

AUTO R I C E R C A

**Un tentativo di  
immaginare parti  
della realtà del  
micromondo**

Diederik Aerts

Numero 2

Anno 2011

Pagine 77-109

LAB

## Riassunto

La meccanica quantistica è la teoria usata per *descrivere* i processi che hanno luogo nel micromondo. Sin dal principio, la meccanica quantistica si è dimostrata una teoria *strana*, nel senso che sembrava confutare in vari modi l'immagine di un micromondo fatto di oggetti che si muovono e interagiscono tra loro in uno spazio tridimensionale. Pertanto, sin dal suo avvento, ci fu un notevole disaccordo sul *significato fisico* della teoria quantistica e numerose furono le discussioni di natura filosofica che ebbero luogo tra i padri fondatori. Unicamente negli ultimi anni sono stati però realizzati degli esperimenti che, indipendentemente dalla stranezza della teoria, ci hanno posto direttamente alle prese con la stranezza della realtà del micromondo. Pensiamo in particolar modo agli esperimenti sul problema EPR. È nostra opinione che, per poter *comprendere* la realtà di questo micromondo, sia necessario introdurre nuovi concetti e divenire consapevoli dei vecchi *pregiudizi* classici. Certamente, non in un modo così radicale come quello proposto dalla cosiddetta *interpretazione californiana* della meccanica quantistica, ma nemmeno in modo così vago come proposto dalla cosiddetta *interpretazione di Copenaghen*. Considerando che, oggi, disponiamo di risultati molto *specifici* su esperimenti molto raffinati, dovremmo cominciare con l'*immaginare* come sia questa *microrealtà*. Scopo di questo articolo è tentare qualcosa in questa direzione, proponendo quella che potrebbe essere una nuova disciplina in fisica teorica. Questa disciplina dovrebbe indagare in che misura diverse tipologie di realtà (modelli del mondo) possano corrispondere ai risultati degli esperimenti oggi a nostra disposizione, e alle descrizioni teoriche offerte dalla teoria quantistica. Quindi, sebbene concordiamo nel ritenere che il mondo quantistico sia decisamente strano, il nostro obiettivo sarà quello di mostrare che non è poi così strano come potrebbe sembrare. Questo

semplicemente perché *una realtà* può essere molto più complicata di quanto siamo soliti immaginare.

## 1 Introduzione

Molte rivoluzioni di natura concettuale sono avvenute sotto il sole nel corso della storia dell'umanità. Un tempo l'umanità pensava che la terra fosse piatta. E che *su* e *giù* fossero concetti *assoluti*. A quei tempi, si pensava che una terra di un'altra forma, ad esempio di forma sferica, fosse alquanto improbabile, poiché si pensava che ovviamente tutto ciò che si trovava sulla parte inferiore della sfera sarebbe caduto da essa. Quindi, se anche la terra non fosse stata piatta, in ogni caso solo sulla sua parte superiore sarebbero potuti esistere gli animali, le piante e gli esseri umani. Ci volle parecchia esperienza e immaginazione per essere in grado di stabilire che la terra non era piatta e aveva la forma di una sfera. E che era ugualmente possibile vivere sull'altro suo lato. Per comprendere questo, si dovette interpretare la forza che tira tutto verso il *basso* come una forza diretta verso il centro di questa terra. Vogliamo far notare che, sebbene ci siano voluti centinaia di anni affinché l'umanità giungesse a tale intuizione, non vi sono particolari difficoltà per la mente umana nel riuscire a *capirla*.

Per molto tempo l'umanità pensò anche che la terra fosse al centro dell'universo, e che ogni altra stella o pianeta girasse attorno ad essa. Come è noto, Tolomeo sviluppò un modello molto ingegnoso in grado di spiegare tutti i movimenti delle stelle e dei pianeti che girano intorno alla terra, posta al centro. Tuttavia, il genere umano scoprì che la realtà era differente. Oggigiorno sappiamo che la terra è solo uno dei 9 pianeti maggiori che girano attorno al sole, che è una tra più di cento milioni di stelle che formano la Via Lattea, che a sua volta è una delle 20 galassie del gruppo locale, che è uno dei 100 gruppi del superammasso della Vergine. L'universo è pieno di questo tipo di superammassi. E di nuovo, non appena questa conoscenza sulla struttura dell'universo fu acquisita, non ci furono particolari

difficoltà per la mente umana nel *comprenderla*.

La teoria della relatività fu probabilmente la prima teoria fisica che introdusse delle difficoltà nel *comprendere* come fosse la realtà del mondo. E non molto dopo fu seguita dalla teoria quantistica. La più parte di noi è d'accordo con Richard Feynman quando dichiara che *nessuno comprende la meccanica quantistica*. In effetti, se paragonata alle precedenti rivoluzioni scientifiche, ad alcune delle quali abbiamo appena accennato, ci troviamo ad affrontare una situazione inedita: la meccanica quantistica possiede un formalismo matematico ben definito, che sappiamo come usare, ma non comprendiamo il significato fisico dei concetti che sono alla base di questo formalismo matematico. Non cercheremo qui di enumerare tutti i diversi tipi di problemi di *comprensione* che la meccanica quantistica ha offerto all'umanità, poiché sono troppi e non esiste nemmeno un accordo su quali essi siano. Tuttavia, il fatto che dopo più di sessant'anni di esistenza<sup>1</sup> della teoria e di successi nella sua applicazione nessun genere di consenso sia stato raggiunto tra quei fisici che hanno riflettuto al significato fisico del formalismo quantistico, dimostra che vi sia un problema reale di *comprensione*. Possiamo imparare qualcosa dalle rivoluzioni precedenti?

Ciò che si può dire è che tutte queste rivoluzioni hanno avuto a che fare con un cambiamento dei nostri *pregiudizi* sulla natura della realtà; pregiudizi che originano dal fatto che siamo esseri umani, che viviamo nel nostro ambiente specifico e abbiamo costruito i nostri modelli di realtà usando i concetti di questo specifico ambiente umano. Infatti, se consideriamo ancora una volta gli episodi appena menzionati, possiamo osservare che un tempo *su* e *giù* erano ritenuti concetti assoluti, poiché nell'ambiente immediato di noi esseri umani essi di fatto sono *assoluti*. Nel senso che *su* è la direzione del

---

<sup>1</sup> Il riferimento è qui agli anni Trenta del secolo scorso, poiché questo articolo è stato pubblicato per la prima volta nel 1990. Alla data di pubblicazione di questa riedizione del numero 2 di AutoRicerca, la teoria quantistica esiste da quasi un secolo [NdE].

cielo, *giù* è la direzione del suolo, e gli oggetti cadono sempre giù. La terra si pensava fosse piatta poiché innanzitutto nel nostro ambiente immediato ci appare piatta, e in secondo luogo poiché il modello che avevamo in mente era quello di un *tavolo*. Il tavolo ha un piano superiore, dove ogni cosa può essere posizionata senza cadere. Possiede inoltre un piano inferiore, che possiede dei bordi oltre i quali ogni cosa cadrebbe se si cercasse di posizionarla su di esso. Con questo modello di terra piatta ci si poneva una domanda sconcertante: “Che cosa accade se andiamo sempre nella stessa direzione? Esiste un luogo in cui si raggiunge il bordo della terra, tale che se ci spingessimo oltre si cadrebbe?”. In alcune società primitive, questo modello è ancora in vigore per la terra.

Il fatto che la terra fosse considerata come il centro dell’universo è già di un’origine più sofisticata rispetto al pregiudizio della terra piatta. Questo pregiudizio nacque dall’osservazione che ogni cosa, eccetto la terra, girava attorno ad essa: ovviamente il sole e la luna, ma anche le stelle. In seguito ad osservazioni più raffinate dei movimenti di questi corpi celesti, un modello molto complicato fu proposto dai greci, oggi comunemente denominato modello tolemaico. Conosciamo tutti quel periodo affascinante durante il quale questo modello fu finalmente sostituito dal modello oggi in vigore e conosciamo anche l’incredibile resistenza che lo caratterizzò.

La nascita della teoria della relatività costituisce un altro esempio. In questa rivoluzione i concetti stessi di spazio e tempo erano interessati. Di nuovo, dalla nostra esperienza di esseri umani con il nostro ambiente immediato abbiamo sviluppato un modello di spazio e di tempo dove questi sono entità indipendenti. Il che significa: esiste lo *spazio*, che è tridimensionale ed euclideo, e in questo spazio scorre il tempo, momento dopo momento. Se questa immagine fosse corretta, la seguente affermazione avrebbe un senso: “In questo momento è l’anno 1989 dopo Cristo, 17 aprile, l’una del pomeriggio, 5 minuti e 34 secondi, e...” E questa affermazione sarebbe *reale* per ogni luogo dello spazio nell’universo. La rivoluzione della teoria della relatività ci ha mostrato che invece la

realtà è più complicata. Quando degli osservatori si muovono gli uni rispetto agli altri, la simultaneità diventa un concetto paradossale. Spazio e tempo si mescolano in un certo modo, descritto matematicamente dalle trasformazioni di Lorentz-Poincaré.

Nel 1902 Henri Poincaré scrisse il suo libricino *La Science et l'Hypothèse* [POI, 1902]. In questo scritto possiamo scoprire i fondamenti di un modo di pensare che in ultimo culminò nelle teorie relativistiche. Ma Poincaré va ben oltre nella sua analisi del concetto di spazio, rispetto a quanto si rivelò in seguito necessario allo sviluppo di queste teorie. Egli analizza come la realtà dello spazio euclideo (o non-euclideo) è stata costruita partendo dalla nostra esperienza quotidiana di esseri umani con gli oggetti per noi più importanti (i corpi rigidi) e a noi più vicini. Questo non significa che lo spazio tridimensionale sia un'*invenzione* dell'umanità. Esiste, ma il modo in cui lo abbiamo organizzato, e in seguito formalizzato, per mezzo di specifici modelli matematici, è parte di esso. In altre parole, ciò che noi chiamiamo realtà tridimensionale dello spazio, in parte esiste in quanto tale e in parte esiste tramite le strutture che abbiamo costruito, sulla base della nostra specifica esperienza umana con esso.

Questa è un'intuizione molto importante e, secondo noi, generalmente vera per tutte le *realtà*. Il *su* e il *giù* che inizialmente furono ritenuti concetti *assoluti*, si dimostrarono in seguito essere concetti *relativi*, in un senso del tutto ovvio, che tutti noi oggi comprendiamo. Questo non significa che questi concetti non esistano, e siano pure invenzioni della mente umana. Esistono, ma nel modo in cui li abbiamo costruiti c'era, e sempre ci sarà, una dimensione umana.

Riteniamo che, per essere in grado di comprendere gli strani aspetti della realtà del micromondo, questo tipo di intuizione debba essere usata esplicitamente. In relazione agli *strani* (ma non così strani come molti fisici ritengono, come vedremo nelle sezioni 5 e 6) effetti della *cosiddetta* non-località, che sono stati riportati nel frattempo da diversi esperimenti, pensiamo che la *parte umana* nella costruzione della realtà dello spazio tridimensionale, euclideo o non-

euclideo, dovrà essere riconsiderata. Si dovrà scoprire quale parte della realtà di questo spazio tridimensionale trova la sua origine nella organizzazione e modellizzazione dello stesso che abbiamo prodotto in qualità di creature umane specifiche che hanno utilizzato le proprie esperienze umane specifiche con gli oggetti macroscopici circostanti. Alcuni fisici nel passato hanno sicuramente pensato a questa necessità, ma riteniamo che la maggioranza di loro l'abbia considerata un passo impossibile per la mente umana. "Come possiamo continuare a immaginare una realtà, se lo spazio in cui questa realtà è contenuta non è lo spazio che immaginiamo?". Noi siamo più ottimisti circa le capacità dell'immaginazione umana. Pensiamo che nel nostro mondo di oggi vi siano già numerose *entità* che non sono così ovviamente *presenti* in questo spazio tridimensionale.

Vediamo di spiegare più chiaramente cosa abbiamo in mente con un esempio molto concreto. Supponiamo di considerare come oggetto del nostro studio un linguaggio, per esempio la lingua francese. Chiunque concorda nel ritenere che la lingua francese esista. Ma dove si trova? Qualcuno potrebbe dire in Francia. Ma sicuramente non tutti i francesi sono in Francia. Se riflettiamo un po' più approfonditamente alla questione, sarà facile giungere alla conclusione che sia più sensato affermare che la lingua francese non sia realmente *presente* nello spazio. Questo però non ci preoccupa più di tanto, dal momento che sappiamo tutti di cosa stiamo parlando e non vi è quindi alcun mistero. Anche perché possiamo sempre considerare l'entità *lingua francese* come una sorta di entità derivata, costruita dagli umani, che non sarebbe mai esistita se gli umani non fossero esistiti. Nel senso in cui lo intendeva Karl Popper [POP, 1972], quando ha presentato la sua teoria dei diversi *mondi*.

Non potrebbe essere che anche le microentità non si trovino sempre in uno stato tale da essere *presenti* in questa parte spaziale della realtà, costruita sulla base dei nostri bisogni umani, e non potrebbe essere questa una maniera per spiegare gli strani aspetti della non-località che incontriamo in numerosi esperimenti con le

microentità? Questa è una domanda che vogliamo prendere su serio. E alla fine di questo articolo presenteremo alcuni esempi con cui evidenzieremo il nostro ottimismo circa il potere di immaginazione della mente umana. Cercheremo infatti di mostrare che è possibile per la nostra mente umana immaginare un modo secondo il quale le cose si sarebbero evolute in questa maniera!

Per poter avanzare in questa direzione, dovremmo cominciare indagando *quali diversi tipi di realtà* siano ancora possibili sulla base dei risultati sperimentali a nostra disposizione compatibilmente con il micromondo, intendendo questo così come è stato descritto in termini matematici dalle regole della meccanica quantistica.

## 2 Che cos'è la realtà

La realtà, così come descritta dalle teorie fisiche *classiche*, viene concepita come una struttura spaziotemporale di eventi, e la totalità di questa struttura spaziotemporale di eventi è ciò che viene denominato *universo*. Tutta la realtà è all'*interno* di questo universo o possiede delle connessioni dirette con esso, come proposto da Karl Popper in [POP, 1972].

La teoria quantistica si adatta molto male a tale concezione di realtà. Vi sono approcci nei fondamenti della fisica che cercano di inserire la teoria quantistica in tale struttura del reale. Ci riferiamo qui agli approcci dove le microentità sono realmente considerate come particelle nel senso classico (punti materiali) e tutta la stranezza del comportamento di queste particelle puntuali viene conferita a un modello di interazione *non-locale* (potenziale quantistico) tra le particelle<sup>2</sup>.

Un altro approccio ai problemi della teoria quantistica, completamente differente, è quello che consiste nel costruire un

---

<sup>2</sup> Ci riferiamo qui al lavoro originale di De Broglie [DEB, 1926, 1927a, 1927b], Rosen [ROS, 1942] e Bohm [BOH, 1952], e all'elaborazione di questo approccio originale, nel lavoro di J. P. Vigièr, B. J. Hiley ed altri ancora.



formalismo che dia per scontato il fatto che il mondo è formato da una collezione di entità e dalle interazioni tra queste entità, che possono essere descritte per mezzo dei loro *elementi di realtà*. Osserviamo in modo esplicito che in questo approccio il significato di “mondo” non è lo stesso attribuito alla parola “universo”. Il mondo è la collezione delle entità e delle interazioni tra le entità, e la richiesta che queste si trovino nell’universo spaziotemporale non è a priori necessaria. Un tale approccio si è sviluppato a Ginevra in uno studio della natura del micromondo, sotto la guida di Constantin Piron [PIR, 1976, 1983, 1985a, 1985b]; studio all’elaborazione del quale il presente autore ha personalmente partecipato [AER, 1981, 1982a, 1983]. L’approccio fornisce una teoria che è un miglioramento della vecchia meccanica quantistica sotto diversi aspetti, soprattutto se consideriamo il fatto che tutti i concetti di cui fa uso sono definiti in modo chiaro, realistico e comprensibile, contrariamente ai concetti utilizzati dalla meccanica quantistica standard; inoltre, nuove parti di realtà sono state descritte grazie ad esso, altrimenti impossibili da descrivere nella vecchia teoria. Si veda, a riguardo, [PIR, 1976, 1983, 1985a, 1985b] e [AER, 1981, 1982a, 1983]. In relazione a quanto ci proponiamo di fare in questo articolo, un notevole vantaggio di questo approccio sta nel fatto che, per introdurre i concetti di cui abbiamo bisogno per rappresentare la *realtà* di questo mondo di entità, non abbiamo bisogno di concetti classici macroscopici, come ad esempio il concetto di continuum spaziotemporale. Pertanto, possiamo sfruttare le *intuizioni* di questo approccio al fine di procedere nella direzione del nostro obiettivo, vale a dire scoprire *quale sia la componente umana (la componente dovuta al nostro posto specifico in questo mondo) che abbiamo immesso in questi concetti macroscopici classici*. Vediamo di ripetere brevemente i concetti principali, necessari alla costruzione della realtà di un mondo di entità.

Un’entità è una parte del mondo che costituisce un tutto, e non può essere facilmente spaccata in diverse parti. Beninteso, è facile vedere che questo concetto di entità non è un concetto assoluto. Se

si vuole, probabilmente ogni entità può essere rotta in diverse parti. Se consideriamo il gioco del biliardo, allora le biglie sono entità. Ma naturalmente, alla fine potranno essere rotte in più parti. Se questo accadesse durante il gioco, sicuramente verrebbe considerato come un incidente. E, infatti, il modello di comportamento meccanico classico delle biglie su un tavolo da biliardo, considera queste come dei corpi rigidi, che non possono essere rotti. La stessa situazione si presenta nel micromondo. Un neutrone è un'entità, sebbene si rompa da solo in pochi minuti. Pertanto, ciò che può essere considerato un'entità è una *convenzione* nel senso di Poincaré [POI, 1902], e dipende dal tipo di modello che si vuole considerare per quella parte del mondo.

La realtà di questo mondo di entità, a un certo tempo  $t$  (il tempo è considerato in questa fase solo come un mezzo per enumerare le diverse esperienze dell'osservatore che formula il modello), è costituita dagli stati delle entità a questo tempo  $t$  e dalle interazioni tra di esse. Quindi, per poter studiare questa realtà, dobbiamo comprendere il significato del concetto di *stato di un'entità*. Trattasi di un concetto che è stato studiato nel dettaglio nell'approccio spiegato in [PIR, 1976, 1983, 1985a, 1985b] e [AER, 1981, 1982a, 1983], e che nel frattempo è stato anche tradotto nel linguaggio generale per la fisica sviluppato ad Amherst da Charles Randall e David Foulis [FOU, 1983], nel quale ciò che noi qui intendiamo con il termine di *entità* viene da loro indicato attraverso l'espressione *entità realistica*, e ciò che noi qui intendiamo con il termine di stato viene denominato *stato realistico*.

Lo stato di un'entità a un certo tempo  $t$  è definito come la collezione di tutte le proprietà che questa entità *ha* a questo tempo  $t$  o che, in altre parole, sono *attuali* per l'entità al tempo  $t$ . Per coloro che desiderano approfondire i dettagli di questa costruzione, rimandiamo ai lavori [PIR, 1976, 1983, 1985a, 1985b], [AER, 1981, 1982a, 1983, 1992]. In questo articolo, anziché rimanere a un livello astratto, vogliamo chiarire la natura di questa costruzione per mezzo di un esempio.

Consideriamo il mondo di tutti i linguaggi umani. In questo mondo, ogni linguaggio umano è dunque un'entità. Tali "entità linguaggio umano", possono possedere diverse proprietà. Per esempio, la proprietà di essere una lingua germanica, o la proprietà di essere parlata da più di 30 milioni di persone nel mondo, ecc. Una volta che ci si è accordati sull'insieme di proprietà che andremo a considerare per i diversi linguaggi, abbiamo a disposizione un modello per questo mondo (non possiamo però considerare tutte le *possibili* proprietà, poiché questo ci condurrebbe a dei paradossi matematici del tipo di Russel; questa problematica viene ulteriormente analizzata in [AER, 1992]). L'insieme di tutte le proprietà *attuali* in un dato momento  $t$ , per un determinato linguaggio, corrisponde allo stato di quel linguaggio in quel determinato momento  $t$ . Per esempio: il francese non è una lingua germanica, ma è parlato da più di 30 milioni di persone nel mondo. La realtà di questo mondo di linguaggi a un dato momento  $t$  è data dagli stati di questi linguaggi in quel momento  $t$ , e dall'interazione tra i diversi linguaggi. È molto chiaro da questo esempio che, *a dipendenza del modello* adottato, diverse realtà potranno essere rilevate, e che queste realtà non fanno parte del continuum spaziotemporale, solitamente considerato al fine di racchiudere tutte le realtà di tutti i mondi, ed essendo per questo denominato "universo". Possiamo osservare che, quando pronunciamo la frase "la realtà a un dato momento  $t$ ", il " $t$ " che usiamo non corrisponde alla coordinata *geometrica* di questo continuum spaziotemporale. Al livello del nostro formalismo, il *tempo* è unicamente un parametro che ordina i *progetti di misure* sperimentali necessari per definire le proprietà, quindi gli stati delle entità.

Abbiamo scelto appositamente l'esempio del mondo dei linguaggi umani poiché da un lato si tratta di un esempio molto concreto (nessun mistero: tutti noi concordiamo sul fatto che i linguaggi *esistano* e possiedano proprietà che a loro volta possono definire i rispettivi stati, i quali possono cambiare, ecc.) e dall'altro lato esso rende così evidentemente chiara l'esistenza di quel

pregiudizio che consiste nel pensare che tutte le realtà di tutti i mondi siano contenute nel continuum spaziotemporale, cioè nell'*universo*.

Beninteso, si potrebbe obiettare che, sebbene questo esempio illustri una realtà non contenuta nell'*universo* dello spaziotempo, essa sia stata creata a partire da esso. Questo poiché i linguaggi sono creazioni degli esseri umani, i quali sono creazioni della materia-energia, e che la materia si trova di fatto nell'universo. Questo è il modo di pensare che Karl Popper propone, per capire che cosa sia la realtà. Vi è un *pregiudizio* di altra natura dietro a questa *limitazione* delle possibili realtà che, secondo noi, si contrappone a una vera comprensione della realtà del micromondo. Potremmo forse chiamarlo il pregiudizio del *riduzionismo*.

Si tratta di un pregiudizio che consiste nel pensare che, se un mondo *A* è contenuto (qualunque cosa ciò significhi) in un altro mondo *B*, allora deve essere sempre possibile ridurre la spiegazione di questo mondo *A* a una spiegazione del mondo *B*, e il mondo *B* deve essere sempre *più complicato* del mondo *A*. Ci sono degli evidenti contro esempi che dimostrano la falsità di questo pregiudizio, ma nondimeno, inconsciamente, continuiamo a ritenerlo vero quando tentiamo di comprendere la realtà del micromondo. Vediamo di dare questo contro esempio.

Consideriamo che il mondo *A* sia il nostro pianeta terra, con tutti gli esseri umani, animali, piante e oggetti sulla sua superficie, e le loro mutue interazioni. Si tratta di un mondo molto complicato. Consideriamo che il mondo *B* sia il nostro sistema solare. In tal caso, il mondo *A* è *contenuto* nel mondo *B*. Ovviamente, il mondo *A* è molto più complicato del mondo *B*. Tuttavia, poiché noi umani, gli animali, le piante, e tutti gli oggetti sulla superficie della terra, si muovono assieme alla terra in un moto piuttosto semplice attorno al sole, ciò fa sì che la nostra apparenza nel mondo *B* sia molto semplice. Nel modello del mondo *B*, secondo le leggi della meccanica di Newton, possiamo anche non apparire del tutto, tanto è semplice la nostra partecipazione.

Questo esempio ci mostra che l'organizzazione (nel caso

dell'esempio, il fatto di muoversi tutti assieme, attaccati alla superficie della terra), può portare a un mondo più grande che è molto più semplice delle parti che lo compongono.

Una situazione simile la si incontra nel caso del micromondo (mondo *A*) e del macromondo materiale (mondo *B*). La meccanica quantistica è una teoria piuttosto complicata, che descrive il comportamento di entità del micromondo che sono sprovviste di un'immagine semplice, mentre il mondo macroscopico materiale si comporta in modo molto più elementare. Noi pensiamo che questo sia dovuto al fatto che il passaggio dal micromondo al macromondo materiale comporta una grande organizzazione di tutte queste microentità, e che queste comincino a comportarsi in modo molto *organizzato* quando riunite in un pezzo di materia, che ci mostrerà questo bel comportamento descritto dalle teorie classiche. Tuttavia, una volta che un pezzo di materia viene scomposto, in maniera tale che le microentità siano nuovamente ognuna per proprio conto, il loro comportamento diventerà molto più complicato, poiché meno organizzato, e quindi strano, se riferito ai nostri standard umani, che derivano dalla nostra scala di esperienze umane caratterizzate precisamente da questo tipo di comportamento *organizzato* degli oggetti materiali attorno a noi.

Questa, secondo noi, è la ragione per cui nessuno fino ad ora è stato in grado di ritrovare il comportamento classico delle macroentità come limite del comportamento collettivo di una grande quantità di microentità. In termini matematici, possiamo effettuare milioni di prodotti tensoriali di spazi di Hilbert, ma un tale enorme prodotto tensoriale non potrà mai fornire uno spazio di fase classico. Non è lo scopo di questo articolo entrare maggiormente nel dettaglio di questo tipo di riflessioni, che ci porterebbero troppo lontano. Un resoconto dettagliato può essere trovato in [AER, 1992]. Quello che ora vogliamo fare è cominciare a fornire alcuni esempi concreti che rientrino in questo modo di pensare.

### 3 Possibili realtà

Quello che è accaduto negli ultimi decenni, se paragonato ai precedenti decenni di discussioni sui *Gedanken-Experimenten* relativi alla teoria quantistica, è che dei magnifici esperimenti *reali* sono stati condotti, volti a determinare se la microrealtà sia in effetti così strana come predetto dal formalismo matematico della meccanica quantistica. Questo tipo di indagini sono state notevolmente accelerate dai ragionamenti di John Bell [BEL, 1964] sull'entità di spin zero di David Bohm [BOH, 1951], che a sua volta si è ispirato alla situazione considerata nell'articolo originale di Einstein, Podolsky e Rosen [EIN, 1935].

Bell ha mostrato che, se calcoliamo le correlazioni relative alle misure di spin in diverse direzioni, in due opposte regioni dello spazio, localizzate simmetricamente rispetto alla regione dove l'entità di spin zero è stata creata, e se si fanno alcune *ipotesi aggiuntive*, si giunge a delle contraddizioni rispetto ai risultati predetti dalla meccanica quantistica. Più comunemente, queste *ipotesi aggiuntive* sono state identificate come l'ipotesi di *esistenza di variabili locali nascoste* per la descrizione dell'entità di spin zero.

Bell aveva formulato le sue richieste nella forma oggi comunemente nota con il nome di disuguaglianze di Bell, e la situazione teorica venne presentata nel modo seguente: le teorie a variabili nascoste soddisfano le disuguaglianze di Bell, mentre la teoria quantistica viola le disuguaglianze di Bell. Gli esperimenti dovrebbero quindi determinare come sia la realtà del micromondo: locale (descrivibile da teorie a variabili nascoste) o non-locale, come descritto dalla meccanica quantistica.

Numerosi esperimenti sono stati effettuati [FRE, 1970], [CLA, 1976], [FRY, 1976], [KAS, 1970], [FAR, 1974], [ASP, 1982] e questi sembrano confermare le predizioni della meccanica quantistica. Pertanto, per come la tesi è stata espressa, questo renderebbe

necessario per noi concludere che la realtà del micromondo sia non-locale. Il problema con questo genere di conclusioni *teoriche* è che, solitamente, nei ragionamenti che portano alla conclusione, sono così tante le *ipotesi aggiuntive* che vengono adottate *inconsciamente*, che la conclusione dovrebbe sempre essere enunciata in modo più prudente, per esempio nel modo seguente:

**Enunciato 1:** *La realtà del micromondo è non-locale (non descrivibile da teorie locali a variabili nascoste), oppure una delle "ipotesi aggiuntive adottate inconsciamente (IAAI)" è falsa.*

Alcuni fisici ritengono a questo proposito che delle IAAI<sup>3</sup> siano presenti in relazione all'interpretazione dell'esperimento EPR in quanto tale<sup>4</sup>.

L'autore stesso è sempre stato persuaso della presenza di ulteriori IAAI, di natura concettuale, che originano dai nostri pregiudizi su come la *realtà* debba essere, quando ragioniamo sulle specifiche situazioni sperimentali del tipo EPR. Questi pregiudizi sulla natura della realtà sono di molti tipi diversi, ma tutti derivano dal fatto che crediamo in un modello di realtà che è il risultato delle nostre esperienze quotidiane come esseri umani alle prese con tale realtà.

L'affascinante arte dell'illusionismo altro non sarebbe che l'esplorazione dei più primitivi tra questi pregiudizi. Altri pregiudizi sono ovviamente di natura molto più profonda, e vanno realmente a toccare le nostre credenze più intime su come sia la realtà. In relazione alla stranezza della teoria quantistica, vi è una mescolanza di queste due tipologie di pregiudizi, quelli della tipologia che abbiamo definito *illusionismo* e quelli di *natura profonda*. Siamo giunti a questa convinzione in quanto, inizialmente, si riteneva che le disuguaglianze di Bell fossero *sempre* soddisfatte nel mondo macroscopico degli oggetti ordinari, e che la meccanica quantistica

---

<sup>3</sup> L'acronimo IAAI è la traduzione dell'inglese AUUA: additional unconsciously used assumptions [NdE].

<sup>4</sup> Ci riferiamo qui al lavoro di Franco Selleri, Trevor Marshall ed Emilio Santos.

predicasse la violazione delle stesse nel micromondo. Pertanto, le diseguaglianze di Bell venivano presentate come delle diseguaglianze che distinguevano il macromondo dal micromondo (similmente a quanto fanno le diseguaglianze di Heisenberg). Dobbiamo oggi ammettere che a quei tempi l'intera problematica non ci era così chiara, ma ciò che era piuttosto ovvio per noi è che potevamo facilmente inventare delle entità fisiche macroscopiche che violavano le diseguaglianze di Bell [AER, 1981, 1982b], tra lo stupore dei numerosi fisici che lavoravano nel campo a quei tempi.

Sono passati quasi dieci anni da allora, e comprendiamo oggi molto più chiaramente quali siano le possibili conclusioni da trarre. Ma per noi fu grazie a tali esempi che ci fu possibile capire tali conclusioni. Pertanto, vogliamo arrivare ora al punto che abbiamo dichiarato essere uno degli scopi di questo articolo. Aniché rimanere con dei ragionamenti astratti sulla natura della realtà, dovremmo cercare degli esempi specifici (delle realizzazioni nella realtà che conosciamo). Per mezzo di queste realizzazioni potremmo infatti chiarire quali siano le IAAI che si nascondono nei nostri ragionamenti astratti, e quali di queste IAAI siano del tipo *illusionismo* o del tipo *profondo*, il che potrebbe consentirci di individuare quei pregiudizi *umani* sulla natura della realtà che si frappongono tra noi e la nostra comprensione della realtà del micromondo.

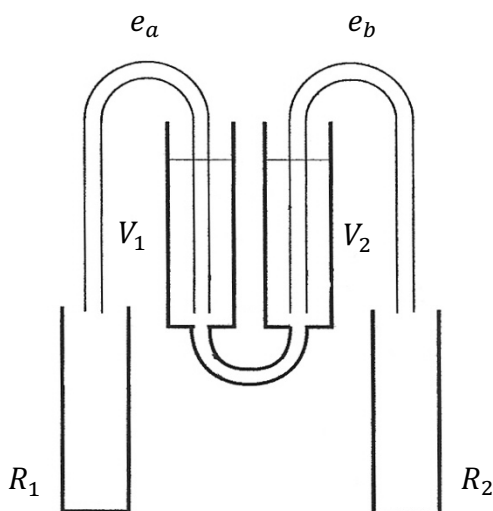
## **4 La violazione delle diseguaglianze di Bell nella realtà umana ordinaria**

Come esempio di ciò che intendiamo, vogliamo presentare in questa sezione un'analisi della violazione delle diseguaglianze di Bell, considerando rigorosamente la realizzazione di quell'entità macroscopica classica e ordinaria che abbiamo già esaminato in numerose occasioni [AER, 1984a, 1985a, 1985b, 1988], e che costituisce un miglioramento rispetto alla versione originale [AER,



1981, 1982b]. Questo poiché nel considerare questa entità, possiamo essere sicuri che stiamo ragionando su una situazione fisica concreta, entro la realtà ordinaria, e che pertanto abbiamo la possibilità di scoprire concretamente che cosa sia necessario, entro questa realtà *umana* ordinaria, affinché le diseguaglianze di Bell siano violate.

L'entità è formata da due recipienti  $V_1$  e  $V_2$  che contengono ognuno 10 litri d'acqua e che sono connessi mediante un tubo (vedi la Figura 1). L'esperimento  $e_a$  consiste nel prelevare dell'acqua dal recipiente  $V_1$  per mezzo di un sifone, raccogliendola in un contenitore di riferimento  $R_1$ . Se si raccolgono più di 10 litri, l'esito dell'esperimento  $e_a$  è "sì", e se si raccolgono meno di 10 litri l'esito per  $e_a$  è "no". L'esperimento  $e_b$  è lo stesso che  $e_a$  ma eseguito su  $V_2$ .



**Figura 1** Il sistema macroscopico classico che viola le diseguaglianze di Bell.

L'esperimento di coincidenza  $e_{ab}$  consiste nell'eseguire  $e_a$  ed  $e_b$  insieme. Questo esperimento di coincidenza crea delle correlazioni. Infatti, se troviamo più di 10 litri in  $R_1$ , allora troveremo meno di 10 litri in  $R_2$ , e viceversa. Le correlazioni vengono rilevate su entrambi i lati quando l'acqua termina di scorrere, vale a dire simultaneamente.

Quindi, gli eventi che corrispondono al rilevamento delle

correlazioni sono eventi separati da intervalli di tipo spazio. Per calcolare le diseguaglianze di Bell dobbiamo introdurre due altri esperimenti. L'esperimento  $e_{a'}$  consiste nel prelevare 1 litro di acqua dal recipiente  $V_1$  e verificare se l'acqua è trasparente. Se è il caso, allora l'esito di  $e_{a'}$  è "sì", altrimenti l'esito è "no". L'esperimento  $e_{b'}$  è lo stesso che  $e_{a'}$ , ma eseguito su  $V_2$ . Similmente a quanto fatto per  $e_{ab}$ , possiamo così definire e realizzare gli ulteriori esperimenti di coincidenza  $e_{a'b}$ ,  $e_{ab'}$  ed  $e_{a'b'}$ .

Definiamo ora le variabili aleatorie  $E_a = +1$  se  $e_a$  dà "sì", ed  $E_a = -1$  se  $e_a$  dà "no". Allo stesso modo, definiamo  $E_a, E_{a'}$ , ed  $E_{b'}$ . Definiamo anche la variabile aleatoria per gli esperimenti di coincidenza:  $E_{ab} = +1$ , se  $e_{ab}$  dà " $(sì, sì)$ " o " $(no, no)$ ", e  $E_{ab} = -1$  se  $e_{ab}$  dà " $(sì, no)$ " o " $(no, sì)$ ". Allo stesso modo, possiamo definire le variabili aleatorie  $E_{a'b}, E_{ab'}$  ed  $E_{a'b'}$ .

Se l'entità è in uno stato iniziale tale che i due recipienti contengono 10 litri di acqua trasparente, allora  $E_{ab} = -1$ ,  $E_{a'b} = +1$ ,  $E_{ab'} = +1$ ,  $E_{a'b'} = +1$ . Pertanto:

$$|E_{ab} - E_{a'b}| + |E_{ab'} + E_{a'b'}| = +4 > +2$$

Questo dimostra che le diseguaglianze di Bell sono violate dal sistema macroscopico dei due recipienti connessi mediante un tubo.

Le diseguaglianze di Bell sono state originariamente derivate a partire da un'ipotesi di località, formulata da John Bell in [BEL, 1964]. Mostriamo che anche questa ipotesi di località di Bell viene violata dal nostro esempio macroscopico. Questa ipotesi di località è stata formulata per una teoria deterministica a variabili nascoste. Si tratta di una teoria che postula l'esistenza di stati dell'entità tali che tutte le osservabili hanno un esito determinato quando lo stato è conosciuto. Indichiamo con  $\Gamma$  l'insieme di questi stati  $\lambda$ . Quindi, in una tale teoria,  $E_{ab}$  possiede un esito determinato  $E_{ab}(\lambda)$  per ogni stato  $\lambda$ . Bell introduce allora la seguente ipotesi:

***Ipotesi di località di Bell:*** per tutti gli esperimenti  $e_a, e_b$  ed  $e_{ab}$ , e per tutti i  $\lambda$ , abbiamo:

$$E_{ab}(\lambda) = E_a(\lambda) E_b(\lambda)$$

Il significato fisico di questa ipotesi è che il risultato dell'esperimento  $e_a$  dipende unicamente dallo stato  $\lambda$  e non dall'esperimento  $e_b$ . Poiché questa ipotesi di località di Bell implica che le diseuguaglianze di Bell sono soddisfatte, anche il nostro esempio dovrà violarla. Cerchiamo di vedere perché è così. È molto facile specificare le variabili nascoste deterministiche associate alla nostra entità. Infatti, se specifichiamo per esempio i diametri  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  dei due sifoni, l'esito di tutti gli esperimenti è determinato. Pertanto, possiamo scrivere:

$$E_{ab}(\lambda_1, \lambda_2) = E_a(\lambda_1, \lambda_2) E_b(\lambda_1, \lambda_2)$$

Se  $\lambda_1 > \lambda_2$ , abbiamo

$$E_a(\lambda_1, \lambda_2) = +1, \quad E_b(\lambda_1, \lambda_2) = -1$$

Se invece  $\lambda_1 < \lambda_2$ , abbiamo

$$E_a(\lambda_1, \lambda_2) = -1, \quad E_b(\lambda_1, \lambda_2) = +1$$

Questa è una fattorizzazione corretta se si esegue l'esperimento di coincidenza  $e_{ab}$ . Se però si vuole usare lo stesso  $E_a(\lambda_1, \lambda_2)$  per fattorizzare la variabile aleatoria  $E_{ab'}$  relativa all'esperimento  $e_{ab'}$ , la cosa non funziona più. Infatti,  $e_a$  eseguito assieme a  $e_{b'}$  dà sempre l'esito "si". Questo significa che il valore di  $E_a$  non solo dipende dagli stati  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , ma anche dal fatto di eseguire l'esperimento  $e_b$  o  $e_{b'}$ . In altre parole:

$$E_a(\lambda_1, \lambda_2; e_b) \neq E_a(\lambda_1, \lambda_2; e_{b'})$$

Infatti, se  $\lambda_1 < \lambda_2$ , abbiamo

$$E_a(\lambda_1, \lambda_2; e_b) = -1$$

Mentre per tutti i  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ , abbiamo

$$E_a(\lambda_1, \lambda_2; e_{b'}) = +1$$

Bell ha avanzato la sua ipotesi di località avendo in mente l'entità formata da due particelle di spin  $\frac{1}{2}$ , in uno *stato singoletto*. Per quale ragione si ritiene che tale ipotesi di località sia *naturale* per questa entità? Perché la si immagina come un'entità formata da due particelle di spin  $\frac{1}{2}$  localizzate in due diverse regioni dello spazio,

molto distanti tra loro, mentre se ne volano via. E in effetti, per due entità localizzate in regioni spaziali molto distanti, senza connessioni tra loro, l'ipotesi di località di Bell appare come un'ipotesi del tutto naturale da soddisfare. Ma per due entità che di fatto formano un tutto (come l'acqua nei due recipienti) è molto facile violare l'ipotesi di località di Bell, quindi anche le diseguaglianze di Bell.

Oltre alle diseguaglianze di Bell nella loro formulazione originale<sup>5</sup>, sono state proposte ulteriori derivazioni delle stesse che sembrano riuscire ad evitare questa ipotesi di località di Bell, fondandosi su un principio fisico più generale, che è il *principio di località einsteiniana* (nessun segnale viaggia più velocemente della luce). Qui certamente alcune IAAI devono essere presenti, poiché nessuno potrebbe credere che l'esempio dei due recipienti d'acqua connessi da un tubo possa violare questo principio. Cerchiamo di individuare le IAAI presenti in questa derivazione.

In essa si suppone che le stesse variabili nascoste descrivano i quattro esperimenti di coincidenza  $e_{ab}$ ,  $e_{a'b}$ ,  $e_{ab'}$  ed  $e_{a'b'}$ . Se consideriamo ancora una volta il nostro esempio dei recipienti d'acqua connessi da un tubo, possiamo facilmente osservare che le variabili nascoste per l'esperimento  $e_{ab}$  (variabili nascoste  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ) sono diverse da quelle per gli esperimenti  $e_{a'b}$ ,  $e_{ab'}$  ed  $e_{a'b'}$  (nessuna variabile nascosta). Pertanto, l'IAAI secondo cui i quattro esperimenti di coincidenza possono essere descritti dalle stesse variabili nascoste non è giustificato da nessun principio fisico.

Matematicamente parlando, è ovviamente possibile considerare quattro insiemi di variabili nascoste, un insieme per ogni esperimento, quindi costruire il prodotto cartesiano di questi quattro insiemi. In questo modo, possiamo descrivere tutti e quattro gli esperimenti con lo stesso insieme di variabili nascoste. Tuttavia, qualcos'altro va storto nella derivazione delle diseguaglianze di Bell. La distribuzione di probabilità  $\rho(\lambda)$  delle variabili nascoste dipenderà in questo caso dagli esperimenti. E, nella derivazione

---

<sup>5</sup> Per degli esempi, vedi l'articolo di review [CLA, 1978].

proposta ad esempio in [CLA, 1978], la distribuzione di probabilità  $\rho(\lambda)$  sotto l'integrale non potrà allora essere trattata matematicamente come viene solitamente fatto, a causa di questa dipendenza dai diversi esperimenti  $e_a$ ,  $e_{a'}$ ,  $e_b$  ed  $e_{b'}$ . Pertanto, si dovrebbero introdurre nelle integrali quattro distribuzioni di probabilità differenti:  $\rho(\lambda; e_a)$ ,  $\rho(\lambda; e_{a'})$ ,  $\rho(\lambda; e_b)$ , e  $\rho(\lambda; e_{b'})$ . Tuttavia, così facendo, ancora una volta non sarà più possibile derivare le disuguaglianze di Bell.

Vorremmo ora determinare quale sia la ragione fisica della violazione delle disuguaglianze di Bell da parte della nostra entità macroscopica. Possiamo già capire molto se consideriamo la natura delle variabili nascoste  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ . Non si tratta di variabili nascoste relative allo stato dell'entità *acqua* prima dell'esperimento, poiché lo stato dell'acqua (e quindi la realtà dell'acqua) è completamente determinato dal fatto che il volume è di 20 litri. E  $\lambda_1$  ( $\lambda_2$ ) è una variabile nascosta dell'esperimento  $e_a$  ( $e_b$ ), ma non dell'esperimento  $e_{a'}$  ( $e_{b'}$ ). Pertanto, se analizzassimo questa situazione nell'ambito dello schema di *modelli probabilistici non classici*, come abbiamo fatto in [AER, 1985c, 1986], classificheremmo le variabili nascoste  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$  come rappresentanti di *misure nascoste* e non di *stati nascosti*, e come mostrato in [CLA, 1978], l'acqua del nostro esempio possiede un modello probabilistico *non classico*.

Questo spiega da un punto di vista probabilistico perché possiamo violare le disuguaglianze di Bell con il nostro esempio dei recipienti d'acqua. Infatti, le correlazioni che vengono rilevate nell'esperimento  $e_{ab}$  non erano presenti prima di esso, ma vengono *create* durante la sua esecuzione; pertanto, possono violare l'ipotesi di località di Bell. Proponiamo di indicare le correlazioni che non erano presenti prima dell'esperimento e vengono create durante e dall'esperimento stesso con l'espressione "*correlazioni del secondo tipo*". Le correlazioni che invece erano già presenti prima dell'esperimento e sono solo rilevate da esso, le chiameremo "*correlazioni del primo tipo*".

Diamo un esempio di tali correlazioni del primo tipo.

Consideriamo un'entità formata da due particelle materiali puntuali che si muovono nello spazio e che hanno una quantità di moto totale pari a zero. Una misura di coincidenza della quantità di moto delle particelle individuali ci fornirà dei risultati correlati. Queste correlazioni erano però già presenti prima dell'esperimento di coincidenza. L'esperimento non fa altro che rilevare le correlazioni, senza crearle.

Questo tipo di correlazioni non potrà mai essere usato per violare le diseuguaglianze di Bell, dal momento che il risultato di un esperimento su una delle particelle non dipenderà mai dall'esperimento che viene effettuato sull'altra particella. Se leggiamo l'articolo di Max Jammer [JAM, 1985] sulla storia dell'articolo EPR, risulta chiaro che questa differenza è esattamente il punto che rese perplesso Einstein e che fu all'origine dell'articolo EPR. Vediamo di riassumere: Se consideriamo delle correlazioni che vengono create durante e dall'esperimento di coincidenza  $e_{ab}$  (correlazioni del secondo tipo) allora è possibile violare le diseuguaglianze di Bell e l'ipotesi di località di Bell per mezzo di tale esperimento di coincidenza e di alcuni altri esperimenti, poiché l'esito dell'esperimento  $e_a$  dipenderà in generale dal fatto che eseguiamo  $e_a$  assieme con  $e_b$ , oppure con qualche altro esperimento  $e_{b'}$ . Se consideriamo correlazioni che erano già presenti prima dell'esperimento di coincidenza, allora l'ipotesi di località di Bell sarà soddisfatta, e le diseuguaglianze di Bell non potranno essere violate.

Cerchiamo ora di mostrare che, secondo quanto *indicato* dalla *descrizione* della meccanica quantistica, questo è esattamente ciò che accade nel caso delle correlazioni che provengono dalla coincidenza di misure di spin sull'entità formata da due particelle nello stato di spin singoletto. Ciò che intendiamo è che la descrizione quantomeccanica di questa situazione indica che ci troviamo nella casistica delle correlazioni del secondo tipo. Vediamo di analizzare la forma dello stato di spin singoletto di un'entità formata da due particelle. Supponiamo che  $\psi_{\vartheta,\phi}^1$  e  $\psi_{\alpha,\beta}^2$  siano le funzioni d'onda che rappresentano lo stato della particella 1 nella direzione di spin  $(\vartheta, \phi)$

e lo stato della particella 2 nella direzione spin  $(\alpha, \beta)$ . Solitamente, la funzione d'onda che rappresenta lo stato singoletto  $S$  si scrive nel modo seguente:

$$\psi_S = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{su}^1 \psi_{giù}^2 - \psi_{giù}^1 \psi_{su}^2)$$

dove avviamo definito:

$$\psi_{su}^i \equiv \psi_{0,0}^i, \quad \psi_{giù}^i \equiv \psi_{\pi,0}^i, \quad i = 1,2$$

Tuttavia, questa funzione d'onda è matematicamente identica alla funzione d'onda che segue:

$$\psi_S = k(\psi_{\vartheta,\phi}^1 \psi_{\alpha,\beta}^2 - \psi_{\alpha,\beta}^1 \psi_{\vartheta,\phi}^2)$$

per ogni  $(\alpha, \beta) \neq (\theta, \phi)$  e per un certo numero complesso  $k$  scelto in modo appropriato. Chiaramente,  $\psi_S$  non dipende dai valori di  $(\theta, \phi)$  e  $(\alpha, \beta)$ . Questo dimostra che  $\psi_S$  non rappresenta uno stato di due particelle che possiedono già il loro spin, sebbene matematicamente sia costruito in questo modo. Esso rappresenta lo stato di un'entità formata da due particelle che non possiedono ancora i loro spin. E gli spin vengono creati dall'esperimento di coincidenza, che è esattamente l'esperimento che scompone l'entità singola, dividendola in due entità *separate*. Cerchiamo di riassumere tutto questo:

**Enunciato 2:** *La violazione delle diseguaglianze di Bell non è una proprietà delle microentità. Le diseguaglianze di Bell possono essere violate altrettanto facilmente da esperimenti di coincidenza su entità macroscopiche classiche. Di fatto, le diseguaglianze di Bell possono essere sempre violate se nel corso dell'esperimento di coincidenza viene rotta un'entità in parti separate e da questo atto si vengono a creare correlazioni. Analogamente all'esempio dei recipienti d'acqua, numerosi altri esempi di entità macroscopiche che violano le diseguaglianze di Bell possono essere inventati. Tuttavia, non c'è ovviamente alcun mistero in queste violazioni, poiché possiamo vedere con i nostri occhi, all'interno della nostra realtà umana, che cosa accade.*

È questa, dunque, la fine della storia? Non dovremmo allora essere per nulla stupiti dagli esperimenti sulle microentità che violano le disequaglianze di Bell? Certamente no. Crediamo che vi sia davvero un mistero, che tocca i *pregiudizi profondi della* nostra parte umana nella costruzione della realtà. Cercheremo di chiarire quale sia, secondo noi, questo mistero.

## 5 Il mistero che ci mostra alcuni dei nostri pregiudizi sulla parte umana della costruzione della realtà

Dalla nostra analisi risulta che dovremmo considerare l'entità costituita dalle due particelle nello stato di spin singoletto come un tutt'uno, senza che vi siano già due parti individuali separate con le rispettive direzioni di spin prima che l'esperimento di coincidenza sia eseguito. Questo però vorrebbe dire che questa entità singola è presente in una parte dello spazio di dimensioni macroscopiche (dell'ordine di 12 metri di lunghezza nel caso degli esperimenti di Aspect). Possiamo immaginare che due entità microscopiche formino un tutto intero in una regione così ampia dello spazio? Per l'acqua non ci sono problemi, dato che possiamo utilizzare un tubo, lungo quanto desideriamo; che dire però delle due microentità?

Inoltre, alcune osservazioni possono essere fatte circa l'esperimento di Aspect. In esso, le parti di tipo spaziale dei fotoni, se descritte da un pacchetto d'onde, ci sembra si allontanino, in quanto passano attraverso due filtri di diverse frequenze. Pertanto, benché sia molto complicato descrivere in modo rigoroso queste parti di tipo spaziale, esse ci appaiono, in un certo senso, come *separate*. D'altra parte, tutti gli aspetti *non-locali* sono dovuti alle parti di tipo spin delle entità. Da questo risulta che dovremmo non solo immaginarci un paio di fotoni aventi le dimensioni di una *nuvola* di 12 metri di diametro, ma aggiungere il fatto che non vi sarebbe *nulla* (dovremmo dire *nulla nello spazio ordinario*) nel mezzo. Le particelle



rimangono un *tutt'uno* mentre le regioni spaziali caratterizzate da una probabilità quasi pari a 1 di rilevare una delle particelle si allontanano, mettendo tra loro distanze macroscopiche. Questa è sicuramente una situazione che non saremmo in grado di imitare per mezzo di entità macroscopiche classiche.

Infatti, se consideriamo due regioni  $R_1$  e  $R_2$ , macroscopicamente separate, e un'entità  $S$  che costituisce un tutto unico, tale che nella regione  $R_1$  abbiamo una probabilità quasi uguale a 1 di rilevare una parte  $S_1$  (o  $S_2$ ) dell'entità  $S$ , e nella regione  $R_2$  abbiamo una probabilità quasi uguale a 1 di rilevare l'altra parte  $S_2$  (o  $S_1$ ) dell'entità  $S$ , e tale che tra le due regioni abbiamo una probabilità quasi uguale a 0 di rilevare  $S$  o una delle sue parti, allora questa situazione può solo essere realizzata per mezzo di un'entità macroscopica nella misura in cui tale entità macroscopica sia già separata in due sottoentità. Le entità macroscopiche sembrano possedere una proprietà aggiuntiva, che le entità microscopiche non necessariamente possiedono. La chiameremo *proprietà di interezza macroscopica*.

*La proprietà di interezza macroscopica: Per le entità macroscopiche abbiamo la seguente proprietà: se formano un tutt'uno (quindi non sono due parti separate) allora rimangono unite attraverso lo spazio. Il che significa che non possono essere localizzate in due diverse regioni dello spazio  $R_1$  e  $R_2$ , macroscopicamente separate, senza essere presenti anche nella regione di spazio in mezzo a queste regioni separate  $R_1$  e  $R_2$ .*

Per comprendere in modo chiaro questa proprietà d'interezza macroscopica, possiamo pensare all'esempio dell'acqua. Se tagliamo il tubo di connessione, i due recipienti d'acqua vengono localizzati in due diverse regioni dello spazio, ma in tal caso diventano delle entità separate, e le disuguaglianze di Bell non possono più essere violate per mezzo di esperimenti di coincidenza eseguiti su entrambe le entità. Le entità microscopiche sembrano essere in grado di costituire un tutto unico, senza necessariamente essere sottoposte a questa

proprietà d'interezza macroscopica. Questo, a nostro avviso, è ciò che di fatto dobbiamo imparare dagli esperimenti EPR.

Se fossero solo gli esperimenti EPR a crearci dei problemi di comprensione circa la natura della realtà, potremmo ancora sperare di trovare una soluzione, nel senso di rimettere in questione dei principi come quelli della *causalità*, o *località einsteiniana*, ecc. Ma vi sono altri esperimenti che ancora più fortemente e chiaramente ci indicano che le entità microscopiche non soddisfano questa proprietà di interezza macroscopica. Questo è quanto stiamo attualmente indagando assieme a Jean Reignier.

Abbiamo considerato, più specificatamente, la situazione di un esperimento tipico di Stern-Gerlach [AER, 1989]. E stiamo analizzando lo stato di tale entità *singola*, quando questa emerge dal magnete di Stern-Gerlach. Il nostro scopo è quello di analizzare il significato di questo stato, al fine di mostrare che questa particella singola (cioè una singola entità) non soddisfa di fatto questa proprietà di interezza macroscopica. In un certo senso, essa è *presente* in due regioni separate  $R_1$  e  $R_2$ , e non tra queste. Sosteniamo questa interpretazione sulla base dei risultati degli esperimenti coi neutroni e con l'interferometro a neutroni [AER, 1991].

È molto difficile poter immaginare che un'entità nel suo complesso non soddisfi questa proprietà di interezza macroscopica. Ma questa difficoltà ha probabilmente origine esattamente in quella porzione della realtà che abbiamo indicato come "parte costruita da noi esseri umani". Infatti, sulla base della nostra conoscenza dello spazio e delle entità in esso contenute, riteniamo che solo due situazioni siano possibili:

*Situazione 1: Un'entità forma un tutto, e quindi rompendola in più parti potremmo realizzare degli esperimenti che violano le disuguaglianze di Bell, ma per questo l'entità dovrà rimanere unita, e quindi non potrà essere localizzata in differenti regioni separate dello spazio.*

*Situazione 2: Un'entità è formata da due entità separate, e quindi la realizzazione di esperimenti sulle sue parti non consentirà mai di violare le diseuguaglianze di Bell. In tal caso, le parti separate potranno ovviamente essere localizzate in differenti regioni separate dello spazio.*

Altre situazioni sono molto difficili per noi da immaginare. Per quale ragione? Vogliamo arrivare ora al punto centrale di questo articolo. Queste altre situazioni sono per noi molto difficili da immaginare perché abbiamo costruito lo spazio a partire dalla nostra esperienza umana con le entità macroscopiche, che precisamente soddisfano questa proprietà di interezza macroscopica. Nella sezione seguente, grazie a un esempio, faremo uno sforzo nell'*immaginare* come lo spazio umano locale potrebbe essere emerso, sebbene in origine le entità con cui sono costituiti gli oggetti che risiedono in esso non soddisfino questo principio d'interezza macroscopica.

Concludiamo questa sezione con un'osservazione aggiuntiva su questo principio classico d'interezza, che non è così importante per lo scopo di questo lavoro, ma fornisce un buon esempio della superiorità del formalismo di Ginevra rispetto al formalismo della meccanica quantistica standard.

Se si vuole descrivere una collezione di entità usando il formalismo matematico della meccanica quantistica standard, è possibile dimostrare che tali entità non potranno mai essere separate in senso classico (quindi la situazione 2 non può essere descritta). Questo è uno dei grandi limiti strutturali di natura matematica del formalismo quantistico standard, che è stato corretto nel formalismo di Ginevra e studiato nel dettaglio in [AER, 1981, 1982a, 1983, 1984a, 1985a, 1985b, 1988]. Come viene mostrato in questi lavori, in [AER, 1982b], e più specificatamente in [AER, 1984b], è questo limite ad essere all'origine del contenuto *logico* dell'articolo di EPR (come spiegato da Max Jammer in [JAM, 1985], la parte del contenuto dell'articolo EPR che è attribuibile a Boris Podolsky, e ai suoi contatti con Kurt Gödel).

## 6 Immaginare entità non locali che determinano una costruzione dello spazio contenente entità locali

Questa sezione va considerata unicamente come un tentativo di inventare un mondo di entità tale che queste entità non siano in principio sottoposte alla proprietà di interezza macroscopica, ma che organizzandosi in un certo modo, con strutture ordinate formate da un grande numero di tali entità, finiscano con l'acquisire tale proprietà.

Facciamo questo tentativo con lo scopo di mostrare che tale evoluzione è possibile, potendo così suggerire future linee di ricerca verso l'elaborazione di modelli più seri e realistici di una tale evoluzione, che potrebbero infine fornire un modello di evoluzione dal micromondo al macromondo materiale. Il corrente esempio va inteso nello stesso senso dell'esempio della piastra scaldata di Poincaré, usato per spiegare la possibile realtà di una geometria non euclidea, o del suo ragionamento sulla natura convenzionale del numero di dimensioni del nostro spazio; vedi [POI, 1902], capitolo 4.

Nel nostro esempio, le entità sono degli esseri umani e il mondo di entità è la nostra società umana. Siamo tutti d'accordo che vi sono numerose interazioni di diversa natura tra gli esseri umani e che è la collezione di tutte queste interazioni, e degli stati di tutti gli esseri umani a un dato tempo  $t$ , a costituire la *realtà della nostra società in quel momento  $t$* . Le interazioni sono molto complicate, e per questo nessuno è stato in grado di presentare dei modelli matematici semplici per questo mondo.

Consideriamo una tipica interazione, che chiameremo *amicizia*. Questa interazione è al momento ben poco strutturata. Abbiamo tutti degli *amici prossimi* e degli *amici meno prossimi*, *un insieme di persone neutre*, e alcune volte delle *persone non amiche* o *nemiche*. Possiamo immaginare che il mondo evolva in una direzione tale che

questa interazione di *amicizia* diventi sempre più strutturata, tanto che in futuro ogni essere umano avrà un determinato quantitativo di amicizia per ogni altro essere umano. Supponiamo che l'umanità sia sopravvissuta solo grazie al fatto che l'*inimicizia* è stata eliminata da questo mondo del futuro, di modo che la quantità di amicizia che una determinata persona  $x$  sente per un'altra persona  $y$  possa essere rappresentata da un numero positivo

$$d(x, y) \geq 0$$

che quantifichi la vicinanza affettiva che la persona  $x$  sente per la persona  $y$ . Supponiamo anche che, per ragioni di stabilità strutturale di questo mondo futuro, l'*amicizia* debba sempre essere reciproca e tale che

$$d(x, y) = d(y, x)$$

per tutte le persone  $x$  e  $y$  che compongono la società. È facile immaginare che tipo di altre *ipotesi* future dovremmo formulare sull'evoluzione di quest'interazione di *amicizia*, di modo che la struttura risultante sia più o meno di *tipo spaziale*, ossia che  $d(x, y)$  rappresenti *realmente* una sorta di distanza tra le persone  $x$  e  $y$ . Dettagli su questa parte della storia possono essere trovati in [AER, 1992].

Quello che vogliamo ora menzionare ai fini del presente articolo è il seguente aspetto di questo esempio. È perfettamente immaginabile che in una tale società diversi *sottogruppi* comincino a emergere, evolvendo tutti verso una strutturazione dell'interazione dell'*amicizia*. Un aspetto di questo tipo di evoluzione è persino già presente al giorno d'oggi, se pensiamo ai diversi *gruppi* che sorgono sul pianeta. Supponiamo di considerare due di questi gruppi,  $A_1$  e  $A_2$ . Quindi,  $A_1$  è un gruppo di persone che vivono in uno *spazio di amicizia* molto strutturato, e  $A_2$  è anch'esso un gruppo di persone che vivono in uno *spazio di amicizia* molto strutturato. Nel vecchio spazio euclideo della superficie della terra, essi vivono mescolati, allo stesso modo in cui oggi giorno anche le persone appartenenti a diversi gruppi di interesse sulla terra vivono mescolate. Tuttavia, nel loro nuovo *spazio di amicizia*, se usiamo come misura la funzione

distanza-affettiva

$$d(A_1, A_2) = \inf \{d(x, y), x \in A_1 \text{ e } y \in A_2\}$$

i due gruppi si troveranno molto distanti tra loro. Il che significa che  $d(A_1, A_2)$  sarà grande e perciò  $A_1$  e  $A_2$  saranno localizzati in due differenti regioni separate  $R_1$  e  $R_2$  dello *spazio di amicizia*.

Supponiamo ora di considerare una persona  $z$  che non appartenga né al gruppo  $A_1$ , né al gruppo  $A_2$ . Questa persona sarebbe considerata molto distante da entrambi i gruppi nello *spazio di amicizia*; possiamo ad esempio ipotizzare che verrebbe collocata nello spazio intermedio tra i gruppi  $A_1$  e  $A_2$ . Supponiamo che per la persona  $z$  sia necessario scegliere di divenire membro di  $A_1$  o divenire membro di  $A_2$ . Se sceglie di divenire membro di  $A_1$ , nello spazio di amicizia collasserà nella regione  $R_1$ , e se sceglie di divenire membro di  $A_2$ , nello spazio di amicizia collasserà nella regione  $R_2$ . Il suo stato originale, prima di scegliere o essere forzata a scegliere, era uno *stato di sovrapposizione*. Tuttavia, se analizziamo nuovamente l'intera situazione dalla prospettiva dello *spazio euclideo* originale della superficie della terra, questa scelta non richiederà alcun tempo, e non muoverà in nessun modo la persona in questo spazio.

Con un po' più di immaginazione, potremmo considerare che dopo molto tempo gli umani si dimentichino del loro spazio euclideo originale, relativo alla superficie della terra, e che quindi un tale accadimento nel loro spazio di amicizia li ponga di fronte a un aspetto non-locale di questo spazio di amicizia.

La presente storia cerca di mostrare che, da un punto di vista realistico, è concepibile che delle microentità si muovano ed evolvano in un altro spazio, di cui noi, nel corso della costruzione della realtà della parte umana dello spazio, ci saremmo dimenticati. Le entità materiali macroscopiche ( $A_1$  e  $A_2$ , se rispettiamo l'analogia) sarebbero le strutture super organizzate formate dalle microentità ( $x$ ,  $y$  e  $z$  nel nostro esempio). Le entità macroscopiche materiali se ne vanno in giro in questo bello spazio tridimensionale, trovandosi in due tipi di situazioni: (1) sono *separate*, ma allora consistono di due

entità separate, con interazioni attraverso lo spazio tra queste entità, oppure (2) formano un tutt'uno, ma allora sono unite attraverso lo spazio. Ora, quando una microentità (come l'entità  $z$  nel nostro esempio) abbandona una di queste macrostrutture (questo è esattamente ciò che gli umani la costringono a fare, durante i loro esperimenti con le microentità) e se ne va in giro nel suo vecchio spazio, essa può comportarsi secondo delle leggi differenti. Quando  $z$  acquisisce la possibilità (attraverso una misura) di appartenere nuovamente a una delle due macroentità  $A_1$  o  $A_2$  (definite dal contesto di misura), essa allora collasserà, uscendo dal suo stato di sovrapposizione. Potrebbe questa essere una spiegazione realistica del comportamento non classico delle microentità?

## Ringraziamenti

Desidero ringraziare Constantin Piron, per la stretta e già lunga collaborazione sui problemi inerenti ai fondamenti della fisica. Le numerose discussioni e conversazioni che abbiamo avuto hanno sicuramente concorso alla formazione di molte delle idee espresse in questo articolo. Desidero anche ringraziare Jean Reignier, per una più recente collaborazione sui problemi fondamentali della fisica quantistica. Le idee espresse in questo articolo sono state sicuramente raffinate e ripensate nel corso delle numerose discussioni che abbiamo avuto negli ultimi mesi. E uno sforzo verrà fatto nel portare avanti alcune di esse in una forma più concreta, nella nostra prevista pubblicazione congiunta sulla problematica dello spin e della non-località in relazione all'esperimento di Stern-Gerlach [AER, 1991].

## Bibliografia

[AER, 1981] D. Aerts, "The One and the Many", Doctoral thesis, TENA, Vrije Universiteit Brussel (1981).

[AER, 1982a] D. Aerts, Found. Phys., 12, 12, 1131, (1982).

- [AER, 1982b] D. Aerts, *Lett. Nuovo Cim.* 34, 107 (1982).
- [AER, 1983] D. Aerts, “The description of one and many physical systems” in “Les Fondements de la Mécanique Quantique” 63, edizioni Christian Gruber, A.V.C.P. Lausanne (1983).
- [AER, 1984a] D. Aerts, in “The Wave-Particle Dualism”, edizioni S. Diner et al., Reidel, Dordrecht (1984).
- [AER, 1984b] D. Aerts, *Helv. Phys. Acta*, 57, 421 (1984).
- [AER, 1985a] D. Aerts, in “Open Questions in Quantum Physics”, edizioni G. Tarozzi G. and A. van der Merwe, Reidel, Dordrecht (1985).
- [AER, 1985b] D. Aerts, in “Symposium on the Foundations of Modern Physics”, edizioni P. Lathi and P. Mittelstaedt, World Scientific, Singapore (1985).
- [AER, 1985c] D. Aerts, in “Recent Developments in Quantum Logic”, edizioni P. Mittelstaedt and E. W. Stachow in “Grundlagen der Exakter Naturwissenschaften”, band 6, Wissenschaftsverlag, Bibliografisches Institut, Mannheim (1985).
- [AER, 1986] D. Aerts, *J. Math. Phys.* 27, 202 (1986).
- [AER, 1988] D. Aerts, in “Microphysical Reality and Quantum Formalism”, edizioni A. van der Merwe et al, Kluwer Academic Publishers (1988).
- [AER, 1989] D. Aerts and J. Reigner, “The Stern-Gerlach effect revisited”, preprint VUB/TENA/89/08.
- [AER, 1991] D. Aerts and J. Reigner, “The spin of a quantum entity and problems of non-locality”, in the Proceedings of the Symposium on the Foundations of Modern Physics 1990, Joensuu, Finland, edizioni P. Lathi, et al., World Scientific Publishing Company, Singapore, 9 – 19 (1991).
- [AER, 1992] D. Aerts, “Construction of reality and its influence on the understanding of quantum structures”, *Int. J. Theor. Phys.*, 31, 1815-1837 (1992).
- [ASP, 1982] A. Aspect, J. Dalibard and G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* 49, 1804 (1982).
- [BEL, 1964] J. S. Bell, “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics* (Long Island City, N.Y.), 1, p. 195 (1964).
- [BOH, 1926] D. Bohm, *Phys. Rev.* 85, 166 (1952).
- [BOH, 1951] D. Bohm, “Quantum Theory”, Prentice-Hall (1951).
- [CLA, 1976] J. F. Clauser, *Phys. Rev. Lett.*, 36, 1223 (1976).
- [CLA, 1978] J. F. Clauser, and A. Shimony, *Reports on Progress in Physics*, 41, 1881 (1978).
- [DEB, 1926] L. De Broglie, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 183, 447 (1926).
- [DEB, 1927a] L. De Broglie, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 184, 273 (1927).



- [DEB, 1927b] L. De Broglie, C. R. Acad. Sci. Paris, 185, 380 (1927).
- [EIN, 1935] A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?" Phys. Rev., **47**, pp. 777-780 (1935).
- [FAR, 1974] Faraci et al., Lett. Nuovo Cim., **9**, 607 (1974).
- [FOU, 1983] D. Foulis, C. Piron and C. Randall, Found. Phys. **13**, 813, (1983).
- [FRE, 1970] S. J. Freedman and J. F. Clauser, Phys. Rev. Lett., **28**, 938 (1972).
- [FRY, 1976] E. S. Fry and R. C. Thompson, Phys. Rev. Lett., **37**, 465 (1976).
- [KAS, 1970] Kasday, Ullmann and Wu, Bull. Am. Phys. Soc., **15**, 586 (1970).
- [JAM, 1985] M. Jammer, in "Symposium on the Foundations of Modern Physics", edizioni P. Lathi and P. Mittelstaedt, World Scientific, Singapore (1985).
- [PIR, 1976] C. Piron, "Foundations of Quantum Physics", W. A. Benjamin Inc., Massachusetts (1976).
- [PIR, 1983] C. Piron, "Les modèles de particules et de champs", in "Les Fondements de la Mécanique Quantique", 149, edizioni Christian Gruber, A.V.C.P. Lausanne (1983).
- [PIR, 1985a] C. Piron, "Quantum Mechanics, Fifty Years Later" in "Symposium on the Foundations of Modern Physics", edizioni P. Lathi and P. Mittelstaedt, World Scientific, Singapore (1985).
- [PIR, 1985b] C. Piron, "Cours de Mécanique Quantique", Département de Physique Théorique, Université de Genève (1985).
- [POI, 1902] H. Poincaré, "La Science et l'Hypothèse", Flammarion, Paris (1902, 1968).
- [POP, 1972] K. Popper, "Objective knowledge", Oxford, Clarendon Press (1972).
- [ROS, 1926] N. Rosen, Phys. Rev. **61**, 726 (1942).

**Nota:** la versione originale in inglese di questo articolo di Diederik Aerts è stata precedentemente pubblicata con il titolo: "An attempt to imagine parts of the reality of the micro-world", pp. 3-25, in *Problems in Quantum Physics II; Gdansk '89*, edizioni J. Mizerski et al., World Scientific Publishing Company, Singapore (1990).

Copyright © 1990. Riprodotto con l'autorizzazione di World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

La traduzione dall'inglese all'italiano è a cura di Massimiliano Sassoli de Bianchi.