

AUTO RICERCA

Una realtà non-spaziale

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Numero 24
Anno 2022
Pagine 15-62

LAB

Riassunto

Solitamente si presume, e si dà per scontato, che la realtà sia completamente contenuta nello spazio. Tuttavia, quando osserviamo da vicino lo strano comportamento delle entità del micromondo, siamo costretti ad abbandonare tale pregiudizio e riconoscere che lo spazio è solo una momentanea cristallizzazione di un piccolo teatro per la realtà, dove le entità materiali possono prendere posto e incontrarsi. Più precisamente, fenomeni come l'*entanglement quantistico*, gli effetti di *interferenza quantistica* e l'*indistinguibilità quantistica*, se analizzati attentamente, ci indicano che nella nostra realtà fisica c'è molto di più di ciò che sono in grado di scorgere i nostri occhi umani tridimensionali. Ma se gli elementi costitutivi della nostra realtà fisica sono non-spaziali, che cosa significa? Possiamo comprendere qual è la natura di un'entità non-spaziale? E se sì, quali sono le conseguenze per la nostra visione del mondo in cui viviamo e ci evolviamo come specie? Questo articolo è stato scritto in considerazione di uno degli obiettivi del *Center Leo Apostel for Interdisciplinary Studies*, quello di un'ampia diffusione della conoscenza scientifica. Pertanto, si rivolge a un pubblico trasversale di lettori, sia accademici che non accademici, sperando di stimolare in questo modo il dialogo interdisciplinare sulle questioni fondamentali della scienza.

1 Introduzione

Secondo la famosa allegoria della *caverna di Platone*, siamo come prigionieri incatenati da tempi immemori in una caverna oscura, che guardano e studiano unicamente delle ombre tremolanti su una *parete*, credendo che quelle ombre e la superficie della parete siano tutto ciò che esiste nella nostra realtà.

Nell'allegoria di Platone, si distinguono due livelli: il *livello empirico*, o *spaziotemporale*, che è quello delle *apparenze*, e il *livello ontologico*, considerato come quella parte del mondo che rimane non percepita dai nostri sensi ordinari, ma che in qualche modo può essere compresa dal nostro intelletto. In altre parole, il livello ontologico è quello delle “entità reali”, mentre il livello empirico è quello delle “apparenze di queste stesse entità reali”.

Per dirla in altro modo, secondo l'allegoria di Platone esisterebbero delle entità di dimensioni superiori, la cui realtà sarebbe più “profonda”, che proiettano ogni sorta di ombra sulla “parete” di dimensioni inferiori della rappresentazione spaziale (o spaziotemporale) di nostra umana costruzione.

Un'allegoria simile è stata proposta dal maestro di scuola inglese *Edwin Abbott Abbott*, nel suo “*Racconto fantastico a più dimensioni*” (Abbott, 1884), un romanzo pubblicato nel 1884 e scritto per criticare la cultura vittoriana. Secondo l'allegoria di Abbott (che è stata famosamente ripresa da *Carl Sagan* nella sua serie TV “*Cosmos*” del 1980, per spiegare le difficoltà che abbiamo nel visualizzare un mondo a quattro dimensioni), siamo un po' come i residenti di una *Flatlandia*, cioè degli esseri bassodimensionali che vivono in uno “strato sottile” di una realtà molto più vasta; uno strato costantemente attraversato da entità altopdimensionali, che non possiamo percepire nella loro interezza.

Immaginate ad esempio un lago in una bella giornata di primavera. La sua superficie definisce tre mondi distinti. C'è il mondo di sotto, piuttosto denso, popolato da creature acquatiche tridimensionali come i pesci; c'è il mondo di sopra, più rarefatto, anch'esso popolato da creature tridimensionali, come gli uccelli; e

c'è il “mondo piatto di mezzo”, definito dalla superficie stessa del lago, una realtà di densità intermedia popolata da creature essenzialmente bidimensionali, come dei piccoli insetti senza ali che non abbandonano mai quel sottile strato di acqua.¹

Secondo Abbott, noi umani siamo simili alle creature piatte di questo mondo di mezzo, con tutti gli svantaggi percettivi (e cognitivi) che ciò comporta.

Immaginate di essere uno degli insetti che vivono al confine tra il mondo di sopra e il mondo di sotto, non sapendo di trovarvi alla frontiera di realtà di dimensione superiore, avendo sempre vissuto in un ambiente bidimensionale, con un corpo bidimensionale, senza la possibilità di sperimentare direttamente la terza dimensione, o la quarta, la quinta, ecc. (vedi la Figura 1).

Supponete quindi che un'entità tridimensionale del mondo di sopra, ad esempio una mano umana, immerga le sue cinque dita nell'acqua. Dalla prospettiva limitata di una creatura del mondo di mezzo, vedrete apparire dal nulla cinque strane entità, più o meno sferiche, che per un momento si manifesteranno nel vostro spazio (vedi la Figura 2).



Figura 1 L'allegoria di Flatlandia di Abbott, qui esemplificata come il mondo di mezzo definito dalla superficie bidimensionale di un lago.

¹ Naturalmente, i piccoli insetti senza ali che vivono sulla superficie del lago sono ancora delle entità tridimensionali; quindi, il nostro esempio va inteso in senso ideale, pensando agli insetti sulla superficie come veri e propri esserini bidimensionali, allo stesso modo degli abitanti di Flatland, nella novella di Abbott.

Sicuramente, confonderete quelle tracce effimere per delle entità individuali realmente bidimensionali, completamente separate e indipendenti l'una dall'altra. Tuttavia, dal punto di vista di un'iper-entità tridimensionale del mondo di sopra, è chiaro che quelle cinque entità sferiche non sono separate, ma interconnesse: fanno parte di un'entità tridimensionale unitaria e appaiono separate solo quando la loro struttura di più alta dimensione è viene osservata dalla prospettiva limitata di una rappresentazione bidimensionale.

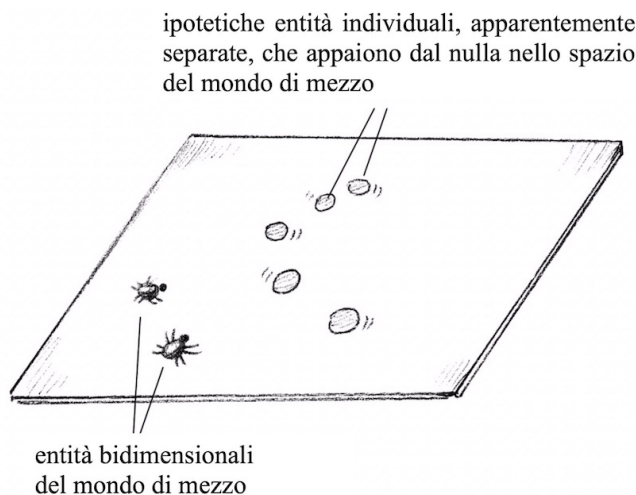


Figura 2 Gli abitanti di un mondo bidimensionale potrebbero scambiare una singola entità tridimensionale unitaria, come una mano, come cinque entità separate, che si muovono indipendentemente le une dalle altre.

Quello che cercheremo di fare in questo articolo, è spiegare perché Platone e Abbott hanno avuto una percezione corretta della nostra realtà, quando nelle loro sconcertanti allegorie hanno intuito che molto accade “dietro le quinte” della nostra rappresentazione spaziale, a nostra insaputa. Cercheremo altresì di evidenziare ciò che Platone e Abbott non sono stati in grado di intuire: la natura delle entità che popolano i “dietro le quinte” della nostra rappresentazione spaziale, e come siano in grado di relazionarsi con quest’ultima.

Ora, se è vero che lo spazio (e più generalmente lo spazio-tempo) non è il contenitore della nostra realtà fisica, ma solo uno

specifico teatro in cui si svolge una rappresentazione molto “parrocchiale”, la prima cosa che dobbiamo chiederci è come siamo arrivati a considerare tale rappresentazione in primo luogo, per poi scambiarla per tutto ciò che esiste. In altre parole: *come abbiamo costruito il nostro teatro spaziale?*

Ciò ha a che fare con il fatto che, come specie, ci siamo evoluti da centinaia di migliaia di anni in una nicchia molto particolare della nostra realtà: quella della superficie del nostro bellissimo pianeta Terra. Come diceva *Carl Sagan*, contemplando l'immagine del nostro pianeta scattata nel 1990 dalla sonda spaziale *Voyager 1*, da una distanza di circa 6 miliardi di chilometri, “la Terra è un piccolissimo palcoscenico in una vasta arena cosmica”.

Questo è certamente vero, se confrontiamo il nostro pianeta con l'immensa “oscurità cosmica” spaziale in cui è immerso. Ma il nostro pianeta, e le entità con cui abbiamo interagito alla sua superficie per mezzo dei nostri corpi densi, sono anch'essi, a loro volta, delle “vaste arene cosmiche”, se li paragoniamo alle cosiddette “particelle” microscopiche che li formano. Con questo intendiamo sottolineare che siamo stati attorniti da entità fisiche molto particolari, di dimensioni macroscopiche, e che dalle nostre molteplici interazioni con queste entità, che abbiamo sperimentato per mezzo dei nostri corpi umani densi in un ambiente piuttosto caldo, abbiamo iniziato moltissimo tempo fa la costruzione di una *concezione del mondo* (worldview) prototipica, nel tentativo di ordinare le nostre esperienze in una *mappa coerente di relazioni*.

Da questa costruzione pre-culturale e pre-scientifica, è emersa una prima *vestizione e decorazione* della realtà, che ci ha permesso di identificare quelle sue parti che erano riconoscibili come *aggregati di proprietà sufficientemente stabili*, dove per “stabili” intendiamo che le proprietà che caratterizzano tali aggregati sono in grado di rimanere *attuali* per un tempo sufficientemente lungo da permettere di essere facilmente osservate. Questi aggregati di proprietà relativamente permanenti (pensiamo a un pezzo di materia che abbia una data dimensione, peso, temperatura, ecc.) erano ciò che oggi chiamiamo, in fisica, *entità classiche* o *oggetti macroscopici*, o semplicemente *oggetti, corpi*, ecc., che includono anche gli enti astronomici che vediamo muoversi nel cielo, come la Luna e il Sole, obbedendo con buona approssimazione alle leggi della meccanica classica non-relativistica.

Si possono distinguere due *direzioni di penetrazione* fondamentali

nel nostro processo pre-culturale di vestizione e decorazione della realtà (Aerts & Aerts, 2004). Una direzione, che abbiamo appena menzionato, è di *penetrazione in profondità*, attraverso la quale abbiamo inizialmente identificato quei fenomeni che, secondo i nostri sensi, in particolare quelli della vista e del tatto (Aerts, 2014), si sono distinti rispetto agli altri, per la loro *disponibilità* a interagire con i nostri corpi e divenire parte delle nostre esperienze, ma anche perché tale disponibilità è durata abbastanza a lungo da permetterci di averne delle multiple esperienze. In altri termini, per mezzo della nostra penetrazione in profondità della realtà, abbiamo riconosciuto l'esistenza di porzioni di essa che erano *esperienzialmente separate e stabili*.

La seconda direzione di penetrazione, che in un certo senso è complementare, può essere definita *penetrazione in larghezza*. Corrisponde al nostro sforzo di organizzare e ordinare il contenuto delle nostre esperienze con i diversi aggregati di proprietà stabili, vale a dire, con i diversi oggetti fisici che ci sono apparsi come separati, nel senso di non far parte di uno stesso aggregato e di non influenzarsi l'un l'altro in modo significativo. Questo processo di penetrazione in larghezza, attraverso il quale abbiamo identificato le relazioni più importanti ed evidenti tra queste entità appartenenti alle nostre esperienze ordinarie, può essere inteso come un *processo di ordinamento che dà origine a uno spazio*. E poiché le nostre esperienze pratiche le abbiamo avute essenzialmente con delle entità classiche, lo spazio relazionale che è emerso è quello che oggi chiamiamo *spazio euclideo tridimensionale*.

In altri termini, lo spazio può essere essenzialmente considerato come uno *specifico teatro della realtà che è emerso quando un determinato insieme di esperienze è stato adeguatamente ordinato e organizzato*, cioè quando tali esperienze sono state messe in relazione le une con le altre (Aerts & Aerts, 2004). La ragione per cui un tale specifico *teatro della realtà* è stato scambiato nel tempo per un suo contenitore sostanziale, di natura fondamentale (una posizione mantenuta ancora oggi da molti se non dalla maggioranza degli scienziati), è facile da capire: con il passare del tempo, ci siamo semplicemente dimenticati della nostra costruzione, e poiché la tipologia delle nostre esperienze è rimasta sostanzialmente invariata, è stato facile e naturale iniziare a credere che tutta la nostra realtà avrebbe trovato un posto in tale teatro, cosicché il teatro e il suo contenuto, e la

realtà, sarebbero in ultima analisi la stessa cosa.

Questa credenza, tuttavia, diventa difficile (se non impossibile) da sostenere ai nostri giorni, in quanto le scoperte della fisica moderna ci hanno permesso di accedere ad esperienze del tutto nuove, in contesti sperimentali controllati, con entità che si comportano in modo molto diverso da quelle individuate nel nostro processo iniziale di ‘penetrazione in profondità’, e che piuttosto ostinatamente non si sono prestate ad essere incluse, o pienamente incluse, nello spazio relazionale che è stato costruito fino a quel momento.

2 Entanglement e non-spazialità

Un esempio paradigmatico della rottura della nostra costruzione di un teatro spaziale euclideo è la scoperta dell'*entanglement quantistico*. A livello teorico, fu inizialmente discusso da *Einstein, Podolsky e Rosen* (1935), oltre che da *Schrödinger* (1935), e la sua esistenza è stata stabilmente accertata in numerosi esperimenti, a partire da quelli storici eseguiti con i fotoni, nel 1982, dal gruppo francese di *Alain Aspect* (Aspect et al, 1982; Aspect, 1999).

In poche parole, due entità sono in uno *stato entangled* se possono essere spazialmente separate da distanze arbitrarie e tuttavia rimanere invisibilmente interconnesse, tanto da influenzarsi a vicenda, o comportarsi come se fossero un'unica entità. A dire il vero, la nozione di entanglement nella teoria quantistica non dipende in alcun modo dal fatto che le due entità siano spazialmente separate o meno, ma è indubbiamente quando questo accade che l'aspetto decisamente non-ordinario della “relazione di entanglement” si presenta in tutta la sua evidenza.

La ragione per cui l'entanglement è incompatibile con la nostra costruzione euclidea è molto semplice da capire. Come abbiamo detto, durante la nostra penetrazione in ampiezza della realtà, abbiamo costruito una rappresentazione spaziale delle diverse relazioni possibili tra le entità che siamo stati in grado di identificare. In questa rappresentazione, la nozione di *distanza spaziale* è stata usata anche per descrivere il *grado di separazione sperimentale* tra le entità, nel

senso che quanto maggiore è la loro separazione spaziale tanto minori sono le possibili influenze reciproche (*principio di località*).

Ora, due entità (chiamiamole entità *A* ed entità *B*) sono *sperimentalmente separate* se quando testiamo una proprietà sull'entità *A* il risultato del test non dipenderà (in senso ontologico) da altri test che potremmo eseguire (simultaneamente o in modo sequenziale) sull'entità *B*, e viceversa (Aerts, 1984). Per le entità ordinarie, cioè classiche/spaziali, ciò è garantito quando la distanza che separa le entità è sufficiente a far sì che nessun segnale possa avere il tempo di propagarsi tra loro, per possibilmente influenzare i risultati dei rispettivi test, prima della loro completa esecuzione. E più in generale, ciò è garantito ogni volta che non esiste un 'terzo elemento di realtà' che colleghi in qualche modo le due entità. E naturalmente, se tale elemento di collegamento fosse presente e rilevabile, non diremmo più che le due entità sono spazialmente separate, ma che formano un tutt'uno interconnesso.

Quindi, *separazione spaziale* e *separazione sperimentale* erano in un certo senso considerate equivalenti, poiché la prima era precisamente usata per caratterizzare la seconda, nel corso della costruzione del nostro teatro euclideo. Ma spieghiamo ora come si possa mettere in evidenza la presenza di entanglement (intricazione) negli esperimenti condotti nei laboratori di fisica. Lo si fa analizzando le possibili *correlazioni* risultanti dall'esecuzione di *misure congiunte* (cioè di osservazioni congiunte) effettuate su dei sistemi compositi. Si tratta però di un problema delicato, poiché anche delle entità sperimentalmente separate possono avere delle proprietà tra loro fortemente correlate. È sufficiente infatti che le entità in questione fossero connesse tra loro in passato e che successivamente siano state disconnesse tramite un qualche processo fisico, in modo tale che la disconnessione abbia *creato delle correlazioni*.

È stato il grande merito del fisico nordirlandese *John Bell* di aver proposto delle particolari disuguaglianze, oggi note con il nome di *disuguaglianze di Bell* (Bell, 1964, 1971), che contengono solo grandezze sperimentalmente accessibili e che sono in grado di verificare se le correlazioni osservate erano già esistenti prima delle misure congiunte, quindi se sono state semplicemente *scoperte* a seguito della loro esecuzione, o se tali correlazioni erano solo *potenziali* prima di dette misure, quindi sono state letteralmente *create*

nel corso della loro esecuzione.

Il fisico belga *Diederik Aerts* ha proposto di chiamare le correlazioni associate a dei processi di scoperta *correlazioni del primo tipo*, e le correlazioni associate a dei processi di creazione *correlazioni del secondo tipo*, essendo quest'ultime quelle caratteristiche dell'entanglement quantistico (Aerts, 1990). Grosso modo, si può dire che le correlazioni del secondo tipo possono violare le disuguaglianze di Bell, quindi rivelare la presenza di entanglement, mentre le correlazioni del primo tipo non possono violare le disuguaglianze di Bell, quindi descrivono una situazione di separazione sperimentale.

Consideriamo un esempio famoso di correlazioni del primo tipo, cioè di correlazioni che non portano la firma dell'entanglement quantistico: *i calzini di Bertlmann* (Bell, 1981). Il dott. Bertlmann era un collega di Bell, che amava sempre indossare calze di colori differenti. Era certamente del tutto imprevedibile il colore che avrebbe avuto il calzino di un dato piede in un dato giorno, ma se si osservava che il primo calzino era, ad esempio, rosa, si poteva subito ottenere l'informazione che l'altro calzino sarebbe stato non-rosa (vedi la Figura 3).

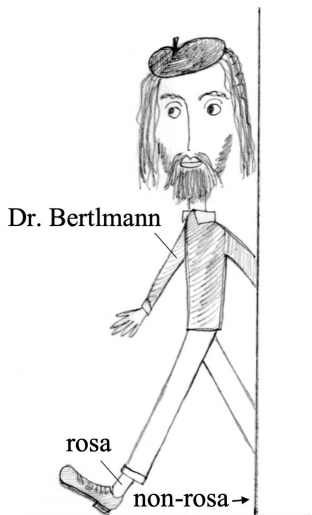


Figura 3 Una descrizione della situazione dei calzini di Bertlmann, come descritta nell'articolo di Bell del 1981, intitolato "Bertlmann's socks and the nature of reality", ossia, "I calzini di Bertlmann e la natura della realtà" (Bell, 1981).

Naturalmente, non c'è qui alcun mistero: il colore dei due calzini preesisteva alla loro osservazione; non è qualcosa che è stato creato dall'osservazione, ma unicamente scoperto grazie ad essa.

Possiamo chiederci: è possibile fornire un esempio semplice anche di un sistema in cui le correlazioni sarebbero del secondo tipo, cioè tipiche dell'entanglement quantistico? La risposta è affermativa. Considerate un esperimento in cui due persone (chiamiamole Alice e Bob, come è tradizione in fisica) afferrano semplicemente le due estremità di una banda elastica di lunghezza L , e tirandole congiuntamente rompono la banda in due frammenti (Aerts, 2005; Sassoli de Bianchi, 2013a). Si tratta chiaramente una situazione in cui le correlazioni sono del secondo tipo, in quanto le lunghezze dei due frammenti vengono create in modo del tutto imprevedibile dall'azione congiunta di Alice e Bob (vedi la Figura 4). Inoltre, tali lunghezze sono sempre perfettamente correlate, in quanto la loro somma deve necessariamente essere uguale alla lunghezza L dell'elastico intero.

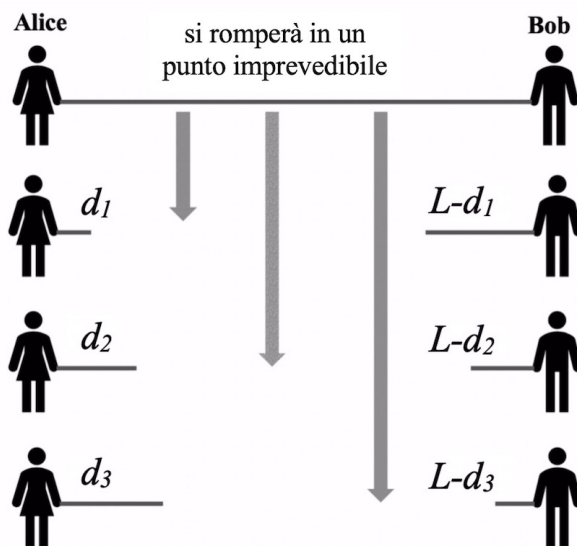


Figura 4 Tre possibili esiti di un processo di rottura di una banda elastica. Sebbene le lunghezze ottenute dei due frammenti possano essere diverse a ogni "esperimento di rottura", sono nondimeno sempre perfettamente correlate, dato che la loro somma è necessariamente uguale alla lunghezza totale L dell'elastico intero.

È importante ricordare che le *misure quantistiche*, cioè le *osservazioni quantistiche*, sono processi in grado di creare quelle stesse proprietà che si pongono di testare, cioè osservare, dato che in generale si tratta di proprietà che sono solo potenziali prima della loro osservazione. Di conseguenza, quando le osservazioni vengono eseguite in modo congiunto su un dato sistema, queste possono creare (attualizzare) delle correlazioni che erano solo potenziali prima dell'osservazione congiunta.

Alice e Bob che rompono un elastico con le loro azioni congiunte, creando così diverse possibili coppie correlate di risultati, come ad esempio

$$(d_1, L - d_1), (d_2, L - d_2), (d_3, L - d_3), \dots$$

è una perfetta esemplificazione di questa situazione, e in effetti è possibile dimostrare che un processo di rottura di bande elastiche è perfettamente in grado di violare le disuguaglianze di Bell (Aerts, 2005; Sassoli de Bianchi, 2013a, Aerts et al, 2019).

Per chiarire fino in fondo la differenza tra una situazione in grado di creare delle correlazioni significative, rispetto a una situazione in cui ciò non avviene, consideriamo un altro esempio molto semplice. Immaginate che Alice e Bob tengano ciascuno un dado nelle proprie mani. Se tirano allo stesso tempo i loro dadi, ad esempio su un tavolo, otterranno un paio di facce superiori, che corrispondono all'esito del loro "esperimento di rotolamento" congiunto. Supponendo che i due dadi non siano truccati, e considerando che sono entità sperimentalmente separate, che non si influenzano in alcun modo, si otterranno in questo modo 36 coppie di possibili esiti distinti, tutti con la stessa probabilità (vedi la Figura 5). E questa è chiaramente una situazione in cui non ci sono correlazioni.

Immaginiamo ora che i due dadi siano collegati in qualche modo, così da formare un "sistema doppio di dadi entangled". Lo si può fare collegandoli *attraverso lo spazio* per mezzo di un'asticella rigida, le cui due estremità sono attaccate al centro di due delle loro facce opposte, come indicato nella Figura 6. La presenza dell'asticella permette ad Alice e Bob di rotolare il loro dado unicamente lungo la stessa direzione, perpendicolarmente all'asticella, cosicché questa volta solo 4 coppie di esiti distinti potranno essere ottenuti (vedi la

Figura 6). Abbiamo quindi un processo dove delle correlazioni vengono create in modo del tutto imprevedibile, e ancora una volta si tratta di una situazione in cui le disuguaglianze di Bell possono essere facilmente violate (Sassoli de Bianchi, 2013b, 2014).

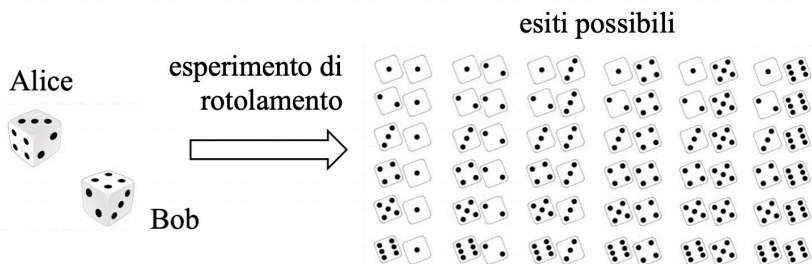


Figura 5 Facendo rotolare due dadi non connessi tra loro, è possibile ottenere 36 coppie equiprobabili di risultati differenti. Sebbene per ogni dado una faccia superiore viene singolarmente creata in modo del tutto imprevedibile, i risultati ottenuti per ciascun dado sono indipendenti l'uno dall'altro, quindi nessuna correlazione viene creata dall'esperimento di rotolamento congiunto e le disuguaglianze di Bell non possono essere violate.

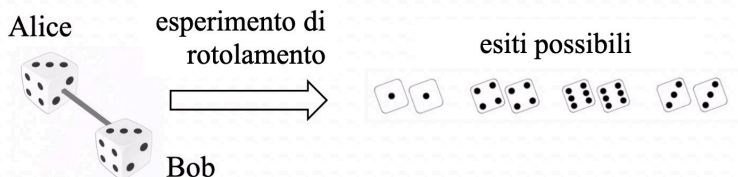


Figura 6 Collegando i due dadi è possibile attualizzare solo 4 coppie equiprobabili di risultati. L'esperimento di rotolamento congiunto è allora in grado di creare delle correlazioni che violano le disuguaglianze di Bell.

Gli esempi sopra riportati non dovrebbero essere considerati solo come degli utili strumenti didattici: permettono infatti di superare il pregiudizio secondo cui una violazione delle disuguaglianze di Bell riguarderebbe unicamente il micromondo (Aerts et al, 2000, Aerts & Sassoli de Bianchi, 2018). Le entità macroscopiche classiche possono anch'esse violare le disuguaglianze, se gli esperimenti congiunti eseguiti da Alice e Bob sono capaci di *attualizzare delle correlazioni potenziali*, il che sarà generalmente il caso se l'entità composita su cui agiscono forma un tutt'uno, a causa di un

collegamento tra le sue componenti. Nel caso della banda elastica, la connessione è fornita dalla sostanza stessa dell'elastico, quando integro, e nel caso dei due dadi dall'asticella. Naturalmente queste connessioni sono elementi di realtà che possiamo rappresentare e rilevare all'interno del nostro spazio euclideo tridimensionale. In altre parole, sono *connessioni spaziali*.

Qui si evince la differenza fondamentale tra due dadi entangled per mezzo di un'asticella rigida, o due frammenti elastici potenziali entangled in una banda elastica integra, e la situazione di due micro-entità entangled, come due elettroni entangled, o due fotoni entangled. Infatti, in questi ultimi casi le connessioni che creano le correlazioni rimangono a noi nascoste, non solo perché matematicamente parlando non possono essere rappresentate in uno spazio tridimensionale, ma anche perché, a livello sperimentale, non c'è nulla di rilevabile nello spazio tra le due micro-entità entangled spazialmente separate. Nonostante questo, le due entità possono dare origine a delle correlazioni del secondo tipo, o comportarsi come se formassero un'unica entità indivisa, e in questo modo dare l'impressione di potersi influenzare a distanza.

Come è noto, Einstein descrisse questa sconcertante situazione con il termine di "azione spettrale a distanza" (spooky action at a distance) e oggi i fisici la indicano usando il termine di *non-località*. Tuttavia, se l'entanglement quantistico esprime una forma di connettività che non si esplica nello spazio, cioè che è la conseguenza della presenza di connessioni non-spaziali, il termine corretto da utilizzare non è *non-località*, ma *non-spazialità*. Ciò significa che le entità microscopiche non sarebbero generalmente presenti nello spazio, ma sarebbero attratte nello spazio solo quando interagiscono con entità macroscopiche, come gli apparati di misura, o quando formano aggregati macroscopici in condizioni standard (Aerts, 1999). E poiché gli stati entangled sono la stragrande maggioranza degli stati fisici, dobbiamo concludere che la stragrande maggioranza della nostra realtà fisica sarebbe di tipo non-spaziale.

Va detto tuttavia che considerare che le violazioni delle disuguaglianze di Bell siano la conseguenza di correlazioni del secondo tipo rimane ancora oggi una visione non comune, anche se quest'ultime sono implicite nel formalismo quantistico. Ciò significa che la maggior parte dei fisici continua a considerare oggi che per spiegare queste violazioni sia necessario evocare una qualche sorta di

“meccanismo di influenza”. Tuttavia, se si suppone che tali influenze si propaghino nello spazio, allora devono farlo a una velocità superluminale, e si può dimostrare che tale velocità dovrebbe superare quella della luce di almeno quattro ordini di grandezza (Salart et al, 2008; Cocciaro et al, 2011).

Questa possibilità di influenze superluminali è generalmente considerata accettabile perché la meccanica quantistica, nella sua formulazione e interpretazione standard, è protetta da possibili conflitti con la causalità relativistica dalle cosiddette “condizioni di non-comunicazione” (*no-signaling conditions*) sulle correlazioni quantistiche (dette anche “leggi marginali”, in inglese *marginal laws*). Queste affermano che le probabilità quantistiche devono obbedire a determinate relazioni, che impediscono precisamente ad Alice e Bob di usare i loro dati statistici per comunicare tra loro a una velocità effettiva superluminale.

Tuttavia, nonostante l'esistenza di queste condizioni di non-comunicazione, un'analisi più attenta mostra che le correlazioni risultanti da influenze che si propagherebbero nello spazio a velocità superluminale finita possono sempre essere sfruttate per ottenere delle comunicazioni a velocità superiori a quella della luce (Coretti et al, 2011; Bancal et al, 2012). Quindi, per usare le parole del fisico svizzero *Nicolas Gisin* e collaboratori (Bancal et al, 2012):²

“Se vogliamo preservare la non-comunicazione, ciò indica che la non-località quantistica deve necessariamente mettere in relazione discontinua parti dell'universo che sono arbitrariamente distanti. Questo dà ulteriore peso all'idea che le correlazioni quantistiche sorgano in qualche modo al di fuori dello spazio-tempo, nel senso che nessuna storia nello spazio e nel tempo può descrivere come esse avvengano.”

In altre parole, una spiegazione delle correlazioni quantistiche in termini di influenze che si propagano nello spazio, a una determinata velocità, sembra condurre a un conflitto insanabile con la relatività e aprire la porta ai paradossi temporali. Quindi, o si rimane nella posizione scomoda di non disporre di una spiegazione

² “If we want to keep no-signalling, it shows that quantum non-locality must necessarily relate discontinuously parts of the universe that are arbitrarily distant. This gives further weight to the idea that quantum correlations somehow arise from outside spacetime, in the sense that no story in space and time can describe how they occur.”

per il fenomeno dell'entanglement, o si accetta che esso abbia a che fare con la non-spazialità e le correlazioni del secondo tipo, cioè con delle correlazioni che fanno riferimento a una causa comune che non è ancora attuale al momento di una misura congiunta, ma che viene attualizzata da quest'ultima in modo istantaneo e imprevedibile.

3 Sovrapposizione e non-spazialità

Ci si potrebbe chiedere a questo punto se la non-spazialità sia solo un aspetto della nostra realtà fisica, che emerge quando le entità interagiscono tra loro e, come conseguenza della loro interazione, entrano in un cosiddetto stato entangled. In altre parole, quando ad esempio degli elettroni non sono tra loro entangled, ma in cosiddetti *stati separabili*, possiamo considerarli nuovamente come delle pure entità spaziali, che si comportano come particelle o onde (a seconda del contesto sperimentale)?

Per comprendere perché anche questa prospettiva è insostenibile, concentriamoci su una proprietà molto specifica delle micro-entità quantistiche, il loro *spin*, che è solitamente (anche se impropriamente) descritto come un *momento angolare intrinseco* che permette alle entità spinoriali di comportarsi come dei *micro-magneti* (cioè dei microscopici *dipoli magnetici*, con un polo nord e sud). Ci sono molte ragioni per cui questa descrizione non può essere considerata corretta. Una di esse è che la rotazione dovrebbe allora essere così rapida che se la micro-entità venisse equiparata a un corpuscolo con un determinato raggio, la sua periferia dovrebbe muoversi a velocità superluminale, in violazione del limite relativistico.

Consideriamo nondimeno che sia possibile associare una direzione nello spazio a ogni stato di rotazione di un elettrone (o di un neutrone, ecc.), cioè che l'idea che uno spin sia una proprietà spaziale, descrivibile come un micro-magnete con un determinato orientamento nello spazio, sia essenzialmente corretta [riguardo la nozione problematica di 'direzioni degli spin', si veda anche Aerts & Sassoli de Bianchi (2015a)]. Quindi, allo stesso modo in cui un

dipolo magnetico, quando ruotato di 360° (cioè di 2π), viene riportato nello stesso stato, ci si aspetterebbe che quando lo spin di un elettrone viene ruotato di 2π , venga a sua volta riportato nello stesso identico stato. Ma questo non è quello che succede e infatti è necessario ruotare uno spin di 4π (720°) affinché torni nel medesimo stato.

Questa non è solo un'ipotesi teorica, ma un fatto sperimentale che è stato evidenziato in alcuni bellissimi esperimenti condotti a metà degli anni Settanta del secolo scorso; non con degli elettroni, ma con dei neutroni. È interessante spiegare la logica di questi esperimenti, poiché ci rivelano molto circa la natura genuinamente non-spaziale delle micro-entità come i neutroni, e lo fanno in modo totalmente indipendente dal fenomeno dell'entanglement precedentemente descritto. Infatti, questi esperimenti sono stati eseguiti usando un singolo neutrone per volta, che viene fatto interferire con sé stesso in un modo che delle entità simili a dei corpuscoli o a delle onde non sono assolutamente in grado di fare.

Questi esperimenti fondamentali furono condotti dai gruppi del fisico austriaco *Helmut Rauch* e del fisico americano *Samuel A. Werner* (Rauch et al., 1975; Werner et al., 1975), usando un cosiddetto *dispositivo LLL*, costituito da un singolo cristallo di silicio [per un'analisi teorica e concettuale di questi famosi esperimenti, vedi Sassoli de Bianchi (2017)]. Come descritto nella Figura 7, si tratta di una struttura monolitica formata da tre lame parallele, ricavate a partire da un *cristallo perfetto di silicio*. La dimensione del cristallo è tipicamente di 7 cm e lo spessore delle sue tre lame è inferiore a mezzo centimetro.

Ciò che è importante osservare per la nostra discussione è che negli esperimenti la velocità dei neutroni (ultrafreddi) entranti e la distanza tra di loro era tale che in media c'era tipicamente un solo neutrone che passava di volta in volta attraverso il dispositivo. Ora, a causa della geometria e dell'orientamento delle tre lame parallele di cristallo, ogni volta che un neutrone ne incontrava una, poteva solo muoversi lungo due percorsi distinti: uno corrispondente al neutrone che viene semplicemente trasmesso attraverso la lama, senza essere deviato, e l'altro con il neutrone che viene deviato di un determinato angolo, a causa della specifica geometria della struttura interna del cristallo. In altre parole, ogni incontro con una lama era caratterizzato da una *biforcazione*, dove il neutrone poteva

prendere solo due diversi percorsi possibili.

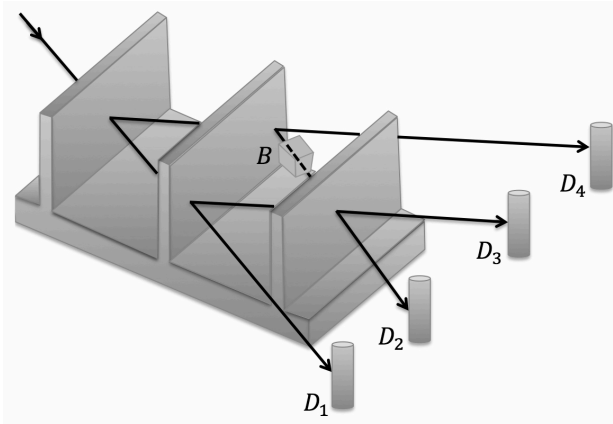


Figura 7 Una raffigurazione dell'interferometro ricavato dal cristallo di silicio (Si), in grado di suddividere il fascio incidente di neutroni in quattro fasci distinti, che vengono poi rilevati dai quattro rivelatori D_1 , D_2 , D_3 e D_4 . Lungo il percorso di uno dei due fasci interni, viene applicato un campo magnetico statico B , ben localizzato, al fine di ruotare lo spin del neutrone di un angolo proporzionale all'intensità del campo stesso.

Come descritto nella Figura 7, ciò significa che in seguito all'interazione con le tre lame, un neutrone poteva uscire dal dispositivo LLL lungo quattro percorsi distinti, con la sua presenza che veniva rivelata dai corrispondenti quattro rivelatori D_1 , D_2 , D_3 and D_4 . Due di questi percorsi emergono dal dispositivo senza che vi sia stata un'interazione con la terza lama (corrispondente ai rivelatori D_1 e D_4), mentre gli altri due si ricombinano (cioè si *sovrappongono*) esattamente a livello della terza lama, per infine abbandonare la struttura cristallina in direzione dei rivelatori D_2 e D_3 .

L'idea dell'esperimento consisteva nel posizionare un campo magnetico (statico) ben localizzato lungo uno dei percorsi interni, in modo da ruotare lo spin del neutrone che lo attraversava di un dato angolo, proporzionale all'intensità del campo magnetico applicato. Se i neutroni (entrando e uscendo dal cristallo LLL, uno alla volta) avessero seguito uno, e solo uno, dei possibili percorsi, la presenza del campo magnetico non poteva influenzare le probabilità con cui i diversi rivelatori avrebbero rivelato di volta in

volta la presenza del neutrone. Tuttavia, poiché due dei percorsi si ricombinano a livello della terza lama, la meccanica quantistica prevede che le *ampiezze di probabilità* ad essi associate debbano sovrapporsi, e siccome l'azione del campo magnetico è quella di variare la fase dell'ampiezza corrispondente, si assisterà a un *fenomeno di interferenza* il cui effetto è proporzionale alla rotazione dello spin del neutrone indotta dal campo magnetico [le cose sono a dire il vero un po' più complicate e ci riferiamo a Sassoli de Bianchi (2017) per una discussione più completa].

Sorprendentemente, ciò che è stato osservato, in accordo con le previsioni della teoria, è che l'intensità misurata dai rivelatori D_2 e D_3 mostrava una *periodicità 4π* rispetto all'angolo di rotazione dello spin (vedi la Figura 8), dimostrando che solo tramite una rotazione di 720° l'entità spinoriale di un neutrone veniva riportata esattamente nello stesso stato; una proprietà ovviamente impossibile da associare a qualsiasi entità spaziale come quelle con cui interagiamo nella nostra vita di tutti i giorni.

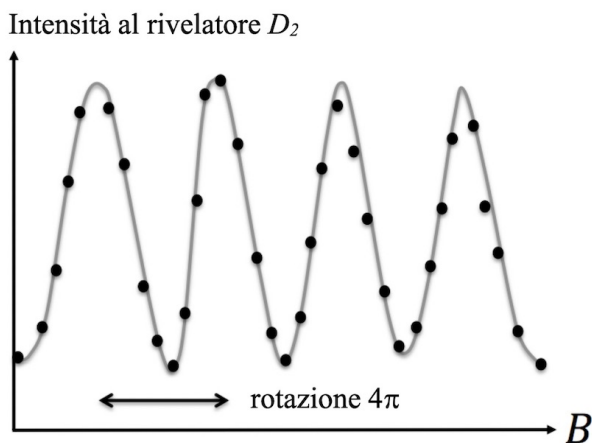


Figura 8 I dati ottenuti da Rauch et al (1975), che mostrano la tipica periodicità 4π dell'intensità misurata dal rivelatore D_2 , quando varia la forza del campo magnetico B , applicato sul percorso interno superiore, in modo da variare correspondentemente l'angolo di rotazione dello spin del neutrone, secondo il noto fenomeno di *precessione di Larmor*.

La messa in evidenza sperimentale di questa insolita 'simmetria 4π ' dello spin di un neutrone, invece della 'simmetria 2π ' di un oggetto spaziale ordinario, per quanto sorprendente e spettacolare, non è

certamente l'aspetto più singolare che è stato evidenziato in questi esperimenti, quando correttamente analizzati. Per spiegare cosa intendiamo, è utile ridimensionare il cristallo LLL ingrandendolo fino a 25 milioni di volte e proiettandolo sulla mappa europea [vedi anche la discussione su Aerts (1999) e Sassoli de Bianchi (2017)]. Come si può vedere nella Figura 9, i neutroni attraversano quindi la prima lama in Francia, vicino a Parigi, e una volta che hanno attraversato anche la seconda lama, il percorso settentrionale attraversa la Danimarca e la Svezia, mentre il percorso meridionale supera la Polonia e la Lituania, prima che entrambi i percorsi si ricombinino in Lettonia.



Figura 9 Una vista a volo d'uccello del dispositivo LLL, qui ingrandita di 25 milioni di volte e proiettata sulla mappa europea.

Ciò che è importante osservare è che i neutroni utilizzati in questi esperimenti di interferometria hanno una cosiddetta *lunghezza di coerenza* (longitudinale) che è tipicamente di *un milionesimo di centimetro*. Quando una tale lunghezza è ampliata 25 milioni di volte, si ottiene che la regione spaziale entro cui questi neutroni giganti

immaginarci (ridimensionati) possono essere influenzati, quando viaggiano lungo i loro percorsi possibili, è un piccolo cubo di soli 25 centimetri! Confrontando questo valore con la distanza di centinaia di chilometri che separa la Svezia dalla Polonia, è chiaro che non c'è modo di intendere tali neutroni che entrano nel dispositivo LLL come degli oggetti spaziali estesi (cioè come se fossero onde): si tratta realmente di entità simili a dei piccoli proiettili che si muovono lungo percorsi molto esigui.

Ma se questo fosse il caso, la simmetria 4π dello spin di un neutrone non potrebbe essere osservata, poiché ciò richiede che le ampiezze provenienti dai due diversi percorsi, quello che attraversa il campo magnetico localizzato in Svezia, e l'altro che passa sopra la Polonia (e quindi non attraversa il campo magnetico), si sovrappongano e interferiscano. Se un neutrone fosse veramente come un proiettile localizzato, considerando che solo un singolo neutrone alla volta entra nel dispositivo, allora o incontra il campo magnetico, se prende il percorso settentrionale, o non lo incontra, se prende il percorso meridionale. Ma in nessuna di queste due situazioni verrebbero osservati degli effetti di interferenza, e i rilevatori D_2 e D_3 farebbero semplicemente clic in media lo stesso numero di volte.

Di conseguenza, non possiamo affermare che un neutrone sia come un corpuscolo spaziale ben localizzato, che si muove lungo un singolo percorso, né possiamo affermare che sia come un'entità estesa diffusa nello spazio, perché la sua lunghezza di coerenza è molto piccola e può solo essere rilevato lungo percorsi molto esigui e mai nello spazio tra di essi. D'altra parte, un neutrone è in grado di esplorare, o "percepire", congiuntamente, nello stesso tempo, i diversi percorsi possibili, qualcosa che una entità genuinamente spaziale è ovviamente incapace di fare. In altre parole, questi rimarchevoli esperimenti di interferometria neutronica ci obbligano a spingerci oltre la dualità onda-particella e accettare che le micro-entità, come i neutroni, abbiano una natura non-spaziale, cioè possano trovarsi in stati non-spaziali, il che tuttavia non implica che il loro comportamento non sarebbe influenzato dalla presenza di apparati spaziali e locali.³

³ L'esperimento di Rauch da solo non può escludere la possibilità di una spiegazione spaziale alla de Broglie-Bohm, in termini di un'onda *pil* una particella,

Ricordiamo che in tempi più recenti, esperimenti di sovrapposizione quantistica sono stati eseguiti con successo usando anche delle entità molto più complesse dei neutroni, come delle grosse molecole, grazie all'avvento di interferometri “a onde di materia” (*matter-wave interferometers*) più avanzati e allo sviluppo di tecniche per ottenere dei fasci macromolecolari lenti. Per esempio, Gerlich et al (2011) sono stati in grado di porre delle entità molecolari composte da 430 atomi (legati tra loro in modo covalente) in stati di sovrapposizione rispetto al “braccio sinistro” e al “braccio destro” del loro interferometro, con una separazione di percorso di circa due ordini di grandezza superiore alle dimensioni di tali molecole.

Esperimenti simili furono eseguiti da *Sandra Eibenberger* e colleghi, a Vienna, ottenendo degli autentici stati di sovrapposizione quantistica per molecole giganti contenenti oltre 800 atomi (Eibenberger et al, 2013). Tutti questi esperimenti dimostrano chiaramente che la complessità interna di un'entità posta in uno stato di sovrapposizione spaziale non è affatto influenzata dal processo di delocalizzazione; quindi, l'idea che uno stato di sovrapposizione possa essere simile a una “diffusione dell'entità nello spazio secondo un modello ondulatorio” non può essere ritenuta corretta.

Sorge quindi la domanda: come possiamo immaginare delle entità di questo tipo? Facciamo un esempio che l'autore ha udito per la prima volta direttamente da *Constantin Piron*, quando

entrambe con piena realtà fisica; si veda ad esempio Vigier et al 1987. In un approccio di questo tipo, l'elemento corpuscolare è considerato sempre perfettamente localizzato su un cammino specifico dell'interferometro, mentre sull'altro cammino viaggerebbe solo una cosiddetta *onda vuota*, la cui presenza spiegherebbe gli effetti dell'interferenza. Tuttavia, l'ipotesi delle onde vuote è risultata incompatibile con gli esperimenti condotti da Mandel e collaboratori (Zou et al 1992) e, in generale, gli approcci basati su onde pilota tridimensionali non sono in grado di spiegare gli effetti di coerenza di ordine superiore (multi-corpuscolari). Quindi, a rigor di logica, l'esperimento di Rauch fornisce supporto all'ipotesi di non-spazialità solo se si considerano anche esperimenti aggiuntivi, al fine di eliminare le spiegazioni alternative a base di onde pilota spaziali. Si noti che lo stesso Bohm era consapevole che una descrizione puramente spaziale nei termini di un'onda pilota alla guida del movimento delle particelle avrebbe dovuto affrontare seri problemi, se applicata a più di una singola entità, poiché in tal caso il *potenziale quantistico* alla guida del loro movimento non poteva più agire in uno spazio euclideo tridimensionale, ma in uno spazio di configurazione di più alta dimensionalità (Bohm 1957).

insegnava il suo famoso corso di meccanica quantistica a Ginevra (Piron, 1990, Sassoli de Bianchi, 2017). Prendete una *banconota da 10 €* (l'esempio originale era con 10 franchi svizzeri). Quando è intatta, possiamo certamente dire che i 10 € si trovano da qualche parte nello spazio, come nel caso di un'entità classica ordinaria. Più precisamente, la posizione dei 10 € è esattamente la posizione della *banconota da 10 €*. Ma cosa succede quando la banconota viene strappata in due parti e i frammenti così ottenuti vengono separati spazialmente (vedi la Figura 10)?

Chiaramente, quando ciò accade, non possiamo dire più che i 10 € si trovino ancora da qualche parte nello spazio, anche se non possiamo nemmeno dire che sarebbero scomparsi completamente dallo spazio. Immaginate per un momento che i due frammenti di banconota siano collocati in due scatole diverse. In un certo senso, possiamo dire che i 10 € siano presenti nelle due scatole, ma è anche vero che non sono contenuti in nessuna di esse, il che è molto simile alla situazione di un neutrone che, in un certo senso, è simultaneamente presente in tutti i suoi diversi percorsi possibili, all'interno della struttura di un interferometro, sebbene al contempo non sia presente in nessuno di essi. Più precisamente, se considerate congiuntamente, le due scatole contengono certamente 10 €, ma solo in termini *potenziali*, i quali potranno essere *attualizzati* solo nel momento in cui i due frammenti verranno estratti dalle due scatole e ricongiunti al fine di formare una banconota integra.

Questa è ovviamente solo una metafora, ma sicuramente molto rivelatrice e interessante, poiché veicola due idee cruciali. Come abbiamo già accennato, c'è innanzitutto l'idea che la cosiddetta non-località quantistica sia espressione di non-spazialità, dove questo termine non va inteso nel senso che un'entità non-spaziale sarebbe necessariamente completamente scomparsa dal nostro teatro spaziale, poiché se ciò fosse vero sarebbe impossibile poi comprendere come una (micro) entità quantistica possa essere facilmente influenzata da delle (macro) entità classiche, come gli apparati di misura che usiamo nei laboratori di fisica, che sono certamente presenti in modo stabile nello spazio. In altre parole, le micro-entità, come i neutroni, sebbene non-spaziali, mantengono una specifica relazione con lo spazio, nel senso che rimangono sempre disponibili nell'essere rilevate al suo interno, con un *grado di disponibilità* che varia a seconda delle localizzazioni e dello stato di

preparazione. Nell'esperienza con l'interferometro a neutroni, ci sono dei percorsi molto stretti in cui il neutrone ha un altissimo grado di disponibilità nell'essere "risucchiato" nello spazio, mentre il grado di disponibilità è molto basso per le regioni che si trovano tra questi percorsi. Questi percorsi sono quindi come delle "finestre interdimensionali" attraverso le quali è possibile agire sui neutroni e accedere alla loro realtà non-spaziale.

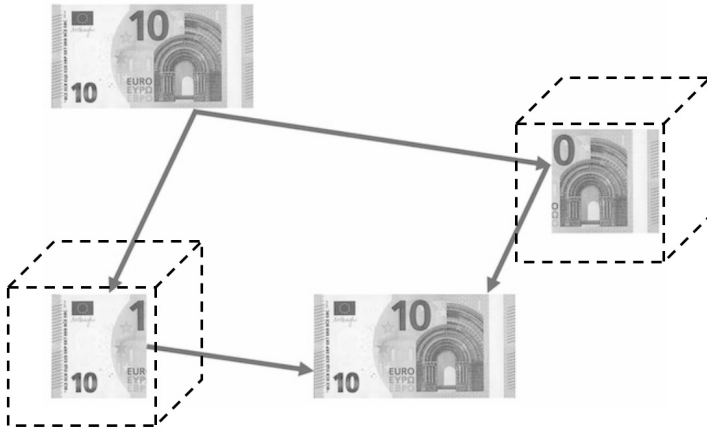


Figura 10 Una *banconota da 10 €* viene prima strappata in due parti, quindi i frammenti vengono mossi lungo due percorsi diversi (e ad esempio inseriti in due scatole separate), per ricombinarli infine in qualche altro luogo dello spazio. Nel processo, i *10 €* scompaiono dal nostro teatro spaziale, per riapparire ancora una volta quando la banconota viene ricomposta.

Ora, il motivo per cui l'esempio dei *10 €* funziona bene con la nostra intuizione è che i *10 €* non sono solo un *oggetto*: sono anche un *concetto*. Ciò che intendiamo è che bisogna distinguere l'entità concettuale *10 €* dall'entità oggettuale della *banconota da 10 €*. I *10 €*, come entità concettuale, possono essere esemplificati (cioè concretizzati, oggettivati) in molti modi diversi. Una *banconota da 10 €* è una possibilità, ma anche *5 monete da 2 €* sono un modo possibile di esemplificare *10 €*, usando quindi il metallo invece della carta, e ovviamente possiamo avere anche *10 €* esemplificati in modo elettronico, come uno specifico trasferimento che appare in un determinato conto bancario.

Ciò che è importante osservare, nel caso della banconota cartacea, è che quando affermiamo che i 10 € si trovano nelle due scatole separate, e nello stesso tempo in nessuna di esse, questa affermazione ha senso perché due diverse nozioni di 10 € sono congiuntamente presenti nella nostra mente. Da una parte, c'è la *banconota da 10 €*, che è un oggetto concreto, e come tale non è certamente presente in nessuna delle due scatole considerate singolarmente (in quanto solo una parte della banconota è presente in ogni scatola). D'altra parte, ci sono i 10 € intesi come entità concettuale più astratta, che, come abbiamo osservato, può essere esemplificata nel nostro teatro spaziale in molti modi diversi. Quando diciamo che i 10 € sono simultaneamente presenti nelle due scatole, il riferimento è quindi più specificamente ai 10 € intesi come entità astratta, esemplificabile in modi diversi, in contesti diversi.

Potrebbe allora essere che un'entità come un neutrone è in grado di comportarsi nel modo in cui si comporta perché sarebbe simile in natura a un concetto umano? In altre parole, potrebbe essere che la non-spazialità delle micro-entità fisiche ci stia dicendo che queste sarebbero come delle entità concettuali che possono manifestarsi in stati differenti, alcuni molto concreti, come quelli che possiamo associare a delle proprietà spaziali, e altri più astratti, che non possiamo associare a delle proprietà spaziali, e che questo spiegherebbe il loro comportamento altrimenti incomprensibile? È importante però osservare che non stiamo qui affermando che le entità quantistiche sarebbero dei *concetti umani*; quello che stiamo dicendo è che condividerebbero con quest'ultimi una medesima *natura concettuale*, così come un'onda elettromagnetica e un'onda sonora, sebbene siano delle entità fisiche molto differenti, condividono nondimeno la stessa natura ondulatoria (Aerts et al, 2018).

4 Indistinguibilità e non-spazialità

Prima di discutere della possibilità di attribuire una natura concettuale alle entità che formano la nostra realtà fisica, menzioniamo un'altra "stranezza" quantistica, che punta anch'essa in direzione della non-spazialità delle entità quantistiche, quindi della loro possibile natura concettuale: l'*indistinguibilità*.

Le entità spaziali (pensate a una palla da biliardo) sono sempre distinguibili, anche quando sono identiche, cioè anche quando possiedono lo stesso insieme di proprietà (come una stessa massa, volume, carica, momento angolare, temperatura, colore, eccetera). Infatti, ammettendo l'*impenetrabilità* di due oggetti fisici, cioè il fatto che non possano occupare allo stesso tempo la stessa posizione nello spazio, ne consegue che potranno sempre essere distinti considerando le diverse traiettorie che percorrono nello spazio. In un certo senso, ciascuna traiettoria fornisce a ciascuna entità spaziale una sorta di etichetta che consente di distinguerla dalle altre entità aventi le stesse proprietà (vedi la Figura 11).

Quindi, le entità materiali spaziali possono essere identiche e allo stesso tempo possono rimanere sempre distinguibili, almeno in linea di principio, perché non possono possedere in un dato momento le stesse proprietà spaziali e quest'ultime possono sempre essere usate per distinguerle. Se ad esempio delle entità come i neutroni fossero simili a piccole biglie che si muovono nello spazio, sarebbero distinguibili e la loro distinguibilità avrebbe delle conseguenze osservabili quando vengono raggruppate, ad esempio quando formano il nucleo di un atomo o vanno a costituire un'entità gigante (ed estremamente densa) detta *stella di neutroni*, risultante dal collasso gravitazionale di una stella molto massiccia.

Infatti, quando delle entità identiche vengono assemblate in regimi di temperature per i quali gli effetti quantistici diventano rilevanti, cioè quando possono entrare stabilmente in stati di entanglement, il fatto che siano indistinguibili produrrà delle differenze importanti nel loro comportamento collettivo, se

paragonato al comportamento di aggregati di entità classiche distinguibili.

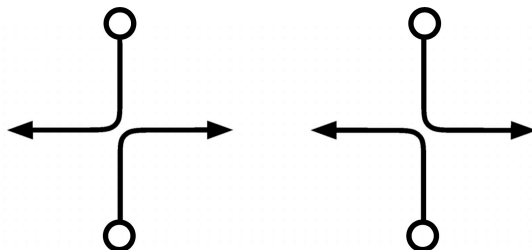


Figura 11 La situazione di due palle da biliardo identiche dirette l'una verso l'altra, con uguale velocità, una da nord e l'altra da sud. Poiché si muovono in direzioni opposte, faranno lo stesso dopo la collisione e le loro velocità (in valore assoluto) rimarranno le stesse (per conservazione della quantità di moto totale). Se la collisione è in qualche modo decentrata, ogni palla verrà deviata dalla sua direzione originale di movimento di un determinato angolo. Qui sono descritte due situazioni: a sinistra, la palla proveniente da nord viene deviata verso ovest, e di conseguenza la palla proveniente da sud viene deviata verso est, mentre nella figura di destra è il contrario. Chiaramente, solo discernendo le traiettorie delle due palle, durante la loro collisione, è possibile conoscere la direzione verso cui ciascuna di esse viene in ultimo deviata, quindi distinguere le due situazioni. Per le micro-entità quantistiche, a causa dell'assenza di una nozione di traiettoria spaziale, queste due situazioni non possono in nessun modo essere distinte.

Un gas di neutroni, che appartengono a quella categoria di entità denominate *fermioni*, a differenza di un gas ideale classico, costituito da entità distinguibili, avrà ad esempio la sua pressione che sarà solo debolmente dipendente dalla temperatura, invece di essere direttamente proporzionale ad essa. Inoltre, un gas di entità indistinguibili denominate *bosoni* (come i fotoni o gli atomi di elio-4), a differenza di un gas ideale classico è in grado di formare un cosiddetto *condensato di Bose-Einstein*, quando a temperature molto basse l'intera collezione di entità si comporta effettivamente come una sorta di singola entità, entrando in uno stato condensato strettamente connesso all'emergenza di fenomeni sorprendenti come la *superfluidità* (la possibilità per un fluido di avere una *viscosità nulla* e quindi fluire senza alcuna perdita di energia cinetica).

Quanto sopra è solo per sottolineare che l'indistinguibilità può avere effetti notevoli e che questi effetti sono stati ampiamente

osservati nei laboratori. Infatti, uno dei problemi sperimentali da cui ha avuto origine la meccanica quantistica, la *radiazione emessa da un corpo nero*, cioè il problema di spiegare lo spettro e l'intensità della radiazione termica emessa da un corpo non riflettente in funzione della sua temperatura, poteva essere adeguatamente affrontato solo considerando che tutti i fotoni coinvolti negli scambi di energia sono entità realmente indistinguibili che obbediscono a una statistica quantistica (detta di Bose-Einstein), anziché a una statistica classica (detta di Maxwell-Boltzmann).

Più esattamente, la differenza tra distinguibilità e indistinguibilità influenza il comportamento statistico di una collezione di entità identiche, alterando il modo in cui si deve contare il numero delle loro possibili configurazioni, che a sua volta dipende dal fatto che, quando scambiamo il ruolo di due di esse, lo scambio può avere o non avere un effetto osservabile.

Per fare un esempio molto semplice, considerate due entità A e B . Se sono distinguibili a un certo livello, allora scambiandosi di ruolo questo potrà avere degli effetti osservabili. Ad esempio, supponendo che le due entità possano trovarsi solo in due stati differenti, chiamiamoli ψ e φ , è chiaro che la situazione in cui A è nello stato ψ e B è nello stato φ è diversa dalla situazione in cui A è nello stato φ e B è nello stato ψ ; quindi, queste due possibilità devono essere contate separatamente. Ciò significa che quando le due entità sono distinguibili, ci saranno 4 diverse configurazioni possibili per il sistema composto formato dalla loro combinazione: le due che abbiamo appena menzionato più le configurazioni in cui le due entità sono entrambe nello stato ψ o entrambe nello stato φ (vedi la Figura 12).

Ma quando le due entità sono indistinguibili, non possiamo più dire che la situazione in cui A è nello stato ψ e B è nello stato φ sia diversa rispetto a quando A è nello stato φ e B è nello stato ψ , perché ora abbiamo $A = B$, quindi queste due situazioni, o configurazioni, non possono più essere distinte. Ciò significa che il sistema composto ha un totale di soli 3 diversi stati possibili, e questo diverso modo di contare è caratteristico della cosiddetta statistica (quantistica) di *Bose-Einstein* (vedi la Figura 12). Ciò vale per quella tipologia di entità indistinguibili con *spin intero*, dette *bosoni*, che possono trovarsi contemporaneamente nello stesso

stato. Per la tipologia di entità indistinguibili con *spin frazionario*, dette *fermioni*, c'è invece il vincolo aggiuntivo noto con il nome di *principio di esclusione di Pauli*, che impone a due entità identiche di non trovarsi mai contemporaneamente nello stesso stato, cosicché nel nostro esempio semplice rimane una sola configurazione disponibile, e questo modo di contare è caratteristico della cosiddetta statistica (quantistica) di *Fermi-Dirac* (vedi la Figura 12).

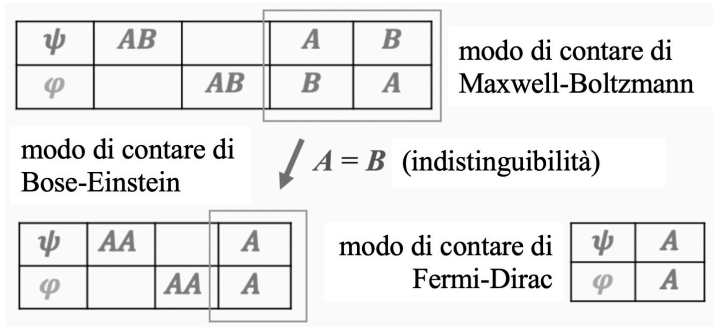


Figura 12 Il numero di stati possibili per un sistema formato da due entità (non interagenti) che possono trovarsi individualmente in due diversi stati, ψ e φ , quando (a) sono delle entità distinguibili (oggetti spaziali), corrispondente al modo di contare di Maxwell-Boltzmann; (b) sono delle entità indistinguibili e possono trovarsi nello stesso stato (bosoni), corrispondente al modo di contare di Bose-Einstein; (c) sono delle entità indistinguibili ma non possono trovarsi nello stesso stato (fermioni), corrispondente al modo di contare di Fermi-Dirac.

Le micro-entità, siano esse fermioni o bosoni, sono quindi indubbiamente degli individui, anche se misteriosamente privi di una qualsiasi identità individuale, poiché si manifestano come se fossero veramente e genuinamente indistinguibili. Questo sembra andare contro il famoso principio ontologico di Leibniz, dell'*identità degli indiscernibili*, che afferma che non possono esistere due entità distinte che si equivalgono in tutte le loro proprietà.

Come può essere allora? Ebbene, come abbiamo già sottolineato, se rinunciamo a considerare una micro-entità come un'entità spaziale, non possiamo più usare la nozione di traiettoria per associare un'etichetta spaziale differente a ciascun membro di una raccolta di entità identiche. Queste, tuttavia, possono rimanere degli individui perché, anche se totalmente indistinguibili, possiedono sempre degli attributi che possono essere misurati e utilizzati per

contare quante ne sono presenti in un dato sistema.

Per esempio, se la carica elettrica totale di una raccolta di elettroni è Q , allora, sapendo che un singolo elettrone ha una carica elettrica e , sappiamo anche che la collezione contiene un numero $N = Q/e$ di elettroni identici, e non una singola entità elettronica. Ma come possiamo allora comprendere la natura di entità in grado di rimanere individui e allo stesso tempo essere anche realmente indiscernibili?

Consideriamo ancora una volta l'esempio dei 10 € . Non c'è dubbio che i 10 € descrivono una collezione di entità, e più precisamente quella collezione che si ottiene considerando due concetti: il concetto 10 (*Dieci*) e il concetto € (*Euro*), uniti nella combinazione 10 € (*Dieci Euro*). È chiaro che tutti gli euro nella combinazione sono completamente identici e tutti esattamente nello stesso stato, vale a dire, possiedono tutti esattamente lo stesso significato e valore, il che significa che siamo veramente in presenza di una collezione di entità indistinguibili (di tipo bosonico), e non di una sola entità. In altre parole, nel mondo concettuale, l'indistinguibilità quantistica non è affatto paradossale, ma perfettamente evidente. Naturalmente, il fatto che i 10 € siano un concetto e non un oggetto è essenziale per poter veicolare la proprietà quantistica (altrimenti impossibile da comprendere) di *essere molti e allo stesso tempo essere genuinamente indistinguibili*.

5 Un'interpretazione concettualistica

Considerando che l'esempio dei 10 € funziona così bene nel descrivere sia la possibilità per un'entità di essere non-spaziale, e per una collezione di entità di essere indiscernibili, pur rimanendo degli individui, ci si potrebbe chiedere se questa sia più di una semplice metafora azzeccata e possa indicare una verità più profonda circa la natura della nostra realtà fisica, ossia, che i suoi elementi costitutivi non sarebbero *simili ad oggetti*, ma *simili a concetti*. In altre parole, ci si potrebbe chiedere se: (1) le entità quantistiche si comportano in modo simile ai concetti umani perché condividono con essi la stessa natura concettuale e, reciprocamente, se (2) i concetti umani, in quanto entità di natura concettuale, si comportano a loro volta

similmente a delle entità quantistiche, nel senso che *quantisticità* e *concettualità* sarebbero in ultima analisi due modi diversi di parlare della stessa realtà.

Il punto (2) è in un certo senso meno controverso rispetto al punto (1); cominciamo quindi con esso. Gli ultimi due decenni hanno visto svilupparsi un nuovo campo di indagine, denominato *cognizione quantistica* (quantum cognition), i cui pionieri sono stati scienziati come *Diederik Aerts*, *Andrei Khrennikov*, *Harald Atmanspacher* e collaboratori; vedi ad esempio Busemeyer & Bruza (2012), Haven & Khrennikov (2013), Wendt (2015) e Aerts et al. (2013, 2016).

Spieghiamo brevemente i motivi per cui è emerso questo campo di studio. All'inizio del secolo scorso, nella loro indagine del micromondo, i fisici hanno dovuto confrontarsi con dati sperimentali che non erano spiegabili con le teorie fisiche esistenti, in particolare per quanto attiene ai loro fondamenti logici e probabilistici. Ed è proprio grazie ai loro tentativi di spiegare l'inspiegabile che la meccanica quantistica è emersa: una teoria fondata su un calcolo delle probabilità completamente diverso (non classico, cioè *non-kolmogoroviano*). Qualcosa di molto simile è accaduto agli scienziati cognitivi quando si sono confrontati con dati inaspettati, raccolti nell'ambito di numerosi test psicologici condotti su gruppi di soggetti umani, al fine di studiare le probabilità che caratterizzano i loro comportamenti o processi di decisione. In effetti, è emerso che in molte circostanze il comportamento umano entra in conflitto con la logica. In altre parole, gli umani sembrano essere decisamente irrazionali.

Come esempio, possiamo descrivere la situazione nota come *fallacia della congiunzione*, come evidenziato nel cosiddetto *problema di Linda* (Tversky e Kahneman, 1983; Morier e Borgida, 1984). Considerate la seguente descrizione di una persona di nome Linda:

“Trentun anni, è single, molto intelligente e senza peli sulla lingua. Si è laureata in filosofia. Da studentessa si interessò molto ai problemi di discriminazione e della giustizia sociale, e partecipò anche a manifestazioni antinucleari.”

Riflettete ora sulle seguenti due affermazioni: (1) Linda è oggi una cassiera di banca; (2) Linda è oggi attiva in un movimento femminista ed è una cassiera di banca. Quale di queste due affermazioni vi sembra più plausibile? Se la vostra risposta è (2), siete appena caduti vittime della fallacia della congiunzione, come è stato il caso per

l'opinione media espressa da numerosi soggetti testati. Ora, dacché l'idea che la concomitanza di due eventi sia più probabile del verificarsi di uno solo di essi è in evidente violazione delle regole assiomatiche della *teoria classica (kolmogoroviana) della probabilità* (che a sua volta si fonda sulla *logica booleana*), situazioni sperimentali come quella evidenziata nel problema di Linda, e molte altre che evidenziano diverse tipologie di fallacie logiche, non potranno essere adeguatamente trattate da quest'ultima.

Ciò ha costretto i ricercatori a cercare un nuovo paradigma per modellizzare in modo coerente, e sulla base di principi sufficientemente generali, i dati accumulati, e sorprendentemente la scelta perfetta si è rivelata proprio essere la meccanica quantistica. Beh, la cosa non è così sorprendente dopo tutto, considerando che quest'ultima conteneva tutti gli strumenti concettuali e matematici necessari per affrontare ogni tipo di deviazione dai comportamenti classici. Infatti, come abbiamo detto, anche la meccanica quantistica è emersa per descrivere situazioni sperimentali che non potevano essere spiegate usando le teorie classiche, basate sulla logica booleana e il calcolo della probabilità kolmogoroviano ad essa associato.

Ci porterebbe troppo oltre lo scopo di questo articolo raccontare in modo convincente la storia della cognizione quantistica, che tra l'altro, per evitare possibili confusioni, non ha nulla a che fare con la nozione di *cervello quantistico*, cioè con la speculazione che i fenomeni quantistici che si verificano nel nostro cervello a un livello microscopico sarebbero determinanti per il suo funzionamento, in particolare in relazione alla manifestazione della coscienza e dell'autocoscienza. Nella cognizione quantistica, si osserva semplicemente che delle strutture quantistiche possono apparire a un determinato livello organizzativo dell'attività mentale, nello stesso modo in cui è possibile costruire delle macchine quantistiche macroscopiche (ad esempio utilizzando delle strutture formate da elastici con geometrie specifiche che si possono rompere in modi imprevedibili) in grado di comportarsi in modo molto simile alle micro-entità (Aerts et al, 2000, Sassoli de Bianchi, 2013a, Aerts & Sassoli de Bianchi, 2014).

A tal proposito, si dovrebbe demistificare la credenza assai diffusa che un comportamento di tipo quantistico sia una prerogativa solo delle micro-entità, essendo piuttosto una forma di organizzazione che è possibile individuare a diversi livelli strutturali nella nostra realtà

(Aerts & Sozzo, 2015; Aerts & Sassoli de Bianchi, 2018). Certamente, è a livello microscopico che questa organizzazione sembra potersi esprimere nel modo più notevole, grazie alla natura autenticamente non-spaziale delle micro-entità.

Ora, considerando l'enorme successo della teoria quantistica nella modellizzazione di diverse situazioni cognitive, come quelle che riguardano i processi decisionali, il ragionamento concettuale, la memoria umana e altri fenomeni cognitivi, cioè considerando che le entità concettuali umane, quando interagiscono con i sistemi cognitivi, appaiono molto simili alle entità quantistiche quando interagiscono con gli apparati di misura, a un certo punto della storia è stato naturale per uno dei pionieri della cognizione quantistica, *Diederik Aerts*, porsi e prendere molto seriamente la seguente domanda (Aerts, 2010):

“Se la meccanica quantistica, come formalismo, modella così bene i concetti umani, forse questo indica che le stesse particelle quantiche sono entità concettuali?”

Aerts ha quindi formulato la seguente ipotesi speculativa, che è oggi alla base della cosiddetta *interpretazione concettualistica della meccanica quantistica* (Aerts, 2010):

“La natura di un'entità quantistica è 'concettuale', cioè interagisce con un apparato di misura (o con un'entità fatta di materia ordinaria) in modo analogo a come un concetto interagisce con una mente umana (o con una qualsiasi struttura di memoria sensibile ai concetti).”

In altre parole, secondo l'ipotesi di Aerts, le entità microscopiche elementari, che sappiamo non possono essere coerentemente descritte in termini di particelle o onde (o persino in termini di campi), si comporterebbero nondimeno come delle cose a noi molto familiari, poiché le sperimentiamo in modo molto intimo, diretto e continuo: i *concetti* (Aerts, 2009, 2010a, 2010b, 2013).

Per poter capire perché una tale ipotesi abbia un senso, dobbiamo spiegare che i concetti, come i sistemi fisici, possono essere modellizzati come entità che possono trovarsi in diversi *stati*, dove uno stato va generalmente inteso come espressione di ciò che un'entità è, nei termini delle proprietà attuali e potenziali che possiede in un dato momento (Aerts et al, 2016), e che può essere descritto utilizzando diverse nozioni matematiche, a seconda del formalismo

specifico adottato. Per esempio, nella meccanica quantistica gli stati sono solitamente descritti da vettori appartenenti a uno spazio vettoriale complesso, detto *spazio di Hilbert*.

Il modo in cui un concetto può cambiare il suo stato dipende dal tipo di contesto con cui interagisce. Come esempio molto semplice, consideriamo il concetto *Automobile* (useremo le lettere maiuscole per distinguere i concetti astratti dalle parole scritte, che sono le tracce lasciate da quest'ultimi su un dato documento). Se considerata nel contesto di sé stessa, possiamo dire che l'entità concettuale *Automobile* si trovi nel suo *stato di significato* più neutro, a volte denominato *stato fondamentale*. Ma è anche possibile combinare il concetto di *Automobile* con altri concetti. Questo è esattamente ciò che facciamo noi umani quando usiamo abitualmente il nostro linguaggio: combiniamo i concetti per creare dei nuovi significati.

Quindi, se *Automobile* è combinato con *Veloce*, ad esempio nella frase *Un'automobile veloce*, il suo stato non sarà più considerato come lo stato fondamentale, ma un differente *stato "eccitato"*. Più precisamente, quando passiamo da *Automobile* a *Un'automobile veloce*, l'entità concettuale *Automobile* cambia di stato in modo *deterministico*. Ciò è simile a quanto accade allo spin di un neutrone quando passa attraverso un campo magnetico, producendo anche in questo caso un cambiamento deterministico del suo stato, che si può facilmente identificare risolvendo la corrispondente *equazione di Schrödinger*.

Ma per evidenziare la differenza tra due stati, al di là di considerazioni di natura puramente teorica, si devono eseguire delle misure, cioè si deve poter sottoporre l'entità concettuale a un preciso *contesto interrogativo*, che in generale sarà *indeterministico*. Ad esempio, consideriamo due esempi specifici di auto, come un *Maggiolino Volkswagen* e una *Lamborghini Countach*. Possiamo chiedere a un gruppo di persone quale dei due esempi meglio rappresenti il concetto più astratto di *Automobile*. Come è facile immaginare, alcune persone sceglieranno il *Maggiolino Volkswagen* e altre la *Lamborghini Countach*, e ci si può aspettare che entrambi gli esempi siano scelti con frequenze comparabili, diciamo il 60% e il 40%, rispettivamente (vedi la Figura 13).

A un altro gruppo di persone (o allo stesso gruppo) possiamo poi porre la stessa domanda, ma questa volta in relazione a *Un'automobile veloce*. Nessun dubbio, in questo caso quasi tutti, se non tutti, selezioneranno l'esempio della *Lamborghini Countach* (vedi

la Figura 13). In altre parole, le probabilità degli esiti cambieranno drasticamente, quando usiamo *Un'automobile veloce* invece di un'*Automobile*, cioè quando consideriamo stati differenti dell'entità concettuale in questione. Lo stesso vale quando si esegue una misura in meccanica quantistica: stati differenti produrranno distribuzioni di probabilità differenti, relativamente a un dato insieme di esiti possibili.

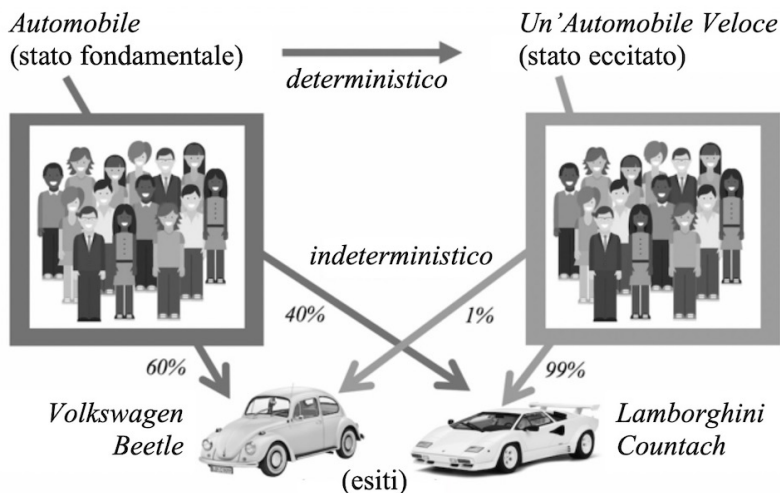


Figura 13 Stati differenti dell'entità concettuale *Automobile* produrranno delle probabilità differenti per i diversi esiti, quando sottoposta a un determinato contesto interrogativo, che qui consiste nel determinare quale dei due esempi/stati più concreti, *Maggiolino Volkswagen* o *Lamborghini Countach*, meglio rappresenti *Automobile*, quando tale concetto si trova nel suo "stato fondamentale" o nello "stato eccitato" definito dalla combinazione *Un'automobile veloce*.

Detto questo, descriviamo ora brevemente alcune delle situazioni in cui l'interpretazione concettualistica consente di meglio comprendere lo strano comportamento delle micro-entità quantistiche, in un modo che nessun'altra interpretazione consente di fare [per maggiori dettagli, rimandiamo ad Aerts (2009, 2010a, 2010b, 2013) e al più recente Aerts et al (2018), ripubblicato anche in questo volume].

Non-spazialità. Le entità quantistiche si trovano generalmente in stati non-spaziali, poiché essendo entità concettuali, possono

trovarsi in stati con diversi *gradi di astrazione* (o diversi *gradi di concretezza*) e solo gli stati più concreti (cioè meno astratti) corrisponderebbero a quelli appartenenti al nostro teatro spaziale. Ad esempio, nel caso speciale dei concetti umani, possiamo osservare che il concetto *Cosa*, nel suo stato fondamentale (cioè nello stato *La cosa è una cosa*) è senza dubbio più astratto di quando si trova nello stato definito dalla combinazione *La cosa è un'automobile*, che a sua volta è più astratto di quando nello stato *La cosa è un'automobile chiamata Lamborghini Countach*, che è più astratto dello stato *La cosa è un'automobile chiamata Lamborghini Countach di proprietà del mio vicino*. Chiaramente, quest'ultimo stato di *Cosa* porta il concetto in stretta corrispondenza con il mondo degli oggetti appartenenti al nostro spazio tridimensionale.

Principio di indeterminazione di Heisenberg. Se le entità quantistiche sono concettuali, allora non possono essere al contempo massimamente astratte e massimamente concrete, e questo non è altro che il principio di indeterminazione di Heisenberg riformulato in termini concettuali, che diventa così perfettamente evidente. Un neutrone con una quantità di moto ben definita sarebbe un neutrone in uno stato massimamente astratto, mentre un neutrone con una posizione spaziale ben definita sarebbe un neutrone in uno stato massimamente concreto, e tutti gli stati tra queste due situazioni limite sarebbero stati non-spaziali, aventi un grado intermedio di astrazione (o di concretezza). In altre parole, esisterebbe un necessario *tradeoff* (scambio) tra astrattezza e concretezza: più aumentiamo la prima e più diminuirà la seconda, e viceversa.

Entanglement. Le misteriose connessioni non-spaziali, responsabili della creazione di correlazioni nelle misure congiunte, in grado di violare le disuguaglianze di Bell, non sarebbero altro che delle *connessioni tramite significato*. In altre parole, se la natura delle micro-entità è concettuale, allora ci si aspetta che si colleghino spontaneamente e sistematicamente condividendo del significato, e poiché le connessioni di significato sono elementi astratti complessi (multidimensionali) della nostra realtà, questo spiega perché non possono essere rappresentati come semplici connessioni spaziali rilevabili nel nostro teatro tridimensionale. Si noti che le disuguaglianze di Bell possono essere facilmente violate quando si realizzano delle misure congiunte nei laboratori di psicologia, su

delle combinazioni concettuali adeguatamente connesse in termini di significato, il che offre ulteriore credito all'interpretazione concettualistica dell'entanglement quantistico; vedi ad esempio Aerts & Sozzo (2011) e Aerts et al (2018a,b).

Indistinguibilità. Molte entità concettuali, combinandosi con quella particolare categoria di concetti denominati *numerali*, produrranno delle entità genuinamente indistinguibili, che rimarranno nondimeno degli individui. Quindi, l'indistinguibilità quantistica diventa evidente quando la quantisticità viene intesa come espressione di concettualità. Si noti che le statistiche non classiche (cioè non del tipo Maxwell-Boltzmann) possono essere facilmente evidenziate quando si analizzano determinate combinazioni di parole che compaiono in raccolte di documenti.

Prendiamo ad esempio il concetto *Dieci animali*, che descrive una raccolta di dieci entità concettuali identiche, del tipo *Animale*. Possiamo considerare due possibili stati per l'entità concettuale *Animale*: *L'animale è un gatto* (in breve, *Gatto*) e *L'animale è un cane* (in breve, *Cane*). Si possono quindi eseguire dei conteggi, diciamo sul Web, usando un motore di ricerca come Google, per stimare le probabilità di trovare questi dieci concetti indistinguibili nei loro diversi stati possibili di *Cane* e *Gatto*, come ad esempio *Otto gatti e due cani*, *Sette gatti e tre cani*, ecc. Senza entrare qui nei dettagli, menzioniamo solo che si possono mettere così in evidenza dei comportamenti statistici simili a quelli di Bose-Einstein (con l'aggiunta di fluttuazioni), dando così ulteriore credito all'interpretazione concettualistica dell'indistinguibilità quantistica (Aerts, Sozzo & Veloz, 2015; Aerts et al 2018).

Quantistico e classico. Secondo l'interpretazione concettualistica, ciò che chiamiamo oggetti sono semplicemente delle entità concettuali in gradi di permanere a lungo in stati di massima concretezza. Il miglior esempio di oggetto nel dominio concettuale umano (o per dirla più precisamente, di concetto che si comporta in modo simile a un oggetto) è ciò che chiamiamo *storia*, cioè un'entità concettuale che è il risultato di una combinazione molto ampia di concetti differenti, tutti collegati tra loro tramite un "tessuto di significato" che è espressione di una narrazione specifica.

Senza entrare nei dettagli, possiamo osservare che nel dominio concettuale i concetti possono combinarsi in modo significativo

usando in particolare i connettivi logici “e” ed “o”. Se A e B sono due concetti, allora anche A e B e A o B sono due concetti a pieno titolo. D'altra parte, se A e B sono due oggetti, sebbene ‘ A e B ’ possa sempre essere considerato un oggetto (l'oggetto composto formato dalla combinazione dell'oggetto A e dell'oggetto B), ‘ A o B ’ non può più essere associato a un qualsivoglia oggetto, ma solo a un concetto, e questa è una delle differenze fondamentali tra concetti e oggetti.

La situazione è simile per le storie. Nel nostro panorama culturale umano possiamo individuare numerose storie che sono della forma ‘ A e B ’, anche quando A e B sono storie molto lunghe e complesse. Pensate ad esempio alle *serie di libri*, che altro non sono se non delle lunghe storie composite della forma ‘ A e B e C ...’. D'altra parte, se A e B sono due storie, ‘ A o B ’ non verrà di solito associata a una storia in senso stretto (cioè a una storia con un senso proprio) nella nostra cultura umana. Quindi, le storie si comportano in modo simile agli oggetti e la nozione di storia ci permette di comprendere come certe tipologie di entità concettuali, formatesi tramite la combinazione di numerosi concetti elementari, finiscano col comportarsi in modo simile a come si comportano gli oggetti classici.

Per un'ulteriore discussione circa la sottile questione della distinzione tra concetti e oggetti, si veda ad esempio Aerts et al (2018) e i riferimenti ivi citati.

Problemi aperti in fisica. L'interpretazione concettualistica offre spunti interessanti su numerosi problemi aperti della fisica moderna, come il *problema della misura*, il *confinamento dei quark*, l'esistenza di diverse *generazioni* di particelle elementari, la *materia oscura*, la mancanza di evidenze a favore della *supersimmetria*, ecc. Per l'esplorazione di queste interessanti questioni, rimandiamo il lettore interessato ad Aerts (2009, 2010a, 2010b, 2013) ed Aerts et al (2018).

6 Conclusione e prospettive

Abbiamo iniziato questo scritto facendo riferimento alle allegorie di Platone ed Abbott e suggerendo che il nostro teatro spaziale sarebbe l'espressione di una prospettiva molto limitata. Per mezzo

di alcuni esempi, tratti dalla nostra indagine sul micromondo, abbiamo evidenziato che queste allegorie esprimono una verità profonda. Vi è tuttavia un aspetto importante che queste non sono state in grado di catturare, che è il seguente. Quando le entità quantistiche di più alta dimensionalità vengono percepite dalla prospettiva limitata della nostra rappresentazione spaziale classica, il processo non è mai riconducibile a un mero atto di *scoperta*. Questo poiché le osservazioni quantistiche, a parte circostanze eccezionali, non possono essere intese come semplici processi di scoperta di proprietà preesistenti, ma letteralmente come processi di *creazione* di proprietà che erano solo potenzialmente esistenti prima del processo di osservazione. Per dirla diversamente, quando il dominio quantistico, di più alta dimensione, si manifesta nel nostro teatro spaziale tridimensionale, il processo è generalmente non deterministico e del tipo ‘rottura della simmetria’, cioè un processo nel corso del quale *l’attuale rompe la simmetria del potenziale* (Aerts & Sassoli de Bianchi, 2017).

Abbiamo altresì sottolineato che la nostra costruzione originaria di un teatro spaziale è risultata dalla nostra percezione degli oggetti macroscopici presenti nel nostro ambiente, mediata dai nostri sensi fisici, in particolare l’azione congiunta – e compatibile – dei sensi della vista e del tatto (Aerts, 2014). Tuttavia, quando abbiamo utilizzato strumenti di misura più sofisticati, in condizioni sperimentali controllate, abbiamo approfondito le nostre percezioni e osservato che il comportamento delle micro-entità è piuttosto sconcertante, dacché la loro realtà è impossibile da rappresentare interamente entro i confini di una singola rappresentazione spaziale.⁴

D’altra parte, grazie al successo del campo emergente della cognizione quantistica, è apparso che questa stranezza delle entità

⁴ Si noti che possiamo trovare tracce (più o meno esplicite) di questa impossibilità nelle ontologie di diverse interpretazioni quantistiche di tipo realistico. Ad esempio, nell’interpretazione possibilistica transazionale di Kastner, ha ricevuto il nome di *pre-spaziotempo* o di strato *pre-empirico* (Kastner 2013, Aerts & Sassoli de Bianchi, 2017). Nella visione bohiana, una nozione attinente è quella di *ordine* (pre-spaziotemporale) *implicito* (Bohm 1957). E per fare un ultimo esempio, il numero infinito di mondi spaziali in continua ramificazione dell’interpretazione a molti mondi non può certo essere rappresentato entro una singola rappresentazione spaziale, quindi una realtà a molti mondi (spaziali) è di nuovo una realtà non-spaziale; vedi anche la discussione in Aerts & Sassoli de Bianchi (2015b).

quantistiche è probabilmente dovuta al fatto che stiamo usando l'immagine sbagliata quando proviamo a catturare la loro natura: pensiamo ad esse in termini di *oggetti* anziché in termini di *concetti* (da intendere in senso non-umano). In altre parole, se da un lato i nostri sensi hanno contribuito all'illusione di un mondo spaziale tridimensionale, formato da oggetti macroscopici, è il nostro modo più recente (relativamente alla nostra evoluzione come specie su questo pianeta) e astratto di interagire con la realtà, guidato dal linguaggio e dal significato, che sembra essere quello in grado di avvicinarci agli aspetti più profondi della nostra realtà, che sarebbero genuinamente non spaziali e molto probabilmente di natura concettuale.

Dall'idea che i mattoni costitutivi della nostra realtà fisica sarebbero entità concettuali che veicolano significato che scambiano con i diversi aggregati di materia ordinaria, emerge in modo del tutto naturale una visione di tipo *pancognitivistico* (Aerts & Sassoli de Bianchi, 2018). Non si tratta, tuttavia, di una prospettiva da intendere in senso antropomorfo, come è chiaro che la cognizione umana è solo un episodio recente di formazione di una struttura concettuale che ha avuto "luogo" nell'ambito di un processo evolutivo molto più antico, dove ogni aspetto del reale partecipa in senso cognitivo.

Si noti che il linguaggio matematico delle nostre teorie fisiche va sempre accompagnato da un'adeguata rete di concetti fisici, utilizzata per mettere in una relazione coerente tra loro le diverse entità matematiche e fornire significato alla porzione di realtà che queste teorie mirano a rappresentare e descrivere (De Ronde 2018). Pertanto, seguendo l'ipotesi dell'interpretazione concettualistica, si potrebbe essere tentati di credere che i concetti umani sarebbero in grado di descrivere la realtà esattamente *come è*. Questo, tuttavia, sarebbe un modo errato di comprendere il messaggio di questa interpretazione, che richiede di distinguere attentamente lo strato concettuale umano da quello delle entità fisiche. Possiamo certamente usare i nostri concetti umani per cercare di rappresentare e comprendere il significato (non umano) veicolato dalle entità microfisiche e dalle loro combinazioni, ma ciò non significa che i due strati concettuali possano essere considerati come equivalenti, per quanto concerne il loro contenuto in termini di significato.

In un certo senso, è come imparare una nuova lingua, appartenente a un'antica cultura aliena di cui non sappiamo nulla, poiché si è sviluppata in territori e tempi completamente diversi dai nostri. Naturalmente, sebbene la maggior parte dei concetti della lingua di questa cultura extra-terrestre non avrà corrispondenza diretta con i nostri, ciò non deve impedirci di provare ad approssimare il loro significato usando combinazioni appropriate di concetti appartenenti alla nostra lingua umana. Tuttavia, nulla garantisce che il nostro linguaggio sia sufficientemente ricco per rappresentare fedelmente ogni aspetto di questa cultura aliena, specialmente se le esperienze e i comportamenti che ne hanno dato origine sono troppo diversi da quelli che hanno dato origine alla nostra. In altre parole, in generale, quando una lingua studia un'altra lingua, non vi sono ragioni per ritenere a priori che i concetti contenuti nella prima coincidano, o siano simili, a quelli contenuti nella seconda, in particolar modo se le due lingue non condividono necessariamente la stessa origine.

A questo proposito, si noti che nell'interpretazione concettualistica si distinguono due linee che vanno dal concreto all'astratto: una *linea parrocchiale*, che ha più a che fare con il modo in cui noi esseri umani abbiamo astratto i concetti a partire dagli oggetti, nel corso della nostra recente evoluzione su questo pianeta, e una linea che riteniamo essere più *universale*, che emerge dall'osservazione di come un gran numero di concetti possano entrare in uno stato più concreto combinandosi tra loro in modo sensato, per formare ciò che noi umani, nella nostra cultura, denominiamo "storie". Questi sono ovviamente aspetti delicati dell'interpretazione concettualistica, ancora in fase di studio, che richiederebbero spiegazioni più dettagliate, ma per questo rimandiamo il lettore a (Aerts et al 2018) e ai riferimenti ivi citati.

Per tornare al *pancognitivismo*, una tale visione ha ovviamente delle conseguenze anche per la nostra comprensione dell'*evoluzione*. In effetti, se la natura delle entità fisiche è fondamentalmente concettuale, e se concettualità e quantisticità sono solo modi diversi di delineare una medesima natura, allora dobbiamo adottare una prospettiva molto più ampia – di tipo sia quantistico che concettualistico – non solo sulla realtà, ma anche sui meccanismi che governano l'evoluzione. Più precisamente, adottare una prospettiva quantistica sull'evoluzione significa comprendere il

racconto della selezione naturale darwiniana non solo come processo di selezione di proprietà già attuali, cioè già espresse nel nostro ambiente spazio-temporale, ma più generalmente come processo di selezione tramite l'attualizzazione di proprietà che possiedono anche uno status solo potenziale.

In altre parole, l'evoluzione risulterebbe da forme di interazione più generali rispetto a quelle normalmente considerate, con i diversi contesti evolutivi che eserciterebbero le loro influenze (tipicamente in modo sequenziale) secondo dinamiche del tipo “rottura (ponderata) di simmetria”, dove la selezione verrebbe operata a partire da un bacino più ampio di possibilità (Gabora & Aerts 2005a,b; Aerts et al. 2011; Aerts & Sassoli de Bianchi, 2018).

Inoltre, l'adozione di una prospettiva concettualistica significa che l'evoluzione delle diverse specie biologiche sarebbe molto più simile a un'*evoluzione culturale*. Ciò significa che la nostra cultura umana, apparsa come un processo evolutivo secondario in seguito a quello delle specie biologiche, sarebbe parte di un processo più antico e primordiale di “cambiamento culturale cosmico”, in vigore sin dall'inizio della nostra realtà. Ciò significa che non sarebbe l'*evoluzione darwiniana* a dover essere considerata come modello generale per l'evoluzione culturale, cioè per descrivere anche i cambiamenti epistemologici e concettuali, ma viceversa, sarebbe l'evoluzione culturale, cioè i processi di cambiamento che avvengono attorno a noi a livello concettuale, psicologico e sociale, che rappresenterebbero il nostro modello evolutivo più avanzato e generale, da utilizzare anche per meglio comprendere la nostra evoluzione biologica come specie.

Naturalmente, non stiamo qui dicendo che i meccanismi evolutivi darwiniani non si applicherebbero in quanto tali, ma semplicemente suggerendo che andrebbero riformulati entro un quadro concettualistico più ampio, nello stesso modo in cui la fisica classica è stata riformulata entro i quadri esplicativi più ampi della meccanica quantistica e della relatività (Aerts & Sassoli de Bianchi, 2018).

Come pensiero di chiusura, possiamo menzionare il *paradosso di Fermi*: l'osservazione che la vita intelligente sembri essere un fenomeno raro nel nostro teatro spazio-temporale, solitamente denominato *universo*, nonostante il fatto che le stime probabilistiche (ad esempio basate sulla famosa *equazione di Drake*) suggeriscano il contrario. Naturalmente, ciò potrebbe essere dovuto

semplicemente al fatto che le diverse forme di vita intelligente avanzata, esistenti nel cosmo, non abbiano attualmente un grande interesse a farsi notare da noi, o semplicemente che non abbiamo preso sufficientemente sul serio, come comunità scientifica, i molti avvistamenti inspiegabili di presunti oggetti extraterrestri (non inerti) di cui è ricca la vasta letteratura sugli UFO. Ma qualunque sia la ragione, possiamo anche ipotizzare che il nostro universo materiale e spaziale tridimensionale non sia in ogni caso il luogo migliore dove cercare la vita e la cultura nella nostra realtà non-spaziale. Citando da (Aerts & Sassoli de Bianchi, 2018):

“La vita e la cultura potrebbero infatti essere più abbondantemente scoperte non tanto esplorando il nostro universo in larghezza, cioè la sua vastità spaziale, ma in profondità, cioè esplorando quelle regioni che, dalla nostra prospettiva spazio-temporale, ci appaiono non-spaziali e non-temporali, e in tal senso più concettuali che oggettuali”.

Resta il problema di imparare a esplorare la nostra realtà non solo *in larghezza* (lo spazio esterno, come tipicamente esplorato dagli astronauti) ma anche *in profondità*, o più esattamente il problema di come promuovere l'esplorazione in profondità che abbiamo appena iniziato. Siamo condannati a contemplare la più ampia realtà non-spaziale rimanendo per sempre confinati entro il nostro teatro spaziale tridimensionale, vale a dire, dando solo una sbirciatina attraverso le finestre quantistiche e relativistiche, senza mai oltrepassarle, o saremo un giorno in grado di sbloccare nuove possibilità e promuovere vere e proprie esplorazioni spaziali “interiori”? Questa è una domanda alla quale è impossibile fornire oggi una risposta soddisfacente, ma su cui è certamente possibile e utile meditare.

Ringraziamenti

L'autore ha il piacere di ringraziare *Ulrike M. Boblmann*, per aver fornito lo stimolo di scrivere questo articolo. Ringrazia anche *Diederik Aerts*, *Tomas Veloz* e due anonimi revisori, per i commenti utili e pertinenti che ne hanno sicuramente migliorato il contenuto.

Bibliografia

- Abbott, E. A. (1884). *Flatland: A Romance in Many Dimensions*; London: Seeley & Co.
- Aerts, D. (1984). The missing elements of reality in the description of quantum mechanics of the EPR paradox situation. *Helvetica Physica Acta* 57, pp. 421-428.
- Aerts, D. (1990). An attempt to imagine parts of the reality of the micro-world. In: J. Mizerski, et al. (Eds.), *Problems in Quantum Physics II*; Gdansk '89, World Scientific Publishing Company, Singapore, pp. 3-25.
- Aerts, D. (1999). The Stuff the World is Made of: Physics and Reality. In: *The White Book of Einstein Meets Magritte*, Edited by Diederik Aerts, Jan Broekaert and Ernest Mathijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 129-183.
- Aerts, D. (2009). Quantum particles as conceptual entities: A possible explanatory framework for quantum theory. *Foundations of Science* 14, pp. 361-411.
- Aerts, D. (2010a). Interpreting quantum particles as conceptual entities. *International Journal of Theoretical Physics* 49, pp. 2950-2970.
- Aerts, D. (2010b). A potentiality and conceptuality interpretation of quantum physics. *Philosophica* 83, pp. 15-52.
- Aerts, D. (2013). La mecànica cuántica y la conceptualidad: Sobre materia, historias, semántica y espacio-tiempo. *Scientiae Studia* 11, pp. 75-100. Translated from: Aerts, D. (2011). Quantum theory and conceptuality: Matter, stories, semantics and space-time. arXiv:1110.4766 [quant-ph]. Also published in: *AutoRicerca*, Issue 18, Year 2019.
- Aerts, D. (2014). Quantum theory and human perception of the macro-world. *Front. Psychol.* 5, Article 554; doi: 10.3389/fpsyg.2014.00554.
- Aerts, S. (2005). A realistic device that simulates the non-local PR box without communication. arXiv:quant-ph/0504171.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Geriente, S., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S., & Veloz, T. (2018a). Spin and wind directions I: Identifying entanglement in nature and cognition. *Foundations of Science* 23, pp. 323-335.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Geriente, S., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S., & Veloz, T. (2018b). Spin and wind directions II: A Bell state quantum model. *Foundations of Science* 23, pp. 337-365.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Geriente, S., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. & Veloz, T. (2019). Quantum entanglement in physical and cognitive systems: a conceptual analysis and a general representation. arXiv:1903.09103 [q-bio.NC].
- Aerts, D. & Aerts, S. (2004). Towards a general operational and realistic framework for quantum mechanics and relativity theory. In: A. C. Elitzur, S.

- Dolev and N. Kolenda (Eds.), *Quo Vadis Quantum Mechanics? Possible Developments in Quantum Theory in the 21st Century*. Berlin: Springer.
- Aerts, D., Aerts, S., Broekaert J. & Gabora L. (2000). The Violation of Bell Inequalities in the Macroworld. *Found. Phys* 30, p. 1387.
- Aerts, D., Bundervoet, S., Czachor, M., D'Hooghe, B., Gabora, L., Polk, P. & Sozzo, S. (2011). On the Foundations of the Theory of Evolution. In: Aerts, D. et al (eds.). *Worldviews, Science and Us: Bridging Knowledge and Its Implications for our Perspectives of the World*. Singapore, World Scientific.
- Aerts, D., Gabora, L. & Sozzo, S. (2013). Concepts and their dynamics: A quantum-theoretic modeling of human thought. *Topics in Cognitive Science* 5, pp. 737-772.
- Aerts, D. & Sassoli de Bianchi, M. (2014). The Extended Bloch Representation of Quantum Mechanics and the Hidden-Measurement Solution to the Measurement Problem. *Annals of Physics* 351, pp. 975-1025. See also the *Erratum*: *Annals of Physics* 366, 2016, pp. 197-198.
- Aerts, D. & Sassoli de Bianchi, M. (2015a). Do spins have directions? *Soft Computing* 21, 1483-1504.
- Aerts, D. & Sassoli de Bianchi, M. (2015b). Many-Measurements or Many-Worlds? A Dialogue. *Foundations of Science*, pp. 399-427.
- Aerts, D. & Sassoli de Bianchi, M. (2017). Quantum measurements as weighted symmetry breaking processes: the hidden measurement perspective. *International Journal of Quantum Foundations* 3, pp. 1-16.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2018). Quantum perspectives on evolution. In: S. Wuppuluri & F. A. Doria (Eds.), *The map and the territory: Exploring the foundations of science, thought and reality*. Berlin: Springer (The Frontiers collection, 2018), pp. 571-595.
- Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M. & Sozzo, S. (2016). On the Foundations of the Brussels Operational-Realistic Approach to Cognition. *Front. Phys.* 4:17. Doi: 10.3389/fphy.2016.00017
- Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, Veloz, T. (2018). On the Conceptuality Interpretation of Quantum and Relativity Theories. *Foundations of Science*. Doi: 10.1007/s10699-018-9557-z. (Also published in this volume).
- Aerts, D. & Sozzo S. (2011). Quantum structure in cognition: Why and how concepts are entangled. *Quantum Interaction. Lecture Notes in Computer Science* 7052, pp. 116-127. Berlin: Springer.
- Aerts, D. & Sozzo, S. (2015). What is Quantum? Unifying Its Micro-physical and Structural Appearance. In: Atmanspacher, H. et al (eds.). *Quantum Interaction. QI 2014*, pp. 12–23. *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8951. Springer, Cham.
- Aerts, D., Sozzo, S. & Veloz, T. (2015). The quantum nature of identity in human thought: Bose-Einstein statistics for conceptual indistinguishability. *International Journal of Theoretical Physics*, 54, pp. 4430-4443.
- Aspect, A. (1999). Bell's inequality test: more ideal than ever. *Nature (London)*

- 398, pp. 189-190.
- Aspect, A., Grangier, P. & Roger, G. (1982). Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities. *Phys. Rev. Lett.* 49, p. 91.
- Bancal, J-D., Pironio, S., Acín, A., Liang, Y-C., Scarani, V. & Gisin, N. (2012). Quantum non-locality based on finite-speed causal influences leads to superluminal signalling, *Nature Physics* 8, pp. 867-870.
- Bell, J. S. (1964). One the Einstein Podolsky Rosen paradox. *Physics* 1, pp. 195-200. Reproduced as Ch. 2 of J. S. Bell, *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, 1987).
- Bell, J. S. (1971). In: B. d'Espagnat (Ed.), *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi," Course XLIX* (Academic Press, New York), p. 171.
- Bell, J. S. (1981). Bertlmann's socks and the nature of reality. *Journal de Physique Colloques* 42 (C2), pp. C2-41-C2-62. Doi: 10.1051/jphyscol:1981202.
- Bohm, D. (1957). *Causality and Chance in Modern Physics*. Routledge & Kegan Paul, London, p. 117.
- Busemeyer, J.R. & Bruza, P.D. (2012). *Quantum Models of Cognition and Decision*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Cocciaro, B., Faetti, S. & Fronzoni, L. (2011). A lower bound for the velocity of quantum communications in the preferred frame. *Physics Letters A* 375, pp. 379–384.
- Coretti, S., Hänggi, E. & Wolf, S (2011). Nonlocality is Transitive, *Phys. Rev. Lett.* 107, 100402.
- De Ronde, C. (2018). Quantum superpositions and the representation of physical reality beyond measurement outcomes and mathematical structures. *Foundations of Science* 23, pp. 621–648.
- Eibenberger, S., Gerlich, S., Arndt, M., Mayor, M. & Tüxen, J. (2013). Matter-wave interference of particles selected from a molecular library with masses exceeding 10000 amu. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 15, 14696.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* 47, pp. 777-780.
- Gabora, L. & Aerts, D. (2005a). Evolution as context-driven actualisation of potential: toward an interdisciplinary theory of change of state. *Interdisciplinary Science Reviews* 30, pp. 69–88.
- Gabora, L. & Aerts, D. (2005b). Distilling the Essence of an Evolutionary Process and Implications for a Formal Description of Culture. In: Kistler, W. (ed.). *Proceedings of Center for Human Evolution Workshop 4: Cultural Evolution*, May 18-19, 2000. Bellevue, WA: Foundation for the Future.
- Gerlich, S., Eibenberger, S., Tomandl, M., Nimmrichter, S., Hornberger, K., Fagan, P. J., et al. (2011). Quantum interference of large organic molecules. *Nature Communications* 2, p. 263.

- Haven, E. & Khrennikov, A.Y. (2013). *Quantum Social Science*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Kastner, R. E. (2013). *The transactional Interpretation of Quantum Mechanics: The Reality of Possibility*. Cambridge University Press, New York.
- Morier D.M. & Borgida E. (1984). The conjunction fallacy: a task specific phenomena? *Personality and Social Psychology Bulletin* 10, pp. 243-252.
- Piron, C. (1990). *Mécanique quantique: Bases et applications*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Switzerland.
- Rauch, H., Zeilinger, A., Badurek, G., Wilfing, A., Bauspiess, W., Bonse, U. (1975). Verification of coherent spinor rotation of fermions. *Phys. Lett.* 54A, pp. 425-427.
- Salart, D., Baas, A., Branciard, C., Gisin, N. & Zbinden, H. (2008). Testing the speed of ‘spooky action at a distance’. *Nature* 454, pp. 861-864.
- Sassoli de Bianchi, M. (2013a). Using simple elastic bands to explain quantum mechanics: a conceptual review of two of Aerts’ machine-models. *Central European Journal of Physics* 11, pp. 147-161.
- Sassoli de Bianchi, M. (2013b). Quantum dice. *Annals of Physics* 336, pp. 56-75.
- Sassoli de Bianchi, M. (2014). A remark on the role of indeterminism and non-locality in the violation of Bell’s inequality. *Annals of Physics* 342, pp. 133-142.
- Sassoli de Bianchi, M. (2017). Theoretical and conceptual analysis of the celebrated 4π -symmetry neutron interferometry experiments. *Foundations of Science* 22, pp. 627-653.
- Schrödinger, E. (1935). *Naturwissenschaften*, 23, 807. English translation: John D. Trimmer (1980). *Proceedings of the American Philosophical Society* 124, p. 323. Reprinted in: J. A.
- Tversky, A. & Kahneman, D. (1983). Extension versus intuitive reasoning: The conjunction fallacy in probability judgment. *Psychological Review* 90(4), pp. 293-315.
- Vigier, J. P., Dewdney, C., Holland, P. R. & Kyprianidis, A. (1987). Causal particle trajectories and the interpretation of quantum mechanics. In: *Essays in Honour of David Bohm*, Eds. B.J. Hiley & F.D. Peat, pp. 169-204, Routledge, London.
- Werner, S.A., Colella, R., Overhauser, A.W., Eagen, C.F. (1975). Observation of the Phase Shift of a Neutron Due to Precession in a Magnetic Field. *Phys. Rev. Lett.* 35, p. 1053.
- Wheeler, J.A. & W.H. Zurek (Eds.), *Quantum Theory and Measurement* (Princeton University Press, Princeton, 1983) p. 152.
- Wendt, A. (2015). *Quantum mind and social science*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Zou, X.Y., Grayson, T., Wang, L. J. & Mandel, L. (1992). Can an “empty” de Broglie pilot wave induce coherence? *Phys. Rev. Lett.* 68, pp. 3667-3669.

Nota: Questo articolo è stato inizialmente pubblicato in inglese in un numero speciale di *Foundations of Science*, risultato della conferenza “Worlds of Entanglement at IFICC – Chile, 7-8 March 2019, Santiago de Chile”. L’articolo in inglese è stato poi riproposto anche in *AutoRicerca* 21, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10699-020-09719-4>.