

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.

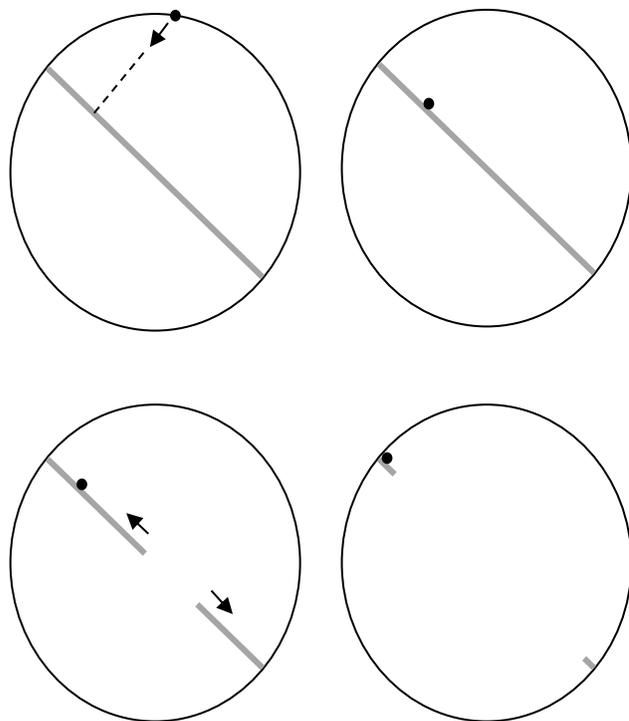


Figura 1 Rappresentazione schematica dell'esperimento della *macchina quantistica* di Aerts. A seconda del punto di rottura dell'elastico e della posizione del punto materiale, quest'ultimo verrà trascinato verso uno dei due punti estremi dell'elastico, determinando l'esito dell'esperimento.

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).

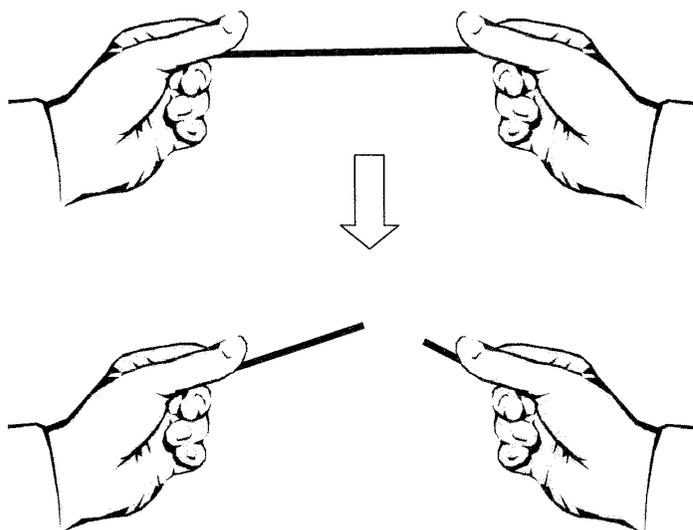


Figura 2 Il test del mancinismo di uno spaghetti. Il frammento più lungo rimane nella mano sinistra, confermando in questo caso la proprietà del mancinismo.

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*¹.

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!

¹ 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 rompiamo 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 “ ϵ -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”² (vessel of water model) [AER, 1984, 1990], o le sue “macchine quantistiche connesse da un'asta rigida” [AER, 2000].

² 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” umano³, 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

³ *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 Mathijs, 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.