

Tiziano Cantalupi e Fabio Uccelli

CONCETTI ED IMPLICAZIONI DELLA TEORIA QUANTISTICA

“... quelli che non sono rimasti scioccati quando si sono imbattuti per la prima volta nella teoria quantistica non possono averla capita ...” [1]

Niels Bohr

La teoria quantistica, o meccanica quantistica (o fisica quantistica) è una disciplina scientifica nata per spiegare la struttura fine della materia. Essa pur risultando, assieme alla teoria della Relatività, il paradigma scientifico di riferimento del XX secolo, non è mai riuscita a superare in modo significativo la ristretta cerchia degli addetti ai lavori. Questo fatto risulta tanto più sorprendente se si pensa che le più rilevanti innovazioni tecnologiche, le più importanti teorie scientifiche che si occupano dell'infinitamente piccolo o dell'infinitamente grande si basano su effetti squisitamente quantistici. Tali effetti riguardano l'energia atomica (e purtroppo anche le armi nucleari), la moderna microelettronica (sfruttata nei Computer "classici" e quantistici), gli orologi digitali, i laser, i sistemi superconduttori, le celle fotoelettriche, le apparecchiature per la diagnostica e la cura medica e tante altre applicazioni che riguardano i settori scientifico-tecnologici più disparati.

La ragione che sta alla base dell'isolamento che la fisica quantistica si trova a vivere nei confronti del panorama scientifico-culturale va innanzitutto ricercata nella estrema complessità concettuale dei suoi assunti fondamentali, nonché nella difficoltà del suo formalismo matematico, che ne fanno una materia ostica persino per gli stessi fisici. E' noto infatti come l'esame universitario di Meccanica Quantistica risulti essere uno degli ostacoli più duri da superare per qualsiasi studente del Corso di Laurea in Fisica.

Si è posto dunque l'accento sulla complessità concettuale della teoria quantistica. A dire il vero più che di complessità concettuale bisognerebbe parlare di difficoltà nell'accettare certi sui *controintuitivi* postulati. Questa sensazione di disagio nell'accogliere determinati assunti quantistici era paradossalmente avvertita anche dagli stessi padri fondatori del paradigma quantistico (i cosiddetti esponenti della

scuola di Copenaghen): Max Born, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli, Pascual Jordan¹. L'ideatore del principio di Indeterminazione, Heisenberg, al riguardo così si esprimeva [2] :

“Ricordo delle discussioni con Bohr che si prolungavano per molte ore fino a notte piena e che ci conducevano quasi ad uno stato di disperazione; e quando al termine della discussione me ne andavo solo a fare una passeggiata nel parco vicino continuavo sempre a ripropormi il problema: è possibile che la natura sia così assurda come ci appare in questi esperimenti atomici [in questi esperimenti di fisica quantistica] ? ”

Fondamenti della meccanica quantistica:

- Non esiste una realtà definita della materia, ma una realtà oggettivamente *indistinta*, fatta di *stati sovrapposti*.
- Le dinamiche fondamentali del micromondo sono caratterizzate dalla acausalità e dalla "non netta" separazione tra sperimentatore ed oggetto osservato.
- E' possibile che, in determinate condizioni, ciò che avviene in un dato luogo possa avere un corrispettivo istantaneo in un luogo ad esso distante.
- Materia ed energia possono (per tempi brevissimi) scaturire dal "nulla".

L'elenco appena fatto degli assunti fondamentali della meccanica quantistica ci fa capire quanto sia risultato (e risulti) difficile non solo accettare, ma anche spiegare, i fondamenti di questa teoria, senza correre il rischio di non essere compresi, oppure, peggio ancora, di essere fraintesi. Il linguaggio a disposizione dei fisici o di chiunque altro addetto ai lavori cerca di esprimere concetti come l'acausalità o la sovrapposizione degli stati, risulta molto spesso inadeguato. Le parole che le lingue ci mettono a disposizione per comunicare determinati concetti, determinate esperienze (o organizzare un coerente scenario gnoseologico), sono spesso inadatte, anche perché le parole sono state concepite per descrivere e rappresentare la *realtà ordinaria*, ma la meccanica quantistica ha ben poco di *ordinario*. Questo aspetto della "descrivibilità" dei fenomeni quantistici è ben espresso in una frase scritta da Max Born [3] :

“L'origine ultima delle difficoltà risiede nel fatto (o nel principio filosofico) che siamo costretti a usare parole del linguaggio comune quando vogliamo descrivere un fenomeno [quantistico] Il linguaggio comune è cresciuto con l'esperienza quotidiana e non potrà mai oltrepassare certi limiti ...”

¹ **Max Born.** Fisico di origine polacca (Breslavia 1882 - Gottinga 1970). Per l'interpretazione probabilistica della "funzione d'onda", nel 1954 ricevette il premio Nobel.

Niels Bohr. Fisico danese (Copenaghen 1885 - 1962). Nel 1922, per la formulazione del suo modello di atomo e della radiazione da esso emessa, vinse il premio Nobel.

Werner Heisenberg. Fisico tedesco (Wüzburg 1901 - Monaco 1976). Per la formulazione del Principio di Indeterminazione nel 1932 (a soli 31 anni) ricevette il premio Nobel.

Wolfgang Pauli. Fisico austriaco (Vienna 1900 - Zurigo 1958). Per la scoperta del Principio di Esclusione che porta il suo nome, nel 1945 vinse il premio Nobel.

Pascual Jordan. Fisico e matematico tedesco (Hannover 1902 - Amburgo 1980). Le sue ricerche contribuirono in modo decisivo a fare della meccanica quantistica una struttura formale rigorosa

dalla quale era possibile trarre delle predizioni esatte così da poter essere verificate negli esperimenti.

La fisica classica

La presente Sezione è dedicata alla visione classica della scienza, è dedicata alla fisica che precedette l'avvento della meccanica dei quanti.

Nei tempi antichi gli uomini che incominciavano ad interrogarsi sulle dinamiche degli eventi naturali che accadevano intorno a loro, ricevettero un'immagine molto "sfuggente" dal mondo che li circondava. Essi si rendevano conto che alcuni eventi erano regolari e prevedibili; l'alternarsi del giorno e della notte, il ciclo delle stagioni, le fasi dei corpi celesti, mentre altri erano occasionali e apparivano in modo irregolare, come gli eventi meteorologici, i terremoti e le eruzioni vulcaniche. In che modo quegli uomini avrebbero potuto organizzare le loro conoscenze in un quadro esplicativo della natura? In alcuni casi, per gli eventi naturali si trovò una spiegazione evidente: osservando, ad esempio, la neve sciogliersi al calore del Sole o lo spegnersi del fuoco a contatto dell'acqua. Tuttavia non vennero compresi e rappresentati in modo chiaro i concetti di causa ed effetto: in loro vece deve essere risultato molto naturale costruire un modello dei fatti del mondo basato sull'intervento di forze soprannaturali. Si ebbero così gli spiriti del legno, del fiume, del fuoco, ecc. Le società più evolute costruirono una gerarchia di divinità quanto mai complessa e fortemente antropomorfa. Terra, Luna, Sole, pianeti vennero considerati personaggi simili a quelli umani e le loro vicende come l'equivalente di azioni, emozioni e desideri umani. "L'ira degli dei" poteva quindi essere considerata come una spiegazione sufficiente per le calamità naturali, da placarsi con sacrifici appropriati.

Parallelamente a questo stato di cose si sviluppò un'altra serie di idee nate in seguito allo sviluppo delle città e alla comparsa degli stati. Si presumeva che, per evitare confusione, i cittadini si sarebbero dovuti adeguare a un rigoroso codice di comportamento, che fu istituzionalizzato sotto forma di leggi. Come era prevedibile, anche gli dei furono considerati soggetti a leggi e, in virtù della loro maggiore autorità e potenza, sancirono il sistema delle leggi umane attraverso i loro intermediari, i sacerdoti.

Nell'antica Grecia la concezione di un universo governato da leggi era già ampiamente diffusa. Le spiegazioni di fatti come la caduta di una pietra o il volo di un freccia, incominciarono a essere formulate sotto forma di inalterabili *leggi di natura*. Questa concezione chiarificatrice dei fenomeni, che si sarebbero prodotti autonomamente in stretta relazione con le leggi naturali, era in stringente contrasto con la concezione di un mondo complessivamente finalistico. Naturalmente i fenomeni veramente importanti come la creazione dell'uomo e dell'universo o i cicli degli astri, richiedevano ancora la più rigorosa "attenzione" degli dei; i *fatti quotidiani* potevano invece andare avanti da soli. Ma, una volta attecchita l'idea che un sistema fisico possa evolvere in modo autonomo seguendo determinati principi fissi e inviolabili, era inevitabile una graduale erosione del dominio degli dei.

Benché la rinuncia all'interpretazione teologica del mondo fisico non sia completa neppure oggi, si può approssimativamente collegare a Galileo Galilei, Isaac

Newton e in parte a Charles Darwin, la svolta decisiva a favore dell'importanza delle leggi fisiche. A cavallo tra il XVI e il XVII secolo, quello che oggi viene unanimemente indicato come il padre della "scienza moderna", Galileo, iniziò una serie di esperimenti destinati a cambiare il corso della fisica e non solo. L'idea centrale del genio di Pisa era che un pezzo di mondo il più possibile isolato dalle influenze esterne, si sarebbe lasciato studiare con relativa facilità, dimostrando nel contempo un comportamento relativamente semplice. Una delle più note indagini condotte da Galileo fu l'osservazione del comportamento dei corpi in caduta. Il precipitare di un corpo è un processo di solito molto complesso, dipendente dal peso, dalla forma, dalla composizione, nonché dalla velocità del vento e dalla densità dell'aria. La genialità di Galileo consistette nell'intuire che tutte queste variabili non sono che complicazioni accidentali, sovrapposte a una legge in realtà molto semplice. Facendo rotolare corpi di forma regolare lungo piani inclinati, i quali riducevano drasticamente le influenze dell'azione dell'aria, Galileo riuscì ad averla vinta sulla complessità (sulle perturbazioni accidentali) e a isolare la legge fondamentale della caduta dei gravi. Oggi la procedura adottata da Galileo può sembrare quanto mai ragionevole, ma nel 1500 richiedeva una notevole dose di inventiva; così come una notevole dose di ingegno richiedeva l'introduzione del concetto di tempo nello studio del moto.

Introducendo la variabile tempo nello studio della caduta dei gravi, Galileo scoprì una legge semplice quanto fondamentale e cioè che *"il tempo necessario per cadere da una data altezza (partendo da una posizione di quiete) è esattamente proporzionale alla radice quadrata dell'altezza stessa."* Con questa semplice relazione nasceva la "scienza moderna". Faceva la sua comparsa l'idea di una formula matematica in luogo di un dio regolatore per descrivere il comportamento di un sistema fisico. Non sarà mai enfatizzata a sufficienza l'importanza di questa conquista dell'intelletto per il progresso del genere umano. Una legge della natura espressa come equazione matematica non vuol dire solo sintesi e universalità, ma anche possibilità di calcolo. Tutto ciò significava che cessava di essere indispensabile osservare la natura per accertarne il comportamento (o l'evoluzione): lo si sarebbe potuto anche calcolare a tavolino con carta e penna. Usando la matematica per esplicitare le leggi, gli scienziati avrebbero potuto predire il comportamento futuro del mondo, nonché ricostruire quello passato.

Alla fine del 1600 il fisico inglese Isaac Newton riprese e sviluppò il lavoro di Galileo elaborando dei principi applicabili in linea generale a tutti i corpi in movimento. Generalizzando i risultati ottenuti da Galileo per la forza di gravità sulla Terra, Newton ipotizzò che il Sole e tutti i corpi dell'universo esercitassero una forza gravitazionale reciproca che diminuiva col quadrato della distanza (ancora una volta ci si trova a fare i conti con una semplice quanto precisa relazione matematica che chiama in causa l'inverso del quadrato).

Dopo aver *matematizzato* il moto, Newton, *matematizzò* anche la gravità. Riunendo i due dati, e ricorrendo al calcolo infinitesimale, egli conseguì un grande risultato predicendo esattamente il comportamento dei pianeti e le date delle eclissi.

L'estensione della meccanica newtoniana al sistema solare fu qualcosa di più di un semplice esercizio di fisica e matematica applicata: essa demolì la fede secolare nell'idea che le dinamiche del cosmo fossero rette da forze puramente *celesti*.

L'universo di Newton è un meccanismo perfetto. Il movimento di ogni granello di materia, di ogni atomo, è in linea di principio determinato in modo completo e assoluto, per tutto il tempo futuro e passato dalla conoscenza delle forze impresse e dalle condizioni iniziali. La conoscenza delle condizioni iniziali e la possibilità di "calcolare" gli eventi (o gli effetti) futuri, caratterizza fortemente il lavoro di Newton così come tutta la scienza sino all'avvento della meccanica dei quanti.

La scoperta dei Quanti

Il 1900 vede ufficialmente la nascita della meccanica quantistica. E' questo l'anno in cui il fisico tedesco Max Planck scopre che tutte le manifestazioni energetiche, dal flusso radiante proveniente da una fonte di calore quale un pezzo di legno che brucia, alla luce prodotta dal sole, si trasmettono per mezzo di scambi di enti discreti. Planck, in particolare, si rende conto che per spiegare adeguatamente quello che in fisica era noto come "il problema dello spettro del corpo nero" (lo spettro delle energie generate da un corpo perfettamente radiante) occorreva abbandonare il presupposto della fisica classica secondo cui l'emissione di energia è continua, sostituendola con l'ipotesi -rivoluzionaria per l'epoca- secondo la quale l'energia deve venir erogata per quantità separate, discontinue. Planck definì queste quantità discrete *quanta*, plurale del vocabolo latino quantum, che letteralmente significa "quanti" (da qui il termine meccanica quantistica), e le rappresentò come il *quanto d'azione* identificato con la lettera *h* (*h* è un numero piccolissimo corrispondente ad una grandezza di $6,6 \cdot 10^{-27}$).

Il successo ottenuto dall'ipotesi avanzata da Planck aveva tuttavia aspetti inquietanti: ammettere che l'energia radiante potesse essere emessa o assorbita soltanto in modo discreto, significava riconoscere implicitamente che in un'onda luminosa l'energia non era distribuita in modo continuo, ma era concentrata sotto forma di granuli o corpuscoli di luce.

Planck che non era un rivoluzionario e con i suoi quarantadue anni, era, secondo i criteri della scienza dell'epoca, già vecchio; in un primo tempo rifiutò la portata dirompente delle sue idee, temendo che potesse essere rimessa in discussione la struttura ondulatoria della luce (perfettamente descritta -almeno in apparenza- dall'elettromagnetismo di Maxwell), ma tutti gli esperimenti confermavano² le sue ipotesi. Ad un certo momento, Planck, anche incalzato dai fatti, finì con l'accettare

² L'esperimento più famoso a conferma dell'attendibilità delle ipotesi avanzate da Planck chiama in causa l'effetto fotoelettrico di Einstein. E' curioso osservare come, a differenza di quanto molte persone credono, Albert Einstein non vinse il premio Nobel per la formulazione della teoria della Relatività, ma per la scoperta, o per meglio dire, per la spiegazione dell'effetto fotoelettrico messo in evidenza per la prima volta nel 1887 da H. R. Hertz.

Con la spiegazione dell'effetto fotoelettrico Einstein (il quale per l'occasione introdusse anche il concetto di *quanto di luce*) riuscì a rendere conto del fatto che una lastra di metallo investita da un

fascio di luce, emette una nube di elettroni. La ragione di questa emissione va ricercata secondo il fisico tedesco nella natura discreta della luce; va ricercata nell'interazione tra le particelle incidenti della luce (i fotoni) e gli elettroni degli atomi del metallo che, nell'urto, vengono scalzati via dalle loro orbite.

le sue stesse idee. Da quel momento in poi la discontinuità dei fenomeni energetici vide una estensione ad ogni settore della fisica e non solo³. Il *quanto d'azione* h finì col diventare una costante fondamentale della natura (la nota "costante di Planck"), alla stregua della c (la velocità della luce nel vuoto) di Einstein.

Il dualismo onda-corpuscolo

Con la scoperta dei quanti la fisica dei primi del novecento si trovava di fronte ad una profonda contraddizione. Da un lato vi erano i lavori di Planck (confermati da Einstein e Compton), i quali dimostravano la natura corpuscolare dei fenomeni luminosi, dall'altro vi erano i lavori di Young, Fresnel e Maxwell (formulati nel XIX secolo) i quali indicavano che la luce non poteva che essere un fenomeno ondulatorio. In particolare gli esperimenti di *interferenza* condotti da Young dimostravano in modo inequivocabile la natura ondulatoria dei fenomeni luminosi.

La possibilità di analizzare e comprendere il fenomeno dell'*interferenza* ci è data dall'osservazione dell'acqua di uno stagno ove vengano gettati simultaneamente due sassi. Ciascuno dei due corpi dà l'avvio a una sequenza di increspature che si allontanano dall'area di impatto. Nel punto di incontro delle due serie di increspature, sulla superficie dell'acqua si forma una figura sistematica di creste e avvallamenti dovuta al fatto che, dove le creste delle onde di una serie coincidono con quelle dell'altra, la perturbazione viene rinforzata, mentre dove le creste di una serie incontrano gli avvallamenti dell'altra, le due perturbazioni si annullano a vicenda e la superficie dell'acqua risulta pressoché piatta.

Si immagini ora di sostituire i moti ondosi prodotti dall'impatto sull'acqua della coppia di sassi, con due *flussi* di onde luminose (provenienti da due direzioni parallele), le quali terminano la loro corsa su uno schermo. In seguito all'interazione tra le onde sullo schermo compariranno bande chiare e scure derivanti dall'interferenza delle singole ampiezze d'onda. Nel caso in cui due creste risultino "in fase" si avrà un rinforzo e l'ampiezza conseguente diverrà doppia (*interferenza costruttiva*). Nel caso in cui una cresta e un avvallamento risultino una opposta all'altro, si annulleranno reciprocamente, con una ampiezza conseguente nulla (*interferenza distruttiva*). La figura che si formerà sullo schermo in seguito all'interazione tra le onde luminose sarà quindi costituita da una serie di bande chiare, nel caso dell'*interferenza costruttiva*, scure, nel caso della *interferenza distruttiva*. Questa situazione sperimentale dimostra (così come molti altri contesti di fisica ottica) inequivocabilmente la natura ondulatoria, continua, della luce.

Ecco, dunque, l'inizio del XX secolo, vedere i fisici che tentano di interpretare la natura dei fenomeni luminosi di fronte a uno strano dilemma. A seconda della modalità di osservazione, la luce, si presenta come un corpuscolo (effetto fotoelettrico) o come un'onda (effetti di *interferenza*). Dovrebbe risultare chiaro a

³ La natura corpuscolare dei "fenomeni energetici" ebbe ripercussioni anche a livello filosofico. Il principio metafisico della *continuità dei fenomeni naturali* esplicitato nella famosa frase: *natura non facit saltus* e fortemente sostenuto, fra gli altri, anche dal grande Leibniz, in seguito alla scoperta dei quanti venne messo in discussione.

chiunque l'assurdità di una tale situazione: soprattutto se si pensa che un'onda è qualcosa che **occupa volume**, mentre un corpuscolo è qualcosa di **concentrato** in un punto ben preciso dello spazio. A seconda della situazione sperimentale quindi, la luce manifesta caratteristiche intrinsecamente opposte.

La natura ondulatoria della materia

Nel 1923 il fisico francese Louis de Broglie (meditando sulle simmetrie della natura) avanzò un'ipotesi arditamente geniale: perché, si chiese, dato che la luce si manifesta sotto un duplice aspetto, ondulatorio e corpuscolare, non potrebbe essere la stessa cosa anche per la materia. Egli formulò quindi una teoria la quale associava ad ogni corpuscolo di materia un'onda stazionaria di determinata lunghezza λ ($\lambda = h/m \cdot v$: dove h è la costante di Planck, m e v sono, rispettivamente, la massa e la velocità del corpuscolo in movimento), cioè un fenomeno periodico esteso nello spazio che circonda la particella. La natura dualistica dei fenomeni luminosi veniva così estesa da de Broglie ad ogni forma di materia: dal piccolo elettrone, all'atomo, a qualsiasi ente macroscopico in movimento.

Osservando attentamente il formalismo dianzi riportato (e non dimenticandosi dell'estrema esiguità del valore del quanto d'azione h) si comprenderà come a parità di velocità, la massa dell'ente in movimento considerato risulti determinante per la definizione della lunghezza d'onda ad esso associata. Più grande è la massa, minore è la lunghezza dell'onda. Ciò spiega perché le onde di materia non possono avere rilevanza nel mondo macroscopico. L'equazione di de Broglie ci dice, infatti, che tali onde anche se associate ad uno dei più "piccoli" oggetti visibili -un granello di sabbia- sono talmente ridotte se confrontate con le dimensioni (con la massa) dell'oggetto che il loro effetto è trascurabile. Solo a livello delle particelle subatomiche la natura ondulatoria della materia diventa rilevante. La ridottissima dimensione di un elettrone, ad esempio, implica che questa particella subisca una notevole influenzata dalla propria onda associata⁴.

Dopo i lavori di de Broglie quindi, un raggio di luce, un fascio di elettroni, può essere immaginato sia come un "treno di onde" elettromagnetiche, sia come un "getto di palline" che si muovono nello spazio.

All'inizio del 1926 il fisico-matematico austriaco Erwin Schrödinger, formula

⁴ Di seguito si confronta il rapporto "dimensione"-lunghezza d'onda di un ente macroscopico e un ente microscopico.

L'ente del mondo macroscopico considerato è un moscone. Un moscone di taglia media possiede una massa di circa 1 g e può volare sino a 1000 cm/sec. La lunghezza d'onda ad esso associata sarà quindi: $\lambda = h/m \cdot v = 6,6 \cdot 10^{-27} / 1 \cdot 1000 = 6,6 \cdot 10^{-30}$ cm; il 10 elevato alla -30 cm ci fa capire quanto piccola sia l'onda associata ad un moscone.

Vediamo ora l'entità dell'onda associata ad un elettrone. Un elettrone ha una massa di $9 \cdot 10^{-28}$ g e nel caso in cui si muova ad una velocità di 100.000.000 cm/sec esso avrà un'onda associata (secondo la formula $\lambda = h/m \cdot v$) di circa $7,3 \cdot 10^{-8}$ cm.

Confrontando i rapporti "dimensioni"-lunghezza d'onda del moscone e dell'elettrone, si comprende quanto enormemente preponderante sia l'aspetto ondulatorio per il secondo ente rispetto al primo.

un'equazione che permette di descrivere compiutamente ogni singola proprietà ondulatoria della materia. Essa migliora l'equazione delle onde materiali di de Broglie, e, con l'introduzione della *funzione d'onda* (identificata con la lettera greca Ψ), consente di descrivere ogni singolo comportamento nello spazio e nel tempo degli enti del micromondo, nonché di calcolare la distribuzione di "possibilità statistica" di trovare una particella all'interno dello spazio corrispondente alle dimensioni della propria onda associata.

Conferme della natura ondulatoria della materia

Intorno alla metà degli anni Venti del secolo scorso il fisico americano Clinton Davisson stava conducendo una serie di ricerche per la Bell Telephone Company quando, nel corso di determinati esperimenti, osservò alcune curiose deviazioni degli elettroni in seguito all'interazione con cristalli di nichel; deviazioni di cui non seppe spiegare la natura. Nel 1927 Davisson effettuò una versione migliorata dell'esperimento assieme ad un collega, Lester Germer, e comprese come quelle strane deviazioni non fossero altro che "*figure di diffrazione*" tipiche della riflessione di onde -in quel caso "*onde elettroniche*"- sui piani cristallini del nichel: la natura ondulatoria della materia (e quindi l'ipotesi di de Broglie) era così dimostrata. Successivi esperimenti, oltre confermare i risultati di Davisson e Germer, misero in evidenza che anche gli atomi e le molecole manifestano un comportamento ondulatorio. Praticamente, quindi, qualsiasi "*oggetto*" ha un'onda associata: un elettrone, una palla da golf, un'automobile e anche una persona, sebbene per questi ultimi enti essa abbia dimensioni e influenze insignificanti.

Il probabilismo e l'acausalità

All'inizio del XX secolo i fisici ritenevano che tutti i processi dell'universo fossero perfettamente calcolabili purché si avessero a disposizione dati di partenza sufficientemente precisi. Questa filosofia deterministica, come si è visto nella Sezione dedicata alla *fisica classica*, aveva preso le mosse oltre due secoli prima quando Newton, con la sua legge di gravitazione universale, era riuscito a descrivere le orbite dei pianeti. In un sol colpo lo scienziato inglese aveva dimostrato che una mela che cade da un albero e un corpo celeste che si muove nello spazio, sono governati dalla stessa legge: l'universo ticchettava come un gigantesco orologio perfettamente regolato. Il matematico francese del XIX secolo Laplace, fu uno dei più convinti sostenitori del determinismo. In più di un'occasione non mancò di ribadire *che se un'intelligenza onnisciente* (una sorta di *superuomo*) potesse osservare tutte le forze che agiscono in natura e registrare la posizione di ogni frammento di materia in un particolare momento "*sarebbe in grado di includere i moti dei corpi più*

grandi e quelli degli atomi più piccoli in una sola formula [...] niente risulterebbe indeterminato; ai suoi occhi, futuro e passato diverrebbero presente".

Ma in concomitanza con la fine dell'epoca vittoriana, la credenza in un universo perfettamente "calcolabile" e comprensibile svanì; avvenne nel momento in cui i fisici tentarono di applicare le leggi deterministiche al comportamento del mondo atomico. In quel minuscolo regno, come abbiamo visto, la materia sembra divertirsi a manifestare aspetti contraddittori.

Alla fine del 1926 il fisico Max Born, anche alla luce dell'impasse in cui la fisica si era venuta a trovare, con una tesi profondamente innovativa diede un'interpretazione in chiave quanto-meccanica della relazione che legava l'aspetto ondulatorio e corpuscolare della materia. L'ipotesi di Born, la quale trasformava di fatto la "possibilità statistica" schrödingeriana di trovare una particella all'interno della sua onda associata, in "**probabilità**", costituì un'idea rivoluzionaria e generò una serie lunghissima di discussioni, in quanto **sancì la fine del determinismo** in fisica. Tale ipotesi fu poi accettata dalla maggior parte dei fisici in quanto in accordo con i risultati sperimentali.

Nelle teorie classiche il calcolo delle probabilità era essenzialmente suggerito da ragioni pratiche, non di principio. Secondo l'interpretazione quantistica di Born, invece, l'esatto risultato di un esperimento è in generale imprevedibile anche in linea di principio e la probabilità ha in essa il ruolo di una nozione primitiva imposta non dall'ignoranza di cause concettualmente conoscibili con esattezza, ma dal fatto che l'analisi causale è limitata dalle leggi fondamentali che governano i fenomeni del mondo atomico. Il probabilismo borniano nasce sostanzialmente dal comportamento ondulatorio-corpuscolare della materia e dal fatto che tale comportamento non consente di formulare previsioni univoche e certe circa l'evoluzione dei microsistemi. L'equazione d'onda di Schrödinger ci dice che una particella può occupare tutte le possibili posizioni all'interno dell'onda associata. Occupando tutte le possibili posizioni **la particella non ha più una localizzazione ed una traiettoria ben definite**: la mancanza di queste "condizioni" non consente più di formulare previsioni precise circa il suo comportamento futuro.

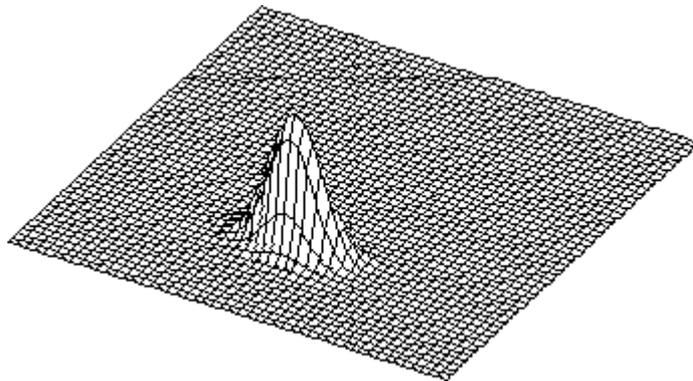
La meccanica classica ammette che sia possibile compiere previsioni deterministiche solo nel caso in cui siano disponibili informazioni contemporanee dei valori delle coordinate canoniche (posizione, "velocità") dell'oggetto in esame in un dato istante. Il probabilismo evidenziato da Born (unitamente all'indeterminismo insito nei Principi formulati da Heisenberg; vedremo più avanti di cosa si tratta), afferma l'impossibilità di conoscere con precisione le coordinate canoniche di partenza e dunque preclude la possibilità di eseguire previsioni certe circa il futuro comportamento di un microoggetto, nonché di tutti gli "oggetti" che interagiscono con esso ⁵. L'impossibilità di effettuare previsioni certe sull'evoluzione spaziotemporale degli enti del micromondo mette in crisi il principio di causalità.

Volendo riassumere quanto sino ad ora illustrato si può affermare che intorno alla

⁵ In un articolo apparso sul numero 302 (1993) della rivista "Le Scienze" i fisici statunitensi Chiao, Kwiat e Steinberg, danno un chiaro esempio di come una particella, nella visione quantistica, perda

per sempre una localizzazione e una traiettoria definita: *“In meccanica quantistica [il] concetto di traiettoria si incrina: la posizione di una particella [...] non è descritta come un punto matematico preciso; la particella è meglio rappresentata, invece, come un pacchetto d’onda [il termine pacchetto d’onda è sinonimo di funzione d’onda ψ] diffuso. Comunque, quando la particella viene rivelata in un punto, l’intero pacchetto d’onda sparisce. La meccanica quantistica non dice dov’era la particella prima di quel momento”*.

metà degli anni venti del XX secolo, Max Born da un’interpretazione probabilistica della funzione d’onda Ψ di Schrödinger. Per spiegare quale deve essere l’onda e quale deve essere la particella costruisce una rappresentazione in cui la Ψ rappresenta la *distribuzione di probabilità* di trovare una particella in ogni punto dello spazio costituito dalla sua onda associata. Born paragona l’onda materiale originariamente postulata da Schrödinger, all’onda d’urto prodotta da un’esplosione: la sua densità deve essere molto elevata vicino al punto di deflagrazione e deve decrescere man mano che ci si allontana. La figura di seguito riportata rappresenta visivamente la forma dell’onda di probabilità postulata da Born.



Nel paradigma borniano l’elettrone (o un qualsiasi altro microente) perde per sempre una sua specifica collocazione. Di un elettrone ruotante attorno a un nucleo di un atomo di idrogeno, ad esempio, può solo dirsi che ha una certa *probabilità* di essere trovato in un dato punto dello spazio (del livello orbitale) intorno al nucleo stesso.

Il fisico italiano Franco Selleri, nel suo libro *La Causalità Impossibile* [4], offre un chiaro esempio del significato di probabilismo quantistico e dell’acausalità che ne consegue; egli scrive :

“Il problema che risulta molto naturale porsi è quello di capire le cause che determinano le differenti vite individuali dei neutroni [liberi]. Lo stesso problema si pone per ogni tipo di sistema instabile come atomi eccitati [...]. L’interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanti non solo non fornisce alcuna conoscenza di queste cause, ma accetta esplicitamente una filosofia acausale secondo la quale ogni processo di disintegrazione di un sistema instabile ha una natura assolutamente spontanea [probabilistica] che non ammette una spiegazione in termini causali. Secondo tale linea di pensiero il problema delle diverse vite individuali dei sistemi instabili dovrebbe necessariamente restare privo di risposta e dovrebbe anzi essere considerato un problema non scientifico”.

E' in seguito all'introduzione del probabilismo quantistico e alle sue conseguenze che Einstein pronunciò la famosa frase :

“Sembra difficile dare uno sguardo alle carte che Dio ha nelle sue mani, ma neppure per un istante posso credere che egli giochi a dadi”.

E ancora, in una lettera inviata a Born, Einstein scrive:

"Le teorie [quantistiche] sulla radiazione mi interessano moltissimo, tuttavia non vorrei essere costretto ad abbandonare la causalità stretta senza difenderla più tenacemente di quanto abbia fatto finora. Trovo assolutamente intollerabile l'idea che un elettrone esposto a radiazione scelga di sua spontanea volontà non soltanto il momento di "saltare", ma anche la direzione del "salto". In questo caso preferirei fare il croupier di casinò piuttosto che il fisico".

Dalle citazioni appena riportate (e da quelle che verranno riportate nelle prossime pagine), risulta evidente la posizione critica di Albert Einstein nei riguardi della meccanica quantistica. Tale posizione appare tanto più singolare se si considera i notevoli contributi dati da Einstein allo sviluppo del paradigma quantistico. Si pensi alla spiegazione in termini di interazione tra quanti di luce ed elettroni atomici dell'effetto fotoelettrico. Uno dei più autorevoli biografi di Einstein riguardo il travagliato rapporto tra il grande scienziato tedesco e la teoria quantistica scriveva:

“Nessun fisico ha contribuito più di Einstein alla creazione della fisica quantistica. Il suo lavoro in questo campo avrebbe significato in sé stesso un'intera carriera scientifica per qualsiasi altro fisico [...] non meno decisamente la respinse, quando era ormai generalmente accettata.”

Dal punto di vista strettamente *umano* la contrapposizione tra Einstein e gli esponenti della teoria quantistica ortodossa (gli esponenti della *scuola di Copenaghen*) vede la lotta continua di un uomo che procede, inesorabile e coerente con se stesso, lungo una strada lontana dal principale corso della fisica, ma a suo parere l'unica per comprendere veramente i misteri della natura.

La sovrapposizione degli stati e l'atto di osservazione

L'interpretazione probabilistica dell'equazione di Schrödinger data da Born, costituisce un aspetto peculiare della teoria quantistica, poiché con essa le leggi rigidamente deterministiche della meccanica classica vengono sostituite da leggi probabilistiche. All'interno della meccanica quantistica l'interpretazione probabilistica della ψ fa emergere un'ulteriore particolare aspetto: la “sovrapposizione degli stati”. Per spiegare di cosa si tratta si ricorrerà ad un'analogia psicologica.

Si supponga che l'umore di una persona sia Cattivo (stato C) o Buono (stato B) e che la probabilità di trovarla in uno di questi due stati sia del 50 %. Il formalismo quantistico ci dice allora che l'umore della persona in oggetto in un momento qualunque della giornata, è rappresentato dalla sovrapposizione lineare dei sotto-stati C e B, ma che la probabilità (P) di trovarla di cattivo o di buon umore è nel rapporto 0,5 a 0,5; il che si traduce simbolicamente con: $P = 0,5 P(C) + 0,5$

$P(B)$. Si può quindi dire che l'umore della persona oscilla dallo stato C allo stato B e per saperne di più occorre incontrarla ("osservarla") per verificare quale sia realmente il suo umore. La potremo trovare nello stato B, esperienza che ci permetterà di dire che al momento dell'incontro/misura abbiamo *ridotto la sua funzione d'onda* al solo sotto-stato $P = (B)$.

La meccanica quantistica offre esempi molto significativi di sovrapposizione di stati; uno di questi è la durata della vita del mesone K^0 (il mesone è una particella sub-atomica). La durata della vita di K^0 può essere 10^{-7} oppure 10^{-10} secondi. Applicando la teoria della sovrapposizione degli stati è possibile affermare che la durata della vita di K^0 è la sovrapposizione di due stati $K^0_1 (10^{-7})$ e $K^0_2 (10^{-10})$. Il mesone può così, in parti uguali, manifestarsi **probabilisticamente** (cioè in maniera del tutto "spontanea") dopo un determinato tempo. Questa situazione trova esemplificazione nella formula $|K^0|^2 = 0,5 |K^0_1|^2 + 0,5 |K^0_2|^2$. Il fatto che la probabilità sia il quadrato del coefficiente che determina la sua influenza nel momento della riduzione della funzione d'onda, lo si deve al formalismo della meccanica quantistica (lo si deve a Born) il quale richiede che la probabilità sia il quadrato della Ψ ⁶.

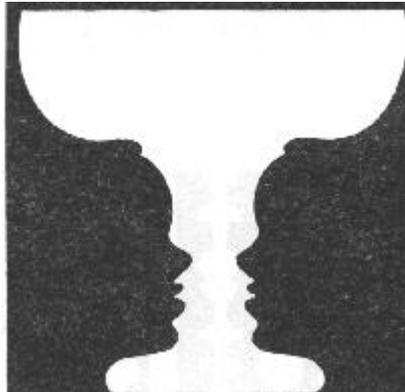
Un altro esempio di sovrapposizione quantistica riguarda il comportamento duale della materia. Come evidenziato nei precedenti paragrafi la materia manifesta una duplice natura: ondulatoria e corpuscolare. Bene, queste due caratteristiche della realtà fisica, devono -nel paradigma quantistico- convivere assieme in una miscela di sovrapposizioni: nella fattispecie sovrapposizioni di stati ondulatori e corpuscolari. E' il tipo di misurazione scelta dallo sperimentatore (la quale produce la *riduzione della funzione d'onda*) che determina come la materia dovrà presentarsi al mondo; se come ente che ha carattere ondulatorio o corpuscolare.

Da quanto sino ad ora scritto il lettore si sarà reso conto che "l'attuarsi" delle caratteristiche della materia, in particolare nel caso della sovrapposizione onda-corpuscolo, non avviene "spontaneamente" come nella durata della vita del mesone K^0 (il quale "sceglie spontaneamente" quando manifestarsi: se dopo 10^{-7} o dopo 10^{-10} secondi), ma è "forzata" dalle scelte dello sperimentatore: vedremo più avanti cosa ciò comporti. Volendo esemplificare visivamente uno stato di sovrapposizione⁷ si può ricorrere alle immagini *duplicemente ambigue* caratteristiche dal movimento psicologico tedesco della Gestalt. Nei contorni che costituiscono le figure gestaltiche sono infatti contemporaneamente presenti i due significati da esse assunti. La figura di seguito riportata è concretamente e nello stesso momento la rappresentazione di un vaso e di due profili umani.

Ad un certo punto dell'esposizione riguardante gli *stati di sovrapposizione* si è esplicitamente parlato della circostanza per la quale la conoscenza della persona in

⁶ Nel momento in cui si va a calcolare la somma dei quadrati delle ampiezze delle probabilità dei sotto-stati $|K^0_1|$ e $|K^0_2|$, si ottengono quelli che nel formalismo quantistico vengono chiamati "termini incrociati" i quali portano al *non localismo* (vedremo nelle prossime Sezioni di cosa si tratta).

⁷ Per amor di verità occorre precisare che per gli esponenti della meccanica quantistica ortodossa è impossibile fornire una qualsiasi raffigurazione di uno stato di sovrapposizione. Uno stato sovrapposto è di per sé non rappresentabile, impensabile: "*è impossibile comprendere la struttura e l'evoluzione di uno stato sovrapposto nel senso di formarsi immagini mentali nello spazio e nel tempo corrispondenti alla sua realtà ...*", scrive Bohr in uno dei suoi più noti lavori. La ragione per cui chi scrive ha deciso di derogare da questa "legge" della teoria quantistica, è quella di fornire un qualche tipo di rappresentazione di una realtà (la realtà sovrapposta) che altrimenti sfuggirebbe a qualsiasi modalità di raffigurazione.



esame può avvenire solo in seguito ad un incontro (ad una "osservazione"). Questo aspetto "attivo del conoscere" è fondamentale in meccanica quantistica. All'interno del paradigma di Copenaghen infatti, il ruolo dello sperimentatore, dell'osservatore (in fisica quantistica chi esegue un qualsiasi tipo di esperimento viene definito *osservatore*), oltre risultare ineliminabile non può mai essere disgiunto dall'ente osservato. Osservatore ed oggetto studiato, nel momento di una misurazione, formano un *tutt'uno*, cosicché le scelte del primo determinano e si fondono con le caratteristiche del secondo. Tutto questo deriva sostanzialmente dal fatto che la materia, prima di una qualsiasi misurazione -la materia allo "stato naturale"- *vive* in uno stato sovrapposto. E' solo l'intervento dello sperimentatore che, per mezzo di un atto di osservazione, produce quello che nel formalismo quantistico viene definito *riduzione della funzione d'onda*, consentendo allo stato sovrapposto di risolversi in un determinato modo, permettendo alla materia di presentarsi al mondo come "ente" che ha una determinata realtà.

L'interazione tra sperimentatore e oggetto osservato, nel caso della vita del mesone K^0 , "costringe" il mesone a dirci qualcosa sulla durata della sua vita, mentre nel caso dell'aspetto ondulatorio-corpuscolare della materia, l'interazione osservatore-oggetto-osservato costringe (a seconda del tipo di esperimento scelto) la materia a presentarsi al mondo sotto una determinata forma: ovvero come onda o come corpuscolo.

Nell'ambito del paradigma quantistico quindi, lo sperimentatore è un *osservatore partecipante*, è un "elemento" mai veramente disgiunto dall'oggetto dell'indagine. L'apparato di misura che interviene nell'esperimento e che fa da tramite fra osservatore e oggetto osservato, diventa anch'esso *ente attivo* nelle misurazioni. Al riguardo, Bohr, nel libro *Unità della conoscenza*, scrive:

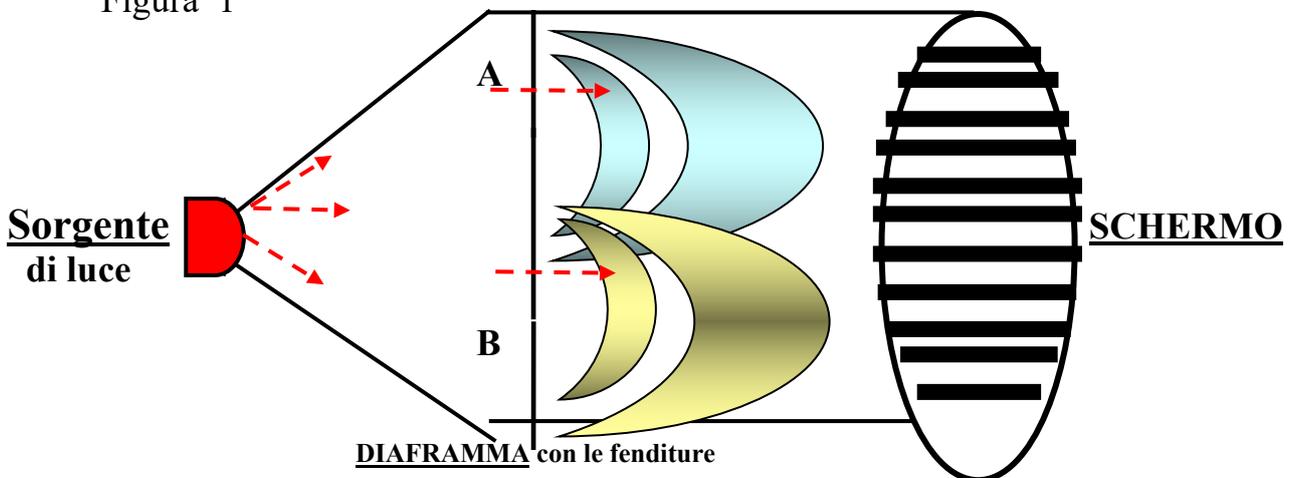
"La differenza fondamentale, rispetto all'analisi dei fenomeni, tra fisica classica e fisica quantistica, è che nella prima l'interazione tra gli oggetti e gli apparati di misura può venire trascurata o eliminata, mentre nella seconda questa interazione è parte integrante del fenomeno".

La sovrapposizione degli stati e l'esperimento della doppia fenditura

Esiste un test in fisica che più di ogni altro mette in evidenza lo stato di sovrapposizione che caratterizza la materia "allo stato naturale", questo test è noto come *esperimento della doppia fenditura*.

Si supponga, come nell'esempio proposto per spiegare l'*interferenza* nella Sezione dedicata al dualismo onda-copruscolo, che vengano prodotti due fasci di onde luminose provenienti da due direzioni parallele, i quali terminino la loro corsa su uno schermo sensibile alla luce (una sorta di lastra fotografica). Nell'esperimento illustrato in Figura 1 (il quale rappresenta un tipico esempio di esperimento a due fenditure) il parallelismo tra i fasci luminosi viene ottenuto opponendo ad una sorgente di luce un diaframma con due fenditure.

Figura 1



Ora, come ben evidenziato nella figura, a destra del diaframma, le onde dei fasci luminosi uscenti dalle fenditure interferiscono tra di loro, e, nel caso in cui tali onde risultino "in fase" si avrà sullo schermo una banda chiara (*interferenza costruttiva*), viceversa nel caso in cui tali onde risultino "in opposizione" si avrà sullo schermo una banda scura (*interferenza distruttiva*). Secondo le leggi dell'ottica, l'interferenza appena descritta può aver luogo solo nel caso in cui entrambe le fenditure siano attraversate dai fasci luminosi. Nel caso in cui solo una delle fenditure sia percorsa da un fascio di luce -non avendosi nessuna interferenza- nessuna banda può prodursi sullo schermo. La cosa straordinaria che accade, invece, è che anche inviando un solo fascio di luce (anche inviando un solo fotone per volta) si formano ugualmente sullo schermo bande chiare e scure tipiche dell'interferenza costruttiva e distruttiva.

Come può accadere tutto ciò si chiedevano perplessi i fisici all'inizio del XX secolo. La risposta venne dalla meccanica quantistica ed in particolare dai lavori di Born, Bohr ed Heisenberg i quali dimostrarono che qualsiasi "microsistema" (fotone, elettrone, atomo) non è obbligato da leggi deterministiche a percorrere traiettorie precise. Il "probabilismo" borniano, unitamente al principio di sovrapposizione e

all'indeterminismo di Heisenberg, **vietano esplicitamente** a qualsiasi microente di possedere una traiettoria definita. Nel caso dell'esperimento a due fenditure illustrato in Figura 1, anche un solo fotone percorre quindi tutte le possibili ("potenziali") traiettorie ("sovrapposte") comprese tra la sorgente e il diaframma. Percorrendo tutte le possibili traiettorie il fotone inevitabilmente incontra anche le due fenditure, riuscendo, dopo averle oltrepassate (e avendo interferito con sé stesso), a produrre sullo schermo le bande chiare e scure tipiche dell'interferenza costruttiva e distruttiva. In un celebre passo scritto da Bohr al riguardo leggiamo:

“Quando il "fotone" passa attraverso la fenditura A ciò determina un certo mondo possibile (che chiameremo mondo A); quando passa attraverso la fenditura B avremo invece il mondo B [...] Nel nostro caso significa che entrambi questi mondi coesistono in qualche modo, l'uno sovrapposto all'altro [...]”.

E ancora il fisico Richard Feynman scrive:

“In un esperimento a due fenditure il microoggetto non passa attraverso una sola delle due fenditure.”

La spiegazione quanto-meccanica dell'esperimento della doppia fenditura, venne accolta (al suo apparire) con scetticismo da una parte della comunità scientifica. Svvariati fisici, soprattutto quelli che più di altri si riconoscevano nelle posizioni realistiche⁸, non ritenevano ammissibile che un ente (seppur speciale come un fotone, un elettrone o un atomo) potesse “sdoppiarsi” e percorrere contemporaneamente strade diverse.

Per avere la certezza della giustezza delle posizioni quantistiche fu allora proposto un esperimento semplice quanto decisivo. Se effettivamente un solo fotone passa per entrambe le fenditure, autointeragisce con sé stesso e produce le bande tipiche dell'interferenza, basta chiudere una delle due fenditure e verificare se effettivamente le bande continuano a prodursi.

L'esperimento fu effettuato, un solo fotone per volta fu inviato, e l'esito fu chiarissimo: la chiusura di una delle fenditure bloccava la formazione delle bande chiare e scure sullo schermo. Anche se può risultare difficile credere che un unico oggetto possa avere la capacità di “sondare” allo stesso tempo due luoghi diversi, questo è ciò che avviene, questo è quello che gli esperimenti dimostrano.

Recentemente un noto fisico americano, David Bohm, rifacendosi ad una vecchia ipotesi proposta da Louis de Broglie, ha formulato una tesi secondo la quale le "stranezze" dell'esperimento della doppia fenditura possono essere spiegate senza ricorrere alla meccanica quantistica. Secondo Bohm nei test a due fenditure un fotone essendo una particella localizzata nello spazio passa attraverso una sola delle fenditure: l'onda associata, invece, passa come può fare solo un ente non localizzato, per entrambe. Una volta che l'onda ha oltrepassato le fenditure, interagisce con sé stessa e *pilota* la particella sullo schermo così da consentire il prodursi delle bande chiare e scure tipiche dell'interferenza costruttiva e distruttiva. Praticamente l'onda *pilota* passa per entrambe le fenditure, la particella solo per una, il fronte d'onda che esce dalle fenditure guida poi la particella sullo schermo così da consentire la formazione delle bande. Se questo è ciò che avviene, però, emerge un grave

problema: l'onda *pilota* guidando la particella deve inevitabilmente trasferire una certa energia (una certa quantità di moto) al fotone: quando si spinge un'automobile,

⁸ Il realismo è quel complesso di posizioni scientifico-filosofiche propugnanti la tesi per cui gli “oggetti del mondo” hanno sempre e comunque una realtà definita, la quale non dipende dal loro essere percepiti (o misurati). Il realismo si fonda anche sull'accettazione incondizionata del “localismo”, ovvero sull'impossibilità di “azioni dirette a distanza” e sulla causalità, ovvero sulla evidenza che tutti gli effetti si propagano sempre dal passato al futuro e che il passato non può essere modificato.

si esercita una forza, si spende energia, e una parte di questa viene trasferita all'automobile. Se l'onda *pilota* ipotizzata da Bohm guida effettivamente il fotone, deve inevitabilmente alterare la quantità di moto del fotone. Nei test a due fenditure, però, ciò non accade: i fotoni arrivano sullo schermo avendo la stessa quantità di moto di quando erano partiti. Ma allora se l'onda “pilota” non esercita alcuna forza, come fanno i fotoni a rispondere ad essa? E' difficile dirlo. Bohm ha suggerito che in qualche modo i fotoni sanno quello che devono fare, sanno interpretare l'informazione inviata dall'onda pilota muovendosi di conseguenza, come un capitano di una nave che riceve informazioni via radio e sa dirigere conseguentemente la sua imbarcazione.

Il Principio di Indeterminazione

Nel 1927 il fisico tedesco Werner Heisenberg scoprì che la natura probabilistica delle leggi della meccanica quantistica poneva grossi limiti al nostro grado di conoscenza di un sistema atomico. Normalmente ci si aspetta che lo stato di una microparticella in movimento -consideriamo ad esempio un elettrone in rotazione attorno ad un nucleo- sia caratterizzato completamente ricorrendo a due parametri: velocità (quantità di moto) e posizione. Heisenberg postulò invece, che a un certo livello queste quantità (che nel linguaggio tecnico vengono chiamate *variabili coniugate*) sarebbero dovute rimanere sempre indefinite. Tale limitazione prese il nome di principio di Indeterminazione. Questo principio afferma che maggiore è l'accuratezza nel determinare la posizione di un particella, minore è la precisione con la quale si può accertarne la velocità e viceversa⁹.

Quando si pensa all'apparecchiatura necessaria per eseguire le misurazioni, questa indeterminazione risulta intuitiva. I dispositivi di rilevazione sono così grandi rispetto alle dimensioni di una particella che la misurazione di un parametro come la posizione è destinato a modificare anche la velocità. Occorre sottolineare però (seguendo Heisenberg) che le limitazioni in parola, non derivano solo dalla interazione tra mondo microscopico e mondo macroscopico, ma sono proprietà intrinseche della materia. In nessun senso si può ritenere che una microparticella possieda in un dato istante una determinata posizione e una determinata velocità. Queste sono, secondo Heisenberg, caratteristiche incompatibili; quale delle due si manifesti con maggior precisione dipende solo dal tipo di misurazione scelta.

Oltre alla posizione e alla velocità delle particelle, il principio di Indeterminazione pone limiti anche alla misura simultanea di parametri come l'energia e il tempo. Ciò significa che al diminuire della durata di una osservazione, aumenta l'imprecisione

⁹ Più precisamente nella misura simultanea delle coordinate di posizione x e di quantità di moto p di una particella è impossibile ottenere valori x' e p' con indeterminazione piccola a piacere. Infatti, se Δx e Δp definiscono rispettivamente l'indeterminazione in x e p , deve valere la relazione: $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$.

nella misura dell'energia e viceversa¹⁰.

Da notare infine che il principio di Indeterminazione, così come le relazioni che legano la dimensione della lunghezza d'onda associata ad un ente materiale in movimento teorizzata da de Broglie, è valido per qualsiasi "oggetto", ma in pratica ha conseguenze importanti solo se applicato a oggetti di dimensioni atomiche o subatomiche, poiché quando si tratta di corpi ordinari, la "piccolezza" della costante h , fa perdere al principio stesso gran parte della sua influenza.

• L'indeterminazione sperimentale

Per misurare la posizione di un oggetto microscopico come un elettrone occorre investirlo con un raggio di luce (un flusso di fotoni) o comunque qualcosa che in ultima analisi risulta avere all'incirca le medesime *dimensioni* dell'elettrone. Questo fa sì che l'elettrone risulti perturbato da questa interazione che ne modifica inesorabilmente la velocità; la stessa cosa, ma in situazioni opposte, avviene nel caso in cui si voglia conoscere la velocità di un elettrone.

Heisenberg, con il suo principio di Indeterminazione, pone con forza l'accento sul fatto che l'effetto dell'interazione tra il raggio di luce incidente e la particella "osservata" può anche essere reso uguale a zero, in tal caso però non si compie nessuna misurazione e non si acquista alcuna conoscenza sulle proprietà del sistema osservato. Se l'interazione è invece diversa da zero, essa non può essere resa arbitrariamente piccola e non è quindi neppure concettualmente eliminabile, ma deve avere la costante di Planck come valore minimo.

Un esempio di indeterminazione sperimentale trasferito alle dimensioni umane può essere il tentativo di determinare simultaneamente la traiettoria e la posizione di un oggetto in movimento. Si supponga di voler determinare, attraverso una fotografia, la posizione di un oggetto in movimento: per esempio una palla di cannone. Naturalmente se la palla percorre la propria traiettoria a notevole velocità, la fotografia risulterà mossa a meno che si usi un otturatore ad alta velocità. Con un otturatore ad alta velocità si riuscirà a "fissare" l'oggetto sulla pellicola, ma si pagherà un prezzo nella definizione della traiettoria; risultando la palla di cannone ferma. D'altro canto usando un otturatore a bassa velocità, si fotograferà una linea indistinta che rappresenta fedelmente la traiettoria della palla, ma che non dà nessuna indicazione sulla posizione.

• L'indeterminazione teorica

Come poco sopra osservato, il fatto che non si riesca a misurare contemporaneamente la posizione e la velocità di una particella non è dovuto soltanto a restrizioni di ordine pratico, ma è un limite obiettivo della natura. In altri termini, per Heisenberg, e per i fisici quantistici in generale, qualsiasi microente (la materia) allo "stato naturale" non ha oggettivamente (ontologicamente) una posizione e una velocità definite, non ha una "dimensione definita". Questa è una conseguenza del principio di sovrapposizione e del formalismo alla base delle relazioni di

¹⁰ Più esattamente l'indeterminazione energia-tempo definisce l'impossibilità di determinare, in seguito ad una osservazione che duri un tempo Δt , l'energia di una particella con un'incertezza inferiore a ΔE , legata a Δt dalla relazione: $\Delta E \cdot \Delta t \cong h$.

indeterminazione. Infatti come è stato evidenziato nelle precedenti Sezioni, la materia, prima di qualsiasi misurazione, *vive* sempre come un mix di stati sovrapposti. Nel caso delle variabili coniugate velocità-posizione ed energia-tempo, la particella *vive* come ente che presenta "miscelate" queste quattro qualità.

L'analisi del formalismo alla base delle relazioni di indeterminazione posizione-quantità di moto, $\Delta x \cdot \Delta p \cong h$, con le equazioni "inverse" $\Delta p = h/\Delta x$ e $\Delta x = h/\Delta p$, dimostra che nel caso in cui si definisca con precisione la posizione di una particella (ovvero con $\Delta x = 0$) l'indeterminazione sulla quantità di moto (Δp) diventa infinita. Così se si suppone di definire esattamente la quantità di moto di una particella ($\Delta p = 0$), la sua posizione risulterà occupare tutti gli infiniti punti dello spazio. Questi semplici esempi dimostrano chiaramente l'incompatibilità per una particella a possedere (se non come miscela di stati indistinti, sovrapposti) ad un tempo posizione e quantità di moto: quando una variabile coniugata tende a zero l'altra tende all'infinito e viceversa.

Con la dimostrazione teorica delle relazioni di indeterminazione emerge chiaro il passaggio dal livello epistemico dell'esperimento, dove gli apparati strumentali dimostrano limiti insormontabili nella possibilità di effettuare determinate misure, alla dimensione ontologica del formalismo, ove la materia dimostra di non possedere per principio determinate caratteristiche.

La Complementarità

Da quanto sino ad ora esposto emerge con forza l'aspetto *contraddittorio* insito nella natura duale della materia. Il principio di Complementarità formulato alla fine del 1927 da Bohr¹¹, consente di superare tale contraddizione eliminando ogni inconciliabilità logica tra la descrizione corpuscolare e ondulatoria (e tra le "proprietà" di posizione e velocità, energia e tempo), implicando l'impossibilità di dimostrare la verità dell'una o la falsità dell'altra. Nell'ambito del modello complementare gli aspetti ondulatori e corpuscolari manifestati dagli enti del micromondo, vengono ad essere elementi *complementari* di una stessa realtà, vengono ad essere due facce di una medesima medaglia. **Entrambi risultano alternativamente necessari per una descrizione completa della realtà osservata.**

Nella Complementarità la contraddizione dovuta all'interpretazione dualistica della materia diventa un'impossibilità "quasi naturale" a tracciare una netta linea di demarcazione tra l'oggetto conosciuto e il soggetto conoscente: il manifestarsi della materia in modo definito sotto una forma piuttosto che un'altra dipende solo dal tipo di esperimento scelto per osservarla.

¹¹ Una delle formulazioni più lucide di Complementarità date da Bohr è la seguente:

"La Complementarità è la concezione dell'oggettività nella teoria quantistica. La realtà non è mai descritta in sé, ma come parte non isolabile di insiemi di fenomeni e rappresentazioni. Una stessa realtà può essere l'oggetto di due raffigurazioni complete, contraddittorie [...]. Queste due rappresentazioni sono dette complementari. E' il caso dell'aspetto corpuscolare ed ondulatorio della materia ...".

La Complementarità e l'Esistenzialismo danese

Bohr considera le "complicazioni" introdotte dalla Teoria Quantistica come inevitabili: la nostra cultura ed il nostro modo di comprendere si sono formati nel mondo macroscopico dove lo spazio-tempo e la causalità sono contemporaneamente necessari. Perciò non possiamo evitare di pensare che gli eventi atomici avvengano nello spazio-tempo e si sviluppino in maniera causale; tuttavia dobbiamo arrenderci all'impossibilità di usare contemporaneamente le due descrizioni¹². In termini kierkegaardiani possiamo dire che la tesi (spazio-tempo) e l'antitesi (causalità) non possono mai essere riuniti in una sintesi, ma debbono restare per sempre opposti e inconciliabili.

Quest'ultima osservazione è essenziale per comprendere le radici storiche e culturali della Complementarità. Bohr non può certamente essere considerato un hegeliano, nonostante accetti la presenza di elementi contraddittori nelle teorie fisiche. Dato che nessun oggetto può essere allo stesso tempo piccolo e grande -dice Bohr- gli aspetti ondulatori e corpuscolari che caratterizzano ogni particella sono elementi contraddittori. Essi sono chiaramente correlati a un'altra coppia di opposti, i concetti di continuità e di discontinuità. Ma questa parziale accettazione delle idee di Hegel non implica che le contraddizioni possono essere risolte in una sintesi a un livello diverso : al contrario, una delle battaglie più importanti condotte da Bohr fu proprio il rifiuto di queste risoluzioni! Uno dei suoi allievi, Leon Rosenfeld, descrisse la situazione in questo modo: *"Mentre i grandi maestri (Planck, Einstein e Schrödinger) tentavano inutilmente di eliminare le contraddizioni in modo aristotelico, riducendo un aspetto all'altro, Bohr comprese la futilità di questi tentativi. Egli sapeva che si sarebbe dovuti convivere con questo dilemma ... e che il problema reale sarebbe stato quello di raffinare il linguaggio della fisica in modo da fare spazio alla coesistenza dei due concetti."* [5]

Ovviamente convivere con un dilemma è radicalmente diverso dal tentare di risolverlo. A questo proposito i filosofi danesi Søren Kierkegaard e Harald Høffding risultarono ispiratori delle idee di Bohr circa la possibilità di risolvere le contraddizioni. Sembra ormai chiaro che la natura della Complementarità abbia tratto ispirazione da un ramo secondario della filosofia : l'esistenzialismo danese. Nel

libro "La Distruzione della Ragione" [6] György Lukacs dedicò sessanta pagine a Kierkegaard e scrisse per esempio: " Kierkegaard combatte Hegel spezzando la viva unità dialettica degli elementi contraddittori e gonfiandoli, nel loro rigido isolamento, di principi metafisici indipendenti."

Questo è esattamente quello che fa Bohr con le idee di particella e onda, col rifiuto di accettare la descrizione di Einstein-de Broglie in cui i due aspetti coesistono oggettivamente e costituiscono il sistema fisico osservato. E' estremamente difficile questo che è nel giusto Max Jammer quando scrive : "Non può esservi dubbio sul fatto che il precursore danese dell'esistenzialismo moderno e della teologia neo

¹² "This postulate [the quantum postulate] implies a renunciation as regards the space-time coordination of atomic processes". N. Bohr

ortodossa, Søren Kierkegaard, abbia in una certa misura inciso sul corso della fisica moderna grazie alla sua influenza su Bohr." [7]

Per Kierkegaard le contraddizioni nella vita e nelle scienze della natura sono rigide e non possono essere superate. Questa sua convinzione viene presentata assieme a duri attacchi contro il razionalismo di Hegel e l'idea che le contraddizioni si possono sempre sintetizzare (cioè risolvere) a un livello superiore. Al contrario - pensa Kierkegaard - le contraddizioni sono inconciliabili e costituiscono alternative che si escludono a vicenda in modo definitivo. Così, ad esempio, nella vita di una persona il conflitto fra i bisogni e i desideri del soggetto (**la tesi**) e la situazione concreta in cui una persona è costretta a muoversi (**l'antitesi**) provoca uno stato di angoscia permanente che non può mai essere eliminata in modo hegeliano in una sintesi di qualità superiore. Una situazione simile viene incontrata nelle scienze naturali. Kierkegaard chiamò la sua filosofia "dialettica qualitativa".

Come vedremo Bohr pensava che un elemento di irrazionalità fosse stato introdotto nella fisica dal valore finito del quanto di azione h , per cui gli scienziati sono costretti ad oscillare fra spazio-tempo e causalità senza mai poterli usare insieme. Similmente egli pensava che è impossibile usare allo stesso tempo i concetti di particella (la tesi) e di onda (l'antitesi), ma che si doveva oscillare dall'uno all'altro per descrivere diversi fatti sperimentali. Dunque anche per Bohr si è in presenza di opposti contraddittori che sono mutuamente inconciliabili e come tali non utilizzabili in una sintesi per raggiungere una descrizione completa degli aspetti essenziali della realtà al suo livello più profondo.

Se la continuità concettuale fra Kierkegaard e Bohr è molto chiara, è invece impossibile trovare una connessione diretta fra i due perché il primo morì mezzo secolo prima che il secondo si iscrivesse all'università. Ci sono invece molte evidenze di importanti connessioni indirette, per il tramite di Høffding, la cui importanza per la formazione culturale di Bohr è stata da quest'ultimo così descritta in un omaggio postumo (1931) durante una conferenza all'accademia danese di Scienze e Lettere:

"[Ho avuto] il privilegio di essere stato in stretto contatto con Høffding fin dalla mia prima giovinezza, perché mio padre era suo intimo amico. In tutte le fasi della mia vita ho avuto la possibilità di beneficiare del suo spirito

veramente scientifico e filosofico, che voi tutti conoscete dalle sue opere, ma che prese un significato speciale dal mio contatto diretto con lui." [8]

L'Indeterminazione energia-tempo e le sue conseguenze

La relazione di indeterminazione energia-tempo, con le sue conseguenze al livello del principio di conservazione dell'energia¹³, da conto di fenomeni quali la radioattività o la nascita delle *particelle virtuali*.

¹³ La formulazione classica del principio di conservazione dell'energia asserisce che in natura "nulla si crea e nulla si distrugge, ma può solo cambiare di stato". In altri termini è impossibile che in natura una qualsivoglia forma di energia (o massa) possa scaturire dal nulla, oppure che una qualsivoglia forma di energia (o massa) possa essere totalmente cancellata dall'universo.

Si supponga di voler determinare l'energia di un fotone. Secondo il formalismo ideato da Planck, l'energia di un fotone è direttamente proporzionale alla frequenza (ν) della luce (infatti: $E = h \nu$). Se, quindi, si raddoppia la frequenza, anche l'energia raddoppia. Un sistema pratico per misurare l'energia è quindi quello di misurare la frequenza dell'onda luminosa, il che si può fare contando il numero di oscillazioni in un dato intervallo di tempo. Per poter applicare questa procedura occorre comunque che si verifichi almeno una e preferibilmente più di una oscillazione completa, che richiede un intervallo di tempo definito. L'onda deve passare da un massimo ad un minimo, e poi di nuovo tornare a un massimo. Misurare la frequenza della luce in un tempo inferiore a quello occorrente per un'oscillazione completa è evidentemente impossibile, anche in via di principio. Per la luce il tempo occorrente è ridottissimo (un milionesimo di miliardesimo di secondo). Onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda maggiore e frequenza minore, come le onde radio, possono richiedere qualche millesimo di secondo per compiere un'oscillazione completa. Queste semplici considerazioni mettono in evidenza l'esistenza di un limite fondamentale nella precisione con cui è possibile misurare la frequenza di un fotone (e quindi la sua energia) in un dato intervallo di tempo. Se l'intervallo è inferiore a un periodo intero dell'onda, l'energia è quanto mai indeterminata. Per avere una determinazione esatta dell'energia si deve effettuare una misurazione "relativamente lunga" (corrispondente ad almeno un'oscillazione completa), ma se ciò che ci interessa è invece l'istante in cui si verifica un evento, lo si potrà determinare in modo esatto solo a spese dell'informazione sull'energia. Ci si trova così a dover scegliere tra l'informazione sull'energia e l'informazione sul tempo, che presentano un'incompatibilità analoga a quella per la posizione e la quantità di moto.

Da quanto sino ad ora illustrato risulta chiaro che i limiti nelle misurazioni della energia e del tempo (così come per la posizione e la quantità di moto), non sono semplici insufficienze tecnologiche, ma proprietà oggettive dalla natura. In nessun senso si può ritenere che un fotone (o un elettrone, ecc.) possieda realmente un'energia definita in un dato istante. Per i fotoni energia e tempo sono due caratteristiche "contrastanti", **complementari**; quale delle due si manifesti con maggior precisione dipende solo dalla natura della misurazione che si sceglie di effettuare.

Una conseguenza immediata delle dimostrazioni sin qui date è che per tempi brevissimi si apre la possibilità per una violazione del principio di conservazione dell'energia. Per tempi che si aggirano intorno al milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo, una particella alfa può prendere in prestito dal "nulla" una certa quantità di energia "scavarsi" una sorta di tunnel (da qui il termine *Effetto Tunnel*), attraversare la barriera di potenziale che la tiene ancorata al nucleo e sfuggire dell'atomo a cui appartiene. Per tempi che si aggirano attorno al miliardesimo di trilionesimo di secondo un elettrone ed il suo compagno di antimateria -il positrone- possono emergere improvvisamente dal nulla, congiungersi e quindi svanire. Tutti questi fenomeni sono possibili poiché la relazione di indeterminazione $\Delta t \cdot \Delta E \cong h$, con la sua "inversa" $\Delta E = h/\Delta t$, consente di ottenere dal "nulla" energia (o massa).

Dalla relazione $\Delta E = h/\Delta t$ risulta chiaro che al tendere a zero di Δt , ΔE tende all'infinito. Per tempi brevissimi quindi (ovvero per tempi con un ordine di grandezza di molto inferiore ad h), è possibile ottenere dal "nulla" notevoli quantità di energia; ciò spiega il perché delle emissioni alfa ad alta velocità (scoperte nel 1898 da Henri Becquerel) o la nascita di particelle o coppie di *particelle virtuali*.

L'Elettrodinamica Quantistica e le fluttuazioni del vuoto

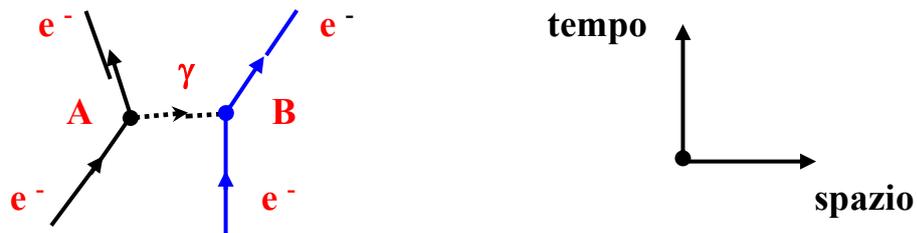
Una interessante conseguenza del principio di Indeterminazione è la fluttuazione del campo elettromagnetico. L'Elettrodinamica Quantistica (il cui acronimo inglese è QED), si occupa delle fluttuazioni dei campi e fonde in sé due concetti: quello di campo elettromagnetico e quello di fotoni intesi come manifestazione corpuscolare delle onde elettromagnetiche. Attraverso l'Elettrodinamica Quantistica ha trovato coerente spiegazione il fenomeno dell'attrazione e della repulsione elettrica, il magnetismo, le anomalie del momento magnetico dell'elettrone, ecc.

Il campo quantistico è un concetto completamente nuovo che è stato applicato alla descrizione di tutte le particelle subatomiche e delle loro interazioni, facendo corrispondere a ciascun tipo di particella un diverso tipo di campo. Il campo quantistico è visto come l'entità fisica fondamentale: un mezzo continuo presente ovunque nello spazio.

Nell'Elettrodinamica Quantistica l'interazione tra due microparticelle (due elettroni per esempio) avviene attraverso lo scambio di fotoni virtuali. I fotoni virtuali nascono e vivono grazie al piccolissimo grado di indeterminazione esistente tra i livelli di energia e tempo evidenziato nella precedente Sezione e che caratterizza lo "stato oggettivo" degli enti del micromondo. Questa nuova concezione della interazione subatomica può sembrare difficile da comprendere, ma essa diventa semplice quando il processo di scambio di un fotone virtuale è rappresentato per mezzo di un diagramma spazio-temporale di Feynman¹⁴. La Figura 2 mostra un diagramma di Feynman nel quale sono rappresentati due elettroni che si avvicinano tra loro; uno di essi emette un fotone virtuale (indicato con γ) nel punto **A**, l'altro lo assorbe nel punto **B**. Dopo aver emesso il fotone, il primo elettrone devia dalla propria direzione e così fa anche il secondo elettrone quando assorbe il fotone.

L'interazione completa tra gli elettroni avviene attraverso una serie continua di scambi di fotoni.

Figura 2



¹⁴ I diagrammi di Feynman risultano lo strumento più semplice ed efficace per rappresentare le interazioni elettromagnetiche. Nel 1965, per i suoi contributi dati alla formulazione dell'Elettrodinamica Quantistica, Richard Feynman, ricevette il premio Nobel per la fisica.

Ogni particella elettricamente carica emette e riassume di continuo fotoni virtuali e/o li scambia con altre particelle cariche. Quando due elettroni (ovvero due cariche dello stesso segno) si scambiano fotoni virtuali, si respingono; quando un protone e un elettrone (ovvero due cariche di segno opposto) si scambiano fotoni virtuali, si attraggono. In termini di fisica classica, si potrebbe dire che le particelle esercitano l'una sull'altra una forza repulsiva o attrattiva.

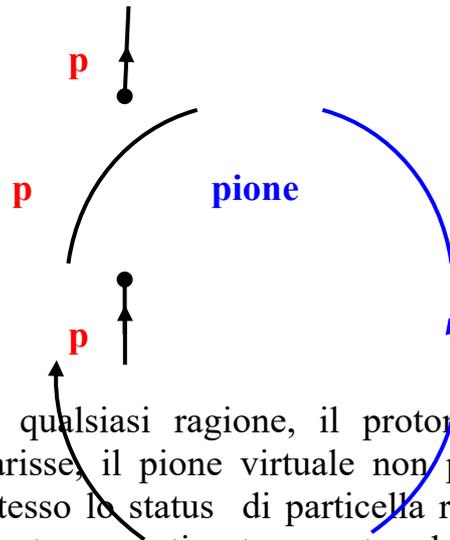
E' interessante notare come nei suindicati "scambi di forze" nessuna delle due particelle "urta" effettivamente l'altra: esse semplicemente interagiscono (*interagiscono*) mediante lo scambio di fotoni, e la forza non è altro che l'effetto macroscopico collettivo di questi ripetuti scambi di fotoni. Il concetto di forza in fisica subatomica deve perciò lasciare il passo al concetto di interazione (*interazione*) tra particelle attraverso campi costituiti da insiemi di fotoni virtuali. Nel caso delle interazioni elettromagnetiche, le particelle virtuali del campo scambiate sono fotoni; nel caso delle interazioni tra i componenti del nucleo atomico le particelle scambiate sono mesoni.

Il meccanismo di "inter-azione" appena descritto può essere ulteriormente esemplificato immaginando due pattinatori fermi su una lastra di ghiaccio e distanti tra loro qualche metro. La forza repulsiva tra di essi può essere illustrata attraverso lo scambio di un oggetto: ad esempio una pesante palla. Il primo pattinatore lancia la palla e conseguentemente rincula; l'altro riceve la palla e viene da essa spinto all'indietro, cosicché alla fine del processo, i due pattinatori si allontanano reciprocamente. I due pattinatori dell'esempio rappresentano le particelle che interagiscono, la palla la particella virtuale.

Quando, come nella Figura 2, un elettrone emette un fotone virtuale che viene assorbito da un altro elettrone, si dice che la microparticella sta interagendo con un'altra particella. Quando invece un elettrone emette un fotone e lo riassume, si dice che sta interagendo con se stesso. L'auto-interazione rende il mondo delle particelle subatomiche una realtà caleidoscopica fatta da incessanti processi di trasformazione. I protoni, come gli elettroni, possono interagire con se stessi in più di una maniera. La più semplice auto-interazione che può effettuare un protone è

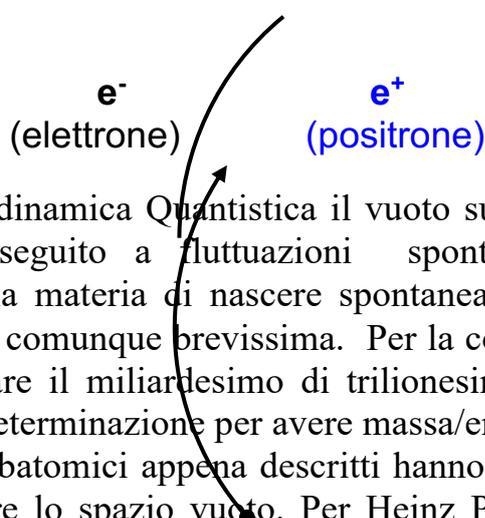
l'emissione e il riassorbimento di una particella virtuale chiamata pione neutro (vedere la Figura 3) nei tempi consentiti dal principio di Indeterminazione.

Figura 3



Se, però, per una qualsiasi ragione, il protone (o qualsiasi altra particella “progenitrice”) scomparisse, il pione virtuale non potrebbe più essere riassorbito; assumerebbe così lui stesso lo status di particella reale. E’ questo ciò che accade quando un protone incontra un antiprotone, entrambi scompaiono improvvisamente, lasciando il pione, o magari la nube di fotoni virtuali che li accompagnano, da soli: queste particelle virtuali si presentano così al mondo come particelle reali, dato che il loro “debito” al principio di Indeterminazione è stato saldato dalla massa-energia della coppia protone-antiprotone annichilita. Nelle Figure 2 e 3 è stata rappresentata la creazione (e lo scambio) di particelle virtuali in presenza di enti reali: elettroni e protoni. Il formalismo dell’Elettrodinamica Quantistica prevede che un processo di creazione di particelle virtuali possa avvenire anche in assenza di materia. Il diagramma di Figura 4 mostra un processo di creazione e distruzione (annichilazione) nel vuoto di particelle virtuali di carica opposta elettrone-positrone (il positrone è un elettrone con carica positiva).

Figura 4



Nell’Elettrodinamica Quantistica il vuoto subisce una sorta di “polarizzazione” (e questo in seguito a fluttuazioni spontanee del campo elettromagnetico) consentendo alla materia di nascere spontaneamente. La vita media delle coppie virtuali create è comunque brevissima. Per la coppia elettrone-positrone ad esempio, non può superare il miliardesimo di trilionesimo di secondo (tempo concesso dal principio di Indeterminazione per avere massa/energia dal “nulla”).

Gli eventi subatomici appena descritti hanno dato ai fisici una nuova prospettiva per comprendere lo spazio vuoto. Per Heinz Pagels della Rockefeller University, il vuoto assomiglia alla superficie dell’oceano: *“Immaginate di sorvolare l’oceano con un jet. Da quel punto di osservazione ottimale la superficie sembra perfettamente*

uniforme e vuota. Ma voi sapete che se foste su una barca, vedreste enormi onde tutt'attorno. Così si comporta il vuoto. Su grandi distanze -ovvero le distanze che noi sperimentiamo come esseri umani- lo spazio ci appare completamente vuoto. Ma se potessimo analizzarlo da molto vicino vedremmo tutte le particelle quantistiche entrare e uscire dal nulla". Il concetto sembra sfidare il buonsenso ma è perfettamente valido nell'ambito dell'Elettrodinamica Quantistica. "Non c'è punto più fondamentale di questo", ha scritto il fisico John Wheeler, "lo spazio vuoto non è vuoto. In realtà è la regione dove avvengono i fenomeni fisici più violenti".

Il “problema della misurazione” in meccanica quantistica

Nel contesto logico della meccanica classica la possibilità di estrarre informazioni sullo stato di un sistema fisico senza per questo modificarlo in maniera significativa, consentiva di porre lo strumento di misura (del quale appunto ci si serviva per estrarre queste informazioni) al di fuori della struttura formale di tale teoria. L'osservazione al telescopio della posizione della Luna non produceva infatti alterazioni apprezzabili sullo stato di questo corpo, e lo strumento poteva essere pertanto considerato una sorta di concetto primitivo, esterno alle elaborazioni teoriche nell'ambito delle quali veniva utilizzato ...

Questa nozione di “misura ideale” comincia a mostrare i primi segni di crisi nell'elettromagnetismo classico, nel cui contesto la misurazione delle grandezze elettriche fondamentali, realizzata attraverso l'ordinaria strumentazione elettromagnetica, perturba la situazione fisica nella quale viene compiuta. Quando infatti viene realizzata una misura di una intensità di corrente attraverso un amperometro (e/o galvanometro), è necessario porre lo strumento in serie nel circuito la qual cosa, a causa della corrente che lo strumento assorbe, perturba la corrente da misurare.

Queste perturbazioni comunque, sono nettamente differenti rispetto a quelle che abbiamo viste intervenire nel Principio di Indeterminazione per almeno due ragioni.

- La prima ragione è che la perturbazione indotta dallo strumento può essere, almeno in linea di principio, resa arbitrariamente piccola fino a diventare irrilevante, attraverso la costruzione di apparecchi sofisticati, caratterizzati da un “assorbimento” interno sempre minore, in modo tale che la corrente perturbata coincida con quella che circola nel circuito prima dell'inserimento del dispositivo di misura. Inoltre, una volta nota la resistenza interna dello strumento, la perturbazione da esso prodotta può essere rigorosamente calcolata.
- La seconda ragione è che possiamo decidere di misurare una intensità di corrente anche attraverso “strumenti” di tipo diverso dall'amperometro che hanno la caratteristica di non assorbire corrente e di non produrre quindi alcuna perturbazione sul sistema fisico misurato ...

L'esistenza del quanto d'azione di Planck introduce in fisica classica una situazione completamente nuova dal punto di vista della descrizione del processo di misura: ogni interazione **I** tra sistema atomico **S_A** e strumento **D** non è più riducibile ad una registrazione da parte di **D** del valore della grandezza misurata su **S_A**, ma comporta una importante **modifica anche del sistema S_A**, che non è

eliminabile né praticamente, né concettualmente. L'interazione può anche essere uguale a zero, ma in tal caso non si compie alcuna osservazione e non si acquisisce alcuna conoscenza sulle proprietà del sistema atomico. Se l'interazione è invece diversa da zero, **essa non può essere resa arbitrariamente piccola** e non è quindi neppure concettualmente eliminabile (come invece avveniva in fisica classica), ma deve avere la **costante di Planck come valore minimo**. 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. Ora le dimensioni fisiche di "energia per tempo" e di "quantità di moto per spazio" sono proprio quelle dell'**azione**, sono cioè quelle della costante (h) di Planck. Il termine **interazione** usato per ogni processo quantistico di misurazione è quindi vero letteralmente, dato che si ha proprio a che fare con lo scambio della grandezza fisica azione fra lo strumento e il sistema fisico misurato, che a causa delle dimensioni atomiche di quest'ultimo, comporta su di esso una inevitabile perturbazione. Questo carattere perturbativo della misurazione in microfisica obbliga ad abbandonare lo schema classico della registrazione in favore del nuovo schema :

$$(1) \quad S_A \leftrightarrow D \rightarrow O$$

che indica esplicitamente la natura **simmetrica** e non più unidirezionale del processo di interazione tra apparato misuratore **D** e sistema atomico misurato **S_A**. Anche in questo nuovo schema la seconda interazione tra apparato **D** e osservatore **O** continua ad essere indicata come una registrazione da parte di **O** del risultato da lui osservato su **D**. Si tratta di uno schema che non è comunque universalmente accettato e sono state avanzate, come vedremo, proposte più radicali, che sostengono la natura **simmetrica anche** dell'interazione tra **O** e **D**, e la conseguente possibilità di una modifica, da parte della **mente** o della **coscienza** di **O**, dello stato fisico di **D** e, attraverso questo, dello stesso **S_A** ...

La **descrizione matematica** del processo di interazione **I** da parte della teoria quantistica fa nascere tutta una serie di gravi difficoltà, generalmente note come "**problema quantistico della misurazione**". Le radici logiche delle difficoltà in parola, vanno ricercate nella coesistenza, all'interno del formalismo quantico, di due differenti modalità di evoluzione della funzione d'onda che, come è noto, viene sempre associata allo stato di un qualsiasi sistema quantistico.

Da un lato abbiamo infatti l'equazione di Schrödinger che regola in modo rigorosamente deterministico l'evoluzione temporale dei sistemi fisici inosservati, dall'altro la descrizione probabilistica della stessa data da Born, che condiziona il tipo di misurazioni effettuate per determinate le "proprietà" dei sistemi fisici osservati.

Il ricorso a entrambe queste modalità di descrizione, l'una deterministica e l'altra probabilistica, è comunque inevitabile, nello stesso senso in cui è necessario servirsi delle proprietà ondulatorie e delle proprietà corpuscolari, per spiegare le proprietà fisiche dei microoggetti ...

Ora **applicando l'equazione di Schrödinger alla descrizione del processo di misura**, interpretando cioè detto processo come qualsiasi procedimento di interazione tra due oggetti fisici (corrispondenti al sistema misurato **S_A** e all'apparato

misuratore **D**), ogni volta che S_A è in uno **stato di sovrapposizione** di due o più stati microscopici, lo stato finale del sistema complessivo $S_A + D$ risulta, a **causa della linearità della equazione di Schrödinger, anch'esso in uno stato di sovrapposizione, in questo caso di differenti stati macroscopici.**

Una simile possibilità implicherebbe che l'osservatore **O** che controlla l'apparato **D**, noterebbe quest'ultimo registrare simultaneamente tutti i differenti risultati previsti dal formalismo quantistico il che, oltre risultare paradossale, rende teoricamente impossibile ogni atto di misura.

Per evitare questa conclusione contraddittoria sono state proposte diverse soluzioni (a seconda della risposta da fornire al livello in cui dovrebbe avere luogo il processo di riduzione d'onda; il passaggio cioè da una sovrapposizione di diversi stati fisici **a un preciso stato finale**). Si tratta naturalmente di un problema di notevole rilevanza per i fenomeni della fisica, dato che esso investe direttamente due questioni fondamentali strettamente connesse; il dominio di applicazione del formalismo quantistico e la descrivibilità dello strumento di misurazione da parte del formalismo stesso.

- La traccia permanente di Bohr

La **PRIMA RISPOSTA** al problema della misurazione è contenuta nella "Teoria della Misurazione" di Bohr la quale afferma che la riduzione della funzione d'onda avviene a livello dello **strumento di misura**. Questa ipotesi riconosce, quindi, allo strumento, uno status particolare rispetto a quello degli ordinari sistemi macroscopici (S_M), le cui interazioni con i microoggetti continuano ad essere descritte dall'equazione di Schrödinger. Nel caso di Bohr lo schema del processo di misura è del tipo $S_A \leftrightarrow D \rightarrow O$ e il dominio di validità del formalismo quantistico $F_{qt}(S_A, S_M)$, si estende ai sistemi microscopici e macroscopici, **escludendo gli strumenti di misura.**

Si tratta comunque di una soluzione assai poco soddisfacente, sia per la rinuncia alla elaborazione di una rigorosa teoria matematica per la descrizione dei processi di **Interazione**, sia per l'assunzione di una differenza di principio tra lo strumento **D** e un qualsiasi altro sistema macroscopico S_M .

- La soluzione soggettivistica di von Neumann e Wigner

La **SECONDA RISPOSTA** al problema della misurazione, è contenuta nella "teoria soggettivistica" di von Neumann. Essa assume che il processo di riduzione della funzione d'onda si verifichi a livello della **coscienza dell'osservatore**. Tale risposta consente di includere lo strumento tra gli oggetti descrivibili dal formalismo quantistico, il cui dominio di validità $F_{qt}(S_A, S_M, D)$, si estende quindi a tutti gli oggetti fisici, compresi naturalmente gli strumenti di misura, escludendo la **coscienza dell'osservatore**. Questa, concepita come **agente esterno al mondo fisico**, è la responsabile della riduzione d'onda, che avviene all'interno di un processo rigorosamente simmetrico, corrispondente a : $S_A \leftrightarrow D \leftrightarrow O$

Nella realtà ciò che avviene è un trasferimento a catena di sovrapposizione di stati. La particella osservata "riversa" la propria sovrapposizione sull'apparato di misura, l'apparato di misura sugli organi di senso e questi sul cervello

dell'osservatore. La catena di "condizionamenti reciproci" non potrebbe mai avere fine se non fosse per l'entrata in scena della **coscienza** (o "**facoltà di introspezione**") dell'osservatore, la quale per le sue caratteristiche di "irriducibilità" permette di troncare la catena delle sovrapposizioni, consentendo la "misura" del microoggetto.

La teoria di von Neumann è stata ripresa in tempi recenti dal Premio Nobel Eugene Wigner il quale ne ha formulato una versione definita INTERAZIONISTA. Secondo questa teoria esistono due livelli di realtà. Una realtà primaria (e fondamentale) che è la realtà mentale. Una realtà secondaria (e relativa) che comprende tutte le altre "cose" (materia, spazio, ecc.). Secondo Wigner l'atto di misura di un "essere cosciente" interagendo col mondo materiale modifica, attraverso il cambiamento del valore della funzione d'onda, il mondo fisico, consentendo il processo di misura ...

- La teoria dei molti mondi, delle molte storie e delle molte menti

La **TERZA RISPOSTA** al problema della misurazione è contenuta nella teoria dei Molti Mondi di Hugh Everett III (successivamente ripresa e ampliata da Bryce De Witt). Essa afferma che la riduzione della funzione d'onda **non ha in realtà mai luogo e che tutte le possibilità previste dal formalismo si realizzano simultaneamente in differenti ramificazioni dell'universo**. Si restituisce così realtà alla funzione d'onda considerandola una vera e propria descrizione dell'universo. La ricompensa per questa promozione consiste appunto nel superamento del paradosso della misurazione; non occorre, infatti, che avvenga una speciale riduzione alla realtà al momento dell'osservazione ... Nella teoria dei Molti Mondi ogni volta che si compie la misurazione di un microoggetto l'universo si scinde in due universi **fisicamente reali** e "identici". La sola differenza tra questi universi sta nel diverso "stato" della particella osservata. Nel caso della misurazione dello spin di un elettrone, ad esempio, in un universo lo spin risulterà essere SU, nell'altro risulterà essere GIU'.

Nonostante questo suo carattere paradossale la teoria di Everett ha una sua consistenza interna e l'importante vantaggio di **descrivere lo strumento come ogni altro oggetto fisico** $F_{qt}(S_A, S_M, D, O)$. Infatti il dominio di applicazione della teoria quantistica si estende, nella prospettiva di Everett, agli oggetti macroscopici S_M , agli oggetti microscopici S_A , agli strumenti di misura D e agli stessi osservatori O , tutti concepiti come elementi della realtà fisica, mentre lo schema del processo di misura, che tiene conto del processo di ramificazione dell'universo, può essere così esemplificato :

$$S_{A1} \leftrightarrow D1 \rightarrow O1$$

$$S_{A2} \leftrightarrow D2 \rightarrow O2$$

Teoria delle molte storie

Un'alternativa alla suddivisione fisica degli universi è stata proposta dal Premio Nobel Murray Gell-Mann e da James B. Hartle su un'idea di R. B. Griffiths. Tale alternativa -detta delle "**Molte Storie**"- prevede che una serie di prescrizioni matematiche possano descrivere le probabilità di tutte le possibili "storie" che si può

immaginare caratterizzino lo svolgersi di un processo di misura ... Dette storie descrivono soltanto "potenzialità" e non realtà fisiche ...

Teoria delle molte menti

Una terza alternativa alla suddivisione fisica degli universi è stata proposta da David Albert e Barry Loewer della Columbia University. Nella loro teoria - detta delle "**Molte Menti**"- i due studiosi americani ipotizzano che a ciascun osservatore o sistema fisico "senziente" sia associato un insieme infinito di stati mentali che esperiscono i diversi esiti possibili delle misurazioni quantistiche. La famiglia delle scelte latenti nell'equazione di Schrödinger corrisponderebbe così alla miriade di esperienze subite da queste menti e non a un'infinità di universi paralleli materiali.

- Le teorie a "riduzione dinamica" e macrorealistiche

La **QUARTA RISPOSTA** al problema della misurazione raggruppa in sé le teorie che prevedono che la riduzione della funzione d'onda si verifichi attraverso un "processo dinamico", attraverso il **passaggio dal livello microscopico a quello macroscopico**.

Ecco di seguito elencati i diversi tentativi che sono stati fatti in queste direzioni:

- a) le Regole di Superselezione di **Landau**, le quali *vietano la sovrapposizione* di stati macroscopici ...
- b) le teorie della misurazione di **Daneri-Loinger-Prosperi**, di **Ludwig**, di **Prigogine** (e collaboratori); secondo questi studiosi lo schema del processo di misura è simile a quello di Bohr, ma il dominio di applicazione del formalismo quantistico viene ristretto ai soli sistemi atomici $F_{qt}(S_A)$, assumendo che la descrizione dei fenomeni macroscopici, e tra essi anche quella dell'interazione **I**, richieda l'elaborazione di una *nuova macrodinamica quantistica*, in mancanza della quale è opportuno fare ricorso (per la descrizione del processo di misura) a teorie classiche o semi-classiche come la meccanica stocastica.
- c) la teoria di **Ghirardi-Rimini-Weber** (GRW), la quale afferma che la riduzione della sovrapposizione degli stati avviene *spontaneamente* al passaggio dalle dimensioni microscopiche della particella alle dimensioni macroscopiche dell'apparecchiatura di misura. Nell'ambito di questa teoria, al passar del tempo, la funzione d'onda di una particella si "espande". Durante l'espansione vi è la probabilità che l'onda urti "qualcosa sullo sfondo" e d'un tratto diventi localizzata. Per le particelle singole la probabilità di un tale urto è molto bassa, circa 1 ogni 100 milioni di anni, ma alle dimensioni degli strumenti di misura le probabilità del crollo della funzione d'onda salgono a 1 ogni 100 picosecondi (1 picosecondo = 10^{-12} secondi).
- d) molto simile alla teoria di GRW è la teoria basata sulla "*decoerenza spontanea*" elaborata da Wojciech Zurek del Los Alamos Laboratory. Essa si basa sull'idea che "l'ambiente" distrugge lo stato di sovrapposizione quantistica ...
- e) la teoria di **Penrose**, la quale afferma che la riduzione avviene per *collasso spontaneo* di due stati della metrica spazio-temporale in seguito all'azione della Gravità Quantistica (alle dimensioni di Planck la gravità diventa Gravità Quantistica ...). Ora, in linea col postulato della sovrapposizione degli stati della M.Q., si avrebbero due differenti campi gravitazionali sovrapposti; vi sarà un

momento in cui le geometrie spazio-temporali di questi due campi sono abbastanza differenti l'una dall'altra, da costringere la Natura a "SCEGLIERE" fra di esse, operando una qualche sorta di riduzione d'onda ... Più grande è la differenza energetica tra gli stati sovrapposti, più breve è la durata della sovrapposizione.

• Per un nucleone il tempo di riduzione è dell'ordine dei milioni di anni.

• Per una massa di 10^{-3} cm è dell'ordine del milionesimo di secondo.

Nota: Nella riduzione dinamica, all'equazione di Schrödinger viene aggiunto un termine **non lineare** per cui, quando le dimensioni del sistema tendono a diventare macroscopiche, i suoi stati sovrapposti convergono in un unico stato.

Conclusioni

Per quanto le teorie sopra esposte sembrano realizzare un sostanziale progresso nei confronti della primitiva interpretazione data da Bohr, sia sul piano formale, sia sul piano fisico ed epistemologico (dato che la distinzione tra microscopico e macroscopico appare assai più fondata di quella tra sistema fisico e strumento di misura), esse vanno incontro ad alcune gravi difficoltà, che impediscono (almeno per il momento) di considerarle una reale soluzione al problema della riduzione della funzione d'onda nel processo di misura.

Il “paradosso delle misurazioni a risultato negativo”

Nei confronti delle proposte di teorie “Dinamiche” e **Macrorealistiche** [non sono possibili stati macroscopici sovrapposti] **della misurazione** avanzate sino ad oggi, esiste tuttavia una grave **obiezione** avanzata da Wigner [9] e che utilizza un paradosso proposto da Renninger [10]. Tale obiezione evidenzia l'esistenza di processi di misura che, pur informando correttamente l'osservatore sull'osservabile misurata attraverso la riduzione del pacchetto d'onde, avvengono senza alcuna modifica controllabile dell'apparato misuratore.

L'argomento di Renninger si basa sulla proposta del seguente Gedanken experimente: Consideriamo una sorgente di singoli fotoni E che emette isotropicamente tali particelle in tutte le direzioni e che sia parzialmente circondata da uno schermo semisferico (Schermo 1) di centro E e raggio R_1 completamente circondata da un secondo schermo sferico (Schermo 2) di raggio $R_2 > R_1$ (vedere la figura 5).

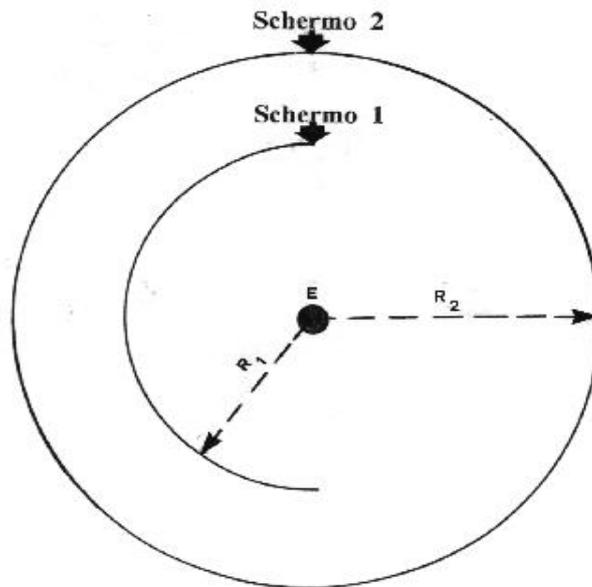
Si supponga inoltre che entrambi gli schermi siano ricoperti di una sostanza sensibile in grado di rivelare i fotoni. In questo modo il fotone emesso dalla sorgente E può essere assorbito dal primo o dal secondo schermo. Ora la probabilità che dopo un certo periodo dall'emissione un fotone colpisca lo Schermo 1 o lo Schermo 2 è data da $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$.

Avremo così due possibilità :

- La prima possibilità è la rivelazione del fotone sul primo schermo, che implica l'annullarsi della Ψ_2 e il trasformarsi della Ψ_1 in certezza.

Secondo il postulato della riduzione della funzione d'onda la nuova situazione fisica sarà quindi descritta da: $\Psi = \Psi_1$.

In questo caso il processo di riduzione può essere spiegato sulla base delle Figura 5



teorie Macrorealistiche e “Dinamiche” della misurazione, come conseguenza dell’interazione tra il fotone rivelato e l’apparato di misura (costituito dallo Schermo 1), che a seguito di tale interazione evolverà verso lo stato stabile di equilibrio termodinamico, dato da un ben definito vettore di stato Ψ_1 .

- La seconda possibilità è che al tempo t_1 (calcolato considerando il tempo medio di emissione, la velocità della luce e la distanza R_1) **non** abbia luogo la rivelazione del fotone da parte dello Schermo 1. Questo implica che per il postulato di riduzione la situazione fisica sarà descritta da: $\Psi = \Psi_2$.

In quest’ultimo caso, però, il cambiamento di descrizione matematica **non può assolutamente essere posto in relazione con un qualsiasi processo fisico di interazione** tra il fotone e lo strumento macroscopico (nel nostro caso lo Schermo 1), ma appare soltanto come una conseguenza dell’informazione che noi, **come osservatori umani**, abbiamo ottenuto su una certa situazione fisica, non osservando il verificarsi di un dato fenomeno. Questo significa che per spiegare la transizione da $\Psi = \Psi_1 + \Psi_2$ a $\Psi = \Psi_2$ non possiamo più fare appello a una teoria della misurazione che consideri lo strumento come oggetto macroscopico in uno stato metastabile che evolve verso la stabilità come conseguenza dell’interazione con l’oggetto misurato.

Il paradosso di Renninger sembra portare un argomento apparentemente conclusivo a favore della teoria soggettivistica di von Neumann-Wigner, che appare la sola in grado di spiegare come l’assenza di un processo di interazione tra strumento e oggetto misurato possa portare ugualmente alla riduzione della funzione d’onda ...

La possibilità di una soluzione realistica del paradosso delle misure a risultato negativo è stata avanzata da Gino Tarozzi dell’Università di Urbino in un articolo del 1985 [11] ...

Questa soluzione si basa sull’ipotesi che le **onde quantiche siano onde reali**, capaci cioè di produrre effetti concreti ...

Obiezioni alla “soluzione-interpretazione soggettivistica”

1° **OBIEZIONE.** Finché non è apparso un essere cosciente (un "osservatore" cosciente) l'universo deve essere rimasto "inattuato"? Deve essere "vissuto" soltanto a livello potenziale?

Al primo atto di percezione cosciente il cosmo deve essersi poi trasformato istantaneamente in una precisa attualità ...

2° **OBIEZIONE.** Cosa deve intendersi esattamente per **essere cosciente**? La riflessione di Bell su questo punto è centrale: *"Forse la funzione d'onda dell'universo ha dovuto aspettare per fare il salto (verso la "definitezza") migliaia di milioni di anni: ovvero la comparsa della prima creatura vivente costituita da una singola cellula? Oppure ha dovuto attendere un po' di più, finché non è emerso un sistema più qualificato ... uno con un dottorato di ricerca?"*

Il paradosso del “gatto di Schrödinger”

Nel 1935 Erwin Schrödinger, nell'intento di dimostrare l'incompletezza e le contraddizioni insite nella teoria quantistica, propose, in un articolo passato ormai alla storia (E. Schrödinger, *Naturwiss*, 23,1935), il seguente esperimento ideale: *“Un gatto è posto all'interno di una camera d'acciaio assieme al seguente marchingegno ... in un contatore Geiger c'è una piccola quantità di una sostanza radioattiva, in modo tale che forse nell'intervallo di un'ora uno degli atomi decadrà, ma anche, con eguale probabilità nessuno subirà questo processo. Se accade che uno degli atomi decade il contatore genera una scarica e attraverso un relay libera un martello che frantuma un piccolo recipiente di vetro che contiene dell'acido prussico. Se l'intero sistema è rimasto isolato per un'ora, si può dire che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo ha subito un processo di decadimento ...*

La funzione d'onda del sistema esprimerà la situazione completa per mezzo della combinazione di due termini che si riferiscono al gatto vivo e al gatto morto (perdonatemi l'espressione), due situazioni mescolate o sfumate in parti uguali.”



Secondo Schrödinger perciò, insistere sulla completezza della teoria quantistica, significa ammettere che dopo un'ora dall'inizio dell'esperimento la realtà oggettiva interna alla camera d'acciaio (e quindi anche il gatto) è rappresentata dalla sovrapposizione lineare di due termini:

$$\Psi(\text{camera}) = \Psi_1 \text{ (nessun atomo si è disintegrato)} + \Psi_2 \text{ (un atomo si è disintegrato)}$$

La situazione appena illustrata è la medesima che si incontra nella descrizione degli stati di sovrapposizione negli *esperimenti a due fenditure*, negli interferometri di Mach-Zehnder (dove un singolo fotone, dopo aver interagito con lo specchio semitrasparente, prende due diverse strade; due “strade sovrapposte” ...) ...

Inoltre, prosegue Schrödinger, *”volendo seguire alla lettera i postulati della teoria quantistica, se dopo un’ora dall’inizio dell’esperimento la camera viene aperta e si trova, ad esempio, che il gatto è morto, occorre ammettere che è stato l’atto di osservare che l’ha ucciso eliminando dalla sovrapposizione la parte che rappresenta il gatto vivo.”*

[Il + della formula $\Psi_{\text{(gatto)}} = \Psi_1_{\text{(gatto vivo)}} + \Psi_2_{\text{(gatto morto)}}$, implica che non si può asserire che il gatto è vivo oppure morto e che questa compresenza di potenzialità incompatibili può eliminarsi soltanto eseguendo un’osservazione mirata a determinare se il gatto è vivo o morto. In senso letterale, se si riconosce il dato di fatto che guardando nella scatola troviamo certamente o il gatto vivo o il gatto morto, siamo costretti a concludere che è il nostro atto di percezione cosciente che determina il destino benigno o letale del gatto.]

Sempre nell’ambito dell’analisi delle conseguenze “degli atti di osservazione” emerge un’ulteriore aspetto paradossale. Se lo sperimentatore decide di rimandare indefinitamente l’osservazione della camera, il gatto resta nel suo stato schizofrenico di vita latente fino a quando non gli viene data una dimensione definitiva, in virtù della cortese, ma capricciosa curiosità dello sperimentatore ...

Alcuni studiosi hanno sostenuto che un gatto non può essere considerato un osservatore appropriato in quanto non possiede quella piena consapevolezza della propria esistenza, che invece hanno gli esseri umani, sicché sarebbe troppo poco “acuto” per capire se è vivo, morto o “vivo-morto”.

Per aggirare questa obiezione è stato suggerito (sempre in un esperimento mentale) di sostituire il gatto con un essere umano.

Generalmente nella comunità dei fisici questo volontario è conosciuto come “l’amico di Wigner”, dato che fu proprio Eugene Wigner ad analizzare questo aspetto del paradosso [12].

Il paradosso “dell’amico di Wigner”

Ad un così valido complice installato all’interno della camera d’acciaio, si potrebbe ora chiedere, nel caso di una sua sopravvivenza all’esperimento, come si sia sentito durante l’esperimento. Non vi è dubbio che egli risponderebbe “bene”, nonostante la nostra supposizione che il suo corpo sia stato in una condizione di “vita-morte” per tutta la durata del test.

In realtà il vero problema è stabilire le modalità che inducono l’amico di Wigner a rispondere in un certo modo alla domanda formulata dalla persona (Wigner) che si trova durante l’esperimento fuori della camera, nonché comprendere a che livello avviene la riduzione dello stato di sovrapposizione ...

E’ chiaro che il paradosso dell’amico di Wigner ci pone davanti ad una situazione contraddittoria che vede il caso di **due esseri dotati di “coscienza”** (uno dei quali si

trova dentro la camera d'acciaio) **coinvolti nella medesima situazione sperimentale e che "confrontano" i risultati delle loro osservazioni.** Chi in questa ottica è realmente responsabile della riduzione dello stato di sovrapposizione ?

Seguendo una logica vicina alla teoria quantistica ortodossa [vicina a Bohr e alla soluzione che lui dà del *problema della misurazione ...*], solo l'osservatore fuori della camera, è in grado di operare questa riduzione. Infatti colui che si trova all'interno della camera (l'amico di Wigner, per intenderci) **"essendo parte"** dell'esperimento (della strumentazione ...) deve inevitabilmente essere descritto dalla medesima funzione d'onda che descrive tutti gli oggetti che si trovano dentro alla camera (i quali dopo un'ora dall'inizio dell'esperimento risultano in una combinazione di due stati ...), la qual cosa non lo rende adatto a ridurre lo stato di sovrapposizione. Solo chi si trova fuori del "sistema camera d'acciaio" (ovvero Wigner), col suo atto di osservazione può ridurre lo stato di sovrapposizione.

A questo punto e nell'ottica appena descritta, risulta evidente che la meccanica quantistica diventa una teoria che conduce al solipsismo più esasperato. Solo un determinato osservatore infatti (nel nostro caso Wigner) [**e non il suo amico** o un altro essere vivente ...], è in grado di produrre e conoscere la vera realtà ; una realtà diversa da quella che sperimentano gli altri esseri umani.

In passato l'atteggiamento per cui risulta reale solo il soggetto e le sue percezioni, mentre tutte le altre cose e le altre persone sono "sovrastrutture", aveva mietuto consensi [Cartesio ...]; Wigner comunque lo ritiene inaccettabile ...

Per sfuggire al solipsismo Wigner avanza l'ipotesi che la meccanica quantistica non si applichi agli esseri umani. Come si possa conciliare questa conclusione con il fatto che la teoria dei quanti debba descrivere la realtà materiale in ogni suo aspetto lo si è già visto nella soluzione che von Neumann e Wigner danno del problema della misurazione.

"La consapevolezza che caratterizza gli esseri umani è un attributo irriducibile che spezza la catena delle sovrapposizioni producendo la riduzione della funzione d'onda ..."

Secondo Wigner perciò, l'amico che si trova all'interno della camera, diversamente del gatto di Schrödinger, non sarà mai preda di stati di sovrapposizione. Egli infatti, nonostante si trovi nella stessa condizione del gatto, sarà, così come qualsiasi altro essere dotato di coscienza¹⁵, in grado di ridurre immediatamente ed autonomamente lo stato di sovrapposizione, comprendendo, fra l'altro, "la piega" che sta prendendo il suo immediato destino ...

Non c'è da stupirsi che le idee di Wigner abbiano suscitato le più ampie critiche. Gli scienziati, normalmente, guardano alla consapevolezza come a qualcosa che, nella migliore delle ipotesi, è mal definito e nella peggiore ipotesi, non esiste dal punto di vista fisico.

Si deve però considerare che **tutte le nostre osservazioni**, e tramite loro tutta la scienza, sono in definitiva basate **sulla nostra consapevolezza** del mondo circostante. Secondo la concezione abituale, la consapevolezza può venire stimolata dal mondo esterno ma senza influenzarlo a sua volta, violando così il principio sotto certi aspetti universale che comporta [simmetria] per ogni azione una qualche

reazione. [EUGENE P. WIGNER, Premio Nobel nel 1963 for his contributions to the theory of the atomic nucleus and the elementary particles, particularly through the discovery and application of fundamental **symmetry** principles] Wigner propone di riformulare il principio includendovi il caso della consapevolezza, **la cui reazione sul mondo** consisterebbe, in pratica, nel ridurlo da sovrapposizione a realtà.

Un aspetto decisamente particolare che deriva dall'accettazione della concezione di Wigner si ha nel caso di due "esseri coscienti" che osservano in tempi e modi diversi lo stesso sistema.

Per illustrare i problemi che possono sorgere in un caso di questo genere, supponiamo di considerare come nelle situazioni precedenti un atomo il cui decadimento attiva un Geiger, questa volta però in assenza di qualsiasi osservatore immediatamente coinvolto nell'esperimento e ove il contatore (attraverso il relay) comandi lo spostamento di un indice.

¹⁵ *"Il mio amico, scrive Wigner in "Two Kinds of Reality", Bloomington, Indiana University Press, 1967, ha gli stessi tipi di impressioni e sensazioni che ho io ..."*

Si supponga ora che dopo un minuto, allorché la probabilità del decadimento è del 50 %, l'esperimento termini, e l'indice del contatore si blocchi nella posizione in cui si trova : se l'atomo si è disintegrato, l'indice risulterà spostato, in caso contrario risulterà nella posizione originaria. L'indice può quindi essere letto in qualsiasi momento successivo.

Ora, anziché far "osservare" direttamente l'indice ad uno sperimentatore, si fotografa il contatore Geiger. Una volta sviluppata la fotografia, lo sperimentatore la guarda, senza mai consultare direttamente il contatore. Secondo Wigner è solo a questo stadio finale della procedura, che fa la sua comparsa la realtà ; perché la realtà deve la propria creazione all'atto consapevole di osservare compiuto dallo sperimentatore o da chiunque altro. Si dovrebbe quindi concludere che, prima che la fotografia fosse esaminata, atomo, contatore Geiger e fotografia, fossero tutti negli stati schizofrenici dovuti alla coesistenza di stati sovrapposti. Tutto ciò anche nel caso in cui si rimandasse di parecchi anni lo sviluppo della fotografia. Questo piccolo angolo d'universo resterebbe quindi sospeso nell'irrealtà fino a quando lo sperimentatore (o qualche curioso di passaggio) si degnasse di dare un'occhiata alla fotografia.

Il problema veramente paradossale comunque, nasce allorché alla fine dell'esperimento, si prendano due fotografie successive dell'indice collegato al contatore ; fotografie che chiameremo A e B. Poiché l'indice è stato bloccato, sappiamo che l'immagine A deve essere identica all'immagine B. Il guaio comincia quando entrano in scena due sperimentatori -chiamiamoli Anna e Bruno- e Bruno guarda la fotografia B prima che Anna guardi quella A. Così B è stata scattata dopo A, ma è stata guardata prima. La teoria di Wigner richiede che Bruno sia in questo caso l'individuo consapevole responsabile della creazione della realtà, e ciò perché guarda per primo la sua documentazione fotografica. Supponiamo che Bruno veda l'indice spostato e perciò affermi che l'atomo si è disintegrato. Naturalmente, quando Anna guarda la fotografia A, anche questa mostrerà l'indice spostato. Il

problema sta nel fatto che quando è stata scattata la fotografia A, quella B non esisteva ancora, quindi in qualche modo misterioso l'atto di guardare B effettuato da Bruno è la causa per cui A è diventata identica a B, anche se A è stata scattata prima di B.

Sembra dunque si sia obbligati a credere ad una sorta di *causalità retroattiva* ...

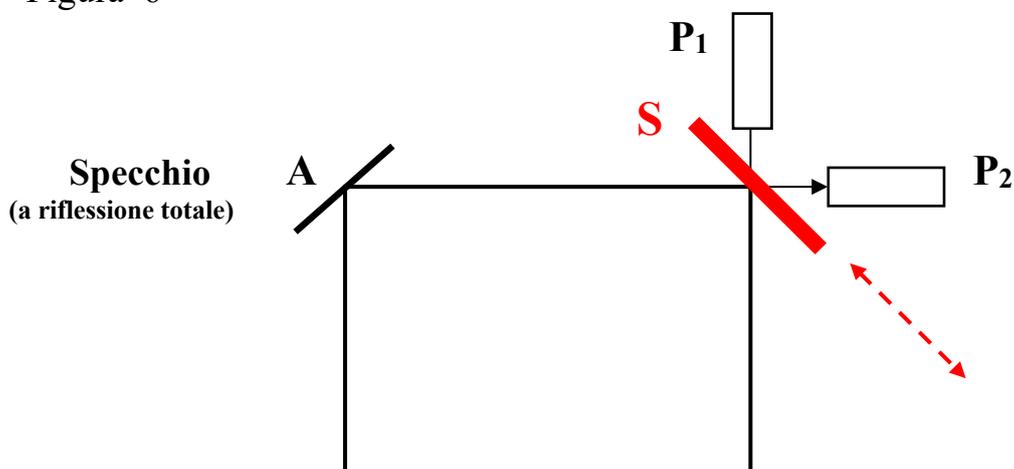
Figura

Esperimenti a scelta ritardata

Alla fine degli anni settanta del secolo scorso uno dei più prestigiosi fisici americani, John Wheeler, avvalendosi di uno strumento chiamato interferometro di Mach-Zehnder (tale strumento richiama molto da vicino il funzionamento delle apparecchiature a due fenditure viste in una delle precedenti Sezioni) dimostrò che ci sono situazioni in cui è possibile assistere ad una inversione dell'ordine temporale dei fenomeni. Prima di illustrare nel dettaglio in cosa consistono gli esperimenti proposti ed eseguiti da Wheeler (che la comunità scientifica conosce come "esperimenti a scelta ritardata") è bene fare alcune riflessioni sul funzionamento e sull'uso degli interferometri Mach-Zehnder.

La Figura 6 mostra cosa accade ad un fotone (o a un elettrone, o a un qualsiasi microente) che entra in un interferometro Mach-Zehnder. La prima cosa che il fotone incontra è uno specchio semitrasparente (**M**): il lettore avrà certamente visto una versione di detto specchio in alcuni film polizieschi, nelle situazioni in cui occorre vedere senza essere visti. In seguito all'interazione con **M** il fotone ha il 50 % di probabilità di attraversarlo (dirigendosi quindi verso lo specchio B) oppure essere deviato (dirigendosi verso lo specchio A). Indipendentemente dal ramo preso e della deflessione subita, il fotone finirà la sua corsa sullo schermo **S**. In assenza di **S** il fotone impatterà sul rivelatore **P₁** o **P₂**. I rivelatori sono apparecchi che registrano in modo permanente l'arrivo di particelle come fotoni, elettroni, ecc.

Figura 6





Si immagini ora una situazione in cui due fotoni attraversino contemporaneamente i due rami dell'interferometro (ovvero il ramo con lo specchio A e il ramo con lo specchio B). Vista la componente ondulatoria associata ai fotoni accadrà che l'incontro degli stessi in **S** produrrà una tipica situazione di interferenza.

A questo punto le leggi dell'ottica (e del buon senso) ci dicono che tale interferenza può aversi soltanto nel caso in cui entrambi i rami dell'interferometro siano attraversati da un fotone. Nell'evenienza in cui un solo fotone stia interessando l'interferometro, avendosi un solo fronte d'onda nessuna interferenza in **S** potrà aver luogo. Invece, come negli esperimenti a due fenditure, anche inviando all'interferometro un solo fotone per volta, sullo schermo **S** si producono gli esiti di una interferenza. La spiegazione in chiave quantistica di questo fenomeno (come per i test a doppia fenditura) è che il fotone, dopo aver attraversato lo specchio **M**, si divide in due, percorre contemporaneamente entrambi i rami dell'interferometro, autointeragisce con sé stesso e, infine, giunto in **S**, manifesta gli effetti dell'interferenza costruttiva o distruttiva. Questa situazione, seppur estremamente semplificata (per varie ragioni non si è tenuto conto dei ritardi che un fotone accumula interagendo con gli specchi A e B), è quella che si produce eseguendo esperimenti con un solo fotone che si muove all'interno di un interferometro Mach-Zehnder.

Ritorniamo ora a Wheeler e ai suoi test. Gli esperimenti proposti e condotti dal fisico americano si incentrano sulla possibilità che lo schermo **S** possa venire rimosso immediatamente dopo che il fotone ha interagito con lo specchio **M**. Compiendo questa operazione i fatti dimostrano che il fotone viene registrato dal rivelatore **P₁** o **P₂**, manifestando, il fotone stesso, un comportamento specificamente corpuscolare. Schematizzando quindi:

- 1) Togliendo **S** dopo che il fotone ha interagito con **M**, avremo un comportamento **CORPUSCOLARE**: il fotone viene registrato dal rivelatore **P₁** o dal rivelatore **P₂**.
- 2) Lasciando **S** dopo che il fotone ha interagito con **M**, avremo un comportamento **ONDULATORIO**: su **S** infatti si avrà l'interferenza distruttiva o costruttiva tipica dell'aspetto ondulatorio della materia.

A questo punto però, Wheeler fa notare che si è verificato qualcosa di molto strano. Infatti la realtà ondulatoria o corpuscolare deve venire assunta dal fotone (così come da qualsiasi altro microente) non a livello di **S**, **P₁** o **P₂**, ma nel momento in cui esso interagisce con lo specchio **M**. E' al livello dello specchio semitrasparente

che avviene materialmente l'atto di osservazione, che avviene la risoluzione dallo stato sovrapposto, assumendo, il fotone, le caratteristiche di ente "ondulatorio" o "corpuscolare". Se però il fotone che ha interagito con **M** e con lo schermo **S** in posizione (ovvero davanti ai rivelatori), alla fine della sua corsa arriva come ente ondulatorio in prossimità **S** e non trova questo schermo, non può fare altro che svanire nel "nulla". Quando un'onda incontra un rivelatore di particelle, infatti, non viene da questo registrata, lo attraversa e basta! Come fanno allora i rivelatori a registrare il fotone come corpuscolo se dopo l'interazione con lo specchio semitrasparente esso aveva assunto le caratteristiche di onda? La spiegazione che Wheeler dà di questi fatti è che la presenza o meno dello schermo **S** dopo che il fotone ha interagito con **M** produce un effetto nel passato, "forzando" il fotone a cambiare il suo stato. Praticamente la scelta (nel futuro) di lasciare o meno **S**, condiziona il modo di propagarsi (nel passato) del fotone.

Per meglio comprendere quanto appena illustrato vediamo cosa scrive lo stesso Wheeler riguardo il significato da dare agli *esperimenti a scelta ritardata*:

“Strumenti di registrazione che operano qui ed ora hanno un ruolo innegabile nel generare ciò che è accaduto [...]. La Fisica Quantistica dimostra che ciò che l'osservatore farà in futuro definisce ciò che accade nel passato”

E ancora nell'intervento intitolato *“Esperimenti a scelta ritardata e dialogo Bohr-Einstein”*, tenuto a Londra alla riunione congiunta della Società Americana di Filosofia e della Società Reale inglese (1980), Wheeler afferma:

“E' sbagliato pensare al passato come già esistente in ogni dettaglio, Il passato è teoria. Il passato non ha esistenza tranne che per l'essere registrato nel presente [...] Ciò che abbiamo il diritto di dire circa lo spazio-tempo passato, e circa gli eventi passati, è deciso da scelte -di quali misure effettuare- compiute nel passato recente e nel presente. I fenomeni resi esistenti da queste decisioni si estendono all'indietro nel tempo nelle loro conseguenze [...]. Strumenti di registrazione che operano qui ed ora hanno un ruolo innegabile nel generare ciò che appare essere accaduto. Per quanto utile possa essere nella vita di ogni giorno il dire «il mondo esiste la fuori indipendentemente da noi», questo punto di vista non può più essere mantenuto. C'è uno strano senso in cui il nostro è un universo partecipato ...”

Logica classica, Logica quantistica e "specificità" degli esperimenti

Con Aristotele nasce ufficialmente la Logica, la scienza della dimostrazione capace di indicare con esattezza quando e perché un ragionamento è coerente, vero o falso, ben costruito rispetto alle premesse. Dai tempi di Aristotele i problemi di tutti i giorni vengono affrontati e risolti con l'ausilio della logica del "sì o no", del "vero o falso". Questa logica bivalente si fonda sostanzialmente sul principio di *non contraddizione* -una cosa non può essere e non essere allo stesso tempo- e sul principio del *terzo escluso* -non è ammissibile una terza possibilità tra il vero e il falso: *tertium non datur*-. Per la sua importanza il principio di *non contraddizione* viene definito da Aristotele *"il più forte di tutti i principi"*; la sua negazione

renderebbe impossibile il pensiero e il linguaggio, poiché ogni concetto potrebbe alludere a una cosa e contemporaneamente a qualcos'altro, anche all'opposto.

Le certezze derivate dalla logica aristotelica subirono, però, un duro attacco con l'irrompere sulla scena scientifica della meccanica quantistica. Determinate situazioni che vedono in azione il principio di sovrapposizione -particolarmente nei test *a due fenditure* o nelle esperienze con interferometri Mach-Zehnder- sperimentano una violazione del principio di *non contraddizione*. La possibilità che una particella possa trovarsi allo stesso tempo in due luoghi diversi; possa percorrere contemporaneamente strade diverse, **rappresenta la coesistenza** (seppur *di un particolarissimo tipo*) di stati antitetici.

Nella teoria quantistica, inoltre, quei gruppi di affermazioni che Bohr-Heisenberg definiscono *prive di significato* (e che sostanzialmente si rifanno agli stati *indeterminati*), collocandosi a metà strada tra i valori di verità e falsità, negano di fatto validità universale al principio del *terzo escluso*.

Non volendo escludere dal linguaggio speculativo comune, dal campo delle *affermazioni significative*, le asserzioni relative agli stati indeterminati¹⁶ è possibile applicare una regola che non permetta di considerarle vere o false. Ciò si ottiene introducendo un terzo valore di verità; si ottiene avvalendosi di una **logica a tre valori**.

La significatività per la teoria quantistica del valore di verità indeterminato è reso particolarmente evidente nelle seguenti considerazioni. Si immagini uno stato fisico generico *S* sul quale si compia una misurazione della grandezza *X* (posizione), nel fare ciò, però, si è costretti a rinunciare alla conoscenza di quale sarebbe stato il risultato se si fosse fatta una misurazione della "grandezza coniugata" *V* (velocità). E' inutile fare una misurazione di *V* nel nuovo stato fisico, poiché la misurazione di *X* ha cambiato la situazione. E' altrettanto inutile costruire un altro sistema con lo stesso stato iniziale *S*, e fare una misurazione di *V*, dato che il risultato di quella misura è determinato soltanto con una certa probabilità. Questa ripetizione della misurazione può dare un valore differente da quello che avremmo ottenuto nel primo caso. Il carattere probabilistico delle previsioni della meccanica quantistica comporta un assolutismo per il caso singolo; esso rende il singolo evento unico e irripetibile.

Una situazione simile a quella appena illustrata, si ha nel caso di una persona, la chiameremo Anna, che affermi : "*Se getto il dado al prossimo tiro, farò tre*" e un'altra persona, la chiameremo Bruno, che affermi: "*Se lo lancio io, invece, farò quattro*". Anna getta il dado, e fa *due*. Sappiamo allora che l'affermazione di Anna era falsa. Quanto all'affermazione di Bruno, però, non abbiamo possibilità di giudizio, in quanto Bruno non ha potuto materialmente lanciare il dado. Un modo per verificare le affermazioni di Bruno potrebbe essere quello di misurare la posizione iniziale del dado, lo stato dei suoi muscoli, la densità dell'aria, ecc. Potremmo allora predire con una precisione grande a piacere il risultato del lancio di Bruno; o, per meglio dire, dato che noi non potremmo mai farlo, lo potrebbe fare per noi il *superuomo* di Laplace, il quale in linea di principio può riprodurre qualsiasi situazione.

Per la meccanica quantistica comunque, neanche il *superuomo* di Laplace può riprodurre in tutto e per tutto l'esito del lancio di Bruno, in quanto, come sottolineato in precedenza, gli esperimenti di fisica quantistica sono governati dalla legge della probabilità e quindi il risultato di qualsiasi osservazione è per principio incerto, "variabile" e quindi non riproducibile.

Un esempio di "logica non distributiva"

Come poco sopra abbiamo dimostrato, la prima differenza che salta agli occhi fra la logica classica e la logica quantistica riguarda i principi (classici) di "non contraddizione" e del "terzo escluso" ...

Nel caso di un esperimento a due fenditure, nella visione classica la particella

¹⁶ Il significato di "stato indeterminato" è totalmente diverso dal significato di "sconosciuto". Il termine "sconosciuto" si applica normalmente anche ad affermazioni a due valori; il valore di verità di un'affermazione della logica "comune" può essere sconosciuto, ma far parte del gruppo di affermazioni vere o false.

può passare soltanto attraverso una delle due fenditure; nella visione quantistica invece, la ("probabile") traiettoria della particella coinvolge entrambe le fenditure ...

Ora se indichiamo con A e B le due fenditure e con X lo schermo sul quale ha luogo la rivelazione delle particelle e consideriamo gli eventi :

- A : la particella è passata attraverso la fenditura A
- B : la particella è passata attraverso la fenditura B
- X : la particella è arrivata in una qualche regione x dello schermo rivelatore X

Secondo la logica classica (e usando i connettivi logici \wedge ; \vee o) non possiamo che scrivere: $A \vee B$ che diventa: $X = X \wedge (A \vee B)$, che diventa [equivale] $X = (X \wedge A) \vee (X \wedge B)$ applicando la proprietà distributiva ...

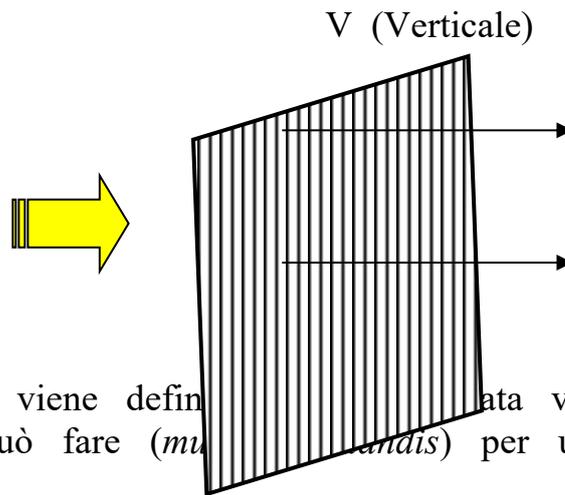
Secondo Birkhoff e von Neumann la logica quantistica non solo viola il principio di *non contraddizione* e del *terzo escluso* ma anche la legge della distributività (che è uno dei fondamenti della logica classica).

Nell'articolo del 1936 i due studiosi forniscono un chiaro esempio di fenomeno ben noto (ai fisici) che confuta la legge della distributività. Così facendo essi dimostrarono matematicamente che è impossibile descrivere l'esperienza tramite la logica classica, perché il mondo reale segue regole differenti (le regole della logica quantistica).

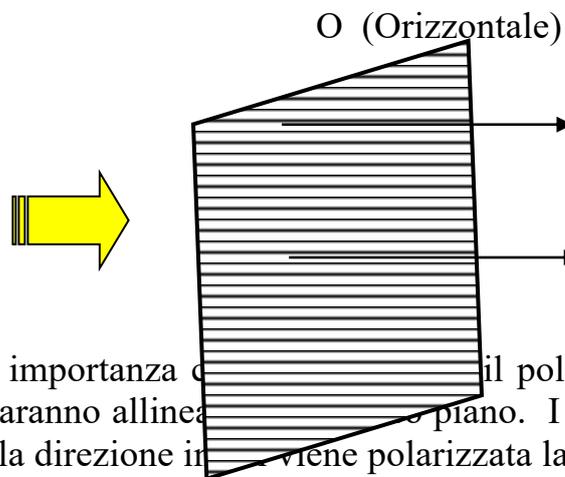
Si farà ora uso di una variazione dell'esempio di Birkhoff e von Neumann per confutare la legge della distributività. La dimostrazione di tale esempio richiede la conoscenza di alcune nozioni sulla polarizzazione della luce.

Le onde luminose provenienti da una normale sorgente di luce come il sole si propagano in ogni maniera, orizzontalmente, verticalmente e in tutte le direzioni intermedie. Ciò non significa solamente che la luce si irradia da una sorgente in tutte le direzioni. Significa anche che in ogni raggio di luce alcune delle onde luminose sono verticali, alcune orizzontali, alcune diagonali e così via. Per un'onda di luce, un polarizzatore assomiglia a una staccionata. Se possa o meno attraversarla dipende dal fatto che sia o meno allineata con la direzione dei pali. Se il polarizzatore è allineato

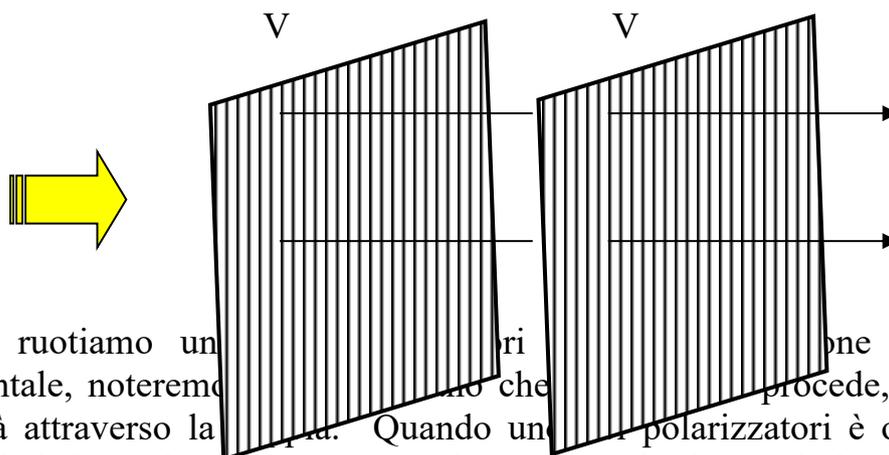
verticalmente, solo le onde di luce verticali lo attraverseranno. Tutte le altre verranno bloccate. Tutte le onde che passano attraverso un polarizzatore verticale sono allineate verticalmente.



Questa è ciò che viene definito luce polarizzata verticalmente. Lo stesso ragionamento si può fare (*mutatis mutandis*) per un polarizzatore allineato orizzontalmente.

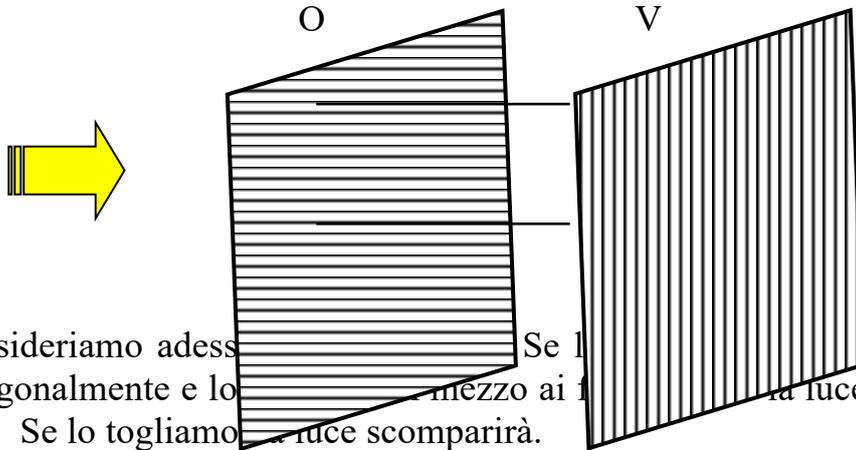


In effetti non ha importanza come il polarizzatore. Le onde di luce che lo attraversano saranno allineate al suo piano. I polarizzatori sono dotati di frecce che indicano la direzione in cui viene polarizzata la luce che li attraversa. Se ne prendiamo uno e lo teniamo con la freccia puntata verso l'alto (o il basso) la luce che lo attraversa sarà polarizzata verticalmente. Se adesso ne prendiamo un altro e lo mettiamo dietro il primo, con la freccia sempre puntata verso l'alto o il basso, noteremo che, tutta la luce che passa attraverso il primo polarizzatore passerà anche attraverso il secondo.

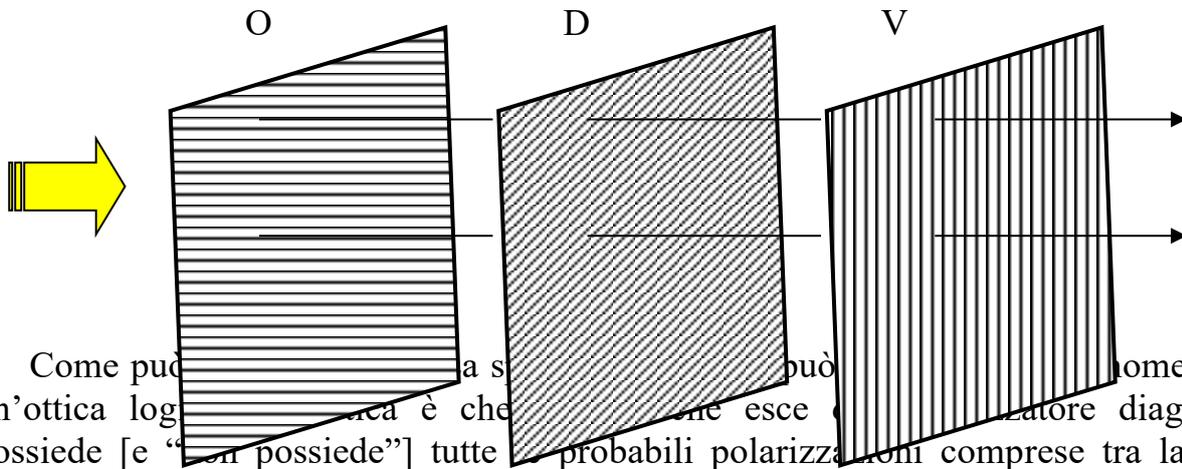


Se ruotiamo un polarizzatore da una posizione verticale a quella orizzontale, noteremo che sempre meno luce passerà attraverso la coppia. Quando un polarizzatore è orizzontale e l'altro verticale la luce viene bloccata completamente. Il primo polarizzatore elimina tutte le

onde luminose tranne quelle polarizzate orizzontalmente. Queste vengono eliminate dal secondo polarizzatore, che lascia passare solo la luce polarizzata verticalmente. Non ha importanza se il primo polarizzatore sia orizzontale e il secondo verticale o viceversa. In ogni caso, nessuna onda li attraverserà entrambi.



Consideriamo adesso un polarizzatore di modo che polarizzi la luce diagonalmente e lo mettiamo a mezzo ai due altri. La luce passerà attraverso i tre filtri. Se lo togliamo la luce scomparirà.



Come può un'onda luminosa (o ancor di più un singolo fotone) che esce da un polarizzatore diagonale possedere [e "non possiede"] tutte le probabili polarizzazioni comprese tra la luce polarizzata orizzontalmente e la luce polarizzata verticalmente. Come può un'onda luminosa (o ancor di più un singolo fotone) che esce da un polarizzatore diagonale possedere tali speciali caratteristiche? Secondo la "logica di tutti i giorni" non può ! ... Inoltre come può l'aggiunta di un "ostacolo" (filtro diagonale) tra due filtri, "attivare" il passaggio della luce ?

Riguardo quest'ultima osservazione fatta sulle caratteristiche delle combinazioni di polarizzatori, così si esprime David Mermin :

"Analizzerò alcuni semplici fenomeni che si possono evidenziare con due paia di occhiali da sole polaroid ... Un effetto particolarmente drammatico emerge quando si guarda una sorgente luminosa attraverso un sandwich di tre filtri polarizzatori. Se si toglie il disco centrale, non si vede nulla. Viceversa, se esso viene reintrodotta il sandwich diventa trasparente. Aggiungendo un ostacolo riusciamo a far passare più luce. Questo fatto, come accade per un buon trucco di magia, rimane molto sorprendente per quasi tutte le persone indipendentemente da quanto bene e da quanto tempo ne abbiano capito la spiegazione."

Le situazioni appena analizzate esemplificano meglio di ogni altra dimostrazione la differenza tra logica classica e logica quantistica.

In realtà i paradossi sopra menzionati risultano tali perché i nostri processi mentali seguono determinate logiche. La ragione infatti ci dice che ciò che stiamo vedendo è impossibile (dopo tutto un fotone che esce da un polarizzatore non può che essere polarizzato in un solo modo: o solo verticalmente, o solo orizzontalmente, o solo diagonalmente). Ciononostante l'inserimento del polarizzatore diagonale fra quelli orizzontale e verticale fa riapparire la luce.

La natura di "entità a sé" della luce che esce da un polarizzatore diagonale riflette la vera natura dell'esperienza. Il nostro processo di pensiero ci impone le categorie del "o questo o quello". Ci pone sempre di fronte a questo o a quello. Ma nel regno dell'esperienza niente è "o questo o quello", c'è almeno un'alternativa in più; spesso vi è un numero infinito di alternative.

Per essere meno astratti, si immagini di avere due differenti pezzi degli scacchi, diciamo un alfiere e un pedone. Se questi oggetti macroscopici seguissero le stesse regole della logica classica, noi non saremmo in grado di dire che esiste altra possibilità oltre quella di essere un alfiere o un pedone. Però fra i due estremi esiste una creatura chiamata "alfione". Un alfione non è né un alfiere né un pedone, e nemmeno mezzo alfiere e mezzo pedone incollati insieme. Un alfione è un'entità a sé. Non può essere separata nei suoi componenti di alfiere e pedone più di quanto un cucciolo incrocio di Collie e Pastore Tedesco possa essere separato nei suoi componenti di Collie e Pastore Tedesco.

Esiste più di un tipo di alfione fra i due estremi dell'alfiere e del pedone. L'alfione che abbiamo descritto è mezzo alfiere e mezzo pedone. Un altro tipo di alfione è per un terzo alfiere e per due terzi pedone. Un altro tipo ancora per tre quarti alfiere e per un quarto pedone. In effetti, per ogni possibile proporzione delle due parti alfiere e pedone esiste un alfione completamente diverso da tutti gli altri.

Un alfione è assimilabile alla sovrapposizione quantistica degli stati. La luce polarizzata diagonalmente è una sovrapposizione coerente di luce polarizzata orizzontalmente e luce polarizzata verticalmente ... La fisica quantistica abbonda di esempi di sovrapposizioni di stati. In effetti, esse sono il cuore del formalismo quantistico.

Nel formalismo quantistico niente è "o questo o quello" senza niente di intermedio. Una delle maggiori difficoltà concettuali della teoria quantistica è la falsa idea che le funzioni d'onda (sovrapposizioni di stati) siano *cose reali* che si sviluppano, collassano, eccetera. D'altro canto, l'idea che le sovrapposizioni siano pure astrazioni che non rappresentano nulla che si possa incontrare nella vita di tutti i giorni, è ugualmente errata. Esse riflettono la natura dell'*esperienza* ...

La nostra concettualizzazione di una data situazione può creare l'illusione che ogni dilemma abbia solo due corni, ma questa illusione è causata dalla presunzione che l'esperienza sia limitata da regole sì/no, chiaro/scuro, ecc. Nel mondo dell'esperienza vi sono disponibili altre alternative. Queste alternative sono parte integrante della logica quantistica ...

Birkhoff e von Neumann nel loro articolo “crearono una prova” che l’esperienza viola le leggi della logica classica. Questa prova è contenuta nell’esperienza stessa.

Nel nostro caso, detta “prova” si basa su ciò che succede o non succede a varie combinazioni di luce polarizzata ...

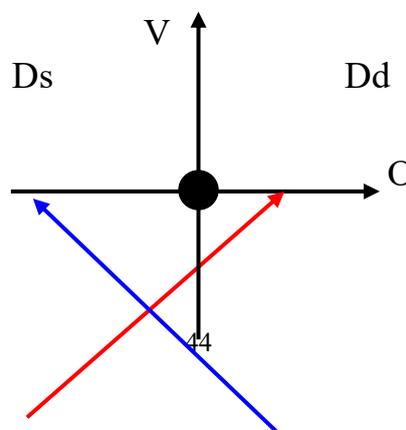
Precedentemente abbiamo constatato che la luce passa attraverso due polarizzatori verticali, due polarizzatori orizzontali, due polarizzatori diagonali, un polarizzatore diagonale e uno verticale, un polarizzatore diagonale e uno orizzontale. Tutte queste combinazioni sono chiamate “transizioni consentite”, poiché accadono effettivamente. In maniera analoga è possibile constatare che la luce non passa attraverso un polarizzatore orizzontale e uno verticale. Queste combinazioni sono chiamate “transizioni proibite” perché non accadono.

Il secondo passo della “prova” di Birkhoff e von Neumann consiste nel redigere una “tabella delle transizioni” come quella che segue.

Ammissioni							
E m i s s i o n i)Ø)O)V)Ds)Dd)I
	Ø)						
	O)		C		C	C	C
	V)			C	C	C	C
	Ds)		C	C	C		C
	Dd)		C	C		C	C
	I)		C	C	C	C	C

In orizzontale abbiamo inserito le emissioni. O) , V) , Ds) , Dd) rappresentano rispettivamente un’emissione luminosa polarizzata Orizzontalmente, Verticalmente, Diagonalmente verso sinistra, Diagonalmente verso destra. Ø) indica l’assenza di emissione. I) indica un’emissione di luce “normale”.

In verticale abbiamo inserito le ammissioni.)O ,)V ,)Ds ,)Dd indicano rispettivamente che l’emissione luminosa ha superato il test di un polarizzatore Orizzontale, Verticale, Diagonale orientato verso sinistra, Diagonale orientato verso destra.)I indica che l’emissione luminosa (essendo)I “assimilabile ad una finestra aperta”) ha superato il test ...

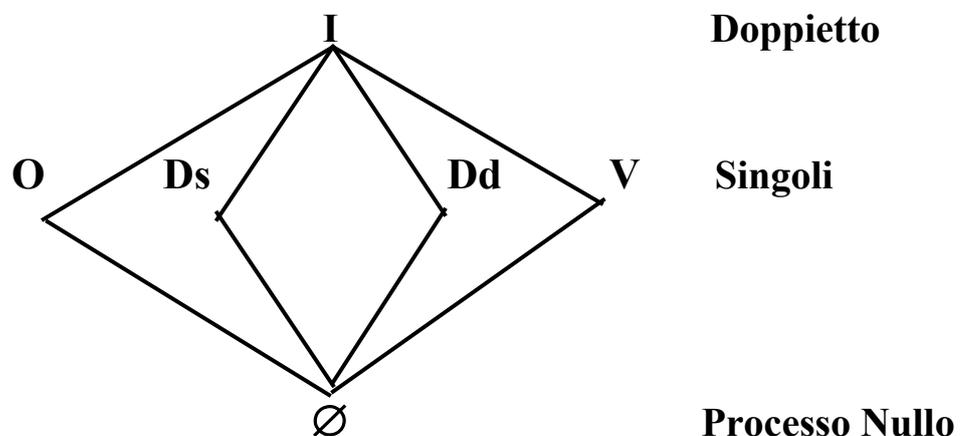


Per usare la “tabella delle transizioni” occorre scegliere il tipo di emissione che interessa e seguirla attraverso la tabella stessa. Un’emissione polarizzata orizzontalmente, ad esempio, supererà il test del polarizzatore Orizzontale, del polarizzatore Diagonale verso sinistra e verso destra e della “finestra aperta”)I.

La lettera C posta nei punti di intersezione (rettangolini) tra una riga e una colonna indica che l’emissione in questione ha superato il test del polarizzatore di quella determinata colonna. Tutti i rettangolini della colonna)I sono contrassegnati dalla lettera C, poiché ogni tipo di luce polarizzata e non supera il test di una “finestra aperta”.

Il terzo passo della “prova” consiste nel tracciare un semplice reticolo delle informazioni contenute nella “tabella delle transizioni”.

Il reticolo ricavato dalla nostra tabella delle transizioni è il seguente :



Nella parte inferiore del reticolo abbiamo un processo nullo. Sotto questo punto non vi è niente perché esso rappresenta l’assenza di emissione. Nel livello intermedio del reticolo abbiamo i vari stati di polarizzazione. Gli elementi a questo livello sono chiamati “Singoli” e sono semplici constatazioni che possono essere fatte sulla polarizzazione di un’onda luminosa. Il livello superiore contiene i “Doppietti”. Nel nostro caso i Doppietti comprendono il livello successivo delle constatazioni di massima che possono essere fatte sulla luce polarizzata in un esperimento.

Questo reticolo nella sua semplicità dimostra graficamente la natura della logica quantistica.

Innanzitutto è possibile notare che il Doppietto I contiene quattro singoli.

Questo è tipico della logica quantistica, ma costituisce un’incomprensibile contraddizione nella logica classica, nella quale ogni Doppietto, per definizione, può contenere solo due singoli, non uno di più e non uno di meno.

I reticoli come quello alla base delle nostre analisi, sono dimostrazioni del postulato quantistico che esiste sempre almeno un'ulteriore alternativa fra ogni "questo" e ogni "quello". In questo caso, sono rappresentate due alternative (Ds e Dd).

Esistono molte altre alternative, non rappresentate in questo reticolo. Per esempio, la luce rappresentata nel reticolo dal simbolo Dd è polarizzata diagonalmente a 45°, ma potrebbe anche essere polarizzata a 46°, 47°, 48°, 48 ½ ° e così via, e tutti questi stati di polarizzazione potrebbero essere inclusi nel doppietto I.

Torniamo ora alla legge della distributività. Lo scopo per la redazione di una tavola di transizione e del conseguente reticolo (si ricorderà), era quello di dimostrare che la meccanica quantistica confuta la legge della distributività.

I matematici usano i diagrammi a reticolo per determinare quali elementi del reticolo sono connessi e in che modo. Per vedere, ad esempio, come due elementi del reticolo siano connessi dalla congiunzione logica "e" basta seguire le linee che partono dagli elementi in questione verso il BASSO in direzione del punto dove si incontrano entrambe [punto che i matematici chiamano "maggior legame inferiore"]. Se si è interessati a O e Ds, ad esempio, è sufficiente seguire le linee verso il basso da O e Ds e scoprire che si incontrano in Ø. Quindi il reticolo ci dice che O e Ds equivalgono a Ø. Se si è interessati a I e O è sufficiente seguire la linea che scende verso il basso dal punto più alto del reticolo (punto I) e scoprire che il più basso punto comune tra I e O è O. Quindi, il reticolo ci dice che I e O sono equivalenti a O. Per vedere come due elementi del reticolo siano connessi dalla disgiunzione logica "o", basta seguire le linee che portano dagli elementi in questione verso l'alto fino al punto in cui si incontrano entrambi (punto che i matematici chiamano "minor legame superiore"). Per esempio se si è interessati a O o V è sufficiente seguire le linee verso l'alto da O e V e si scopre che si incontrano in I.

Passiamo ora alla "prova" vera e propria.

La legge della distributività dice che $x \bullet (y \text{ + } z) = (x \bullet y) \text{ + } (x \bullet z)$.

Per veder se ciò corrisponde al vero, occorre inserire alcuni degli attuali stati di polarizzazione nella formula e risolverla facendo uso del metodo del reticolo. Per esempio, la legge della distributività dice che la luce polarizzata Diagonalmente a sinistra "e" la luce polarizzata Verticalmente "o" la luce polarizzata Orizzontalmente equivale alla luce polarizzata Diagonalmente a sinistra "e" la luce polarizzata Verticalmente "o" la luce polarizzata Diagonalmente a sinistra "e" la luce polarizzata Orizzontalmente. Usando le abbreviazioni ed i connettivi logici corrispondenti alle varie polarizzazioni si può scrivere: $Ds \wedge (V \text{ v } O)$ equivale a $(Ds \wedge V) \text{ v } (Ds \wedge O)$

Ritornando al reticolato, esaminiamo ora la prima di queste due constatazioni. Per risolvere $(V \text{ v } O)$ seguiamo le linee sul reticolo verso l'alto da V e da O fino al loro più alto punto comune. Si incontrano in I. Quindi il reticolo ci dice che $(V \text{ v } O)$ è equivalente a I. Sostituendo I all'originale $(V \text{ v } O)$ la prima affermazione diventa $Ds \wedge I$. Seguendo le linee da Ds e da I verso il basso nel reticolo, troviamo che il loro più basso punto comune è Ds. Quindi il reticolo ci dice che $Ds \wedge I$ equivale a Ds.

In breve : $Ds \wedge (V \vee O)$ equivale a $(Ds \wedge V) \vee (Ds \wedge O)$
 $Ds \wedge I$ equivale a $(Ds \wedge V) \vee (Ds \wedge O)$
 Ds equivale a $(Ds \wedge V) \vee (Ds \wedge O)$

Possiamo risolvere ora la seconda constatazione alla stessa maniera. Risolvendo per $(Ds \wedge V)$ seguiamo le linee sul reticolo che vanno verso il basso da Ds e da V fino al loro più basso punto comune. Si incontrano in \emptyset . Quindi il reticolo ci dice che $(Ds \wedge V)$ equivale a \emptyset . Sostituendo \emptyset a $(Ds \wedge V)$ rimaniamo con $(Ds \wedge O)$. Per risolvere $(Ds \wedge O)$ seguiamo le linee che vanno verso il basso da Ds e O sino al loro più basso punto comune. Anch'esse si incontrano nel punto \emptyset . Quindi il reticolo ci dice che $(Ds \wedge O)$ equivale a \emptyset . Sostituendo \emptyset a $(Ds \wedge O)$ rimaniamo con $\emptyset \vee \emptyset$ che in ultima analisi equivale a \emptyset .

La seconda constatazione equivale quindi a \emptyset .

In breve : Ds equivale a $(Ds \wedge V) \vee (Ds \wedge O)$
 Ds equivale a $\emptyset \vee (Ds \wedge O)$
 Ds equivale a $\emptyset \vee \emptyset$
 Ds equivale a \emptyset

Ma Ds non equivale a \emptyset ! Ds è la luce polarizzata Diagonalmente a sinistra e \emptyset indica una non emissione (un non esperimento). La legge della distributività NON FUNZIONA ...

Sulla “metafisica sperimentale”

Per quanto concerne le conseguenze che i risultati degli esperimenti in generale, e di certi esperimenti di fisica quantistica in particolare, dovrebbero avere a livello filosofico, vediamo quale è l'opinione del Prof. MAURO DORATO nell'articolo intitolato “*Il problema del realismo tra meccanica quantistica e relatività speciale*” (*Epistemologia*, XIX, 1996). “... A tale proposito, voglio solo osservare che l'affermazione di Boniolo [13] secondo cui gli esperimenti non toccano mai il livello delle presupposizioni metafisiche è certamente da rivedere alla luce della storia della scienza. Basti pensare al principio metafisico e metodologico della continuità dei fenomeni fisici (*natura non facit saltus*), difeso anche da LEIBNIZ, ma abbandonato in seguito agli esperimenti sul corpo nero di Planck. Senza voler fare della storia della scienza aneddotica, questo esempio mostra che alcuni problemi filosofici vengono risolti in laboratorio, ed io ritengo che gli esperimenti di Bell appartengano alla categoria di esperimenti rilevanti per la metafisica.

Inoltre, *pace* il famoso principio di demarcazione popperiano, assunzioni fisiche e assunzioni metafisiche non sono facilmente separabili, e una tale separazione non è forse nemmeno desiderata, né per la filosofia, né per la scienza. A questo proposito, Van Fraassen [14] ha formulato un programma filosofico-scientifico che sta incontrando il favore di vari studiosi: il compito fondamentale che i filosofi della scienza dovrebbero porsi è descrivere come può essere fatto il mondo così come è descritto dalle nostre teorie. Si noti che questo programma filosofico, che è basato sull'idea che le teorie siano modelli (nel senso della teoria dei modelli) e non sistemi di asserzioni linguistiche ha, tra gli altri, lo straordinario vantaggio di preparare un terreno comune di lavoro per strumentalisti ...

“The content of a theory is what it says the world is like; and this is either true or false. The applicability of this notion of truth remains here, as everywhere, the basis of all logical analysis. When we come to a specific theory, the question : “how could the world possibly be the way this theory says it is” concerns the content alone. This is the fundamental question par excellence, and it makes equal sense to realist and empiricist.” Van Fraassen [15]

Digressioni filosofiche

Filosofia Cartesiana e fisica quantistica

Nella filosofia di Descartes la materia viene essenzialmente pensata come qualcosa di opposto allo spirito. La *materia* e lo *spirito*, o per meglio dire la “*res extensa*” e la “*res cogitans*”, sono due aspetti incompatibili del mondo ... Descartes fisico e matematico esclude ogni influenza dei fenomeni corporei sulle forze spirituali, la materia può venire considerata come una realtà a sé, indipendente dallo spirito e da ogni forza soprannaturale. La materia è *materia formata*, interpretandosi il processo di formazione come una catena causale di interazioni meccaniche ...

Basandosi sul dubbio e sul ragionamento logico Cartesio si sforza di trovare un fondamento completamente nuovo e assolutamente consistente per un sistema filosofico. Rifiutandosi di accettare acriticamente quanto percepito dai sensi propone il “metodo del dubbio”. Investe col dubbio ciò che i nostri sensi ci dicono, i risultati dei nostri ragionamenti, pervenendo, fra l’altro, alla sua famosa conclusione : “*cogito, ergo sum*” (non posso dubitare della mia esistenza dato che essa è conseguente del fatto che sto pensando) ...

Ma “a mettere in profonda crisi” le idee di Descartes, scrive in “*Fisica e Filosofia*” (il Saggiatore, Milano) Werner Heisenberg, venne la fisica quantistica: *“A questo punto la situazione si modificò notevolmente in seguito alla teoria dei quanta e possiamo perciò venire ora ad un confronto fra il sistema filosofico cartesiano e la situazione della fisica moderna. Nella interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta noi possiamo in realtà procedere senza menzionare noi stessi come individui, ma non possiamo trascurare il fatto che la scienza naturale è formata da uomini. La scienza naturale non descrive e spiega semplicemente la natura ; essa è una parte dell’azione reciproca fra noi e la natura, descrive la natura in rapporto ai sistemi usati da noi per interrogarla. E’ qualcosa, questo che Descartes poteva non aver pensato, ma che rende impossibile un netta separazione fra il mondo e l’Io.*

Se si pensa alle gravi difficoltà che anche eminenti scienziati, come Einstein, incontrarono per intendere ed accettare l’interpretazione di Copenaghen della teoria dei quanta, esse si possono far risalire alla divisione cartesiana di materia e spirito. Tale divisione è penetrata profondamente nella mente umana durante i tre secoli che seguirono Descartes e ci vorrà molto tempo perché possa esser sostituita da un atteggiamento veramente diverso nei riguardi del problema della realtà”

Filosofia Kantiana e meccanica quantistica

Nella sua *“Critica alla ragion pura”* Kant affronta il problema se la conoscenza sia fondata soltanto sull’esperienza o possa provenire da altre fonti, ed arriva alla conclusione che la nostra conoscenza è in parte *“a priori”*, non ricavata cioè induttivamente dall’esperienza. Egli perciò distingue fra conoscenza *“a priori”* e conoscenza *“empirica”*. Nello stesso tempo distingue tra proposizioni *“analitiche”* e proposizioni *“sintetiche”*. Le proposizioni analitiche derivano semplicemente dalla necessità logica e negarle implicherebbe contraddizione. Un giudizio analitico è sempre *a priori*. Le proposizioni che non sono analitiche sono sintetiche : la conoscenza empirica è conoscenza sintetica ...

Ma quale è secondo Kant, il criterio della conoscenza *a priori* ? Kant è d’accordo nell’ammettere che ogni conoscenza comincia con l’esperienza, ma aggiunge che non sempre deriva dall’esperienza. E’ vero che l’esperienza ci insegna che una certa cosa ha la tale o la tal altra proprietà, ma non ci dice che essa non potrebbe essere diversa.

Se una proposizione è caratterizzata dal carattere della necessità essa deve essere *a priori* ; se un giudizio ha un carattere d’assoluta necessità, ovvero se è impossibile immaginare delle eccezioni, esso deve essere *a priori*.

Lo spazio e il tempo, afferma Kant, sono esempi di forme *a priori* dell’intuizione pura. Nel caso dello spazio egli porta i seguenti argomenti :

- 1) Lo spazio non è un concetto empirico, astratto dalle altre esperienze, poiché esso è presupposto ad ogni riferimento di sensazioni a qualche cosa d’esterno, e l’esperienza esterna è possibile soltanto attraverso la rappresentazione dello spazio.
- 2) Lo spazio è una rappresentazione necessaria *a priori*, che soggiace ad ogni percezione esterna ; poiché noi non possiamo immaginare che non ci sia spazio, sebbene possiamo immaginare che non ci sia nulla nello spazio.

Ecc., ecc.

Kant assume, *a priori*, accanto allo spazio e al tempo, la legge di causalità e la geometria euclidea

In merito a queste idee avanzate da Kant, così si esprime nel già citato libro *“Fisica e Filosofia”* Werner Heisenberg: *“Venendo ora al raffronto delle dottrine di Kant con la fisica moderna, sembra a prima vista che il suo concetto centrale dei “giudizi sintetici a priori” sia stato completamente annichilito dalle scoperte del nostro secolo. La teoria della relatività ha mutato le nostre concezioni sullo spazio e sul tempo, ha rivelato in effetti aspetti del tutto nuovi dello spazio e del tempo, di cui non si ha traccia nelle forme “a priori” kantiane dell’intuizione pura. La legge di causalità non è più applicata nella teoria dei quanta. Naturalmente Kant non poteva aver previsto le nuove scoperte, ma poiché era convinto che i suoi concetti sarebbero stati “la base di ogni futura metafisica che si presenti in forma di scienza” è interessante constatare come i suoi argomenti siano stati erronei. Come esempio prendiamo la legge di causalità. Kant afferma che ogni qualvolta osserviamo un evento noi presumiamo che esiste un evento precedente da cui il primo deve seguire*

secondo una certa regola. E' questo, come dice Kant, la base d'ogni lavoro scientifico ... “

Non localismo tra azioni a distanza e non separabilità

Il *non localismo* (ovvero la possibilità di “azioni a distanza”) è uno di quei particolari fenomeni che caratterizzano le dinamiche della meccanica quantistica. Nella realtà *ordinaria* le influenze tra sistemi distanti non avvengono mai direttamente o in tempo reale. Un'epidemia d'influenza che nasce in Asia, ad esempio, non si diffonde immediatamente anche in Europa. Per arrivare nel nostro continente impiega un certo tempo; occorrono settimane infatti perché gli individui infetti, spostandosi da un luogo all'altro della Terra, diffondano la malattia. L'esempio (di *localismo*) appena fatto, non vale nel mondo della fisica quantistica, dove le *azioni* tra luoghi diversi dello spazio sono all'ordine del giorno, dove la realtà sembra divertirsi ad apparire irragionevole.

Per avere un'idea chiara di *non localismo* quantistico si immagini di avere davanti a sé due scatole che contengono ognuna un guanto di uno stesso paio. E' intuitivo che, ancora prima di guardare dentro le scatole, si avrà la certezza che esse conterranno un guanto con un “verso” ben definito: la scatola di destra, ad esempio, conterrà un guanto “destro”, la scatola di sinistra un guanto “sinistro” e viceversa. Ora se anziché usare normali guanti, usassimo “guanti quantistici”, ci renderemmo conto che il “verso” dei guanti nelle rispettive scatole, verrebbe definito solo nel momento in cui si guarda all'interno di una di esse. L'atto di guardare all'interno di una delle due scatole conferisce realtà alla coppia dei guanti, conferisce, a distanza (cioè *non localmente*), un “verso” al guanto non oggetto (in quel momento) di *osservazione*.

Secondo il paradigma quantistico, prima dell'*osservazione*, prima che un osservatore decida di guardare dentro una delle scatole, i guanti *vivono* in uno stato sovrapposto, *intrecciato*; uno stato che vede i guanti “mischiat” in un unico ente: un guanto *destro/sinistro*. Nell'ambito dell'interpretazione ortodossa della teoria quantistica, le caratteristiche oggettive di qualsiasi microente o coppia di microenti vengono definite solo nel momento in cui si compie un atto di osservazione, soltanto l'atto di osservare *risolve* lo stato sovrapposto che caratterizza la materia.

Si consideri ora l'emissione da parte di un atomo eccitato di una coppia di particelle correlate¹⁷: diciamo due protoni. La logica dell'uomo della strada ci dice che se anche queste particelle venissero portate una sulla Luna e l'altra su Venere un eventuale esperimento condotto sul protone che si trova sul nostro satellite non potrebbe avere effetti sul protone che si trova su Venere. Questo ci dice il buon senso e dicevano anche (nel 1935) i fisici Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, quando, nell'intento di dimostrare l'incompletezza della teoria quantistica, scrivevano una serie di articoli critici fra i quali uno famosissimo intitolato: “*Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*” (“*Può considerarsi completa la descrizione della realtà fisica data dalla meccanica quantistica?*”) [16]. In particolare Einstein, riguardo il *non localismo* insito nella meccanica quantistica, insito nel formalismo di questa teoria, scriveva:

”Un aspetto essenziale delle cose della fisica è che a un certo momento esse possono affermare la loro esistenza indipendente le une dalle altre, purché situate in parti diverse dello spazio. Se non si fa questo tipo di ipotesi circa l’indipendente esistenza degli oggetti che sono lontani l’uno dall’altro nello spazio il pensiero fisico nel senso familiare diventa impossibile [...] La seguente idea caratterizza l’indipendenza relativa di oggetti lontani nello spazio (A e B); un’influenza esterna su A non ha influenza diretta su B [...] Se questo assioma dovesse essere abolito la formulazione di leggi che possono essere controllate empiricamente nel senso accettato diventerebbe impossibile.”

Nel passo appena citato Einstein è categorico nel ribadire l’assoluta indipendenza degli oggetti lontani nello spazio, pena il caos nella fisica.

Su posizioni diametralmente opposte si collocano gli esponenti della scuola della fisica quantistica ortodossa, i quali attraverso le parole del loro più autorevole esponente, N. Bohr, stigmatizzano:

“Anche se due fotoni [correlati] si trovassero su due diverse galassie

¹⁷ Le particelle correlate sono microenti (protoni, fotoni, ecc.) che hanno un’origine comune. Esse possono essere in qualche modo assimilate ai gemelli omozigoti delle specie animale.

La disintegrazione di una particella sub-atomica come un mesone π , il passaggio dal I al II livello energetico degli atomi di Calcio, produce coppie di fotoni correlati.

Una delle caratteristiche principali delle particelle correlate è manifestare, a seconda della situazione sperimentale, "proprietà simmetriche": ad esempio "oscillazione" sullo stesso piano.

continueranno pur sempre a rimanere un unico ente ... e l’azione compiuta su uno di essi avrebbe effetti anche sull’altro ... ”.

Pur con una terminologia leggermente diversa rispetto a quella di Einstein e compagni (Bohr infatti parla di “unicità della materia”, di “inseparabilità della materia”, non di *Non localismo*), i quantistici ribadiscono che il destino di qualsiasi particella correlata deve essere comune all’interno dell’evoluzione spazio-temporale della coppia. La contrapposizione tra gli esponenti della scuola di Copenaghen da una parte, e coloro i quali si riconoscono nelle posizioni di Einstein dall’altra, ebbe il suo epilogo nel 1982 quando Alain Aspect dell’Università di Parigi condusse una serie di avanzatissimi esperimenti¹⁸ i quali dimostrarono inequivocabilmente la

¹⁸ A questo punto l’obiettività storica impone venga menzionato il lavoro condotto dal grande fisico irlandese John Bell. Nel 1964 Bell formulò un teorema [17] il quale, se applicato a determinati contesti sperimentali, poteva fornire gli strumenti teorici per arrivare a dirimere il contenzioso aperto tra Einstein, Podolsky, Rosen e i fisici quantistici. Il teorema di Bell -o disuguaglianza di Bell- riusciva con una elegante costruzione matematica a trasformare la disputa tra i *localisti* e i *non localisti*, che ai più era sembrata soltanto una contrapposizione di carattere filosofico, in qualcosa che poteva essere sottoposta a verifica sperimentale.

La formulazione della *disuguaglianza di Bell* può riassumersi dicendo che qualsiasi teoria locale, la quale assume che determinate coppie di particelle correlate separate ed inviate verso rivelatori lontani abbiano proprietà definite anche prima di essere sottoposte a test, non può riprodurre le previsioni probabilistiche della meccanica quantistica. In sostanza Bell, con la sua *disuguaglianza*,

definisce i termini dell'incompatibilità tra le tesi che prevedono che le coppie di particelle correlate abbiano sempre e comunque proprietà oggettivamente definite e locali, rispetto alle assunzioni della meccanica quantistica, la quale prevede che la realtà del micromondo debba essere definita soltanto nel momento in cui si esegue una misurazione, e che di fatto questa misurazione deve avere effetti non locali.

Secondo alcuni autorevoli studiosi, le implicazioni al livello della natura della realtà che emergono dal teorema di Bell, travalicano la disputa tra Einstein e i fisici quantistici, presentandoci un mondo non localistico "a priori". Non è questa la sede per entrare nei dettagli tecnico-formali del lavoro di Bell, qui possiamo comunque -riportando le opinioni di alcuni studiosi- fornire il resoconto di una lettura eminentemente "non locale" del lavoro del grande fisico irlandese. Il primo degli studiosi di cui si propone l'opinione è James Cushing il quale scrive [18]: *"Bell non ha mai elaborato alcuna teoria locale e deterministica. Ma, senza mai entrare nei dettagli dinamici, egli ha dimostrato che, in linea di principio, nessuna teoria siffatta può esistere [...] Il teorema di Bell non dipende in alcun modo dalla meccanica quantistica. Esso rigetta un'intera categoria di teorie (essenzialmente) classiche senza neppur dover menzionare la meccanica quantistica. E accade che i risultati sperimentali non solo escludono l'intera classe delle teorie locali e deterministiche, ma anche che confermano le previsioni della meccanica quantistica"*.

A completamento delle argomentazioni di Cushing così si esprimono rispettivamente il fisico David Lindley e il fisico e filosofo della Columbia University David Albert: *"Quand'anche non ci piacesse la Meccanica Quantistica, quand'anche pensassimo che qualche altra teoria potrebbe infine venire a soppiantarla, non potremmo però tornare alla vecchia visione della realtà. Essa semplicemente non funziona: questa è la vera importanza, è il vero messaggio del teorema di Bell."* *"Ciò che il teorema di Bell ci ha consegnato è la dimostrazione che sussiste ineluttabilmente un'autentica non-località nello svolgersi dei processi della natura, comunque si tenti di descriverla. Tale non-località è, anzitutto, una caratteristica della stessa meccanica quantistica; ma in base al teorema di Bell, risulta essere necessariamente anche una caratteristica di ogni possibile modalità di calcolo ..."*.

giustizia delle posizioni sostenute dai teorici quantistici. Al riguardo scrive il fisico David Lindley [19]:

"Nel 1982 venne infine la soluzione, la quale fu accettata come definitiva dal mondo dei fisici. La natura non obbediva alle leggi del Realismo Locale, la meccanica quantistica celebrò il suo trionfo, e la nostra comprensione della realtà del mondo naturale diventò più complessa."

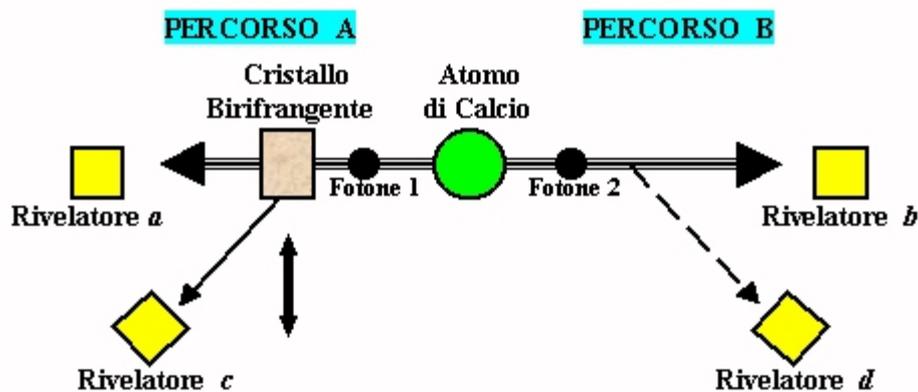
Gli esperimenti condotti oltralpe da Aspect prevedevano che una coppia di fotoni correlati venissero separati e lanciati verso rivelatori lontani, i quali a loro volta dovevano misurare il comportamento dei fotoni dopo che lungo la traiettoria di uno di essi veniva casualmente inserito un "filtro" che ne modificava la direzione. Il risultato dei test di Aspect dimostrò che, allorché uno dei due fotoni deviava in seguito all'interazione col "filtro" posto lungo il suo cammino, istantaneamente deviava anche l'altro, benché si trovasse spazialmente separato (per l'esattezza distanziato tredici metri: uno spazio enorme per particelle di dimensioni subnucleari).

Il fatto straordinario, già previsto e temuto da Einstein sin dal 1935 delle esperienze condotte all'Università di Parigi, non si rivelò tanto la conferma del *non localismo*, delle "azioni a distanza", quanto l'evidenza che queste *azioni* avvenivano praticamente "in tempo reale", quasi ci fosse tra le particelle correlate una trasmissione di informazioni istantanea: violando la insuperabilità della velocità della luce. Il *non localismo*, o la *non separabilità* per dirla con le parole dei fisici

quantistici, ci presenta uno spazio-tempo agli antipodi rispetto alle concezioni classiche, rispetto a quello che si è abituati a sperimentare ogni giorno.

Gli esperimenti di Alain Aspect

Nel 1982 Alain Aspect con la collaborazione di due ricercatori, J. Dalibard e G. Roger, dell'Istituto di Ottica dell'Università di Parigi, raccolse la sfida per una rigorosa verifica delle ipotesi "non localistiche" della teoria quantistica. Egli realizzò una serie di apparecchiature sofisticatissime nel campo dell'ottica-fisica, le quali permisero di risolvere il contenzioso che ormai da mezzo secolo opponeva i fisici che si riconoscevano nelle posizioni "classiche" (Einstein, ecc.), con i fisici quantistici della *scuola di Copenaghen*. Nella figura di seguito riportata vediamo una schematizzazione delle apparecchiature utilizzate da Aspect e collaboratori nei loro esperimenti. Al centro si trova un atomo di Calcio eccitato il quale produce una coppia di fotoni correlati che si muovono lungo percorsi opposti. Lungo uno di



questi percorsi (nel caso rappresentato in figura, il Percorso A), di tanto in tanto e in maniera del tutto casuale, viene inserito un "filtro" (un Cristallo Birifrangente) il quale, una volta che un fotone interagisce con esso, può, con una probabilità del 50 %, deviarlo oppure lasciarlo proseguire indisturbato per la sua strada. Agli estremi di ogni tragitto previsto per ciascun fotone è posto un rivelatore di fotoni.

Ora, la cosa straordinaria verificata da Aspect con le sue apparecchiature è che nel momento in cui lungo il Percorso A veniva inserito il Cristallo Birifrangente e si produceva una deviazione verso il rivelatore *c* del fotone 1, anche il fotone 2 (ovvero il fotone del Percorso B; il fotone separato e senza "ostacoli" davanti), "spontaneamente" ed istantaneamente, deviava verso il rivelatore *d*. Praticamente l'atto di inserire il Cristallo Birifrangente con la conseguente deviazione del fotone 1, faceva istantaneamente e a distanza deviare il fotone 2.

Tutto ciò può sembrare strano, ma è quello che effettivamente accade quando si eseguono esperimenti su coppie di particelle correlate.

Queste bizzarrie della natura stigmatizzano i fisici quantistici, sono tali solo se si ragiona secondo una "logica classica". In uno scenario ove si immagina che qualsiasi sistema correlato possa godere della prerogativa di non risentire della distanza spaziale, tutto risulta semplificato, "normale". Abbandonando l'idea che le particelle correlate *separate* rappresentino enti distinti, scompaiono -dato che si passa da contesti ove le azioni si sviluppano tra luoghi diversi dello spazio a contesti ove le

azioni avvengono nel “medesimo luogo”- buona parte degli ostacoli concettuali (e di fatto) che impediscono una *comunicazione* o “un’azione” a distanza.

In riferimento all’*unicità della materia* che scaturisce dalla visione non localistica della teoria quantistica, così si esprime il premio Nobel per la Fisica Brian Josephson:

“L’universo non è una collezione di oggetti, ma una inseparabile rete di modelli di energia vibrante nei quali nessun componente ha realtà indipendente dal tutto: includendo nel tutto l’osservatore”.

La fisica quantistica ieri e oggi

In chiusura di esposizione dei fondamenti e delle implicazioni della teoria quantistica, chi scrive ritiene utile riproporre alcune pagine tratte da un famoso libro scritto da Louis de Broglie [20]. Attraverso queste pagine il lettore avrà l’opportunità di *rivivere* il clima intellettuale (spesso fatto di aspre contrapposizioni) che a partire dal 1927 caratterizzò l’affermarsi sulla scena scientifica della meccanica quantistica. Le righe scritte da Louis de Broglie permetteranno altresì di cogliere, nella posizione dei fisici della metà del secolo scorso, lo stesso approccio degli scienziati di oggi nei riguardi delle implicazioni e delle conclusioni più “sorprendenti” della meccanica quantistica.

“Alla fine dell’ottobre 1927 ebbe luogo a Bruxelles il quinto Consiglio di Fisica Solvay dedicato alla meccanica ondulatoria [in questo caso il termine meccanica ondulatoria si riferisce alla meccanica quantistica] e alla sua interpretazione. Io [Louis de Broglie] vi feci un’esposizione del mio tentativo [di confutare l’interpretazione probabilistica della meccanica quantistica], ma per diverse ragioni lo feci sotto una forma un po’ monca e insistendo principalmente sull’immagine idrodinamica.

Il mio rapporto non fu affatto apprezzato: unito attorno a Bohr e Born, il gruppo molto attivo dei giovani teorici, che comprendeva Pauli, Heisenberg e Dirac, era completamente conquistato dalla interpretazione puramente probabilistica di cui essi erano gli autori.

Tuttavia si levarono alcune voci per combattere queste nuove idee, Lorentz affermava il suo convincimento che occorresse conservare il determinismo dei fenomeni e la loro interpretazione mediante immagini precise nel quadro dello spazio e del tempo; ma il suo intervento molto notevole non apportava alcun elemento costruttivo [...].

Che cosa avrebbe detto Einstein in questo dibattito dal quale doveva uscire la soluzione del formidabile problema che l’aveva tanto preoccupato dopo la sua geniale intuizione sui quanti di luce ?

Con mio grande disappunto non disse quasi niente. Una sola volta egli prese la parola per alcuni minuti : rifiutando l’interpretazione probabilistica egli lo fece in termini molto semplici. Una obiezione che io credo abbia comunque conservato il suo notevole peso. Poi egli ricadde nel suo mutismo. In conversazioni private egli m’incoraggiava nei miei tentativi, senza tuttavia

pronunciarsi sulla teoria della doppia soluzione che egli non sembrava aver studiata molto da vicino.

Affermava che la fisica quantistica si impegnava su una cattiva strada e davanti a questa evoluzione sembrava scoraggiato. Un giorno mi disse: Questi problemi di fisica quantica divengono troppo complessi. Io non posso più mettermi a studiare questioni così difficili: sono troppo vecchio! Frase ben strana nella bocca di questo illustre scienziato che non aveva allora che quarantotto anni e il cui pensiero audace non era certo di quelli che si lasciano facilmente scoraggiare dalla difficoltà dei problemi !

Ritornai dal Consiglio Solvay molto sconcertato per l'accoglienza che vi avevano ricevuto le mie idee. Non vedevo il modo di superare gli ostacoli che esse incontravano e le obiezioni che mi erano state fatte. Avevo l'impressione che la corrente, che portava la quasi unanimità dei teorici qualificati ad adottare l'interpretazione probabilistica, fosse irresistibile. Mi allineai dunque con questa interpretazione e la presi come base dei miei insegnamenti e delle mie ricerche. Il solo tentativo che era stato fatto (il solo forse che poteva essere fatto) per risolvere il problema delle onde e dei corpuscoli, nel senso che Einstein auspicava, sembrava essere decisamente fallito.

Einstein tuttavia non si arrendeva. Emigrando negli Stati Uniti, non cessava di rivolgere in tutti i suoi scritti, vivaci critiche all'interpretazione puramente probabilistica della meccanica quantistica. Vi furono degli scontri vivaci tra Bohr e lui, particolarmente nel 1935 [...]

In questa disputa, Einstein si trovava quasi isolato e non aveva per compagno di lotta che Schrödinger, autore anche lui di numerose e molto fini obiezioni contro l'interpretazione probabilistica. Ma l'atteggiamento di Einstein restava puramente negativo: egli rifiutava la soluzione dell'enigma delle onde e dei corpuscoli che era prevalsa, ma non ne proponeva alcun'altra: il che, evidentemente, indeboliva la sua posizione. Egli si dedicava allora alle sue ricerche sulle teorie unitarie che, prolungando lo sforzo realizzato dallo sviluppo della relatività generale, cercavano di conglobare il campo gravitazionale, il campo elettromagnetico ed eventualmente altri campi in un'immagine unica. Ma anche se questi interessanti tentativi unitari dovevano continuare a svilupparsi, essi non potevano in alcun modo condurre, almeno nella loro forma attuale, ad una rappresentazione esatta della realtà fisica, poiché essi non contenevano i quanti. Einstein lo sapeva meglio di ogni altro, egli che aveva scoperto i quanti di luce ! Si rendeva conto molto bene che gli si poteva rimproverare di aver abbandonato ogni lavoro costruttivo nel dominio dei quanti: e nell'ultima lettera che egli mi scrisse il 15 febbraio 1954 mi diceva scherzosamente: Io devo rassomigliare ad uno struzzo che nasconde continuamente la sua testa nella sabbia relativistica per non aver da guardare in faccia questi villani quanti.

Frattanto la controversia si andava lentamente spegnendo. La maggior parte dei fisici ammetteva, senza discussione, l'interpretazione probabilistica, gli

uni perché la trovavano realmente soddisfacente, gli altri più pragmatici, perché il formalismo della meccanica quantica sembrava loro in grado di fornire tutti gli strumenti che erano necessari per le loro previsioni e perché non si preoccupano più in nessun modo di sapere quale realtà potesse nascondersi dietro il velo delle equazioni”.

E' in quest'ultima frase che si può riconoscere l'attuale posizione della comunità scientifica nei riguardi della meccanica quantistica, nei riguardi delle implicazioni più “sorprendenti” del paradigma di Copenaghen.

Per i fisici la teoria quantistica è utilissima per descrivere fenomeni, fare previsioni e formulare nuove teorie, ma preoccuparsi di conoscere cosa in realtà si nasconde dietro *il velo delle equazioni*, cosa si celi dietro il modello di *realtà* che emerge dal paradigma quanto-meccanico, è più materia per filosofi che per scienziati.

Indicazioni bibliografiche

[1] Werner Heisenberg, *Physics and Beyond*, Harper e Row, New York (1971).

[2] Werner Heisenberg, *Fisica e Filosofia*, il Saggiatore, Milano (1961).

[3] Max Born, “*Atomic Physics*”, Hafner (1957).

[4] Franco Selleri, *La Causalità Impossibile*, Jaca Book, Milano (1987).

[5] A. Landé, *New Foundations of Quantum Mechanics*, Cambridge University Press (1965).

[6] G. Lukacs, *La Distruzione della Ragione*, Einaudi, Torino (1959).

[7] M. Jammer, *The Conceptua Development of Quantum Mechanics*, Tomash Publishers, Am. Inst. Physics (1989).

- [8] R. N. Moreira, *Høffding and Bohr: Waves or Particles*, in: *Waves and Particles in Light and Matter*, a.c. di A. van der Merwe, Plenum, New York/London (1994).
- [9] E.P. Wigner, *American Journal of Physics*, 31 (1963).
- [10] M. Renninger, *Zeitschrift für Physik*, 158 (1960).
- [11] G. Tarozzi, “*The resolution of the paradox of negative-results measurements*”, in *Open Questions in Quantum Physics*, Reidel Dordrecht (1985).
- [12] E. Wigner, *Scientist Speculates* (1962).
- [13] G. Boniolo, “*A Deconstruction of EPR Paradox*”, *Annales de la Fondation Louis de Broglie* (1993).
- [14] Van Fraassen, “*A Modal Interpretation of Quantum Mechanics*”, *Current Issues in Quantum Logic*, Plenum, New York (1981).
- [15] Van Fraassen, “*Quantum Mechanics, An Empiricist View*”, Clarendon Press, Oxford (1991).
- [16] A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen, *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?*, *Physical Review*, 47 (1935).
- [17] John Bell, *On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox*, *Physics*, vol.1, pp. 195-200 (1964).
- [18] James T. Cushing, *Quantum Mechanics*, Chicago University Press, Chicago, (1994).
- [19] David Lindley, *La Luna di Einstein*, Longanesi, Milano (1997).
- [20] Louis de Broglie, *Nuove Prospettive in Microfisica*, Fratelli Fabbri Editori, Milano (1969).