

# DALL'«ARTICOLO EPR» AGLI ESPERIMENTI DI ALAIN ASPECT: IL LUNGO CAMMINO DEL PROBLEMA DELLA NONLOCALITÀ IN MECCANICA QUANTISTICA

## ABSTRACT

Quando, nel 1935, venne pubblicato il famoso articolo chiamato poi “EPR Paper” per le iniziali dei suoi autori - Einstein, Podolsky, Rosen -, la comunità scientifica dovette confrontarsi non solo con le manifeste provocazioni che il suo argomento voleva mostrare, ma anche con latenti problemi che sarebbero sbocciati più avanti in tutti i loro stridenti contrasti. L'incompletezza della meccanica quantistica, che l'“articolo EPR” si proponeva di dimostrare, poggiava infatti su un principio molto problematico, quello della località, che sarebbe esploso nell'esperimento prima concettuale di Bohm e poi sperimentale di Aspect. Ciò che questo articolo vuole delineare è lo sviluppo del problema della nonlocalità, dai suoi albori fino alla prova della sua effettiva esistenza nel mondo quantistico, dove, come ben ha dimostrato Bell, nulla possono fare le variabili nascoste per dissolvere la realtà nonlocale di alcuni fenomeni.

When, in 1935, the famous “EPR article” – so called from the initials of its authors – was published, the scientific community had to face not only the manifest challenges that the argument meant to show, but also some hidden problems that would later arise. The incompleteness of quantum mechanics, which the “EPR article” aimed to prove, was indeed grounded on a very problematic principle, the locality principle, later challenged by the experiment first thought by Bohm and then performed by Aspect. The aim of this article is to delineate the development of the problem of nonlocality, from its origins to the proof of its existence in the quantum world, where, as Bell showed, the hidden variables cannot do anything in order to dispel nonlocality.

## 1. L'ARTICOLO DEL 1935

La domanda con la quale veniva intitolato l'articolo di Einstein, Podolsky e Rosen *Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* trovava una risposta apparentemente lungimirante nella sua conclusione:

while we have thus shown that the wave function does not provide a complete description of the physical reality, we left open the question of whether or not such a description exists. We believe, however, that such a theory is possible.<sup>1</sup>

Ciò che gli autori si proponevano di dimostrare era infatti che la teoria quantistica, così come era stata fino ad allora elaborata, e quindi con le correlazioni di

1. Einstein - Podolsky - Rosen 1935, p. 780.

incertezza di Heisenberg, non poteva definirsi completa. Il successo e la coerenza della teoria quantistica non permettevano, però, di rigettare la teoria in sé, ma spingevano a un'ottimistica speranza, quella che in un futuro sarebbe stato possibile completare la teoria.

Procedendo ora con ordine, solo un attento esame dell'articolo in questione ci consente di intravedere le basi concettuali sulle quali si fonda e di capire il tipo di terreno dal quale le sue radici traggono nutrimento. Senza dubbio l'"EPR Paper" è una fonte inesauribile di problematiche filosofiche che sono alla base della stessa ricerca scientifica: la distinzione tra una realtà oggettiva "indipendente dalla teoria" e i concetti fisici con i quali la teoria opera, ma anche il concetto di "successo" applicato a qualsiasi teoria scientifica, e quello di esperienza. Per capire l'argomentazione che si sviluppa nell'articolo, basta concentrare l'attenzione sui due criteri che ogni teoria deve soddisfare per potersi definire completa e descrittiva di elementi reali. Il primo criterio, necessario, predica che ogni elemento della realtà fisica deve avere una controparte nella sua rispettiva teoria; il secondo, invece, indica quali requisiti deve avere un elemento per essere una realtà fisica e viene esplicitato con queste parole: se, senza in alcun modo disturbare un sistema, è possibile predire con certezza (e quindi con probabilità uguale a 1) il valore di una quantità fisica, allora esiste un elemento di realtà fisica corrispondente a quella quantità. Con questo, si vuole attribuire completezza a una teoria se e solo se contiene al suo interno almeno una controparte per ogni singolo elemento della realtà fisica posta al di fuori di essa, dove per elemento di realtà fisica si intende una quantità fisica che si può predire non solo con certezza, ma anche senza perturbare il sistema oggetto della nostra indagine scientifica. Tralasciando ora la portata filosofica di tali criteri di completezza e di realtà, è importante notare come questa restrizione del campo della realtà fisica e la conseguente forzatura sul concetto di completezza portino inevitabilmente a considerare la meccanica quantistica una teoria incompleta. Per arrivare a ciò, gli autori sfruttano il principio di indeterminazione associato spesso al nome di Heisenberg: nel momento in cui un commutatore tra due operatori quantistici non è nullo, e quindi non è possibile trovare una base di autovettori comune ai due operatori, le due grandezze associate ai due operatori non possono essere misurate contemporaneamente. Nel caso di momento e posizione, per esempio, non è possibile misurare contemporaneamente le due grandezze fisiche di una stessa particella: la conoscenza di un valore esclude la possibilità di sapere in modo preciso anche l'altro valore. A questo punto, se la teoria quantistica fosse davvero completa, vorrebbe dire che, a seconda che si misuri una delle due grandezze fisiche posizione/momento, l'altra ces-

sa di essere un elemento della realtà fisica, in quanto non è possibile sapere il suo valore. Ciò significherebbe che il processo di misurazione dissolverebbe la realtà di un elemento. L'assurdità di questa conclusione, che per molti è una semplice verità, non viene considerata dagli autori come sufficiente per mostrare l'incompletezza della teoria quantistica: l'argomento, mirando a un obiettivo ben più profondo, non si accontenta di mostrare esiti paradossali, tra l'altro discutibili, ma di dimostrare come gli stessi strumenti della teoria quantistica ammettano l'esistenza reale e simultanea di grandezze fisiche dagli operatori non commutabili. Per questo l' "articolo EPR" mostra il caso di due particelle che dopo un momento di interazione si separano: calcolando il momento dell'una, possiamo predire con certezza anche il momento dell'altra e così anche per quanto riguarda la posizione. In questo modo è possibile attribuire alla stessa particella due valori relativi a due grandezze fisiche che non commutano. Avendo dunque dimostrato che le due grandezze che non commutano hanno realtà fisica nonostante non possano essere descritte simultaneamente dalla teoria, si deve concludere che la teoria quantistica non è completa. Il ragionamento dell'EPR è, però, ancora più sottile; date le due alternative spiegate precedentemente, ovvero che

1. La descrizione della meccanica quantistica data dalla funzione d'onda non è completa

oppure

2. Quando due operatori corrispondenti a due quantità fisiche non commutano, le due quantità non possono avere realtà simultanea

dovremmo negare la 1 e quindi concludere con la 2. L'esperimento mentale della coppia di particelle mostra infatti che, supponendo che la descrizione della realtà data dalla funzione d'onda sia completa, è possibile associare ben due funzioni d'onda alla stessa realtà, anche se autofunzioni di due operatori che non commutano. Eppure, la negazione della 1 non ci ha portato alla unica alternativa possibile, ovvero alla 2, bensì alla sua negazione: ovvero che due quantità hanno realtà simultanea anche se gli operatori a loro corrispondenti non commutano. Paradossalmente, la negazione della 1 porta alla negazione della sua unica alternativa, ovvero della 2. Gli autori, dunque, concludono che siamo costretti a affermare che la 1 è vera, e dunque che la descrizione della meccanica quantistica data dalla funzione d'onda non è completa<sup>2</sup>. L'unico modo per ovviare a questo argomento sarebbe quello di limitare il criterio di realtà, sulla base che due elementi fisici possano dirsi reali se e solo se possono essere misurati, o comunque

2. Per una maggiore delucidazione dell'argomento, vd. Jammer 1974, p. 182.

predetti simultaneamente. L'esigenza di restringere così drasticamente il campo del reale sarebbe sentita, però, nel momento in cui ammettessimo che la misurazione di un elemento possa in qualche modo causare una perturbazione simultanea sull'altro elemento in considerazione. Possibilità che, senza tentennamenti, viene definita «non reasonable».

## 2. IL PRINCIPIO DI LOCALITÀ

La conclusione alla quale l'«articolo EPR» voleva portare, ovvero l'incompletezza della meccanica quantistica, non è però così convincente da far sfuggire le zone di ombra dell'argomento, spesso incurante di sviscerare con metodo i problemi che serpeggiano e di affrontare con criticità i principi concettuali sui quali si fonda. Lo stesso Einstein, in una lettera scritta a Ehrenfest tre anni prima, ammetteva che l'attribuzione di realtà oggettiva alla posizione e al momento non è logicamente necessaria, e addirittura sarà il primo a biasimare lo sviluppo dell'argomento EPR, a suo avviso «buried by erudition»<sup>3</sup>. Più volte, nel corso della sua vita, il padre della relatività tentò di riformulare l'argomento EPR<sup>4</sup> tralasciando da una parte le correlazioni di incertezza di Heisenberg e esplicitando dall'altra i principi sui quali il ragionamento si basa. Ben due lettere a Schrödinger, l'una del 7 e l'altra del 19 Giugno, insistono proprio sull'irragionevolezza di accettare la dipendenza immediata di due sistemi separati; convinzione che viene ribadita in tutta la sua forza in uno degli ultimi scritti di Einstein, nel 1947, sotto forma di appunti, scribacchiati in modo essenziale su una lettera ricevuta da Mougouillanes:

Composite system of total spin 0.

1. The description is assumed to be complete.
2. A coupling of distant things is excluded.

[...]

If there is no coupling, then the result of a measurement of the spin of subsystem II may in no way depend on whether a measurement was taken of subsystem I (or on what kind of measurement)

The two assumptions therefore cannot be combined.

Sullo stesso manoscritto si trovano scritte due righe sul margine destro:

3. È diventata famosa così la frase usata da Einstein in una lettera del 19 Giugno 1935 a Schrödinger «Gelehrsamkeit verschüttet».

4. La rivisitazione dell'argomento EPR è l'argomento centrale di due articoli: Howard 1985, pp. 171-201 e Sauer 2007, pp. 879-887.

The description by quantum theory is incomplete one with respect to the individual system, or

- a. There is an immediate coupling of states of spatially separated things.<sup>5</sup>

Dopo averlo aspramente criticato, Einstein rielaborava così l'argomento EPR con semplicità e chiarezza. In questa ultima versione, egli riprendeva un esperimento mentale di Bohm inerente a due particelle con spin totale zero e proponeva la completezza della teoria quantistica e il principio di località come due alternative escludentesi. Se infatti presupponiamo che non ci possano essere fenomeni nonlocali, e che quindi non esista una immediata azione tra due particelle distanti, allora non è possibile considerare completa la teoria della meccanica quantistica.

La parte forse più controversa dell'argomento è proprio l'assunzione che sia impossibile alcun tipo di influenza istantanea tra un punto e l'altro dello spazio. Nel momento in cui, infatti, un atto di misura su una particella potesse portare istantaneamente una perturbazione su un'altra particella distante modificandone così le caratteristiche, nulla potrebbe vietare che la realtà di un elemento possa dipendere da un evento distante. In poche parole, il principio che giustificherebbe la conclusione dell'EPR, e che viene sbrigativamente accennato con la frase «the first system, which does not disturb the second system in any way»<sup>6</sup>, potrebbe cadere nella meccanica quantistica e quindi condurre a imbarazzanti conclusioni. Prima però di affrontare queste conclusioni, ben lontane dal "reasonable" esito a cui pervengono i tre autori sopra citati, è bene analizzare il principio della località in tutte le sue sfaccettature.

Il principio di località può essere sintetizzato come il soddisfacimento di due condizioni:

1. Qualsiasi azione di uno sperimentatore su un punto dello spazio non può influenzare simultaneamente il risultato di una misurazione effettuata su un altro punto dello spazio; nel caso in cui la separazione spaziale tra l'azione dello sperimentatore e il risultato della misurazione è  $sd$ , è possibile che ci sia un'influenza tra i due punti dello spazio se e solo se la misurazione segue temporalmente l'azione di almeno  $st$ , dove  $sd$  è  $c$  volte  $st$ .
2. Il risultato di una misurazione di un osservabile a un punto nello spazio non può influenzare il risultato di una seconda misurazione.

Le due condizioni, chiamate da Shimony "parameter independence" e "outcome independence", e da Jarrett "locality principle" e "completeness princi-

5. La trascrizione degli appunti presi sul manoscritto si trovano nell'articolo di Sauer 2007, pp.879-887.

6. Einstein - Podolsky - Rosen 1935, p. 780.

ple”, sono basate sullo stesso principio su cui si fonda la teoria einsteiniana della relatività speciale: nessun segnale può trasmettersi a velocità infinita, ovvero, quantizzando, viaggiare con una velocità maggiore di quella della luce. Grazie a questo presupposto, ogni causa avviene necessariamente prima del suo effetto, e mai simultaneamente. Il principio di località non asserisce solamente che due eventi distanti non possono influenzarsi istantaneamente, ma, più in profondità, che la trasmissione di un segnale avviene temporalmente e che, per questo, qualsiasi evento accada in un punto dello spazio non può dipendere da un evento che accade simultaneamente in un’altra regione dello spazio. L’assunzione di questo principio sembra senza ombra di dubbio un sensato presupposto nell’indagine scientifica, ma anche un forte requisito affinché si possa parlare di metodo e ricerca scientifica così come viene intesa nella nostra cultura. Usando le parole di Einstein, la negazione del principio di località renderebbe impossibile l’esistenza di sistemi chiusi o quasi chiusi e la possibilità di stabilire leggi empiricamente testabili.

### 3. L’ESPERIMENTO *GEDANKEN* DI BOHM

Quando si discute l’esperimento descritto nell’“articolo EPR”, questo viene spesso presentato come quello che viene formulato nel 1951 da Bohm, e poi concretamente condotto da Aspect trent’anni dopo. Forse più semplice e di più immediato impatto concettuale, la dinamica dell’esperimento è per alcuni aspetti simile: dopo il decadimento di una particella di spin zero in due particelle, queste da una fonte comune vengono emesse in versi opposti, allontanandosi l’una dall’altra con una distanza sempre maggiore. Ora, la teoria della meccanica quantistica ci dice con certezza che le due particelle sono nella configurazione del singoletto:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

ovvero che se una particella ha spin up l’altra avrà sicuramente spin down e viceversa<sup>7</sup>. Il problema è che se anche possiamo prevedere con certezza lo spin di una

7. Per completezza, è doveroso ricordare che lo spin di ciascuna particella ha tre differenti componenti che non commutano l’una con l’altra; questo comporta che solo una delle componenti dello spin può avere un valore specifico in un dato momento, rispettando così le relazioni di incertezza di Heisenberg. Così, se ad esempio la componente x è definita, le altri due componenti y e z sono indeterminate e vengono considerate come casuali fluttuazioni. In realtà, la meccanica quantistica mostra che qualsiasi componen-

particella dopo aver misurato l'altra, non è possibile prevedere quale delle due particelle ha spin up e quale spin down. Ora, le probabilità ci dicono che prima di alcuna misurazione abbiamo il 50% di trovare una particella con spin up/down, d'altra parte, la misurazione dello spin di una particella ci consente di sapere al 100% lo spin dell'altra particella. E ciò accade anche se eseguiamo due misurazioni simultanee sulle due rispettive particelle. Le domande a questo punto sorgono senza sosta e l'idea che possa esistere una istantanea trasmissione di segnale da una particella all'altra timidamente si profila all'orizzonte. Il nodo del problema è infatti come poter conciliare due diversi tipi di probabilità che dipendono dall'effettuarsi di una misurazione. Se, infatti, la misurazione non è stata effettuata, si ha il 50% di trovare lo spin up o down di una particella, se invece la misurazione sull'altra particella è stata compiuta, allora con probabilità uguale a 1 si avrà sempre lo stesso risultato. Si potrebbe ovviare al problema se la misurazione dello spin di una particella desse il 50% delle volte spin up/down anche se effettuata simultaneamente a quella sull'altra particella. In realtà, come già detto, vi è una stabile correlazione di risultati anche se le misurazioni sono effettuate simultaneamente. Sembra dunque, che la proprietà dello spin di una particella dipenda da ciò che viene compiuto su un'altra particella, distante e separata, contravvenendo così al principio di località formulato da Einstein con queste parole:

But on one supposition we should, in my opinion, absolutely hold fast: the real factual situation of the system S2 is independent of what is done with the system S1, which is spatially separated from the former.<sup>8</sup>

Davanti a questo imbarazzante dubbio, potrebbero però rincuorarci le stesse speranze realistiche di Einstein che, invocando alla fine del suo articolo la formulazione di una teoria dalle variabili nascoste, tiene fede al principio di località.

#### 4. LE VARIABILI NASCOSTE

La strana correlazione tra i risultati delle misurazioni simultanee potrebbe essere spiegata dal fatto che essi sono predeterminati da alcune variabili nascoste, probabilmente presenti nel sistema prima ancora che le due particelle si separi-

te spin di una particella scegliamo di misurare, la stessa componente dell'altra particella sarà sempre opposta. Questa considerazione mostra la affinità dell'argomento EPR con la versione di Bohm: in entrambi i casi, infatti, è possibile dare un valore definito a una componente non descritta dalla teoria quantistica.

8. Einstein 1999, p. 85.

no e fautori di questo misterioso collegamento tra due parti distanti dello spazio. Questa potrebbe essere la spiegazione più plausibile che evita l'appello all'azione a distanza o comunque a fenomeni non locali. Empedocle, Leucippo, Democrito ed Epicuro sono stati forse i primi artefici della teoria a variabili nascoste, nelle quali le variabili erano appunto invisibili e latenti. Originariamente, l'idea delle variabili nascoste non aveva un formalismo matematico, ma consisteva semplicemente nell'aggiunta di alcuni elementi che sembravano necessari per poter spiegare un certo fenomeno. Gli stoici, ad esempio, postulando un mondo deterministico, predicavano l'aggiunta di cause "oscure" nel momento in cui nessuno fosse stato in grado di individuare cause manifeste. Nella storia della meccanica quantistica, l'idea delle variabili nascoste nasce ben prima dell' "articolo EPR", quando Max Born, nella sua opera *Quantenmechanik der Stossvorgaenge*, già nel 1926 indica la possibilità di introdurre dei parametri nascosti, seguendo un consiglio che gli era stato dato da Frenkel ma che gli era sembrato a prima vista improbabile. L'idea filosofica che dà vita a teorie nonlocali è quella di postulare uno strato più profondo e nascosto della realtà, non ancora visibile e conosciuto, ma indispensabile per poter arrivare a una chiara e precisa conoscenza della realtà della quale facciamo esperienza. Tornando ora al sopracitato argomento EPR, quello che gli autori auspicavano era un modello locale – che quindi non contemplasse fenomeni nonlocali – che potesse spiegare la correlazione dei due risultati, dovuta, probabilmente, a una causa comune o comunque allo stato che caratterizzava il sistema all'origine, prima che le due particelle venissero emesse in versi opposti. Senza postulare queste variabili nascoste, infatti, si sarebbe dovuta ammettere la nonlocalità, arrivando così a esiti paradossali da un punto di vista concettuale. Le variabili nascoste servivano dunque ad evitare la nonlocalità, ma non solo: avevano anche il compito di trasformare la teoria della meccanica quantistica in una teoria deterministica. La conoscenza di queste variabili, infatti, avrebbe permesso di determinare in modo preciso il valore di tutte le osservabili del sistema. A livello di formalismo matematico, denotando le variabili nascoste con  $\lambda$ , e un osservabile con  $A$ , conoscendo  $\lambda$  possiamo specificare  $A$  con un certo determinato valore,  $A(\lambda)$ . Dato che in meccanica quantistica uno dei tratti peculiari è l'assegnazione dei valori medi delle osservabili, per quanto riguarda le variabili nascoste si suppone che esse siano distribuite soddisfacendo queste due condizioni:

$$\rho(\lambda) \geq 0; \int \rho(\lambda) d\lambda = 1$$

Così che il valore medio dell'osservabile  $A$  sia:

$$\langle A \rangle = \int A(\lambda) \rho(\lambda) d\lambda$$



Ora, se noi fossimo a conoscenza dei valori delle variabili nascoste, allora sapremmo anche i valori definiti di qualsiasi osservabile fisica del sistema e scomparirebbe così il carattere probabilistico della teoria. In quest'ottica, dunque, la natura probabilistica della meccanica quantistica sarebbe solo "epistemica" e non "ontologica", o meglio, sarebbe data dalla nostra ignoranza e non dalla realtà dei fenomeni. La famosa frase di Einstein «God does not play dice» potrebbe essere allora ancora una volta vincente.

## 5. IL TEOREMA DI BELL

I tentativi di formulare teorie con variabili nascoste atte ad eliminare la non-località si susseguirono lungo i decenni successivi agli anni '30. Gli esiti però non erano mai soddisfacenti: pur arrivando a teorie complete, la completezza non eliminava l'imbarazzo di correlazioni nonlocali. L'interesse del fisico Bell, scienziato del Cern, fu dunque quello di capire a livello di formalismo matematico, se fosse possibile concepire una teoria locale con variabili nascoste. Il suo progetto fu dunque quello di costruire un teorema, poi chiamato 'teorema di Bell' assumendo la veridicità della località come indubitabile caratteristica fondamentale della natura. Partendo da questo presupposto, cercò di costruire un modello con variabili nascoste, in grado di spiegare le correlazioni nonlocali presenti nell'esperimento di Bohm come l'esito di fenomeni locali. In quest'ottica, la correlazione dei risultati delle due misurazioni effettuate simultaneamente su due punti fisici distanti dovrebbe essere data non da influenze reciproche istantanee, bensì da una "predeterminazione" precedente alle misurazioni. Dato che la funzione d'onda non ci permette di identificare nessun tipo di predeterminazione, ne consegue che ci dovrebbero essere alcune variabili nascoste dello stato delle due particelle capaci di fornire una più completa descrizione e specificazione dello stato. Dunque, assunte alcuni variabili nascoste chiamate  $\lambda$ , che potrebbero essere solo un parametro o un insieme di parametri, il risultato di una misurazione effettuata su una particella dovrebbe dipendere dalla componente dello spin misurato su quella stessa particella e i valori delle variabili nascoste appartenenti allo stato del paio di particelle. Il teorema di Bell dimostra in modo inequivocabile che qualunque modello di teoria locale a variabili nascoste predice dei risultati che non rispettano quelli sperimentali della meccanica quantistica. Una versione del teorema di Bell è data da un esperimento condotto su alcune calze<sup>9</sup>

9. Per questa versione del teorema si veda Bell 1981, pp. 41-62, poi pubblicato in Bell 1987, e poi in Bell - Gottfried - Veltman 2008.

che, senza ombra di dubbio, non possono scambiarsi informazioni istantanee da una parte all'altra dello spazio. Supponiamo che un certo Dr. Bertlmann sia un fisico molto interessato ai colori e alla resistenza delle sue calze. Non solo non indossa mai due calze dello stesso colore, ma conduce vari esperimenti tramite lavaggi per capire quali tipi di calze reggono al lavaggio e quali no, cercando così di trovare delle correlazioni tra i risultati degli esperimenti condotti sulle due calze. In particolare, diversi set di esperimenti vengono compiuti su ciascuna delle due calze di un paio. Il teorema termina con una disuguaglianza. Se però tutto il ragionamento viene applicato all'esperimento di Bohm, si vede chiaramente come i risultati sperimentali non rispettino questa disuguaglianza: la meccanica quantistica viola la disuguaglianza di Bell. Dato che il teorema non ha errori a livello matematico né di ragionamento, per cambiare la conclusione è necessario cambiare le premesse, ovvero che la natura sia locale. Gary Felder ha brillantemente tradotto in un altro esperimento mentale il teorema di Bell. Supponiamo di effettuare la misurazione di una qualche proprietà di elettroni attraverso un segnale binario: ad esempio una luce che può essere solamente o rossa o verde. A seconda della direzione in cui lo strumento di misura viene posto, e quindi supponiamo tre direzioni 1,2,3, il segnale rileverà se alla particella misurata 'piaccia' l'orientamento dell'apparato di misurazione. Ora, se alla particella piace, la luce emanata sarà verde, altrimenti rossa. Supponiamo anche che esperimenti di prova ci diano la certezza che lo strumento sia sicuro e che misuri effettivamente la proprietà: ripetendo *ad infinitum* lo stesso tipo di misurazione, infatti, otteniamo sempre lo stesso risultato. Possiamo anche eseguire più test diversi uno dopo l'altro posizionando gli apparati lungo orientamenti differenti; in tal caso veniamo a conoscenza, presupponiamo, che le particelle amano la direzione 1 e 3 ma non la 2. Ora, ricalcando il modello di Bohm, immaginiamo di posizionare, l'uno lontano dall'altro, due strumenti di misurazione ai lati di una sorgente di particelle che vengono emesse con versi opposti. Dunque, dopo aver emanato due particelle vediamo che, con probabilità uguale a 1, se i due apparati sono posizionati con lo stesso orientamento, le luci emesse dai due differenti apparati sono sempre dello stesso colore, o rosse o verdi. Ciò significherebbe che le due particelle emanate da una sorgente comune possiedono la stessa proprietà e che la sorgente è programmata in modo tale da emettere particelle con le stesse proprietà. O almeno, questo è quello che viene naturalmente concluso nel caso in cui teniamo fermo il principio di località: i due segnali sono sempre identici non perché ci sia comunicazione tra due parti distanti dello spazio ma per qualche strana proprietà della sorgente stessa. Ora, se presupponiamo che le particelle di una coppia possiedono le stesse proprietà, ciò varrà non solo quando posizioniamo i due apparati di misura lungo lo stesso orientamento, ma anche quando scegliamo, ad esempio,

di posizionarne uno con direzione 1 e l'altro con direzione 3. La domanda che Bell si porrebbe in una situazione simile sarebbe con che frequenza le due luci emesse hanno lo stesso colore. Presupponiamo dunque che i due elettroni amino le direzioni 1 e 3 ma non la 2. In tal caso le due luci saranno uguali 5 volte su 9, dato che 9 sono tutte le possibili combinazioni. Vediamo qui come:

		DIREZIONE DEL PRIMO RILEVATORE		
		1	2	3
DIREZIONE DEL SECONDO RILEVATORE	1	S	D	S
	2	D	S	D
	3	S	D	S

Come si può vedere, indicando con “s” “stesse luci” e con “d” “luci diverse”, dovremmo ottenere luci diverse solo nel caso in cui un apparato si trovi in direzione 2 e l'altro non si trovi nella stessa direzione. Dovessimo tradurre il nostro ragionamento in una diseguaglianza, scriveremmo dunque che la probabilità di avere le due luci dello stesso colore sarebbe almeno maggiore o uguale a  $5/9$ . La probabilità potrebbe infatti essere maggiore nel caso in cui la sorgente imposti le particelle in un altro modo. Il risultato sperimentale è però imbarazzante: la probabilità di ottenere le luci dello stesso colore è solamente  $1/3$ . Ecco come avviene:

		DIREZIONE DEL PRIMO RILEVATORE		
		1	2	3
DIREZIONE DEL SECONDO RILEVATORE	1	S	D	D
	2	D	S	D
	3	D	D	S

Come è possibile facilmente vedere, i risultati sembrerebbero rivelare che ogni particella mostra una proprietà a seconda della proprietà mostrata dall'altra. O meglio, sembrerebbe che il risultato della misurazione effettuata su una particella in una particolare direzione dipenda dal risultato ottenuto durante la misurazione sull'altra particella. Questo schema di risultati effettivi, sperimentalmente provati, non è compatibile con il modello locale schematizzato

sopra che vorrebbe invece spiegare le correlazioni con variabili nascoste. La disuguaglianza vigente in tale modello, infatti, viene abbondantemente infranta nella realtà sperimentale.

## 6. LE DISUGUAGLIANZE DI BELL

La derivazione delle famosi disuguaglianze di Bell, che vengono infrante dalla Meccanica Quantistica, possono essere facilmente comprese e derivate dall'esperimento concettualizzato da Bohm. Più facilmente applicabile al teorema di Bell è però una versione ottica dell'esperimento che riguarda lo stato di polarizzazione di un paio di fotoni emessi con diverse frequenze  $\nu_1, \nu_2$  che si propagano per versi opposti. Supponendo che lo stato di polarizzazione del paio sia:

$$|\Psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ |x, x\rangle + |y, y\rangle \}$$

Dove  $|x\rangle$  e  $|y\rangle$  sono gli stati polarizzazioni lineari. Lo stato globale di polarizzazione sopra descritto non è fattorizzabile in un prodotto dei due singoli stati appartenenti ai due fotoni singolarmente. Supponiamo dunque di effettuare delle misurazioni di polarizzazioni sui due fotoni con due analizzatori, ad esempio, A e B. Sappiamo inoltre che l'analizzatore A posto in direzione a è seguito da due rilevatori che possono dare risultati binari  $0 + 0 -$ , corrispondenti alla polarizzazione lineare che viene trovata o parallela o perpendicolare ad a. Lo stesso poi vale per l'analizzatore B posto in direzione b. Se dunque noi calcoliamo le probabilità  $P_{\pm}(a)$  di ottenere i risultati  $\pm$  per il fotone  $\nu_1$  prese singolarmente e le probabilità  $P_{\pm}(b)$  di ottenere i risultati  $\pm$  per il fotone  $\nu_2$ , la Meccanica Quantistica dice che:

$$P_+(a) = P_-(a) = \frac{1}{2}$$

$$P_+(b) = P_-(b) = \frac{1}{2}$$

Se però vogliamo calcolare le probabilità congiunte  $P_{\pm\pm}(a,b)$  abbiamo:

$$P_{++}(a, b) = P_{--}(a, b) = \frac{1}{2} \cos^2(a, b)$$

$$P_{+-}(a, b) = P_{-+}(a, b) = \frac{1}{2} \sin^2(a, b)$$

Da ciò deriva che, nel caso in cui i polarizzatori siano paralleli, abbiamo:

$$P_{++}(a, a) = P_{--}(a, a) = \frac{1}{2}$$

$$P_{+-}(a, a) = P_{-+}(a, a) = 0$$

Ciò significa che con probabilità uguale a 1 i risultati sono sempre uguali, mostrando così una piena correlazione.

Ora, se crediamo di poter descrivere il sistema fruendo delle variabili nascoste che denotiamo  $\lambda$ , classicamente la densità di probabilità per queste quantità si scrive  $\rho(\lambda)$ . Presupponiamo che lo spin delle due particelle venga misurato simultaneamente, ma quello di A lungo la direzione  $a$ , mentre quello di B lungo  $b$ . In realtà, ciò che noi misuriamo delle due rispettive particelle sono le componenti dello spin, indicate con  $\alpha$  e  $\beta$  e possono assumere solo i valori  $\pm 1$ . Da ciò consegue che:

$$| \langle \alpha(\lambda, a) \rangle | \leq 1 \text{ e } | \langle \beta(\lambda, b) \rangle | \leq 1$$

Inoltre, i risultati delle due misurazioni sono sempre opposti, per cui:

$$\beta(b, \lambda) = -\alpha(b, \lambda)$$

Ciò che Bell dovrebbe aspettarsi, tenendo fede al principio di località è che i risultati di  $\alpha$  e  $\beta$  siano indipendenti l'uno dall'altro, e che dipendano da parametri locali nascosti, tra i quali anche quelli degli strumenti di misura. Infatti, come Shimony ricorda tramite le sue due condizioni di località, è impossibile che il risultato di  $\beta$ , ad esempio, dipenda dalla direzione lungo la quale viene misurato  $\alpha$ . Il principio di località, dunque, limita la dipendenza alle zone "vicine" all'atto di misura: il valore di  $\alpha$  potrà dunque dipendere da quelle variabili nascoste proprie dell'apparato che misura A, dalla direzione lungo la quale avviene la misura, ma non da ciò che accade alla particella B. Nella elaborazione del suo teorema, Bell dunque pone come criterio la condizione di fattorizzabilità, secondo la quale la probabilità di risultati correlati deve essere uguale al prodotto tra le probabilità di ciascun singolo risultato:

$$P_{\lambda ab}(\alpha_a \& \beta_b) = P_{\lambda a}(\alpha_a) \cdot P_{\lambda b}(\beta_b)$$

Detto in un linguaggio matematico più accurato, possiamo scrivere la probabilità dell'unione dei possibili risultati in questo modo:

$$P(a, b) = \int d\lambda \rho(\lambda) \langle \alpha(\lambda, a) \rangle \langle \beta(\lambda, b) \rangle$$

Oppure

$$P(a, b) = - \int \rho(\lambda) [\alpha(a, \lambda) \alpha(b, \lambda)] d\lambda$$

Per procedere con il teorema, ora dobbiamo ricordare che la densità di probabilità delle variabili nascoste è sempre positiva, e che deve soddisfare la condizione di normalizzazione:

$$\rho \geq 0; \int \rho(\lambda) d\lambda = 1$$

Dunque, considerando ora tre direzioni a, b, c possiamo scrivere che

$$1. P(a, b) - P(a, c) = \int \rho(\lambda) [\alpha(a, \lambda) \alpha(b, \lambda) - \alpha(a, \lambda) \alpha(c, \lambda)] d\lambda$$

E, ricordando che  $\alpha(b, \lambda) = \pm 1$  e quindi che  $\alpha(b, \lambda)^2 = 1$ , possiamo scrivere:

$$2. P(a, b) - P(a, c) = \int \rho(\lambda) [1 - \alpha(a, \lambda) \alpha(c, \lambda)] \alpha(a, \lambda) \alpha(b, \lambda) d\lambda$$

Tenendo dunque in mente le disuguaglianze facilmente deducibili

$$-1 \leq \alpha(a, \lambda) \alpha(b, \lambda) \leq +1; \int \rho(\lambda) [1 - \alpha(b, \lambda) \alpha(c, \lambda)] \geq 0$$

possiamo infine scrivere:

$$1. P(a, b) - P(a, c) \leq \int \rho(\lambda) [1 - \alpha(b, \lambda) \alpha(c, \lambda)] d\lambda$$

E quindi che:

$$2. P(a, b) - P(a, c) \leq 1 + P(b, c)$$

Questa è la famosa disuguaglianza che Bell scopre essere vigente in qualsiasi modello locale con variabili nascoste come quello che potrebbe rispecchiare il fenomeno descritto dall'esperimento di Bohm. In realtà, sappiamo che la meccanica quantistica obbedisce a questa equazione:

$$P(a, b) = -a \cdot b$$

Ed è facilmente calcolabile l'incompatibilità delle due funzioni. Se per esempio consideriamo tre vettori a, b, c giacenti su uno stesso piano, per cui c compo-

ne due angoli di  $45^\circ$  rispettivamente con  $a$  e  $b$ , allora la famosa diseguaglianza di Bell si trasformerebbe così:

$$0.707 \leq 1 - 0.707$$

E dunque in una diseguaglianza falsa, dato che

$$1 - 0.707 = 0.293$$

La conclusione che se ne trae è dunque che nessun modello con variabili nascoste è compatibile con una teoria locale, o meglio, che le variabili nascoste non ci salvano dalla nonlocalità. Gli esperimenti poi effettuati da Aspect provarono ancora una volta la violazione della diseguaglianza di Bell e il carattere nonlocale della natura.

## 7. DISCUSSIONE

Per evitare frettolose conclusioni, è meglio riflettere sul significato della violazione delle diseguaglianze di Bell. Essendo il frutto del teorema in aperto contrasto con le predizioni della Meccanica Quantistica, il nodo dell'errore – nel caso ci sia – si dovrebbe trovare nelle premesse, dato che il ragionamento che ne segue non presenta zone di ombra. Ciò che sarebbe auspicabile sarebbe proprio quello di individuare una delle premesse come unica responsabile del dissidio. Riguardando il teorema così come è stato formulato, tre sono le ipotesi che potrebbero essere contestate<sup>10</sup>. La prima è proprio l'esistenza di variabili nascoste, postulate per risolvere il problema della nonlocalità: come è stato precedentemente delineato, esse sono caratteristiche di una particolare concezione della realtà, della fisica e della causalità di cui Einstein si fa portavoce. La seconda ipotesi è il determinismo, chiaramente espresso nello stesso formalismo che introduceva la derivazione delle diseguaglianze. Ciò che infatti è stato postulato, è che una volta fissate le variabili nascoste, è possibile calcolare con certezza il valore dei risultati delle misurazioni. In realtà, nella Meccanica Quantistica la matematica si trova a dover descrivere un mondo molto lontano da quello deterministico: il dubbio che si debba sostituire alle classiche variabili dei parametri stocastici capaci di predire non valori specifici, bensì delle funzioni di probabilità, lascia intravedere una nuova strada. Ad accogliere questa possibilità furono i fisici Clauser e Horne

10. Di seguito ho riportato le ipotesi presentate in Aspect 2002.

che, dopo aver elaborato questa nuova strategia, dovettero però arrendersi all'evidenza: non era il carattere deterministico a causare la violazione. Infine, rimane l'ipotesi più caldeggiata dallo stesso Bell, ovvero quella della località: come preambolo al suo teorema, infatti, egli postula l'indipendenza tra il risultato di una misurazione effettuata in una regione dello spazio e l'orientamento dell'apparato di misura posto in un'altra regione. Inoltre, Bell postula che la probabilità di distribuzione  $\rho(\lambda)$  non dipenda dalle direzioni  $a$  e  $b$ . L'unione delle due possibili ipotesi rimaste contiene dunque il conflitto con la meccanica quantistica: un modello locale di variabili nascoste. L'impossibilità di spiegare i fenomeni descritti dall'esperimento di Bohm tramite una teoria locale a variabili nascoste spinge a trovare nuovi modelli interpretativi.

## 8. POSSIBILI SPIEGAZIONI

Davanti alle correlazioni degli esperimenti del tipo EPR-Bohm effettuati in due regioni separate dello spazio, la tentazione di cercarne la spiegazione nella fisica classica è sicuramente un ovvio inizio. Il comportamento quantico appena descritto, infatti, può facilmente evocare esperimenti riguardo il momento angolare, dove una particella con momento angolare uguale a zero si divide in due particelle che vengono posizionate in due posti distanti: anche in questo caso il momento angolare di una delle due particelle è con probabilità uguale a 1 uguale e opposto. Gli sforzi di categorizzare le correlazioni quantistiche con tali fenomeni provenienti dalla fisica classica, però, sfociano esattamente in modelli locali con variabili nascoste. L'idea stessa di paragonare una possibile interazione a distanza con l'influenza gravitazionale esercitata da due corpi è a dir poco fuorviante. Quando si trattano tali correlazioni, infatti, è sempre bene considerarne gli aspetti specifici. Innanzitutto, l'azione apparentemente esercitata da una parte all'altra dello spazio è inalterata dalla distanza; mentre la forza gravitazionale di Newton o quella elettrica di Coulomb sono intrinsecamente dipendenti dalla distanza tra i due corpi, l'interconnessione quantistica non lo è. Inoltre, essa avviene istantaneamente, senza alcun intervallo di tempo: e con questo non vuol tanto dire che è possibile assimilarla all'azione newtoniana, quanto invece che da essa eredita imbarazzanti problemi. Un'ultima considerazione riguarda poi la discriminazione dell'azione quantica: essa interessa solo le particelle di un paio emesso da una comune sorgente: una volta creata una relazione, non è più possibile scioglierla neanche con la distanza. In un colpo solo, dunque, è doveroso abbandonare le categorie usate nella storia della filosofia della scienza



per spiegare fenomeni dalla apparente nonlocalità<sup>11</sup>. Che il caso sia l'artefice delle correlazioni descritte dall'esperimento di Bohm è seppur una alternativa non escludibile, una sconfitta amara non giustificata. Ciò che accade a Rosencrantz e Guildenstern che ottengono sempre "testa" da ogni lancio della moneta non è così probabile nella ricerca scientifica e sicuramente non può essere ragionevolmente etichettato come figlio del caso. Si potrebbe forse parlare di "coincidenza" secondo la quale due eventi, separati e non correlati tra di loro, accadono "insieme"; in tal senso, però, dovremmo spiegare i due eventi come i risultati di due catene causali indipendenti, cosa che nel caso dell'esperimento di Bohm non è applicabile. Spiegare le correlazioni in termini di "coordinazione" sembra ancora una volta fuorviante: due eventi possono essere coordinati o se vengono programmati – e ciò viene escluso dal teorema di Bell – oppure se il primo evento è a conoscenza del secondo, e ciò dovrebbe avvenire, sempre nel caso dell'esperimento di Bohm, istantaneamente. La paradossalità di un viaggio senza il passare del tempo è però un problema al quale non saremmo voluti arrivare e la ragione per cui cerchiamo soccorso nella storia della filosofia della scienza. Sarebbe allora che Leibniz e Malebranche abbiano dato l'unica alternativa possibile: una armonia prestabilita fin dalla creazione del cosmo: le correlazioni tra i risultati delle due misurazioni sarebbe, ancora una volta, solo apparente...

## 9. SPUKHAFTE FERNWIRKUNG

Se però consideriamo dal punto di vista filosofico l'idea di Leibniz come un disperato tentativo privo di rilevanza scientifica, l'esigenza di trovare una spiegazione a queste correlazioni nonlocali sembra necessaria. Quando Schrödinger tentò di rielaborare l' "articolo EPR" nello stesso anno della sua pubblicazione, una sinistra risoluzione si profilò all'orizzonte, la stessa che Einstein battezzò in una lettera a Born del 1947 «spukhafte Fernwirkung». Criticata dal suo stesso fondatore<sup>12</sup>, disprezzata da Maxwell<sup>13</sup> e poi definitivamente bandita da Einstein, l'azione a distanza sembrava ora l'unica spiegazione possibile. L'azione a distanza può essere descritta come quel fenomeno che induce un cambiamento nelle proprietà intrinseche di un sistema distante senza che avvenga un processo che trasmet-

11. Per una più ampia descrizione delle possibili interpretazioni della nonlocalità, si veda Fraassen 1992, p. 350.

12. Vd. Newton 1756, pp. 25-26.

13. Vd. ad esempio Maxwell 2003, p. 311.

te un cambiamento in modo continuo nello spazio e nel tempo. Nel nostro caso si potrebbe caratterizzare come un fenomeno nel quale un cambiamento di proprietà intrinseche di un sistema induce istantaneamente un altro cambiamento di proprietà intrinseche di un altro sistema, distante dal primo. Lo stesso Einstein descrive l'azione a distanza come un fenomeno dove un sistema in una regione dello spazio, per esempio A, acquisisce un valore definito di una proprietà nello stesso momento in cui una misurazione è effettuata in un'altra regione dello spazio B. Questa sarebbe proprio l'azione propria di fenomeni nonlocali che violano il principio di località. La riluttanza di Einstein nell'accettare l'azione a distanza e quindi la sua convinzione dell'incompletezza della meccanica quantistica sono ben visibili nelle lettere che scrive a Max Born:

That which really exists in B should [...] not depend on what kind of measurement is carried out in part of space A; it should also be independent of whether or not any measurement at all is carried out in space A. If one adheres to this program, one can hardly consider the quantum-theoretical description as a complete representation of the physically real. If one tries to do so in spite of this, one has to assume that the physically real in B suffers a sudden change as a result of a measurement in A. My instinct for Physics bristles at this [...].<sup>14</sup>

La motivazione che rendeva Einstein riluttante verso la nonlocalità, e quindi anche alla meccanica quantistica, sembra essere legata non solo al suo concetto di realtà nel tempo e nello spazio ma anche a quello di Fisica:

I cannot seriously believe in [quantum physics] because it cannot be reconciled with the idea that Physics should represent a reality in time and space, free from spooky action at a distance.<sup>15</sup>

e viene rivelata in un'altra lettera a Born:

If one renounces the assumption that what is present in different parts of space has an independent, real existence, then I do not at all see what Physics is supposed to describe.<sup>16</sup>

Se infatti, secondo Einstein, il 'sistema' diventa solo un modo convenzionale di suddividere il mondo, non si potrebbe né metodologicamente dividere un fenomeno dall'altro in modo oggettivo, né tantomeno attribuire ad essi proposizioni scientifiche esatte.

14. Born 1971, p.164

15. Born 1971, p. 158

16. *Ivi*, p.165.

Without such an assumption of the mutually independent existence of spatially distant things, an assumption which originates in everyday thought, physical thought in the sense familiar to us would not be possible.<sup>17</sup>

Il criterio di separabilità di sistemi spazialmente distanti è la seconda condizione necessaria affinché sia possibile praticare la ricerca scientifica. Anche per quanto riguarda la prima condizione, ovvero quella di località, Einstein ne assume la validità tenendo fede al concetto di Fisica a lui familiare:

The complete suspension of this basic principle would make impossible the idea of the existence of (quasi)closed systems and, thereby, the establishment of empirically testable laws on the sense familiar to us.<sup>18</sup>

In questo estratto si vede anche come il principio di località sia condizione necessaria per il criterio di separabilità: nel caso esistesse una reciproca influenza istantanea tra due fenomeni, non sarebbe possibile considerarli come separati.

I motivi che spingevano Einstein a rifiutare l'esistenza di eventi nonlocali erano dunque molteplici. Innanzitutto, che nessun segnale potesse viaggiare a velocità maggiore di quella della luce e quindi a velocità infinita era stato considerato come un principio della fisica già ai tempi di Maxwell. La azione tra due punti dello spazio avveniva dunque col trascorrere del tempo e i fenomeni elettromagnetici ne davano la prova. La violazione di questo fondamento della Relatività Speciale, ben delineato già nel 1905, avrebbe potuto causare una rivoluzione epocale nella Fisica. Non solo avrebbe potuto portare ad effetti disastrosi sulle leggi della fisica di diversi sistemi di riferimento, ma anche sulle trasformazioni galileiane, sulla velocità nel caso di accelerazione, sul concetto di spazio e tempo assoluti e su quello di causalità. Il semplice tentativo di spiegare una causalità che si propagava con velocità infinita sembrava da un punto di vista filosofico catastrofico. I problemi abbondavano anche sulla concezione stessa del metodo e del pensiero della Fisica: se due eventi distanti non possono essere considerati indipendenti, non solo non sarebbe più possibile applicare «any empirically testable laws»<sup>19</sup>, ma anche lo stesso compito della Fisica sembrerebbe cadere. Eppure, l'implicazione del teorema di Bell, lucidamente sintetizzato da Abner Shimony in una lettera a Wigner del 1967:

There is a paper by J. S. Bell [...] which I found very impressive as evidence against hidden variable theories. He shows that in an Einstein-Podolsky-Rosen type of experiment

17. Einstein 1948, pp. 321-322, traduzione in Howard 1985, pp.188-190.

18. *Ibidem*.

19. Secondo Einstein, la separabilità è un requisito necessario per la testabilità.

the supposition of hidden variables, with any statistical distribution whatever, is certain to disagree with some of the predictions of quantum mechanics unless there is a kind of action at a distance.<sup>20</sup>

sarebbe in pochi anni apparso davanti alla comunità scientifica; e con esso si profilerà più avanti anche la sua prova sperimentale.

## 10. DA BELL A ASPECT, UN FATICOSO CAMMINO DURATO VENT'ANNI

Il teorema di Bell, pubblicato nel 1964, divenne subito il centro di varie considerazioni filosofiche e dispute sul significato della realtà, sulle caratteristiche fondamentali della natura e sul vecchio modo di concepire la fisica. Il passaggio dalla filosofia alla fisica<sup>21</sup> tardò però ad avvenire, mostrando così quanto le questioni inerenti ai fondamenti della fisica quantistica fossero considerati di carattere più speculativo che sperimentale. Solo a fatica, infatti, ciò che era stato per decenni un comune argomento di controversie filosofiche divenne il centro di ricerche sperimentali. Furono Abner Shimony e John Clauser coloro che per primi posero le diseguaglianze di Bell nei laboratori e, in particolare, sotto la guida di esperimenti ottici, i cui apparati tecnici erano stati notevolmente perfezionati. Nel 1969 Clauser, Horne, Shimony, and Richard Holt pubblicarono un articolo in cui proponevano delle modalità pratiche per poter effettuare l'esperimento idealizzato da Bohm sfruttando i recenti progressi dell'ottica. I risultati degli esperimenti, però, portarono a un drammatico dissidio: mentre quelli di Clauser in collaborazione con Freedman dimostrarono la violazione da parte della meccanica quantistica delle diseguaglianze di Bell, Holt arrivò a esiti opposti. Mentre la decisione di non pubblicare i risultati sembrava quella più sensata, Aspect si preparava a formulare un esperimento decisivo, capace di indirizzare la storia della fisica. Ben tre furono alla fine gli esperimenti, condotti con miglioramenti sia nelle strategie di misurazioni sia per quanto riguarda il perfezionamento dei dispositivi: non solo fu possibile utilizzare un polarizzatore a due canali, ma, accogliendo il suggerimento di Bell, si riuscì anche a cambiare gli orientamenti degli apparati di misura mentre le particelle erano già in "viaggio". I risultati rivelarono una inequivocabile violazione del-

20. Shimony to Wigner, 1 Jan 1967. Wigner Papers, Box 83, folder 7.

21. Olival Freire ha svolto uno studio dettagliato sulla cammino che dovette compiere la Filosofia prima di entrare nei laboratori Freire 2006, pp. 577-616.

le disuguaglianze di Bell e furono confermati da una successiva serie di esperimenti condotti da Weihs e Zeilinger nei quali gli orientamenti degli strumenti di misura venivano addirittura cambiati casualmente, sempre dopo l'emissione delle particelle. La violazione delle disuguaglianze era di oltre 30 deviazioni standard. La conclusione degli esperimenti ebbe allora una portata davvero straordinaria, come già preannunciava Aspect, non solo per quanto riguarda i concetti filosofici che aiutano ad interpretare i risultati sperimentali, ma anche per quanto riguarda gli aspetti pratici della ricerca scientifica:

Physical metaphors [...] are more than just conveniences, but rather are practical necessities. [...] But the experiments on Bell's inequalities are making it difficult for us to continue using some of our familiar physical metaphors in the old ways.<sup>22</sup>

Aspect, parlando del grande lavoro di Bell, si riferisce addirittura a una rivoluzione concettuale così profonda da portare a una rivoluzione tecnologica, soprattutto per quanto riguarda le nanotecnologie: i problemi concettuali erano divenuti così pressanti, da spingere alla ricerca di risposte "pratiche". Dagli anni '70 del secolo scorso, ad esempio, portarono alla manipolazione di una singola particella microscopica come lo ione o l'elettrone, alla osservazione della superposizione, e alla dimostrazione sperimentale del salto quantico. Le domande sulla nonlocalità quantistica diedero uno slancio agli studio sulla crittografia, l'informazione quantica e i computer quantici. Se dunque la nonlocalità rimane ancora qualcosa difficilmente 'digeribile' almeno concettualmente, la rivoluzione tecnologica in atto spinge a sua volta a una rivoluzione concettuale.

## 11. IL DIBATTITO CONTEMPORANEO

Secondo il fisico francese Aspect, gli esiti degli esperimenti avevano messo in luce ciò che già i teoremi sui segnali superluminali avevano tentato di evidenziare: la nonlocalità della meccanica quantistica non implica la possibilità di comunicazione attraverso segnali superluminali. Un osservatore posto a un lato dell'esperimento, che quindi può osservare solo i risultati della misurazioni di una particella, vede solo una serie di risultati casuali e non può prevedere in nessun modo in quale direzione sia stato cambiato l'altro apparato di misura posto all'altro lato dell'esperimento. Da un punto di vista filosofico, infatti, l'azione di "segnalare" implica di per sé una comunicazione tra due agenti. Il tipo di comunicazione qui inteso dovrebbe significare una correlazione tra un

22. Schawlow 1983.

elemento controllabile del mittente e un osservabile del destinatario (Berkovitz 1998a). Affinché dunque ci sia un segnale superluminale occorrerebbe necessariamente che ci sia dipendenza tra l'esito della misurazione e un aspetto controllabile, quale la direzione dell'altro apparato di misura; l'aspetto controllabile viene però a cadere negli esperimenti dove l'orientamento degli apparati viene scelto sempre in modo casuale. In questo senso si mossero poi i filosofi della fisica come Jarrett e Berkovitz, che continuarono a sottolineare il fatto che la meccanica quantistica violava sì una località esprimibile come dipendenza di risultati di esperimenti condotti in differenti regioni dello spazio, ma non una dipendenza tra i parametri di un processo di misurazione e i risultato dell'esperimento effettuato in un'altra regione dello spazio. In poche parole, la nonlocalità della meccanica quantistica presupponeva una "outcome dependence" e non una "parameter dependence", riprendendo così i termini usati da Shimony. Secondo questa corrente, veniva così provata la compatibilità della relatività speciale con la meccanica quantistica e il principio di Einstein sulla velocità della luce non sarebbe caduto, portando così a catastrofiche conseguenze. Dietro questa conclusione vi era - e vi è - l'assunzione che, mentre una "parameter dependence" porta con sé una causalità istantanea tra due punti dello spazio distanti, nel caso di una "outcome dependence" si può tranquillamente evitare di parlare di imbarazzanti fenomeni superluminali e di causalità trasmessa a velocità infinita. Questa posizione però non fu la unica voce. Maudlin fu il primo a parlare di una violazione della parameter independence da parte della meccanica quantistica e a quindi mettere in dubbio la possibilità di conciliare i fondamenti della relatività con quelli quantici. Recentissimi sono poi i contributi di Nägel, che non solo sembrerebbe aver dimostrato l'insensatezza della distinzione di due tipi di indipendenza nel principio di località, ma ha anche chiaramente evidenziato come il tipo di nonlocalità delle correlazioni di Bohm sia molto forte rispetto ad altri esempi di correlazioni nonlocali che invece obbediscono alle disequaglianze di Bell. In questo intricato guazzabuglio, che rimane ancora apertissimo a nuovi contributi, le certezze rimaste sono poche.

## 12. L'ENTANGLEMENT QUANTISTICO

Prima di analizzare le interpretazioni e le chiavi di lettura che sono state date alla nonlocalità propria del mondo quantistico al di là di ogni dubbio - se mai possibile -, occorre guardare al nodo del problema, al cuore delle correlazioni. Nello stesso anno in cui veniva pubblicato l'argomento EPR, Schrödinger scrisse una serie di relazioni volte a sviscerare il concetto di nonlocalità e battez-

zando il tipo di correlazione nonlocale “entanglement”. Così il fisico introdusse il termine poi diventato così famoso da sostituire quello di azione a distanza:

When two systems, of which we know the states by their respective representatives, enter into temporary physical interaction due to known forces between them, and when after a time of mutual influence the systems separate again, then they can no longer be described in the same way as before, viz. by endowing each of them with a representative of its own. I would not call that one but rather the characteristic trait of quantum mechanics, the one that enforces its entire departure from classical lines of thought. By the interaction the two representatives (the quantum states) have become entangled.<sup>23</sup>

A livello di formalismo matematico, l'entanglement si traduce, come si è scritto prima, in uno stato singoletto della forma:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow\rangle \otimes |\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle \otimes |\uparrow\rangle$$

Dove, per esempio, abbiamo l'entanglement tra due stati di due particelle con spin up o down. Questo stato singoletto indica che indipendentemente da quanto distanti siano le particelle in questione, lo stato spin del sistema composito è una forma di superposizione tra i due singoli stati. Questa superposizione però non è fissa, ovvero non specifica quale delle due particelle abbia spin up e quale spin down, anzi, ci dice che in realtà di per sé nessun singolo stato ha uno spin specifico, ma l'uno dipende intrinsecamente dall'altro. Nel caso in cui lo spin della particella A sia up, allora quello della seconda particella sarà down e viceversa. Ciò significa che solo il sistema composito ha uno spin definito e che quindi solo ad esso possiamo applicare uno stato puro. Infatti, nel caso in cui volessimo descrivere gli stati dei sottosistemi presi singolarmente, dovremmo indicarli con stati impuri o misti. Il fenomeno dell'entanglement è stato variamente interpretato come il fenomeno per eccellenza dell'olismo quantico (Esfeld), come la più alta manifestazione della nonseparabilità in natura (Howard) o come una sorta di ‘passione a distanza’ (Shimony) dovuta a una stretta interconnessione di potenzialità. Indipendentemente dalle varie letture del fenomeno, però, è chiaro che al momento della misurazione di una singola particella che viene dunque ad assumere un valore preciso di spin, anche l'altra particella acquisisce istantaneamente un valore ad esso correlato. E la cosa sorprendente è che ciò avviene anche se la seconda particella non ha ancora incontrato nessun polarizzatore.

23. Schrödinger 1983, p.161.

### 13. CONCLUSIONI

La conclusione inevitabile che si trae dagli elementi qui sopra elencati è ovviamente che la meccanica quantistica contiene in sé una natura nonlocale. Categorizzare e spiegare questo tipo di nonlocalità è però assai arduo. Come è stato accennato, nel caso in cui non si trattasse di una comunicazione superluminale ne conseguirebbe che la Relatività Speciale non viene automaticamente esclusa dal mondo quantistico. Se il teorema di Bell dunque non permette di fare sonni tranquilli provando la realtà della nonlocalità, almeno non dimostra la realtà di fenomeni catastrofici in contrasto con i principi sui quali una teoria così di successo come quella della relatività si poggia. Tuttavia, ciò che forse si è imparato, è che cercare di guardare la nonlocalità “à la Einstein” è troppo pericoloso e fuorviante. Quello che il fisico vedeva, ovvero due fenomeni separati nello spazio-tempo ma intrinsecamente connessi grazie ad azioni a distanza istantanee capaci di trasformare le loro proprietà intrinseche non ha più alcun significato, o meglio, deve essere rivisto alla luce del carattere di nonseparabilità della meccanica quantistica. Ciò che gli esperimenti presentano, e di cui il formalismo dell’entanglement si fa portavoce, è un mondo dove esiste un solo evento: quello di una coppia di particelle “entangled”. I due eventi non sono separabili perché non sono due eventi, ma uno stesso che si ‘allarga’ nello spazio occupando due diverse regioni. Come ciò possa avvenire, però, rimane ancora un mistero. ‘The brutal fact of nature’ davanti al quale ci troviamo non sembra poter essere inserito in nessuna delle categorie fino ad ora accettate senza dispute.

Se la perfetta correlazione degli spin data una definita direzione poteva farci pensare a un mondo deterministico locale, i casi delle correlazioni con cambiamenti casuali delle direzioni, se non sono esse stesse casuali, ci portano diritto all’azione a distanza. Concludendo, mentre non ci è dato di sapere se l’azione a distanza è richiesta necessariamente dalla fisica, ciò che è chiaro è che non è possibile separare due eventi “entangled” con la pretesa di considerarli due sistemi separati e in questo modo il programma di Einstein sembrerebbe fallire. Ciò che è certo, insomma, è che dobbiamo constatare l’inadeguatezza della località: due particelle “entangled” devono essere considerate come un sistema unico, descrivibile con una funzione d’onda unica. È qualcosa di cui dovremmo preoccuparci? Aspect stesso si è posto questa domanda e, ricordando una frase pronunciata da Richard Feynman «It has not yet become obvious to me that there is no real problem... I have entertained myself always by squeezing the difficulty of quantum mechanics into a smaller and smaller place, so as to get more and more worried about this particular item. It seems almost ridicu-



lous that you can squeeze it in a numerical question that one thing is bigger than other. But there you are – it is bigger...» gli risponde: «Yes, it is bigger by 30 standard deviations»<sup>24</sup>.

Vera Matarese  
University of Hong Kong  
mvera@hku.hk

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Aspect 1999                    A. Aspect, *Bell's inequality test: more ideal than ever*, «Nature» 398 (1999), pp.189-190.
- Bell 1981                      J. Bell, *Bertlmann's socks and the nature of reality*, «Journal de Physique» 42 (1981), pp. 41-62.
- Bell 1987                      J. Bell, *Speakable and unspeakable in quantum mechanics: collected papers on quantum mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- Bell - Gottfried - Veltman 2008    M. Bell - K. Gottfried - M. Veltman (eds.), *John S. Bell on the foundations of Quantum mechanics* 2001, Singapore, World Scientific Publishing, 2008.
- Berkovitz 1998a              J. Berkovitz, *Aspects of Quantum Non-Localities I: Superluminal Signalling, Action-at-a-Distance, Non-Separability and Holism*, «Studies in History and Philosophy Of modern Physics» 29, 2 (1998), pp. 183-222.
- Berkovitz 1998b              J. Berkovitz, *Aspects of Quantum Non-Localities II: Superluminal Causation and Relativity*, «Studies in History and Philosophy of modern Physics» 29, 4 (1998), pp. 509-545.
- Berkovitz 2008              J. Berkovitz, *Action at a distance in Quantum Mechanics*, in *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Stanford, 2008. <http://plato.stanford.edu/archives/win2008/entries/qm-action-distance/>
- Bertlmann - Zeilinger 2002    R.A. Bertlmann - A. Zeilinger (eds.), *Quantum [Un]speakables - From Bell to Quantum Information*, Springer, Heidelberg, [Germany] 2002.

24. Aspect 1999, p. 190.

- Born 1971a M. Born (ed.), *The Born Einsteins Letters*, Glasgow, Macmillan Press, 1971.
- Born 1971b M. Born (ed.), *The Born-Einstein Letters, correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955 with commentaries by Max Born*, Glasgow, Macmillan Press, 1971.
- Einstein - Podolsky - Rosen 1935 A. Einstein - B. Podolsky - N. Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?*, «Physical review» 47 (1935), pp. 777-780.
- Einstein 1948 A. Einstein, *Quantenmechanik und Wirklichkeit*, «Dialectica» 2, 3-4 (1948), pp. 320-324.
- Einstein 1999 A. Einstein, *Autobiographical notes* (1979), Open Court, La Salle, 1999.
- Esfeld 2004 M. Esfeld, *Quantum Entanglement and a metaphysics of relations*, «Studies in History and Philosophy of Modern Physics» 35 (2004), pp. 605-617.
- Frassen 1992 V. Fraassen, *Quantum Mechanics: an empirist view*, Clarendon paperbacks, USA, 1992.
- Freire 1985 O. Freire, *Philosophy enters the optics laboratory: Bell's theorem and the first experimental tests (1965 -1982)*, «Studies in History and Philosophy of Modern Physics» 37 (2006) pp. 577-616.
- Howard 1985 D. Howard, *Einstein on locality and Separability*, «Studies in History and Philosophy of Science» 16, 3 (1985), pp.171-201.
- Jammer 1974 M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics, The interpretation of Quantum Mechanics in Historical Perspective*, a Wiley-interscience publication, USA, 1974.
- Laudisa 1995 F. Laudisa, *Einstein, Bell, and Nonseparable Realism*, «The British Journal for Philosophy of Science» 46, 3 (1995), pp. 309-329.
- Maxwell 2003 J.C. Maxwell, *The Scientific Papers of James Clerk Maxwell*, Dover Phoenix Edition, USA 2003.
- Newton 1756 I. Newton, *Four letters from Sir Isaac Newton to doctor Bentley*, containing some arguments in proof of a deity, London, Pall-Mall, Printed for R. and J. Dodsley, 1756.
- Sauer 2007 T. Sauer, *An Einstein manuscript on the EPR paradox for spin observables*, «Studies and History and Philosophy of Modern Physics» 38 (2007), pp. 879-887.

- Schawlow 1983            A. Schawlow, *Concluding remarks*, in I. Lindgren - A. Rosen - S. Svanbeg (eds.), *Atomic Physics 8*, New York, Plenum Press, 1983, pp. 565-569.
- Schrödinger 1983        E. Schrödinger, *The Present Situation in Quantum Mechanics* (1935), J. Wheeler - W. Zurek (eds.), *Quantum Theory and Measurement*, Princeton, Princeton University Press, 1983.
- Wigner 1967             E. Wigner, 1 Jan 1967. Wigner Papers, Box 83, folder 7.

