

# Fisica e realtà

Massimiliano Sassoli de Bianchi  
Diederik Aerts

Prefazione di Sara Chessa

2011

2

AUTO R I C E R C A

# Fisica e realtà

Numero 2  
Anno 2011

 LAB

AutoRicerca è la rivista del LAB – Laboratorio di AutoRicerca di Base  
Via Cadepiano 18, 6917 Barbengo, Svizzera.

*Editore*

Massimiliano Sassoli de Bianchi

<i>Numero</i>	2
<i>Anno</i>	2011
<i>Edizione</i>	Aprile 2024
<i>Pagine</i>	114
<i>ISSN</i>	2673-5113
<i>Titolo</i>	Fisica e realtà
<i>Autori</i>	Massimiliano Sassoli de Bianchi, Diederik Aerts
<i>Editor</i>	Sara Chessa, Luca Sassoli de Bianchi Massimiliano Sassoli de Bianchi
<i>Copertina</i>	Luca Sassoli de Bianchi
<i>Copyright</i>	Gli autori (tutti i diritti riservati)
<i>Web</i>	<a href="http://www.autoricerca.ch">www.autoricerca.ch</a> , <a href="http://www.autoricerca.com">www.autoricerca.com</a>

È vietata la riproduzione, anche parziale, con qualsiasi mezzo effettuata, compresa la fotocopiatura e la digitalizzazione, se non precedentemente autorizzata dall'editore o dagli autori degli articoli, fatta eccezione per brevi passaggi, nell'ambito di discussioni e analisi critiche. In tal caso, la fonte della citazione dovrà essere sempre citata.

## Indice

A proposito degli autori	5
Prefazione alla nuova edizione <i>Sara Chessa</i>	8
Editoriale: effetto osservatore e visione creazione scoperta <i>Massimiliano Sassoli de Bianchi</i>	12
Proprietà effimere e l'illusione delle particelle microscopiche <i>Massimiliano Sassoli de Bianchi</i>	39
Un tentativo di immaginare parti della realtà del micromondo <i>Diederik Aerts</i>	77
A proposito di AutoRicerca	110
Numero precedente	112

*Nota:* il presente volume è una riedizione del Numero 2, Anno 2011. È cambiata l'impaginazione e la copertina, ma i contenuti sono rimasti invariati, mentre si è colta l'occasione per correggere dei refusi e migliorare, là dove possibile, la scorrevolezza dei testi e delle traduzioni. Il volume contiene inoltre una prefazione alla nuova edizione, a cura di Sara Chessa.

*Le pagine di un libro, siano esse cartacee o elettroniche, possiedono una particolarissima proprietà: sono in grado di accettare ogni varietà di lettere, parole, frasi e illustrazioni, senza mai esprimere una critica, o una disapprovazione. È importante essere pienamente consapevoli di questo fatto, quando percorriamo uno scritto, affinché la lanterna del nostro discernimento possa accompagnare sempre la nostra lettura. Per esplorare nuove possibilità è indubbiamente necessario rimanere aperti mentalmente, ma è ugualmente importante non cedere alla tentazione di assorbire acriticamente tutto quanto ci viene presentato. In altre parole, l'avvertimento è di sottoporre sempre il contenuto delle nostre letture al vaglio del nostro senso critico ed esperienza personale. L'editore e gli autori non possono in alcun modo essere ritenuti responsabili circa le conseguenze di un cambiamento di paradigma indotto dalla lettura delle parole contenute in questo volume.*

## A proposito degli autori

*Massimiliano Sassoli de Bianchi* si è laureato in fisica presso l'Università di Losanna (UNIL), Svizzera, nel 1989. Dal 1990 al 1991, è stato assistente presso il Dipartimento di Fisica Teorica (DPT) dell'Università di Ginevra (UNIGE), dove ha studiato i fondamenti della teoria quantistica con Constantin Piron. Nel 1992, è entrato a far parte dell'Istituto di Fisica Teorica (IPT), presso il Politecnico federale di Losanna (EPFL), e a seguito di una proficua collaborazione scientifica con Ph. A. Martin, ha conseguito il dottorato di ricerca nel 1995, con uno studio sulle osservabili temporali nella teoria dello scattering quantistico. Dal 1996, ha lavorato come manager nel settore privato, come ricercatore indipendente, e come insegnante. Nel 2010, ha creato il Laboratorio di Autoricerca di Base (LAB), la cui missione è lo sviluppo e la diffusione di competenze e conoscenze in grado di massimizzare il potenziale umano. Nel 2010, ha avviato una corrispondenza scientifica con Diederik Aerts, tramite la quale si è riallacciato alle idee della scuola di Geneva-Brussels, dando vita negli anni ad una proficua collaborazione scientifica. Nel 2016, è entrato a far parte del Centre Leo Apostel for Interdisciplinary Studies (CLEA), presso la Vrije Universiteit Brussel (VUB), collaborando e interagendo con molti dei suoi membri. La sua ricerca si concentra sui fondamenti delle teorie fisiche, sulla meccanica quantistica e sulla cognizione quantistica. È attivo anche nell'esplorazione della coscienza, principalmente da una prospettiva esperienziale, in prima persona (ricerca interiore). Ad oggi, ha pubblicato circa 90 articoli di ricerca e numerosi libri e monografie (compresi libri di divulgazione scientifica e racconti per bambini). È stato uno degli organizzatori del "Worlds of Entanglement Symposium", tenutosi presso la VUB, il 29-30 settembre 2017, e uno dei principali ricercatori di CLEA per QUARTZ, una rete di formazione innovativa che mira a educare i ricercatori in fase iniziale ad adottare un nuovo approccio all'accesso e recupero delle informazioni (IAR), basato sulla struttura della

meccanica quantistica. Attualmente, dirige il Laboratorio di Autoricerca di Base (LAB), a Lugano, Svizzera, è l'editore della rivista AutoRicerca, e presidente della società Area 302.

*Diederik Aerts* si è laureato in fisica matematica e ha poi conseguito un dottorato di ricerca in fisica teorica, presso la Brussels Free University (VUB). Per la sua ricerca di dottorato, ha lavorato con Constantin Piron, nell'ambito della cosiddetta "scuola di Ginevra sui fondamenti della fisica", occupandosi della descrizione assiomatica quantistica di sistemi composti, dimostrando tra l'altro l'impossibilità della teoria quantistica standard di modellare i sistemi formati da entità separate. Per il suo postdoc, Aerts ha lavorato presso il Fondo nazionale belga per la ricerca scientifica, dove è stato anche ricercatore di ruolo, per poi diventare professore alla Brussels Free University (VUB). Lì è stato direttore del Centro Leo Apostel di Studi Interdisciplinari (CLEA), prima di diventare di recente professore emerito. È editore capo della rivista internazionale Foundations of Science (FOS), oltre che membro del consiglio del Worldviews Group, fondato dal filosofo Leo Apostel, che indaga sulla possibilità di costruire delle worldviews (concezioni del mondo) integrate, tenendo conto anche delle più recenti scoperte scientifiche. È stato coordinatore scientifico e artistico della conferenza "Einstein meets Magritte," dove eminenti scienziati e artisti di livello internazionale si sono riuniti per riflettere su scienza, natura, azione umana e società. Questa è stata seguita da due simposi internazionali co-organizzati con i suoi collaboratori e studenti, "Times of Entanglement", alla World-Exhibition di Shanghai, e "Worlds of Entanglement", presso la VUB. Aerts è considerato uno dei pionieri nel campo di ricerca denominato "quantum cognition", dove le strutture quantistiche vengono utilizzate per modellizzare aspetti della cognizione e della decisione umana, un campo in cui è ancora attivamente impegnato con il suo gruppo di collaboratori e dottorandi. Partendo dalla sua riflessione sulla cognizione quantistica, ha inoltre formulato una nuova interpretazione della

teoria quantistica, detta “interpretazione concettualistica”, nella quale le entità quantistiche vengono considerate essere dei concetti (entità di significato) anziché degli oggetti. Con il suo gruppo, sta attualmente elaborando questo approccio impegnativo in tutte le sue possibili sfaccettature e campi di indagine, poiché sembra in grado di chiarire aspetti fondamentali della teoria quantistica, come l’indeterminazione, l’indistinguibilità, l’entanglement e la sovrapposizione; aspetti che non hanno ancora trovato una spiegazione soddisfacente nelle interpretazioni quantistiche esistenti.

## Prefazione alla nuova edizione

È vero che, come afferma Richard Feynman, nessuno comprende la meccanica quantistica?

Se volgiamo lo sguardo verso il moderno tempio di conoscenza in cui essa è indagata ai livelli più alti, vediamo che, anche attraverso i suoi luminosi corridoi e le sue aule dense di desiderio di comprensione, gli studiosi hanno a che fare con un affascinante paradosso. Finché hanno a che fare col formalismo matematico della meccanica quantistica, ben definito e solido come una parete di roccia, sanno come operare con esso; tuttavia, non appena si tratta di comprendere il significato fisico dei concetti espressi da questo formalismo, un'atmosfera più ombrosa ed enigmatica si fa strada per quelle aule, portando ad un tratto un buio che è tutto da esplorare.

Per circa settant'anni, innumerevoli menti geniali si sono aggirate per i corridoi di quel tempio e seduti attorno ai tavoli di lavoro che esso ospita; eppure, sul significato fisico del formalismo quantistico non vi è ancora un consenso. Bisogna, recuperando l'umiltà come forma di onestà intellettuale al servizio della conoscenza stessa, ammettere che esiste un problema di comprensione.

Da qui partono gli autori ospitati in questo volume, guidando il lettore in un viaggio che inizia con una domanda fondamentale: possiamo imparare qualcosa dalle rivoluzioni scientifiche precedenti, qualcosa che ci permetta di aggiungere tasselli di comprensione alla rivoluzione più recente rappresentata dalla meccanica quantistica?

I contenuti che Diederik Aerts e Massimiliano Sassoli de Bianchi offrono al lettore in questo volume – e che hanno poi trovato conferme nei loro successivi lavori sul tema<sup>1</sup> – condividono un'osservazione di fondo: tutte le rivoluzioni scientifiche passate hanno richiesto il cambiamento di alcune nostre radicate

---

<sup>1</sup> Vedi ad esempio i loro articoli pubblicati sul numero 24 di *AutoRicerca* e le referenze ivi citate.

convinzioni sulla natura della realtà e, solo nel momento in cui abbiamo osato fare un passo verso il loro superamento, rinunciando alla rassicurante carica che il passato conferiva loro, ci siamo resi conto che tali convinzioni erano, in ultima analisi, dei pregiudizi.

La nave che i due studiosi costruiscono – per esplorare in direzione ostinata e contraria ai pregiudizi stessi – permette al lettore o alla lettrice che s’imbarchino con loro di recuperare una caratteristica innata dell’essere umano, ossia l’istinto spontaneo alla scoperta dell’ignoto, la vocazione naturale – magari dimenticata, ma naturale – verso la ricerca di una conoscenza della realtà che sia più profonda di quella conquistata fino al presente.

Affiora, in coloro che leggono, una sorta di “senso dell’avventura”. E questo perché, dalla carta nautica che gli autori utilizzano in questo viaggio, vengono progressivamente depennati punti di riferimento che tendiamo a dare per scontati e che non mostrano invece di essere d’aiuto nel mondo microscopico della meccanica quantistica, dove le entità sembrano non essere presenti nello spazio, ma emergono (o s’immergono) in esso ogni volta che interagiscono con i nostri apparecchi di misura macroscopici e tridimensionali.

Qual è la verità? E come si comprende quali punti di riferimento sulla carta nautica devono essere abbandonati per incoraggiare la rotta esplorativa della nave verso l’orizzonte aperto dalla rivoluzione quantistica?

Una delle tempeste che più spesso agitano il mare in cui questa nave di ricercatori si muove è quella delle “ipotesi aggiuntive adottate inconsciamente” (IAAI), causate proprio dalle nostre attempate convinzioni circa il fatto che la realtà deve essere in un certo modo. Chi legge avrà modo di vedere quali forme queste “tempeste” assumano, scoprendo cosa siano le IAAI definite da Aerts come illusionismo e quelle a cui egli stesso attribuisce una natura profonda.

Per superare le IAAI nascoste e “normalizzate” nelle pieghe più ombrose dei nostri ragionamenti, Aerts conduce l’indagine servendosi di esempi specifici, concreti, contenuti nella realtà che conosciamo. Segue la sua stessa linea Sassoli de Bianchi, cosicché

entrambi i capitani della nave, in missione verso ciò che è (ancora) ignoto, portano i lettori-ricercatori lungo tratti di mare in cui elementi più insospettabili del mondo macroscopico diventano strumenti per una comprensione più profonda di quello microscopico: due recipienti d'acqua, un'entità di legno, l'amicizia nel mondo umano, uno spaghetti.

Chi immaginerebbe che questi oggetti/realità macroscopiche possano contribuire a creare un principio di chiarezza di visione sul significato fisico dei concetti che sono alla base del formalismo matematico della meccanica quantistica? Pochissimi, forse. Eppure, chi “viaggia” attraverso questi esempi viene colpito dal loro potere esplicativo in tal senso.

La rotta prosegue verso un orizzonte su cui, miglio nautico dopo miglio nautico, sempre più si fa chiara una intuizione fondamentale: le particelle microscopiche non esistono. Cosa vuol dire? La visione corpuscolare delle particelle è errata? Può esistere un'ontologia non-particellare? Imbarcandosi nella nave e viaggiando con Aerts e Sassoli de Bianchi, i lettori incontreranno uno ad uno i tasselli che contribuiscono a formare una risposta convincente a queste domande.

Tanto altro potrebbe anticipare questa prefazione alla seconda edizione, a cominciare da alcune delle stelle maestre seguite lungo l'itinerario, ossia la nozione di “elemento di realtà” introdotta da Einstein, Podolsky e Rosen nel 1935 o il criterio di esistenza (CE) introdotto da Constantin Piron.

All'arrivo della nave nel porto di destinazione – che potrà poi essere punto di partenza di nuovi viaggi – lettrici e lettori avranno una visione chiara dei concetti di non-spazialità, non-individualità, e – addirittura! – non-esistenza di quelle che fino ad oggi abbiamo chiamato “particelle”.

Prima di tale approdo, tuttavia, si estende davanti agli occhi di chi legge un mare che è “tutto da esplorare”, e che la lettura di questo numero di AutoRicerca consentirà di solcare.

Sara Chessa

*Gli articoli presentati in questo volume, compreso l'editoriale, sono in buona parte accessibili anche al lettore sprovvisto di conoscenze tecniche specifiche. Tuttavia, trattandosi di articoli di ricerca, in quanto tali richiedono un certo sforzo di astrazione e concentrazione per poter essere pienamente compresi. Si raccomanda quindi a quei lettori che, per quanto colti, siano a digiuno di fisica moderna, di seguire le linee di ragionamento presentate senza troppo preoccuparsi se un dettaglio tecnico, o un concetto specifico, non vengono subito compresi. Altresì, in prima lettura, è sicuramente possibile saltare alcuni dei passaggi più tecnici, dove viene utilizzato (sebbene assai parcamente) un linguaggio matematico, senza per questo compromettere la comprensione complessiva degli scritti, che sono stati prodotti con particolare attenzione didattica e possiedono comunque una struttura piuttosto modulare (molte parti possono essere comprese indipendentemente dalle precedenti, o successive). In altre parole, incoraggiamo il lettore "non addetto ai lavori" a non scoraggiarsi troppo presto, perseverando nella lettura. Avrà così l'occasione di stabilire un contatto con un campo di indagine particolarmente affascinante e profondo; un campo in cui si tenta realmente di capire la natura e struttura del nostro mondo, senza frammentare e separare artificialmente la conoscenza scientifica da quella filosofica, come purtroppo spesso avviene ai nostri giorni, nelle diverse comunità scientifiche, più preoccupate dal successo tecnico e formale che dal raggiungimento di una vera conoscenza.*

*L'editore e gli autori degli articoli pubblicati non possono in alcun modo essere ritenuti responsabili circa le conseguenze di un eventuale cambiamento di paradigma indotto dalla lettura dei testi contenuti in questo volume.*

## Editoriale: effetto osservatore e visione creazione scoperta

Sono felice di poter presentare il secondo numero di *AutoRicerca*, una pubblicazione il cui scopo è diffondere scritti di valore, in lingua italiana, sul vasto tema della *ricerca interiore*.

Per una rivista di così recente pubblicazione, il passaggio dal primo al secondo numero è indubbiamente un evento importante, se non altro sotto il profilo simbolico. Infatti, se il numero 0 rappresenta l'idea della rivista e la sua dimensione potenziale, non manifesta, il numero 1 è invece il primo passo concreto in direzione dell'attuazione di tale potenziale, che diviene manifesto<sup>1</sup>. Tuttavia, è solo con il numero 2 che questo aspetto manifesto può cominciare a trasformarsi, quindi a evolversi. Il 2 infatti, come dicevano gli antichi, è l'1 che comincia a muoversi!

Questo secondo numero della rivista, intitolato *Fisica e realtà*, è interamente dedicato al tema della fisica e, più in particolare, alla *fisica quantistica*.

Alcuni lettori potrebbero chiedersi quale sia il nesso tra una scienza appartenente al corpus delle indagini esteriori come la fisica (sia essa classica, quantistica, o relativistica) e la ricerca interiore. La domanda è certamente lecita, ma nondimeno un po' ingenua. Infatti, in ultima analisi, la separazione tra esteriore e interiore è solo una comoda convenzione, non un dato incontrovertibile sulla realtà del mondo. Questo anche perché la percezione che abbiamo del nostro esteriore è fortemente condizionata dai contenuti del nostro interiore, dal nostro stato di coscienza; viceversa, la percezione che abbiamo del nostro interiore è fortemente influenzata dal contesto

---

<sup>1</sup> Il primo numero di *AutoRicerca* si è occupato del tema dello *Stato Vibrazionale*, una fondamentale condizione energetica in grado di manifestarsi (sebbene raramente) in modo spontaneo nell'essere umano, ma che è possibile promuovere anche in modo volontario, mediante l'applicazione di specifiche tecnologie interiori.

esteriore in cui ci troviamo.

Inoltre, così come ogni rovescio della medaglia possiede un rovescio della medaglia, ogni interiore ha il suo interiore (o i suoi interiori), e ogni esteriore ha il suo esteriore (o i suoi esteriori). E a questo dobbiamo poi aggiungere le molteplici zone di frontiera, dove i concetti stessi di interiore e di esteriore perdono il loro senso proprio.

Ora, se è vero che non sempre è possibile distinguere un esteriore da un interiore, soprattutto quando ci rapportiamo alla realtà nella sua interezza, c'è un'altra ragione per la quale questa distinzione non sempre appare significativa. A titolo di esempio, consideriamo il concetto di *dialogo*. Come è noto, gli esseri umani dialogano tra loro, attraverso l'utilizzo di strumenti comunicativi esteriori (voce, scrittura, linguaggio corporeo, espressioni emotive, ecc.). Ogni essere umano è però anche in grado di dialogare con sé stesso, o meglio, con le innumerevoli parti che formano le sue personalità e sub-personalità, nell'intimità e profondità della propria realtà interiore. Esistono quindi dei dialoghi esteriori, dei dialoghi interiori e altresì dei dialoghi tra queste diverse forme di dialogo.

Questo per evidenziare l'esistenza di categorie concettuali di natura trasversale (o transdimensionale), che si applicano altrettanto bene sia al mondo interiore sia al mondo esteriore, sia alla ricerca interiore sia alla ricerca esteriore, come è il caso del summenzionato concetto di *dialogo* e, più generalmente, del concetto di *interazione* tra i diversi enti che popolano la realtà, di cui l'interazione soggetto-oggetto costituisce indubbiamente uno degli esempi più emblematici.

Quando ci interroghiamo sulla pertinenza di queste categorie universali di pensiero, in grado di plasmare la nostra comprensione e percezione del reale, ecco che, come gli antichi, non contrapponiamo più l'oggetto e il soggetto, l'esteriore e l'interiore, ma poniamo la nostra ricerca al servizio di quei principi unici ed unitari (quegli *archetipi*) che sono alla base della nostra manifestazione, non solo fisica, ma anche energetica, emozionale, mentale, spirituale...

Ecco allora che il cosiddetto scienziato “convenzionale” e il ricercatore di verità interiori si trovano, forse senza saperlo, a condividere un medesimo campo di indagine, in quanto entrambi tentano di scoprire e analizzare quegli elementi di realtà – e di illusione – che risultino avere valenza universale e che prescindano dall’orientamento specifico della ricerca in questione.

Questa osservazione assume tutta la sua pertinenza soprattutto quando lo scienziato convenzionale, nella fattispecie il fisico quantistico, si addentra nei meandri del micromondo e delle sue stranezze. Così, al pari di un entronauta<sup>2</sup> che viaggiando sempre di più all’interno si accorge dell’inadeguatezza dei propri strumenti cognitivi ordinari, il fisico ha l’opportunità di divenire consapevole di come i suoi pregiudizi più radicati e radicali sulla realtà vengano apertamente sfidati dal comportamento apparentemente paradossale degli enti del micromondo.

Per questa sua particolarità, sin dal principio, la meccanica quantistica – ancor più della fisica relativistica – ha sorpreso e ancora oggi sorprende tutti coloro che la studiano attentamente con la genuina intenzione di capirla, coloro che, cioè, cercano di armonizzare l’esperienza acquisita mediante l’interazione con le entità del macromondo (ossia gli oggetti ordinari del nostro quotidiano) con i dati, apparentemente contraddittori, in provenienza dal micromondo.

È interessante osservare che il micromondo della fisica, governato dalle leggi quantomeccaniche, può essere per certi versi inteso come l’aspetto interiore del macromondo, governato dalle leggi classiche di Newton o dalle leggi relativistiche di Einstein (che restano pur sempre leggi classiche, nel senso di non-quantistiche). Infatti, secondo la visione riduzionista, la dimensione microscopica sarebbe ciò che formerebbe e fonderebbe la dimensione macroscopica; quindi, in un certo senso, il microscopico sarebbe ciò che il

---

<sup>2</sup> Il termine “entronauta” è un neologismo coniato da Piero Scanziani per identificare i grandi mistici che consacrano le proprie vite all’indagine sui continenti interiori.

macroscopico avrebbe in sé, nel suo ventre (o nel suo cuore se preferite), costituendone la dimensione più interiore (e per questo invisibile ai nostri sensi ordinari).

Sebbene siano probabilmente in molti di noi un fenomeno del tutto inconscio, la analogia tra mondo interiore e dimensione microscopica e quella tra mondo esteriore e dimensione macroscopica possono forse spiegare perché oggi la fisica quantistica sia considerata da numerosi ricercatori spirituali come una possibile chiave di comprensione dell'interiorità dell'uomo, intendendo qui il termine di interiorità nella sua accezione più ampia e metafisica.

Non è certo mia intenzione affermare qui il contrario. Nondimeno, è bene non cadere vittime di interpretazioni troppo rapide o superficiali, come spesso accade quando ci facciamo prendere da un troppo facile entusiasmo, figlio di un emotivo più bisognoso di certezze che di verità. La ricerca – interiore o esteriore che sia – necessita di un emotivo ben bilanciato, al servizio di un mentale stabile e maturo, interessato alla raccolta di informazioni che siano le più possibili imparziali e attendibili.

Mi spiego meglio. Coloro che studiano e sperimentano su di sé, lucidamente, gli aspetti multidimensionali della coscienza umana, spesso hanno cercato il conforto della scienza, a sostegno delle intuizioni ed esperienze raccolte tramite percorsi di indagine svolti in prima persona, quindi sostanzialmente soggettivi. Questo sostegno, però, non è mai veramente giunto.

Naturalmente, questo non significa in nessun modo che non vi sia un contenuto di verità nelle innumerevoli ricerche condotte a livello personale, nel corso dei millenni, ma semplicemente che la ricerca scientifica convenzionale non ha ancora saputo, o voluto, adattare i propri metodi e i propri criteri di indagine al fine di abbracciare questo più ampio campo di studio, solitamente riservato alle speculazioni filosofiche, agli atti di fede religiosi o alle esperienze di stampo mistico.

D'altra parte, in epoche più recenti, a molti dei fenomeni associati

alla multidimensionalità della coscienza umana è stato dato l'appellativo generico di “fenomeni paranormali” (detti anche “fenomeni anomali”). L'indagine del paranormale, intesa qui nel senso della moderna parapsicologia, ha fatto passi da gigante, grazie soprattutto al crescente numero di esperimenti di laboratorio condotti in modo estremamente rigoroso e controllato, analizzati con i più sofisticati strumenti matematici, quali ad esempio le metanalisi statistiche.

La conclusione che è possibile trarre da questa imponente mole di dati, accumulata nel corso di diversi decenni, lascia pochi dubbi: telepatia, precognizione, chiaroveggenza (visione a distanza) e telecinesi sono fenomeni che hanno ormai ricevuto così tante e articolate evidenze empiriche<sup>3</sup> da essere oggi piuttosto arduo, per uno scettico intellettualmente onesto e bene informato, dubitare della loro veridicità<sup>4</sup>.

Tuttavia, se la realtà empirica dei fenomeni psichici (o meglio, parapsichici) può essere ritenuta del tutto consolidata (nonostante la più parte degli scienziati continui a fare orecchie da mercante), resta aperta la questione della spiegazione e dell'interpretazione. Com'è possibile che l'essere umano e gli esseri viventi in generale siano in grado di produrre fenomeni così strani, che sfidano apparentemente il

---

<sup>3</sup> Vedi ad esempio: Dean Radin, *The Conscious Universe: The Scientific Truth of Psychic Phenomena*, HarperEdge (1997); Charles Tart, *The End of Materialism: How Evidence of the Paranormal Is Bringing Science and Spirit Together*, New Harbinger Publications and Institute of Noetic Sciences (2009); *Debating Psychic Experience: Human Potential or Human Illusion?*, S. Krippner and H. L. Friedman, Editor (2010).

<sup>4</sup> Naturalmente, le cose rimangono assai più controverse per quanto attiene ai fenomeni paranormali più complessi, come ad esempio le esperienze di pre-morte (NDEs – *near death experiences*), le proiezioni extracorporee (OBEs – *out of body experiences*), la serialità esistenziale (reincarnazione) e gli stati di cosmocoscienza (samadhi, satori); questi fenomeni infatti, non possono essere facilmente studiati con i protocolli sperimentali tradizionali (in terza persona) e richiedono il passaggio a nuove metodologie di indagine scientifica, di cui l'attuale establishment scientifico sembra faticosi ancora a dotarsi.

nostro buon senso, se non addirittura le leggi consolidate della fisica?

D'altra parte, bisogna pur ammettere che nell'ultimo secolo anche la fisica è diventata piuttosto strana, soprattutto in seguito alle sue due più recenti rivoluzioni: quella quantistica e quella relativistica. Non potrebbe essere allora che la spiegazione dei fenomeni paranormali trovi un ambito in queste grandi rivoluzioni concettuali e sperimentali, che hanno così profondamente stravolto la nostra visione della realtà?

La meccanica quantistica, più ancora della relatività, ha sicuramente stimolato gli intelletti umani in questa direzione, e sono numerosi oggi i sostenitori del paranormale che ritengono che la quantistica, con le sue leggi contro intuitive, sia perfettamente in grado di spiegare, almeno in parte, lo strano fenomeno della coscienza, soprattutto per quanto attiene ai suoi poteri più sorprendenti, quali ad esempio l'interazione mente-materia e la visione a distanza.

Molti lettori conosceranno sicuramente il nome di Fritjof Capra, fisico mondialmente noto non tanto per la sua ricerca specifica nel campo della fisica, quanto per il suo primo saggio, "Il Tao della Fisica" (Adelphi), scritto nel lontano 1975<sup>5</sup>, in cui offre un'affascinante analogia tra la visione del mondo descritta dalle antiche filosofie religiose, come il *buddhismo mahāyāna*, il *taoismo* e lo *zen*, e la visione che emerge dalle scoperte della fisica moderna, in particolar modo la meccanica quantistica. In altre parole, due esperienze del mondo apparentemente opposte, quella ottenuta attraverso le pratiche meditative e le esperienze extrasensoriali, e quella derivante da un'indagine logico-razionale condotta con metodi matematici e sperimentali, ci avrebbero condotti a scoprire sostanzialmente la stessa realtà nascosta.

Come evidenziato dallo stesso Capra, un aspetto importante che spiegherebbe questo incontro tra visioni conseguite con approcci

---

<sup>5</sup> Testo che assieme al suo successivo titolo, "Il punto di svolta" (Feltrinelli), costituisce indubbiamente uno degli scritti fondatori della corrente "New Age".

così diversi, starebbe nel fatto che sia nella via del fisico che in quella del mistico (inteso qui come colui che indaga la dimensione spirituale mediante tecnologie interiori) le osservazioni avverrebbero in campi che sono inaccessibili ai sensi ordinari: per la fisica moderna si tratta essenzialmente della dimensione microscopica, mentre per il ricercatore spirituale si tratta della dimensione interiore, accessibile unicamente mediante stati non ordinari di coscienza.

D'altra parte, sebbene l'analogia offerta da Capra (e da numerosi altri ricercatori dalla visione olistica) sia sicuramente suggestiva, vi sono pure notevoli ed evidenti differenze tra questi due approcci e i mondi che le relative visioni circoscrivono. Per dirla in linguaggio matematico: non si tratta certo di un isomorfismo! Inoltre, bisogna fare molta attenzione a non cadere nella facile tentazione di strumentalizzare, sia in un senso che nell'altro, il contenuto di una visione per renderla più confacente all'altra.

Mi riferisco qui, in particolar modo, ad alcuni degli aspetti più seducenti e controversi della teoria quantistica, ritenuti da alcuni come la "prova scientifica" della capacità della mente umana di influenzare direttamente la materia-energia, dando così un fondamento scientifico ad alcuni tra i più suggestivi fenomeni paranormali, quali ad esempio la psicocinesi e la visione a distanza.

## **Effetto osservatore**

Tra questi aspetti c'è, ad esempio, il cosiddetto *effetto osservatore*, secondo il quale, in ultima analisi, sarebbe l'azione finale della coscienza osservatrice a determinare la realtà di ciò che osserviamo; un secondo esempio significativo è il misterioso fenomeno dell'*entanglement* (intricazione), in grado di conferire una perfetta coesione anche a sistemi (microscopici) separati da enormi distanze spaziali.

Consideriamo l'effetto osservatore. Per capire l'origine di questo fenomeno dobbiamo ricordarci che la teoria quantistica contempla sostanzialmente due tipi di evoluzione per i sistemi fisici. La prima è

descritta dalla famosa *equazione di Schrödinger*: si tratta di un'evoluzione perfettamente deterministica, denominata *processo U* da Roger Penrose<sup>6</sup>, e tale che, se si conosce lo stato di un sistema in un determinato istante, è possibile determinare con esattezza il suo stato in ogni istante successivo (ed è per questo che questo tipo di evoluzione viene definita *deterministica*).

Ai processi *U* bisogna però aggiungere i cosiddetti *processi R*, associati ai famosi *salto quantici*, durante i quali il sistema passa da uno stato a un altro stato, in modo del tutto discontinuo e imprevedibile<sup>7</sup>.

Questi due tipi di processi, *U* e *R*, corrispondono a contesti molto diversi e vengono descritti nella teoria da oggetti matematici del tutto differenti. I processi *U* hanno tipicamente luogo quando il sistema non viene in nessun modo disturbato da un'osservazione sperimentale, mentre i processi *R* si rivelano quando sul sistema viene effettuata una misura di una qualsivoglia grandezza fisica, obbligando quest'ultimo a scegliere, se così si può dire, uno specifico valore per quella grandezza, tra diverse alternative possibili.

In altre parole, secondo la meccanica quantistica, l'evoluzione di un sistema fisico microscopico sarebbe governata da un processo *U*, perfettamente deterministico, fintanto che nessuno si occupa del sistema, ma non appena uno sperimentatore umano decide di "dare un'occhiata", usando per questo un apposito strumento di misura, ecco che l'operazione produce un processo *R*, il cui esito è del tutto imprevedibile e può essere descritto unicamente in termini probabilistici.

Questa strana dicotomia presente nel mondo microscopico, tra processi *U*, perfettamente deterministici, e processi *R*, genuinamente indeterministici, sarebbe alla base di quel preconcetto, condiviso da

---

<sup>6</sup> Il processo viene così definito perché nel formalismo matematico della teoria è descritto da un "operatore di evoluzione" che ha la proprietà di essere un operatore *unitario*, solitamente rappresentato con la lettera "*U*."

<sup>7</sup> In questi processi, il vettore di stato (cioè l'oggetto matematico che descrive lo stato del sistema) si *riduce* (o *collassa*), da cui il nome di processo *R*.

alcuni ricercatori, secondo cui la coscienza sarebbe la vera responsabile dei processi  $R$ , ossia dei salti quantici.

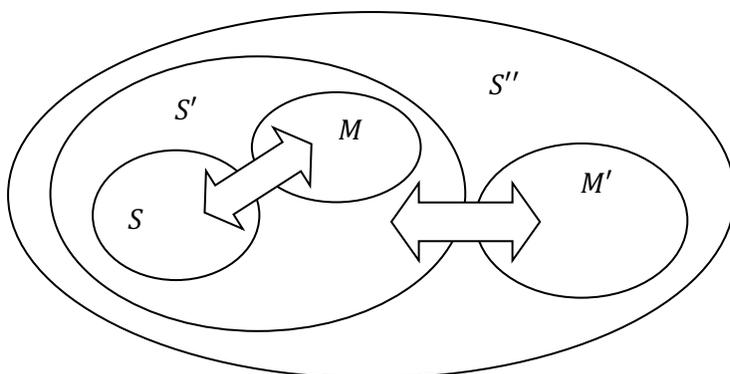
Per arrivare a questa strana conclusione bisogna ragionare come ragionò John von Neumann negli anni Trenta del secolo scorso. L'argomento di von Neumann è all'incirca il seguente<sup>8</sup>. Supponiamo che uno strumento di misura, che chiameremo  $M$ , sia responsabile del processo  $R$  attraverso il quale un dato sistema, che denomineremo  $S$ , viene portato ad attualizzare uno specifico valore per una non meglio specificata grandezza fisica, che è quella misurata da  $M$ . Ora, nell'ambito della teoria quantistica è sempre possibile scegliere di considerare un sistema fisico più grande (chiamiamolo  $S'$ ), che oltre a  $S$  racchiuderebbe in sé anche lo strumento di misura  $M$ , in interazione con  $S$  (vedi la Figura 1). Questo sistema più grande,  $S'$ , non sarebbe allora più soggetto ad alcun tipo di misura (avendo inglobato nella sua definizione anche lo strumento di misura  $M$ ), quindi la sua evoluzione complessiva sarebbe nuovamente governata da un processo deterministico  $U$ . Tuttavia, poiché l'evoluzione di tipo  $U$  è tale da mantenere un sistema in uno stato di *sovrapposizione* (non obbligandolo a "scegliere" un particolare valore per la grandezza fisica in questione), ciò significa che il sottosistema  $S$  di  $S'$  non potrà a sua volta avere attualizzato alcun valore specifico in relazione alla misura effettuata da  $M$ .

Otteniamo così una contraddizione rispetto all'ipotesi di partenza secondo cui lo strumento  $M$  sarebbe la causa del processo  $R$ . E, se proviamo a introdurre un nuovo strumento di misura  $M'$ , il cui compito sarebbe quello di effettuare una misura su  $S'$ , supponendo nuovamente che  $M'$  sia all'origine del processo  $R$  (cioè del salto quantico attraverso il quale  $S'$ , e conseguentemente anche  $S$ , assumerebbero una specifica configurazione), non risolveremmo proprio nulla, poiché di nuovo potremmo considerare un sistema più grande  $S''$ , che contenga sia  $S$  che  $M$  e  $M'$ , e ripetere l'argomento

---

<sup>8</sup> J. von Neumann, *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* (1932); 1996 edition, Beyer, R. T., trans., Princeton Univ. Press.

precedente, in una sorta di regressione infinita (vedi la Figura 1).



**Figura 1** Una rappresentazione simbolico del sistema  $S$  in interazione con lo strumento di misura  $M$ , che congiuntamente formano un sistema  $S'$  in interazione con uno strumento di misura  $M'$ , che congiuntamente formano un sistema  $S''$ .

In base a questo ragionamento, i processi  $R$  risulterebbero del tutto impossibili secondo la teoria e si verrebbe così a creare un vero e proprio paradosso, poiché nella realtà dei fatti i processi  $R$  vengono osservati in continuazione (sono infatti i processi  $R$  a costituire la base di tutti i fenomeni quantistici osservati in laboratorio).

Per risolvere il paradosso bisogna quindi cambiare qualcosa nella formulazione e/o interpretazione standard della teoria quantistica, oppure ipotizzare che uno strumento di misura non sia di per sé sufficiente a realizzare la misura di una grandezza fisica, cioè a promuovere un processo  $R$  tramite il quale un sistema sia in grado di manifestare uno specifico valore per una grandezza fisica, come ad esempio una specifica posizione spaziale nel caso di una particella microscopica.

Per uscire da questa impasse, l'ipotesi di von Neumann (poi ripresa negli anni Sessanta da Eugene Wigner, nel suo celebre paradosso detto dell'*amico di Wigner*) consiste allora nell'affermare che sarebbe la coscienza dello sperimentatore (un aspetto non-materiale della realtà, non sottoposto alla dicotomia dei processi  $U$  ed  $R$ , quindi fondamentalmente diverso sia dal sistema  $S$  sia dallo

strumento di misura  $M$ ) l'entità in grado di attivare, in ultima analisi, un processo  $R$  nel sistema.

In altre parole, il semplice “prendere conoscenza dell'esito dell'esperimento” da parte di una coscienza (o di una mente se preferite) sarebbe ciò che permetterebbe a un sistema di passare da un'evoluzione continua di tipo deterministico (processo  $U$ ), a un'evoluzione discontinua di tipo indeterministico (processo  $R$ ), ossia di effettuare un cosiddetto salto quantico e manifestare uno specifico valore per una grandezza fisica.

Naturalmente, per chi ritiene che la mente possa agire direttamente sulla materia, come dimostrerebbero i numerosi esperimenti di psicocinesi, questo tipo di spiegazione sembra offrire esattamente quello spiraglio tanto sperato per fondare una teoria dell'interazione mente-materia, cioè dell'interazione tra la dimensione cognitiva di tipo non-materiale e la dimensione energetico-materiale.

Inoltre, se è vero che la mente immateriale è in grado di influenzare direttamente la materia-energia, ecco che anche il problema fondamentale della connessione tra corpo e spirito potrebbe essere, se non altro in linea di principio, risolto dalla fisica quantistica. Ne conseguirebbe che l'esistenza dell'anima, cioè della capacità dell'individuo di sopravvivere alla morte del suo corpo fisico, come evidenziato dalle esperienze di premorte (NDE) e di extracorporeità (OBE), non sarebbe un'assurdità nemmeno per la scienza, in quanto la mente, secondo una certa interpretazione della meccanica quantistica, sarebbe realmente in grado di estendersi al di là dei confini materiali del cervello umano.

Per queste ragioni, non è raro trovare in numerosi libri di divulgazione, scritti da autori con un marcato orientamento verso le filosofie orientali, o di stampo New-Age, affermazioni come le seguenti<sup>9</sup>:

*Non vi parlo dal punto di vista di una pia illusione o di una vana*

---

<sup>9</sup> Citate a partire da: *The Secret*, di Rhonda Byrne (Macroedizioni).

*stravaganza, ma da quello di una comprensione di base più profonda. La fisica quantistica sta veramente cominciando a mettere in evidenza questa scoperta, affermando che non può esistere un Universo senza una mente che vi penetri, e che la mente plasma effettivamente ogni cosa che viene percepita [Fred Alan Wolf].*

O ancora:

*La meccanica quantistica lo conferma, e anche la cosmologia quantistica: l'universo nasce dal pensiero e tutta la materia da cui siamo circondati è semplicemente pensiero precipitato [John Hagelin].*

Affermazioni di questo genere potrebbero apparire giustificate alla luce del già menzionato ragionamento di von Neumann, che in qualche modo sembra avvalorare la tesi che per poter spiegare il comportamento dei sistemi microscopici sia strettamente necessario mettere in campo nella teoria fisica l'elemento della coscienza umana e la natura molto particolare della sua interazione coi sistemi fisici. Per dirla con le parole di Wigner<sup>10</sup>:

*È l'ingresso di un'impressione nella nostra coscienza ad alterare la funzione d'onda<sup>11</sup> [...] È a questo punto che la coscienza entra nella teoria inevitabilmente e irrimediabilmente [Eugene Wigner].*

Quello che però ci si dimentica di ricordare ai lettori è che, ad esempio, Wigner, inizialmente convinto che la coscienza fosse del tutto necessaria per spiegare il processo di misura in meccanica quantistica, cambiò completamente opinione alla fine della sua carriera. Si dimentica inoltre di ribadire che questo tipo di ipotesi è avvalorata unicamente da una ristrettissima minoranza di fisici, tra cui spicca la figura emblematica di Henry Stapp<sup>12</sup>. Infatti, sono

---

<sup>10</sup> Citata a partire da: A. Shimony, Role of the observer in quantum theory, *American Journal of Physics*, 31 (10), pp. 755-773 (1963).

<sup>11</sup> Cioè lo stato del sistema.

<sup>12</sup> Vedi ad esempio: H. P. Stapp, *Mindful Universe: Quantum Mechanics and the Participating Observer*, Springer (2007). Vedi anche: Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. & Veloz, T. (2019). From Quantum Axiomatics to Quantum

attualmente disponibili numerose alternative in grado di spiegare il processo di misura (ossia di osservazione) dei sistemi quantistici, senza dover per questo scomodare la coscienza umana. Tra queste spiegazioni, alcune sono più alla moda di altre, più o meno esotiche di altre, più o meno economiche dal punto di vista delle ipotesi e dei concetti, ma molte sicuramente risolvono, se non altro in parte, i problemi imbarazzanti che l'ipotesi della coscienza all'origine dei processi  $R$  introdurrebbe.

Infatti, se ogni osservatore cosciente fosse davvero all'origine di uno specifico processo  $R$ , come potrebbero i diversi osservatori trovarsi tutti sempre d'accordo sugli infiniti fenomeni materiali che osserviamo in continuazione nel mondo, o nei laboratori? Se due osservatori differenti osservano nel medesimo istante un medesimo sistema fisico, dal momento che ognuno sarebbe in grado di originare un diverso processo  $R$ , come potrebbero le loro osservazioni concordare? Certo, si potrebbe semplicemente ipotizzare che il processo  $R$  sia sempre attivato dalla coscienza dell'osservatore-partecipatore che per primo "getta lo sguardo" sul sistema in questione, ma è sempre possibile operare questo distinguo? È possibile, per esempio, quando due scienziati osservano in modo continuativo, contemporaneamente, il sistema da loro studiato?

In ogni caso, lasciando da parte questi imbarazzanti interrogativi, vi sarebbe in fin dei conti una ragione ben più seria per abbandonare questa ipotesi, evocata di recente da Shan Yu e Danko Nikolić<sup>13</sup>. Infatti, sottolineano questi autori, se è vero che non è possibile dimostrare la validità dell'ipotesi secondo cui la coscienza sarebbe all'origine dei processi  $R$  (dal momento che la scienza, come è noto, non è in grado di dimostrare la verità di alcuna ipotesi), sarebbe

---

Conceptuality. *Activitas Nervosa Superior: Brain, Mind and Cognition* 61, pp. 76–82 (special issue dedicated to Henry Stapp in honor of his 90th birthday).

<sup>13</sup> Shan Yu, Danko Nikolić (2011). Quantum mechanics needs no consciousness. *Annalen der Physik, Volume 523, Issue 11*, pp. 931-938. arXiv:1009.2404v2 [physics.gen-ph].

nondimeno possibile dimostrarne la falsità<sup>14</sup>, ossia la falsità dell'assunto

$$R \Rightarrow RC$$

secondo cui la manifestazione di un processo  $R$  implica necessariamente ( $\Rightarrow$ ) una rappresentazione cosciente ( $RC$ ) del fenomeno nella mente dello sperimentatore.

Ora, da un punto di vista logico, tale ipotesi è del tutto equivalente alla sua negazione ( $\neg$ ), che si ottiene invertendo i termini della relazione<sup>15</sup>:

$$\neg RC \Rightarrow \neg R$$

Questa versione, logicamente equivalente alla precedente ipotesi, afferma che la mancata rappresentazione cosciente del fenomeno nella mente dello sperimentatore ( $\neg RC$ ) implica necessariamente ( $\Rightarrow$ ) la non-manifestazione del processo  $R$  ( $\neg R$ ).

D'altra parte, molti dei risultati sperimentali già disponibili (ad esempio quelli dei cosiddetti "which-path experiments"), già indicano, se attentamente analizzati, che l'ipotesi " $\neg RC \Rightarrow \neg R$ " è di fatto falsa; pertanto, lo sarebbe anche l'ipotesi logicamente equivalente " $R \Rightarrow RC$ ." Da questo conseguirebbe che il presunto legame tra coscienza umana e processo  $R$  (cioè, il collasso della funzione d'onda) sarebbe di fatto in contraddizione con i dati sperimentali già in nostro possesso.

Aveva quindi ragione Einstein, quando obiettava, a giusto titolo,

---

<sup>14</sup> Gli assunti detti scientifici sono tali proprio per questo: non perché è possibile dimostrare la loro veridicità, ma perché è possibile, se non altro in linea di principio, dimostrare la loro falsità (cioè sono potenzialmente *falsificabili*).

<sup>15</sup> Facciamo un esempio: se  $A$  corrisponde alla proposizione "Wigner è un fisico" e  $B$  alla proposizione "Wigner conosce la fisica", abbiamo ovviamente che  $A \Rightarrow B$ , in quanto il fatto che Wigner sia un fisico implica necessariamente ( $\Rightarrow$ ) che egli conosca la fisica. D'altra parte, possiamo osservare che questa implicazione è del tutto equivalente alla sua negazione logica, che si ottiene negando le rispettive proposizioni e invertendo il senso dell'implicazione:  $\neg B \Rightarrow \neg A$ . Infatti, se "Wigner non conosce la fisica" ( $\neg B$ ), ciò implica necessariamente ( $\Rightarrow$ ) che "Wigner non è un fisico" ( $\neg A$ ).

che la luna continua a esistere anche quando nessuno la sta guardando. E questa, infatti, è anche l'opinione dominante della più parte dei fisici, che ritengono che non sia necessaria una misteriosa interazione tra la coscienza e la materia-energia per comprendere il processo di misura (cioè i processi  $R$ ) in fisica quantistica.

Naturalmente, come ribadivo poc'anzi, vi è una moltitudine di interpretazioni e di approcci differenti, tutti più o meno equivalenti sotto il profilo delle predizioni sperimentali, che spiegano e interpretano, ognuno a modo loro, l'effetto osservatore (ossia l'emergenza dei processi  $R$ ) e numerose altre questioni inerenti al comportamento piuttosto strano delle entità microfisiche.

A titolo di esempio, e solo per ricordare i nomi degli approcci più noti, oltre alla cosiddetta visione ortodossa o convenzionale della *scuola di Copenaghen* (inizialmente sviluppata da Niels Bohr e Werner Heisenberg) possiamo menzionare: l'*approccio dell'onda pilota* di Luis de Broglie, susseguentemente rielaborato da David Bohm; l'esotica *interpretazione a molti mondi*, ipotizzata da Hugh Everett III; la teoria della *decoerenza quantistica*, che evita del tutto il riferimento ai processi  $R$ , spiegando questi ultimi come approssimazioni di processi  $U$ , che si "disperderebbero" nell'ambiente circostante al sistema<sup>16</sup>.

Tra le altre interpretazioni che possiamo citare abbiamo: l'*interpretazione transazionale*, di John Cramer, che introduce l'esistenza di processi in grado di propagarsi a ritroso nel tempo; la *meccanica quantistica relazionale* di Carlo Rovelli; le *teorie del collasso oggettivo*, come quella sviluppata dai fisici italiani Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini e Tullio Weber, e molte altre ancora, più o

---

<sup>16</sup> In altre parole, secondo l'interpretazione della decoerenza, le sovrapposizioni continuerebbero ad esistere nel tempo, ma non sarebbero più misurabili in termini pratici. Questa interpretazione è indubbiamente tra le più condivise oggi tra i fisici, sebbene non sia molto soddisfacente sotto il profilo concettuale, a causa per l'appunto della mancanza dei processi  $R$ , in grado di ridurre le sovrapposizioni tra i possibili risultati della misura di una grandezza fisica. In altre parole, sposta il problema senza realmente risolverlo.

meno conosciute e/o alla moda.

In questo vasto paesaggio di interpretazioni e riformulazioni alternative della meccanica quantistica, si distinguono però anche alcuni approcci di natura più fondamentale, nel senso proprio di questo termine. Ossia, degli approcci i quali, prima ancora di rivolgersi alle specifiche del mondo microscopico, cercano di identificare e descrivere con esattezza quali siano le regole del gioco, quando un fisico studia (sia teoricamente che sperimentalmente) un qualsivoglia sistema fisico, sia esso macroscopico, microscopico o mesoscopico (ossia intermediario).

Ovviamente, ci troviamo qui alla frontiera tra scienza fisica e filosofia della conoscenza, un territorio concettualmente delicato, dove non tutti i ricercatori si sentono a proprio agio. Ma questo è probabilmente il territorio dove è oggi necessario inoltrarsi, se si desidera davvero penetrare alcuni dei misteri e delle stranezze della realtà del micromondo. Infatti, studiando i fondamenti delle teorie fisiche in senso lato, possiamo accorgerci che alcune delle presunte peculiarità del micromondo sono di fatto già presenti nella nostra interazione con le entità macroscopiche convenzionali; riusciremmo a rilevarle, se solo imparassimo a osservare il contenuto di queste interazioni con il dovuto discernimento.

Questo se non altro è quanto emerge dalle scoperte della *scuola di Geneva-Brussels sui fondamenti della fisica*, che ha avuto origine nei lavori pionieristici di Josef Maria Jauch e Constantin Piron, a Ginevra, in Svizzera, e che ha trovato piena maturazione nei lavori fondamentali di Diederik Aerts, e del suo gruppo di Brussels, in Belgio (autore di uno degli articoli contenuti in questo numero di *AutoRicerca*).

L'idea centrale e più feconda di questa scuola consiste nell'osservazione secondo cui il metodo adottato abitualmente, soprattutto in epoche recenti, dalla maggioranza dei fisici, che consiste nel derivare prima una struttura matematica formale e solo dopo domandarsi quale possa essere l'interpretazione fisica di quest'ultima, non è adatto se si vuole realmente elucidare le difficoltà

concettuali inerenti alla nostra descrizione del reale. Un metodo migliore consiste invece nell'identificare fin dal principio quelli che sono i concetti fisici rilevanti, definendoli e chiarendoli su una solida base operativa, e solo in seguito usarli per costruire una solida teoria scientifica della realtà, che potrà allora essere del tutto sensata e intelligibile.

Seguendo questo approccio più naturale, i ricercatori della scuola di Geneva-Brussels (e più particolarmente Diederik Aerts) sono riusciti negli anni a derivare un linguaggio concettuale e matematico molto efficace, denominato *visione creazione-scoperta* ("creation-discovery view", in inglese), in grado di descrivere propriamente le diverse entità che popolano la nostra realtà, con un notevole livello di generalità e universalità, giungendo così anche alla scoperta di strutture del tutto nuove, che si estendono oltre i limiti delle strutture classiche e quantistiche precedentemente note.

È stato in questo modo possibile elucidare molte delle stranezze e ambiguità concettuali presenti nelle diverse interpretazioni della fisica quantistica, sviluppando un approccio, a tutt'oggi ancora in fase di ampliamento<sup>17</sup>, con il quale diventa possibile descrivere entità sia fisiche che non-fisiche (come ad esempio gli enti culturali, i segni e i simboli, i concetti, le menti, eccetera).

Prima di entrare nel merito dei due articoli presentati in questo numero della rivista, che si inseriscono nel quadro di riferimento della scuola di Geneva-Brussels, riteniamo possa essere di aiuto per il lettore riassumere in modo semplice alcune tra le idee più significative della visione creazione-scoperta sviluppata da Aerts. Nel farlo, ci teniamo a rendere attento il lettore al fatto che questo linguaggio concettuale è ben più ricco e sottile di quello che si potrà evincere dal nostro breve riassunto.

---

<sup>17</sup> Rimandiamo il lettore agli articoli pubblicati sul numero 24 di *AutoRicerca*, e alle referenze ivi citate, per un aggiornamento [NDE].

## La visione creazione-scoperta

La visione creazione-scoperta (VCS) è stata ideata con lo scopo di integrare in un medesimo quadro concettuale coerente le nostre conoscenze teorico-sperimentali dei sistemi fisici, sia classici sia quantistici, dimostrando in questo modo la possibilità di enunciare una forma molto generale e articolata di *realismo*, in grado non solo di riconoscere la presenza delle cose “là fuori”, esistenti indipendentemente dai nostri atti di osservazione, ma anche il fatto che queste nostre osservazioni non sempre sono senza conseguenze e possono arrivare, in alcune circostanze, a creare letteralmente quelle stesse proprietà che si pensa semplicemente di osservare.

Infatti, nel nostro ruolo attivo di partecipanti della realtà, noi interagiamo in continuazione con le innumerevoli entità che la popolano, e queste interazioni costituiscono la base delle nostre *esperienze*, di cui le operazioni di misura eseguite nei laboratori di fisica sono solo casi particolari (essendo in questo caso il partecipatore formato dall’abbinamento tra scienziato e strumento di misura, in un’esperienza comune a entrambi e denominata *esperimento*).

Ora, nello stesso modo in cui il nostro linguaggio ordinario distingue tra *verbi* e *sostantivi*, nelle nostre esperienze (o esperimenti) possiamo distinguere tra un *aspetto creazione* e un *aspetto scoperta*. Gli aspetti scoperta descrivono quelle proprietà presenti nella realtà che sono attuali prima ancora dell’esperienza, mentre gli aspetti creazione corrispondono a tutte le nuove proprietà che vengono poste in essere durante l’attuazione della stessa, quale conseguenza dell’interazione del partecipatore con quegli elementi di realtà che partecipano all’esperienza.

Per fissare le idee, prendiamo in considerazione la semplice esperienza che consiste nel bere una tazza di tè in una sala da tè. Possiamo osservare che vi sono numerose entità che popolano la scena in cui si svolge una simile esperienza. C’è ovviamente la tazza di

tè, riempita di ottimo tè, ma c'è anche il tavolo, sul quale è posta la tazza, le sedie, l'aria che riempie il volume della sala, le altre persone attorno, con i loro pensieri e le loro emozioni, e così via. Tutti questi elementi esistono indipendentemente dal partecipatore. Aerts chiama tutti questi elementi *accadimenti* (happening), onde distinguerli dai più specifici *eventi* della teoria della relatività e sottolineare così il fatto che non necessariamente ogni accadimento avviene nello spazio (e/o nel tempo). È il caso, ad esempio, delle strane entità microscopiche quantistiche (come avremo modo di scoprire leggendo gli articoli di questo numero) oppure, nell'esempio in questione, dei pensieri e delle emozioni delle persone presenti nella sala da tè, che appartengono a spazi mentali ed emozionali di natura più astratta.

Dal punto di vista del partecipatore, tutti questi accadimenti accadono contemporaneamente nella sua realtà. E per il fatto stesso che accadono, ognuno di essi potrà essere selezionato per partecipare a una delle sue esperienze. Per definizione, un'esperienza vissuta dal partecipatore è la combinazione di uno dei suoi atti di creazione (di solito descritto da un verbo) con uno degli accadimenti disponibili (di solito descritto da un sostantivo).

Nel nostro esempio, l'aspetto creazione consiste semplicemente nell'azione del partecipatore di prendere la tazza di tè in mano e berne il contenuto; un'azione che è completamente sotto il suo controllo. D'altra parte, l'aspetto scoperta di questa esperienza corrisponde a quello specifico accadimento della sua realtà – denominato tazza di tè – che si concede alla sua creazione attraverso la sua azione di prenderlo in mano e bere una certa quantità del suo contenuto liquido. Il risultato dell'esperienza è la creazione di una nuova entità, che non esisteva in senso attuale (non era cioè ancora un accadimento) prima della sua esecuzione e potrà essere una “tazza di tè completamente vuota” o una “tazza di tè parzialmente vuota” a seconda della quantità di liquido che il partecipatore sarà in grado di assumere in una sorsata.

È importante osservare che, sebbene un numero imprecisato di

accadimenti possano accadere simultaneamente, solo uno alla volta potrà prendere parte all'esperienza del partecipatore, in quanto le esperienze possono essere vissute solo una alla volta, nel momento presente del partecipatore. Tuttavia, tutti gli accadimenti disponibili contribuiscono di fatto alla costruzione della realtà del partecipatore; questo perché avrebbero potuto tutti partecipare alla sua esperienza presente, se solo avesse scelto di agire in modo diverso nel suo passato.

Questo significa che ciò che solitamente chiamiamo realtà (e più precisamente la nostra realtà personale presente) è una costruzione su tutto ciò che è possibile, vale a dire sulle esperienze che avremmo potuto vivere, in sostituzione dell'attuale, se così avessimo deciso nel nostro passato. E questo significa anche che la nostra costruzione della realtà dipende essenzialmente da due fattori: (1) il nostro *potere personale* nell'attuare determinati atti di creazione e (2) la *disponibilità* degli innumerevoli accadimenti che potranno partecipare alle esperienze che abbiamo il potere di compiere.

Un altro aspetto degno di nota della VCS è quello della predicibilità o non predicibilità del risultato di un'esperienza, o esperimento. Per esempio, supponiamo che prima di bere la tazza di tè il partecipatore abbia già deciso di svuotare la tazza in un colpo solo. In tal caso, possiamo dire che il risultato dell'"esperimento-bevuta" sia completamente sotto il suo controllo, e si tradurrà con certezza nella creazione dell'entità denominata "tazza di tè completamente vuota." In alternativa, il partecipante avrebbe potuto decidere di portare unicamente la tazza vicino al naso e odorare il tè, al fine di acquisire conoscenza circa il suo aroma e la sua temperatura. In questo caso, l'entità "tazza piena" sarebbe rimasta immutata in seguito alla sua azione, che corrisponde pertanto a un processo di pura osservazione, nel corso del quale vengono raccolte informazioni sullo stato dell'entità in modo del tutto non invasivo, una situazione tipica degli esperimenti della fisica classica.

Tuttavia, la predicibilità non è necessariamente possibile quando il partecipatore non possiede un pieno controllo delle variabili che

intervengono nel corso della sua interazione con la tazza, cosicché l'esito non potrà essere in generale predeterminato. Per esempio, anche se il partecipatore è in grado di sapere tutto circa lo stato della tazza di tè (dimensioni, temperatura, volume del contenuto liquido, ecc.), se non avrà deciso in anticipo come l'interazione-bevuta dovrà essere esattamente condotta, automaticamente permetterà a un certo numero di fattori *contestuali* di influenzarne il processo, potendo dunque arrivare, come esito, a una "tazza di tè completamente vuota" o una "tazza di tè parzialmente vuota" o anche qualcos'altro (come una tazza di tè rotta).

Secondo la VCS, i sistemi quantistici sono tali proprio perché, quando sperimentiamo con questi sistemi nei cosiddetti processi di misura, non siamo in grado di controllare (in qualità di partecipanti) tutte le fluttuazioni presenti nell'interazione tra il sistema e l'apparato di misura, che andranno poi a determinare l'esito della stessa. Questa importante osservazione ha ricevuto piena giustificazione nel cosiddetto *approccio a misure nascoste* ("hidden measurement approach", in inglese), ideato dallo stesso Aerts, nel quale è possibile dimostrare che il comportamento tipico dei sistemi quantistici può essere riprodotto anche da entità macroscopiche convenzionali, sempreché nell'esecuzione degli esperimenti sia all'opera un meccanismo di selezione "nascosto" attraverso il quale uno specifico processo di misura deterministico (cioè una specifica interazione) viene scelto tra i diversi processi possibili, in modo non controllabile dallo sperimentatore, andando così a determinare uno tra gli esiti possibili (che è esattamente quello che avviene nei cosiddetti processi  $R$ , precedentemente evocati<sup>18</sup>).

---

<sup>18</sup> Il lettore attento potrebbe giustamente chiedersi: se è vero che l'*aspetto creazione*, inevitabilmente presente nel nostro modo di rapportarci e interagire con la realtà, non avrebbe nulla a che fare (se non altro nell'ambito dei processi fisici abitualmente osservati in laboratorio, escludendo qui gli eventuali fenomeni anomali relativi alla psicocinesi, la cui logica e meccanismo di azione sarebbero del tutto differenti) con la mente o coscienza dell'osservatore, essendo che i processi  $R$ , in ultima analisi, originerebbero unicamente nelle fluttuazioni presenti

Se un tale meccanismo di selezione non è sotto il controllo diretto dello sperimentatore-partecipatore, ciò risulterà nelle famose probabilità quantistiche, le quali, contrariamente alle probabilità di tipo classico (che obbediscono agli *assiomi di Kolmogorov*), non possono essere associate a una mancanza di conoscenza su ciò che è già esistente prima della misura (come lo stato e le proprietà del sistema in esame), ma a una mancanza di conoscenza di ciò che esattamente accade durante l'interazione tra il sistema e l'apparato di misura.

In altri termini, la distinzione tra probabilità classiche e probabilità quantistiche sarebbe unicamente una distinzione tra lo scoprire ciò che già è esistente e il creare ciò che ancora non è esistente, per mezzo di un esperimento (cioè di un processo di misurazione) la cui dinamica interna non può essere controllata (o interamente controllata) dallo sperimentatore.

Ovviamente, nella fattispecie del nostro esempio didattico, siamo

---

nell'interazione tra lo strumento di misura e il sistema misurato, come la mettiamo allora con l'argomento di von Neumann? Non cadiamo in questo caso nel summenzionato paradosso di una regressione infinita? La domanda è pertinente e la risposta, per essere tale, non può prescindere da una conoscenza approfondita e articolata della struttura assiomatica della meccanica quantistica. Infatti, l'argomento di von Neumann poggia sull'ipotesi implicita che la meccanica quantistica costituisca un modello completo e coerente della realtà del mondo fisico, e che quindi possa essere applicata in modo non contraddittorio a qualsiasi sistema fisico. Questa ipotesi è però difficilmente sostenibile. Già Einstein, a suo tempo, riteneva che vi fossero degli elementi di realtà che la teoria non era in grado di descrivere. La storia gli dette torto, nel senso che quegli specifici elementi di realtà a cui lui alludeva si rivelarono poi essere solo potenzialmente esistenti (e non attualmente esistenti), e in tal senso non potevano minacciare la completezza della teoria quantistica nella sua formulazione abituale. D'altra parte, in epoca più recente, e grazie alla profonda analisi logico-matematica iniziata da Constantin Piron e portata a termine da Diederik Aerts, è stato possibile stabilire che in effetti, come presagiva Einstein, la teoria quantistica standard è di fatto incompleta, sebbene non nel senso da lui ipotizzato (maggiori dettagli negli articoli presentati in questo numero). Pertanto, essendo la teoria standard incompleta, viene meno anche la pertinenza dell'argomento di von Neumann, che poggia implicitamente su tale assunto.

tutti d'accordo nel ritenere che solo la "tazza di tè piena" sia di fatto esistente prima dell'interazione promossa dal processo di bevuta, mentre la "tazza completamente vuota", o la "tazza parzialmente vuota", sono entità solo potenzialmente esistenti prima di tale interazione. Pertanto, a nessuno verrebbe in mente l'idea bizzarra di osservare (cioè, di misurare, testare, ecc.) la vacuità totale, o parziale, dell'entità "tazza di tè piena", in quanto per l'appunto, come dicevo, le entità "tazza completamente vuota" e "tazza parzialmente vuota" sono solo potenzialmente presenti e non attualmente presenti nel nostro spazio, prima dell'esperimento. In altri termini, non si tratta di accadimenti che appartengono alla realtà presente del partecipante, ma solo possibili accadimenti futuri appartenenti alla sua realtà futura, che potranno essere o meno creati nel corso del suo processo di bevuta.

Questa osservazione, apparentemente banale nel caso dell'esempio della tazza di tè, diventa del tutto cruciale quando andiamo a indagare i processi di misura quantistici. Infatti, come avrete modo di appurare attraverso la lettura dei due articoli di questo numero, quando ad esempio osserviamo (ossia misuriamo) la posizione spaziale di un'entità microscopica, ritenendola pertanto un elemento di realtà preesistente al processo di osservazione, ci troviamo di fatto nella stessa situazione in cui si troverebbe un folle che pretenderebbe di misurare il contenuto liquido di una tazza di tè vuota o il peso del nulla o il colore del buio. Questo perché, come si evincerà dall'analisi accurata presentata nel primo articolo di questo numero, è possibile mostrare che le entità microscopiche non appartengono, come invece solitamente si ritiene, al nostro spazio fisico ordinario, cioè allo *spazio euclideo tridimensionale*, ma a uno spazio non-ordinario, la cui caratterizzazione è tuttora in corso.

Quella della *non-spazialità* (sarebbe forse più accurato dire *meta-spazialità*, o *spazialità non-ordinaria*) delle entità quantistiche è uno di quegli aspetti "genuinamente strani" della meccanica quantistica, che richiede uno sforzo reale di immaginazione da parte

dello studioso per poter essere pienamente compreso. D'altra parte, come si evince dalla lettura del secondo articolo di questo numero<sup>19</sup>, è bene non sottovalutare il potenziale dell'immaginazione umana, soprattutto quando l'individuo è in grado di divenire consapevole di ciò che Aerts definisce "ipotesi aggiuntive adottate inconsciamente", ossia i pregiudizi inconsci che coltiviamo a proposito di come, secondo noi, il mondo dovrebbe essere, sebbene non necessariamente sia. Altresì, ci ricorda sempre Aerts nel suo articolo, è bene non sottovalutare il grado di complessità già presente nella realtà macroscopica (solo apparentemente ordinaria) in cui siamo immersi, la cui ricchezza concettuale va ben oltre quello che siamo solitamente portati a credere.

Partendo da questo genere di considerazioni, Aerts ci conduce per mano nel suo articolo, portandoci a scoprire quale sia la componente umana che, a nostra insaputa, determina parte dei nostri preconcetti. Si tratta di una componente legata al nostro posto specifico nel mondo e alla possibilità di sfruttare l'indagine del micromondo per ampliare i nostri orizzonti concettuali.

Buona parte dell'indagine che Aerts presenta nel suo articolo si fonda sull'analisi dell'*entanglement* quantistico, un effetto che è al centro delle attuali ricerche dei fisici quantistici. L'*entanglement* (intrecciamento, ingarbugliamento, irretimento, intricazione) è un altro di quegli aspetti genuinamente strani della realtà su cui la meccanica quantistica ci confronta. Grosso modo, l'*entanglement* si manifesta quando due entità microscopiche, entrando in interazione, rimangono tra loro profondamente "intrecciate", tanto

---

<sup>19</sup> Si noti che l'articolo di Aerts è la traduzione di un lavoro pubblicato quasi 35 anni fa. L'articolo di Sassoli de Bianchi, che si fonda sulle teorie di Aerts, è invece la traduzione di un lavoro di più recente pubblicazione. Nondimeno, per questioni didattiche, si è scelto di presentare per primo l'articolo di Sassoli de Bianchi, in quanto alcuni dei suoi contenuti potrebbero aiutare il lettore a penetrare più facilmente la sottile analisi concettuale in seguito presentata da Aerts. Per aggiornamenti più recenti dei lavori di questi due autori si rimanda al numero 24 di AutoRicerca [NdE].

da non consentire più di distinguere un'entità dall'altra. La particolarità di questo effetto è che l'intrecciamento persiste anche quando tra le due entità viene posta una distanza spaziale anche astronomica.

Il fenomeno dell'entanglement era già noto sin dagli albori della meccanica quantistica. Più precisamente, si sapeva che, se due entità quantistiche rimanevano intrecciate (cioè entangled), se si agiva su una di esse, la cosa si sarebbe ripercossa istantaneamente sull'altra, anche se le due entità erano separate da anni luce di distanza. In altre parole, la teoria prediceva (e predice) la possibilità di curiose "azioni fantasma a distanza", apparentemente incomprensibili secondo il nostro modo di intendere le entità dell'universo macroscopico.

Questa stranezza quantistica, che predice l'esistenza di sistemi microscopici che pur essendo separati da distanze spaziali arbitrarie possono nondimeno rimanere in comunicazione diretta e istantanea tra loro, sembrava sfidare ogni forma di buon senso circa la natura della realtà fisica, così come fu evidenziato da Einstein (e collaboratori) nel suo celebre articolo del 1935, in cui il celebre scienziato enunciò quello che oggi è noto con il nome di "paradosso EPR", dalle iniziali dei suoi tre autori<sup>20</sup>.

La questione dell'entanglement, e più particolarmente delle correlazioni a distanza tra i sistemi "intrecciati", fu però considerata dai contemporanei di Einstein una questione piuttosto marginale, alla frontiera tra fisica e metafisica, in quanto si riteneva che nessun esperimento sarebbe mai stato in grado di testare un effetto così esotico. Tuttavia, questo non teneva conto del genio di John Bell, che negli anni Sessanta decise di riconsiderare l'intera controversia delle "azioni fantasma a distanza" (dette anche azioni *non-locali*). Queste ultime, secondo la teoria quantistica, avrebbero permesso ai sistemi "intrecciati" di separarsi di colpo, producendo delle improbabili correlazioni istantanee.

---

<sup>20</sup> A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, "Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?", *Phys. Rev.*, 47, pp. 777-780 (1935).

Nel suo sforzo di chiarificazione, Bell riuscì nell'intento di riportare il dibattito dalla filosofia alla fisica. Partendo da un'ipotesi di *località*, del tutto naturale e intuitiva per gli oggetti materiali macroscopici, Bell riuscì nella prodezza di derivare delle particolari *diseguaglianze matematiche*, cioè delle relazioni tra determinate grandezze fisiche che dovevano necessariamente essere verificate se l'ipotesi di località era corretta.

Mostrò poi che la teoria quantistica violava in modo flagrante queste disequaglianze, e che perciò la descrizione quantistica della realtà era del tutto incompatibile con la sopra menzionata ipotesi di località. Tuttavia, l'aspetto più notevole del risultato di Bell era che le sue disequaglianze erano perfettamente testabili sotto il profilo sperimentale. E questo significava che, grazie a Bell, risultava per la prima volta possibile trasformare l'esperimento di pensiero (*gedankenexperimente*) di Einstein (detto esperimento EPR) in un test concretamente realizzabile.

Fu però necessario aspettare i primi anni Ottanta perché questo accadesse. In quel momento, infatti, Alain Aspect condusse con alcuni suoi collaboratori degli esperimenti su coppie di fotoni intrecciati, il cui scopo era, per l'appunto, quello di testare le disequaglianze di Bell. Senza entrare qui nel dettaglio di questi straordinari esperimenti, che richiesero la padronanza di tecniche e tecnologie davvero complesse, ricordiamo soltanto che dopo i primi test realizzati dall'equipe di Aspect, a Orsay, ne seguirono numerosi altri, sempre più sofisticati, dove le coppie di fotoni vennero separate da distanze di addirittura svariati chilometri. Tutti questi esperimenti hanno immancabilmente e abbondantemente dimostrato che gli enti microscopici in stati di entanglement violano in modo flagrante le disequaglianze di Bell, quindi l'ipotesi di località.

Nel suo articolo, Aerts analizza il contenuto contro intuitivo di questo sorprendente risultato teorico-sperimentale alla luce del non meno sorprendente concetto di *non-spazialità*, evidenziando alcuni tra i più profondi pregiudizi che sono alla base della nostra

costruzione della realtà, aiutandoci così a sollevare un piccolo lembo del grande velo di *Maya*<sup>21</sup>.

Buona lettura, buono studio e, soprattutto, buona meditazione!

Massimiliano Sassoli de Bianchi

---

<sup>21</sup> Termine sanscrito con cui si indica, in diverse dottrine filosofiche indiane, il concetto di “creazione”, e più esattamente l’illusione promossa dalla sua manifestazione fenomenica.

AUTO R I C E R C A

# Proprietà effimere e l'illusione delle particelle microscopiche

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Numero 2

Anno 2011

Pagine 39-76

 LAB

## Riassunto

Fondando la nostra analisi sull'approccio alla meccanica quantistica della scuola di Geneva-Brussels, ci lasceremo guidare da alcuni esempi di oggetti macroscopici convenzionali, al fine di chiarire il contenuto di due importanti risultati dell'inizio del ventesimo secolo: il criterio di realtà di Einstein-Podolsky-Rosen e il principio di indeterminazione di Heisenberg. Combinando questi due risultati, mostreremo che la credenza diffusa nell'esistenza delle particelle microscopiche è solo il risultato di un'illusione cognitiva, in quanto le particelle microscopiche non sono particelle, bensì la manifestazione spaziale e locale, di natura effimera, di entità non-spaziali e non-locali.

## 1 Introduzione

La maggior parte dei fisici, siano essi teorici o sperimentali, ricercatori o insegnanti, crede ancora che i componenti di base della nostra realtà fisica siano le cosiddette particelle elementari (quark, leptoni e bosoni di gauge). Si tratta però di una falsa credenza, basata su un pregiudizio macroscopico circa la realtà microscopica, dal momento che sin dagli albori della meccanica quantistica vi sono state forti evidenze a dimostrazione del fatto che: *le particelle microscopiche non esistono*.

Numerosi autori hanno evidenziato, col passare degli anni, l'erroneità della visione corpuscolare e l'inevitabile confusione concettuale che un'ontologia particellare è in grado di produrre. Un esempio degno di nota è il premio Nobel Steven Weinberg, secondo cui i campi quantistici formano la nostra "realtà essenziale" e le particelle si riducono a dei meri epifenomeni [Wei, 1983]. Questa sua affermazione viene spesso citata. Tuttavia, malgrado tutti questi sforzi didattici, dobbiamo riconoscere che, da un punto di vista concettuale, la mitologia particellare a tutt'oggi persiste.

Scopo principale del presente articolo è quello di contribuire a questo sforzo continuativo, di lunga data, volto a una rieducazione della "concezione del mondo" (*weltanschauung*) di fisici e filosofi della scienza, presentando quello che riteniamo essere un argomento chiaro a favore di un'ontologia non-particellare.

A tal fine, nella Sezione 2 cominceremo col precisare cosa intendiamo esattamente con i concetti di "microscopico" e "particella". Successivamente, nella Sezione 3, considereremo la nozione di "elemento di realtà", così come inizialmente introdotta da Einstein, Podolsky e Rosen nel loro celebre articolo del 1935 [EIN, 1935]; nozione che ci permetterà di elucidare il contenuto di un più completo *criterio di esistenza* (CE), introdotto da Constantin Piron [PIR, 1976, 1978, 1990], quale ingrediente chiave del cosiddetto

approccio (realistico) di Geneva-Brussels alla meccanica quantistica. Nella Sezione 4, ricorderemo quale sia il contenuto concettuale del principio di indeterminazione di Heisenberg (PIH) e la sua relazione con l'importante nozione d'*incompatibilità sperimentale*, sfruttando a tal fine il celebre esempio di Aerts di un'entità di legno macroscopica [AER, 1982]. Quindi, combinando il PIH con il CE, nella Sezione 5 dimostreremo l'inesistenza delle particelle microscopiche, quale conseguenza diretta della loro *manca di spazialità*.

Vogliamo sottolineare sin dal principio che gli argomenti che presenteremo in questo lavoro non sono di per sé nuovi, essendo già stati considerati da Diederik Aerts, in diversi modi, in numerosi articoli fondamentali, dove l'importante nozione di *non-spazialità* delle entità quantistiche è stata ampiamente indagata [AER, 1990, 1998, 1999]. Tuttavia, la nostra presentazione sarà più specifica nel considerare la conseguenza della non-spazialità per quanto attiene alla validità della nozione (ancora oggi) diffusa di “particella microscopica”.

Inoltre, il nostro obiettivo è anche quello di illustrare ulteriormente (e quindi spiegare) i motivi della riscontrata non-spazialità delle entità quantistiche, introducendo a tal fine la nozione di *effimerità* di una proprietà quantistica. Faremo questo seguendo la tradizione di Aerts che consiste nell'inventare esempi creativi di oggetti macroscopici convenzionali che presentino un comportamento non-classico e per i quali il grande mistero quantistico, in un certo senso, sarebbe interamente sotto i nostri occhi.

Più esattamente, nella Sezione 6 presenteremo quello che riteniamo essere il primo modello di un'entità macroscopica (un semplice spaghetti italiano crudo!) in grado di esibire delle proprietà sia non-classiche che non-compatibili. Grazie a questo esempio, che completa la già ricca collezione di modelli macroscopici ideati da Aerts, potremo meglio comprendere la relazione tra il carattere effimero di certe proprietà quantistiche e la loro osservata non-spazialità.

Nella Sezione 7, proseguiremo nel nostro sforzo didattico analizzando l'esperimento EPR ed evidenziando un altro attributo fondamentale di cui le presunte particelle microscopiche notoriamente difettano: l'individualità.

Quindi, nella Sezione 8, volgeremo brevemente la nostra attenzione al concetto altrettanto fuorviante di *campo quantistico*, per poi presentare un simbolico "mea culpa". Infine, nella Sezione 9, offriremo alcune osservazioni conclusive.

## 2 Particelle microscopiche

Un'entità è detta *microscopica*, nel senso inteso in questo articolo, se il principio di indeterminazione di Heisenberg (PIH) si applica alla descrizione delle sue osservabili cinematiche, come la posizione e la quantità di moto.

Per quanto riguarda il concetto di *particella*, possiamo osservare che vi sono essenzialmente due significati che sono ad esso associati. Il significato originale, etimologico, è che una particella sia una *piccola parte* di un sistema composito più grande, ossia un piccolo sottosistema. Il secondo significato, più generale e attualmente più comune, è che una particella sia semplicemente un *piccolo sistema fisico localizzato*, un corpuscolo, un piccolo oggetto, che non ha necessariamente bisogno di appartenere a un sistema composito più grande. E questo sarà anche il significato che adotteremo qui di seguito.

Indubbiamente, diverse *proprietà* possono essere associate al concetto di particella, o corpuscolo. Tuttavia, per il nostro scopo sarà sufficiente concentrarsi su una delle più fondamentali: la *spazialità*. Se un'entità fisica è una particella, allora, in ogni momento, dovrà possedere una specifica localizzazione nello spazio, caratterizzabile da una posizione (ad esempio del suo centro di massa), relativa a un dato sistema di coordinate. In altre parole, dovrà esistere da qualche parte nel nostro *spazio fisico euclideo tridimensionale*.

### 3 Criterio di esistenza

Infine, definiamo il concetto di *realtà* o, in modo equivalente, di *esistenza*, poiché nell'accezione comune di questi due termini una cosa è ritenuta reale se e solo se esiste. Ciò di cui abbiamo bisogno è un criterio da poter usare per discriminare tra ciò che esiste (e perciò è parte della realtà) e ciò che non esiste (e perciò è solo potenzialmente, ma non attualmente, parte della realtà).

Tale criterio venne fornito da Einstein e dai suoi due collaboratori, Podolsky e Rosen (che abbrevieremo in “EPR” nel seguito), nel loro famoso articolo del 1935, in cui enunciarono il seguente criterio di realtà (l'enfasi è nostra) [EIN, 1935]:

“Se, senza disturbare in nessun modo un sistema, possiamo *predire con certezza* [...] il valore di una grandezza fisica, allora *esiste un elemento di realtà* fisica corrispondente a questa quantità fisica”.

Quello che il gruppo EPR riconobbe chiaramente è che la nostra descrizione della realtà si basa sull'affidabilità delle nostre predizioni su di essa. Tuttavia, rimasero piuttosto prudenti circa il loro criterio, poiché scrissero anche [EIN, 1935]:

“Ci sembra che questo criterio, sebbene sia lontano dall'esaurire tutti i modi possibili per riconoscere una realtà fisica, ci fornisca almeno uno di questi modi, quando le condizioni poste in esso si verificano. Considerato non come condizione necessaria di realtà, ma soltanto come condizione sufficiente, questo criterio è in accordo con le idee di realtà sia della meccanica classica che della meccanica quantistica”.

Nonostante l'avvertimento che diede, il gruppo EPR non fornì un solo contro esempio della possibile natura di un elemento di realtà fisica non soggetto al loro criterio. In altri termini, pur supponendo, molto prudentemente, che il loro criterio fosse solo sufficiente, non presentarono nessun argomento che spiegasse perché esso non potesse essere considerato anche necessario.

Un aspetto importante da evidenziare è che, quando il team EPR scrive: “se [...] possiamo predire con certezza”, quello che bisogna di fatto intendere è: “se possiamo, *in linea di principio*, predire con certezza”. Infatti, l’aspetto cruciale non consiste nel verificare se si possiedono in pratica tutte le informazioni pertinenti che consentono di fare una previsione affidabile, ma se queste informazioni siano disponibili da qualche parte nell’universo (anche se magari disperse chissà dove), di modo che un essere di sufficiente potere e intelligenza possa *in linea di principio* avervi accesso.

Nel suo articolo, il gruppo EPR non menziona esplicitamente questo punto delicato, e il qui presente autore non è a conoscenza se vi siano state discussioni di Einstein e collaboratori, dopo il loro articolo del 1935, in cui tale questione di “principio” (che è al centro del rapporto tra il punto di vista *ontico* ed *epistemico*, nella nostra descrizione della realtà) sia stata menzionata e delucidata. Ciò che è certo è che l’argomento è stato successivamente riconsiderato da Constantin Piron, il quale ha abilmente incorporato queste idee nella sua elaborazione delle nozioni chiave di *proprietà attuale* e *test veridico* [PIR, 1976, 1978, 1990].

Vi è infatti un approccio assai avanzato ai fondamenti della meccanica quantistica, generalmente noto come l’approccio di Geneva-Brussels (che conta tra i suoi fondatori J. M. Jauch, C. Piron, D. Aerts e altri ancora; vedi ad esempio [PIR, 1976, 1978, 1990], [AER, 1982, 1984, 1990, 1992a, 1998, 1999], [CHR, 2002] e i riferimenti ivi citati), dove la nozione di elemento di realtà introdotta da Einstein, Podolsky e Rosen è stata successivamente analizzata in maniera molto dettagliata e articolata. Questo è stato fatto anche con lo scopo di proporre un *criterio di esistenza* (CE) molto specifico e completo, che è il seguente:

**Definizione** (criterio di esistenza). *Se, senza disturbare in nessun modo l’entità fisica considerata, è in principio possibile predire con certezza l’esito di un determinato test sperimentale, allora la proprietà associata a tale test è una proprietà attuale (esistente) dell’entità.*

*Viceversa, se la proprietà di un'entità fisica è attuale, allora, senza in nessun modo disturbarla, è in linea di principio possibile predire con certezza l'esito di uno dei test sperimentali ad essa associati.*

Secondo questo criterio di esistenza (CE), una proprietà è attuale *se e solo se*, si decidesse di eseguire uno tra i test equivalenti che la definiscono, il risultato atteso sarebbe *certo in anticipo*. Questo significa che l'entità *possiede* la proprietà in questione prima ancora che si effettui il test, e di fatto prima ancora che si scelga di eseguirlo. E questa è la ragione per la quale si è autorizzati ad affermare che tale proprietà è un elemento di realtà che esiste indipendentemente dalla nostra osservazione.

D'altra parte, se non possiamo applicare il CE, se, cioè, non possiamo, *nemmeno in linea di principio*, predire l'esito del test che definisce la proprietà in questione, allora dobbiamo concludere che l'entità considerata non possiede tale proprietà, ossia che non si tratta di una proprietà *attuale* (esistente).

Questa conclusione è corretta solo se la predizione non può essere fatta *nemmeno in linea di principio*. Infatti, nella maggior parte delle situazioni sperimentali semplicemente non possediamo una conoscenza completa dell'entità e, pertanto, non abbiamo accesso a tutte le sue proprietà attuali. Quando invece possediamo una *conoscenza completa* dell'entità, allora, per definizione, siamo in grado di predire con certezza tutto quanto c'è di prevedibile a suo riguardo e, di conseguenza, ciò che non può essere predetto è per definizione un aspetto non-esistente (*potenziale*, increato) della realtà.

Per dirla con altre parole, avere una conoscenza completa di un'entità significa avere una piena conoscenza del suo *stato*, il quale rappresenta ciò che l'entità è, la sua *realtà*, in un dato momento, definito dall'insieme di tutte le sue proprietà attuali; vedi, in proposito, i succitati articoli di Piron e Aerts, e l'interessante analisi concettuale in [SME, 2005].

## 4 Incompatibilità

Avendo chiarito il contenuto dei tre concetti menzionati nell'introduzione, ai fini del nostro ragionamento dobbiamo rivolgerci ora all'ultimo ingrediente: il principio di indeterminazione di Heisenberg (PIH). Questo principio (che in realtà non è tale) esprime il fatto che su un'entità quantistica non sia possibile estrarre simultaneamente informazioni su due osservabili che non commutano (come, ad esempio, la posizione e la quantità di moto); la non-commutabilità degli operatori che rappresentano le osservabili corrisponde alla controparte matematica dell'incompatibilità delle rispettive procedure sperimentali impiegate per definirle e misurarle.

Il PIH pone un problema interpretativo fondamentale: se due osservabili associate a un'entità quantistica sono mutualmente incompatibili, quindi legate da una relazione di indeterminazione, sta questo a significare che l'entità in questione non può *possedere congiuntamente* dei valori specifici relativi a queste due osservabili o indica solo che lo sperimentatore non è in grado di accedere contemporaneamente a tali valori, a causa dell'incompatibilità delle corrispondenti procedure sperimentali? In altre parole, è il PIH un'asserzione sulla *non-esistenza* di determinate osservabili non-commutanti, e delle corrispondenti proprietà, oppure è solo un'asserzione sulle limitazioni insite nella loro misura congiunta, indipendentemente dalla loro esistenza?

Per chiarire il reale contenuto di interrogativi fondamentali di questo genere, la nozione di compatibilità è stata analizzata in profondità da Diederik Aerts, nell'ambito dell'approccio di Geneva-Brussels. In particolare, Aerts ha introdotto l'analisi di un sistema macroscopico molto semplice – un piccolo pezzo di legno – per il quale tutti i misteri dell'incompatibilità sperimentale sono sotto i nostri occhi [AER, 1982]. Consideriamolo ancora una volta.

Un piccolo pezzo di legno è un'entità fisica che possiede un certo numero di proprietà, come ad esempio quella di “bruciare bene” e di “galleggiare sull'acqua”. Per osservare la proprietà “bruciare bene”, dobbiamo dare fuoco al pezzetto di legno, mentre per osservare la proprietà “galleggiare sull'acqua”, dobbiamo immergerlo nell'acqua. Tuttavia, questi due test sperimentali sono chiaramente incompatibili tra loro, in quanto un pezzetto di legno bagnato non brucerà più bene e un pezzetto di legno bruciato, in generale, non galleggerà. In altri termini, non possiamo osservare congiuntamente le proprietà “bruciare bene” e “galleggiare sull'acqua” del pezzetto di legno.

Tuttavia, indipendentemente dalla loro incompatibilità sperimentale, il pezzetto di legno, di fatto, possiede congiuntamente, in attualità, entrambe le proprietà, come si evidenzia dal fatto che possiamo predire in anticipo, con certezza, che qualunque sia il test che scegliamo di eseguire (quello della galleggiabilità o quello della bruciabilità), l'esito sarà un “sì” (questo è in essenza ciò che tecnicamente parlando viene definito un *test prodotto* [PIR, 1990], [AER, 1982]).

Se usiamo l'entità pezzetto di legno come esempio paradigmatico di incompatibilità sperimentale, potremmo essere tentati di concludere che nulla impedisca a un'entità quantistica di possedere congiuntamente dei valori ben definiti associati a osservabili incompatibili, in quanto una cosa è possedere simultaneamente due proprietà (come una specifica posizione e quantità di moto) e un'altra è essere in grado di accedere sperimentalmente al loro rispettivo valore. Come vedremo, questa conclusione è nondimeno errata nel caso delle osservabili quantistiche.

## 5 Non-spazialità

Una *particella microscopica*, come abbiamo detto, è un'entità fisica che possiede almeno l'attributo della spazialità e le cui osservabili cinematiche sono soggette al PIH. Quello che ci accingiamo a mostrare è che tale definizione è di fatto vuota, in quanto nessuna

entità di questo genere può esistere (cioè, essere reale).

Come precisato nell'introduzione, la nozione di non-spazialità in relazione alle entità quantistiche è già stata studiata da Aerts in numerose pubblicazioni [AER, 1990, 1998, 1999] e non pretendiamo certo di essere qui particolarmente innovativi in questa nostra discussione, che è solo un'altra maniera di presentare un argomento noto, in un modo che speriamo sia concettualmente chiaro e preciso.

La spazialità è l'attributo di un'entità di "essere sempre presente da qualche parte nello spazio fisico euclideo tridimensionale, nel corso della sua esistenza". Ciò che importa qui non è se conosciamo, in termini pratici, i luoghi dove un'entità-particella attualmente si trova e/o si troverà, ma se possiamo conoscere in linea di principio le sue posizioni, supponendo di possedere una *conoscenza completa del suo stato*.

Cominciamo con il considerare il caso di una *particella macroscopica* che, senza alcun dubbio, possiede l'attributo della spazialità. Non essendo soggetta al PIH, possiamo facilmente misurare la sua posizione in un dato istante e, simultaneamente, la sua quantità di moto; e una volta conosciuti i loro valori in un determinato istante, possiamo risolvere le equazioni del moto di Newton e usare le soluzioni, la cui esistenza può essere matematicamente dimostrata, per predire con certezza, senza disturbare la particella, ogni sua futura posizione.

Sulla base della certezza di queste nostre predizioni, possiamo concludere, grazie al CE, che in ogni momento la particella macroscopica si trova da qualche parte nello spazio, ossia che essa esiste nello spazio.

Se invece di un corpo macroscopico consideriamo un (ipotetico) corpuscolo microscopico, quello che cambia è che ora il PIH si applica, di modo che, quando misuriamo la localizzazione spaziale del corpuscolo, distruggiamo la possibilità di conoscere il valore della sua quantità di moto, e viceversa. Tuttavia, sulla base del nostro pregiudizio macroscopico, potremmo nondimeno aderire all'idea

che le particelle macroscopiche possiedano *in atto* sia una posizione sia una quantità di moto, ma che, a causa dell'inevitabile disturbo indotto dalle nostre misure, semplicemente non possiamo scoprirne in senso pratico i valori simultanei (così come non possiamo osservare simultaneamente le proprietà “bruciare bene” e “galleggiare sull'acqua” dell'entità macroscopica fatta di legno, nonostante il fatto che tali proprietà esistano indubbiamente in modo congiunto). Questa credenza è tuttavia del tutto inconsistente, come dimostra la seguente proposizione.

**Proposizione** (non-spazialità). *Sia  $S$  un'entità fisica le cui osservabili cinematiche obbediscono al PIH. Se il CE è valido, allora  $S$  è non-spaziale.*

**Dimostrazione.** Pur disponendo di una conoscenza completa dello stato di  $S$ , il PIH ci impedisce di determinarne simultaneamente la posizione e la quantità di moto. Pertanto, non possiamo utilizzare le equazioni di Lagrange o di Hamilton per determinare il modo in cui varierà la posizione di  $S$  nel tempo e predire con certezza le sue future localizzazioni, nemmeno in linea di principio. Usando il CE, possiamo allora concludere che  $S$  non possiede in modo attuale la proprietà di essere da qualche parte nello spazio fisico, di modo che, qualunque cosa  $S$  sia, si tratta di un'entità *non-spaziale*.

Segue immediatamente da questo risultato che *le particelle microscopiche non esistono*, poiché per poter essere *particelle* le entità microscopiche dovrebbero essere presenti nel nostro spazio tridimensionale. Ma poiché non lo sono, la loro natura corpuscolare è unicamente il frutto di un'illusione cognitiva.

Per amor di chiarezza, desideriamo osservare che tale conclusione è obbligatoria solo se si concorda che il CE delinea correttamente il limite tra esistenza e non-esistenza. D'altra parte, l'adozione di un criterio alternativo, che affermi ad esempio l'esistenza a priori di entità corpuscolari microscopiche, indipendentemente dalla nostra capacità di predirne, almeno in linea di principio, le posizioni

spaziali, sarebbe una scelta di natura chiaramente metafisica, che andrebbe oltre lo stretto ambito della ricerca scientifica.

Questa è la posizione assunta dalla teoria di de Broglie-Bohm, in cui si ipotizza l'esistenza *ad hoc* di particelle microscopiche con localizzazioni ben definite nello spazio euclideo tridimensionale, indipendentemente dalla nostra possibilità di predire, fosse anche solo in linea di principio, le loro posizioni attuali; questo, in virtù della presenza di un ipotetico campo causale, la cui esistenza deve anch'essa essere postulata *ad hoc*. Tale campo si manifesterebbe a un livello sub-quantico della realtà e le sue fluttuazioni casuali, una volta integrate nel tempo, sarebbero all'origine della funzione d'onda quantistica ordinaria.

Non commenteremo oltre, in questa sede, l'ontologia particellare di stampo metafisico della teoria di de Broglie-Bohm, che, come è noto, presenta seri problemi interpretativi quando si cerca di descrivere più di una singola entità quantistica (si veda ad esempio la discussione in [AER, 1998]).

## 6 Proprietà effimere

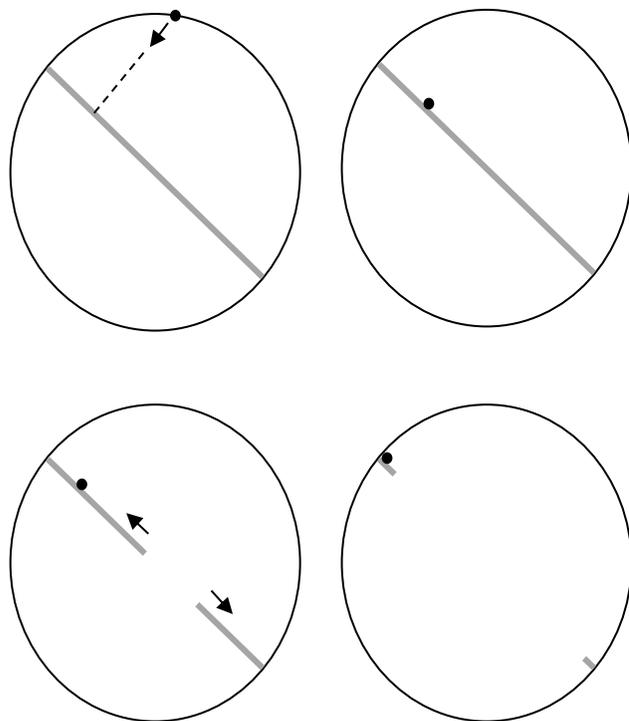
Aerts e i suoi collaboratori hanno introdotto un approccio definito *approccio a misure nascoste* (“hidden measurement approach”, in inglese) [AER, 1992b, 1998, 1999], dove la *non-esistenza* della posizione e di altre osservabili di un'entità quantistica, a dispetto della nostra completa conoscenza del suo stato, viene spiegata introducendo l'ipotesi che queste quantità siano letteralmente *create* da quegli stessi esperimenti che usiamo per definirle in modo operativo, e quindi misurarle. Il termine “misure nascoste” si riferisce qui al fatto che le “interazioni” che provocano questo processo di creazione rimangono nascoste nel caso delle osservabili quantistiche, nel senso che misure macroscopicamente indistinguibili possono di fatto essere microscopicamente differenti (a causa degli effetti di queste “interazioni di misura” nascoste), il che spiegherebbe anche la presenza di una probabilità di natura irriducibile.

Un ruolo importante nell'analisi di Aerts sull'*aspetto creazione* di una misura quantistica è stato svolto dalla sua notevole *macchina-quantistica* (quantum machine), un modello macroscopico di tipo meccanico la cui descrizione è del tutto isomorfa a quella dello spin di una "particella" di spin  $\frac{1}{2}$ . Infatti, grazie al modello macroscopico di Aerts, diventa possibile osservare esplicitamente come un processo di misura possa essere responsabile della creazione imprevedibile di un nuovo stato dell'entità macchina-quantistica, inesistente prima della misura, e questo nonostante la nostra completa conoscenza del suo stato prima dell'esecuzione di quest'ultima.

Senza entrare nei dettagli, ricordiamo brevemente quali siano gli elementi di base che costituiscono l'entità macchina-quantistica di Aerts (per una descrizione e analisi completa del modello rimandiamo il lettore interessato a [AER, 1998, 1999] e ai riferimenti ivi citati). Grosso modo, un'entità macchina-quantistica è un punto materiale localizzato all'interno di una sfera tridimensionale euclidea, i cui diversi stati possibili corrispondono alle diverse posizioni che il punto materiale può occupare al suo interno. La particolarità e ingegnosità del modello risiedono nel modo in cui gli esperimenti sono concepiti. Infatti, per osservare lo stato dell'entità, il protocollo sperimentale richiede di usare un elastico appiccicoso che viene esteso tra due punti opposti della sfera (ogni coppia di punti definisce un diverso esperimento); quindi, si lascia semplicemente che il punto materiale cada dalla sua posizione iniziale, ortogonalmente, sull'elastico, attaccandosi così ad esso. A questo punto, l'elastico si rompe, in un qualche punto imprecisabile a priori, e il punto materiale, che è attaccato a uno dei due segmenti dello stesso, viene trascinato verso uno dei due punti estremi, definendo in questo modo l'esito dell'esperimento, ossia lo stato acquisito dal punto materiale quale conseguenza della misura (vedi la Figura 1).

Possiamo osservare che nel modello di Aerts l'entità, di per sé, è alquanto convenzionale (un punto materiale classico), mentre a essere piuttosto inusuale è il processo di misura, che sfrutta la "rompibilità" di un elastico. Ciò che è estremamente interessante nel

modello è la perfetta illustrazione di una situazione dove gli esiti degli esperimenti possono essere predetti solo in termini probabilistici. Bisogna notare che all'origine di ciò vi è un manco di conoscenza che non riguarda lo stato del sistema, ma il processo di misura; riguarda, cioè, l'assenza di informazioni circa il punto esatto in cui l'elastico si romperà durante l'esecuzione di tale processo.



**Figura 1** Rappresentazione schematica dell'esperimento della *macchina quantistica* di Aerts. A seconda del punto di rottura dell'elastico e della posizione del punto materiale, quest'ultimo verrà trascinato verso uno dei due punti estremi dell'elastico, determinando l'esito dell'esperimento.

Ora, sebbene l'entità macchina-quantistica consenta una piena modellizzazione di uno spin  $\frac{1}{2}$ , non chiarisce un'importante caratteristica generale delle proprietà quantistiche: la loro *effimerità*. Infatti, la posizione di un'entità microscopica – come, ad esempio, un elettrone – è effimera, nel senso che, in generale, non solo non è

possibile predirne il valore prima della misura, ma nemmeno è possibile farlo in un tempo finito dopo di essa, per quanto piccolo sia tale tempo finito. La ragione di questo, come abbiamo sottolineato con la nostra proposizione nella sezione precedente, è che non solo tale posizione è di fatto inesistente prima della misura, ma altresì cessa di esistere immediatamente dopo di essa.

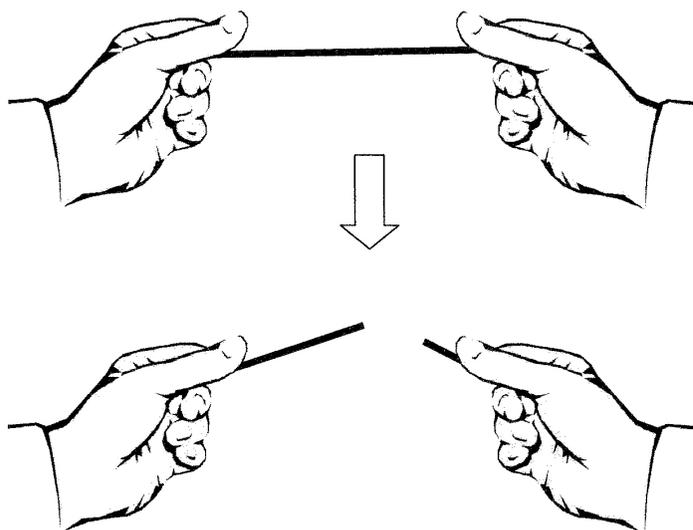
Questa conclusione è doverosa se si riconosce la validità generale del CE e del PIH. Tuttavia, indipendentemente dalla predisposizione di ciascuno a credere nell'effimerità delle proprietà quantistiche quale conseguenza della non-spazialità delle entità ad esse associate, sarebbe indubbiamente utile poter disporre di un modello macroscopico "à la Aerts" che ci aiuti a guidare la nostra intuizione.

Questo è ciò che ora faremo, presentando un esempio specifico di un'entità macroscopica che illustri non solo la tipica effimerità delle proprietà quantistiche, ma altresì la loro incompatibilità. La prospettiva di una tale modellizzazione era già contenuta, in quanto possibilità, nel quadro teorico generale sviluppato da Aerts nel suo *approccio a misure nascoste* [AER, 1992b, 1999] e, più generalmente, nella cosiddetta *visione creazione-scoperta* ("creation-discovery view", in inglese) [AER, 1998, 1999]. Tuttavia, per quanto ci è noto, un tale modello esplicito non era stato elaborato finora.

L'entità (o sistema) macroscopico che consideriamo è un convenzionale *spaghetto italiano crudo*, che potrà essere sia intero sia rotto in più frammenti. Vogliamo misurare (cioè, osservare) la proprietà del "mancinismo" dello spaghetto, che definiamo con il seguente test (vedi la Figura 2): prendere lo spaghetto con due mani e piegarlo fino a quando non si rompe, se il frammento più lungo rimane nella mano sinistra la risposta è "sì", altrimenti "no;" e se lo spaghetto è già rotto, eseguire semplicemente l'esperimento usando il frammento più lungo.

Ovviamente, non è possibile determinare in anticipo se uno spaghetto è mancino (o, alternativamente, destro), ma questo non è imputabile alla nostra mancanza di conoscenza del suo stato. Infatti,

anche con una conoscenza completa di tutte le proprietà attuali dello spaghetti, fino al livello molecolare, non potremmo predire l'esito dell'esperimento, in quanto la proprietà del "mancinismo" viene *creata durante l'esecuzione stessa del test* (ossia durante la sua osservazione), a seconda dei punti specifici in cui l'entità-spaghetto andrà a rompersi, i quali dipenderanno da un gran numero di fattori fluttuanti, totalmente al di là della nostra possibilità di controllo (similmente alla rottura dell'elastico nel modello della macchina-quantistica di Aerts).



**Figura 2** Il test del mancinismo di uno spaghetti. Il frammento più lungo rimane nella mano sinistra, confermando in questo caso la proprietà del mancinismo.

In altri termini, pur possedendo una conoscenza completa dello stato dell'entità-spaghetto, non possediamo alcun controllo circa l'interazione tra l'entità e lo strumento di misura (le nostre due mani). E, a causa di questo, il meglio che siamo in grado di fare è predire il risultato in termini probabilistici.

Per ribadire ciò che è stato più volte enfatizzato da Aerts nel suo

*approccio a misure nascoste* [AER, 1992b, 1999], ciò che distingue le probabilità quantistiche dalle probabilità classiche altro non sarebbe che il fatto che le seconde descrivono la nostra mancanza di conoscenza su ciò che già esiste, mentre le prime descrivono la nostra mancanza di conoscenza su ciò che invece viene contestualmente portato in esistenza dai nostri esperimenti.

Evidentemente, il mancinismo (o destrimanismo) di uno spaghetti è una *proprietà effimera* che viene posta in esistenza solo nel momento stesso in cui il test viene eseguito e che cessa di esistere immediatamente dopo di esso, poiché se decidiamo di ripetere il test (usando il frammento più lungo, come da protocollo), il suo esito è nuovamente imprevedibile.

Una caratteristica importante del nostro modello-spaghetto è quella di illustrare il fatto che proprietà come il mancinismo, nonostante il carattere effimero, possano nondimeno intrattenere relazioni di incompatibilità con altre proprietà effimere. Per vedere questo, consideriamo un'altra proprietà dello spaghetti crudo, che chiameremo “solidità” e che definiamo nel modo seguente: lasciate cadere lo spaghetti a terra dalle vostre mani, se non si rompe la risposta è “sì”, altrimenti “no”; se poi lo spaghetti è già rotto, eseguite semplicemente l'esperimento usando il frammento più lungo.

Similmente alla proprietà del “mancinismo”, la proprietà della “solidità” viene anch'essa creata dall'esecuzione stessa del test impiegato per definirla, ed è anch'essa di natura effimera. Ciò nonostante, intrattiene visibilmente una relazione di incompatibilità con la proprietà del “mancinismo”, dal momento che un test di quest'ultima accresce considerevolmente la probabilità che un test della prima fornisca una risposta positiva (come è evidenziato dal fatto che più corto è un frammento di spaghetti e meno facilmente esso si romperà cadendo a terra).

Il nostro modello-spaghetto, in un certo senso, è complementare al modello-pezzetto di legno di Aerts. Entrambi i sistemi presentano infatti delle proprietà incompatibili, ma nel caso del pezzetto di legno queste proprietà – “bruciare bene” e “galleggiare sull'acqua” – sono

di tipo classico, nel senso che esistono stabilmente nel nostro spazio tridimensionale (che è lo spazio in cui queste proprietà sono definite e rese manifeste per mezzo dei test sperimentali corrispondenti), mentre nel caso dello spaghetti (“mancinismo” e “solidità”) si tratta di proprietà di tipo non-classico, nel senso che vengono poste in essere, in modo effimero e imprevedibile, dagli stessi test sperimentali impiegati per definirle.

Grazie a questi due esempi paradigmatici, possiamo chiaramente osservare che incompatibilità ed effimerità sono concetti indipendenti. Infatti, come il modello-pezzetto di legno dimostra, due proprietà possono esistere in modo stabile pur essendo incompatibili, ma ugualmente, come il modello-spaghetto dimostra, possono esistere in modo del tutto effimero e, tuttavia, essere allo stesso modo incompatibili. Questo indica che il carattere effimero di una proprietà non-classica ha più a che vedere con il modo in cui la proprietà viene definita (ossia, testata) che non con il fatto che possa o meno intrattenere relazioni di incompatibilità con altre proprietà.

Questa osservazione è particolarmente rilevante se si considera il fatto che l'argomento della non-spazialità, presentato nella proposizione della sezione precedente, utilizza il PIH come suo ingrediente principale; utilizza cioè l'esistenza di una relazione di incompatibilità tra la posizione e la quantità di moto. Pertanto, si potrebbe essere tentati di concludere che sia l'esistenza stessa di tale incompatibilità sperimentale a essere all'origine dell'osservata non-spazialità delle entità microscopiche (e conseguente effimerità della loro posizione spaziale). Tuttavia, considerando l'esempio del pezzetto di legno, possiamo vedere che l'incompatibilità non è una condizione sufficiente per la non-spazialità (o, più generalmente, l'effimerità); d'altra parte, considerando l'esempio dello spaghetti, possiamo altresì vedere che l'incompatibilità non può nemmeno essere considerata una condizione necessaria per quest'ultima, come si evidenzia dal fatto che il carattere effimero delle proprietà del “mancinismo” o della “solidità” è incorporato nella loro stessa definizione, indipendentemente dalla compatibilità o incompatibilità del loro rapporto con altre proprietà.

In altre parole, sebbene il PIH possa essere opportunamente usato per stabilire la non-spazialità delle entità quantistiche microscopiche, questo non significa che si tratti di un ingrediente fondamentale per giungere a tale conclusione. Infatti, l'importanza del PIH in questo contesto è da mettere in relazione con la specifica struttura delle formulazioni lagrangiana e/o hamiltoniana, che richiedono che la posizione e il momento siano variabili *indipendenti* ai fini di una determinazione unica delle soluzioni delle equazioni del moto. Tuttavia, come i modelli del pezzetto di legno e dello spaghetti dimostrano, non c'è alcuna necessità logica nel ricorrere al PIH (ossia all'incompatibilità) per stabilire la non-spazialità delle entità quantistiche.

In realtà, come è stato più volte sottolineato da Aerts [AER, 1998, 1999], il diffuso effetto quantistico detto della *non-località* (non-locality), che si manifesta ad esempio negli esperimenti di interferometria neutronica (neutron interferometry experiments) di Rauch, negli esperimenti a scelta ritardata di Wheeler (Wheeler's delayed choice experiments) o in quelli di Aspect con le coppie correlate (entangled pairs), se analizzato attentamente può di fatto essere considerato come una firma chiara e diretta della *non-spazialità*.

## 7 Individualità

Nelle precedenti sezioni abbiamo considerato i modelli del pezzetto di legno e dello spaghetti come esempi guida, paradigmatici, per sottolineare che le entità possono avere sia proprietà classiche, che esistono indipendentemente dalla nostra osservazione, sia proprietà quantistiche (o simil-quantistiche), che vengono poste in esistenza effimera per mezzo dei nostri esperimenti. Come abbiamo visto, queste proprietà quantistiche, avendo vita estremamente breve, non possono essere usate per caratterizzare l'identità di un'entità, poiché per questo dovremmo poter individuare le proprietà invarianti – gli attributi dell'entità – la cui attualità dovrebbe essere predicibile con

certezza e rimanere tale per un tempo sufficientemente lungo. E come abbiamo evidenziato, la spazialità è una tipica proprietà che un'entità necessita di possedere, invariabilmente, per poter essere identificata come particella.

Se l'entità è microscopica, la proprietà di “essere nello spazio” può essere attualizzata solo per un istante. Tuttavia, *manifestare una singola posizione solo per un istante non significa creare una particella con un'intera traiettoria!*

In questa sezione vogliamo rafforzare ulteriormente il ragionamento circa l'inadeguatezza della visione corpuscolare, spiegando che, oltre alla spazialità, le ipotetiche particelle microscopiche mancano di possedere un altro attributo del tutto fondamentale: quello dell'*individualità*.

È importante ricordare che il gruppo EPR enunciò il suo criterio di realtà con l'intento di confutare le limitazioni imposte dal PIH e mostrare la possibilità di attribuire una realtà congiunta alla posizione e alla quantità di moto di una particella microscopica. Per spiegare l'essenza del loro ragionamento, torniamo per un momento all'entità-pezzetto di legno di Aerts. Come abbiamo visto, le proprietà di “bruciare bene” e di “galleggiare sull'acqua” sono sperimentalmente incompatibili, il che significa che non possiamo testarle (ossia osservarle) congiuntamente, senza incidere sui rispettivi esiti. La situazione sarebbe però diversa se disponessimo di due pezzetti di legno identici, due entità identiche *separate* su cui poter effettuare contemporaneamente uno dei due esperimenti. In questo modo, evidentemente, gli esperimenti non influirebbero più uno sull'altro e si potrebbe raccogliere l'esito affermativo previsto da entrambi.

Questa è esattamente l'idea che sottostà al celebre *gedankenexperimente* di EPR: anziché cercare di misurare congiuntamente la posizione e il momento su una stessa particella microscopica, si considerano due (ipotetiche) particelle microscopiche, identiche e separate, e si realizza su ognuna di esse uno dei due test, i cui risultati possono così essere congiuntamente raccolti, dimostrando così la possibilità di eludere il PIH relativo a

posizione e momento.

Più esattamente, ciò che EPR hanno mostrato nel loro articolo del 1935 è che, se due particelle identiche vengono preparate in uno stato specifico (detto stato prodotto) e poi vengono lasciate interagire, queste finiscono col formare un cosiddetto stato *entangled* (detto anche stato *non-prodotto*), nel quale le (ipotetiche) proprietà possedute dalle due particelle individuali sono fortemente correlate. Tuttavia, poiché col tempo le due particelle divengono sempre più separate in termini spaziali, secondo il gruppo EPR esse divengono sempre più separate anche in termini sperimentali, in quanto nessuna influenza sarebbe in grado di percorrere istantaneamente la distanza spaziale che le separa (influenza definita provocatoriamente da Einstein “azione fantasma a distanza”, o “spooky action-at-distance”, in inglese).

Secondo questa linea di ragionamento, diviene possibile, se non altro in linea di principio, misurare la quantità di moto della prima particella e poi usare il risultato della misura per predire con certezza la quantità di moto della seconda (grazie alla correlazione indotta dall’entanglement), senza in nessun modo disturbare quest’ultima. Quindi, se si fosse ancora liberi di eseguire sulla seconda particella una misura della sua posizione, questo dimostrerebbe la possibilità di determinare simultaneamente entrambe le osservabili. E, dal momento che la conclusione raggiunta mediante il sottile ragionamento di EPR contraddirebbe le predizioni del PIH (e più generalmente della meccanica quantistica) è possibile comprendere come mai questa situazione sia stata storicamente definita come il *paradosso* di EPR e come mai il gruppo EPR stesso arrivò alla conclusione secondo cui la meccanica quantistica (MQ) è una teoria *incompleta*, in quanto non in grado di rendere conto di tutte le proprietà attuali presenti nel sistema, ossia di tutti i possibili elementi di realtà.

Tuttavia, come oggi sappiamo grazie all’analisi di Bell [BEL, 1964, 1987] e agli storici esperimenti con le coppie correlate di Aspect *et al.* [ASP, 1982, 1999] (e i numerosi altri che da allora sono stati eseguiti),

il falso pregiudizio di EPR consisteva nel credere che mettere una sufficiente distanza spaziale tra due (ipotetiche) entità-particella di natura microscopica avrebbe automaticamente garantito la loro separazione sperimentale. In altri termini, il gruppo EPR confuse il concetto di *separazione sperimentale* con quello di *separazione spaziale* (o assenza di interazione).

In realtà, ciò che la violazione sperimentale delle diseuguaglianze di Bell ha chiaramente rivelato è che la MQ descrive in modo del tutto appropriato lo stato di un sistema formato da due entità microscopiche spazialmente separate che emergono da un'interazione per mezzo di uno stato entangled (non-prodotto), tanto che il sistema non può essere compreso come la somma di parti (sperimentalmente) separate (ognuna descritta da un suo specifico stato), ma come un'entità singola e intera.

Questo dimostra che, se le particelle microscopiche non possono esistere, non è solo perché non sono presenti nello spazio, come abbiamo evidenziato nella sezione precedente, ma anche perché, generalmente, non possiedono l'attributo essenziale dell'*individualità*, ossia la proprietà di esistere in quanto entità separate. Un tale attributo, al pari di quello della spazialità, è sicuramente fra quelli a cui non possiamo rinunciare se vogliamo preservare il significato del concetto stesso di particella.

È importante però menzionare che la violazione sperimentale delle diseuguaglianze di Bell non ha fornito una soluzione al paradosso di EPR in quanto tale. Tale soluzione è giunta solo negli anni Ottanta del secolo passato, in seguito alla profonda analisi della situazione EPR presentata da Aerts nella sua tesi di dottorato e poi sviluppata in numerose altre sue pubblicazioni. In questi lavori, egli fu in grado di evidenziare un aspetto molto sottile e cruciale: strutturalmente parlando, la formulazione standard delle MQ non è idonea a descrivere dei sistemi formati da entità separate [AER, 1982, 1984] (il concetto di *separazione* è qui da intendersi in senso sperimentale, ossia nel senso che compiendo esperimenti su un'entità non si pregiudica lo stato delle altre, e viceversa).

Come sottolineato da Aerts, si tratta di un aspetto fondamentale (e solitamente frainteso), in quanto EPR, nel loro ragionamento *ex-absurdum*, considerarono proprio che, al contrario, la MQ fosse perfettamente in grado di descrivere la situazione di due entità che divenivano separate (in senso sperimentale) nella misura in cui si allontanavano spazialmente. Questa loro premessa si è però dimostrata errata in seguito all'analisi di Aerts. Quindi, sebbene la conclusione di EPR circa l'incompletezza della MQ fosse corretta, non lo era per le ragioni sostenute nel loro articolo del 1935. Se la MQ è incompleta, è perché manca di descrivere correttamente le entità fisiche separate [AER, 1982, 1984] (vedi anche la discussione in [CHR, 2002]).

## 8 Entità

Seguendo l'approccio alla MQ di Geneva-Brussels, nelle sezioni precedenti abbiamo considerato due importanti argomenti a favore di un'ontologia (microscopica) non-corpuscolare: l'evidente non-spazialità e non-individualità delle entità quantistiche. Questo comporta che la MQ, nella sua formulazione e interpretazione abituali, diventi una teoria sbagliata quando pretende di dare un senso proprio al concetto illusorio di "particella microscopica individuale". Ogni volta che lo fa, automaticamente dà vita a numerosi e inutili paradossi.

Dovremmo menzionare che, in aggiunta alla spazialità e all'individualità, numerosi altri attributi (interrelati) possono essere associati a un'entità fisica per caratterizzarne adeguatamente la natura corpuscolare, come ad esempio: distinguibilità, materialità, movimento, forma, e molti altri ancora.

La definizione di molti di questi attributi può sicuramente essere ampliata senza per questo rinunciare al concetto stesso di particella. Per esempio, possiamo concordare nel continuare a chiamare particella un'entità, sebbene questa non sia rigorosamente impenetrabile e possa ad esempio essere attraversata da altre entità,

benché non da tutte le entità. Allo stesso modo, senza rinunciare al concetto di particella, possiamo rimpiazzare il requisito di possedere un certo quantitativo di materia con quello più generale di possedere un certo quantitativo di energia, in quanto la massa, in ultima analisi, è energia interna, e possiamo immaginare delle particelle che abbiano trasformato tutta la loro energia interna in energia cinetica, muovendosi così alla massima velocità consentita (come sarebbe il caso delle entità fotoniche nel caso la loro massa sia strettamente uguale a zero).

D'altra parte, a nostro parere vi è ben poco spazio per poter ampliare la definizione degli attributi di spazialità e di individualità, senza dover poi rinunciare al concetto stesso di particella. Se un'entità non è in ogni momento presente da qualche parte nello spazio, nel corso della sua esistenza, e non può essere separata dalle altre entità, allora non possiamo considerarla una particella, almeno non nel senso in cui siamo soliti comprendere questo concetto.

Detto questo, dobbiamo nondimeno riconoscere che l'ipotesi delle particelle microscopiche, per quanto sbagliata, si è dimostrata un'idea incredibilmente fertile. Citando ad esempio Feynman, dalle prime pagine delle sue famose lezioni di fisica [FEY, 1970]:

“Se, per qualche cataclisma, tutta la conoscenza scientifica fosse distrutta, e solo una frase potesse passare alla generazione successiva, quale dichiarazione conterrebbe il massimo di informazione con il minimo di parole? Credo che sia l'ipotesi atomica (o il fatto atomico, o comunque tu lo voglia chiamare) che le cose sono fatte d'atomi, piccole particelle che si muovono intorno in moto perpetuo, attraendosi quando sono a distanza ravvicinata, ma respingendosi quando sono schiacciate l'una contro l'altra. In questa sola frase vedrai un'enorme quantità di informazione sul mondo, se soltanto un po' di immaginazione e pensiero sono applicati”.

Sebbene Feynman sicuramente sbagliasse nel ritenere l'ipotesi atomica un fatto, era sicuramente nel giusto nel considerare che l'atomismo, e più generalmente il riduzionismo, è stato, e ancora oggi

è, una fonte di notevole potere esplicativo. I sistemi fisici non sono fatti di atomi, o di particelle elementari, ma fare *come se* lo fossero può sicuramente rivelarsi utile in numerose circostanze. Non dobbiamo però dimenticarci del “come se”, altrimenti rischiamo di mancare tutte le spiegazioni e previsioni più avanzate che si trovano al di là della nostra incompleta visione corpuscolare, che è solo una fortunata analogia concettuale estrapolata dalla nostra esperienza del mondo macroscopico.

C'è però un altro aspetto importante che non dobbiamo dimenticare, quando discutiamo di MQ. Citando Giuliano Preparata ([PRE, 2002], pagina 63):

“[...] la meccanica quantistica è una conseguenza rigorosa della corrispondente teoria quantistica dei campi nel limite di ‘diluzione infinita’, dove il mondo è popolato solo da un piccolo numero finito di quanta”.

In altri termini, la MQ è solo un'approssimazione di una teoria più generale e avanzata, detta *teoria quantistica dei campi* (TQC); inoltre, come il nome suggerisce, l'ingrediente base della TQC non sono le particelle, ma i campi quantistici!

Quando i campi quantistici interagiscono tra loro, lo fanno localmente, scambiandosi dei quanta di energia, e così facendo lasciano tracce visibili nel nostro spazio fisico tridimensionale, per esempio sotto forma di piccoli puntini su uno schermo. Queste tracce sono facilmente confondibili con le tracce che verrebbero lasciate da ipotetici corpuscoli microscopici dotati di cinematica e dinamica proprie. Si tratta però di un'illusione cognitiva, in quanto tali tracce sono solo la conseguenza del fatto che i campi quantistici, contrariamente ai campi classici, possono scambiare energia solo in modo discontinuo, ossia, in piccoli pacchetti, o quanta.

Tornando alla citazione di Weinberg menzionata nell'Introduzione, quella secondo cui i campi quantistici formano la nostra “realtà essenziale” e le particelle si riducono a meri epifenomeni, possiamo allora chiederci se, concettualmente

parlando, sarebbe sufficiente sostituire la nozione di “particella” con la nozione di “campo” per risolvere il problema interpretativo.

Alcuni fisici, infatti, difendono fortemente il punto di vista secondo cui le nostre maggiori difficoltà nel comprendere la MQ risultano dalla nostra cattiva abitudine di persistere nel ragionare sui fenomeni quantistici per mezzo di idee corpuscolari classiche; secondo questi fisici, la via d’uscita da questa impasse sarebbe semplicemente quella di rimpiazzare il concetto vetusto di “particella” con quello di “campo”, cosa che si ritiene sia possibile fare già a partire dal livello dei corsi introduttivi di fisica quantistica, offrendo in questo modo agli studenti un quadro più unificato e realistico, oltre che meno paradossale, della realtà fisica. Per una recente e interessante discussione su questo tema, vedi ad esempio: [HOB, 2005, 2009a, 2009b], [KAM, 2008], [CON, 2009].

Sicuramente, la nozione di “campo” è, in un certo senso, più adatta rispetto a quella di “particella” nel descrivere coerentemente la realtà del nostro mondo microscopico. Infatti, essa supera il problema del dover pensare ai quanta come a singole minuscole particelle in movimento nello spazio vuoto, potendo invece intenderli come le tracce lasciate dai campi quantistici quando questi interagiscono con i nostri strumenti di misura; tracce che, necessariamente, devono essere presenti nel nostro spazio fisico ordinario.

Tuttavia, a ben vedere, dobbiamo ammettere che la sostituzione della nozione di “particella quantistica” (microscopica) con la nozione di “campo quantistico” ha come unico effetto quello di spostare il problema. Infatti, anche un campo è un’entità definita nello spazio, con specifiche proprietà in ogni suo punto (come, ad esempio, dei vettori di forza); quindi, anche questa nozione non è in grado di descrivere in modo adeguato la natura tipicamente non-spaziale di un’entità quantistica ed evitare ogni paradosso.

Contrariamente alle particelle, i campi sono entità non-locali, estese, ma restano pur sempre entità spaziali. La sola differenza è che una particella viene immaginata come un ente dotato di una specifica

localizzazione, tipicamente puntiforme, in ogni istante temporale, mentre un campo viene immaginato possedere una localizzazione diffusa nello spazio, in ogni istante temporale (similmente a un'onda). Eppure, l'osservata mancanza di spazialità delle entità quantistiche si applica sia alle particelle quantistiche che ai campi quantistici, cosicché entrambe le idee, di "particella" e "campo", si dimostrano insufficienti nel descrivere adeguatamente un'entità quantistica.

A questo proposito, è sufficiente considerare una situazione in cui siano presenti più entità quantistiche. Proprio a causa dell'esistenza dell'entanglement, sperimentalmente confermata, i cosiddetti campi che descrivono un insieme di entità quantistiche non possono essere definiti in uno spazio tridimensionale, ma in uno spazio configurazionale di più alta dimensione. Questo significa che, così come le particelle quantistiche descritte dalla MQ non sono particelle, similmente possiamo affermare che i campi quantistici descritti dalla TQC non sono campi.

Da un punto di vista didattico, un interrogativo sorge allora naturale. Considerando che sia il concetto di "particella" sia quello di "campo" non sono adeguati nel descrivere coerentemente la natura di un'entità quantistica non-spaziale, quale sarebbe un concetto migliore, più avanzato, da poter usare in loro sostituzione? In altre parole, quale sarebbe un puntatore concettuale più adeguato nel designare un'entità quantistica?

Un modo semplice per evitare di dover fare riferimento alle immagini fuorvianti di particelle o campi potrebbe essere quello di usare i prefissi greci "pseudo" o "quasi" come già avviene ad esempio con i fononi, che non vengono descritti come particelle, ma come *quasiparticelle*. Questi prefissi possono essere usati per ricordarci della falsità del concetto che segue, che pretende di essere qualcosa che di fatto non è. Allo stesso modo, potremmo usare i termini di "*pseudocampi* quantistici", o "*quasicampi* quantistici", per indicare che i campi quantistici, contrariamente ai campi classici, sono "sostanze" non-ordinarie, che esistono al di fuori del nostro spazio

tridimensionale.

C'è però, di fatto, una soluzione molto più semplice, chiara ed elegante, che è stata già proposta da Aerts sin dal principio della sua ricerca. Questa soluzione consiste nell'evitare del tutto di usare le nozioni svianti di "particella" e "campo", usando invece la nozione più astratta e generale di *entità*.

La parola "entità" origina dal latino *entis* e si riferisce all'essenza, all'"esserità" di una cosa. Un'entità non è necessariamente un fenomeno spaziale, potendo anche riferirsi a un aspetto matematico, mentale, concettuale della realtà, e a molti altri ancora. In altre parole, un'entità è unicamente una parte della nostra realtà multidimensionale alla quale, nel nostro ruolo di osservatori-creatori, siamo in grado di assegnare alcune proprietà. Per usare le parole di Aerts [AER, 1998]:

"Un'entità è una collezione di proprietà che possiedono un certo stato di permanenza nel raggrupparsi insieme, e una proprietà è uno stato di predizione per un certo esperimento. Una proprietà, in quanto elemento della collezione di proprietà che definisce un'entità, può essere attuale, il che significa che l'esito corrispondente può essere predetto con certezza, o potenziale, il che significa che l'esito non può essere predetto con certezza, ma che l'attualità di tale proprietà è disponibile".

Quello che è importante osservare in questa definizione generale è che, citando Aerts [AER, 1998]: "Lasciamo cadere il preconetto che tali raggruppamenti (*clusters*) di proprietà siano nello spazio e veicolino un impatto determinato". Infatti, le entità, siano esse classiche, quantistiche o simil-quantistiche, necessitano solo di essere "contenute" nella realtà, non nel nostro spazio tridimensionale. Per citare ancora una volta Aerts [AER, 1999]:

"La realtà non è contenuta nello spazio. Lo spazio è una cristallizzazione momentanea di un teatro per la realtà dove i movimenti e le interazioni delle entità macroscopiche materiali ed

energetiche hanno luogo. Ma altre entità – come, ad esempio, le entità quantistiche – ‘hanno luogo’ fuori dallo spazio, o – e questo sarebbe un altro modo per dire la stessa cosa – entro uno spazio che non è lo spazio euclideo tridimensionale”.

Vorremmo concludere questa sezione esprimendo un simbolico “mea culpa”, anche a nome dei nostri colleghi, poiché a dispetto delle forti evidenze teoriche e sperimentali che da tempo sono sotto i nostri occhi, siamo ancora riluttanti nell’abbandonare il concetto fuorviante di *particelle microscopiche* – che dovremmo almeno avere la decenza di chiamare *quasiparticelle*, come facciamo ad esempio con i fononi – e rimpiazzarlo con il concetto più avanzato di *entità quantistiche*<sup>1</sup>.

La situazione ci ricorda quando Sir Joseph John Thomson scoprì che i raggi catodici erano formati da “corpuscoli” elettricamente carichi, che furono in seguito battezzati elettroni. I suoi esperimenti mostrarono che i cosiddetti atomi, che per definizione erano ritenuti entità intagliabili (secondo l’etimologia stessa del loro nome), di fatto erano stati “catodicamente” tagliati. In altre parole, tutt’a un tratto gli atomi avevano perso il loro attributo più caratteristico: l’intagliabilità!

---

<sup>1</sup> Beninteso, un simile “mea culpa” andrebbe pronunciato per l’altrettanto fuorviante concetto di campo quantico, o quantistico. Tuttavia, ci sono in questo caso, crediamo, delle circostanze attenuanti, in quanto il concetto di campo, contrariamente a quello di particella, viene solitamente percepito come espressione di un aspetto della realtà meno “tangibile” e “visibile”. Inoltre, viene spesso usato in modo figurativo, come nell’espressione “campo di possibilità”. I campi quantistici sono entità non-spaziali, e perciò non sono campi, in senso stretto. D’altra parte, producono effetti (i clic nei nostri rilevatori) che sono presenti nel nostro spazio tridimensionale, e certamente non è sbagliato descrivere l’insieme di tali effetti (tracce, clic, ecc.) come un campo, o verosimilmente come un *campo di effetti*. Ciò che dobbiamo tenere a mente in questo caso, è che tale campo di effetti non può catturare l’intera realtà dell’entità quantistica che ne è all’origine, e il cui “campo di manifestazione” si estende ben oltre il nostro ristretto teatro tridimensionale.

(Oggi diremmo l'elementarità). Ma nonostante l'evidenza sperimentale, non abbiamo fatto nulla per correggere la nostra nomenclatura, e anziché ribattezzare gli ex-atomi in molecole e dare, se non altro temporaneamente, l'appellativo di atomi alle entità elettroniche appena scoperte, non abbiamo fatto nulla del genere.

Non conosciamo le ragioni di questa pigrizia terminologica, ma quello che possiamo osservare è che, *mutatis mutandis*, la situazione si ripete al giorno d'oggi. Infatti, nonostante sappiamo tutti che gli elettroni non esistono nello spazio, né sono delle entità individuali, continuiamo a chiamarli particelle, o corpuscoli, come Thomson riteneva che fossero. E più generalmente, continuiamo a pensare che i "mattoni" con cui è fatta la nostra realtà sarebbero delle specie di particelle elementari che descriverebbero misteriose traiettorie nascoste in uno spazio euclideo tridimensionale. Citando Piron [PIR, 1999], dobbiamo ammettere che, per il momento, "[...] la rivoluzione quantistica non ha ripulito!".

Per quanto ne sappiamo, la nostra realtà microscopica non è fatta di piccole particelle che si muovono nello spazio vuoto, ma di entità quantistiche. Queste entità non sono esseri tridimensionali e tutto ciò che concretamente sappiamo su di esse proviene dalle tracce che lasciano quando interagiscono con i nostri strumenti. Queste tracce sono certamente presenti nel nostro spazio fisico ordinario, ma in generale le entità quantistiche non lo sono: non sono presenti nello spazio, ma in qualche modo emergono (o s'immergono) in esso ogni volta che interagiscono con i nostri apparecchi di misura macroscopici e tridimensionali.

Inoltre, le entità quantistiche formano di solito un tutt'uno e, quando manifestano la loro presenza nello spazio fisico tridimensionale, per esempio nell'ambito di un esperimento di tipo EPR, temporaneamente "rompono" questa loro interezza e, così facendo, creano correlazioni che violano le disuguaglianze di Bell [AER, 1990].

Consideriamo come esempio metaforico quello di un'entità-elastico. Immaginiamo che l'elastico sia fabbricato con un materiale

particolare, ultra-estendibile, che può essere allungato su distanze arbitrariamente grandi, a condizione che lo si tiri delicatamente. Con una mano afferriamo un lembo dell'elastico e chiediamo a un collega di afferrare l'altro lembo, quindi ci allontaniamo, mettendo tra noi una notevole distanza spaziale. Nel fare questo l'elastico diventerà sempre più fine, fino a sparire, apparentemente, dalla nostra prospettiva tridimensionale. Quando siamo sufficientemente distanti, con uno strappo rompiano l'elastico, cosicché un frammento si contrarrà nella nostra mano e l'altro nella mano del nostro collega (supponendo per semplicità che l'elastico possa rompersi solo in due pezzi). Quello che c'è di magico (o spooky!) in questo fenomeno è che, se conosciamo la lunghezza dell'elastico a riposo (se, cioè, sappiamo come il sistema era stato inizialmente preparato) e misuriamo la lunghezza del frammento nella nostra mano, possiamo predire con certezza (facendo una semplice sottrazione) la lunghezza del frammento nella mano del nostro collega, e questo senza dover scambiare alcuna informazione con lui. Non c'è una "azione fantasma a distanza", ma solo la creazione di correlazioni nel momento esatto in cui viene rotta l'interezza dell'elastico in due frammenti separati [AER, 1990].

## 9 Conclusione

Nel presente lavoro il nostro primo obiettivo era quello di promuovere una riflessione nel lettore per quanto riguarda la natura sottile delle entità che popolano la nostra realtà microscopica (e macroscopica), con particolare enfasi sulla nozione ossimorica di "particella microscopica". Lo abbiamo fatto cercando di mettere insieme, in modo didattico, alcuni dei risultati e ragionamenti più importanti che sono stati ottenuti negli ultimi decenni da Constantin Piron, Diederik Aerts e collaboratori.

Nel fare questo, abbiamo apportato anche un nostro modesto contributo a questo sforzo di chiarimento di lunga data, promosso dalla cosiddetta scuola di Geneva-Brussels sui fondamenti della

fisica: un modello entità-spaghetto che dimostra che delle proprietà non-classiche e non-compatibili possono riscontrarsi anche negli oggetti macroscopici convenzionali.

Beninteso, molto di più ci sarebbe da dire sull'importante nozione di *entità*, così come proposta da Aerts nella sua penetrante *visione creazione-scoperta* della realtà; a questo proposito, rimandiamo il lettore non ancora familiare con questo approccio ai già citati articoli di Aerts *et al.*, i quali, nonostante la loro sottigliezza concettuale, sono sempre redatti in uno stile molto chiaro e didattico.

Per quanto riguarda la possibilità di comprendere il singolare livello quantico della nostra realtà, un famoso detto di Feynman viene subito in mente [FEY, 1992]:

“Mi sento di poter affermare con sicurezza che nessuno ha mai capito la meccanica quantistica”.

D'altra parte, considerando i numerosi modelli espliciti elaborati da Aerts e collaboratori nel corso degli anni, dobbiamo forse riconoscere che l'ammonizione di Feynman è divenuta oggi giorno piuttosto obsoleta.

Nel presente articolo, in aggiunta al nostro “modello spaghetto” di nuova concezione, abbiamo unicamente menzionato gli esempi del “pezzetto di legno” e della “macchina quantistica”. Ce ne sono però molti altri. Ad esempio, il modello della macchina quantistica è stato ulteriormente ampliato da Aerts in un modello noto con il nome di “ $\epsilon$ -model” [AER, 1998], che consente la descrizione di strutture intermedie, più generali, che non sono né puramente quantistiche né puramente classiche. Inoltre, Aerts ha fornito degli esempi macroscopici chiarificatori in grado di modellizzare le correlazioni non-locali del tipo EPR, come il suo famoso “modello a base di recipienti d'acqua”<sup>2</sup> (vessel of water model) [AER, 1984, 1990], o le sue “macchine quantistiche connesse da un'asta rigida” [AER, 2000].

---

<sup>2</sup> Vedi a riguardo l'articolo di Aerts nel presente volume.

Aerts ha anche proposto delle analisi molto generali al fine di illustrare le sottigliezze inerenti alla nostra costruzione della realtà, e la relazione tra le modalità di tale costruzione e la nostra comprensione delle strutture quantistiche. Possiamo citare, tra le altre cose, la sua illuminante spiegazione di un esperimento di “rottura di noci” (cracking of walnuts experiment) [AER, 1998, 1999] e la sua analisi di uno “spazio di amicizia” umano<sup>3</sup>, quale metafora significativa di un’evoluzione da una realtà di tipo non-spaziale (il nostro mondo microscopico meno strutturato) a una realtà di tipo spaziale (il nostro mondo macroscopico maggiormente strutturato) [AER, 1990].

Certamente, non stiamo qui affermando che grazie a questi modelli, e agli avanzamenti concettuali che questi hanno permesso, siamo ora in grado di penetrare la realtà ultima del micromondo. Tale livello di “realtà ultima” rimarrà probabilmente per sempre nascosto alle nostre indagini intellettuali. Ma abbiamo sicuramente fatto dei notevoli passi avanti nello svelare ciò che il mondo microscopico veramente è, se non altro strutturalmente parlando.

Detto questo, pensiamo sia rilevante concludere questo articolo menzionando i progressi più recenti del lavoro di Aerts, che secondo il parere di questo autore rappresentano il culmine del suo sforzo instancabile verso una comprensione demistificata della natura delle entità quantistiche. Questi progressi fanno seguito ai successi di Aerts e del suo gruppo, in questi ultimi anni, nell’utilizzo del formalismo quantistico per la modellizzazione dei concetti umani; successi che lo hanno portato a porsi una domanda tanto semplice quanto provocatoria [AER, 2009]: “Se il formalismo della meccanica quantistica modella i concetti umani così bene, forse questo indica che le particelle quantistiche sono a loro volta entità concettuali?”

Questa domanda è stata il punto di partenza per una nuova interpretazione della MQ, che è probabilmente oggi il quadro esplicativo più avanzato per comprendere questa teoria

---

<sup>3</sup> *Ibid.*

d'avanguardia. Secondo Aerts, le entità quantistiche [AER, 2009]

“[...] interagiscono con la materia ordinaria, nuclei, atomi, molecole, entità materiali macroscopiche, apparati di misura, ..., in modo simile a come i concetti umani interagiscono con le strutture di memoria, le menti umane o le memorie artificiali”.

Pertanto, citando ancora Aerts [AER, 2009]:

“Se si dimostrasse esatta, questa nuova interpretazione quantistica fornirebbe una spiegazione secondo la quale le ‘particelle quantistiche’ si comportano come qualcosa che è a tutti molto familiare e di cui abbiamo tutti un’esperienza diretta, ossia i concetti”.

Non è nostra intenzione commentare oltre questo sottile quadro esplicativo e la sua efficacia nello spiegare fenomeni come l’entanglement e la non-località, tradizionalmente considerati (nello spirito della già menzionata citazione di Feynman) come “non compresi” lasciando al lettore il piacere intellettuale di scoprire queste spiegazioni direttamente dagli articoli di recente pubblicazione di Aerts [AER, 2009, 2010]. Osserviamo soltanto – e su questo concludiamo – che senza dubbio abbiamo percorso una lunga strada dai tempi in cui disponevamo, per descrivere la nostra realtà fisica, autenticamente multidimensionale, unicamente di immagini naif, a base di particelle e sostanze cartesiane in movimento nello spazio.

## Ringraziamenti

Dedico questo articolo al professor Constantin Piron, uno dei fondatori della scuola di Geneva-Brussels di meccanica quantistica, di cui ho avuto il piacere di essere l’assistente circa una ventina d’anni fa. Interagire con Constantin per più di un anno, quasi su base giornaliera, ha cambiato in modo irreversibile il mio modo di guardare ai misteri del mondo quantistico, il quale, un po’

paradossalmente, era solito divenire allo stesso tempo meno e più misterioso quando mi trovavo in sua presenza.

L'autore è grato a Diederik Aerts per le fruttuose comunicazioni e per l'incoraggiamento, nonché a due revisori anonimi, per la lettura attenta del manoscritto e le numerose e acute osservazioni che hanno notevolmente contribuito a migliorare la presentazione e il contenuto di questo lavoro.

## Bibliografia

[AER, 1982] D. Aerts, "Description of many physical entities without the paradoxes encountered in quantum mechanics", *Found. Phys.*, 12, pp. 1131-1170 (1982).

[AER, 1984] D. Aerts, "The missing element of reality in the description of quantum mechanics of the EPR paradox situation", *Helv. Phys. Acta*, 57, pp. 421-428 (1984).

[AER, 1990] D. Aerts, "An attempt to imagine parts of the reality of the micro-world", pp. 3-25, in "Problems in Quantum Physics II; Gdansk '89", eds. Mizerski, J., et al., World Scientific Publishing Company, Singapore (1990).

*Vedi anche la traduzione in italiano pubblicata in questo volume:* D. Aerts, "Un tentativo di immaginare parti della realtà del micromondo", *AutoRicerca*, Numero 2 (2011).

[AER, 1992a] D. Aerts, "The construction of reality and its influence on the understanding of quantum structures", *Int. J. Theor. Phys.*, 31, pp. 1815-1837 (1992).

[AER, 1992b] D. Aerts, "A possible Explanation for the Probabilities of Quantum Mechanics", *J. Math. Phys.*, 27, pp. 202-210 (1992).

[AER, 1998] D. Aerts, "The entity and modern physics: the creation-discovery view of reality", in "Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics", Ed. Castellani, E. Princeton University Press, Princeton (1998).

[AER, 1999] D. Aerts, "The Stuff the World is Made of: Physics and Reality", p. 129, in "The White Book of 'Einstein Meets Magritte'", Edited by Diederik Aerts, Jan Broekaert and Ernest Mathijis, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 274 pp. (1999).

[AER, 2000] D. Aerts, "The description of joint quantum entities and the formulation of a paradox", *Int. J. Theor. Phys.*, 39, pp. 485-496 (2000).

[AER, 2009] D. Aerts, "Quantum Particles as Conceptual Entities. A Possible

Explanatory Framework for Quantum Theory”, *Foundations of Science*, 14, pp. 361-411 (2009).

[AER, 2010] D. Aerts, “Interpreting Quantum Particles as Conceptual Entities”, *Int. J. Theor. Phys.*, 49, pp. 2950-2970 (2010).

[ASP, 1982] A. Aspect et al., “Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities”, *Phys. Rev. Lett.*, 49, p. 91 (1982).

[ASP, 1999] A. Aspect, “Bell’s inequality test: more ideal than ever”, *Nature (London)*, 398, p. 189 (1999).

[BEL, 1964] J. S. Bell, “On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox”, *Physics (Long Island City, N.Y.)*, 1, p. 195 (1964).

[BEL, 1987] J. S. Bell, “Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics”, Cambridge University Press (1987).

[CHR, 2002] W. Christiaens, “Some notes on Aerts’ interpretation of the EPR-paradox and the violation of Bell-inequalities”, pp. 259-286, in “Probing the Structure of Quantum Mechanics: Nonlocality, Computation and Axiomatics”, World Scientific, Singapore, 394 pp. (2002).

[CON, 2009] R. Conn Henry, “The real scandal of quantum mechanics”, *Am. J. Phys.*, 77 (10), pp. 869-870 (2009).

[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).

[FEY, 1970] R. Feynman, “The Feynman Lectures on Physics”, Addison Wesley Longman, 1552 pp. (1970).

[FEY, 1992] R. P. Feynman, “The Character of Physical Law”, Penguin Books (1992).

[HOB, 2005] A. Hobson, “Electrons as field quanta: A better way to teach quantum physics in introductory general physics courses”, *Am. J. Phys.*, 73 (7), pp. 630-634 (2005).

[HOB, 2009a] A. Hobson, “Response to ‘The scandal of quantum mechanics’, by N. G. van Kampen”, *Am. J. Phys.*, 77 (4), p. 293 (2009).

[HOB, 2009b] A. Hobson, “Response to ‘The real scandal of quantum mechanics’, by R. Conn Henry”, *Am. J. Phys.*, 77 (10), pp. 870-871 (2009).

[KAM, 2008] N. G. van Kampen, “The scandal of quantum mechanics”, *Am. J. Phys.*, 76 (11), pp. 989-990 (2008).

[PIR, 1976] C. Piron, “Foundations of Quantum Physics”, W. A. Benjamin Inc., Massachusetts (1976).

[PIR, 1978] C. Piron, “La Description d’un Système Physique et le Présupposé de la

Théorie Classique”, *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 3, pp. 131-152 (1978).

[PIR, 1990] C. Piron, “Mécanique quantique. Bases et applications”, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Second corrected edition 1998), First Edition (1990).

[PIR, 1999] C. Piron, “Quanta and Relativity: Two Failed Revolutions”, p. 107, in “The White Book of ‘Einstein Meets Magritte’”, Edited by Diederik Aerts, Jan Broekaert and Ernest Mathijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 274 pp. (1999).

[PRE, 2002] G. Preparata, “An Introduction to Realistic Quantum Physics”, World Scientific Publishing (Singapore), 74 pp. (2002).

[SME, 2005] S. Smets, “The modes of physical properties in the logical foundations of physics”, *Logic and Logical Philosophy*, 14, pp. 37-53 (2005).

[WEI, 1983] S. Weinberg, quoted in Heinz Pagels’s “The Cosmic Code” (Bantam Books, New York, 1983), p. 239.

**Nota:** la versione originale in inglese di questo articolo di Massimiliano Sassoli de Bianchi è stata precedentemente pubblicata (senza le illustrazioni) con il titolo: “Ephemeral properties and the illusion of microscopic particles”, *Found. of Sci.* 16, pp. 393-409. Doi: 10.1007/s10699-011-9227-x.

Copyright © 2011. Riprodotto con l’autorizzazione di Springer Science+Business Media.

La traduzione dall’inglese all’italiano è a cura dell’autore.

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.

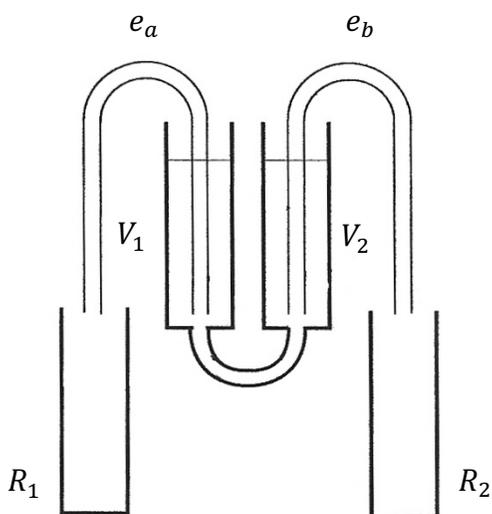
Sono passati quasi dieci anni da allora, e comprendiamo oggi molto più chiaramente quali siano le possibili conclusioni da trarre. Ma per noi fu grazie a tali esempi che ci fu possibile capire tali conclusioni. Pertanto, vogliamo arrivare ora al punto che abbiamo dichiarato essere uno degli scopi di 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 disequaglianze di Bell.

Oltre alle disequaglianze 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 disequaglianze 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 diseguaglianze di Bell.

Vorremmo ora determinare quale sia la ragione fisica della violazione delle diseguaglianze 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], classificherebbero 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 diseguaglianze 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 disequaglianze 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 disequaglianze 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 disequaglianze 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.

## A proposito di AutoRicerca

*AutoRicerca* è una pubblicazione la cui missione è diffondere scritti di valore sul vasto tema della *ricerca interiore ed esteriore*.

*AutoRicerca* si pone al di fuori delle abituali categorie editoriali: non è la solita rivista di facile divulgazione, dai contenuti “fast-food”, ma nemmeno un “journal accademico”, rivolto ai soli specialisti.

*AutoRicerca* offre ai suoi lettori articoli di notevole livello, selezionati e controllati personalmente dall'editore e tradotti dal suo team poliglotta. Si tratta di testi che pur esigendo un notevole impegno per essere assimilati (vanno studiati, non letti!), restano pur sempre accessibili al lettore generico, purché animato di buona volontà e desideroso di imparare qualcosa di nuovo.

*AutoRicerca* è una pubblicazione d'avanguardia, non solo per i contenuti, ma anche per le modalità con cui la rivista viene stampata e diffusa, avvalendosi dei moderni sistemi di pubblicazione “on-line”, che consentono di offrire, a costi ragionevoli, un prodotto sia in versione elettronica, sia in versione classica cartacea. Questo modo di procedere presenta numerosi vantaggi. Anzitutto, riducendo al minimo l'investimento dell'editore, svincola i fruitori della rivista dall'obbligo di un abbonamento, lasciandoli così liberi di acquistare solo quei numeri il cui contenuto è di loro interesse. Consente inoltre di optare per la sola la versione elettronica, che essendo facilmente memorizzabile e catalogabile sul computer, risolve il problema della notoria mancanza di spazio nelle biblioteche dei lettori-autoricercatori.

Non meno importante è poi il fatto che la versione elettronica consenta di risparmiare qualche albero di questo bellissimo pianeta. In ogni caso, per coloro che non desiderano rinunciare all'esperienza tattile di una rivista cartacea c'è sempre, in ogni momento, la possibilità di ordinare, farsi stampare e spedire direttamente a casa, con la facilità di un click, anche un singolo volume della rivista. Questo intendiamo quando affermiamo che non è necessario un

AutoRicerca 2, 2011, pp. 110-111

abbonamento per ricevere *AutoRicerca*.

Se desiderate essere informati sulle nuove uscite, non avete che da visitare, di tanto in tanto, il sito <https://autoricerca.ch>, e controllare se un nuovo numero è stato pubblicato. Oppure, più comodamente, potete iscrivervi (sempre allo stesso indirizzo) alla mailing-list del LAB (*Laboratorio di Autoricerca di Base*), così da essere sempre avvertiti per tempo delle novità.

## Numero precedente

**Numero: 1, Anno: 2011, Titolo: Stato Vibrazionale  
Pagine: 174, Seconda edizione: marzo 2024**

### Indice numero 1

A proposito degli autori	5
Prefazione alla nuova edizione <i>Sara Chessa</i>	7
Editoriale <i>Massimiliano Sassoli de Bianchi</i>	11
Dal pranayama dello Yoga all'OLVE della Coscienziologia: proposta per una tecnica integrativa <i>Massimiliano Sassoli de Bianchi</i>	19
Un approccio alla ricerca sullo stato vibrazionale attraverso lo studio dell'attività cerebrale <i>Wagner Alegretti</i>	59
Attributi misurabili della tecnica dello stato vibrazionale <i>Nanci Trivellato</i>	99
Glossario della Coscienziologia	145