nessun fotone riesce ad emergere dal secondo filtro.

Supponiamo di inserire, in mezzo ai due, un terzo filtro che sia polarizzato a 45°. L'esperienza mostra che tale inserimento provoca l'immediato passaggio di una parte della luce attraverso tutti i filtri.

Anche se la spiegazione di tale fenomeno è matematicamente accettabile, dal punto di vista fisico-filosofico si fa un po' fatica ad accettare che l'aggiunta di un apparato solido, lungo il percorso di un sistema, possa far apparire una radiazione luminosa altrimenti assente.

Particelle virtuali

Nello studio della elettrodinamica quantistica sono introdotte spesso le cosiddette particelle virtuali: particelle che, per così dire, vengono prese in prestito durante le interazioni e poi restituite per bilanciare i conti energetici.

Esse esistono limitatamente nello spazio o nel tempo, obbediscono alle leggi di conservazione ed introducono incertezza nella misura di posizione e quantità di moto.

Le particelle virtuali sono anche responsabili dell'energia del vuoto che è presente nello spazio anche quando privo di materia. Fenomeni di creazione e annichilazione di particelle si verificano quando si tenta di osservare il vuoto a distanze infinitesime.

Anche se matematicamente convincente, questo punto di vista suscita molte perplessità dal punto di vista filosofico. Ci possiamo chiedere se lo spazio vuoto sia "realmente" un mare di presenze materiali o ondulatorie, oppure sia realmente vuoto.

Nel caso che non fosse più vuoto, bisognerà approfondire la conoscenza del substrato per cercare di capire come possa emergervi uno spazio che sembra vuoto e cercare, se non altro, un nuovo nome. "Spazio libero" potrebbe essere, forse, più appropriato.

Indistinguibilità Delle Particelle

Un'altra caratteristica da tenere in considerazione è quella dell'indistinguibilità delle particelle. Due particelle della stessa natura si dicono indistinguibili l'una dall'altra dal momento che entrambe posseggono le stesse caratteristiche fisiche e nessuna che le differenzi. Tutti i fotoni con identica polarizzazione sono uguali tra loro, tutti gli elettroni con lo stesso spin sono uguali tra loro. Sono soltanto le grandezze fisiche misurabili quelle che stabiliscono la differenza tra una particella e un'altra.

Il Substrato Quantico

Il substrato quantico o schiuma quantistica è quell'ente che permea tutto lo spaziotempo ad una scala di scambi energetici confrontabile con la costante di Planck. Il principio d'indeterminazione di Heisenberg ci dice che le particelle non posseggono una ben definita coppia di posizione e momento secondo la ben nota relazione. Analogamente si possono dire le stesse cose per la coppia di valori di energia e istante di tempo.

Le recenti teorie che aspirano a diventare Teorie Del Tutto, quali la "Teoria Delle Stringhe" e la "Gravità Quantistica A Loop" danno interpretazioni, ma soprattutto descrizioni diverse del substrato. La prima considera le particelle come formate da piccolissime stringhe che quindi dovrebbero considerarsi come corpuscoli in uno spaziotempo ordinario. La seconda quantizza lo spaziotempo stesso.

Purtroppo entrambe non sembrano prendere in grossa considerazione i punti salienti, limitandosi ad inglobare la meccanica quantistica, compreso l'apparato interpretativo, senza analizzarne ulteriormente le problematiche e ancor meno spiegarle.

L'esperimento delle due fenditure

Se si manda la luce da una sorgente luminosa su di una parete attraverso una fenditura il cui spessore è maggiore della lunghezza d'onda della luce inviata, la luce prosegue indisturbata il suo cammino in linea retta, con eccezione dei bordi frastagliati che riproducono i contorni della fenditura.

Se, invece, lo spessore della fenditura è dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda emessa, sappiamo che il risultato sarà dato dal fenomeno della diffrazione, ovvero nello schermo successivo alla fenditura ci saranno zone di luce e buio secondo le leggi dei fenomeni ondulatori.

Nel caso in cui, al contrario, la fenditura avesse spessore inferiore a quello della lunghezza d'onda della luce inviata, la luce proseguirebbe il suo cammino in ogni direzione possibile, diventando a tutti gli effetti una sorgente di luce.

Se vengono considerate due fenditure, di spessore inferiore alla lunghezza d'onda della luce per evitare effetti di diffrazione, poste ad una distanza molto superiore alla lunghezza d'onda, sappiamo che esiste il fenomeno ondulatorio dell'interferenza. Ovvero nello schermo ci saranno zone di luce alternate a zone di ombra. L'esperimento appena descritto è quello classico di Joung che dimostrava il comportamento ondulatorio della luce.

Se la luce fosse solo semplicemente un'onda non ci sarebbe nulla di strano. Ma secondo il principio di dualità, l'onda è anche una particella.

Supponiamo, allora, di spedire un fotone, una singola particella. Tale particella viene rilevata in un certo punto dello schermo.

Se la fenditura è una sola, la particella viene rilevata, con diverse probabilità, in un qualsiasi punto dello schermo, senza restrizioni.

Se le fenditure sono due, la particella cade solo in certe zone dello schermo, quelle che corrispondono alle zone di luce nel caso dell'interferenza..

Ripetendo per un numero grande di volte l'esperimento, possiamo verificare che la particella non cade mai nelle zone di buio, e inoltre capita con maggiore frequenza nelle zone di picco di luminosità.

Tale particella dovrebbe essere passata per una delle due fenditure, quindi non si capisce come faccia a sapere che l'altra fenditura è aperta. La presenza di due fenditure porta ad un comportamento diverso anche di un singolo fotone che passa soltanto in una di esse.

Se si suppone di inserire un rivelatore in una delle fenditure per verificare dove effettivamente sia passato il fotone, vediamo che misteriosamente la particella comincia a comportarsi come se ci fosse una sola fenditura, l'interferenza scompare e il fotone può di nuovo assumere qualunque posizione lungo lo schermo.

L'interpretazione classica non vede ambiguità: la decisione di osservare il fotone come corpuscolo mentre attraversa una fenditura, modifica il successivo comportamento che non sarà più quello di onda.

Secondo l'interpretazione successiva di Feynmann il fotone percorre tutti i cammini possibili.

Viene, infatti, definito un integrale di Feynmann su tutte le traiettorie possibili, il che equivale a passare per entrambe le fenditure, ma effettivamente anche questa interpretazione lascia molti interrogativi.

Il fatto che un qualsiasi ente possa effettivamente passare per tutte le traiettorie possibili, sembra un artificio matematico che nasconde un'interpretazione diversa, oppure addirittura potrebbe essere interpretato con il fatto che alcune delle ipotesi sono effettivamente mal poste.

Equazione Classica Dell'Onda Luminosa

L'equazione classica dell'onda luminosa è estesa in tutto lo spazio che va dalla sorgente alle due fenditure, e poi dalle fenditure fino allo schermo. Comprende il passaggio della luce attraverso entrambe le fenditure. In quanto funzione lineare, essa ammette l'interferenza tra due picchi e due ventri, atti a formare zone di luce e ombra sullo schermo.

L'equazione dell'onda luminosa prevede l'interferenza tra le due fenditure che impedisce ad alcune zone dello schermo di essere raggiunte dalla luce.

Funzione d'onda e riduzione del pacchetto

La funzione d'onda del fotone è una funzione nello spazio vettoriale complesso H , detto spazio di Hilbert, e non è associata allo spazio fisico reale. La funzione d'onda determina lo stato associato al fotone nello spazio funzionale complesso dove ogni direzione spaziale corrisponde ad uno stato del

sistema. Applicandole l'operatore di posizione essa fornisce la probabilità di trovare il fotone in un certo punto dello spazio ordinario.

Anche per un solo fotone, la funzione d'onda prevede l'interferenza tra le due fenditure. E' per questo motivo che alcune zone dello schermo non possono essere raggiunte dal fotone.

Con la riduzione del pacchetto si ha la parte stocastica del processo che prevede la visualizzazione del fotone in un punto casuale dello schermo tra quelli previsti dalla funzione d'onda. E quindi solo nelle zone di luce.

La casualità nei quanti come causalità non epistemica

Una delle particolarità della meccanica quantistica è quella della casualità insita nei processi che la coinvolgono. Abbiamo già visto che il punto in cui appare un fotone nello schermo dell'esperimento delle due fenditure è assolutamente casuale, anche se nell'ambito delle zone permesse e con diverse probabilità. Un altro esempio può essere quello della disintegrazione di un elemento radioattivo. Ci sono alcuni composti chimici che in natura non sono stabili, ovvero si trasformano secondo particolari modalità in altri elementi stabili.

A livello macroscopico osserviamo che un certo quantitativo di sostanza, dopo un certo periodo di tempo, perde peso o, per meglio dire, la sua massa diminuisce, emettendo radiazione. Possiamo dunque supporre che alcuni atomi, non tutti altrimenti la sostanza scomparirebbe invece di perdere massa, si trasformino in radiazione. A questo punto ci chiediamo quali atomi siano interessati alla trasformazione e dopo quanto tempo questa accada.

Ebbene, a livello del singolo atomo, scopriamo che dopo un certo tempo caratteristico per ogni sostanza radioattiva esiste una certa probabilità che ciascuno di essi si disintegri emettendo radiazione. Si badi bene che abbiamo parlato di probabilità, infatti non c'è alcuna certezza che la disintegrazione avvenga davvero. Essendo un fenomeno probabilistico, possiamo usare la statistica per descriverlo. Considerando un grosso numero di atomi misuriamo, per una certa sostanza, il tempo che occorre perché metà degli atomi originari si disintegrino: questo tempo viene indicato come *tempo di dimezzamento*.

Conoscendo il tempo di dimezzamento e il numero di atomi presenti nella nostra sostanza si può calcolare la probabilità che, ogni secondo, un singolo atomo decada.

Si potrebbe analizzare la suddetta probabilità e confrontarla con la probabilità che al lancio di un dado esca, ad esempio, il numero 6. La casualità del lancio del dado consiste nel fatto che sono sconosciute le migliaia di variabili insite nel lancio: ad esempio la forza associata ad esso, la direzione, le dimensioni del dado e le condizioni iniziali. Se per ipotesi tutte queste variabili fossero note, non sarebbe difficile prevedere l'esito di tale lancio. In questo caso parliamo di casualità epistemica, ovvero dovuta all'ignoranza delle variabili in gioco. Come fu scoperto successivamente con le disuguaglianze di Bell, si è dimostrato che il mondo reale quantistico non prevede variabili nascoste e che quindi la probabilità insita nei processi di decadimento è di tipo puramente non epistemico.

Esperimento con due specchi birifrangenti

L'esperimento con due specchi birifrangenti può essere considerato l'analogo di quello con due fenditure. In alternativa si potrebbe pensare di realizzarlo con dei filtri polarizzatori.

Uno specchio si dice birifrangente se fa passare senza rifrangere, ovvero lascia indisturbata, la luce incidente polarizzata ad esempio orizzontalmente, mentre rifrange e quindi devia di un certo angolo quella polarizzata verticalmente.

Mandando ad un tale specchio della luce polarizzata a 45 gradi avremo che una parte del raggio viene deviata e un'altra parte passa indisturbata, dividendo di fatto il raggio in due fasci.

Possiamo prendere due di questi specchi e piazzarli uno di fronte all'altro in modo che agiscano uno al contrario dell'altro. Una luce polarizzata a 45 gradi incide sul primo specchio, viene in parte deviata e in parte lasciata passare dividendosi in due raggi che, dopo un diverso percorso,

colpiscono il secondo specchio. Questo, essendo posto al contrario, indirizza tutti e due i raggi nel medesimo punto dove convergono in un unico raggio.

Ci si aspetta che questo raggio risultante della somma delle due parti sia costituito da alcuni fotoni polarizzati orizzontalmente e da altri polarizzati verticalmente e che quindi se sottoposti ad un filtro polarizzatore essi debbano diventare circa la metà e risultare polarizzati a 45 gradi.

Ebbene il risultato dell'esperimento è che tutti i fotoni passano il filtro a 45 gradi, come se non si fossero separati lungo le due direzioni e avessero mantenuto la propria polarizzazione di 45 gradi. Si potrebbe, al limite considerare un solo fotone in modo che si elimini una eventuale possibilità di ricombinazione delle direzioni. Ci si può chiedere, analogamente al caso delle due fenditure, quale percorso abbia seguito il singolo fotone. Possiamo vedere che, anche in questo caso, il fotone segue entrambi i percorsi, rendendo possibile la ricombinazione del raggio polarizzato a 45 gradi che in caso contrario era inevitabilmente o polarizzato orizzontalmente o verticalmente.

La teoria a variabili nascoste

Gli anni successivi alla formulazione della meccanica quantistica furono animati da numerose polemiche legate all'interpretazione della stessa. Da un lato c'era la scuola di Copenaghen capeggiata da Bohr, colui che aveva per primo dato una interpretazione quantistica delle orbite atomiche, e che era legata a delle teorie filosofiche positiviste. Dall'altra parte c'era Einstein sostenitore del realismo filosofico.

Il positivismo interpretava la non conoscibilità di osservabili quantistiche attraverso la non esistenza delle stesse: tutto ciò che non è possibile conoscere non esiste, o meglio, non ha senso porsi la domanda di come esso sia.

Per il realismo, invece, anche se alcuni elementi di realtà sono nascosti nel mondo microscopico, essi sono comunque reali e determinano il comportamento di quelli osservabili.

Alla luce delle conoscenze attuali entrambe queste posizioni potrebbero risultate scorrette, ma il dibattito che esse suscitavano nel corso dell'intero ventesimo secolo ha permesso tutti i successivi approfondimenti.

I sostenitori del realismo pensavano che si dovessero determinare tutta una serie di variabili, le cosiddette variabili nascoste, attraverso le quali la comprensione del mondo quantistico sarebbe stata completa: le probabilità sarebbero diventate epistemiche e le posizioni e velocità delle particelle sarebbero state determinabili contemporaneamente.

Attraverso il paradosso EPR, dalle iniziali dei nomi dei personaggi che lo idearono: Einstein Poldosky Rosen, i realisti trovarono un punto debole dell'interpretazione positivista della meccanica quantistica che poteva essere superato solo in due modi: o attraverso l'esistenza di variabili nascoste, come essi sostenevano, o attraverso la falsificazione di alcuni principi che a quel tempo erano considerati irrefutabili. Sembrava dunque che la battaglia fosse a favore dell'esistenza delle variabili nascoste e, invece, inaspettatamente, gli esperimenti condotti nei decenni successivi portarono alla scoperta della non località dei processi fisici a livello quantistico, ridando vigore alla corrente positivista.

Il paradosso di E.P.R. - Einstein Poldosky Rosen

Il paradosso EPR altro non è che un esperimento effettuato su due fotoni accoppiati, ovvero in uno stato che si dice "entangled".

Si considerano due fotoni provenienti da una medesima sorgente e che vengono inviati in due direzioni opposte. Questi si dicono accoppiati ovvero si trovano nello stato seguente caratterizzato da due casi:

Caso 1 = fotone 1 polarizzato verticalmente; fotone 2 polarizzato verticalmente

Caso 2 = fotone 1 polarizzato orizzontalmente; fotone 2 polarizzato orizzontalmente

La polarizzazione è semplicemente la direzione del piano di oscillazione di un fotone.

Possiamo dire dunque che i due fotoni hanno sempre la stessa polarizzazione.

Teniamo conto, però, che la polarizzazione di un fotone è una proprietà quantistica, ovvero *il fotone non possiede una polarizzazione* finché non viene eseguita la misura. Questa misura sarà casualmente verticale nel 50 per cento dei casi e orizzontale nel restante 50 per cento.

A questo punto possiamo eseguire due distinte misurazioni atte a determinare quale sia lo stato dei due fotoni.

Posso eseguire la misurazione facendo passare il fotone 1 per un filtro polarizzatore di direzione verticale. Nel caso 1 il fotone passerà per il filtro, mentre nel caso 2 il fotone sarà assorbito dal filtro.

Da rimarcare che l'incidenza delle 2 possibilità è del tutto casuale!

L'esperienza ha dato un risultato che non ci si attendeva.

Se il risultato casuale dell'esperimento sul fotone 1 era una polarizzazione ad esempio verticale, allora nella misurazione del fotone 2 la casualità *spariva* e il risultato della misurazione era *sempre* una polarizzazione verticale.

Quindi tutte le volte che il fotone 1 passerà per un filtro verticale anche il fotone 2 farà lo stesso. Analogamente succede se il risultato è una polarizzazione orizzontale.

Questo accadrà indipendentemente da quanto saranno lontani i 2 fotoni l'uno dall'altro nel momento della misurazione oppure *dopo quanto tempo* viene fatta la seconda misurazione. Stessa cosa se decidiamo di misurare prima il secondo fotone al posto del primo!

Il fatto che la misura di un fotone riesca a determinare istantaneamente lo stato di un altro fotone lontano quanto vogliamo, contrasta con l'ipotesi che il mondo reale sia *locale*. La località del mondo reale implica che un evento che accade in una zona dell'universo non può intervenire sugli eventi che accadano in una zona lontana quanto si voglia da esso.

Questo esperimento fu chiamato *paradosso* da EPR perché fino ad allora non si pensava neanche lontanamente che il mondo reale non fosse locale, quindi l'esperimento sembrava condurre ad una situazione paradossale di incongruenza con la realtà fisica.

L'esperimento EPR, nato per mettere in crisi la Meccanica Quantistica, è riuscito, invece, a mettere in risalto una proprietà del tutto nuova del mondo reale microscopico: la *non località*.

La ricerca delle famose *variabili nascoste* che sembravano necessarie per mostrare che la Meccanica Quantistica non è una teoria completa, ha invece contribuito a mostrare una ulteriore proprietà del mondo fisico che altrimenti non si sarebbe sospettata.

Le disuguaglianze di Bell

Attraverso le disuguaglianze di Bell, si è data la prova che si può rispondere attraverso un esperimento alla domanda metafisica sull'esistenza delle variabili nascoste e quindi sull'esistenza o meno degli elementi di realtà della Meccanica Quantistica, qualora non fossero osservati. La risposta non è quella che si sarebbe aspettata Einstein, ovvero che non è possibile trovare una teoria a variabili nascoste che renda conto del mondo quantistico. Per meglio dire, una teoria a variabili nascoste, per il mondo quantistico, avrebbe delle caratteristiche tali da contraddire i risultati della teoria della relatività.

Dell'esperimento di Bell, si può dare una descrizione attraverso un esempio, dove al posto delle particelle o dei fotoni vengono sostituite delle ipotetiche persone in grado di compiere certe determinate operazioni.

Supponiamo di avere due candidati per l'esperimento: Angelo e Barbara. A queste persone vengono consegnati due biglietti contenenti ciascuno un numero compreso tra 1 e 3. Alla semplice visione di questo biglietto le due persone sono libere di scegliere se accettare il biglietto oppure rifiutarlo. Si potrebbe compiere un grande numero di queste operazioni e registrarne i risultati.

Ora supponiamo che l'esame di questi risultati dia che tutte le volte che ad entrambi viene recapitato lo stesso numero, a loro insaputa, essi decidano entrambi di ritirare o non ritirare il biglietto.

Qualcuno direbbe sicuramente che i due si sono messi d'accordo. L'alternativa sarebbe esclusivamente la telepatia.

Per mettersi d'accordo due persone devono usare una strategia, ovvero una regola che permetta ai due di decidere se ritirare o consegnare il biglietto.

Esaminando ogni possibile strategia che i due potrebbero utilizzare, si è visto che ognuna di esse costringerebbe i due ad assegnare periodicamente un valore ad una certa decisione se accettare o rifiutare il biglietto.

Le possibili strategie consistono nello scegliere sempre un certo tipo di risposta ad un certo numero, la più semplice delle quali è rispondere sempre allo stesso modo. Supponendo di considerare la conservazione del biglietto i possibili esiti sono:

1=SI 2=SI 3=NO

1=SI 2=NO 3=NO

1=SI 2=NO 3=SI

1=NO 2=SI 3=SI

1=NO 2=SI 3=NO

1=NO 2=NO 3=SI

I casi di 3 SI e tre NO relativi al rispondere sempre uguale porterebbero ad una ovvia concordanza. Possiamo vedere che ciascuno di questi possibili accordi portano ad una concordanza di casi pari a cinque su quattro.

Dato che ci sono nove possibilità di avere una certa combinazione di biglietti data dalle coppie:

(1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3)

La prima strategia porterebbe al seguente caso ottenuto sostituendo 1 con SI, 2 con SI e 3 con NO: (SI,SI), (SI,SI), (SI,NO), (SI,SI), (SI,SI), (SI,NO), (NO,SI), (NO,SI), (NO,NO)

Possiamo verificare che i casi concordi sono 5 e i casi discordi sono 4.

Analogamente si avrebbe la stessa cosa per ciascuna delle altre 5 strategie.

Possiamo dunque affermare che basta controllare che statisticamente ci sia una maggioranza di casi concordi per affermare che ci sia stato un accordo. Infatti, un rapporto di 5 su 4 è abbastanza facile da verificare sperimentalmente.

Ebbene il grande risultato sperimentale, dove al posto di Angelo e Barbara c'erano particelle in uno stato accoppiato, al posto dei biglietti con dei numeri c'erano delle direzioni in cui eseguire misure e il fatto di ricevere o consegnare il biglietto corrispondeva al risultato positivo o negativo dell'esperimento, sembra essere il fatto che tale probabilità di avere esiti concordi o discordi è esattamente la metà e non $\frac{5}{4}$ che avevamo ipotizzato. Ciò sembra voler dire che le particelle sono telepatiche.

Chiaramente questa telepatia corrisponde alla non località del mondo microscopico.

2° parte: Utilizzo dell'ipotesi del substrato e della indistinguibilità delle particelle

Uno scenario diverso

Alcune indicazioni fornite dalle problematiche delle moderne teorie delle stringhe portano verso uno scenario del mondo subatomico diverso da come lo avevamo fin d'ora immaginato.

I concetti di tempo e spazio, così intimamente connessi, perdono il loro posto di fondamento della realtà. Si ipotizza, infatti, che a livello infinitesimo sia lo spaziotempo ad emergere dal substrato e non viceversa. Il substrato diventa a questo punto un ente che dovrebbe essere al di fuori del tempo e dello spazio e non contenuto in esso.

In questo senso si possono rivedere i due concetti fondamentali di “substrato quantico” e di “indistinguibilità delle particelle” e, nello stesso tempo, tentare di reinterpretare i principali esperimenti-chiave della meccanica quantistica.

Ipotesi del substrato

Si può supporre che il substrato quantico, che altro non è se non il vuoto ad un livello più profondo, sia un'entità al di fuori dello spaziotempo. Essere al di fuori dello spaziotempo comporta una caratteristica essenziale, quella di contenere eventi che sono ovunque e sempre nello stesso istante. Il tempo e lo spazio ordinari potrebbero emergere come caratteristiche fisiche a partire dallo strato sottostante che non le possiede. Come una grossa scatola nera, di cui noi ignoriamo il contenuto, il substrato potrebbe generare, con il suo comportamento temporale, la nostra sensazione usuale di tempo e spazio. Praticamente il substrato potrebbe generare il nostro universo creando gli eventi nello spaziotempo.

Le nostre misurazioni non sono altro che delle sollecitazioni a cui esso è sottoposto e a cui deve rispondere.

Le sue caratteristiche di risposta alle sollecitazioni cambiano in base alla topologia dello spazio ordinario considerato, ovvero alla sua forma spaziale, ai campi che lo attraversano e alla presenza di massa.

Possiamo cercare di capire in che modo il substrato si connetta con il tempo e lo spazio esaminando i vari esperimenti che si effettuano in meccanica quantistica.

Nel seguito chiameremo questa ipotesi “ipotesi del substrato”.

Per onestà, mi sento anche di aggiungere che questa operazione non è completamente indolore. Anche se ignoriamo la natura del substrato, sappiamo che la sua topologia deve sottostare a ben determinate regole che potrebbero rendere impraticabile tale ipotesi. Ignorerò nel seguito tale presupposto e prenderò per scontato che questi problemi saranno in futuro risolti.

Indistinguibilità

Per quanto riguarda l'indistinguibilità delle particelle si può fare la seguente osservazione: due particelle per il fatto di essere indistinguibili non necessariamente sono la stessa particella.

Analogamente due particelle che sembrano essere la stessa particella potrebbero essere solamente indistinguibili.

Nella interpretazione duale della luce nella forma onda-corpuscolo, l'intero processo di scambio di un fotone può essere sintetizzato nel seguente modo: ad una emissione quantizzata e quindi di tipo corpuscolare segue un analogo assorbimento all'altro estremo del fenomeno, da contrapporre ad una propagazione, lungo tutto il tragitto, di tipo ondulatorio. L'emissione e l'assorbimento avvengono stocasticamente nel tempo, mentre la propagazione ondulatoria è di tipo deterministico.

In questo contesto, l'indistinguibilità delle particelle, unita con il fatto che non ci è possibile rilevare il corpuscolo se non con una misurazione, potrebbe consentire l'ipotesi che lo spostamento della particella, nello spazio ordinario, sia soltanto virtuale.

Ovvero potrebbe non esserci effettivamente uno spostamento "materiale".

La particella potrebbe in qualche modo riemergere all'estremo del percorso con tutte le sue caratteristiche fisiche e il chiederci se sia la stessa particella o un'altra, perde di significato. In tal caso potremmo riassumere l'intero processo come un'assorbimento e una successiva riemissione della particella da parte del substrato, con un certo ritardo spaziotemporale.

In pratica, la particella emessa non viene a coincidere con quella rilevata. Si tratterebbe a tutti gli effetti di una nuova particella allo stesso modo in cui le particelle virtuali emergono dal vuoto.

Nel caso, però, in cui decidessimo di effettuare una misurazione in un altro punto dello spazio, ad esempio nel mezzo della traiettoria, ci potremmo chiedere come sia possibile trovare la particella emessa se, a tutti gli effetti, non esiste un reale spostamento della medesima. In realtà, quando compiamo una misurazione, modifichiamo la topologia dello spaziotempo, cambiando in tal modo la probabilità di trovare la particella nel punto in cui effettuiamo la misurazione. La particella che emerge è sempre una indistinguibile da quella di partenza, ma anche in questo caso non esiste la necessità che sia la stessa.

La presenza dell'apparato di misura risulta sostanziale, non necessita di riferimenti ad osservatori esterni, ma fa riferimento solo alla topologia dello spaziotempo e quindi al substrato.

Non è possibile, in questo contesto, entrare nel merito di quali siano le caratteristiche microfisiche del substrato. Le attuali branche di indagine, quali la gravità quantistica a loop e la teoria delle stringhe, dovrebbero mettere in rilievo proprio questo punto.

Mi sembra, però, che entrambe non focalizzino questo aspetto. La prima quantizza lo spaziotempo, mentre la seconda lo lascia addirittura inalterato anche a dimensioni infinitesime.

Stessa particella oppure particelle distinte

E' opportuno soffermarsi per chiarire meglio questo punto.

Bisogna innanzitutto distinguere i due contesti in cui vanno considerate le particelle.

Nell'ambito del substrato in cui tutti gli eventi sono contemporanei e cospaziali risulta ovvio che le due particelle, emessa e rilevata, coincidono. Ovvero, nel substrato la particella è come se fosse ferma.

L'ambiguità nasce nel momento in cui ci riferiamo allo spazio ordinario, in cui tale particella viene prima emessa e poi rilevata di identiche dimensioni fisiche in un'altra posizione. Cio' crea l'illusione dello spostamento, ovvero la credenza che la particella debba esistere anche in tutti i punti intermedi.

In questo senso, la particella rilevata è diversa dalla prima emessa.

Si puo' affermare cio' per mettere in evidenza il fatto che non ci sia stato nessuno spostamento reale di tale particella nello spazio ordinario.

Reinterpretazione dell'esperimento della doppia fenditura

Prima di esaminare i vari concetti della Meccanica Quantistica e di osservare come si modificano nell'ottica di quanto asserito pocanzi, possiamo porre l'attenzione sull'enigma della doppia fenditura, che occupa un posto centrale in quanto ingloba gran parte delle problematiche filosofiche. Possiamo tentare di reinterpretare l'esperimento tenendo conto della indistinguibilità delle particelle e del concetto di substrato quantico.

Riassumiamo gli eventi considerando un fotone che viene emesso da una sorgente. Esso si propaga secondo le leggi deterministiche legate alla funzione d'onda. Passa attraverso una coppia di fenditure e viene rilevato sullo schermo successivo, attraverso un processo di riduzione del pacchetto d'onda.

Il risultato è che se le fenditure sono entrambe aperte il fotone finisce solo in alcune zone dello schermo interferendo con se stesso passando da entrambe.

Ma potremmo supporre che il fotone emesso e quello rilevato, non coincidano.

Infatti, nessuno ci assicura che, quando proiettiamo un fotone su di uno schermo, esso sia esattamente lo stesso di quello che arriva sullo schermo.

Sicuramente arriva un fotone con direzione e frequenza medesima, ma nessuno veramente garantisce che sia lo stesso.

Il senso di questi interrogativi è quello di chiederci se il fotone ha davvero viaggiato nel tragitto tra la sorgente e lo schermo seguendo un percorso nello spazio ordinario.

Dal punto di vista fisico noi *non* osserviamo la propagazione di corpuscoli luminosi lungo il tragitto. Infatti in realtà osserviamo solo le eventuali interazioni. A maggior ragione, nessuno può osservare un raggio di luce senza misurarlo. L'unico modo per osservare fotoni che attraversino il tragitto è quello di compiere misurazioni e quindi di modificare la topologia dello spazio con una riduzione del pacchetto d'onde. Dunque è verosimile che non sia lo stesso fotone, ma, inoltre, non ce n'è nemmeno la necessità.

Supponendo che si tratti di un altro fotone, cerchiamo di spiegare la sua provenienza tramite il concetto di substrato quantico, ovvero di un'entità al di fuori dello spaziotempo che comunica con noi *nello* spaziotempo.

Supponiamo per un istante che il fotone sia stato immagazzinato alla partenza come informazione dal substrato quantico che sottende il nostro spaziotempo. Il substrato quantico riceve l'invio del fotone, che deve essere restituito, con le caratteristiche fisiche opportune, in un altro punto dello spaziotempo con un ritardo spaziotemporale che dipende dalle caratteristiche del fotone in ingresso e dalle caratteristiche topologiche dello spazio in cui viaggia il fotone.

Il fenomeno potrebbe essere paragonato a quello delle onde del mare in cui una perturbazione in un punto causa un fenomeno in un altro senza che le particelle coinvolte viaggino fisicamente. Un esempio altrettanto chiaro potrebbe essere quello di un filo conduttore dove passa la corrente elettrica. In realtà, gli elettroni emessi non sono certamente gli stessi che erano stati immessi.

Tornando al nostro fotone emesso dalla sorgente, esso potrebbe essere stato assorbito dal substrato quantico. A questo punto il substrato quantico lo avrebbe riemesso direttamente sullo schermo finale e senza farlo viaggiare nello spazio ordinario, secondo le leggi probabilistiche: un fotone indistinguibile da quello che era partito dalla sorgente.

La probabilità di emissione potrebbe essere connessa con la necessità della coerenza logica con gli effetti relativistici e di entanglement come vedremo più avanti.

Il famoso esempio di inserire un rivelatore in una delle due fenditure, per vedere dove è passato il fotone che genera la distruzione delle figure di interferenza, può ora essere facilmente spiegata.

Infatti, l'inserimento del rivelatore di fatto modifica la topologia dello spazio coinvolto e quindi ne risulta che il comportamento del substrato sarà differente.

L'enigma del fatto che il fotone è passato da due fenditure contemporaneamente è superato dal fatto che non c'è stato un reale spostamento di una particella nello spaziotempo ordinario.

L'Integrale di Feinmann su tutte le traiettorie possibili, assume finalmente un significato fisico: la particella è presente virtualmente nel substrato come potenzialità. In esso, infatti, tutte le traiettorie sono comprese nel medesimo istante. Il comportamento è dunque puramente topologico.

Per ottenere la rimozione dell'ambiguità del passaggio della particella da entrambe le fenditure, abbiamo dovuto rinunciare in maniera definitiva allo spostamento fisico della particella da un estremo all'altro, cosa che nessuna interpretazione aveva, forse, avuto il coraggio di intraprendere in maniera diretta, ma soltanto con scappatoie filosofiche positiviste.

Dai precedenti discorsi, si può dedurre che la domanda "da quale delle due fenditure è passato il fotone" è stata sempre mal posta. Infatti il substrato quantico sottende tutto lo spazio considerato, comprese le due fenditure. Le modifiche apportate ad esso, quali l'apertura o la chiusura di una fenditura, sono percepite istantaneamente dal substrato quantico e determinano in maniera inequivocabile e istantanea, con gli opportuni ritardi che hanno generato da sempre la sensazione di

un reale spostamento, la modifica del comportamento delle particelle che sono coinvolte e quindi della risposta sullo schermo che viene fornita dallo stesso substrato una volta assorbito il fotone. Il processo della misura modifica la configurazione del substrato quantico, costringendolo a decadere istantaneamente in uno stato reale che genera il fotone misurato. Se, per esempio, si vuol rilevare il fotone quando passa attraverso una fenditura, la configurazione dello stato quantico cambia istantaneamente e, nella nuova configurazione che comprende una sola fenditura, non permette più l'interferenza. Quindi, in quest'ultimo caso, il fotone può essere rivelato in ogni punto dello schermo.

Il fotone, in ultima analisi, sembra partire come una particella, propagarsi all'interno del substrato restando invisibile nello spazio ordinario e poi rivelarsi di nuovo come particella in un certo punto dello spazio. Nel substrato in realtà non c'è propagazione perché contiene tutti gli eventi allo stesso tempo, ma reagisce all'emissione della particella creando un evento nello spazio ordinario che viene percepito come uno spostamento spaziale e un ritardo temporale, ovvero come radiazione nello spaziotempo.

Conseguenze dell'ipotesi del substrato sulla funzione d'onda

La funzione d'onda dovrebbe rappresentare l'evoluzione dello stato di una particella. Nel caso del propagarsi di un fotone è una funzione deterministica dell'evoluzione temporale dello stato del fotone nello spazio. Attraverso la funzione d'onda ci è permesso calcolare la probabilità che la misurazione dello stato di una particella in un certo istante sia uno di quelli possibili.

Tale processo è dunque diviso in due parti: una evoluzione temporale e deterministica degli stati possibili e un processo irreversibile e aleatorio di risultato della misura.

Secondo l'ipotesi del substrato lo spaziotempo emerge con le sue usuali caratteristiche temporali proprio grazie a questo processo deterministico che crea l'illusione di un movimento nel tempo.

Bisogna, infatti, sempre ricordare che la funzione d'onda *non* rappresenta il movimento di una particella nello spazio ordinario, ma rappresenta soltanto l'evoluzione degli stati di un sistema, aiutando a fornire una indicazione probabilistica sul loro valore. Non è dunque né un'orbita, né un percorso. Nonostante ciò essa assomiglia macroscopicamente proprio ad un'orbita e per questo ha incontrato un largo favore concettuale.

La funzione d'onda risulta, inoltre, una rappresentazione parziale e imperfetta, dato che non sottende il risultato aleatorio della misurazione stessa.

Il substrato quantico, pur essendo atemporale e aspaziale, potrebbe essere il soggetto che genera lo spaziotempo e la funzione d'onda una descrizione della sua risposta alle sollecitazioni. Tale risposta alle sollecitazioni esterne può essere stata confusa con uno spostamento spaziotemporale reale.

L'ambiguità della presenza contemporanea di più stati quantici potrebbe essere una importante indicazione della natura "atemporale" del substrato.

La stocasticità della risposta finale potrebbe, invece, derivare dalla necessità di mantenere la coerenza dei risultati dovuti alle varie correlazioni tra gli stati. A tale riguardo, si possono leggere nei paragrafi successivi ulteriori approfondimenti.

L'ipotesi del substrato mette in risalto il fatto che non esiste nessun movimento materiale nello spazio ordinario. La particella che viene emessa alla fine del percorso ha le caratteristiche fisiche della prima, ma non è la stessa particella.

La funzione d'onda, vista come rappresentazione dell'evoluzione di una particella a partire dalla sua emissione, viene raffigurata quale indicazione della posizione di un ente che evolve nello spaziotempo. Questa interpretazione confonde tale ente con la presenza reale di un'onda-corpuscolo che si muove e genera tutte le ambiguità di cui sono piene le varie interpretazioni della meccanica quantistica.

L'ipotesi del substrato riferisce, invece, la funzione d'onda all'intero spazio topologico piuttosto che alla particella considerata.

E' una rappresentazione ondulatoria e dunque prevede stati che si sovrappongono. Ma rimane comunque solo una rappresentazione: non c'è nessuno spostamento fisico reale. La particella potrebbe riemergere in maniera casuale nello spazio e nel tempo come se spuntasse dal nulla, come del resto si comportano le particelle virtuali.

In tale momento la particella viene rilevata o misurata nella nuova posizione, senza essere traslata fisicamente. E' avvenuta la cosiddetta riduzione del pacchetto.

Emerge in questo istante dal substrato quantico con tutte le caratteristiche "reali" di posizione, momento, etc. Queste caratteristiche reali sono quantizzate e dunque rispettano il principio di indeterminazione.

Il processo di misura

L'inserimento dell'apparato di misura in un certo punto dello spaziotempo modifica la probabilità che ha l'evento "emissione di una particella" di verificarsi e quindi l'evento stesso viene generato secondo le probabilità fornite dalla funzione d'onda. L'evento consiste in una modifica topologica dello spaziotempo avviata dallo stesso substrato quantico.

Si può, dunque, affermare che è la misura a generare la particella. La misura è intesa come un cambiamento della topologia dello spaziotempo ordinario considerato. Infatti la particella prima della misura non possiede le caratteristiche richieste di essere posizionata nello spazio e nel tempo ordinari. Esiste come probabilità all'interno del substrato, ma non esiste ancora nello spazio ordinario.

L'inserimento dell'apparato di misura modifica la probabilità che ha l'evento "emissione di una particella" di verificarsi in quel punto e quindi genera l'evento stesso secondo le probabilità fornite dalla funzione d'onda. L'evento consiste in una modifica topologica dello spaziotempo avviata dallo stesso substrato quantico.

Tutto il precedente ragionamento è in perfetta sintonia con l'interpretazione quantistica di Copenhagen. La particella "non esiste" fintantochè non la si misura. La novità consiste nel fatto che la particella non viaggia fisicamente e quindi non c'è l'ambiguità logica di sapere dove sia in un certo istante di tempo. Infatti essa è letteralmente presente in tutto il substrato allo stesso tempo. L'impressione generale, riguardo gli elementi di realtà come la posizione di una particella, è che il famoso detto di Bohr "Tutto ciò che non è possibile conoscere non esiste" vada ribaltato nel più chiaro e lineare:

"Non è possibile conoscere e misurare ciò che non esiste".

La diversa natura di materia e radiazione

Proviamo a verificare quale può essere la differenza comportamentale tra materia e radiazione secondo l'ipotesi del substrato.

Secondo tali ipotesi, la radiazione potrebbe consistere in eventi che si propagano all'interno del substrato, ma senza nessun effettivo spostamento di particelle, bensì soltanto come successione di assorbimenti e successive riemissioni.

La materia, invece, potrebbe essere costituita dalle modificazioni topologiche del substrato stesso che si muovono al suo interno secondo le note leggi della fisica, creando con la loro presenza il tessuto stesso dello spaziotempo. Andrebbe verificato se si tratta di un movimento continuo oppure discontinuo, perché nel secondo caso potrebbe comunque essere ridotto ad una serie di successive emissioni e assorbimenti dal substrato.

Queste ipotesi spiegherebbero, comunque, la differente percezione sensoriale dei due enti.

La discontinuità dei due mezzi, ovvero il passaggio da un sistema ad un altro, porta alla quantizzazione di tale processo e a quel fenomeno irreversibile che si chiama "riduzione del pacchetto".

Dualità onda corpuscolo

Il concetto di dualità onda-corpuscolo è uno dei fondamenti della Meccanica Quantistica, ma nasce dalla necessità di coniugare alcuni esperimenti in cui la luce si comporta da corpuscolo, come quelli legati all'assorbimento e all'emissione, con quelli legati al comportamento ondulatorio, come l'esperienza delle due fenditure.

Alcuni osservatori, oggi, sollevano dei dubbi epistemologici sulla legittimità di tale binomio, la doppia interpretazione lascia molti dubbi e perplessità.

Secondo un moderno punto di vista i due concetti non hanno alcunchè in comune. Il primo presuppone una non localizzazione di un ente fisico, bensì una sua diffusione in tutto lo spazio, mentre il secondo presuppone che la particella sia concentrata in un unico punto spaziale.

Le varie interpretazioni, anche se talvolta non esplicitamente, non si riferiscono a ipotesi "alternative", ma a ipotesi "contemporanee".

Problemi epistemologici sorgerebbero già con l'ipotesi alternativa, in quanto dal punto di vista sostanziale si fa fatica a concepire qualcosa che abbia comportamenti tanto diversi, ma comunque un dualismo comportamentale potrebbe essere accettabile per spiegare qualcosa che non è né l'uno né l'altro. Ma in tal caso sarebbe lecito interrogarsi sull'effettiva natura della luce.

La seconda ipotesi lascia, invece, esterefatti e sembrerebbe al di fuori di ogni logica.

Talvolta, si è parlato di pacchetto d'onde, concetto che permette una sorta di localizzazione di alcune proprietà fisiche, ma che è, comunque, molto lontano dal concetto di corpuscolo.

Il corpuscolo dovrebbe, infatti, avere tutte le sue proprietà fisiche concentrate in un'unica posizione allo stesso istante di tempo.

L'ipotesi che il fotone non si sposti fisicamente nello spazio ordinario, ma emerga dal substrato sottostante, ha delle importanti ripercussioni interpretative sulla meccanica quantistica.

La prima conseguenza è che viene a mancare l'ipotesi ondulatoria della luce. Infatti il fotone interagisce con lo spazio ordinario esclusivamente sotto forma di processi di assorbimento o emissione di energia. Questi processi sono quantizzati e stocasticamente distribuiti nel tempo. Il punto che potrebbe generare la differenza è il fatto che l'energia emessa o assorbita non venga affidata ad una particella che si sposta nello spazio ordinario, bensì venga assorbita dall'*intero* substrato che la riemette secondo le regole della meccanica quantistica.

In questo modo, il concetto di complementarietà viene a perdere di significato e di utilità. Infatti il processo summenzionato è di tipo corpuscolare per quanto riguarda l'assorbimento e l'emissione. Non c'è spostamento nello spazio ordinario e dunque non c'è un corpuscolo che si muove seguendo leggi ondulatorie e che creava il paradosso di un oggetto che fosse contemporaneamente diffuso e concentrato nello spaziotempo.

Ad avere comportamento ondulatorio è soltanto la funzione d'onda che rappresenta la probabilità che l'evento si manifesti in un certo punto spaziotemporale.

Gli eventi ondulatori associati alla luce potrebbero essere attribuiti esclusivamente ai fenomeni statistici legati alla linearità delle funzioni d'onda. Ma il vero fenomeno reale a livello microscopico rimarrebbe comunque di tipo corpuscolare. In realtà più che di un corpuscolo si deve parlare di un processo quantizzato che *non* comporta trasporto di corpuscoli da un punto all'altro. Praticamente le particelle vengono come assorbite in un punto e riemesse in un altro, come fossero dei campi energetici quantizzati, perché ne è vietata la presenza in sottomultipli energetici della costante di Plank.

Tutto ciò è assolutamente in accordo con le leggi della Meccanica Quantistica.

Per riassumere, alla luce dell'ipotesi del substrato, l'aspetto ondulatorio della luce diventa una proiezione continua nello spaziotempo di un evento che in realtà è presente virtualmente in tutto il substrato. L'aspetto corpuscolare, che avviene nell'atto di assorbimento e di successiva riemissione del quanto di luce, rimane, invece, l'unico reale.

Gli operatori e le osservabili.

Il fatto che l'ipotesi del substrato releghi la funzione d'onda in ruolo subalterno rispetto alle interpretazioni comunemente diffuse, non mina il suo valore come strumento di conoscenza. La vera novità consiste nel fatto che la funzione d'onda andrebbe riferita allo spazio topologico in cui essa opera ed è una caratteristica di esso e *non* soltanto della particella o particelle in esso contenute intese come oggetti a se stanti.

Lo studio della funzione d'onda è forse proprio l'unico strumento che oggi ci permette di entrare in contatto con il substrato quantico da cui emergono tutte le caratteristiche dello spaziotempo come noi le conosciamo.

Ci si domanda come mai l'atto della misurazione decida "istantaneamente" quale sia il risultato tra quelli probabili.

Non dimentichiamo che abbiamo associato al sistema fisico lo spazio di Hilbert H . Questo spazio di Hilbert è uno spazio funzionale complesso che associa ad ogni direzione spaziale uno stato del sistema. In questo spazio la misurazione di un osservabile corrisponde all'applicazione di un operatore allo stato in esame secondo una certa base ortonormale. Dato che ogni vettore può essere scomposto secondo tale base ortonormale, l'applicazione dell'operatore corrisponde a trovare l'autovalore corrispondente secondo quella base. È ovvio che, avendo associato la misurazione all'applicazione di un operatore, il risultato non possa essere altro che un evento puntuale nel tempo. Ci si potrà eventualmente chiedere perché sia lecita tale associazione.

Le osservabili associate agli operatori nello spazio di Hilbert costituiscono qualcosa di più profondo di quanto probabilmente non sia emerso finora.

Il principio di indeterminazione

Nell'ipotesi del substrato il principio di indeterminazione perde gran parte del suo fascino misterioso. Infatti i fotoni, che abbiamo finora considerato, esistono in quanto eventi di assorbimento e di emissione che hanno la caratteristica di essere stocastici e quantizzati. Il principio di indeterminazione deriva direttamente dal fatto sperimentale che l'energia è quantizzata.

Il più piccolo pacchetto di energia che può essere trasmesso o assorbito è una quantità che è proporzionale alla frequenza utilizzata secondo la costante famosa h .

L'ipotesi che lo spaziotempo emerga da un substrato che ne è privo non va confuso con il concetto di posizione e velocità che non sono contemporanei per una particella.

Infatti l'ambiguità dei concetti posizione-velocità nasce dal fatto che si è voluto forzatamente assegnare un'orbita spaziotemporale ad un processo che, secondo l'ipotesi del substrato, non la possiede. Questa forzatura ha generato tutta la serie di paradossi le cui interpretazioni semiscientifiche hanno contribuito alla successione di eventi di cui tutti siamo stati partecipi. In pratica erano le premesse a non essere corrette e ad aver generato i paradossi stessi.

È vero che lo spazio e la velocità, e dunque il tempo, sono legati dalla costante h , ma per il fatto che l'energia è quantizzata. Sono dunque i processi di emissione ed assorbimento a non avere una corretta collocazione spaziotemporale e non le orbite delle particelle che potrebbero essere fittizie.

Alla luce di tutto ciò, il principio di indeterminazione rimane il parametro discriminatorio tra il mondo macroscopico e quello microscopico, legato indissolubilmente alla quantizzazione dei processi energetici.

È evidente che il legame e l'indeterminazione delle due grandezze spazio e tempo rivelano una profonda connessione con l'idea di un substrato da cui esse possano emergere.

Il Paradosso EPR con l'ipotesi del substrato

Vediamo come l'esperimento di due particelle entangled può essere interpretato utilizzando l'ipotesi del Substrato.

Ricordiamo che i due fotoni di partenza sono entangled, ovvero hanno inizialmente lo stesso stato di polarizzazione, ma bisogna ben chiarire che, fintantochè non si esegue una misura su di essi, non si sa quale sia il loro stato di polarizzazione. Supponendo di prendere come piano di polarizzazione l'asse X, potremmo trovare, ad esempio, che la polarizzazione del primo fotone è orizzontale. Se dovessimo misurare la polarizzazione del secondo fotone, non immediatamente, ma dopo un certo numero di chilometri, sempre secondo l'asse X, troveremo che è *sempre* orizzontale, cioè identica a quella della prima misurazione.

Possiamo effettuare una prima osservazione di tipo relativistico.

Supponiamo che il primo fotone parta dal punto A e si propaghi linearmente verso il punto B dove effettueremo la misura. Analogamente il secondo fotone partirà dal punto A e proseguirà verso il punto C. I punti B e C sono separati spaziotemporalmente. Essendo i due punti separati nello spaziotempo, secondo la relatività non esiste un evento che si possa definire temporalmente prima dell'altro. Ovvero a seconda del sistema di riferimento l'evento B precede o segue l'evento C.

Nonostante ciò gli esiti dei due esperimenti sono gli stessi. Come è possibile?

Possiamo fare alcune osservazioni: il buon senso ci porterebbe a dire che il tipo di casualità non sia epistemica, sembra infatti che i due fotoni si siano accordati nel momento della loro interazione e che in realtà, qualunque sia il momento delle successive misurazioni, essi abbiano previsto di rispondere allo stesso modo. Questo fatto, però, è in contraddizione col teorema di Bell, confermato dai successivi esperimenti per cui ciò non accade.

Se siamo in un sistema di riferimento per cui B accade prima di C, la misurazione in B è casuale, mentre quella di C dovrebbe essere predeterminata: è infatti uguale alla prima. Se il sistema di riferimento è tale per cui C accade prima di B, succede che la misurazione in C è casuale mentre quella in B sarebbe predeterminata.

Come è possibile che le due misurazioni siano entrambi casuali, indipendentemente dall'ordine temporale, senza che ci sia predeterminazione?

Secondo l'ipotesi del substrato ciò è possibile perché non c'è nessuna particella corpuscolare che viaggia nello spazio ordinario, ma sfruttando la linearità della funzione d'onda il substrato risponde alle misurazioni in maniera correlata sfruttando il fatto che, in assenza di tempo, i due eventi sono contemporanei.

Se il passato e il futuro fossero assoluti, sarebbe possibile determinare lo stato di un particolare evento e la probabilità degli eventi dovrebbe essere sempre 1. Ovvero l'evoluzione degli stati non dovrebbe avere un aspetto probabilistico.

L'esistenza, invece, di molteplici probabilità diverse da 1, legate agli eventi quantistici, potrebbe nascondere la correlazione con eventi che si svolgeranno nel futuro, confermando completamente la relatività ristretta per quanto riguarda i rapporti tra passato e futuro.

Ovvero, detto nel senso inverso, le proprietà della relatività ristretta riguardo al passato e al futuro potrebbero essere possibili soltanto perché la meccanica quantistica prevede l'esistenza di stati con probabilità diversa da 1.

Dalla natura non assoluta dello spaziotempo relativistico e dalla natura probabilistica dei risultati degli esperimenti emerge la possibilità di atemporalità degli eventi: solo un risultato probabile tiene conto di eventi che possono essere contemporanei o co-spaziali in un opportuno sistema di riferimento. La casualità degli eventi è dunque figlia di un'assenza spaziotemporale al livello del substrato quantico.

Da un punto di vista atemporale l'indeterminazione scompare. L'evento è originariamente fuori dal tempo. All'interno della dimensione temporale può essere conosciuto soltanto dopo la misurazione, perché conoscerlo prima equivarrebbe a conoscere il futuro. La casualità riesce a tenere conto del fatto che due eventi spaziotemporalmente distanti sono correlati.

La casualità di un evento permette di correlare, dunque, lo stesso evento ad un evento *futuro*!

Si può concludere, dunque, che il principio di non località della meccanica quantistica risulta estremamente connesso con la relatività speciale. In base all'ipotesi del substrato, gli eventi

entangled non solo risultano spiegati semplicemente, ma, confermando la non località dello spazio, rendono possibili gli effetti relativistici e viceversa.

L'esperimento con due specchi bifrangenti con l'ipotesi del substrato

Vediamo come l'esperimento dei due specchi bifrangenti può essere visto considerando l'ipotesi del substrato. Una luce polarizzata a 45° viene mandata su di un primo specchio che la separa in due fasci, uno polarizzato verticalmente e uno orizzontalmente. I due fasci vengono fatti convergere su di un secondo specchio.

Come è noto, a valle del secondo specchio si ottiene l'intero fascio iniziale e non metà fascio come si potrebbe ritenere. Infatti ciascuno dei due raggi polarizzati orizzontalmente e verticalmente avrebbe dovuto far passare soltanto metà raggio attraverso lo specchio. E' come se il secondo specchio sapesse che i due raggi provenivano da un solo raggio polarizzato a 45° .

Supponendo di mandare un solo fotone, ci si può chiedere quale sia il percorso effettuato realmente dal fotone. In tal caso il fotone sembra percorrere entrambe le traiettorie con polarizzazioni diverse, riemergendo, infine, come singolo fotone con la stessa polarizzazione che aveva in partenza.

Tenendo conto dell'ipotesi del substrato, si può dire che non c'è stato spostamento di fotoni nello spazio tra gli specchi: il substrato ha acquisito il fotone ed ha risposto rigenerando il fotone nel punto che aveva probabilità del 100% di avvenire.

Le caratteristiche fisiche sono legate all'intero spazio che comprende sia l'evento iniziale che quello finale e sono tutte note aprioristicamente. Il substrato "sa" come rispondere perché ha in sé tutte le informazioni necessarie contenute nello spazio topologico considerato. E' al di fuori dello spaziotempo, ma risponde nel modo che noi abbiamo finora interpretato come uno spostamento del fotone dai due estremi dello spazio considerato.

In quest'ottica lo scorrere del tempo, o meglio il movimento delle particelle bosoniche nel tempo, altro non è che una generazione del substrato. Il tempo è il ritardo con cui il substrato risponde ad una sollecitazione di campo. Lo spostamento di particelle è solo simulato, o, a meglio dire, la natura si comporta in un modo che era stato erroneamente interpretato come spostamento corpuscolare di una particella.

In realtà non c'è una vera simulazione di spostamento, ma un comportamento che *da sempre* è stato erroneamente interpretato come spostamento.

Si può dire che il fotone può essere visto come un'entità che si muove simulando un'onda e interagisce come una particella corpuscolare, anche se quest'aspetto rimane completamente da chiarire con lo studio degli aspetti intrinseci del substrato. E' il suo "muoversi come corpuscolo" ad essere soltanto un'illusione e a generare i famosi paradossi.

Traendo le conclusioni nel nostro esperimento con specchi birifrangenti, possiamo affermare che l'ipotesi del substrato fa supporre che non solo il fotone non percorre entrambe le traiettorie, ma addirittura non c'è nessuno spostamento della particella nei due percorsi dell'esperimento: i fotoni vengono assorbiti dal substrato nell'attimo in cui entrano nel primo specchio e vengono riemessi con identica polarizzazione iniziale dal secondo specchio. Tale comportamento è dettato dalle proprietà topologiche dello spazio compreso tra i due specchi e quindi del substrato stesso.

Il campo elettromagnetico

Secondo Maxwell la presenza di una carica in un certo punto dello spazio modifica lo spazio circostante creando quello che si chiama "campo elettrico". Una seconda carica posta in un punto del campo genera una forza che tende a respingere o attirare le due cariche. Secondo tale visione il fotone è un'onda elettromagnetica, ovvero un campo elettrico che genera un campo magnetico che genera un campo elettrico e così via...

Uno dei grandi problemi della fisica classica consisteva nel fatto che una modifica del campo era avvertita istantaneamente su tutto lo spazio. Questa era la cosiddetta azione "a distanza", sostituita

successivamente nelle teorie quantistiche dallo scambio di uno o più bosoni che avviene alla velocità della luce.

Secondo la moderna interpretazione le due cariche si scambiano un bosone, nella fattispecie un fotone che esiste solo in quantità discrete multiple di una certa quantità h .

Notiamo che le due visioni del campo elettromagnetico sembrano avere caratteristiche contrastanti. Possiamo chiederci come sia possibile visualizzare il campo elettromagnetico tenendo conto dell'ipotesi del substrato e verificare che l'interpretazione del campo data da Maxwell sia superata dalla visione moderna di interazione tra particelle.

Con l'ipotesi del substrato, lo spazio del campo corrisponde allo spazio topologico in cui viaggia il fotone. Potrebbe corrispondere alla quantità di spazio messa a disposizione dal substrato quantico. La carica di Maxwell che genera il campo elettrico può essere vista, invece, come una singolarità topologica. Lo scambio del bosone, infine, viene sostituito dallo scambio con il substrato. Il bosone di scambio può essere paragonato con l'interazione con il substrato.

A questo punto, la propagazione del campo elettrico può essere vista come la propagazione non reale all'interno del substrato. L'acquisizione del bosone corrisponderebbe al fenomeno reale di riduzione del pacchetto d'onda e quindi soggetto alla fenomenologia stocastica.

Tutta la parte ondulatoria è dunque trasferita nel substrato, che comunica col mondo reale attraverso i processi stocastici, gli unici che possono tener conto della correlazione di tutti gli stati.

Sembra dunque, che l'ipotesi del substrato riesca a coniugare le due diverse visioni del campo elettromagnetico in un unico modello concettuale privo di ambiguità.

Il tempo nel substrato quantico

Secondo l'ipotesi finora considerata il substrato è collocato al di fuori del tempo e comunica con noi "nel tempo". Possiamo provare a dare una spiegazione di come ciò potrebbe essere possibile.

Sappiamo che il substrato quantico dipende fortemente dalla topologia di tutto lo spazio racchiuso. Se cambia la topologia, cambia anche la risposta del sistema, anche se tutte le altre variabili dell'esperimento restano fisse, così come accade nell'esperimento della doppia fenditura in cui l'azione di apertura di una fenditura cambia la figura che si forma sullo schermo.

Il substrato si comporta come se al suo interno le particelle fossero formate da onde che si propagano alla velocità della luce. Le proprietà sono ondulatorie fintantochè il sistema non interagisce con l'ambiente. A quel punto c'è la cosiddetta riduzione del pacchetto d'onda che assume un valore preciso, ma statistico fra quelli possibili.

Secondo l'interpretazione di Feynmann, se il substrato comprende diversi percorsi per le onde, è 'come se' questi venissero attraversati tutti. E' evidente che in questa interpretazione non viene espresso nulla di nuovo o diverso da quanto asserito nella meccanica quantistica ortodossa. Questo non vuol dire, però, che effettivamente tutti i percorsi vengano effettuati realmente, ma semplicemente che il comportamento sia quello.

Il substrato è come una scatola nera: non sappiamo cosa c'è all'interno, ma sappiamo come si comporta e reagisce alle nostre sollecitazioni. Sembra evolvere come un'onda, ma solo approssimativamente. Tant'è che la risposta alle sollecitazioni è quantizzata e probabilistica.

Prendiamo in esame l'esperimento delle due fenditure: la nostra sollecitazione sul substrato corrisponde al fotone che viene inviato nel sistema, mentre la sua risposta è il fotone che si materializza sullo schermo. Noi diciamo che il fotone viaggia nello spazio in esame, ma in realtà diamo al substrato un impulso e ne riceviamo un impulso in uno dei punti dello schermo, casualmente. Diciamo che il fotone ha percorso tutte le possibili traiettorie, ma in realtà non sappiamo cosa succede all'interno del substrato.

Il fotone che emerge potrebbe non essere lo stesso "ente fisico" che è entrato, ma un suo equivalente in dimensioni fisiche che dunque non si è spostato nello spaziotempo ordinario.

Se nel substrato lo spaziotempo viene a mancare è ovvio che risulta come se tutte le traiettorie fossero percorse nello stesso tempo. Lo spaziotempo stesso potrebbe essere come una simulazione,

data da una risposta del substrato del tipo osservato sperimentalmente. Ovvero il substrato risponde alle sollecitazioni in un modo che da noi viene percepito come uno spaziotempo.

Ci possiamo chiedere quale potrebbe essere la formulazione di passaggio dal *non* spaziotempo allo spaziotempo e come potrebbe essere contenuta in una topologia.

L'ipotesi del substrato suggerisce che non esistono spostamenti di particelle, ma soltanto modificazioni della topologia dello spazio dovute a emissioni o assorbimento di quanti singoli di energia.

Probabilità nel substrato quantico

La probabilità degli eventi quantistici nasconde la necessità del substrato quantico di rendere conto degli effetti relativistici. O, per meglio dire, cambiando la prospettiva con cui si osserva il fenomeno, gli eventi probabili rendono possibile uno scenario con uno spaziotempo *non* assoluto. Uno spazio tempo di questo tipo ben si concilia con la possibilità di avere un substrato atemporale. Dunque dalla natura *non* assoluta dello spaziotempo relativistico e dalla natura probabilistica dei risultati degli esperimenti emerge la atemporalità degli eventi.

Solo un risultato probabile tiene conto di eventi che possono essere contemporanei o cospaziali in un opportuno sistema di riferimento. La casualità degli eventi quantistici potrebbe dunque essere figlia di un'assenza spaziotemporale al livello inferiore a quello della costante di Planck. In questo contesto si collocano gli eventi entangled.

Dubbi rivelati: risposte sintetiche ai vari quesiti paradossali

L'ipotesi del Substrato ha il vantaggio di:

1. Accettare e condividere tutta la struttura matematica della Meccanica Quantistica Standard.
2. Eliminare di colpo tutte le ambiguità dovute alla duplice rappresentazione onda-particella.
3. Rifiutare la necessità di ricorrere a ipotesi poco plausibili.

Doppia fenditura

Il fotone non passa in nessuna delle due fenditure, ma viene assorbito e riemesso alle due estremità.

Indeterminazione delle variabili coniugate:

Non esistono particelle puntiformi che hanno una velocità, ma solo energia emessa e assorbita dal substrato con valori discreti a istanti casuali.

Funzione d'onda

Descrive la probabilità che avvenga un'emissione o un'assorbimento dal substrato in una certa posizione. Non è associabile a oggetti macroscopici. La funzione d'onda di un oggetto macroscopico è priva di utilità.

Dualità onda-corpuscolo

Illusoria: non c'è un corpuscolo che si muove, ma soltanto emissioni e assorbimenti di energia. I fenomeni di tipo ondulatorio sono legati a interpretazioni statistiche di emissioni e assorbimenti.

Entanglement

Non c'è spostamento di particelle, ma una sorta di *simulazione* dell'evoluzione temporale all'interno del substrato. Gli stati correlati continuano ad esserlo in esso per quanto esteso esso sia.

Casualità dei processi quantistici

La risposta del substrato agli eventi non è puramente lineare, ma vi è associata una componente spaziotemporale casuale, sempre legata a processi di assorbimento ed emissione che genera la probabilità dell'evento. Tale casualità rende possibili alcuni comportamenti relativistici.

Paradosso della misura

La misura introduce inevitabilmente processi di assorbimento ed emissione che costringono il sistema substrato ad una risposta positiva o negativa legata alla probabilità dell'evento.

Gatto di Schroedinger

In realtà il confine tra mondo quantistico e mondo classico è già a livello infinitesimo. La funzione d'onda è solo una rappresentazione del ritardo con cui il substrato risponde agli eventi di assorbimento o emissione di energia. A livello macroscopico, la funzione d'onda perde di utilità. La casualità insita nella funzione di gattovivo-gattomorto è associata alla non conoscenza del suo stato. In realtà, come del resto sembrerebbe ovvio secondo il senso comune, internamente il gatto o è vivo o è morto.

Caratteristiche del Substrato Quantico

Da tutti i ragionamenti sinora esposti si possono desumere alcune caratteristiche salienti del substrato quantico che vengono ipotizzate:

- E' atemporale, ovvero contiene già in sé tutti gli eventi presenti, passati e futuri.
- Le caratteristiche topologiche ne condizionano in maniera istantanea il comportamento, generando effetti che *sembrano* extraluminari. Ha un comportamento che è definito *non locale*.
- A livello microscopico rivela la sua natura stocastica che cela l'impossibilità di prevedere il futuro da parte di un qualsiasi sistema inerziale temporale.
- Il *tempo* sembra essere una caratteristica del substrato da lui stesso generata attraverso il suo comportamento.

Conclusioni

L'ipotesi del substrato fornisce un'interpretazione della fenomenologia quantistica che aiuta a *chiarire* la maggior parte dei nodi cruciali senza ricorrere ad eccessive ipotesi supplementari. La differenza con altri tipi di interpretazioni consiste nel fatto che in queste ultime vengono introdotte ipotesi supplementari non falsificabili *senza ottenere alcuna chiarificazione di tipo concettuale* in cambio.

Anzi potremmo aggiungere che le varie complicazioni della meccanica quantistica potrebbero proprio derivare da false interpretazioni che hanno fuorviato i vari pensatori e hanno contribuito a quella che è stata definita "deriva irrazionale".

Resta il fatto che la cosiddetta ipotesi del substrato rimane per ora in sé non falsificabile.

Invertendo il discorso, il punto cruciale potrebbe risultare proprio questo: visto che la parte interpretativa viene enormemente chiarificata, ciò potrebbe significare che l'ipotesi del substrato fornisce un serio indizio sulla strada da intraprendere per gli sviluppi futuri.

Si diceva che soltanto poche persone fossero in grado di capire la relatività e che nessuno capisce la meccanica quantistica, come se le sue bizzarrie debbano far parte integrante della teoria stessa e non essere, invece, un campanello di avvertimento che alcuni argomenti non sono ben compresi.

Nessuno, infatti, ci deve esimere dal tentativo di provare ad eliminare tali bizzarrie e soprattutto nessuno può essere autorizzato da esse a fornire spiegazioni che non siano plausibili e logiche.

Ci sono molte interpretazioni diverse della meccanica quantistica e l'ipotesi del substrato fornisce soltanto un'ottica diversa con cui esaminare i fatti, ma l'autorevolezza di una interpretazione deve giungere, secondo il mio modesto parere, da quanto essa sia in grado, se non di predire, almeno di chiarire.

Claudio Caracci

Bibliografia:

- [1] **Boniolo G., Bergia S., Dalla Chiara M.L., Dorato M., Ghirardi G.C., Giuntini R. e Pauri M.** *Filosofia Della Fisica* (B. Mondadori) 1997, p. 655
- [2] **Ghirardi G. C.,** *Un'Occhiata Alle Carte Di Dio* (Il Saggiatore Tascabili) 1997, p. 420
- [3] **Penrose R.,** *La Strada Che Porta Alla Realtà* (BUR Biblioteca Univ. Rizzoli) 2004, p. 1113
- [4] **Aczel A.D.,** *Entanglement* (Cortina Raffaello) 2004, p. 260
- [5] **Gellmann M.,** *Il Quark E Il Giaguaro* (Bollati Boringhieri) 1996, p.444
- [6] **Maccone L., Salasnich L.,** *Meccanica Quantistica, Caos E Sistemi Complessi* (Carocci) 2008, p. 216
- [7] **Konishi K., Paffuti G.,** *Meccanica Quantistica: Nuova Introduzione* (Plus) 2007, p.416
- [8] **Einstein A.,** *Come Io Vedo Il Mondo* (Newton) 1988, p.209
- [9] **Davies P.,** *Il Cosmo Intelligente* (Oscar Mondadori) 1999, p. 279
- [10] **Russell B.,** *Introduzione Alla Filosofia Matematica* (Longanesi) 1984, p. 336
- [11] **Davies P.,** *La Mente Di Dio* (Mondadori) 1995, p.310
- [12] **Bitsakis E.,** *Basi della Fisica Moderna* (Edizioni Dedalo) 1992, p. 304
- [13] **Maiani L.,** *Campi, Forze e Particelle* (Le Scienze) 1991, p.272
- [14] **Selleri F.,** *Che Cos'è L'Energia* (Editori Riuniti) 1986, p.140
- [15] **Hawking S.,** *Dal Big Bang Ai Buchi Neri* (Rizzoli) 1990, p. 224
- [16] **Ridley B.K.,** *Dalle Leggi Del Pendolo Alla Particella Incantata* (Bollati Boringhieri) 1985, p.182
- [17] **Davies P.,** *Dio E La Nuova Fisica* (Mondadori) 1986, p. 342
- [18] **Aczel A.D.,** *L'Equazione Di Dio* (Net) 2004, p. 223
- [19] **Reeves H.,** *L'Evoluzione Cosmica* (Rizzoli) 2000, p. 312
- [20] **Barbour J.,** *La Fine Del Tempo* (Einaudi) 2003, p. 354
- [21] **Born M.,** *Fisica Atomica* (Bollati Boringhieri) 1976 p. 571
- [22] **Teodorani M.,** *La Fisica Dell'Infinito – Bohm* (Macroedizioni) 2006, p. 120
- [23] *Fisica Quantistica, Volume IV - Berkeley*
- [24] **Davies P.,** *Le Forze Della Natura* (Bollati Boringhieri) 1990, p. 215
- [25] **Kane G.,** *Il Giardino Delle Particelle* (Tea) 2002, p.249
- [26] **Silvestrini V.,** *Guida Alla Teoria Della Relatività* (Editori Riuniti) 1982, p. 134
- [27] **Stephen Hawking S.,** *Inizio Del Tempo E Fine Della Fisica* (Mondadori) 2000, p. 112
- [28] **Okun L.B.,** *Leptoni E Quark* (Editori Riuniti) 1986, p. 328
- [29] **Lindley D.,** *La Luna Di Einstein* (Tea) 2001, p.272
- [30] **Paul Davies P.,** *I Misteri Del Tempo* (Mondadori) 1995, p. 345
- [31] **Ford K.W.,** *Il Mondo Dei Quanti* (Bollati Boringhieri) 2006, p. 278
- [32] **Hoof G.,** *Il Mondo Subatomico* (Editori Riuniti) 1999, p. 224
- [33] **Hawking S.,** *La Natura Dello Spazio E Del Tempo* (BUR Biblioteca Univ. Rizzoli) 2002, p. 176
- [34] **Arcidiacono G.,** *La Relatività Dopo Einstein* (Di Renzo Editore) 2006, p.144
- [35] **Feynman R.P.,** *Sei Pezzi Facili* (Adelphi) 2000, p. 212
- [36] **Feynman R.P.,** *Sei Pezzi Meno Facili* (Adelphi) 2004, p. 223
- [37] **Polkinghorne J.,** *Teoria Dei Quanti* (Codice) 2007, p. 130
- [38] **Einstein A.,** *Teoria Dei Quanti Di Luce* (Newton Compton) 2005, p.125
- [39] **Oerter R.,** *La Teoria Del Quasi Tutto* (Codice) 2006, p. 323
- [40] **Hawking S.,** *La Teoria Del Tutto* (Rizzoli) 2003, p. 176
- [41] **Greene B.,** *La Trama Del Cosmo - Spazio Tempo E Realtà* (Einaudi) 2006, p. 612
- [42] **Davies P.,** *Gli Ultimi Tre Minuti* (BUR Biblioteca Univ. Rizzoli) 2000, p. 172
- [43] **Greene B.,** *L'Universo Elegante* (Einaudi) 2003, p. 395
- [44] **Zelinger A.,** *Il Velo Di Einstein* (Einaudi) 2005, p. 218
- [45] **Gleick J.,** *Caos* (Rizzoli) 1989, p. 348
- [46] **Penrose R.,** *La Mente Nuova Dell'Imperatore* (BUR Biblioteca Univ. Rizzoli) 2000, p. 622
- [47] **Boyer C.B.,** *Storia Della Matematica* (Mondadori) 1982, p. 700