

## Meccanica Quantistica (MQ)

Antonella Vannini<sup>1</sup> e Ulisse Di Corpo<sup>2</sup>

### Abstract

La Meccanica Quantistica (MQ) o fisica quantistica è un complesso di teorie fisiche la cui elaborazione è iniziata nella prima metà del ventesimo secolo e che descrivono il comportamento della materia a livello microscopico, a scale di lunghezza inferiori o dell'ordine di quelle dell'atomo. La meccanica quantistica permette di interpretare fenomeni che, nell'opinione della maggior parte dei fisici contemporanei, non possono essere giustificati dalla meccanica classica. In questo articolo viene descritta brevemente la nascita della MQ e presentati alcuni modelli interpretativi.

### 1. L'esperienza della doppia fenditura: la luce come onda

Il 24 novembre 1803 Thomas Young presentò presso la Royal Society di Londra l'esperienza della doppia fenditura, giungendo così alla dimostrazione della natura ondulatoria della luce:

*“L'esperienza di cui sto per parlare (...) può essere ripetuto con grande facilità, purché splenda il sole e con una strumentazione che è alla portata di tutti”.*

L'esperienza di Young era molto semplice. Un raggio di sole veniva fatto passare attraverso un foro praticato in un cartoncino, quindi raggiungeva un secondo schermo, con due fori. La

---

<sup>1</sup> [antonella.vannini@gmail.com](mailto:antonella.vannini@gmail.com)

<sup>2</sup> [ulisse.dicorpo@gmail.com](mailto:ulisse.dicorpo@gmail.com)

luce che attraversava i due fori del secondo schermo finiva infine su uno schermo, dove creava una figura di luci e ombre (Fig. 1) che Young spiegò come conseguenza del fatto che la luce si diffonde attraverso i due fori in forma di *onde*. Queste onde danno origine, nei punti in cui si sommano, a fasce chiare (*interferenza costruttiva*), mentre nei punti dove non si sommano a fasce scure (*interferenza distruttiva*).

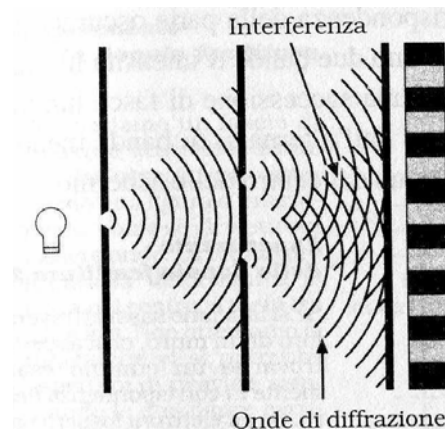


Fig. 1 - *Esperimento della doppia fenditura di Young*

L'esperimento di Young venne accettato come dimostrazione del fatto che la luce si irradia per mezzo di onde. Infatti se la luce fosse stata costituita da particelle, non si sarebbe osservata questa alternanza di luci e ombre, ma si sarebbero osservate solo due bande luminose, una per foro. Nell'esperimento della doppia fenditura la banda più luminosa si colloca tra i due fori, in corrispondenza della parte oscurata dallo schermo (Fig. 2).

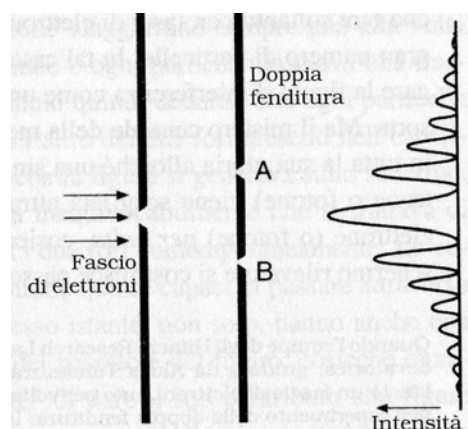


Fig. 2 – *Intensità luminosa nell'esperimento della doppia fenditura di Young*

L'esperimento di Young sulla natura ondulatoria della luce ha rappresentato un caposaldo della fisica fino a quando, a partire dal lavoro di Max Planck agli inizi del '900, la scienza andò sempre più scoprendo ciò che è oggi noto come *dualismo onda/corpuscolo* e che rappresenta uno dei principi fondamentali della meccanica quantistica.

## **2. Nascita della meccanica quantistica**

Verso la fine del diciannovesimo secolo Lord Rayleigh e Sir James Jeans cercarono di estendere il principio statistico di equiripartizione, utilizzato per la descrizione delle proprietà termiche dei gas (particelle), alle radiazioni termiche (onde).

Il Teorema di Equiripartizione, che viene dedotto matematicamente dai principi newtoniani della Meccanica, afferma che *"l'energia totale contenuta in un gas si ripartisce ugualmente (in media) fra tutte le particelle."*

Il teorema di equiripartizione, applicato alle onde, portava però a prevedere l'esistenza del fenomeno della "catastrofe ultravioletta"; infatti, la radiazione termica si sarebbe concentrata nelle frequenze più elevate, la frequenza ultravioletta dello spettro, dando luogo a picchi infiniti di energia termica che avrebbero causato, appunto, la catastrofe ultravioletta.

Tuttavia, la catastrofe ultravioletta non si manifestava in natura e questo paradosso venne risolto il 14 dicembre 1900 quando Max Planck presentò, ad un raduno della Società tedesca di fisica, un lavoro secondo il quale i livelli di energia sono *quantizzati*. Ovvero, l'energia non cresce o diminuisce in modo continuo, ma sempre per multipli di un "quanto di base", una quantità che Planck definì come il prodotto  $h\nu$  dove  $\nu$  è la frequenza caratteristica del sistema preso in considerazione e  $h$  è una costante fondamentale, oggi nota come costante di Planck e che corrisponde a  $6,6262 \cdot 10^{-34}$  joule/sec. Planck aveva concettualizzato la trasmissione dell'energia in forma di pacchetti discreti, alcuni grandi, altri piccoli, in funzione della

frequenza di oscillazione del sistema. Al di sotto della frequenza minima del pacchetto di energia, l'intensità della radiazione veniva meno, impedendo così che questa crescesse agli altissimi livelli previsti dalla catastrofe ultravioletta.

Il 14 dicembre 1900 è oggi ricordato come la data in cui è nata la meccanica quantistica.

### **3. L'effetto fotoelettrico e la luce come particelle: i fotoni**

L'effetto fotoelettrico consiste nel fatto che quando i raggi di luce colpiscono un metallo, il metallo emette degli elettroni. Questi elettroni possono essere individuati e le loro energie misurate.

Le analisi dell'effetto fotoelettrico, per vari metalli e con luci di frequenze differenti, mostrano che:

- fino ad una certa soglia di frequenza il metallo non emette elettroni;
- sopra la soglia emette elettroni la cui energia resta la stessa;
- l'energia degli elettroni cresce solo se si aumenta la frequenza della luce.

La teoria classica della luce non era in grado di spiegare questi fenomeni, ad esempio:

- perché l'intensità della luce non aumentava l'energia degli elettroni emessi dal metallo?
- perché la frequenza ne influenzava invece l'energia?
- perché non venivano emessi elettroni sotto una determinata soglia?

Nel 1905 Einstein rispose a queste domande utilizzando la costante di Planck e ipotizzando che la luce, precedentemente considerata solo come onda elettromagnetica, potesse essere descritta in termini di quanti, ovvero pacchetti discreti di energia, particelle che oggi chiamiamo fotoni. La spiegazione fornita da Einstein ebbe un ruolo chiave nella storia dello sviluppo della fisica quantistica, giacché trattava la luce in termini di fasci di particelle, invece che in termini di onde, aprendo così la strada alla dualità onda-particella.

La validità dell'ipotesi di Einstein fu dimostrata sperimentalmente nel 1915 da Robert Millikan che, per ironia, era motivato dall'intento opposto, cioè di dimostrare l'erroneità dell'ipotesi di Einstein. Millikan dedicò una decina d'anni all'esame delle spiegazioni di Einstein sull'effetto fotoelettrico, sperimentando con sempre maggiore accuratezza. Scopri così che le teorie alternative fallivano, mentre l'interpretazione di Einstein si rivelava corretta. Diversi anni dopo, lo stesso Millikan commentò: *“Ho dedicato dieci anni della mia vita ad esaminare quell'equazione del 1905 di Einstein, e contrariamente ad ogni mia aspettativa nel 1915 sono stato costretto ad ammettere la sua netta validità, nonostante la sua illogicità!”*

Nel 1923 le ricerche di Arthur Compton dimostrarono che i quanti elettromagnetici si comportano esattamente come particelle, scambiandosi oltre all'energia anche il momento (la velocità) durante la collisione con gli elettroni.

#### **4. L'esperienza della doppia fenditura: la dualità onda-particelle**

L'esatto equivalente dell'esperienza di Young può oggi essere condotto servendosi di un fascio di elettroni. Gli elettroni lanciati in un esperimento della doppia fenditura producono una figura d'interferenza sullo schermo rivelatore (in questo caso uno schermo simile a quello di un televisore) e devono quindi muoversi sotto forma di onda. Tuttavia, all'arrivo, generano un solo punto di luce, comportandosi quindi come particelle. Si è quindi portati a concludere che gli elettroni viaggiano come onde, ma giungono all'arrivo come particelle!

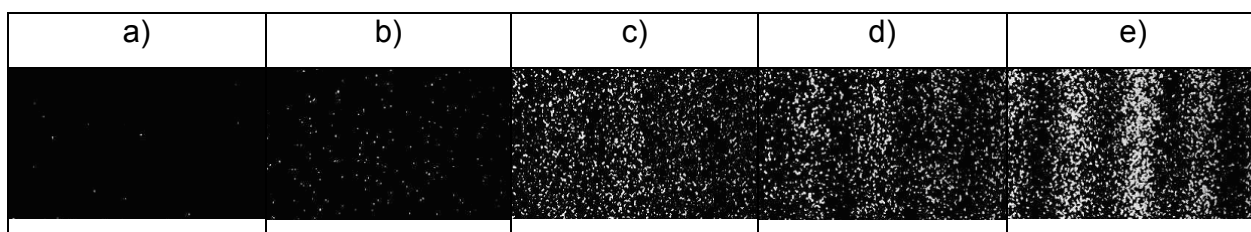


Fig. 3 – Esperimento della doppia fenditura realizzato con elettroni

a) dopo 10 elettroni; b) dopo 100 elettroni; c) dopo 3.000 elettroni; d) dopo 20.000; e) dopo 70.000.

Se l'elettrone fosse una particella potremmo dedurre che ogni particella passa attraverso uno o l'altro dei due fori presenti nell'esperimento; tuttavia, la figura d'interferenza che si genera sullo schermo dimostra che si tratta di onde che attraversano i due fori contemporaneamente. Le entità quantistiche si dimostrano quindi capaci di passare attraverso le due fenditure nello stesso istante; non solo, hanno anche una sorta di consapevolezza del passato e del futuro, cosicché ognuna di esse può scegliere di dare il suo contributo alla figura d'interferenza nel punto corretto, quello che contribuisce alla creazione della figura, anziché alla sua distruzione.

Secondo le parole di Richard Feynman nell'esperimento della doppia fenditura è racchiuso il "mistero centrale" della meccanica quantistica. Si tratta di un fenomeno *"in cui è impossibile, assolutamente impossibile, trovare una spiegazione classica, e che ben rappresenta il nucleo della meccanica quantistica. In realtà, racchiude l'unico mistero... Le peculiarità fondamentali di tutta la meccanica quantistica"* (Feynman, 1977)

### **5. Interpretazione di Copenhagen**

Tra il 1930 e il 1980 ha dominato, tra le spiegazioni del mondo quantistico, l'Interpretazione di Copenhagen, secondo la quale la coscienza, tramite l'esercizio dell'osservazione, determina almeno in parte la realtà.

L'interpretazione di Copenhagen, formulata da Niels Bohr e Werner Heisenberg durante la loro collaborazione a Copenhagen nel 1927, spiega l'esperimento della doppia fenditura nel modo seguente:

- l'elettrone lascia il cannone elettronico come particella;
- si dissolve immediatamente in una serie di onde di probabilità sovrapposte, ovvero una sovrapposizione di stati;

- le onde passano attraverso ambedue le fenditure e interferiscono reciprocamente fino a creare una nuova sovrapposizione di stati;
- lo schermo rivelatore, compiendo una misurazione del sistema quantistico, fa collassare la funzione d'onda in una particella, in un punto ben definito dello schermo;
- subito dopo la misurazione, l'elettrone ricomincia a dissolversi in una nuova sovrapposizione di onde.

Componenti essenziali dell'interpretazione di Copenhagen sono:

- Il principio di indeterminazione di Heisenberg, secondo il quale un'entità quantistica non ha un preciso momento e una precisa posizione nello stesso istante.
- Il concetto di complementarità, ovvero il modo in cui le particelle quantiche hanno contemporaneamente gli attributi della particella e dell'onda.
- L'equazione d'onda di Schrödinger, reinterpretata, come descrizione matematica della probabilità che l'elettrone (o qualsiasi altra entità) sia in un particolare stato.
- La sovrapposizione degli stati, cioè tutte le possibili funzioni d'onda sono miscelate assieme finché la misurazione non ha luogo.
- Il collasso della funzione d'onda che consegue all'atto della misurazione.

Secondo l'interpretazione di Copenhagen l'esistenza oggettiva di un elettrone in un certo punto dello spazio, per esempio in una delle due fenditure, indipendentemente da una osservazione concreta, non ha alcun senso. L'elettrone sembra manifestare un'effettiva esistenza solo quando l'osserviamo. La realtà viene creata, almeno in parte, dall'osservatore.

Quando Erwin Schrödinger si rese conto del modo in cui la sua funzione d'onda era stata reinterpretata, fino a diventare un'onda di probabilità dai connotati quasi mistici, commentò: *"Non mi piace, e non avrei mai voluto avere a che fare con qualcosa del genere!"*. Einstein prese subito le distanze dall'interpretazione di Copenhagen affermando che il ricorso alla coscienza ed alla probabilità non erano altro che prove dell'incompletezza di tale interpretazione. Secondo Einstein, ogni teoria scientifica doveva far uso della causalità.

Einstein era solito sottolineare questa sua convinzione affermando che *“Dio non gioca a dadi!”*

## 6. L'EPR

Einstein non se la sentì mai di accettare che il caso avesse un posto nelle leggi della natura. Era convinto che la meccanica quantistica fosse corretta nell'assegnare le probabilità ai possibili esiti di un esperimento; ma riteneva anche l'esigenza di ricorrere alla probabilità fosse dovuta solo alla nostra ignoranza di un livello più profondo della teoria, livello che doveva essere descrivibile da una fisica deterministica (priva cioè di struttura probabilistica). Einstein fu un critico feroce della teoria dei quanti proprio perché non riusciva ad accettare che la natura funzionasse in modo probabilistico: *“Dio decreta; Dio non gioca a Dadi”*. Einstein si era convinto che mancasse qualcosa alla teoria dei quanti, che esistessero delle “variabili” nascoste. In aggiunta, Einstein aveva a cuore altre nozioni che considerava “intuitive”, di buon senso, così come lo sono, di fatto, per la maggioranza delle persone. Ad esempio, la nozione di località, secondo la quale ciò che accade in un luogo non può influenzare qualcosa che stia accadendo in un luogo molto distante, a meno che, ovviamente, non venga spedito in questa regione distante un segnale che possa influenzare ciò che sta succedendo in quella regione dello spazio.

Per tutta la vita Einstein tenne fede a tre principi che riteneva dovessero far parte di qualsiasi buona descrizione della natura:

- Il livello di base della natura dovrebbe essere descritto, per principio, da una teoria deterministica, anche se alcune lacune nella umana conoscenza delle condizioni iniziali e delle condizioni al contorno potrebbero costringere gli esseri umani a ricorrere alla probabilità per poter effettuare predizioni sui risultati delle osservazioni.
- La teoria dovrebbe includere tutti gli elementi della realtà.
- La teoria dovrebbe essere locale: quello che accade qui dipende da elementi della realtà che sono localizzati qui.



Nel 1924 Pauli aveva scoperto che gli elettroni hanno uno spin, ossia girano su se stessi come una "trottola", e che un'orbita può essere occupata solo da due elettroni con spin opposto, uno che gira in senso orario e l'altro che gira in senso antiorario (principio di esclusione di Pauli). Secondo questo principio, ogni coppia di elettroni che ha condiviso una stessa orbita rimane legata (entangled) continuando ad assumere spin opposti, indipendentemente dalla distanza che li separa.

Nel 1934 Einstein formulò un esperimento mentale che prese il nome di esperimento EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) e che rimase irrisolto fino agli anni '80. In pratica Einstein si chiedeva *"Supponiamo che due particelle siano entangled. Consideriamo ora un osservatore che si occupi di una delle due particelle in una zona molto distante dal punto in cui hanno interagito e che misuri la quantità di moto; allora, questo osservatore sarà ovviamente in grado di dedurre anche la quantità di moto dell'altra particella. Se, viceversa, egli scegliesse di misurare la posizione della prima particella, sarebbe comunque in grado di dire dove si trova esattamente l'altra. Come può lo stato finale della seconda particella venire influenzato da una misurazione effettuata sulla prima, dopo che ogni interazione fisica tra le due è cessata?"*

## **7. L'esperimento di Aspect**

L'EPR era stato presentato come un "esperimento concettuale", inteso a dimostrare l'assurdità della fisica quantistica ponendo una contraddizione logica; in realtà, nessuno chiedeva che l'esperimento venisse realmente eseguito. Ma nel 1952 David Bohm propose una variazione dell'EPR che riguardava il comportamento dei fotoni, e nel 1964 John Bell dimostrò che la variazione di Bohm poneva le basi, in linea di principio, per un autentico esperimento.

A quell'epoca, in realtà, neppure lo stesso Bell riteneva che quell'esperimento potesse davvero essere eseguito. Ma gli sperimentatori accettarono quasi subito la sfida. Nel giro di vent'anni diversi gruppi erano arrivati vicini all'esecuzione delle misurazioni con la precisione

richiesta; è comunemente accettato che sia stato proprio il risultato ottenuto dall'équipe di Aspect, pubblicato nel 1982, a sancire definitivamente che Einstein (e con lui il comune buonsenso) dovevano arrendersi alla realtà del mondo quantistico e alla non-località delle sue regole.

La proprietà quantistica misurata da Aspect è la polarizzazione del fotone, che può essere immaginata come una freccia che punta o verso l'alto o verso il basso. E' possibile stimolare un atomo in modo che produca simultaneamente due fotoni, i quali si dirigono in due direzioni diverse. Nel complesso, le polarizzazioni dei due fotoni devono cancellarsi: se la freccia del primo è su, l'altra dev'essere giù. Ogni fotone nasce con una polarizzazione definita, e il suo partner con la polarizzazione opposta, ed entrambi mantengono tale caratteristica originaria nel loro viaggio nello spazio. Tuttavia, secondo l'interpretazione di Copenhagen, qualsiasi entità quantistica che abbia la possibilità di una scelta del genere esiste in una condizione di sovrapposizione di stati, ovvero una miscela delle due possibilità, finché (in questo caso) la sua polarizzazione non viene misurata. A quel punto, e solo a quel punto, vi è ciò che viene definito "collasso della funzione d'onda", in seguito al quale viene fissata una delle due possibilità.

Tuttavia, la controparte del fotone che viene misurato deve anch'essa trovarsi in una sovrapposizione di stati, almeno fino al momento della misurazione. Poi, nel preciso istante in cui la misurazione del fotone A causa il collasso della funzione d'onda, la funzione d'onda del fotone B (che potrebbe, in linea di principio, trovarsi ormai dall'altra parte dell'universo) deve collassare nello stato opposto. La risposta istantanea del fotone B a ciò che accade al fotone A è proprio ciò che Einstein definì "azione fantasma a distanza".

L'effettivo esperimento realizzato da Aspect misura la polarizzazione in base ad un angolo, che può essere variato, rispetto alle frecce all'insù e all'ingiù. La probabilità che un fotone con una certa polarizzazione passi attraverso un filtro disposto con un certo angolo dipende dalla sua stessa polarizzazione e dall'angolo tra la sua polarizzazione e il filtro. In una realtà non-locale mutare l'angolo con il quale si sceglie di misurare la polarizzazione del fotone A finirebbe per alterare la probabilità che il fotone B passi attraverso un filtro polarizzatore sistemato con un angolo diverso. Inoltre, l'esperimento non riguarda soltanto due fotoni, ma interi fasci di fotoni, ovvero serie di coppie correlate che sfrecciano attraverso l'apparecchiatura una dopo l'altra.

Bell aveva mostrato che, se Einstein aveva ragione, il numero di fotoni che passano attraverso il filtro polarizzatore B doveva essere inferiore a quello che passa attraverso il filtro A. Ciò prende il nome di disuguaglianza di Bell. Tuttavia, l'esperimento di Aspect dimostra l'esatto contrario, che il primo valore (A) è in realtà sempre inferiore al secondo valore (B). Per dirla altrimenti, la disuguaglianza di Bell viene violata e il comune buonsenso incarnato da Einstein perde la sfida.

Sebbene l'esperimento di Aspect sia stato motivato proprio dalla teoria quantistica, il teorema di Bell ha implicazioni molto più vaste e la combinazione del teorema di Bell e dei risultati sperimentali rivela una delle verità fondamentali dell'universo, ovvero che ci sono rapporti di correlazione che hanno luogo istantaneamente, indipendentemente dal grado di separazione tra gli oggetti implicati, e che sembrano esistere segnali che possono viaggiare a velocità superiore a quella della luce.

### **8. Esperimento della scelta ritardata e retrocausalità**

Wheeler propose l'esperimento della scelta ritardata partendo dagli esperimenti che mostrano che, quando si colloca un rivelatore sulle fenditure e si analizza da quale fenditura passa il fotone, la figura d'interferenza scompare. Nell'esperimento della scelta ritardata il rivelatore viene collocato in un punto intermedio tra le due fenditure e il rivelatore finale, in modo da osservare quale traiettoria viene assunta da ogni singolo fotone dopo il passaggio tra le due fenditure, ma prima di giungere al rivelatore finale. La teoria quantistica dice che se si spegne il rivelatore intermedio e non si analizzano le traiettorie dei fotoni, questi formeranno una figura d'interferenza. Se però si osservano i fotoni per determinare da che fenditura sono passati, anche se l'osservazione è compiuta dopo che l'hanno attraversata, non ci sarà figura d'interferenza. La "scelta ritardata" entra in gioco appunto perché è possibile decidere se analizzare il fotone (oppure la decisione può essere effettuata casualmente da un computer) dopo che il fotone è passato attraverso la/le fenditura/e. La decisione, secondo la teoria quantistica, sembra influenzare il modo in cui il fotone si comporta nel momento in cui passa per la/le fenditura/e, ovvero una frazione infinitesimale di tempo prima dell'osservazione.

Due esperimenti indipendenti compiuti all'Università del Maryland e all'Università di Monaco di Baviera, intorno alla metà degli anni '80, hanno confermato che ciò accade realmente. Il comportamento dei fotoni in entrambi gli esperimenti è stato influenzato dall'apparato sperimentale, anche se tale apparato subiva mutazioni mentre i fotoni erano già in viaggio; ciò implica che i fotoni hanno una sorta di precognizione della futura struttura dell'apparato, prima ancora di attraversarlo nel loro breve percorso.

La scala di tempo implicata è infinitesimale: solo qualche miliardesimo di secondo. Ma, come lo stesso Wheeler aveva fatto notare, è possibile immaginare un esperimento analogo su scala addirittura cosmica. Ad esempio, utilizzando la luce proveniente da un oggetto molto distante (un quasar) che raggiunge la Terra passando per due diversi percorsi, essendo stata curvata attorno a una grande galassia che si trovava sul tragitto, per via del fenomeno conosciuto come lente gravitazionale. In linea di principio, sarebbe possibile combinare la luce delle due immagini del quasar fino a creare una figura d'interferenza, dimostrando così che ha viaggiato nell'universo come un'onda, seguendo entrambi i possibili percorsi. Oppure si potrebbero monitorare i singoli fotoni, cercando di capire attraverso quale percorso siano arrivati, ma in tal caso non si formerebbe alcuna figura d'interferenza. Dal momento che il quasar in questione potrebbe trovarsi a 10 miliardi di anni luce di distanza, si deduce che la nostra scelta sul metodo di misurazione influenza il modo in cui la luce si è messa in movimento 10 miliardi di anni fa, ovvero 5 miliardi di anni prima della nascita del nostro sistema solare. Se questa versione dell'esperimento della scelta ritardata potesse mai essere portata a termine, costituirebbe la prova più significativa che il mondo quantistico è influenzato da connessioni retrocausali, che operano a ritroso nel tempo.

### **9. Interpretazione transazionale**

L'interpretazione transazionale della meccanica quantistica è stata presentata nel 1986 da John Cramer dell'Università di Washington. Le previsioni sugli esiti degli esperimenti rimangono esattamente analoghe a quelle delle altre interpretazioni quantistiche, ma ciò che caratterizza questo modello è una diversa prospettiva su quanto sta accadendo, che molti

trovano più semplice rispetto, per esempio, all'interpretazione di Copenhagen o alle altre interpretazioni della meccanica quantistica.

Cramer si è ispirato alla teoria assorbitore-emettitore di Wheeler-Feynman. La versione originale della teoria di Wheeler-Feynman era, a rigor di termini, una teoria classica, giacché non prendeva in considerazione i processi quantistici. Per poter applicare tali idee alla meccanica quantistica, c'era bisogno di un'equazione con una doppia soluzione, come quella di Maxwell, in cui una soluzione, relativa ad onde ritardate, individua energia che fluisce dal passato verso il futuro, mentre l'altra soluzione, relativa ad onde anticipate, individua energia che fluisce a ritroso dal futuro verso il passato. A prima vista, la famosa equazione d'onda di Schrödinger non era adatta, perché descrive il flusso in un'unica direzione, dal passato al futuro. Tuttavia, come ogni fisico apprende all'università (per poi dimenticarlo subito dopo), tale equazione non è completa in quanto non prende in considerazione i requisiti della teoria della relatività. L'equazione d'onda completa (equazione di Klein-Gordon) comporta, invece, due soluzioni, una corrispondente alla semplice e più familiare equazione di Schrödinger, l'altra paragonabile a una sorta di immagine speculare dell'equazione di Schrödinger, che descrive la propagazione a ritroso delle onde anticipate: dal futuro verso il passato.

La stessa equazione probabilistica fondamentale, sviluppata da Max Born nel lontano 1926, contiene un riferimento esplicito alla natura del tempo e ai due possibili tipi di equazione di Schrödinger, una che descrive le onde anticipate e l'altra che descrive le onde ritardate. C'è un fatto importante: a partire dal 1926, ogni volta che i fisici hanno utilizzato l'equazione di Schrödinger per calcolare le probabilità quantistiche, hanno di fatto preso in considerazione la soluzione delle onde anticipate, quindi l'influsso delle onde che viaggiano a ritroso nel tempo, senza neppure rendersene conto. Nell'interpretazione di Cramer la matematica, a partire dall'equazione di Schrödinger, è esattamente la stessa dell'interpretazione di Copenhagen. La differenza sta, esclusivamente, nella sola interpretazione. L'interpretazione di Cramer riesce nel "miracolo" di risolvere tutti i misteri e gli enigmi della fisica quantistica, rendendola, inoltre, compatibile con i presupposti della relatività ristretta (Fig 4).

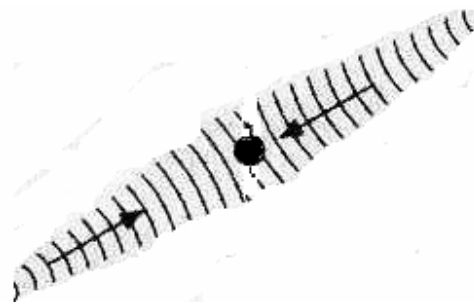


Fig. 4 – Interpretazione Transazionale

*La transazione tra onde ritardate, provenienti dal passato, e onde anticipate, provenienti dal futuro, da luogo ad una entità quantistica con proprietà duali onda/particella. La proprietà delle onde è conseguenza dell'interferenza delle onde ritardate e anticipate e la proprietà della particella è dovuta alla localizzazione della transazione.*

Questo miracolo si ottiene però ad un prezzo, cioè al costo di accettare che l'onda quantistica possa realmente viaggiare a ritroso nel tempo. A prima vista, ciò è in aperto contrasto con la logica comune, che ci dice che le cause devono sempre precedere l'evento causato, ma il modo in cui l'interpretazione transazionale considera il tempo differisce dalla logica comune, giacché l'interpretazione transazionale include esplicitamente gli effetti della teoria della relatività. L'interpretazione di Copenhagen tratta, invece, il tempo in modo classico, potremmo dire "newtoniano", e ciò è all'origine delle incongruenze che si manifestano ogni qualvolta si prova a spiegare i risultati di esperimenti come quello di Aspect e della doppia fenditura. Cramer, in pratica, ha scoperto un legame molto profondo tra relatività e meccanica quantistica e ciò rappresenta il nocciolo della sua interpretazione.

## **10. Altre interpretazioni della Meccanica Quantistica**

Nel corso del tempo, sono nate varie interpretazioni del formalismo matematico della Meccanica Quantistica. Abbiamo già descritto l'interpretazione di Copenhagen (CI) e l'interpretazione transazionale di Cramer (TI). Altre interpretazioni sono, ad esempio:

**HVT (Hidden Variable Theories):** è una "famiglia" di interpretazioni basate sul presupposto che tutte le versioni abituali della Meccanica Quantistica siano incomplete, e che ci sia un livello di realtà sottostante (una sorta di mondo sub-quantistico) contenente informazioni

addizionali sulla natura della realtà. Tali informazioni addizionali sono appunto presenti nella forma di variabili nascoste. Se i fisici conoscessero i valori delle variabili nascoste potrebbero prevedere con precisione i risultati di determinate misurazioni, e non dovrebbero accontentarsi della “probabilità” di ottenere certi risultati.

**De Broglie-Bohm GWI (Guide Wave Interpretation):** in questa interpretazione, proposta originariamente da L. De Broglie e poi migliorata e sostenuta da D. Bohm, ad ogni tipo di particella può essere associata un'onda che guida il moto della particella stessa, come un radar guida una nave. Da qui il termine *teoria delle onde pilota*. Matematicamente, tale onda pilota è descritta dalla classica funzione d'onda di Schrödinger della meccanica quantistica corretta però aggiungendo un fattore che rende conto dell'influenza pilotante sul moto delle particelle. A differenza dell'Interpretazione di Copenhagen, tale onda pilota è reale e permea tutto l'universo, guidando qualsiasi particella reale (come un fotone o un elettrone).

**MWI (Many Worlds Interpretation):** proposta da Everett agli inizi degli anni '50 e sostenuta da Wheeler, tale teoria consiste nell'idea che ogni qualvolta il mondo deve affrontare una scelta a livello quantistico (ad esempio, se un elettrone può scegliere in quale fenditura passare nel noto esperimento della doppia fenditura), l'universo si divide in due (ovvero in tante parti quante sono le scelte possibili), di modo che vengano realizzate tutte le possibili opzioni (nell'esperimento di cui sopra, in un mondo l'elettrone passa attraverso la fenditura A, nell'altro attraverso la fenditura B).

## 10. Bibliografia

1. Amir D. Aczel, *Entanglement: il più grande mistero della fisica*, Raffaello Cortina Editore, Milano 2004;
2. Arntz W., Chasse B., Vincente M., *Bleep*, Macro Edizioni, Cesena 2006;
3. Cramer J.G., *The Transactional Interpretation of Quantum Mechanics*, Reviews of Modern Physics 58, pp. 647-688, July 1986;
4. Cramer J.G., *What's done is done... or is it?*, New Scientist, 30 September 2006, pp. 6-10;

5. Einstein A., *Relatività: esposizione divulgativa*, Boringhieri, Torino 1967;
6. Feynman R., *Meccanica Quantistica*, in *La fisica di Feynman*, Vol.III, Zanichelli, Bologna 2001;
7. Gamow G., *Trent'anni che sconvolsero la fisica*, Zanichelli, Bologna 1990;
8. Ghirardi G.C., *Un'occhiata alle carte di Dio*, Il Saggiatore, Milano 2003;
9. Gribbin J., *Q come Quanto: dizionario enciclopedico illustrato di fisica quantistica*, Macro Edizioni, Cesena 2004;
10. Penrose R., *La strada che porta alla realtà: le leggi fondamentali dell'universo*, Rizzoli, Milano 2005;
11. Slater J.C., *Teoria Quantistica della materia*, Zanichelli, Bologna 1980;
12. Wheeler J.A., Tegmark M., *100 years of the quantum*, Scientific American, Febbraio 2001, pp. 68-75.