

A02



Vai al contenuto multimediale

Fausto Intilla

Esperimenti sulle disuguaglianze di Bell

Dalle origini al crollo del realismo locale





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXIX
Gioacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.gioacchinoonoratieditore.it
info@gioacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-2127-6

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: gennaio 2019

Nessuna teoria della realtà compatibile con la teoria dei quanti, può richiedere che eventi spazialmente separati siano indipendenti.

John Stewart BELL

Gli esseri umani sono bloccati in una situazione simile a quella di re Mida: non possiamo sperimentare direttamente la vera trama della realtà, perché tutto ciò che tocchiamo diventa materia

Nick HERBERT

Indice

- 9 *Introduzione*
- 11 *Capitolo I*
Modellando la realtà, immaginando il possibile
- 1.1. Dal principio di causalità a quello di località, 11 – 1.2. Dal realismo locale al principio di non località, 17 – 1.3. Dalla MQ al teorema e le disuguaglianze di Bell, 21.
- 45 *Capitolo II*
Modellando la realtà, immaginando l'impossibile
- 2.1. CHSH e CH74: i primi esperimenti realizzati, 45 – 2.2. Gli esperimenti di Alain Aspect e colleghi, 52 – 2.3. L'esperimento di Nicolas Gisin e colleghi, 58 – 2.4. L'esperimento di Anton Zeilinger e colleghi, 65 – 2.5. L'esperimento di Jian-Wei Pan e colleghi, 66 – 2.6. L'esperimento di Mary Rowe e colleghi, 81 – 2.7. L'esperimento di Simon Gröblacher e colleghi, 82 – 2.8. L'esperimento di Daniel Salart e colleghi, 84 – 2.9. L'esperimento di Markus Ansmann e colleghi, 86 – 2.10. L'esperimento di Marissa Giustina e colleghi, 87 – 2.11. Gli esperimenti dei gruppi di Hensen, Giustina e Shalm, 89 – 2.12. L'esperimento di Roman Schmied e colleghi, 90 – 2.13. L'esperimento di David Kaiser e colleghi, 92 – 2.14. L'esperimento di Wenjamin Rosenfeld e colleghi, 94 – 2.15. L'esperimento denominato: Big Bell Test, 96.
- 99 *Conclusioni*
- 103 *Biografie*
- 115 *Bibliografia*

Introduzione

«Ormai in fisica non c'è più nulla di nuovo da scoprire. Tutto ciò che rimane da realizzare sono misure sempre più precise». Lo disse nel settembre del 1900 Lord Kelvin (davanti all'assemblea della *British Association for the Advancement of Science*, a Bradford, nel Regno Unito), uno dei fisici più eminenti della sua epoca, quando sembrava che la meccanica di Newton e l'elettromagnetismo potessero spiegare tutta la realtà fisica. Pochi anni dopo però, la meccanica quantistica e la relatività rivoluzionarono le vecchie idee di spazio, tempo ed energia.

Ebbene la storia ovviamente ha smentito in modo eclatante tali idee, purtroppo condivise anche da molti altri scienziati dell'epoca di L. Kelvin. Oggigiorno nessuno, tra gli "addetti ai lavori", ritiene più che le attuali teorie in ambito scientifico (non solo nel campo della fisica), siano da considerarsi del tutto consolidate e quindi in sostanza, definitive ed "intoccabili".

Tuttavia un teorema, come spesso accade nell'ambito della logica matematica (quando è implicitamente legata ad una realtà fisica difficilmente sperimentabile), è riuscito a sopravvivere per oltre mezzo secolo, confermando solo in questi ultimi anni la sua importanza, con la stessa forza e solidità con cui nel 1964 (anno della sua pubblicazione), si impose in ambito accademico (disturbando il sonno a molti scienziati, filosofi e liberi pensatori, a partire dalla metà degli anni Sessanta fino ad oggi). Ovviamente il riferimento è al teorema di John Stewart Bell, che per più di mezzo secolo (dal 1964 al 2015), ha fatto riflettere e discutere scienziati di mezzo mondo, su quella che avrebbe dovuto essere l'effettiva descrizione del mondo fisico, attraverso un modello teorico di riferimento che non lasciasse più spazio ad alcun dubbio.

Le domande fondamentali quindi, tra tutti gli studiosi e ricercatori che per vari decenni si occuparono di tale questione, erano le seguenti: È possibile una descrizione della realtà fisica, solo ed esclusivamente attraverso il principio di località e del realismo locale? Esisteranno davvero delle variabili nascoste, all'interno delle nostre teorie fisi-

co–matematiche, oppure tutto è descrivibile con le regole e i principi standard della meccanica quantistica? È possibile che anche il mondo macroscopico, risponda ai principi della meccanica quantistica, ma che ancora non abbiamo degli strumenti fisici sufficientemente evoluti per poter osservare tale fenomeno? Esiste una sottile linea di confine, tra il mondo dell’infinitamente piccolo e quello macroscopico, dove è necessario abbandonare l’uno o l’altro modello di riferimento (fisica classica o meccanica quantistica, per intenderci), per una descrizione esatta e coerente della realtà?

Ebbene nel 2015, un importante esperimento sulle disuguaglianze di Bell (riportato nel presente libro; v. sottocapitolo 2.10. *Gli esperimenti dei gruppi di Hensen, Giustina e Shalm*), sembrerebbe avere almeno in parte risposto alle succitate domande, mettendo la parola fine al realismo locale. È l’anno del trionfo della meccanica quantistica, come unico modello di riferimento per una descrizione della realtà, ampiamente supportata da una moltitudine di prove sperimentali ormai ritenute quasi del tutto inoppugnabili. Ma è anche l’anno del trionfo del teorema di Bell e di tutto ciò che al cospetto delle menti più eccelse, aveva già preannunciato con circa mezzo secolo d’anticipo. Nel presente volume vengono presentati tutti gli esperimenti di Bell, compiuti dall’inizio degli anni Settanta fino ad oggi (2018); ma solo i più significativi sono stati descritti nel dettaglio utilizzando il formalismo matematico della meccanica quantistica (tutti gli altri sono stati esposti in forma divulgativa). Con la speranza di far appassionare a tale tema il maggior numero di lettori che avranno scelto quest’opera, sia per pura curiosità che per un necessario approfondimento di studio sull’argomento in questione (studenti universitari in primis), auguro a chiunque sia giunto alle ultime parole di questa breve prefazione, una buona lettura.

Fausto Intilla
Cadenazzo, 29 settembre 2018

Modellando la realtà immaginando il possibile

Si può trascorrere una vita intera a costruire un muro di certezze tra noi e la realtà.

Chuck PALAHNIUK

L'immaginazione è l'unica arma nella guerra contro la realtà.

Lewis CARROLL

1.1. Dal principio di causalità a quello di località

Sia in ambito scientifico che filosofico, il termine “causalità” si riferisce semplicemente ad una relazione di causa ed effetto. La causa è ciò che produce l'effetto, mentre la causalità esprime il rapporto tra una causa e il suo rispettivo effetto. L'idea di questo rapporto riferito a tutta la realtà, costituisce dunque il principio di causalità. Secondo tale principio tutti i fenomeni debbono avere una causa. Per Spinoza era evidente che «da una causa ben determinata, deve necessariamente risultare un effetto; e, inversamente, se non vi è alcuna causa ben determinata, è impossibile che si produca un effetto”. Secondo Kant invece, la “legge della causalità” indicava semplicemente che: «Tutti i cambiamenti avvengono, secondo la legge di connessione tra causa ed effetto». Dopo Kant, agli inizi del XIX secolo, la causalità si colloca nell'ambito della razionalità pura; dove risulta inscindibile dal concetto di deducibilità. Ovvero, la causalità permette la deduzione dell'effetto (previsione ottenuta dal riconoscimento del nesso causale); creando dunque un assioma fondamentale per il metodo e la conoscenza scientifica dell'era moderna. Oggigiorno nel campo della fisica, il

principio di causalità afferma che se un fenomeno (definito causa) produce un altro fenomeno (definito effetto), allora la causa precede l'effetto (ordine temporale). Il principio di causalità è uno dei limiti realistici imposti a qualsiasi teoria matematica coerente, affinché possa essere considerata fisicamente ammissibile.

Il principio di causalità è stato per molto tempo strettamente associato alla questione del determinismo; secondo cui alle stesse condizioni iniziali, le stesse cause producono gli stessi effetti. Tuttavia, tenendo conto di fenomeni di natura intrinsecamente statistica (come il decadimento radioattivo di un atomo o la misurazione in meccanica quantistica), esso nel corso del XX secolo se ne è distanziato considerevolmente. Oggi il principio di causalità, assume delle forme abbastanza diverse, in base ai rami della fisica che vengono considerati (in cui esso si ritrova ad operare).

Il principio di causalità (inteso come ordine temporale della causalità), venne formulato in modo chiaro ed esplicito da Eulero e Jean Le Rond d'Alembert, ma era già stato compreso molto tempo prima da Descartes¹ ed utilizzato implicitamente da Isaac Newton.

Tutta la fisica classica fonda le sue radici sul principio di causalità; secondo cui qualsiasi effetto è interamente determinato da delle azioni anteriori. L'effetto è il cambiamento di stato del sistema fisico studiato, dovuto alle cause (quelle identificabili) e alle forze che si esercitano sul sistema (sia per contatto come shock e attrito, sia a distanza come la gravitazione o la forza elettromagnetica) o agli eventi che producono queste forze.

Isaac Newton, scrivendo che esiste una proporzionalità tra la forza motrice (la causa) e i cambiamenti di movimento (l'effetto), ha reso lo studio della causalità uno studio quantitativo che sta alla base della fisica classica. Il problema della possibile differenza di natura tra la causa e l'effetto è quindi ridotto alla questione dell'ordine temporale

1. Storicamente, la formulazione moderna del principio di causalità è stata ispirata dalla filosofia meccanicistica di René Descartes, che ha cominciato ad approcciarla nel *Discorso sul metodo* (1637), per poi svilupparla maggiormente in *Meditazioni metafisiche* (1641). Descartes si chiede, tra le altre cose, se la causa debba precedere nel tempo il suo effetto. Egli risponde: «[...] propriamente parlando, non ha il nome o la natura di causa efficiente fin quando essa non produce il suo effetto; e quindi non lo è prima». (DESCARTES, *Meditazioni metafisiche*). La causa efficiente è un insieme di condizioni, di cui è necessario e sufficiente che esse siano presenti nel momento in cui l'effetto si manifesta.

tra gli stati dell'intero sistema studiato, poiché tali stati possono essere considerati come cause ed effetti gli uni degli altri. La previsione deterministica degli stati futuri dalla conoscenza di quelli del passato sembra essere associata in modo "naturale" al principio di causalità nella fisica classica; ma ciò sarebbe come dimenticare che nella pratica sperimentale nessun dato è perfettamente noto e che nella teoria, la complessità matematica inizia non appena vi è la presenza di soli tre corpi. Ed inoltre, sarebbe come dimenticare che la teoria del caos, è nata proprio dallo stesso determinismo.

Un corpo macroscopico è un corpo composto da un enorme numero di particelle (atomi o molecole). Se questa materia viene trattata dalla fisica classica o relativistica, allora, per ipotesi, la causalità si applicherebbe anche pienamente a ciascun corpo microscopico che compone il tutto, specialmente per quanto riguarda le loro influenze reciproche; tuttavia, la sua manifestazione è singolarmente diversa dal caso dei sistemi più semplici. Il gran numero di componenti distinti (ovvero di gradi di libertà) del corpo macroscopico renderebbe irrealizzabile, in pratica, la determinazione delle equazioni del moto con i metodi della fisica classica. Mentre la completa determinazione dello stato iniziale del sistema, sarebbe irraggiungibile. In tale contesto, le leggi del corpo macroscopico vengono quindi scritte utilizzando delle statistiche: se il sistema è "stabile", qualsiasi cambiamento di "bassa portata" lo rimuove solo momentaneamente da uno stato di equilibrio e dunque, lo stato globale del sistema è determinato, con una probabilità molto forte, dall'immediata vicinanza di questo "stato medio".

Per tutti i corpi microscopici che si riuniscono per comporre un corpo macroscopico, lo stato è determinabile solo a livello statistico: vi è lo stato medio degli stati di questi corpi e vi sono inoltre altri stati possibili con delle probabilità associate; ma è impossibile determinare il loro stato "attimo dopo attimo", con la consueta precisione della fisica classica.

Tutte le perturbazioni/informazioni che vanno ad interessare un corpo macroscopico nella sua interezza, vengono disperse dagli scambi incessanti tra i componenti microscopici e in base alle leggi della statistica. Uno stato (medio o transitorio) di un corpo macroscopico, o il particolare stato di uno dei suoi componenti microscopici, emerge dunque da una causa non precisabile, indefinibile; per tale motivo

è impossibile determinarlo con precisione assoluta, partendo dallo stato precedente (anche da un punto di vista teorico non è possibile risalire allo stato iniziale). Inoltre, l'impossibilità di predire lo stato esatto, ma solo lo stato statistico, del corpo macroscopico o di un corpo microscopico, ci fa talvolta parlare di indeterminismo.

Poiché il principio di causalità è applicabile praticamente in ogni contesto, verso la fine del XIX secolo Henri Poincaré dimostrò che anche dei semplici sistemi trattabili con la fisica classica possono essere molto sensibili alle variazioni delle condizioni iniziali: una piccolissima modifica può, per alcuni sistemi molto semplici, portare ad un'evoluzione successiva molto diversa dal sistema iniziale. Quindi, poiché è impossibile conoscere con assoluta precisione le condizioni iniziali di un sistema e poiché è impossibile conoscere le esatte misurazioni di qualsiasi causa influente (poiché anche la fisica classica è una scienza sperimentale), tutto il rigore possibile non permette di prevedere sempre lo stato futuro di un sistema.

Il determinismo dice che alle stesse condizioni iniziali, le stesse cause producono gli stessi effetti. In pratica, questo "alle stesse condizioni iniziali" pone un problema di realizzazione, poiché le condizioni iniziali del sistema non possono essere conosciute con assoluta precisione. Se si ripete per la seconda volta quello che sembrerebbe essere lo stesso esperimento, si risconterà sicuramente qualche differenza con l'esperimento di partenza. Tuttavia, molti sistemi studiati sono "stabili"; vale a dire che piccole variazioni iniziali portano solo a piccole variazioni sull'evoluzione del sistema.

Questa breve nota introduttiva sul concetto di causalità, ha come unico scopo quello di farci riflettere su come l'essere umano percepisce ed interpreta la realtà apparente del mondo osservabile; sia essa a noi circostante oppure lontana milioni di anni luce. Ed è proprio questa esperienza percettiva collettiva, che ha indirizzato la nostra evoluzione biologica verso una maggiore intelligenza di specie e la nostra evoluzione culturale verso una conoscenza sempre più profonda dei meccanismi della natura.

Ma forse nulla è come appare e noi non siamo nient'altro che degli ingranaggi di un meccanismo senza confini di cui non riusciremo mai a coglierne l'effettiva interezza e complessità; proprio perché ogni nostra singola azione, ogni nostro pensiero, contribuisce alla creazione continua di questa entità infinita in continua espansione

(che taluni chiamano Universo). Nel 1938, in *La pensée et le mouvant* (trad. it. “Pensiero e movimento”, Bompiani, Milano), Henri Bergson scriveva:

Se il movimento è una serie di posizioni e il mutamento una serie di stati, il tempo è fatto di parti distinte e giustapposte. Senza dubbio diciamo ancora che esse si succedono, ma questa successione potrebbe essere assimilabile a quella delle immagini di una pellicola cinematografica: il film potrebbe svolgersi dieci, cento, mille volte più veloce senza che niente di ciò che svolge venga modificato; se andasse infinitamente veloce, se lo svolgimento (questa volta fuori dall'apparecchio) divenisse istantaneo, si vedrebbero sempre le stesse immagini. La successione così intesa non aggiunge dunque niente; sottrae piuttosto qualcosa, segnala una mancanza, traduce una infermità della nostra percezione, condannata a frammentare il film immagine per immagine al posto di coglierlo globalmente. In breve, il tempo così ravvisato non è che uno spazio ideale in cui si suppongono allineati tutti gli eventi trascorsi, presenti e futuri, ai quali si impedisce di apparire unitamente [...].

Penso che anche Einstein, come molti altri eminenti fisici del suo tempo (nonché attuali), fosse pienamente d'accordo con questa visione della realtà, visto che un giorno ebbe a dire: «La distinzione fra passato, presente e futuro è solo un'illusione, anche se ostinata».

È dunque qui che sta il nocciolo della questione. Il passo tra il principio di causalità e quello di località, non può far altro che apparirci breve, logico e scontato; ma è proprio qui che “casca l'asino”. Noi possiamo analizzare solo dei piccoli frammenti di una realtà senza confini; e nel fare ciò possiamo fidarci solo delle nostre limitate capacità sensoriali e percettive. Dobbiamo accettare l'idea che possano esserci delle cause che non potremo mai conoscere, ma che tuttavia conducono a degli effetti/eventi pienamente osservabili. Il riferimento non è a delle ipotetiche “variabili nascoste”, ma semplicemente ad una quantità infinita di informazione che non può essere analizzata, elaborata e compresa neppure da un'entità che disponesse di un'intelligenza illimitata. Solo l'Universo può comprendere sé stesso.

Il principio di località afferma che: «Oggetti distanti non possono avere influenza istantanea l'uno sull'altro: un oggetto è influenzato direttamente solo dalle sue immediate vicinanze»².

2. Una teoria che includa il principio di località in genere viene definita come una “teoria locale”. Si tratta di un'alternativa al vecchio concetto di “azione a distanza istantanea”.

Anche qui, ad entrare in gioco è sempre il concetto di tempo. Ma se il tempo, come sosteneva anche Einstein, è solo un'illusione, allora perché continuiamo ostinatamente a chiamarlo in causa? La risposta è semplice: perché ci fa comodo così. Ed è stato un bene che sia stato così, specialmente negli ultimi tre secoli; altrimenti non avremmo potuto raggiungere i traguardi scientifici e tecnologici che oggi ci consentono di scambiare messaggi alla velocità della luce, di pilotare un aereo mediante le onde cerebrali³ o di esplorare lo spazio fino ai confini del sistema solare.

Il fatto che vi siano dei limiti (teorici, pratici e concettuali) che non potremo mai superare, è solo un bene; altrimenti smetteremmo di fare scienza, poiché tutto sarebbe già dato! Tutto ciò che abbiamo finora raggiunto, scoperto, ideato, “capito”, dobbiamo solo avere la modestia di definirlo aggiungendo una semplice parolina al suo fianco: “apparente”. Avremmo così il principio di causalità apparente, il principio di località (... e di non località!) apparente, la Relatività Ristretta (... e Generale!) apparente, il principio di Mach apparente e via di seguito.

Tutto ciò potrà sembrarvi folle, ma purtroppo (o per ben che si voglia) è del tutto coerente con i più alti livelli oggi raggiunti dalla fisica sperimentale; specialmente in ambito quantistico. Avrete modo di scoprire esattamente di cosa sto parlando, verso la fine di questo libro. Posso solo anticiparvi che nell'anno 2015, si sono aperte le porte

La località si è evoluta fuori dalle teorie di campo della fisica classica. Il concetto è che per avere un'azione, causata dall'*influenza* di un punto A verso un punto B (o viceversa), qualcosa nello spazio tra quei due punti (ad esempio un campo) deve mediare l'azione. Per esercitare un'*influenza*, qualcosa, come un'onda o una particella, deve viaggiare attraverso lo spazio tra i due punti, “trasportando” appunto tale *influenza*. La teoria della relatività speciale limita la velocità con cui tutte queste *influenze* possono viaggiare, a quella della luce (*c*). Dunque, il principio di località implica che un evento in un punto non può causare un risultato simultaneo in un altro punto. Un evento al punto A non può causare un risultato al punto B, in un tempo inferiore a $t = D/c$ (dove “D” è la distanza tra i due punti e “c” è la velocità della luce).

3. Nel 2014 gli scienziati del Technische Universität München (TUM) e del TU Berlin hanno dimostrato che i comandi di un velivolo possono essere eseguiti solo mediante le onde cerebrali, senza toccare joystick, manetta e pedali. I test, effettuati con un simulatore di volo, sono stati eseguiti con successo da sette persone, una delle quali non aveva mai pilotato un aereo. Il progetto Brainflight, finanziato dall'Unione Europea e sviluppato dalle due università tedesche, ha permesso di studiare nuovi metodi per il “volo controllato dal cervello”.

ad un nuovo paradigma scientifico, che forse la mente umana non riuscirà mai ad accettare pienamente, accantonando per sempre ogni dubbio.

1.2. Dal realismo locale al principio di non località

Con il termine realismo in fisica si indica l'idea che la natura non è in alcun modo legata o vincolata dalla mente umana; ovvero che la sua esistenza non dipenda dal pensiero umano. Detto in altre parole, entrando per qualche istante nel campo della meccanica quantistica: anche se il risultato di una possibile misurazione non esiste prima dell'atto stesso della misurazione, ciò non significa che sia una creazione della mente dell'osservatore.

Una proprietà indipendente dalla mente non deve essere un valore di una variabile fisica (come ad esempio la posizione o la quantità di moto). Una proprietà può essere potenziale (cioè può essere una capacità): ad esempio un oggetto di vetro ha il potenziale (o la capacità) di rompersi, se sottoposto a una particolare forza; ma se ciò non accade (ovvero se l'oggetto in questione non viene sottoposto a tale forza), esso sicuramente non si romperà. Anche se il risultato di colpire un oggetto di vetro con un martello non esiste prima dell'atto di colpirlo, ciò non significa che il vetro rotto sia una creazione dell'osservatore.

Pensiamo ora ad un acceleratore di particelle come ad un sofisticato tipo di "martello"; in tale contesto fisico si possono per analogia identificare i "frammenti" delle particelle bersaglio, al termine del processo di scontro con le particelle "proiettile", come i cocci di vetro dell'oggetto precedentemente considerato.

Tale risposta, cioè la rottura, è una risposta *condizionale*; ovvero una risposta a una particolare applicazione della forza. Applicando tale concetto ai sistemi quantistici, Schrödinger ha riconosciuto che anche loro hanno una risposta *condizionale*; ovvero una tendenza a rispondere (considerabile anche come una specifica probabilità di risposta) a una particolare forza di misurazione, con un valore particolare. In un certo senso, essi sono pre-programmati con un risultato particolare.

Un tale risultato sarebbe realistico in senso metafisico, senza essere realistico nel senso fisico del *realismo locale* (che richiede che un singolo valore sia prodotto con certezza). Un concetto correlato

è la “determinatezza controfattuale”; ovvero l’idea che sia possibile descrivere in modo significativo come ben definito, il risultato di una misurazione che, di fatto, non è stata eseguita (cioè la capacità di assumere l’esistenza di oggetti e assegnare valori alle loro proprietà, anche quando non sono stati misurati).

In genere la definizione più comune di *realismo locale* è la seguente: *esso è la combinazione del principio di località con l’assunto “realistico” che tutti gli oggetti debbano oggettivamente possedere dei valori preesistenti per ogni possibile misurazione, prima che tali misurazioni vengano effettuate*. Il realismo locale è una caratteristica di rilievo della meccanica classica, della Relatività Generale e della teoria di Maxwell, ma la meccanica quantistica rifiuta largamente questo principio a causa della presenza di *entanglement* quantistici (per la maggior parte chiaramente dimostrati dal paradosso EPR e quantificati dalle disuguaglianze di Bell). Qualsiasi teoria, come la meccanica quantistica, che violi le disuguaglianze di Bell, deve rinunciare al realismo locale o alla *determinatezza controfattuale*⁴.

L’affidabilità dei valori *controfattualmente* definiti è un’ipotesi di base che, insieme all’ “asimmetria temporale” e alla “causalità locale” ha portato alle disuguaglianze di Bell. Bell ha dimostrato che i risultati degli esperimenti intesi a testare l’idea di variabili nascoste sarebbero previsti entro certi limiti basati su tutte e tre queste ipotesi (che sono considerate principi fondamentali per la fisica classica), ma che i risultati trovati entro questi limiti sarebbero incoerenti con le previsioni della teoria della meccanica quantistica⁵. Gli esperimenti hanno

4. Nella maggior parte delle interpretazioni convenzionali (quale quella di Copenaghen e quella basata sulle *storie consistenti*) in cui si assume che la funzione d’onda non abbia un’interpretazione fisica diretta, è il realismo ad essere rifiutato. Le reali proprietà definite di un sistema fisico quantistico “non esistono” prima della misura e la funzione d’onda viene interpretata come niente altro che uno strumento matematico utilizzato per calcolare le probabilità dei risultati sperimentali.

5. Nel 1964 John Bell dimostrò con il suo teorema che se esistessero variabili nascoste che rendessero la teoria locale, alcune configurazioni dovrebbero soddisfare determinate relazioni non previste dalla meccanica quantistica. Alcuni fisici, come Alain Aspect e Paul Kwiat, hanno condotto sperimentazioni che hanno registrato violazioni delle disuguaglianze di Bell su 242 deviazioni standard, conseguendo un’eccellente certezza scientifica. Ciò depone a favore della meccanica quantistica nella sua interpretazione classica, escludendo teorie a variabili nascoste locali (rimane aperta la possibile esistenza di quelle non locali). Una teoria delle variabili nascoste che volesse mantenere coerenza con la meccanica quantistica dovrebbe possedere caratteristiche non-locali, permettendo l’esistenza di relazioni di causa

dimostrato che i risultati della meccanica quantistica superano in modo prevedibile i limiti classici. Il calcolo delle aspettative basato sul lavoro di Bell implica che per la fisica quantistica l'assunzione del "realismo locale" debba essere abbandonata. Nella derivazione di Bell si assume esplicitamente che ogni misura possibile, anche se non eseguita, possa essere inclusa nei calcoli statistici. Il calcolo implica la mediazione di insiemi di risultati che non possono essere tutti contemporaneamente concreti; se alcuni sono considerati risultati concreti di un esperimento altri devono essere considerati controfattuali. Quelli che sono definiti come fattuali sono determinati dallo sperimentatore; in tal modo i risultati delle misurazioni effettivamente eseguite diventano reali in virtù della sua scelta di farlo, i risultati delle misurazioni che non esegue sono controfattuali. Il teorema di Bell dimostra che ogni tipo di teoria quantistica deve necessariamente violare la località o rifiutare la possibilità di misurazioni affidabili del tipo controfattuale e definito. La determinatezza controfattuale è presente in ogni interpretazione della meccanica quantistica che considera le misurazioni quantomeccaniche come descrizioni oggettive dello stato di un sistema (o dello stato del sistema combinato e dell'apparato di misurazione), ma che non tiene conto del fatto che non tutte le descrizioni oggettive del genere possono essere rivelate simultaneamente dalle misurazioni. L'interpretazione transazionale di Cramer (1986) è un esempio di tale interpretazione.

Nel 1935 Albert Einstein, Boris Podolsky e Nathan Rosen, nel loro paradosso EPR (l'acronimo è composto dalle iniziali dei loro cogno-

istantanee, o comunque più veloci della luce, tra entità fisiche separate. Sulla scia dell'idea di de Broglie dell'*onda pilota*, nacque nel 1952, a opera del fisico David Bohm, un'interpretazione della meccanica quantistica che ancora oggi è considerata la teoria a variabili nascoste meglio formulata. Basandosi sull'idea originaria di de Broglie, Bohm ha teorizzato di associare a ciascuna particella, ad esempio un elettrone, un'onda guida che governi il suo moto. Grazie a tale assunto gli elettroni hanno un comportamento sufficientemente chiaro: quando si conduce il celebre esperimento della doppia fenditura, essi passano attraverso una fenditura piuttosto che un'altra e la loro scelta non è probabilistica, ma predeterminata, mentre l'onda associata attraversa entrambe le fenditure generando la figura di interferenza. Tale prospettiva contraddice l'idea di eventi locali che è utilizzata sia nella teoria atomica classica che nella teoria della relatività. I conflitti con la teoria della relatività, non solo in termini di non-località, ma soprattutto per quanto riguarda l'invarianza di Lorentz, sono considerati dai sostenitori della "convenzionale" fisica quantistica come la principale debolezza della teoria di Bohm. Secondo i critici essa sembrerebbe scaturire da una forzatura, ovverosia sarebbe stata deliberatamente strutturata per fare previsioni che sono in ogni dettaglio uguali a quelle della meccanica quantistica.

mi), teorizzarono che la meccanica quantistica poteva non essere una teoria locale (ipotizzando erroneamente che il formalismo quantistico fosse incompleto, poiché non era in grado di spiegare tutti gli elementi della realtà fisica), poiché una misurazione fatta su una coppia di particelle separate ma correlate (*entangled*) tra loro, causa un effetto simultaneo; ovvero: il collasso della funzione d'onda nella particella *entangled* misurata successivamente (un effetto che supera la velocità della luce). Mi spiego meglio con un esempio: in una coppia di particelle *entangled* (A;B), se lo sperimentatore misura lo spin della particella A e rileva *spin up*, istantaneamente, in qualsiasi altra parte dell'universo si trovi l'altra particella B (anche lontana milioni di anni-luce dalla sua "gemella" A), la sua funzione d'onda collassa e assume *spin down*; mentre prima dell'osservazione della particella A, il suo spin si trovava in uno stato di totale indeterminazione.

Se si accettava la teoria dei quanti della meccanica quantistica, si doveva accettare il paradosso EPR e quindi anche un principio di non-località⁶; ossia il fatto incontrovertibile che l'*entanglement*, la "relazione" tra le particelle quantistiche, si mantiene a prescindere dalla distanza nello spazio e al di là della limitazione relativistica della velocità della luce.

Siccome il principio di indeterminazione di Heisenberg, limita la precisione delle misurazioni inerenti a posizione e quantità di moto delle particelle, nel 1951, David Bohm propose di abbandonare questi parametri per lo studio dell'*entanglement* e di sostituirli con dei valori facilmente misurabili; come ad esempio lo spin. Fu nel 1964 che John Stewart Bell usò questa idea e formulò una disuguaglianza. Il suo grande punto d'interesse sta nel fatto che «la fisica quantistica prevede che

6. Alcuni fisici furono convinti delle argomentazioni (ancora tendenzialmente a favore di un realismo locale) di Einstein, Podolsky e Rosen e cercarono di elaborare delle teorie per completare la meccanica quantistica con l'introduzione di un livello sottostante di descrizione (teoria dell'onda pilota di Louis De Broglie, teorie con variabili nascoste di David Bohm, etc.). Tuttavia, la grande maggioranza dei fisici seguì la tesi di Bohr, secondo la quale non è possibile considerare una realtà fisica indipendente (separata) dallo strumento di misurazione (un concetto fondamentale strettamente legato al principio di non località). La loro fiducia nella tesi di Bohr, era rinforzata dal teorema di von Neumann, enunciato nel 1932 nel libro in cui erano poste le basi matematiche della meccanica quantistica. In questo libro von Neumann aveva affrontato il problema della interpretazione del carattere statistico delle predizioni quantistiche nei termini delle variabili nascoste e aveva dimostrato l'incompatibilità delle proprietà matematiche del formalismo quantistico con l'esistenza di un formalismo sottostante nel quale intervenissero delle variabili nascoste.