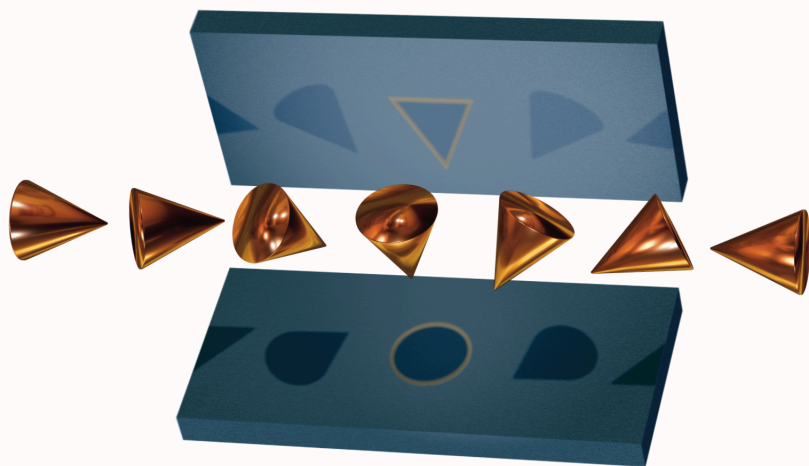


AUTO RICERCA 24

Quantistica & concettualistica



Diederik Aerts

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Sandro Sozzo

Tomas Veloz

AUTO R I C E R C A

Quantistica & concettualistica

Numero 24
Anno 2022

LAB

<i>Rivista</i>	AutoRicerca
<i>Numero</i>	24
<i>Anno</i>	2022
<i>Pagine</i>	220
<i>ISSN</i>	2673-5113
<i>Titolo</i>	Quantistica e concettualistica
<i>Autori</i>	Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M. Sozzo, S. & Veloz, T.
<i>Editore</i>	Massimiliano Sassoli de Bianchi
<i>Copertina</i>	Luca Sassoli de Bianchi
<i>Copyright</i>	Gli autori (tutti i diritti riservati)
<i>Web</i>	www.autoricerca.ch , www.autoricerca.com

AutoRicerca è la rivista del *LAB – Laboratorio di AutoRicerca di Base* (www.autoricerca.ch), via Cadepiano 18, 6917 Barbengo, Svizzera.

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

Indice

Editoriale	5
A proposito degli autori	11
Una realtà non-spaziale <i>Massimiliano Sassoli de Bianchi</i>	15
Sull'interpretazione concettualistica della teoria quantistica e relativistica <i>Diederik Aerts, Massimiliano Sassoli de Bianchi Sandro Sozzo & Tomas Velož</i>	63
Dall'interpretazione a molti mondi di Everett-DeWitt all'approccio a misure nascoste della scuola di Geneva-Brussels <i>Diederik Aerts & Massimiliano Sassoli de Bianchi</i>	153
Invito alla lettura	217
Numeri precedenti	219

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

Editoriale

Questo ventiquattresimo volume di AutoRicerca, primo volume del 2022, è interamente dedicato alla *fisica* e contiene tre articoli che affrontano aspetti fondamentali della *meccanica quantistica* e della *teoria della relatività*. Tutti e tre gli articoli toccano, in modo più o meno specifico, la cosiddetta *interpretazione concettualistica* della teoria quantistica e della relatività, inizialmente proposta da *Diederik Aerts* nel 2009 e attualmente indagata da alcuni membri del “gruppo di Bruxelles”, presso il *Center Leo Apostel for Transdisciplinary Research (CLEA)*.¹

Il primo articolo, già pubblicato in inglese nella rivista *Foundations of Science*,² e in seguito ripubblicato (sempre in inglese) sul numero 21 di *AutoRicerca*, fu curato dal sottoscritto tenendo a mente uno degli obiettivi di CLEA: quello di un’ampia diffusione della conoscenza scientifica. Pertanto, si rivolge a un pubblico genuinamente trasversale di lettori, non necessariamente con una preparazione di tipo accademico.

Il suo contenuto è stato inizialmente presentato in un intervento che ebbi il piacere di tenere il 16 maggio 2019, a Parigi, presso la sede “Bertrand” dell’*Agenzia Spaziale Europea (ESA)*, nell’ambito del loro “Beyond Space lunchtime series,” il cui scopo era presentare al personale dell’agenzia delle idee che vanno “oltre lo spazio” in quanto tale.³

Il titolo di questo primo articolo è “Una realtà non spaziale”, e cerca di evidenziare che, in base a quanto appreso sul comportamento delle entità del micromondo, siamo in qualche modo obbligati ad accettare che non potranno mai essere pienamente rappresentate come delle entità appartenenti al nostro

¹ CLEA è un centro interfacoltà della *Vrije Universiteit Brussel*, la cui missione è gettare ponti tra le diverse discipline scientifiche, sociali e culturali (<https://clea.research.vub.be>).

² Sassoli de Bianchi, M. (2021). A Non-Spatial Reality. *Found Sci* 26, 143–170. doi: 10.1007/s10699-020-09719-4

³ Per chi è interessato, esiste anche un video su YouTube che si basa sul PowerPoint di quella mia presentazione: <https://youtu.be/omvHPruoDMQ>.

esiguo teatro spaziale, e più in generale spaziotemporale. In altre parole, gli elementi costitutivi della nostra realtà fisica sarebbero di natura *non-spaziale*.

Questa è un'osservazione cruciale per l'interpretazione concettualistica, poiché una volta stabilito che i fenomeni quantistici (come l'entanglement, gli effetti di interferenza e l'indistinguibilità), se esaminati attentamente, ci raccontano che c'è molto di più nella nostra realtà fisica di ciò che può essere rappresentato in termini spaziotemporali, resta allora la pressante questione di sapere quale possa essere la vera *natura* di un'entità non-spaziale del micromondo.

Per quanto mi è dato di sapere, nessuna interpretazione della fisica quantistica ha mai offerto una risposta soddisfacente a questa domanda, salvo per l'appunto l'interpretazione concettualistica, che viene presentata in modo estensivo nel secondo articolo contenuto in questo volume; articolo che ho avuto il piacere di scrivere in collaborazione con *Diederik Aerts, Sandro Sozzo e Tomas Veloz*.

Il testo fu pubblicato per la prima volta nel 2018, su *Foundations of Science*,⁴ quindi riproposto, sempre in inglese, nel numero 21 di *AutoRicerca*, e ora sono lieto di poterlo finalmente proporre anche in traduzione italiana.

Questo lungo lavoro è una versione estesa di una conferenza plenaria che ebbi l'onore di tenere al simposio *Worlds of Entanglement*,⁵ nel settembre del 2017, a Bruxelles, che comprendeva numerose sessioni dedicate a diversi temi della ricerca, come i fondamenti della fisica quantistica, le strutture probabilistiche non classiche, l'entanglement nelle scienze sociali, i sistemi complessi, l'intelligenza artificiale quantistica, le teorie della decisione in condizioni di

⁴ Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. & Veloz, T. (2020). On the Conceptuality interpretation of Quantum and Relativity Theories. *Foundations of Science* 25, pp. 5–54. doi: 10.1007/s10699-018-9557-z.

⁵ Questo simposio si è iscritto nella continuità di precedenti eventi organizzati dal CLEA, in particolare la conferenza *Einstein meets Magritte* (1995) e il simposio *Times of Entanglement* (2010), che hanno riunito alcuni dei pensatori più famosi al mondo, come Zygmunt Bauman, Brian Arthur, Ilya Prigogine, Heinz von Foerster, William Calvin, Bas van Fraassen, Bob Edwards, Adolf Grunbaum, Rom Harré, Chris Langton, Constantin Piron, Francisco Varela, Linda Schele, Robert Pirsig, Barbara Hernstein-Smith, John Ziman, e molti altri ancora, per promuovere un dialogo interdisciplinare e transdisciplinare su questioni fondamentali della scienza e della società.

incertezza e lo studio coscienza, solo per citarne alcuni.

Nella mia presentazione,⁶ ho spiegato come sia possibile comprendere lo strano comportamento delle entità quantistiche e relativistiche adottando un'ipotesi speculativa circa la loro natura, che è alla base dell'interpretazione concettualistica. Citando il fisico francese *Jean-Marc Lévy-Leblond*:⁷

Bisogna oggi rendersi conto [...] che la teoria quantistica esiste, e che i suoi concetti, dopo un secolo di attività scientifica collettiva, sono profondamente radicati nel senso comune dei fisici. Questi concetti non hanno più bisogno di essere accostati a quelli della fisica classica, ma possono, e dovrebbero, essere presi sul serio, per quello che realmente sono. Una tale comprensione, intrinsecamente quantistica, ci porta a riconoscere che gli enti della fisica quantistica non sono né onde né particelle, come vorrebbe farci credere la dualità; non sono *né onde, né particelle*, anche se esibiscono, in circostanze molto particolari, due tipi di comportamento limite come onde (classiche) o particelle (classiche) [...]. È stato proposto di sottolineare questo aspetto ontologico denominandoli “quantoni”.

L'ipotesi speculativa alla base dell'interpretazione concettualistica è che i “quantoni” di cui parla Lévy-Leblond, in ultima analisi, altro non sarebbero che dei *cognitoni*,⁸ vale a dire, non delle *entità oggettuali*, ma delle *entità concettuali*. Tuttavia, ciò non va inteso nel senso che le entità quantistiche (e relativistiche) sarebbero equiparabili a dei concetti umani, ma nel senso che condividerebbero con essi una natura simil-concettuale, allo stesso modo in cui, ad esempio, le onde marine e le onde acustiche, pur essendo entità molto diverse, condividono nondimeno la stessa natura ondulatoria.

⁶ Per chi è interessato, esiste anche un video su YouTube che si basa sul PowerPoint della mia presentazione: <https://youtu.be/-SteQN1A33M>.

⁷ Lévy-Leblond, J.-M. (2018). On the Conceptual Nature of the Physical Constants. In: *The Reform of the International System of Units (SI). Philosophical, Historical and Sociological Issues*. Edited by: Nadine de Courtenay, Olivier Darrigol, and Oliver Schlaudt, Routledge, pp. 125-149.

⁸ Il termine “cognitone” è stato introdotto di recente da *Diederik Aerts e Lester Bertrand*, in: Aerts, D., Beltran, L. (2020). Quantum Structure in Cognition: Human Language as a Boson Gas of Entangled Words. *Found Sci* 25, pp. 755–802, 2020. doi: 10.1007/s10699-019-09633-4.

Tutto questo verrà ampiamente spiegato e motivato nel summenzionato articolo, che è stato scritto pensando a un pubblico interdisciplinare, quindi a dei lettori non necessariamente specialisti nel campo della fisica. Nondimeno, si rivolge a dei lettori con una sufficiente cultura generale della fisica moderna, realmente motivati ad accedere a spiegazioni e comprensioni d'avanguardia, con una particolare attenzione all'importantissimo dibattito sulle possibili interpretazioni e fondamenti delle teorie fisiche.

Riguardo l'importanza di trovare un'interpretazione per il formalismo quantistico, è utile citare le parole del filosofo *Tim Maudlin*:⁹

Non c'è dubbio che [...] esiste un formalismo matematico da cui sappiamo estrarre delle previsioni, e che quelle previsioni possono essere accurate fino a quattordici cifre decimali, ma [...] una teoria fisica è più di un semplice formalismo matematico con delle regole, dovrebbe poter specificare un'ontologia fisica, il che significa: dimmi cosa esiste nel mondo fisico; ci sono particelle? Ci sono campi? C'è lo spaziotempo? E dovrebbe parlarmi di queste cose [...] e il problema è che [...] la teoria quantistica non è una teoria in questo senso, è solo un formalismo, e quindi ciò che la gente chiama "interpretazione della teoria quantistica" – che suona come una cosa buffa da fare, perché si potrebbe dire, beh, ho una teoria, cosa sarebbe un'interpretazione? – [...] corrisponde di fatto allo sviluppo di precise teorie fisiche che fanno le stesse previsioni, o quasi le stesse previsioni, di quelle derivate a partire da questa ricetta matematica standard [...].

Nel corso degli anni sono state proposte innumerevoli interpretazioni del formalismo quantistico, ognuna con i suoi vantaggi e svantaggi. L'interpretazione concettualistica si distingue per il fatto che è emersa dal recente successo dell'uso del formalismo matematico quantistico nella modellazione di diversi aspetti della cognizione umana, come le dinamiche concettuali nei processi di pensiero e decisionali umani.

Questo successo ha portato Aerts a coltivare l'idea che non potesse essere una mera coincidenza che il formalismo matematico della meccanica quantistica fosse così ben attrezzato nel descrivere

⁹ Vedi l'intervista: "The Problem With Quantum Theory," *The Institute of Art and Ideas*: <https://youtu.be/hC3ckLqsL5M>.

così tanti aspetti del dominio cognitivo umano, che ciò fosse dovuto a una corrispondenza più profonda, legata alla vera natura delle entità microfisiche.

Aerts lavorò sull'idea dell'interpretazione concettualistica inizialmente in silenzio, ma non appena il potere esplicativo dell'interpretazione divenne sempre più evidente, permettendogli di superare tutti gli aspetti difficili da comprendere della meccanica quantistica, come il principio di indeterminazione di Heisenberg, le particelle indistinguibili e l'entanglement, dal 2009 iniziò a pubblicare le sue intuizioni e i primi risultati di questo potente quadro esplicativo, il cui presupposto era che le entità quantistiche fossero delle entità concettuali, cioè delle entità governate dal livello del significato.

Il secondo articolo presente in questo volume offre per la prima volta una presentazione sistematica, a 360°, di quest'affascinante interpretazione, che mette a dura prova i nostri pregiudizi storici sulla realtà fisica, quelli che vorrebbero che fosse costituita unicamente da oggetti spaziotemporali.

Ora, c'è una ragione per non aver proposto questo importante articolo, di ben 89 pagine (praticamente un piccolo libro!) come primo articolo di questo Numero 24 di *AutoRicerca*. Come è noto, la rivista si rivolge a un vasto pubblico di lettori, molti dei quali potrebbero non digerire così facilmente questo piccolo trattato, anche se contiene pochissime formule matematiche. Ho pensato quindi di farlo precedere da un testo di più semplice lettura, più orientato alla didattica, così da offrire un approccio più graduale al tema. Ma il lettore è ovviamente libero di adottare il percorso di lettura che più gli si addice.

Venendo ora al terzo e ultimo, si tratta di un dialogo immaginario, che scrissi a quattro mani con Diederik Aerts. Si tratta di una rivisitazione ed estensione di un articolo pubblicato in inglese nel 2015, nella rivista *Foundations of Science*.¹⁰

Il testo sarà di sicuro interesse per chi è rimasto affascinato dalla cosiddetta “interpretazione a molti mondi della fisica quantistica”, che contempla un numero infinito di mondi (o universi) paralleli,

¹⁰ Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M. (2015). Many-Measurements or Many-Worlds? A Dialogue. *Found Sci* 20, pp. 399–427 (2015). doi: 10.1007/s10699-014-9382-y.

che si diramano in continuazione, dove tutti i possibili esiti di una misura quantistica vengono sempre e immancabilmente attualizzati. Nel dialogo, questa visione “a molti mondi” viene contrapposta a un’altra visione, “a molte misure”, dove esiste invece un solo mondo, dove le misure quantistiche sono in grado di produrre un singolo esito alla volta.

A differenza dei molti mondi dell’interpretazione di Everett-DeWitt, il singolo mondo dell’interpretazione “a molte misure” (più precisamente detta “interpretazione a misure nascoste”, che è perfettamente compatibile con l’interpretazione concettualistica) possiede maggiore profondità, in quanto contempla l’esistenza di una vastissima dimensione di pura potenzialità, di natura non-spaziotemporale, grazie alla quale diventa possibile dare un senso, e un fondamento, anche ai processi di natura creativa.

Mi auguro che i tre articoli presentati in questo volume forniranno al lettore una prospettiva intellettualmente stimolante, e suggestiva sulle due grandi rivoluzioni scientifiche del secolo scorso: la quantistica e la relatività.

Ogni articolo è a sé stante e potrà essere letto indipendentemente dagli altri due; quindi, suggerisco al lettore di lasciarsi guidare dall’intuito, soprattutto se decidesse di leggerne uno solo. E per i coraggiosi che sceglieranno di percorrere l’intero volume, ci saranno delle inevitabili ripetizioni, ma come dice il proverbio latino, *repetita iuvant*, cioè, in un contesto di apprendimento, ripetere più volte certe nozioni e ragionamenti può facilitarne la comprensione.

A prescindere dai percorsi cognitivi scelti, come sempre vi auguro buono studio e una piacevole lettura!

Massimiliano Sassoli de Bianchi
Editore

A proposito degli autori

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



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

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



ricercatori di CLEA per QUARTZ, una rete di formazione innovativa che mira a educare i ricercatori in fase iniziale ad adottare un nuovo approccio all'accesso e recupero delle informazioni (IAR), basato sulla struttura della meccanica quantistica. Attualmente, dirige il Laboratorio di Autoricerca di Base (LAB), a Lugano, Svizzera, è l'editore della rivista AutoRicerca, e presidente della società Area 302. È nel comitato scientifico dell'associazione BrainCircle Lugano, nata nel 2019, il cui l'obiettivo è avvicinare il pubblico, in particolare i giovani, al mondo della ricerca. È membro a vita dell'American Physical Society (APS), membro dell'American Association of Physics Teachers (AAPT), dell'International Quantum Structure Association (IQSA), dell'International Network on Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information (INFQMCI), e della Society of Scientific Exploration (SSE).

Sandro Sozzo, fisico teorico, è “associate professor” presso la “University of Leicester” (Regno Unito). I suoi interessi di ricerca riguardano principalmente i fondamenti logico-epistemologici delle scienze naturali e cognitive. In particolare, ha sviluppato una nuova prospettiva teorica per la rappresentazione dei sistemi cognitivi che spiega in modo unitario l'origine di numerose fallacie cognitive e deviazioni dalla razionalità nei giudizi e nelle decisioni in presenza di incertezza. Tale prospettiva ha avuto interessanti applicazioni nelle scienze informatiche, per esempio, nell'accesso e recupero dell'informazione. Sandro Sozzo è autore di un centinaio di pubblicazioni, ha organizzato diverse conferenze internazionali, ha presentato in più di sessanta conferenze ed è stato invitato a tenere lezioni nel Regno Unito (Università di Oxford), Unione Europea, Canada, Cina e Stati Uniti. Ha inoltre ricevuto diversi riconoscimenti sia per la didattica che per la ricerca. Nel 2014 ha fondato e attualmente dirige il centro di ricerca “Centre for Quantum Social and Cognitive Science” (IQSCS). Nell'ambito delle attività del centro IQSCS, Sandro Sozzo è “principal investigator” nel consorzio “Quantum Information Access and Retrieval Theory” (QUARTZ), che comprende sette istituzioni europee e ha ricevuto finanziamenti dall'Unione Europea per un “Marie Curie Innovative Training Network”.



Tomas Veloz si è laureato in fisica (BSc), matematica (BSc) e informatica (MSc) presso l'Università del Cile, rispettivamente nel 2005, 2007 e 2010. Ha ricevuto il PhD in studi interdisciplinari presso l'Università della British Columbia nel 2015. È attualmente direttore della Modellazione matematica presso il Centro Leo Apostel (CLEA) della Vrije Universiteit Brussels (VUB). La sua ricerca porta principalmente sulla modellazione matematica interdisciplinare. Una delle sue aree di interesse è la teoria dell'organizzazione chimica, dove ha dimostrato il teorema della decomposizione e l'esistenza di strutture organizzative di tipo quantistico. Un suo altro campo di studio è la cognizione quantistica, dove ha sviluppato metodi per rappresentare collezioni di concetti in uno spazio di Hilbert e ha dimostrato che vari fenomeni cognitivi e linguistici presentano delle strutture quantistiche. Veloz è anche fondatore e direttore della "Foundation for the Interdisciplinary Development of Science, Technology and Arts", una fondazione con sede in Cile che collabora con il CLEA e con altre istituzioni in tutto il mondo, per creare e diffondere una conoscenza integrata e sviluppare progetti con un impatto sociale.



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'iperentità 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.

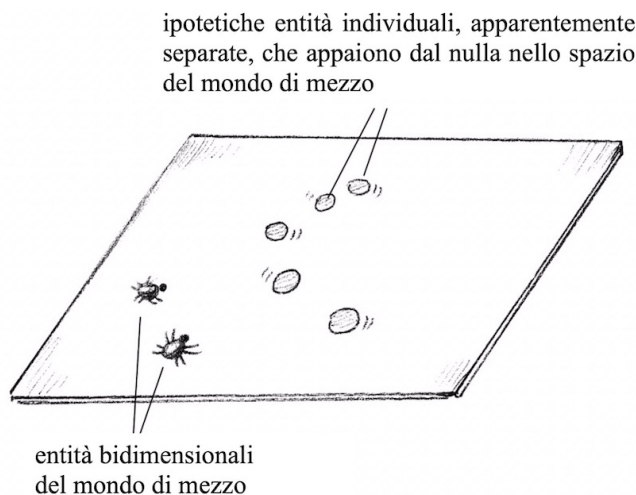


Figura 2 Gli abitanti di un mondo bidimensionale potrebbero scambiare una singola entità tridimensionale unitaria, come una mano, come cinque entità separate, che si muovono indipendentemente le une dalle altre.

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 attornati 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).

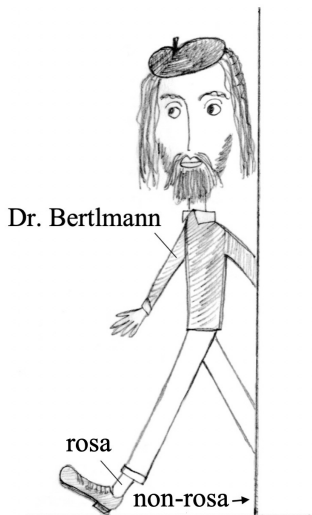


Figura 3 Una descrizione della situazione dei calzini di Bertlmann, come descritta nell'articolo di Bell del 1981, intitolato "Bertlmann's socks and the nature of reality", ossia, "I calzini di Bertlmann e la natura della realtà" (Bell, 1981).

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.

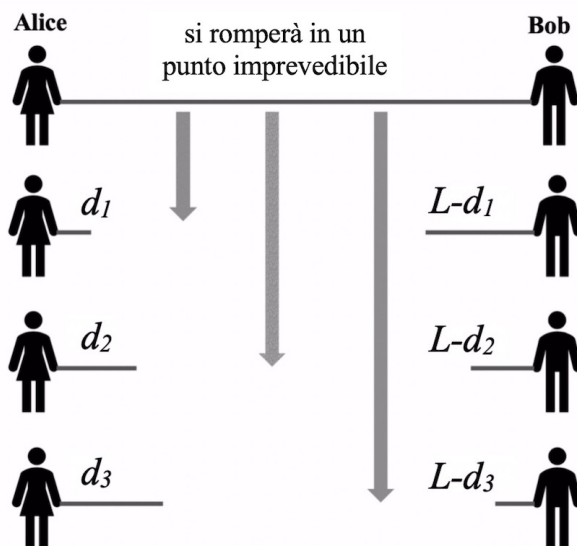


Figura 4 Tre possibili esiti di un processo di rottura di una banda elastica. Sebbene le lunghezze ottenute dei due frammenti possano essere diverse a ogni “esperimento di rottura”, sono nondimeno sempre perfettamente correlate, dato che la loro somma è necessariamente uguale alla lunghezza totale L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

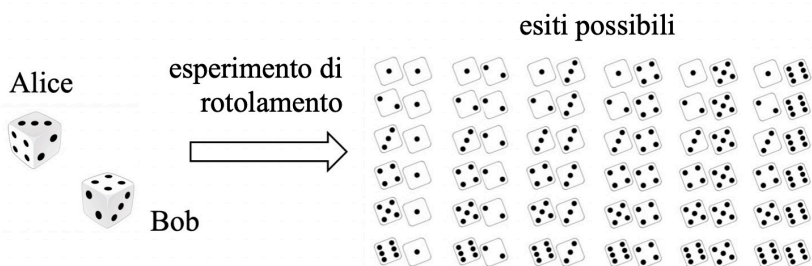


Figura 5 Facendo rotolare due dadi non connessi tra loro, è possibile ottenere 36 coppie equiprobabili di risultati differenti. Sebbene per ogni dado una faccia superiore viene singolarmente creata in modo del tutto imprevedibile, i risultati ottenuti per ciascun dado sono indipendenti l'uno dall'altro,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

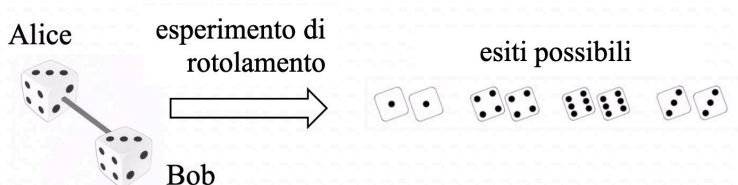


Figura 6 Collegando i due dadi è possibile attualizzare solo 4 coppie equiprobabili di risultati. L'esperimento di rotolamento congiunto è allora in grado di creare delle correlazioni che violano le disuguaglianze di Bell.

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.

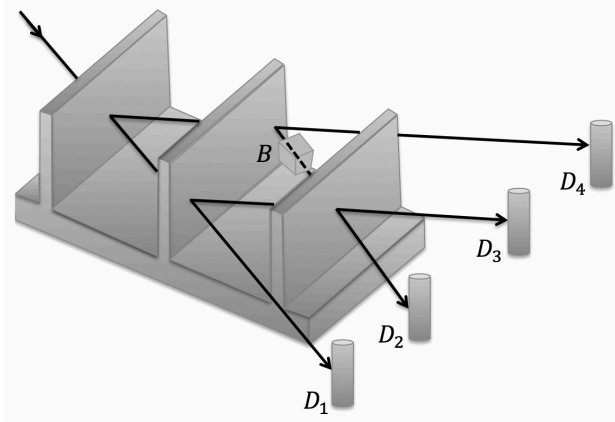


Figura 7 Una raffigurazione dell'interferometro ricavato dal cristallo di silicio (Si), in grado di suddividere il fascio incidente di neutroni in quattro fasci distinti, che vengono poi rilevati dai quattro rivelatori D_1 , D_2 , D_3 e D_4 . Lungo il percorso di uno dei due fasci interni, viene applicato 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 due 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.

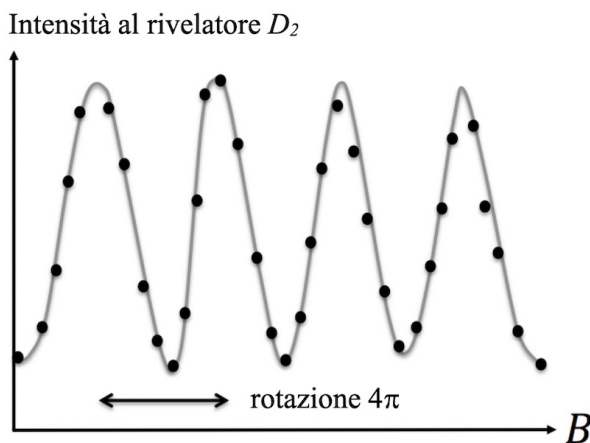


Figura 8 I dati ottenuti da Rauch et al (1975), che mostrano la tipica periodicità 4π dell'intensità misurata dal rivelatore D_2 , quando varia la forza del campo magnetico B , applicato sul percorso interno superiore, in modo da variare corrispondentemente l'angolo di rotazione dello spin del neutrone,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

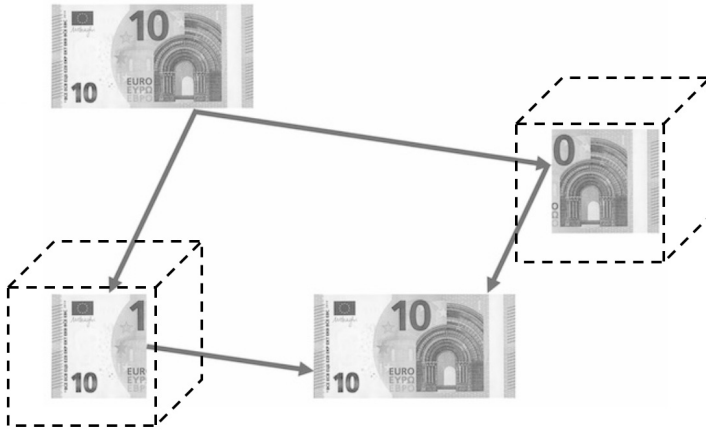


Figura 10 Una *banconota da 10 €* viene prima strappata in due parti, quindi i frammenti vengono mossi lungo due percorsi diversi (e ad esempio inseriti in due scatole separate), per ricombinarli infine in qualche altro luogo dello spazio. Nel processo, i *10 €* scompaiono dal nostro teatro spaziale,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

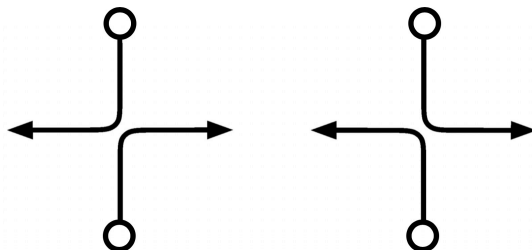


Figura 11 La situazione di due palle da biliardo identiche dirette l'una verso l'altra, con uguale velocità, una da nord e l'altra da sud. Poiché si muovono in direzioni opposte, faranno lo stesso dopo la collisione e le loro velocità (in valore assoluto) rimarranno le stesse (per conservazione della 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).

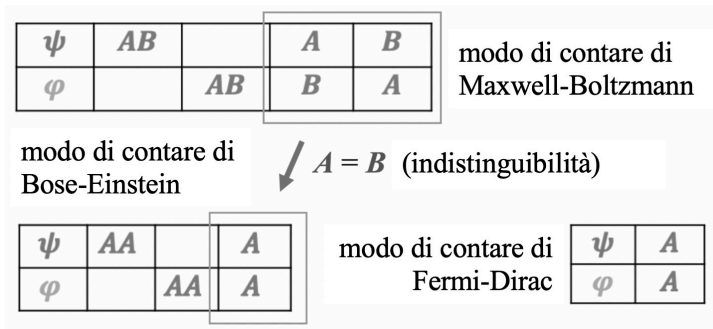


Figura 12 Il numero di stati possibili per un sistema formato da due entità (non interagenti) che possono trovarsi individualmente in due diversi stati, ψ e φ , quando (a) sono delle entità distinguibili (oggetti spaziali), corrispondente al modo di contare di Maxwell-Boltzmann; (b) sono delle entità 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.

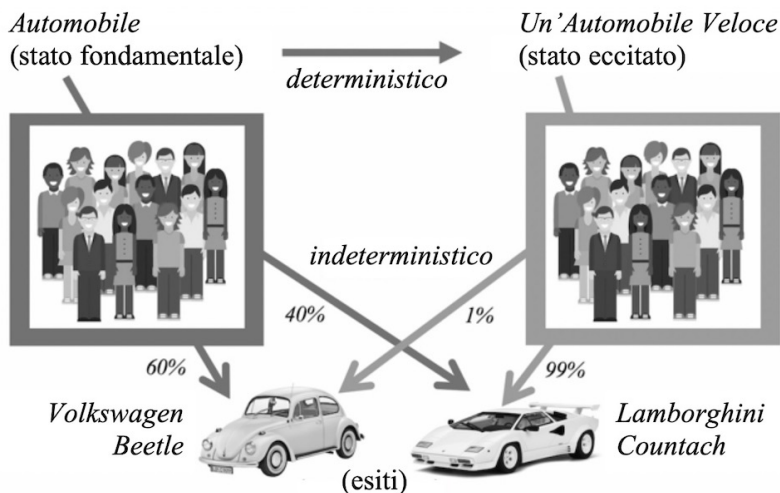


Figura 13 Stati differenti dell'entità concettuale *Automobile* produrranno delle probabilità differenti per i diversi esiti, quando sottoposta a un determinato contesto interrogativo, che qui consiste nel determinare quale dei due esempi/stati più concreti, *Maggiolino Volkswagen* o *Lamborghini Countach*, 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>.

AUTO RICERCA

Sull'interpretazione concettualistica della teoria quantistica e relativistica

Diederik Aerts

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Sandro Sozzo

Tomas Veloz

Numero 24

Anno 2022

Pagine 63-152

 LAB

Riassunto

Come possiamo spiegare lo strano comportamento delle entità quantistiche e relativistiche? Perché si comportano in modi che sfidano la nostra intuizione su come le entità fisiche si dovrebbero comportare, se consideriamo la nostra esperienza ordinaria del mondo che ci circonda? In questo articolo, affrontiamo queste domande mostrando che il comportamento delle entità quantistiche e relativistiche non è poi così strano, se solo teniamo in considerazione quale possa essere la loro vera natura: non oggettuale, ma concettuale. Questo non nel senso che le entità quantistiche e relativistiche sarebbero dei concetti umani, ma nel senso che condividerebbero con quest'ultimi la medesima natura concettuale, analogamente a come le onde elettromagnetiche e sonore, sebbene entità molto differenti, condividono una medesima natura ondulatoria. Quando questa ipotesi viene avvalorata, cioè quando un'interpretazione concettualistica della natura profonda delle entità fisiche viene presa seriamente, molte delle difficoltà interpretative scompaiono e il nostro mondo fisico torna nuovamente ad avere un senso, sebbene la nostra visione dello stesso muti radicalmente rispetto a quanto il nostro pregiudizio classico ci avrebbe fatto inizialmente credere.

1 Introduzione

Nel 1924, *Luis de Broglie*, nella sua tesi di dottorato (De Broglie 1924), fece una delle mosse più audaci nella storia della fisica moderna. In seguito all'introduzione da parte di Planck ed Einstein di un aspetto duale di tipo particella, associato alle onde luminose, per "spiegare" il loro strano comportamento in alcuni esperimenti, de Broglie, ragionando in modo speculare, emise l'ipotesi che un aspetto del tipo onda avrebbe dovuto essere altresì associato alle entità fisiche che fino a quel momento erano state considerate unicamente dei corpuscoli, come gli elettroni, i neutroni e i protoni.

Come tutte le nuove idee speculative, i fisici erano inizialmente molto incerti sul valore dell'ipotesi di de Broglie, ma fortunatamente Langevin ebbe la lungimiranza di inviare una copia della sua tesi a Einstein, che fu immediatamente conquistato dall'idea, così che a de Broglie fu infine concesso il dottorato di ricerca. Il resto è storia: qualche anno dopo, Davisson e Germer negli Stati Uniti, e G.P. Thomson, in Scozia, confermarono per mezzo di esperimenti di diffrazione che gli elettroni potevano comportarsi anche come delle onde. Nel 1929, Louis de Broglie ricevette così il Premio Nobel per la fisica per la sua scoperta della natura ondulatoria degli elettroni, che, come sappiamo, gettò le basi della meccanica quantistica, e nel 1937 anche Davisson e Thomson ricevettero il Premio Nobel, per i loro storici esperimenti di diffrazione.

Lo scopo di questo articolo è discutere di una più recente "mossa alla de Broglie", frutto anch'essa di un ragionamento speculare. Il punto di partenza è il nuovo e fiorente campo di ricerca noto con il nome di *cognizione quantistica*, dove il formalismo matematico della meccanica quantistica è stato applicato con inaspettato successo nella modellizzazione dei concetti umani e loro interazione con le menti umane, dimostrando che le donne e uomini di questo pianeta pensano e prendono decisioni decisamente in modo simil-quantistico. Ciò non significa necessariamente che i cervelli umani sarebbero come dei *computer quantistici*, che sfrutterebbero l'esistenza di effetti quantistici a livello microscopico, ma certamente significa

che un comportamento di tipo quantistico non è una prerogativa delle micro-entità, essendo invece piuttosto una forma di organizzazione che si ritrova a diversi livelli strutturali nella nostra realtà (Aerts e Sozzo 2015).

Ora, se le entità concettuali umane sono associabili a un comportamento simil-quantistico, e quindi possiedono una natura quantistica, è possibile ipotizzare che, viceversa, le entità microfisiche (quantistiche) andrebbero a loro volta associate a un comportamento simil-concettuale, e quindi possiederebbero una natura concettuale simile a quella dei concetti umani. Tuttavia, diversamente dalla dualità onda-particella, il binomio *quantisticità-concettualità* non sarebbe l'espressione di una relazione di complementarità, ma piuttosto di una relazione di somiglianza, nel senso che la quantisticità e la concettualità sarebbero solo due termini che indicherebbero una stessa realtà, o natura, in grado di manifestarsi a diversi livelli organizzativi nella nostra realtà.

L'ipotesi di cui sopra, secondo cui le entità quantistiche sono concettuali, è stata proposta da uno di noi nel 2009 (Aerts 2009, 2010a,b, 2013, 2014), e in questo lavoro dimostreremo il suo potere esplicativo rivedendo alcune delle situazioni quantistiche dove è stata finora applicata, tra quelle considerate non ancora del tutto comprese, se non addirittura impossibili da comprendere. Faremo lo stesso per le difficoltà interpretative della teoria della relatività speciale, dimostrando così che l'*interpretazione concettualistica* descrive un possibile passo avanti fondamentale nella nostra comprensione di ciò di cui sarebbe fatto il nostro mondo, ed è un valido candidato per la costruzione di un quadro coerente sia per la teoria quantistica che per la relatività, e forse anche per le teorie dell'evoluzione (Aerts e Sassoli de Bianchi 2018).

Ma prima di farlo, un avvertimento è d'obbligo. Dall'ipotesi che le entità quantistiche sarebbero entità concettuali che veicolano significato, che scambiano con i corpi di materia ordinaria, emerge in modo del tutto naturale una visione *pancognitivista* (Aerts e Sassoli de Bianchi 2018), dove tutto nella nostra realtà parteciperebbe in termini cognitivi, la cognizione umana essendo solo un esempio che si esprime a un livello organizzativo specifico. Questo, tuttavia, non va inteso come un'antropomorfizzazione della realtà, perché la cognizione umana è da considerarsi come una forma molto giovane, e quindi ancora non molto sofisticata, di quella struttura concettuale

fondamentale che costituirebbe l'intera nostra realtà globale.

Non vi è quindi alcuna connessione tra il nostro approccio e le visioni filosofiche di stampo idealista, in cui le teorie fisiche vengono descritte come semplici teorie relative a un contenuto mentale umano. Al contrario, l'interpretazione concettualistica è una visione di stampo genuinamente realista, dove le entità concettuali vengono considerate come entità in grado di trovarsi in diversi stati ed essere soggette a dei processi di misura, che sarebbero processi non solo di *scoperta* (di quelle proprietà che sono già preesistenti), ma anche di *creazione* (di quelle proprietà che sono solo potenziali prima della misura e che possono diventare attuali tramite la sua esecuzione).

Inoltre, la sostanza concettuale che forma la nostra realtà globale non è neppure necessariamente connessa alla cognizione umana, essendo indubbiamente la sua esistenza indipendente da essa, vale a dire, anche quando noi umani non eravamo ancora venuti alla luce sulla superficie del pianeta Terra, in quanto specie dotata di capacità cognitive, la sostanza concettuale fondamentale che formava la nostra realtà globale era già presente, perché anche i suoi aspetti quantistici erano già presenti. Per rendere ancora più chiara la posizione realistica alla base della nostra interpretazione concettualistica, possiamo osservare che se i dinosauri non si fossero estinti (probabilmente a causa dell'impatto di un asteroide) e avessero sviluppato ulteriormente i loro talenti cognitivi, sarebbero stati facilmente loro i primi ad esplorare lo strato concettuale inerente alla loro specie, così come avrebbero potuto essere loro i primi a svelare la natura quantistica del micromondo.

Detto questo, e prima di procedere nelle prossime sezioni descrivendo come l'interpretazione concettualistica possa spiegare diversi fenomeni quantistici e relativistici, è interessante riflettere per un momento sui motivi per cui la fisica quantistica sia rimasta così ardua da capire, che è poi il motivo per cui così tante interpretazioni hanno visto il giorno da quando è stata formulata in modo completo negli anni Trenta del secolo scorso. Il caso della teoria della relatività è solo apparentemente diverso, poiché la maggior parte dei fisici sembra coltivare la convinzione che la relatività sarebbe invece ben compresa, o quanto meno molto meglio compresa della meccanica quantistica, il che a nostro avviso è solo il frutto di un malinteso, come sottolineeremo più avanti nell'articolo.

Un primo punto importante da considerare è che l'esistenza ancora oggi di numerose interpretazioni quantistiche può essere visto come il segno che nessuna di esse sia stata finora in grado di fornire quelle nozioni capaci di catturare, nella sua interezza, quella realtà che la teoria quantistica si pone di descrivere, e ottenere così un consenso generale. Crediamo che una delle ragioni del loro fallimento sia che la maggior parte di esse cerchi solo, per certi versi nostalgicamente, di interpretare il formalismo matematico quantistico usando delle nozioni spaziotemporali classiche.

Per spiegare meglio quale sia il nocciolo del problema, quando si cerca di comprendere le entità quantistiche (e relativistiche), possiamo usare una metafora. Durante il diciottesimo secolo, i primi coloni britannici che sbarcarono nel continente australiano si trovarono confrontati a un territorio totalmente nuovo, sia per gli usi e i costumi degli indigeni, gli aborigeni, sia per la misteriosa flora e fauna che popolava quelle terre lontane. Tra gli animali australiani, ce n'era uno in particolare che colpì l'immaginazione dei coloni. Di tanto in tanto potevano scorgerlo in prossimità dei corsi d'acqua, ma essendo molto schivo era difficile osservarlo chiaramente. Quando lo scorgevano dal davanti, vedendone il becco piatto e i due piedi palmati, esclamavano: "È un'anatra!" Poi però, quando si girava e scappava, si accorgevano che non aveva due, bensì quattro zampe, e una fitta pelliccia. Così, probabilmente, ribadivano: "No, è una talpa!" E a forza di gridare: "È un'anatra!... No, è una talpa!... No, è un'anatra!... No, è una talpa!..." alla fine, forse stufo, convennero di chiamarlo *talpanatra*¹

In altre parole, battezzarono questo strano animale con un nome paradossale, ottenuto dalla composizione dei nomi di due diversi animali. Una tale designazione, di natura dualistica, era chiaramente solo provvisoria, dal momento che nessun animale poteva essere contemporaneamente un'anatra e una talpa, e quando alla fine furono in grado di osservarlo più da vicino e più attentamente, si accorsero che non era né una talpa né un'anatra, ma qualcosa di completamente diverso. Così, infine, l'animale ricevette un nome tutto

¹ La nostra piccola storia è ovviamente una caricatura. Stiamo qui traducendo in italiano il termine "duckmole", formato dalla combinazione di "duck" (anatra) e "mole" (talpa), che in inglese era uno dei nomi che furono dati al "platypus" (ornitorinco).

suo: *ornitorinco*²

Il curioso aneddoto di cui sopra fu usato da *Jean-Marc Lévy-Leblond* (1999) per illustrare la situazione in cui si trovarono i fisici all'inizio del secolo scorso, che al pari dei coloni europei furono confrontati con delle entità – quelle microscopiche, come i fotoni e gli elettroni – il cui aspetto poteva cambiare a seconda del contesto sperimentale, a volte manifestandosi come particelle (talpe) e altre volte come onde (anatre). E di nuovo, a forza di esclamare che: “È una particella!... No, è un’onda!... No, è una particella!... No, è un’onda!...” alla fine, decisero anche loro di denotare provvisoriamente tali entità *ondeparticelle* (waveparticles), o *partonde* (wavicles), ecc. (Bunge 1999; Lévy-Leblond e Balibar 1997), vale a dire, di parlarne nei termini di una *dualità onda-particella*.

Ma così come un ornitorinco non è né un’anatra né una talpa, e certamente non simultaneamente un’anatra e una talpa, un’entità quantistica microscopica non è né una particella né un’onda, e certamente non simultaneamente una particella e un’onda. La designazione dualistica di ondaparticella è in realtà solo il risultato di un’osservazione fugace del loro comportamento, e se si prende il tempo di osservarle con più attenzione, diventa chiaro che ciò che sono veramente è un “qualcos’altro”, di completamente diverso sia dalla nozione discreta e locale di particella, sia dalla nozione continua ed estesa di onda, poiché entrambe queste nozioni sono spaziali, mentre una delle caratteristiche più salienti delle entità quantistiche microscopiche è proprio quella di non essere rappresentabili come entità stabilmente presenti nello spazio (o nello spaziotempo). In altre parole, sappiamo cosa le entità quantistiche certamente non sono: sono entità *non-spaziali* (e più in generale, come avremo modo di discutere, sono entità *non-spaziotemporali*). Tuttavia, sapere che cosa un’entità quantistica microscopica non sia, non ci dice cosa essa sia, cioè quale sia veramente la sua natura. Lo stesso vale per il precedente esempio dell’ornitorinco: sapendo che cosa non era, non era sufficiente per determinarne la natura, motivo

² Prima dell’arrivo dei coloni europei, gli aborigeni avevano numerosi nomi per designare questo strano animale, tra cui *boondaburra*, *mallingong* e *tambreet*. La prima descrizione scientifica dell’ornitorinco (*ornithorhynchus anatinus*) è attribuita al botanico e zoologo inglese *George Shaw*, la cui prima reazione, quando ricevette un esemplare, fu di credere che si trattasse di una bufala, realizzata cucendo insieme diversi animali.

per cui una controversia si è protratta a lungo tra i naturalisti europei, quando scoprirono le caratteristiche insolite di questo animale.³

Comprendere la natura di un'entità quantistica è fondamentale, perché il comportamento di un'entità fisica può apparirci decisamente strano, se non incomprensibile, se crediamo che sia qualcosa che di fatto non è, mentre il suo comportamento può improvvisamente diventare perfettamente normale e pienamente comprensibile se abbiamo identificato correttamente la sua natura. A tale proposito, è importante sottolineare che una teoria fisica richiede non solo un formalismo matematico, ma anche una rete di concetti fisici coerentemente collegati a quest'ultimo, in grado di fornire una rappresentazione fisica significativa della realtà che la teoria si pone di descrivere (De Ronde 2018). E, naturalmente, tra questi concetti fisici il più importante è quello che permette di identificare la natura delle entità fisiche di cui parla la teoria in questione. Ad esempio, prima dell'avvento della meccanica quantistica, il concetto di *particella* (o *corpuscolo*) era fondamentale per dare un senso a tutte le altre nozioni associate alla teoria (della meccanica classica), come quella di posizione, velocità, massa, ecc., che a loro volta erano associate a specifici oggetti matematici nel formalismo.

Quindi, per dare senso alla meccanica quantistica, la prima cosa da fare è individuare una nozione che specifichi quale sia la natura di un'entità microfisica. Sappiamo che non può essere una nozione di particella, né una nozione di onda, né una nozione di ondaparticella, quindi, di quale nozione si tratta? La risposta standard è che non abbiamo nulla di valido a nostra disposizione per rappresentare correttamente la natura di un'entità quantistica.

Dunque, questo è quanto? Come *Arthur Conan Doyle* amava più di una volta sottolineare, nelle sue storie di Sherlock Holmes, a volte il posto migliore per nascondere qualcosa è di tenerlo in bella vista. E secondo l'interpretazione concettualistica, ciò che è sempre stato in bella vista, e proprio per questo era così difficile da notare, è che la nozione che si doveva utilizzare per descrivere la natura di un'entità quantistica, e dare un senso pieno al suo comportamento, era

³ Oggi l'ornitorinco è classificato come *monotremo*: un mammifero che depone le uova invece di dare alla luce i piccoli, con il maschio che possiede uno sperone cavo sulle zampe posteriori, che rilascia un veleno in grado di causare gravi dolori all'uomo ma letale per numerosi animali, e con numerose altre differenze strutturali rispetto ai comuni mammiferi.

proprio la nozione di *concetto*! In altre parole, i concetti umani non sarebbero l'unica categoria di entità concettuali con cui noi umani abbiamo interagito: le cosiddette entità quantistiche microscopiche formerebbero un'altra categoria di entità concettuali, molto più antiche e strutturate di quelle nostre umane, e non appena resettiamo i nostri parametri mentali, e iniziamo a pensare ad esempio a un elettrone non come a un oggetto, ma come a un'entità concettuale, la maggior parte del mistero del suo comportamento quantistico scompare, come andremo ora a illustrare considerando diverse situazioni fisiche.

2 L'esperimento della doppia fenditura

Richard Feynman era solito affermare che l'esperimento della doppia fenditura racchiudesse in sé il cuore della meccanica quantistica e contenesse l'unico mistero. Certamente, contiene parte del mistero, quindi, iniziamo col descrivere questo esperimento per poi mostrare come questo mistero letteralmente evapori se solo iniziamo a pensare alle entità microfisiche che interagiscono con la barriera a doppia fenditura – supponiamo si tratti di elettroni – non come delle particelle, o delle onde, ma come delle entità concettuali.

Per questo, iniziamo ricordando il motivo per cui l'esperimento a doppia fenditura sia impossibile da spiegare in modo classico. Il motivo è semplice: gli impatti localizzati sullo schermo rivelatore sembrano indicare che le entità in questione siano simili a particelle. D'altra parte, la figura a frange che si osserva, quando si raccolgono numerosi impatti, rivela che ciò che attraversa la doppia fenditura è più simile a un fenomeno ondulatorio, in grado di creare effetti di interferenza (vedi la Figura 1). E poiché un'onda non è una particella, e viceversa, il comportamento osservato degli elettroni non può essere spiegato in modo coerente.

Più precisamente, se fossero come dei piccoli proiettili, allora un'interpretazione *composizionale* dell'esperimento dovrebbe essere possibile, con la figura degli impatti ottenuta quando entrambe le fenditure sono aperte che sarebbe deducibile dalle figure di impatti ottenuti quando queste sono aperte una alla volta, anziché

contemporaneamente. Ciò significa che la probabilità $P_{12}(x)$ di avere un impatto in un punto x dello schermo rivelatore, nella situazione in cui le due fenditure sono aperte, dovrebbe essere data dalla media uniforme delle probabilità $P_1(x)$ e $P_2(x)$ di avere un impatto nello stesso punto quando solo la fenditura 1 o solo la fenditura 2 sono aperte, rispettivamente, cioè,

$$\bar{P}_{12}(x) = \frac{1}{2} [P_1(x) + P_2(x)]$$

Ma poiché in generale abbiamo invece che $P_{12}(x) \neq \bar{P}_{12}(x)$, anche se gli elettroni *sembrano* corpuscolari, poiché lasciano tracce sullo schermo sotto forma di impatti puntiformi, non possono essere tali, come dimostra la complessa figura a frange che si ottiene.

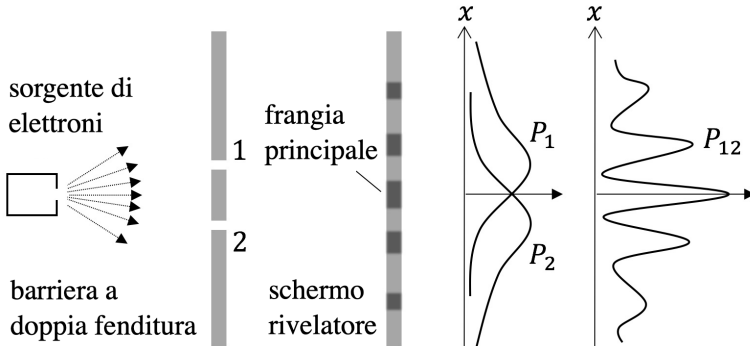


Figura 1 Nell'esperimento a doppia fenditura, una sorgente di elettroni spara quest'ultimi verso una barriera con due fenditure. Se la fenditura 1 è aperta e la fenditura 2 è chiusa, la distribuzione di probabilità per la rilevazione di un elettrone a una distanza x dal centro dello schermo rivelatore è P_1 . Se la fenditura 2 è aperta e la fenditura 1 è chiusa, la distribuzione di probabilità è P_2 . Se entrambe le fenditure sono aperte, la distribuzione di probabilità P_{12} non è proporzionale alla somma di P_1 e P_2 , come ci si aspetterebbe se gli elettroni fossero delle particelle, ma è una funzione più complessa, che descrive una figura di interferenza a frange, con la frangia principale che si trova al centro dello schermo rivelatore.

Si noti che le distribuzioni di probabilità a una fenditura $P_1(x)$ e $P_2(x)$ sono compatibili con l'ipotesi che gli elettroni siano entità di natura corpuscolare. È proprio quando entrambe le fenditure sono simultaneamente aperte che la distribuzione degli impatti sullo

schermo di rilevazione diventa incompatibile con l'ipotesi corpuscolare, non essendo più deducibile come media uniforme delle probabilità di distribuzione a una sola fenditura.

Ragionando in termini probabilistici, ci saranno punti x sullo schermo di rilevazione in cui la probabilità di osservare un elettrone differirà sensibilmente dal valore dato dalla media uniforme $\bar{P}_{12}(x)$, nel senso che ci saranno punti di *sovraesposizione* [corrispondente a una *sovraestensione* della probabilità: $P_{12}(x) > \bar{P}_{12}(x)$] e punti di *sottoesposizione* [corrispondente a una *sottoestensione* della probabilità: $P_{12}(x) < \bar{P}_{12}(x)$], nel senso che si deve correggere la media uniforme introducendo un terzo termine $I(x)$, un *contributo di interferenza* responsabile di questi effetti di sovraestensione (interferenza costruttiva) e di sottoestensione (interferenza distruttiva):

$$P_{12}(x) = \bar{P}_{12}(x) + I(x)$$

Consideriamo ora l'ipotesi che gli elettroni siano entità concettuali, cioè entità che si comportano in modo simile a come si comportano i concetti umani. E supponiamo che l'apparato di misura, e più specificamente lo schermo rivelatore, sia un'entità sensibile al significato veicolato dagli elettroni, in grado di rispondere a domande quando queste vengono formulate in termini operazionali, cioè attuandole attraverso la costruzione di uno specifico assetto sperimentale. Naturalmente, l'entità simil-mentale dello schermo rivelatore non parla il nostro linguaggio umano e comunicherà solo per mezzo di segni che sono le tracce di impatto degli elettroni sulla sua superficie; tracce che dobbiamo interpretare correttamente, e per farlo dobbiamo capire quale sia il significato da attribuire agli impatti quando appaiono nelle diverse posizioni.

Ora, le domande a cui l'entità mente-schermo sta possibilmente rispondendo, tramite il suo "linguaggio pointillistico", sono nella fattispecie le seguenti tre:

- (a) "Qual è un buon esempio di punto d'impatto di un elettrone che passa attraverso la fenditura 1?"
- (b) "Qual è un buon esempio di punto d'impatto di un elettrone che passa attraverso la fenditura 2?"
- (c) "Qual è un buon esempio di punto d'impatto di un elettrone che passa attraverso la fenditura 1 o 2?"

Queste tre domande possono essere formulate in termini pratici mantenendo solo la fenditura 1 aperta, solo la fenditura 2 aperta, ed entrambe le fenditure aperte, rispettivamente. Naturalmente, l'entità concettuale elettrone si troverà allora in uno stato che dipenderà dalla configurazione della barriera. Quando è aperta solo la fenditura 1, sarà in uno stato ψ_1 , corrispondente alla combinazione concettuale *L'elettrone passa attraverso la fenditura 1*. Quando è aperta solo la fenditura 2, sarà in uno stato ψ_2 , corrispondente alla combinazione concettuale *L'elettrone passa attraverso la fenditura 2*. E quando entrambe le fenditure sono aperte, sarà in uno stato $\psi_{1,2}$, corrispondente alla combinazione concettuale *L'elettrone passa attraverso la fenditura 1 o 2*.⁴

Se gli stati di cui sopra sono rappresentati da vettori complessi in uno spazio di Hilbert, si può facilmente ritrovare lo schema di interferenza sullo schermo rivelatore rappresentando $\psi_{1,2}$ come una sovrapposizione normalizzata di ψ_1 e ψ_2 , vale a dire,

$$\psi_{1,2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_1 + \psi_2)$$

Quindi, la densità di probabilità $P_1(x)$ [rispettivamente, $P_2(x)$] con cui la mente-schermo fornisce la risposta x alla domanda (a) [resp.,

⁴ La nozione di “passare attraverso” rimane un modo molto umano di formulare la domanda rivolta all'apparato di misura. In effetti, quando diciamo “passare attraverso”, o anche “punto di impatto”, stiamo già attribuendo agli elettroni delle proprietà spaziali che non necessariamente possiedono. In altre parole, stiamo già guardando le cose partendo dalla prospettiva dei nostri pregiudizi spaziali. D'altra parte, se “passare attraverso” viene più generalmente inteso come un modo per esprimere il fatto che le uniche regioni dello spazio occupate dalla barriera in cui vi è una probabilità pari a zero di assorbire gli elettroni sono quelle delle due fenditure (quando sono aperte), allora la nozione di “passare attraverso” può sicuramente essere usata per descrivere adeguatamente l'esperimento in un modo che le nostre menti umane possono facilmente comprendere. Un modo più generale, e probabilmente più corretto, di formulare le tre precedenti domande sarebbe:

- (a) “Qual è un buon esempio di effetto prodotto da un elettrone che interagisce con la barriera quando solo la fenditura 1 è aperta?”
- (b) “Qual è un buon esempio di effetto prodotto da un elettrone che interagisce con la barriera quando solo la fenditura 2 è aperta?”
- (c) “Qual è un buon esempio di effetto prodotto da un elettrone che interagisce con la barriera quando entrambe le fenditure 1 e 2 sono aperte?”

(b)] è $P_1(x) = |\psi_1(x)|^2$ [rispettivamente, $P_2(x) = |\psi_2(x)|^2$], mentre la densità di probabilità che il punto x sia selezionato come buon esempio di un elettrone che passa attraverso la fenditura 1 o 2 [domanda (c)] è:

$$P_{1,2}(x) = |\psi_{1,2}(x)|^2 = \frac{1}{2} |\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2 \\ = \frac{1}{2} [|\psi_1(x)|^2 + |\psi_2(x)|^2] + \Re \psi_1^*(x) \psi_2(x)$$

dove $I(x) = \Re \psi_1^*(x) \psi_2(x)$ è il contributo d'interferenza, che tiene conto degli effetti di sovraestensione e di sottoestensione, e il simbolo \Re indica qui la parte reale di un numero complesso.

Quella che abbiamo usato è la nota regola della meccanica quantistica che afferma che quando siamo in presenza di alternative (fenditura 1 o 2), l'ampiezza di probabilità è data dalla somma normalizzata delle ampiezze di probabilità per le alternative considerate separatamente. Ma quello che vogliamo ora capire è l'emergenza dello schema a frange dal punto di vista dell'ipotesi concettualistica. In altre parole, vogliamo comprendere il processo cognitivo operato dallo schermo di rilevamento, quando considerato come un'entità simile a una mente che risponde alle tre precedenti domande.

Prima di tutto, dobbiamo osservare che tale processo cognitivo non può essere deterministico. In effetti, "passare attraverso una fenditura" non è un'indicazione sufficiente per descrivere una traiettoria unica nello spazio. Ciò è anche dovuto al fatto che essendo un elettrone un'entità concettuale, non può essere associato *a priori* con delle proprietà spaziali. Tali proprietà spaziali dovranno essere acquisite nel corso dell'interazione con l'apparato, dando così un senso alla nozione stessa di "passare attraverso". E poiché ci sono molti modi in cui un'entità spaziale è in grado di passare attraverso una fenditura, la mente-schermo dovrà scegliere tra queste diverse possibilità, e scegliere una tra queste diverse possibilità è un processo di *rottura di simmetria* i cui esiti non possono essere predetti in anticipo, che è il motivo per cui ogni volta che viene posta la domanda la risposta (la traccia dell'impatto sullo schermo) può essere diversa. Tuttavia, le risposte non possono essere totalmente arbitrarie, dal momento che la domanda specifica che l'elettrone deve passare, ad esempio nel caso della domanda (a), attraverso la fenditura 1.

Quindi, la mente-schermo manifesterà sicuramente una maggiore propensione a rispondere per mezzo di un punto d'impatto situato in una posizione in prossimità della fenditura 1, il che significa che il processo di rottura di simmetria sarà ponderato, con alcuni risultati che avranno maggiore probabilità di altri (diremo di più sui processi di misura nella Sezione 9). Naturalmente, le cose diventano più interessanti quando consideriamo la domanda (c), poiché in questa situazione non solo ci sono molte possibilità su come l'elettrone è in grado di passare attraverso una delle due fenditure, ma anche su quale fenditura, la 1 o la 2, attraverserà.

Di fronte a questa situazione, la mente-schermo dovrà allora selezionare quelle risposte che meglio esprimono questo doppio livello di incertezza, producendo un punto di impatto che sarà tipico di un'entità concettuale elettronica che ha acquisito proprietà spaziali e passi attraverso la fenditura 1 o 2. E quando la domanda viene posta numerose volte in modo operativo, il risultato che si otterrà sarà la tipica struttura a frange della Figura 1.

Ma vediamo di analizzare più attentamente la mente-schermo, per cercare di capire come può emergere una tale struttura a frange. A tal fine, concentriamoci sulla sua caratteristica più saliente: la frangia centrale, che è quella con una maggiore densità di impatti, situata a pari distanza dalle due fenditure. È qui che l'entità cognitiva-schermo ha maggiore probabilità di manifestare una risposta, quando soggetta alla domanda (c). Per capire il perché, possiamo osservare che un impatto nella regione della frangia centrale corrisponde a una situazione di massimo dubbio riguardo la fenditura che l'elettrone avrebbe usato per attraversare la barriera, o anche il fatto che avrebbe necessariamente attraversato l'una o l'altra fenditura, in modo esclusivo. Pertanto, costituisce una perfetta esemplificazione, sotto forma di un punto d'impatto sullo schermo, del concetto "un elettrone che passa attraverso la fenditura 1 o 2".

Ora, se la regione tra le due fenditure è una regione di sovraestensione, le due regioni di fronte alle due fenditure sono invece di sottoestensione, che mostrano una densità di impatti molto bassa. Per capire perché, possiamo osservare che un impatto nelle regioni di fronte alle due fenditure non ci farebbe dubitare circa la fenditura usata dall'elettrone per attraversare la barriera. In altre parole, un punto di impatto nelle due regioni di fronte alle fenditure costituirebbe una pessima esemplificazione del concetto "un elettrone che

passa attraverso la fenditura 1 o 2". Spostandoci poi da queste due regioni (allontanandoci dal centro) ci troveremo di nuovo in una situazione di dubbio, sebbene meno perfetta di quella espressa dalla regione centrale, così delle regioni di sovraestensione si manifesteranno nuovamente, ma questa volta con minore intensità, quindi di nuovo ci saranno delle regioni di sottoestensione, e così via, producendo in questo modo il tipico schema a frange osservato negli esperimenti.

Da questa spiegazione concettualistica dell'esperimento della doppia fenditura, si evince che l'aspetto onda associato agli elettroni (descritto matematicamente dalla funzione d'onda $\psi_{1,2}$, che evolve secondo l'equazione di Schrödinger), è solo un modo conveniente per modellizzare, per mezzo di effetti di interferenza costruttivi e distruttivi, i diversi effetti di sovraestensione e sottoestensione che derivano dal processo cognitivo (di rottura di simmetria) attraverso il quale, di volta in volta, viene fornito un buon esempio (concreto) di un'entità concettuale astratta, quando il contesto interrogativo forza l'entità concettuale elettronica ad entrare nel teatro spazio-temporale, mediante un impatto localizzato sullo schermo.

Naturalmente, questo impatto non va confuso con una traccia lasciata da un'entità corpuscolare, avente una sua traiettoria ben definita nello spazio, come verrà meglio spiegato nelle sezioni seguenti. Ora, per conferire maggiore credibilità alla narrazione di cui sopra, e considerando che si presuppone che un elettrone e un concetto umano condividano la stessa natura concettuale (allo stesso modo in cui un'onda elettromagnetica e un'onda acustica, anche se sono fenomeni fisici molto differenti, condividono la medesima natura ondulata), si dovrebbe essere anche in grado di mostrare che le menti umane sono capaci di produrre figure di interferenza simili, se sottoposte a contesti interrogativi che le confrontano a delle alternative autentiche. E infatti così accade: le menti umane, quando interagiscono con i concetti, producono generalmente degli effetti di sovraestensione e di sottoestensione con schemi molto complessi, di fatto molto più complessi (meno simmetrici) di quelli prodotti dalle menti-schermo che interagiscono con gli elettroni (o i fotoni). Qui di seguito, descriviamo brevemente un esperimento in cui questo è stato esplicitamente dimostrato, rimandando il lettore interessato ad Aerts (2009) e Aerts & Sassoli de Bianchi (2017a), per maggiori dettagli.

Negli anni Ottanta del secolo scorso, lo psicologo cognitivo *James Hampton* condusse un esperimento in cui furono presentati 24 esemplari di *Cibo*⁵ a 40 studenti, chiedendo loro se fossero tipici (cioè dei buoni esempi) di (Hampton 1988):

- (a) *Frutto*;
- (b) *Verdura*;
- (c) *Frutto o verdura*.

Questi diversi esemplari di *Cibo* svolgono qui lo stesso ruolo delle diverse posizioni x sullo schermo di rilevamento, nell'esperimento della doppia fenditura, con il concetto *Frutto* (rispettivamente, *Verdura*) che svolge il ruolo della fenditura 1 (rispettivamente, della fenditura 2). Se il processo decisionale degli studenti, quando sottoposti alla domanda (c), fosse di tipo sequenziale (scelgono prima tra *Frutto* e *Verdura* e in seguito, se scelgono il primo, selezionano un esemplare tipico di *Frutto*, e se scelgono il secondo, selezionano un esemplare tipico di *Verdura*), allora la probabilità di selezionare un determinato esemplare di *Cibo* dovrebbe corrispondere alla media uniforme delle probabilità che descrivono le situazioni delle domande (a) e (b). Ma non è questo che rivelano i dati di Hampton, che contengono invece uno schema complesso di effetti di sovraestensione e sottoestensione.

Quando i dati vengono rappresentati in modo quantistico, usando due funzioni bidimensionali che interpolano i risultati delle domande (a) e (b), quindi una sovrapposizione normalizzata di queste due funzioni per interpolare i dati della domanda (c), si ottiene una figura di interferenza complessa, che ricorda quelle ottenute nei fenomeni di birifrangenza (Aerts 2009; Aerts e Sassoli de Bianchi 2017a) (vedi la Figura 2).

Concludiamo questa sezione con un'osservazione importante. Nella nostra discussione, abbiamo fatto una distinzione tra lo schermo rilevatore, che svolge il ruolo di struttura sensibile al significato veicolato dagli elettroni, e la barriera, che svolge il ruolo di struttura che permette alle tre domande (a), (b) e (c) di essere poste in termini operazionali, quando la fenditura 1, 2, ed entrambe le

⁵ Questi erano: (1) *mandorla*, (2) *ghiana*, (3) *arachide*, (4) *oliva*, (5) *noce di cocco*, (6) *uva passa*, (7) *sambuco*, (8) *mela*, (9) *senape*, (10) *frumento*, (11) *radice di zenzero*, (12) *peperoncino*, (13) *aglio*, (14) *fungo*, (15) *crescione*, (16) *lenticchia*, (17) *pepe verde*, (18) *patata dolce*, (19) *pomodoro*, (20) *zucca*, (21) *broccolo*, (22) *riso*, (23) *peperoncino*, (24) *pepe nero*.

fenditure sono aperte, rispettivamente. Questa distinzione, tuttavia, non è fondamentale ed è stata utilizzata unicamente per rafforzare l'analogia con la nostra tipica esperienza umana, quando distinguamo una mente che risponde a una domanda dal processo che pone la domanda, ad esempio oralmente o per iscritto. Di fatto, l'intera struttura dell'apparato sperimentale andrebbe compresa come entità di tipo mentale, essendo chiaro che non solo lo schermo ma anche le altre parti materiali dell'apparato, in particolare la barriera, interagiscono nel loro assieme con le entità concettuali elettroniche.

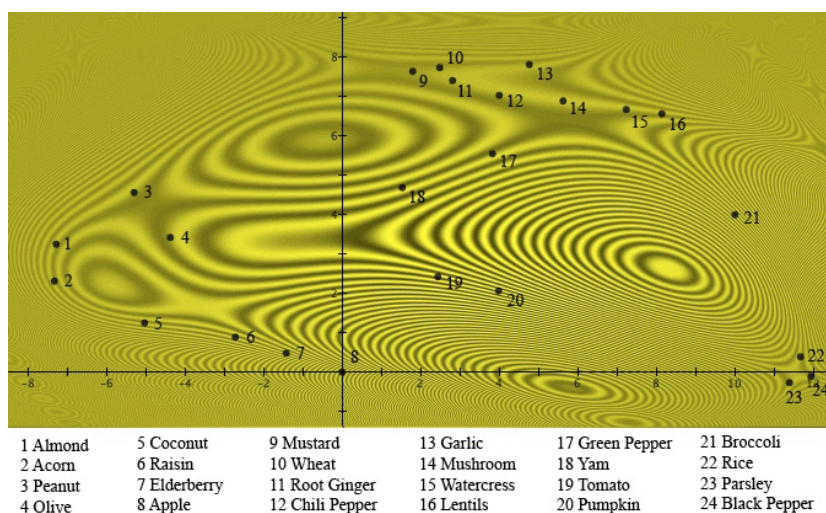


Figura 2 La figura di interferenza che descrive gli effetti di sovraestensione e sottoestensione contenuti nei dati di Hampton, quando ai partecipanti viene chiesto di selezionare degli esemplari rappresentativi della disgiunzione *Frutto o verdura*. Per maggiori dettagli su come è stata ottenuta questa figura, vedi Aerts (2009).

Un'immagine più corretta consiste quindi nel dire che la struttura dell'intera entità simil-mentale dell'apparato cambia a seconda della domanda che viene posta. Più precisamente, l'effetto di porre la domanda (a) [rispettivamente, (b) e (c)] corrisponde all'apertura della fenditura 1 (rispettivamente, della fenditura 2, e di entrambe le fenditure) a livello della barriera, e la risposta alla domanda corrisponde al processo che vede l'entità concettuale elettronica interagire con l'apparato e lasciare una specifica traccia sullo schermo del rilevatore.

Dopo aver analizzato l'esperimento della doppia fenditura,

vogliamo ora considerare, nella prossima sezione, un altro esperimento quantistico paradigmatico, che è impossibile da comprendere se non si rinuncia al pregiudizio che le entità microfisiche sarebbero particelle o onde, vale a dire fenomeni spaziotemporali, ma che diventa invece molto facile da spiegare se si presume che siano entità concettuali (che veicolano significano).

3 Esperimento di scelta ritardata

Nel 1978, Wheeler considerò il seguente esperimento (Wheeler 1978). Un'entità quantistica, diciamo un elettrone, entra in un apparato come quello precedentemente descritto, a doppia fenditura, con la differenza che il suo settaggio può essere modificato all'ultimo momento, prima che l'elettrone sia in ultimo rilevato. I settaggi che vengono considerati sono due: un settaggio di tipo onde, come quello usato in un tipico esperimento a doppia fenditura, che dà luogo ad effetti di sovraestensione e sottoestensione, e un settaggio di tipo particelle, corrispondente alla situazione in cui lo schermo di rilevamento è rimosso e sostituito da un secondo schermo di rilevamento, posto ad una distanza maggiore, in modo che gli impatti rilevabili su di esso diventino compatibili con una descrizione classica, corpuscolare (nessun effetto di sovraestensione o sottoestensione); vedi la figura 3.

Più precisamente, poiché l'apparato fa divergere le componenti della funzione d'onda provenienti dalle due fenditure, queste non si sovrappongono più quando arrivano dove è presente il secondo schermo (fisso), cosicché le tracce degli impatti su di esso consentono di determinare senza ambiguità la componente della funzione d'onda a cui sono associati, ovvero quale percorso è stato seguito dall'elettrone, se interpretato come particella. L'apparato è tuttavia concepito in modo tale che il settaggio possa essere cambiato estremamente rapidamente, e il risultato dei numerosi esperimenti finora condotti è che sebbene tale modifica avvenga all'ultimo momento, gli elettroni (o qualsiasi altra entità quantistica microfisica) si comportano come se fosse stato presente fin dall'inizio.

Esperimenti di questo genere [vedi ad esempio Jacques et al.

(2007)] dimostrano l'inadeguatezza della dualità onda-particella. Infatti, se l'entità quantistica elettronica si comportasse come un'onda (cioè come un'entità spaziale in grado di passare per entrambe le fenditure) o come una particella (cioè come un'entità spaziale in grado di attraversare solo la fenditura 1, o la fenditura 2, ma non entrambe), a seconda del settaggio sperimentale adottato, allora quando quest'ultimo viene modificata all'ultimo momento, l'elettrone (qui considerato come un'entità che si propaga nello spazio), avendo già lasciato la regione della barriera con la doppia fenditura, il cambiamento di settaggio ritardato non dovrebbe poter influenzare il suo precedente comportamento, ondulatorio o corpuscolare.

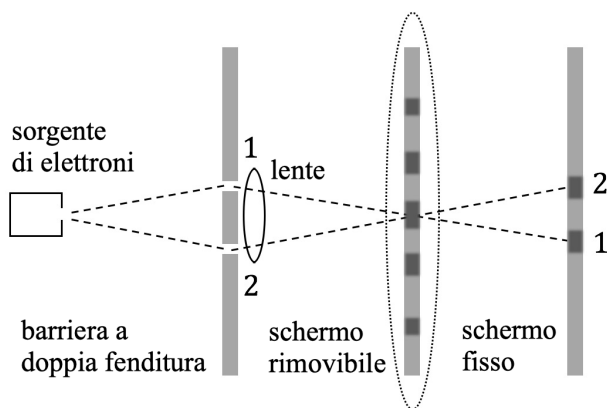


Figura 3 Lo schema dell'esperimento a scelta ritardata, in cui uno dei due schermi di rilevamento è rimovibile, permettendo di creare un contesto ondulatorio o particellare, lasciandolo lo schermo rimovibile in posizione, o rimuovendolo, rispettivamente. La lente in prossimità della doppia fenditura fa divergere leggermente le componenti della funzione d'onda provenienti dalle due fenditure, cosicché ci saranno effetti di interferenza rilevanti solo dove si trova lo schermo rimovibile, più vicino, ma non dove si trova lo schermo fisso, più distante. Ciò significa che quest'ultimo non mostrerà alcuna figura d'interferenza a frange, ma solo due regioni, distinte ed equivalenti, contenenti gli impatti associabili agli elettroni emergenti dalla fenditura 1 o dalla fenditura 2, rispettivamente.

Questo però non è quanto si osserva negli esperimenti, dove tutto accade come se l'elettrone “ritardasse la sua scelta” (da cui il nome dato a questi esperimenti) di manifestarsi o come fenomeno ondulatorio o come fenomeno corpuscolare, fino a quando non viene deciso il settaggio finale.

Di fronte alle implicazioni di questi esperimenti, Wheeler

affermò notoriamente quanto segue (Wheeler 1978): “Quindi, permettiamo di trarre una lezione generale da questa apparente inversione del tempo: ‘Nessun fenomeno è un fenomeno finché non è un fenomeno osservato’. In altre parole, non è un paradosso che scegliamo cosa sarà successo, dopo che è già accaduto. Non è realmente accaduto, non è un fenomeno, finché non è un fenomeno osservato.”

Se per “fenomeno” intendiamo un “fenomeno spaziale”, allora possiamo solo essere d’accordo con l’affermazione di Wheeler, che indica che non possiamo comprendere il comportamento di un elettrone dipingendolo come un’entità spaziale, sia essa un’onda, una particella o un’ondaparticella. In altre parole, ciò che questi esperimenti mostrano è che gli elettroni, e qualsiasi altra entità microfisica, sono entità *non-spaziali*: quando un elettrone viene “sparato” verso la barriera a doppia fenditura, non bisogna immaginarlo come un’onda o una particella che si propaga nello spazio, ma come un’entità più astratta che viene risucchiata nello spazio solo al momento della sua effettiva rilevazione, sia dallo schermo rimovibile che dallo schermo fisso, a seconda della selezione finale.

Naturalmente, l’elettrone esiste anche prima della sua rilevazione, sebbene non come un’entità che abbia già acquisito proprietà spaziotemporali. Di nuovo, questo è tipico del comportamento di un’entità concettuale il cui stato può passare da più astratto a più concreto, quando interagisce con una struttura (simil-mentale) sensibile al significato che trasporta.

Consideriamo ancora una volta l’ipotesi concettualistica, per vedere come l’apparente comportamento a scelta ritardata dell’elettrone diventi non solo perfettamente comprensibile, ma corrisponda anche a ciò che ci aspetteremmo. Come descritto nella sezione precedente, la domanda che viene posta è: “Qual è un buon esempio di punto di impatto di un elettrone che passa attraverso la fenditura 1 o 2?” Una risposta a questa domanda verrà manifestata o dalla mente-schermo rimovibile, se mantenuta in posizione, o dalla mente-schermo fissa, se la prima è stata rimossa. Queste due entità cognitive, tuttavia, incontreranno le entità concettuali elettroniche in stati differenti, a causa delle loro distinte ubicazioni spaziali.

Dal punto di vista dello schermo rimovibile, che è più vicino alla barriera a doppia fenditura, la lente convergente non ha effetti rilevanti; quindi, lo stato $\psi_{1,2}$ degli elettroni può essere

convenientemente descritto dalla combinazione concettuale: *L'elettrone passa attraverso la fessura 1 o 2*. D'altra parte, poiché la lente convergente produce un effetto rilevante per lo schermo fisso più lontano, questo interagirà con gli elettroni in uno stato differente $\psi'_{1,2}$, che può essere descritto dalla combinazione concettuale: *L'elettrone passa attraverso la fenditura 1 o 2 e successivamente viene fortemente deviato dalla sua traiettoria da una lente convergente*. Essendo questi stati differenti, anche il significato trasportato dall'elettrone nelle due situazioni è differente, cosicché lo schermo-mente rimovibile risponderà alla domanda nel modo descritto nella sezione precedente, con un complesso schema di frange caratterizzato da una frangia maggiore centrale, mentre lo schermo fisso risponderà considerando in modo casuale un punto nella regione superiore, associata alla fenditura 2, o un punto nella regione inferiore, associata alla fenditura 1 (vedi la Figura 3).

Ma perché ora un punto nella regione centrale non è più un buon esempio per esprimere il dubbio circa la fenditura da cui è passato un elettrone? Il motivo è semplice da capire: a causa della presenza della lente convergente, e della distanza dello schermo fisso, si può ora descrivere lo stato $\psi'_{1,2}$ dell'elettrone in termini più sintetici, con la combinazione concettuale: *l'elettrone passa esclusivamente attraverso la fenditura 1 o la fenditura 2*. In altre parole, la "o" è stata sostituita da un "o esclusivo" (xor, in inglese: "exclusive or"), a significare che l'elettrone può passare attraverso la fenditura 1 o la fenditura 2, ma non attraverso entrambe. Quindi, lo schermo fisso deve rispondere alla stessa domanda dello schermo rimovibile, ma con l'informazione aggiuntiva che gli elettroni non passano attraverso entrambe le fenditure contemporaneamente.

Ciò significa che un punto centrale dello schermo non sarà più un buon esempio della situazione, in quanto un punto centrale esprime una forma di dubbio molto più profonda: quella in cui non solo non conosciamo la fenditura attraverso la quale è passato l'elettrone, ma anche se è passato attraverso una sola fenditura o entrambe. Ora, poiché la fenditura attraverso la quale passa l'elettrone rimane non specificata, l'unica opzione per la mente-schermo fisso, per rispondere in modo coerente, è produrre un impatto puntiforme o in una posizione compatibile con la situazione di passaggio dell'elettrone attraverso la fenditura 1, il 50% delle volte, o in una posizione compatibile con la situazione dell'elettrone che passa

attraverso la fenditura 2, l'altro 50% delle volte, che è esattamente ciò che si osserva negli esperimenti. Usando ancora il formalismo spaziale di Hilbert, abbiamo ora:

$$P'_{1,2}(x) = |\psi'_{1,2}(x)|^2 = \frac{1}{2} |\psi'_1(x)|^2 + \frac{1}{2} |\psi'_2(x)|^2$$

cioè, le due alternative sono non-interferenti, compatibilmente con una descrizione (composizionale) classica.

4 Le relazioni di indeterminazione di Heisenberg

Tornando per un momento alla dualità onda-particella, e supponendo che uno schema di interferenza sarebbe indicativo di un'onda, e la sua assenza sarebbe indicativa di una particella, esperimenti come quello descritto nella sezione precedente sono generalmente interpretati dicendo che il comportamento di un'entità quantistica, come un elettrone, è determinato dal tipo di misurazione che eseguiamo su di essa. Questo è certamente corretto, ma solo se comprendiamo che la determinazione sorge nel momento in cui l'entità quantistica viene effettivamente rilevata, e non prima, e questo significa anche che se non vogliamo abbandonare una visione realistica della nostra realtà fisica, dobbiamo accettare che un'entità microfisica, prima della sua rilevazione, non è di solito né in uno stato ondulatorio né in uno stato particellare, ma in una condizione che non può essere associata a nessuna specifica proprietà spaziale.

La *teoria di de Broglie-Bohm* può certamente offrire qui una descrizione alternativa, poiché presuppone che un'entità quantistica sia la combinazione simultanea di entrambi gli aspetti: una particella e un'onda (pilota) (Norsen 2006). Tuttavia, se considerata come un tentativo di preservare la spazialità, la teoria, come è noto, incorre in un serio problema quando si tratta di descrivere più di una singola entità, poiché l'onda pilota (detta anche potenziale quantistico) non può allora più essere descritta come un fenomeno spaziale, quindi il problema interpretativo rimane, e in un certo senso peggiora.

Se intendiamo le entità concettuali come entità di significato che possono trovarsi in diversi stati (con ogni stato che specifica il significato effettivo veicolato dall'entità concettuale), che possono cambiare sia in modo prevedibile, quando sono soggette a contesti deterministici, sia in modo imprevedibile, quando sono soggette a contesti indeterministici, come i contesti (di misura) interrogativi, ne consegue immediatamente che, per definizione di cos'è uno stato, un'entità concettuale in un dato stato non può essere contemporaneamente in un stato differente.

Stiamo ovviamente affermando l'ovvio, ma questo è davvero ciò che sarebbe alla base del principio di indeterminazione di Heisenberg. Consideriamo il concetto umano *Animale*. Quando usiamo una sola parola per indicare questo concetto, possiamo dire che esso descrive il più astratto di tutti i suoi stati, associato a un contesto perfettamente neutro (tautologico), che veicola semplicemente il significato che: *L'animale è un animale*. Possiamo subito osservare un parallelo tra il concetto umano *Animale* e un'entità microfisica come un elettrone, che secondo l'interpretazione concettualistica possiede anch'essa una natura concettuale.

La teoria quantistica non-relativistica non descrive in termini formali lo stato di un elettrone nella condizione di essere solo un elettrone. Di solito si descrive un elettrone in contesti in cui l'elettrone ha già acquisito alcune proprietà più specifiche, che nella teoria vengono descritte matematicamente dandosi un vettore (in uno spazio di Hilbert), o una matrice di densità.

Consideriamo allora i seguenti concetti: *Cane*, *Gatto*, *Cavallo*, ecc. Sono tutti esempi specifici di *Animale*, quindi specificano diversi possibili stati del concetto-animale, e più precisamente gli stati che trasmettono i significati: *L'animale è un cane*, *L'animale è un gatto*, *L'animale è un cavallo*, ecc. In altre parole, il concetto *Animale* può trovarsi in diversi stati e quelli indicati qui sopra sono ovviamente ancora esempi di stati molto astratti, se paragonati con degli stati determinati da contesti che mettono ad esempio il concetto *Animale* in una relazione uno-a-uno con un'entità ben definita del nostro teatro spaziotemporale.

Ad esempio, le combinazioni concettuali: *Il cane Labrador di nome Esmerelda di proprietà dell'attrice Anne Hathaway*, *Il gatto bianco di Cameron Diaz di nome Little Man*, *Il cavallo da corsa di nome Lexington che ha stabilito un record al Metaire Course di New Orleans*, ecc., corrispondono

a stati molto più concreti del concetto *Animale*. Un concetto può quindi trovarsi in stati differenti, ma certamente non può essere contemporaneamente in due stati differenti, e alcuni stati sono massimamente astratti, altri massimamente concreti, e nel mezzo ci sono stati (la maggior parte di essi) il cui grado di astrazione è intermedio, come ad esempio lo stato descritto dalla combinazione concettuale: *Un gatto di proprietà di una celebrità* (Mervis e Rosch 1981; Rosch 1999).

Ciò significa che un concetto non può trovarsi in uno stato che è massimamente astratto e allo stesso tempo massimamente concreto, e questa non è altro che la versione concettualistica del principio di indeterminazione di Heisenberg (vedi la Figura 4).



Figura 4 Un diagramma schematico che descrive la direzione di localizzazione della posizione spaziale rispetto alla direzione (opposta) di localizzazione della quantità di moto, che secondo l'interpretazione concettualistica corrispondono alle direzioni di concretizzazione e astrazione di un concetto, rispettivamente.

Nel caso di un'entità come un elettrone, uno stato massimamente concreto corrisponde alla massima localizzazione dell'entità elettronica nel nostro spazio tridimensionale, mentre uno stato massimamente astratto corrisponde alla sua massima delocalizzazione, cioè a un elettrone massimamente localizzato nello spazio della quantità di moto.

Nei manuali di meccanica quantistica, il principio di indeterminazione di Heisenberg viene solitamente enunciato utilizzando le deviazioni standard di due osservabili non commutanti, come le osservabili posizione q e quantità di moto p . Il risultato tipico è che il prodotto $\sigma_q \sigma_p$ delle loro deviazioni standard deve essere limitato

dal basso da un dato valore, ad esempio $\hbar/2$. La deviazione standard σ_q deve essere qui interpretata come una misura del grado di concretezza dello stato in cui si trova la micro-entità elettronica, con $\sigma_q = 0$ che corrisponde a una condizione di massima concretezza (cioè di massima localizzazione nello spazio delle posizioni) e $\sigma_q = \infty$ di minima concretezza. Allo stesso modo, σ_p deve essere interpretata come una misura del grado di astrazione dello stato in cui si trova l'elettrone, con $\sigma_p = 0$ che corrisponde a una condizione di massima astrazione (cioè, massima localizzazione nello spazio della quantità di moto) e $\sigma_p = \infty$ di minima astrazione.

Risulta quindi chiaro che il prodotto $\sigma_q\sigma_p$ deve essere limitato dal basso, non potendo esserci contemporaneamente una situazione di massima concretezza ($\sigma_q = 0$) e massima astrazione ($\sigma_p = 0$), o situazioni in cui la concretezza (rispettivamente, l'astrazione) sarebbe massimale e l'astrazione (rispettivamente, la concretezza) sarebbe intermedia (cioè con una deviazione standard finita).

Tuttavia, il prodotto $\sigma_q\sigma_p$ è limitato anche dall'alto, non potendo avere contemporaneamente situazioni di minima concretezza ($\sigma_q = \infty$) e minima astrazione ($\sigma_p = \infty$), o situazioni in cui la concretezza (rispettivamente, l'astrazione) sarebbe minima e l'astrazione (rispettivamente, la concretezza) sarebbe intermedia (cioè con una deviazione standard finita). E infatti, si può ottenere anche una versione inversa delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg, cosa che è stata fatta di recente (Mondal et al. 2017), in accordo con quanto suggerisce l'interpretazione concettualistica.

5 Spiegare la non-spazialità (non-località)

Secondo quanto appena discusso, le relazioni di indeterminazione di Heisenberg (standard e rovesciate) non dovrebbero essere considerate il risultato di una mancanza di precisione su come vengono misurate le osservabili in laboratorio, o attribuite al fatto che le misurazioni possono alterare lo stato dell'entità misurata (come

inizialmente considerato da Heisenberg nel suo ragionamento semiclassico con il microscopio). Esprimerebbero invece qualcosa di ontologico, che descrive il necessario compromesso tra concretezza e astrazione, risultante dal fatto che, a livello ontologico, le entità quantistiche sarebbero entità concettuali (di significato). Quindi, la *non-località* di una micro-entità come un elettrone, che dovrebbe essere più propriamente denominata *non-spazialità*, esprimerebbe il fatto che la maggior parte degli stati dell'elettrone sono astratti (con diversi gradi di astrazione), con il sottoinsieme di quelli massimamente concreti che corrispondono a descrizioni di localizzazioni specifiche nello spazio. Di conseguenza, la nozione classica di *oggetto* (qui inteso come entità spaziotemporale) corrisponderebbe a un'entità concettuale che può rimanere per un tempo sufficientemente prolungato in uno stato massimamente concreto, il che significa che gli oggetti (le entità classiche) sarebbero solo casi limite di entità concettuali immerse in contesti deterministici che le consentono di rimanere a lungo massimamente concrete.

Una possibile critica della suddetta spiegazione delle relazioni di indeterminazione di Heisenberg è che non ci sarebbe nulla di veramente fondamentale nella nostra distinzione umana tra concetti astratti e concreti, essendo chiaro che quelli che chiamiamo concetti concreti sono proprio quelli associati agli oggetti che hanno interagito con noi, nel corso della nostra evoluzione sulla superficie di questo bellissimo “pallido puntino blu”.

È certamente vero che gli oggetti fisici hanno svolto un ruolo importante nel modo in cui noi umani abbiamo dato forma al nostro linguaggio e abbiamo creato concetti più astratti, ad esempio quando abbiamo bisogno di indicare un'intera categoria di oggetti invece di un semplice membro di una categoria. Quindi, in questa linea storica umana, con cui passiamo dal concreto all'astratto, i concetti più concreti sono quelli che specificano entità spaziotemporali (oggetti), come nella combinazione concettuale: *Questo oggetto che sto attualmente tenendo tra le mani*, e i più astratti sono quelli indicati da termini come *Entità*, *Cosa*, *Sostanza*, ecc., con tutti gli altri concetti che stanno in mezzo tra questi due estremi, per quanto riguarda il loro grado di astrazione/concretezza (vedi la Figura 5).

Questa linea umana (parrocchiale) è quella tipicamente considerata in semiotica e psicologia, motivo per cui gli psicologi usano il termine “*istanziamento*” per denotare una forma più concreta (uno

stato più concreto) di un dato concetto. Questo termine si riferisce principalmente all'attualizzazione nel tempo di un esemplare di un concetto più astratto, come quando si sceglie *Mela* come esemplare di *Frutta*, ma ovviamente si potrebbe anche usare il termine *spazializzazione* (o *spaziotemporizzazione*), in aggiunta al termine di istanziazione, quando l'esemplare in questione è un oggetto esistente anche nello spazio.

Si tenga però presente che un concetto umano, anche quando indica un oggetto ordinario, non è un oggetto, e viceversa un oggetto fisico non è un concetto umano, sebbene quest'ultimo possa essere messo in corrispondenza con il primo, e il primo, secondo l'interpretazione concettualistica, è un'entità concettuale in uno stato massimamente concreto.



Figura 5 Per i concetti umani ci sono due linee principali che collegano l'astratto al concreto. La prima va dal concreto all'astratto: dagli oggetti alle collezioni di oggetti con caratteristiche comuni. La seconda va dall'astratto al concreto: dai concetti alle storie formate dalla combinazione di numerosi concetti.

C'è quindi una linea "parrocchiale", per passare dal concreto all'astratto, legata al modo storico in cui abbiamo sviluppato i concetti (a partire dal nostro bisogno di nominare le entità fisiche intorno a noi), astraendoli dagli oggetti, e c'è una seconda linea (Aerts 2014), che va dall'astratto al concreto, legata a come noi umani

abbiamo imparato a combinare i concetti (al fine di pensare e comunicare meglio), creando significati emergenti più complessi (vedi la Figura 5). In questa seconda linea, i concetti più astratti sono quelli che sono esprimibili con singole parole, e la loro concretezza aumenta quando aumenta il numero di combinazioni concettuali, quindi i concetti più concreti sono quelli tipicamente descritti da grandi aggregati di concetti, espressi tramite singole parole collegate (entangled) tramite significato, che è ciò che in ambito umano indicheremo genericamente come delle *storie*, ad esempio quelle scritte in libri, articoli, pagine web, ecc.

Non intendiamo qui delle storie solo nel senso riduttivo di romanzi, ma nel senso più generale di gruppi di concetti che si combinano insieme in modo interessante, così da creare un significato ben definito. Questa seconda linea è quindi molto diversa dalla precedente (in un certo senso è trasversale ad essa) e noi umani usiamo chiaramente entrambe le linee contemporaneamente, quando comunichiamo e creiamo nuovi significati. Tuttavia, è questa seconda linea che crediamo sia quella veramente fondamentale e universale, cioè quella in cui i concetti umani hanno trovato la loro nicchia di sviluppo naturale.

Il fatto che nel linguaggio umano entrambe le linee esistano e si mescolino, può spiegare in parte il fatto che ci siano differenze strutturali tra il nostro dominio concettuale umano e il dominio concettuale della microfisica, in particolare il fatto che quest'ultimo mostrerà generalmente un livello più elevato di simmetria e organizzazione (un'altra ragione sarebbe che la nostra evoluzione culturale umana è un avvenimento molto recente se paragonato alla scala temporale del nostro universo).

Consideriamo ora un documento contenente un testo e supponiamo che il testo contenga la parola "cavallo". Questo significa che la storia in quel documento è un contesto (deterministico) che specifica uno stato del concetto di *Cavallo*, che secondo la seconda linea di concretizzazione sarebbe uno stato molto concreto. Naturalmente, questo stesso documento può essere considerato anche per descrivere lo stato dei concetti indicati da altre parole nella storia, o anche di concetti le cui parole non sono specificatamente menzionate nel testo, ma sono comunque fortemente collegate in termini di significato al suo contenuto.

Vale la pena sottolineare che questo documento, contenente una

storia sul concetto di *Cavallo*, non è necessariamente associato a un cavallo fisico, che si può toccare e cavalcare (un'istanza del *Cavallo*, secondo la prima linea di concretizzazione). Ad esempio, il testo potrebbe riferirsi al disegno di un cavallo, che ovviamente non è un essere vivente, o forse il termine "cavallo" è usato solo in modo metaforico, come nel detto "la superbia va a cavallo e torna a piedi". Tuttavia, poiché il documento contiene un'intera storia, quest'ultima si comporterà nell'universo concettuale in modo simile a come si comportano anche gli oggetti della macrofisica.

Per spiegare cosa intendiamo, consideriamo due oggetti e chiamiamoli oggetto-A e oggetto-B. Quando consideriamo la combinazione concettuale *Oggetto-A e oggetto-B* (usando il connettivo logico 'e'),⁶ siamo ancora in grado di metterla in corrispondenza con un oggetto, e più precisamente con l'oggetto che si ottiene riunendo i due oggetti, formando così un unico oggetto composto (chiamiamolo *oggetto-A \wedge B*). Quando invece consideriamo la combinazione concettuale *Oggetto-A o oggetto-B* (usando il connettivo logico 'o'), non siamo più in grado di associarlo a un oggetto. Ma se abbiamo due concetti, chiamiamoli *Concetto-A* e *Concetto-B*, allora non solo la combinazione *Concetto-A e concetto-B* è di nuovo un concetto, ma anche la combinazione *Concetto-A o concetto-B* è un concetto. Quindi, il dominio concettuale è chiuso rispetto ai connettivi della congiunzione e disgiunzione, mentre il dominio degli oggetti è per definizione chiuso solo rispetto al connettivo della congiunzione (la congiunzione di due oggetti è ancora un oggetto, ma la disgiunzione di due oggetti non è più un oggetto).

Che dire delle storie, cioè delle entità concettuali che sono formate da ampie combinazioni di concetti collegati tra loro tramite significato? Indubbiamente, poiché una storia è pur sempre un concetto, e più precisamente un concetto che si ottiene combinando in modo coerente numerosi altri concetti, come descritto dalla specifica combinazione di parole presenti in un documento che rende tale storia manifesta (come un libro, una pagina web, ecc.), quanto sopra deve comunque valere: se abbiamo due storie, chiamiamole *Storia-A* e *Storia-B*, allora anche *Storia-A e storia-B* e *Storia-A o storia-*

⁶ Per facilitare la comprensione, indicheremo sempre i concetti utilizzando caratteri di tipo corsivo e una prima lettera maiuscola, per distinguerli dagli oggetti, che indicheremo utilizzando caratteri di tipo romano.

B devono essere considerate delle storie.

Ma il punto delicato da comprendere sta nella distinzione tra la nozione di storia intesa come concetto (cioè come un'entità di significato) e la possibilità che una storia si manifesti in forma concreta anche nel nostro teatro spaziale. Consideriamo due libri concreti, fatti di carta e inchiostro, e chiamiamoli libro- A e libro- B . Il libro- A contiene le parole della *Storia-A* e il libro- B contiene le parole della *Storia-B*. Che dire allora dei libri associati alle due storie *Storia-A e storia-B* e *Storia-A o storia-B*? Chiamiamoli rispettivamente libro- $A \wedge B$ e libro- $A \vee B$. Il primo può essere considerato semplicemente come la giustapposizione del libro- A e del libro- B , il che significa che non appena esistono due libri, ognuno dei quali racconta una specifica storia, allora anche il libro che contiene la congiunzione delle loro due storie può essere considerato esistere e corrispondere al libro ottenuto semplicemente accostando i due libri. In altre parole, quando guardiamo gli scaffali di una libreria, con i diversi libri affiancati, stiamo di fatto contemplando storie che sono congiunzioni di altre storie.

La situazione è differente se consideriamo la disgiunzione di due storie. In una libreria non troveremo di solito libri del tipo libro- $A \vee B$. Questo non perché sarebbe difficile creare un oggetto di questo tipo, nel nostro mondo materiale. In effetti, per farlo, dobbiamo solo creare una singola pagina su cui scrivere la parola "o", quindi considerare la giustapposizione del libro- A , di tale pagina, e del libro- B . Ma la probabilità di trovare un manufatto di questo tipo in una libreria è estremamente bassa, e questo perché nella nostra cultura umana non sarebbe considerato la manifestazione (lo stato collassato) di una storia sensata, essendo chiaro che, date due storie qualunque, *Storia-A* e *Storia-B*, l'ambiguità introdotta dal connettivo O verrebbe considerata come troppo artificiale per far sì che la *Storia-A o storia-B* meriti di essere concretamente stampata.

Per dirla in un altro modo, in generale il connettivo O presente in *Storia-A o storia-B* non fornirà una connessione di significato sufficientemente forte affinché la storia *Storia-A o storia-B* possa apparire anche in un libro vero e proprio, acquistabile da noi umani in una libreria. In altre parole, sebbene in teoria il libro- $A \vee B$, che racconta la storia *Storia-A o storia-B*, potrebbe essere facilmente creato fisicamente, apparirà con una probabilità estremamente piccola nell'ambito dei manufatti risultanti dalla nostra attività culturale umana.

Quanto appena espresso non significa, tuttavia, che delle storie formate da disgiunzioni di altre storie non possano comparire in documenti che appartengono alla nostra cultura umana. Ciò avverrà ad esempio in tutti quei testi che, per ragioni narrative, richiedono di introdurre specificamente un tale aspetto, dove due trame vengono raccontate una dopo l'altra, con una disgiunzione nel mezzo. Un tipico esempio potrebbe essere quello di una storia poliziesca, dove vengono raccontati diversi scenari come possibili soluzioni di un crimine. Possiamo poi osservare che se consideriamo frammenti di testo più brevi, le disgiunzioni appariranno sempre più frequentemente, come nelle tipiche frasi “caffè o tè” e “vivo o morto”.

Quindi, a differenza delle disgiunzioni di storie, le congiunzioni di storie sono in un modo molto più concreto ed evidente di nuovo delle storie, e questa differenza di comportamento delle storie, in relazione ai connettivi *E* e *O*, indica il loro statuto speciale di elementi di maggiore concretezza di un dominio concettuale. E allo stesso modo in cui gli oggetti che sono congiunzioni di altri oggetti hanno bisogno di più spazio per manifestarsi nel nostro teatro spaziale, anche le storie che sono congiunzioni di altre storie hanno bisogno di più “spazio” per manifestarsi, cioè più pagine, più parole, più memoria su un computer, nel caso di documenti elettronici, ecc. Tuttavia, a differenza degli oggetti ordinari, non esiste ancora, per le nostre storie umane, l'equivalente di un teatro spaziale ben strutturato, e sicuramente ci sono molti modi differenti per definire l'embrione di una struttura da cui un giorno potrebbe emergere un ambiente più organizzato e simmetrico.

Come esempio paradigmatico, consideriamo quella specifica raccolta di storie umane solitamente denominata World Wide Web. Le sue pagine (web) interconnesse possono essere intese come le possibili manifestazioni spaziotemporali di un'entità astratta di significato, piuttosto complessa (formata dalla combinazione di molteplici concetti), la cui descrizione completa richiede l'uso del formalismo quantistico (o di formalismi simil-quantistici ancora più generali). Questa prospettiva è stata presa in considerazione di recente, in modo piuttosto dettagliato, come un modo per catturare il pieno contenuto in termini di significato di una raccolta di entità documentali, e il nome QWeb è stato proposto per denotare una tale entità di significato più astratta, per distinguerla dalla sua rete spaziotemporale di pagine stampate o stampabili (Aerts et al. 2018a).

Il QWeb, in quanto entità di significato di natura quantistica, può trovarsi in diversi stati: alcuni saranno più astratti, altri più concreti, e i più concreti saranno le storie associate alle diverse pagine web stampabili. Possiamo quindi considerare l'intera collezione di pagine web interconnesse come l'equivalente del nostro spazio euclideo tridimensionale, inteso come teatro per quelle entità (classiche) che chiamiamo oggetti. In altre parole, possiamo considerare la raccolta di documenti del Web, in un dato momento della nostra storia culturale umana, come l'equivalente (o meglio, la versione embrionale) delle possibili posizioni spaziali che possono occupare le entità microfisiche e macrofisiche, sia in modi effimeri che più permanenti.

Ciò significa che interpretiamo le diverse storie associate alle diverse pagine web come l'equivalente degli stati spaziali che l'entità QWeb (o alcune delle sue entità sub-concettuali) può assumere, in determinati contesti sperimentali, come ad esempio il contesto interrogativo dove un essere umano inserisce la parola "cavallo" nel motore di ricerca di Google, per ottenere, come risultato, una storia relativa al concetto *Cavallo*, tra le diverse storie possibili.

Tale esperimento di ricerca può essere considerato l'equivalente di una misurazione quantistica, anche se ovviamente il parallelo non è completo, poiché è chiaro che i motori di ricerca come Google operano ancora oggi in modo deterministico, mentre le misurazioni quantistiche sono genuinamente indeterministiche, così come lo sono probabilmente anche i processi decisionali umani (vedi la Sezione 9). Ma possiamo certamente considerare, ai fini del nostro parallelo, una versione futura degli attuali motori di ricerca, che andranno ad integrare nel loro funzionamento anche dei processi probabilistici (cioè un certo livello di casualità). Ad ogni modo, oggi viene sempre presentata a un essere umano una raccolta di possibili risultati, ordinati secondo la loro rilevanza, e l'operatore deve quindi decidere, di volta in volta, su quale link cliccare, tra quelli forniti, introducendo così un elemento di imprevedibilità nel processo di selezione finale.

Prima di continuare con la discussione, sottolineiamo ancora una volta il doppio status delle pagine web: hanno acquisito quello di oggetti nel nostro mondo umano, come è il caso per tutti i manufatti umani, ma descrivono altresì delle complesse combinazioni concettuali (che abbiamo denominato 'storie') che corrispondono agli stati più concreti dell'entità concettuale QWeb. Ma non tutti i manufatti

umani sono necessariamente associati a degli stati concettuali massimamente concreti, secondo la seconda linea di concretizzazione illustrata nella Figura 5. Ad esempio, un pezzo di carta su cui è scritta la parola “cavallo” è un’entità in uno stato massimamente concreto secondo la prima linea (è un oggetto), ma non un’entità in uno stato massimamente concreto secondo la seconda linea (non è una storia).⁷

Detto questo, vediamo subito che un concetto come *Animale*, diciamo nello stato *L’animale è un cavallo*, che come abbiamo discusso può essere considerato uno stato relativamente astratto, intrattiene una forte connessione di significato con un certo numero di pagine, ad esempio tutte quelle che contengono la parola “cavallo”, e questo significa che l’entità concettuale *Animale* è potenzialmente presente in tutte queste pagine, cioè in tutti quegli aggregati di significato che sono le storie relative al concetto di *Cavallo*, che possono essere selezionate in un esperimento consistente nel trovare un buon esempio di storia di cavalli. Ma poiché un’entità concettuale può solo essere in uno stato alla volta, finché una pagina web non viene selezionata, non si può affermare che sia effettivamente presente nello spazio (e nel tempo), poiché per questo deve poter acquisire, in un dato momento, uno degli stati appartenenti alla tela Web degli stati spaziali.

Otteniamo quindi un’interessante spiegazione della cosiddetta *non-località*. Innanzitutto, come evidenziato in molti lavori che sono precedenti alla proposta dell’interpretazione concettualistica, *non-località significa non-spazialità* (Aerts 1998, 1999). Il nostro spazio euclideo tridimensionale (e più generalmente il nostro spazio minkowskiano quadridimensionale, possibilmente anche curvato dalla gravità) non va considerato come il teatro complessivo della nostra

⁷ Nella nostra analogia con il Web, partiamo dal presupposto che gli esseri umani siano motivati a creare una pagina solo quando è in grado di trasmettere un significato sufficientemente articolato e complesso, e che una pagina contenente, ad esempio, la singola parola “cavallo”, non sarà ritenuta sufficientemente interessante da giustificare lo sforzo (la spesa energetica) per la sua realizzazione, così come non troviamo sugli scaffali di una libreria dei volumi le cui pagine, a parte il titolo di copertina, sarebbero tutte vuote. Ma ovviamente, manufatti di questo tipo non sono in linea di principio impossibili da creare, e a dire il vero vengono anche creati. Ad esempio, in una cartoleria si possono trovare dei quaderni, che sono dei volumi senza parole stampate. Ma una cartoleria è un contesto molto diverso da quello di una biblioteca, o di una libreria.

realtà fisica, ma come ‘uno spazio’ che è emerso in seguito alla strutturazione delle macro-entità fisiche formatesi a partire dalle micro-entità. L’interpretazione concettualistica aggiunge però una spiegazione importante su come si debba intendere questa nozione di non-spazialità: *non-spazialità significa astrazione*.

Più precisamente, non-località e non-spazialità risulterebbero dal fatto che le entità microfisiche, essendo entità concettuali, è possibile formare delle storie a partire da esse (intese come complesse combinazioni di concetti singoli), con la *coerenza* (l’elemento strutturante per la loro formazione) che altro non sarebbe che l’espressione di una connessione di significato, esattamente allo stesso modo in cui, nell’ambito concettuale umano, le storie che raccontiamo, e in particolare le pagine web, hanno origine e vengono strutturate tramite i significati presenti nelle nostre visioni del mondo individuali e collettive. Questi significati, collegando i concetti più astratti a quelli più concreti, spiegano perché le entità concettuali quantistiche sono sempre disponibili nell’acquisire proprietà spaziali, prestandosi ad essere rilevate dagli strumenti fisici che appartengono a quel particolare spazio semantico (lo spazio euclideo) che è un teatro per le loro storie.

Consideriamo una storia che menziona il concetto di *Animale*, in diversi punti della sua narrazione. Immaginiamo che a un certo punto venga specificato che l’*Animale* è un *Cavallo*. Il concetto *Animale* contenuto nella storia assumerà allora lo stato specificato dalla combinazione concettuale: *L’animale è un cavallo*. Ne consegue che istantaneamente diventerà *Cavallo* in qualsiasi altra parte della storia dove viene indicato come *Animale*, il che è esattamente ciò che accade negli esperimenti nei laboratori di fisica quando si osservano entità separate da grandi distanze spaziali che cambiano contemporaneamente il loro stato in modo correlato.

6 Oggetti come limiti di concetti

Dalla discussione precedente si evince che quelli che di solito chiamiamo oggetti (entità classiche con proprietà spazio-temporali stabili) non sarebbero altro che entità concettuali che hanno raggiunto

lo status di vere e proprie storie, cioè di combinazioni sufficientemente complesse di concetti interconnessi tra loro. Ancora una volta, sottolineiamo l'importanza di non confondere gli artefatti che contengono le storie umane (come le pagine web stampate) con il fatto che questi artefatti umani, in quanto entità materiali macroscopiche, sono a loro volta entità concettuali non umane, simili a storie.

La nozione di oggetto, così come utilizzata nella fisica classica, sarebbe allora solo un'idealizzazione, poiché il comportamento oggettuale dipenderebbe solo dall'ambiente concettuale/cognitivo in cui un'entità è immersa. Si consideri l'esempio del risonatore meccanico di O'Connell (una piccola ancia di 60 μm , abbastanza grande da essere vista a occhio nudo) che è riuscito a mettere in una sovrapposizione di due stati classicamente mutualmente esclusivi, con uno che "vibra poco" e l'altro che "vibra molto" (O'Connell 2010).

Come altro esempio, si consideri l'esperimento condotto da Gerlich et al., in cui delle molecole organiche formate da un massimo di 430 atomi, con dimensioni massime fino a 60 angstrom, sono state messe con successo in una sovrapposizione di stati localizzati in regioni dello spazio separate da distanze di ordini di grandezza superiori alle dimensioni delle molecole stesse (Gerlich et al. 2011). Esperimenti di questo tipo indicano che anche delle grandi entità materiali, come sedie e tavoli, potrebbero in linea di principio entrare in stati non-spaziali.

Prendiamo il caso di una sedia. Se a un livello fondamentale è anche un'entità concettuale di tipo storia, allora è in grado di trovarsi in diversi stati concettuali. Il più neutro è semplicemente lo stato che esprime la sua esistenza, che possiamo descrivere con la combinazione concettuale: *La sedia è una sedia*, o *La sedia esiste*. Altri stati dell'entità concettuale sedia sono facili da incontrare nel nostro ambiente umano, come ad esempio: *La sedia è in camera da letto*, o *La sedia è in salotto*. Si tratta di autostati relativi ai contesti in cui le sedie si trovano abitualmente. Ma in linea di principio, e anche se ciò potrebbe non essere mai alla nostra portata in termini sperimentali, si potrebbero anche creare dei contesti interrogativi, come quelli considerati da Gerlich et al. per le molecole organiche, in cui lo stato di una sedia sarebbe descritto per esempio dalla combinazione concettuale: *La sedia è in camera da letto o in salotto*.

L'enorme difficoltà nell'ottenere in pratica uno stato di questo

tipo è dovuta al fatto che una sedia è un oggetto molto complesso, cioè una storia molto complessa, formata da numerose sotto-storie, e che mettere un'entità di questo livello di complessità in uno stato di sovrapposizione significa trovare un modo per decomporre tale storia in quella che può essere descritta come la disgiunzione di due storie differenti: una corrispondente alla sedia che si trova nello stato spaziale *La sedia è in camera da letto*, e l'altra corrispondente alla stessa sedia che si trova nello stato spaziale *La sedia è in salotto*.⁸

Quindi, per ottenere uno stato come *La sedia è in camera da letto o in salotto*, per un'entità materiale macroscopica come una sedia, è necessario creare un contesto sperimentale che svolga il ruolo di un'entità cognitiva simil-mentale in grado di scomporre coerentemente il suo significato in un modo che descriveremmo precisamente come la disgiunzione di due diverse storie di sedie (senza distruggere l'entità sedia). Si noti che le menti umane possono facilmente creare un contesto interrogativo di questo tipo, quando esprimono una mancanza di conoscenza su dove si trovi effettivamente la sedia, e formulare tale situazione di incertezza-ambiguità usando il connettivo "o", cioè producendo uno stato più astratto.⁹

Ciò significa che, nell'ambito del regno concettuale umano, le menti umane possono facilmente fornire un contesto/interfaccia in grado di interagire con un'entità-sedia in modo concettuale, cioè metterla in uno stato di sovrapposizione che può successivamente collassare, una volta acquisita una certa conoscenza aggiuntiva. Questo non va però inteso nel senso della mente umana che farebbe collassare oggettivamente la sedia fisica, come si ritiene nelle

⁸ Il linguaggio concettuale è molto fluido: una combinazione concettuale usata per descrivere lo stato di un'entità concettuale può essere interpretata a sua volta, a seconda del contesto considerato, anche come un'entità composita a sé stante. Qui il focus è sull'entità *Sedia*, quindi una combinazione come *La sedia è in camera da letto* va interpretata come una specificazione di uno dei suoi possibili stati, ma *La sedia è in camera da letto*, in quanto combinazione di 6 concetti differenti, può essere interpretata anche come un'entità concettuale multipartita, che a sua volta può trovarsi in stati diversi.

⁹ Per descrivere opportunamente la disgiunzione come uno stato di sovrapposizione, la mancanza di conoscenza in questione deve essere profonda, cioè tale da non sapere nemmeno se la sedia si trova in camera da letto o in salotto, cioè se la sedia è o non è in uno stato spaziale. In altre parole (si veda l'analisi degli esperimenti della doppia fenditura e della scelta ritardata nelle Sezioni 2 e 3) la "o" deve essere qui intesa in modo non esclusivo.

interpretazioni dette ‘consciousness causes collapse’ (la coscienza causa il collasso), ad esempio quella di von Neumann-Wigner. Ancora una volta, non dobbiamo confondere i concetti umani con la concettualità delle entità fisiche, e la cognizione umana con il comportamento cognitivo delle entità materiali (come gli strumenti di misura) che sono sensibili al significato veicolato dalle entità fisiche concettuali.

È possibile dunque creare un contesto fisico in grado di mettere una sedia in uno stato di sovrapposizione corrispondente a due luoghi diversi, e allo stesso tempo fornire un’interfaccia in grado di interagire concettualmente con la sedia in tale stato di sovrapposizione, cioè comprendere il significato che esso veicola, e possibilmente farlo collassare, successivamente, in stati con proprietà spaziali ben definite, come possiamo farlo con le entità fisiche microscopiche e mesoscopiche? Come abbiamo detto, la nostra risposta provvisoria è che questo dovrebbe essere possibile in linea di principio, e il fatto che finora abbiamo idealizzato le entità come le sedie come oggetti, invece che come entità concettuali, è dovuto al fatto che la loro natura concettuale può manifestarsi solo quando viene creato per loro un contesto del tipo della doppia fenditura.

Ma quale potrebbe essere l’equivalente di uno schermo di rilevazione per un’entità come una sedia?

Possiamo osservare che, poiché il nostro ambiente standard terrestre è in grado di mantenere corpi macroscopici costantemente nello spazio, ci possiamo aspettare che questo stesso ambiente sia in grado di produrre anche il collasso – l’oggettivazione – di una macro-entità come una sedia in uno stato di sovrapposizione. Ma come si può portare una sedia in uno stato più astratto, di sovrapposizione spaziale? E perché sarebbe così difficile farlo rispetto ad esempio a un atomo di idrogeno? La risposta è semplice: per entità sempre più grandi diventa sempre più difficile ottenere una schermatura efficace per proteggerle dall’incessante bombardamento termico cui sono sottoposte, sulla superficie del nostro pianeta, e non c’è solo il bombardamento esterno: bisogna tenere conto anche dell’ambiente interno della sedia.

Per spiegare cosa intendiamo, possiamo ragionare come segue. Per mettere l’intera sedia in una sovrapposizione di due diverse posizioni spaziali, dobbiamo essere in grado di descrivere l’entità sedia come un tutt’uno coerente. In termini matematici, ciò si può tradurre

nella possibilità di fattorizzare la funzione d'onda in modo tale che il contributo del centro di massa si separi da quello proveniente dai movimenti relativi dei diversi costituenti, gli uni rispetto agli altri e rispetto a quel centro comune. Infatti, non è la parte della funzione d'onda che descrive il moto relativo dei componenti interni che vogliamo mettere in uno stato di sovrapposizione (poiché tale parte della funzione d'onda descrive la struttura della sedia, che vogliamo preservare), ma quella che descrive il suo centro di massa, cioè la localizzazione potenziale nello spazio della sedia nel suo assieme.

Nel caso di un atomo di idrogeno, è semplice separare la funzione d'onda relativa al centro di massa da quella associata al moto relativo, ottenendo così una descrizione dell'evoluzione del centro di massa tramite una funzione d'onda in evoluzione libera (si veda un qualsiasi manuale di meccanica quantistica). Ma con un corpo macroscopico le cose si fanno molto più complicate, poiché per descrivere il centro di massa della sedia per mezzo di un pacchetto d'onda in evoluzione libera, l'evoluzione del centro di massa del corpo deve disaccoppiarsi da tutti i gradi di libertà interni, e questo può essere ragionevolmente fatto solo se il corpo viene raffreddato a temperature estremamente basse. Quanto basse? Abbastanza basse da evitare qualsiasi scambio di energia tra il grado di libertà del centro di massa e i gradi di libertà associati a tutti i movimenti relativi interni (Sun et al. 2001).

Ci si può chiedere perché questi scambi di energia sarebbero così problematici. Naturalmente, è facile capire che il bombardamento esterno di pacchetti di energia termica possa causare quella che solitamente viene definita *perdita di coerenza quantistica*, che nell'ambito dell'interpretazione concettualistica si traduce in *perdita di significato*. Questa perdita di significato è causata dal fatto che quando un sistema fisico è costretto a comunicare con un ambiente rumoroso, questo offuscherà altresì, di conseguenza, le comunicazioni interne, con il risultato che i componenti interni cesseranno di comportarsi come un tutt'uno coerente.

Ma anche se il bombardamento esterno non fosse termico, ma pienamente coerente, questo probabilmente non risolverebbe il problema dell'offuscamento delle comunicazioni interne dell'entità-sedia. Infatti, una sedia è un'entità molto complessa, composta da innumerevoli parti, alcune delle quali sono più coese di altre. È come un ambiente formato da individui diversi, con cervelli diversi,

per cui anche quando ricevono tutti lo stesso input, come una frase che viene pronunciata (un concetto in un determinato stato), ciò produrrà una risposta differente a seconda dell'individuo coinvolto. È naturalmente, se numerosi individui sono costretti a chiacchierare tutti assieme, tutti allo stesso tempo, senza alcun coordinamento, producendo ciascuno un output differente, il risultato complessivo sarà una cacofonia incomprensibile. Questo è esattamente ciò che possiamo aspettarci che accada in una comunicazione mediata da fotoni che avviene al livello dei diversi pezzi di materia che formano la struttura della sedia, come atomi, molecole, macromolecole e altri domini coerenti più o meno separati, a causa degli incessanti processi di eccitazione e de-eccitazione.

Il problema di questa miscela discordante e priva di significato di comunicazioni diverse può essere risolto, in linea di principio, mettendo a tacere tutti i partecipanti, cioè togliendo loro energia, raffreddando l'entità-sedia a temperature estremamente basse, e naturalmente facendo lo stesso con il suo ambiente esterno. In queste condizioni di un ambiente esterno e interno estremamente freddi, anche una sedia, perlomeno in linea di principio, potrebbe essere portata in uno stato di sovrapposizione non-spaziale, facendola interagire con un contesto macroscopico equivalente a una doppia fenditura.

Ora, considerando ancora una volta il parallelo tra un'entità complessa come una sedia e la nozione di storia, possiamo osservare che anche nelle storie scritte da noi umani ci sono parti di esse che sono più coese di altre. Prendiamo l'esempio di un romanzo: si possono distinguere diversi capitoli, che sono come delle sotto-storie, e poi ci sono i paragrafi, che di solito contengono anche loro delle "unità di discorso" più coese e autonome, associate a determinate idee (tanto che ogni paragrafo può essere considerato un'entità concettuale a sé stante, nello stato specifico descritto dalle combinazioni di parole presenti nel paragrafo). Ma andando oltre, e considerando la più specifica linea di concretizzazione umana, possiamo osservare nei documenti scritti da esseri umani la presenza dei connettivi "e" e "o", con i primi di solito molto più abbondanti dei secondi.

Come abbiamo già osservato, il connettivo "o" di solito aumenta il livello di astrazione, mentre il connettivo "e" andrebbe tipicamente nella direzione di rendere la combinazione più concreta. È chiaro che *Talpa e anatra* trasmette un significato molto più specifico

di *Talpa o anatra*, in quanto la “o” è più facilmente associabile a un nuovo possibile significato emergente, non riducibile a quelli trasmessi da *Talpa* e *Anatra* presi separatamente, e che nel tempo potrebbe poi ricevere un termine completamente nuovo per la sua designazione.¹⁰

Questa rottura della simmetria tra “e” e “o” nelle entità documentali umane, e l’osservazione che, in generale, il connettivo “o” produca delle connessioni di significato più forti rispetto al connettivo “e” (si confronti ad esempio *Vivo o morto* con *Vivo e morto*, *Dolcetto o scherzetto* con *Dolcetto e scherzetto*, ecc.), è indicativo del fatto che all’interno dei testi esistono diversi *dominii di significato*, dove i concetti appartenenti a questi domini sono molto più immersi nei reciproci significati, per cui un raggruppamento dei documenti in strutture di significato di diverse dimensioni è insito nel modo in cui un’interazione che si fonda sul significato funziona a un livello fondamentale.

Naturalmente, il processo di raggruppamento provoca un processo di oggettivazione, con i raggruppamenti più estesi che raggiungono solitamente uno status oggettuale più forte all’interno di tale interazione governata dal significato. Per un oggetto fisico come una sedia sarà la stessa cosa, se consideriamo la coerenza quantistica come l’equivalente della nozione di significato per le micro-entità: ci saranno *dominii di coerenza* all’interno di una sedia, separati da altri domini di coerenza, il che rende di fatto una sedia un’entità formata in buona approssimazione dalla congiunzione di parti diverse che non hanno quasi nessuna connessione di significato tra di loro (nessuna sovrapposizione), cioè che si comportano pressoché come fossero oggetti distinti.

Tuttavia, la loro natura concettuale può ancora essere rivelata, se viene messo in atto un contesto sperimentale appropriato, come un contesto in cui l’energia complessiva viene abbassata al punto in cui le *lunghezze d’onda di de Broglie* associate a tutti questi domini separati possono sovrapporsi e iniziare a comunicare intimamente [per una discussione dettagliata della nozione di lunghezza d’onda di de Broglie, vedere Aerts (2014)]. Citiamo qui en passant la differenza tra

¹⁰ L’effetto delle congiunzioni “e” e “o” nel rendere una combinazione più o meno astratta è a dire il vero molto più articolato; si vedano ad esempio le discussioni in Aerts (2010b, 2014).

un pezzo di materia morta, come una sedia, e un pezzo di materia vivente, come un ornitorinco. Si può dire che quest'ultimo, a differenza del primo, è stato in grado di costruire, a temperatura ambiente, strutture nidificate di domini di coerenza (significato) di tutte le dimensioni possibili, fino a quelle dell'intero corpo dell'entità vivente.

7 Entanglement

Dopo quanto discusso nelle sezioni precedenti, diventa più facile spiegare come l'entanglement possa essere spiegato in modo soddisfacente dall'interpretazione concettualistica. L'entanglement è uno dei fenomeni quantistici meglio studiati e verificati sperimentalmente, che sembra sfidare il nostro senso comune (spaziale), motivo per cui Einstein lo ha notoriamente definito come una "azione fantasma a distanza" (spooky action at a distance). In effetti, la possibilità di creare una condizione di entanglement tra due micro-entità sembra non dipendere dalla distanza spaziale che le separa o, per dirla in termini più precisi, sembra non dipendere dalla distanza spaziale tra i luoghi in cui le entità in stato di entanglement possono essere rilevate con alta probabilità.

Una caratteristica dell'entanglement quantistico (conseguenza diretta del principio di sovrapposizione) è la sua ubiquità, nel senso che le entità quantistiche si "aggrovigliano" in modo naturale ogni volta che possono interagire, e rimangono poi tipicamente "aggrovigliate" (entangled) finché non interverrà nulla a separarle (a desincronizzarle). Questa ubiquità dell'entanglement rispecchia l'ubiquità delle *connessioni di significato* che sono inevitabilmente presenti in qualsiasi ambito concettuale. Non appena due entità concettuali possono incontrarsi in un determinato contesto cognitivo, tra loro esisterà una connessione di significato, la cui forza dipenderà ovviamente da quanto significato le due entità possono condividere e scambiare.

Prendiamo l'esempio dei due concetti *Animale* e *Verso*. Si tratta di due concetti astratti che nella maggior parte dei contesti hanno una forte connessione di significato, poiché tutti noi sappiamo, grazie alla

nostra esperienza del mondo, che gli animali sono esseri viventi e che gli esseri viventi possono compiere diversi tipi di azioni, tra cui quella di fare un verso, e che ci sono versi che certi animali tipicamente fanno e che altri animali invece non fanno. Questa connessione diventa perfettamente evidente quando questi due concetti vengono combinati in una frase come *L'animale fa un verso*. Pressoché tutte le menti umane concorderanno sul fatto che questa frase possiede un significato pieno e perfettamente comprensibile.

Per comprendere meglio la natura della connessione di significato tra *Animale* e *Verso*, quando questi concetti sono combinati nella frase *L'animale fa un verso*, possiamo considerare due coppie di esemplari per entrambi i concetti, come le seguenti (Aerts e Sozzo 2011): (*Cavallo*, *Orso*) e (*Tigre*, *Gatto*) per *Animale*, che denoteremo *A* e *A'*, rispettivamente, quindi (*Ringhio*, *Nitrito*) e (*Sbuffo*, *Miagolio*), per *Verso*, che denoteremo *B* e *B'*, rispettivamente. Si può quindi invitare un certo numero di individui a partecipare al seguente esperimento congiunto.

Considerando la combinazione *L'animale fa un verso*, si chiede loro di selezionare coppie di esemplari per i due concetti *Animale* e *Verso*, come esempi rappresentativi della loro combinazione. Se scelgono tra le coppie *A* e *B*, la loro selezione sarà considerata il risultato di una misura congiunta denominata *AB*, e lo stesso vale per le altre combinazioni, definendo così in totale quattro misure congiunte: *AB*, *A'B*, *AB'* e *A'B'*. Le statistiche di tutti questi risultati possono essere analizzate nello stesso modo in cui i fisici analizzano i dati degli esperimenti del tipo “test di Bell”, per esempio utilizzando la versione della disuguaglianza di Bell nota come disuguaglianza di Clauser, Horne, Shimony e Holt (CHSH) (Clauser et al. 1969).¹¹ E il risultato che si ottiene è che la disuguaglianza viene violata con magnitudini simili a quelle delle tipiche situazioni create

¹¹ La disuguaglianza di CHSH è $|S| \leq 2$, dove:

$$S \equiv E(A, B) - E(A, B') + E(A', B) + E(A', B')$$

e $E(A, B)$ è il valore medio della misura congiunta *AB*:

$$E(A, B) = p(A_1, B_1) - p(A_1, B_2) - p(A_2, B_1) + p(A_2, B_2)$$

con $p(A_1, B_1)$ la probabilità di ottenere come esito la coppia (A_1, B_1) , i.e., (*Cavallo*, *Ringhio*), corrispondente alla combinazione *Il cavallo ringhia*, e similmente per le altre probabilità e misure congiunte.

in un laboratorio di fisica, con spin entangled o fotoni entangled (Aerts e Sozzo 2011, 2014).

Quindi, la combinazione concettuale *L'animale fa un verso* descrive quello che in fisica è indicato come *stato entangled*. Tale combinazione contiene sia una specifica dello stato di *Animale* che dello stato di *Verso*, ma anche una specifica dello “stato della loro connessione”. Infatti, se invece di *L'animale fa un verso* avessimo usato la combinazione più complessa *Un animale che è stato drogato fa uno strano verso*, non solo la specifica degli stati di *Animale* e *Verso* sarebbe stata diversa, ma lo sarebbe stata anche la loro connessione di significato, in quel contesto.

Tuttavia, questo non è il modo abituale in cui si interpreta uno stato entangled in meccanica quantistica. Infatti, poiché si presume che gli stati quantistici autentici siano descritti solo da stati puri, e non si possono associare stati puri ai diversi componenti di un'entità composita quando c'è entanglement, la conclusione abituale è che quando un'entità composita è in uno stato di entanglement, i suoi componenti cessano di esistere, così come due gocce d'acqua cessano di esistere quando si fondono in un'unica goccia più grande.

Questo però non è del tutto coerente con l'osservazione che l'entanglement preserva la struttura dell'entità composita. Per esempio, due elettroni entangled, una volta districati (cioè posti in uno stato non-entangled, che ne descrive la separazione), avranno ancora la stessa massa e la stessa carica elettrica. In altre parole, le entità quantistiche non scompaiono completamente quando sono entangled, come indica anche la combinazione concettuale *L'animale fa un verso*, se interpretata come rappresentativa di uno stato di entanglement.

Ci sarebbe quindi un'incompatibilità tra l'interpretazione concettualistica e ciò che suggerisce il formalismo quantistico standard? Sicuramente no, anche se l'interpretazione concettualistica ci spinge certamente verso un completamento del formalismo quantistico, per consentire ai componenti di un sistema entangled di rimanere sempre in stati ben definiti. Ciò può essere fatto adottando la *rap-presentazione di Bloch estesa* (EBR – extended Bloch representation) della meccanica quantistica, di recente derivazione (Aerts e Sassoli de Bianchi 2014a), in cui è possibile rappresentare in maniera coerente lo stato di un'entità composita bipartita come una tripla di

vettori (reali), due dei quali specificano gli stati individuali dei due componenti e il terzo (di dimensione superiore) lo stato della loro connessione (Aerts e Sassoli de Bianchi 2016a, b).

Il motivo per cui la rappresentazione di Bloch estesa può farlo è che si tratta di una versione completata del formalismo quantistico, nella quale anche gli operatori di densità svolgono il ruolo di rappresentanti di stati autentici. In questo modo, non si deve più rinunciare al principio generale secondo cui un sistema composito esiste, e quindi si trova in uno stato ben definito, se e solo se anche i suoi componenti esistono, e quindi si trovano in stati ben definiti (si veda anche la Sezione 9, per il ruolo svolto dall'EBR in relazione al problema della misura).

Non appena spieghiamo l'entanglement come una connessione di significato, il fenomeno viene demistificato. Innanzitutto, perché diventa chiaro che non ci sono comunicazioni attraverso lo spazio da associare alle correlazioni quantistiche, in quanto una connessione di significato tra due concetti è un elemento astratto della realtà, che non si manifesta al livello del nostro teatro spaziale. Ed è anche chiaro che, sebbene sia corretto descrivere un sistema entangled, ad esempio formato da due elettroni, come un tutt'uno, a causa della connessione di significato che svolge il ruolo di elemento connettivo, non per questo si deve pensare che le entità concettuali avrebbero perso la loro identità nella combinazione (in poche parole, l'entanglement, come fenomeno emergente, non è " $1 + 1 \rightarrow 1$," ma " $1 + 1 \rightarrow 3$ ").

Una volta considerato il ruolo svolto da questo elemento di connessione, diventa altresì evidente che quando delle proprietà individuali vengono create (anziché essere solo scoperte) in una misura congiunta, anche le correlazioni verranno create (invece di essere solo scoperte), proprio per la presenza di una connessione (più astratta) non-spaziale. In altre parole, è proprio perché le correlazioni vengono create in una misura congiunta [denominate *correlazioni del secondo tipo*, vedi Aerts (1991); Aerts e Sassoli de Bianchi (2016b)], anziché essere solo scoperte, che le disuguaglianze di Bell possono essere violate, e l'unico modo per creare correlazioni a partire da un'entità composita è che i suoi componenti siano connessi prima della misura.

Per capire meglio cosa intendiamo, consideriamo due dadi tradizionali. Se li lanciamo contemporaneamente, otterremo 36 coppie

possibili ed equiprobabili di esiti per le facce superiori dei due dadi. Si tratta di una situazione in cui non è possibile individuare delle correlazioni nella statistica dei risultati. Tuttavia, se colleghiamo i dadi attraverso un'asticella rigida, si potranno ottenere solo alcune coppie di facce superiori, e non altre, quando i dadi vengono lanciati congiuntamente (vedi la Figura 6).

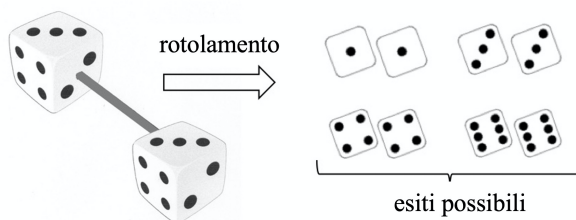


Figura 6 Quando due dadi separati vengono fatti rotolare, ci sono 36 coppie di esiti possibili, equiprobabili, per le loro facce superiori (nessuna correlazione). Se invece i due dadi vengono collegati tramite un'asticella rigida, quando vengono fatti congiuntamente rotolare si possono ottenere solo 4 coppie di risultati possibili per le loro facce superiori (le correlazioni tra facce superiori vengono create dall'esperimento di rotolamento).

In questo esempio, possiamo vedere perfettamente il ruolo svolto dall'elemento di connessione, qui del tutto visibile come connessione attraverso lo spazio, e dei macrosistemi composti interconnessi di questo tipo possono facilmente violare le disuguaglianze di Bell (Sassoli de Bianchi 2013). La connessione tramite significato svolge esattamente lo stesso ruolo dell'asticella rigida che collega i due dadi attraverso lo spazio. Naturalmente, non funziona in modo così stabile quando delle menti umane selezionano delle coppie di esemplari rappresentative di concetti più astratti, poiché ci si aspetta che siano presenti anche delle fluttuazioni. Rimanendo nel paradigma dell'esempio dei dadi, una descrizione più realistica sarebbe quella di un'asticella rigida che ha una certa probabilità di staccarsi e cadere durante l'esecuzione del processo di rotolamento congiunto, in modo che le correlazioni non siano sempre perfette, andando tipicamente a ridurre il grado di violazione delle disuguaglianze di Bell (Sassoli de Bianchi 2014).

Per completare la nostra discussione, forniamo anche l'esempio di una situazione concettuale che sarebbe l'equivalente di due micro-entità in uno stato non-entangled (detto stato prodotto), come

due dadi scollegati. Consideriamo la combinazione concettuale *L'animale è un gatto il cui verso preferito è il miagolio*. Poiché tale combinazione attualizza già una connessione tra *Gatto* e *Miagolio*, il processo di creazione di correlazioni durante la misurazione congiunta sarà notevolmente ridotto. In altre parole, ci troviamo in una situazione di *correlazioni del primo tipo* (Aerts 1991; Aerts e Sassoli de Bianchi 2016b), che vengono tipicamente scoperte, anziché create, nel corso dell'esperimento.

Si potrebbero fornire altri esempi di situazioni concettuali umane che imitano ciò che accade nei microsistemi entangled, quando vengono interpretati come sistemi concettuali con la presenza di collegamenti di significato. Ad esempio, è stato recentemente eseguito un esperimento di psicologia cognitiva piuttosto suggestivo, in cui è stato chiesto ai partecipanti di selezionare delle coppie di direzioni del vento che consideravano essere buone rappresentanti di *Due diverse direzioni del vento*. I dati hanno mostrato una violazione della disuguaglianza CHSH con un valore molto vicino a quello degli esperimenti con due spin entangled (Aerts et al. 2018b). Ed è stata presa in considerazione anche una versione simmetrizzata dell'esperimento, che ha ricevuto una modellazione quantistica completa nello spazio di Hilbert, utilizzando uno stato di singoletto per descrivere la connessione di significato e delle misure prodotto per descrivere i contesti interrogativi preposti alla selezione delle coppie effettive di direzioni del vento (Aerts et al. 2018c).

Utilizziamo quest'ultimo esempio delle direzioni del vento per rendere ancora più esplicito il parallelo tra natura e comportamento delle entità concettuali umane ed entità della microfisica. Quando consideriamo la combinazione concettuale *Due diverse direzioni del vento*, nessuno dei due concetti di vento in essa contenuti ha una direzione spaziale specifica. Allo stesso modo, considerando due entità quantistiche di spin-1/2 in uno stato (entangled) di singoletto, anche in questa situazione i due spin non hanno una direzione spaziale specifica. Queste direzioni vengono attualizzate solo quando le due entità di spin sono costrette dall'apparato di misura ad acquisirne una, allo stesso modo in cui i partecipanti all'esperimento cognitivo sono costretti a scegliere coppie effettive di direzioni del vento. Il modo in cui lo fanno dipende dall'esperienza umana accumulata con i venti che soffiano sulla superficie del nostro pianeta, e dal significato che è stato astratto da queste

esperienze. Ciò farà sì che alcune direzioni del vento siano percepite come più differenti tra loro di altre, favorendo così un processo di creazione di forti correlazioni durante la selezione delle coppie di direzioni spaziali ritenute essere dei buoni esempi di *Due diverse direzioni del vento*.

Questo è esattamente ciò che accade anche negli esperimenti congiunti con due entità di spin- $1/2$ in uno stato di singoletto, che è uno stato di spin zero in cui non sono ancora state create direzioni specifiche (autostati degli operatori di spin). Quindi, quando gli apparati simil-mentali di Stern-Gerlach selezionano congiuntamente una direzione di spin, cioè quando rispondono alla domanda “Qual è il miglior esempio di due diverse direzioni di spin?”, produrranno una risposta che tiene conto del contenuto di significato portato dall’entità concettuale composta di spin, che può essere descritta dalla combinazione concettuale *Il valore totale dello spin è zero* o, per esprimerlo in termini ancora più specifici: *Gli orientamenti degli spin sono sempre opposti quando vengono creati lungo una stessa direzione*.

8 Indistinguibilità

Nella sezione precedente abbiamo spiegato che l’entanglement, secondo l’interpretazione concettualistica, è espressione di una connessione di significato tra entità concettuali. A volte, l’entanglement viene descritto come *coerenza quantistica*, dove il termine “coerenza” va inteso come l’esistenza di una data specifica relazione tra stati, che è precisamente ciò che uno stato di entanglement è: una particolare relazione tra stati prodotti, espressa tramite la loro sovrapposizione. Questa relazione, o connessione, è una connessione di significato che esiste prima che le entità entangled siano sottoposte a possibili contesti interrogativi.

Quindi, il realismo non è chiaramente messo in questione quando si ha a che fare con stati di entanglement, poiché la realtà, come abbiamo già spiegato, non sarebbe completamente contenuta nel teatro spazio-temporale, e le entità quantistiche entangled sarebbero entità in stati più astratti, disponibili ad acquisire proprietà spaziali (come luoghi e direzioni) solo se sottoposte a contesti adeguati,

come quelli di misura. In altre parole, dobbiamo distinguere ciò che collega le entità e gli effetti che queste connessioni producono in termini di correlazioni che possono essere create nei laboratori, che sono processi dove degli esemplari (istanziamenti) più concreti di concetti astratti possono essere attualizzati in modo congiunto.

In questa sezione, vogliamo affrontare un altro degli enigmi quantistici, l'*indistinguibilità*, e spiegare perché può essere elucidato in modo convincente dall'interpretazione concettualistica; questo perché i concetti incorporano in modo naturale la nozione di indistinguibilità, che è apparentemente ciò che usiamo di default quando abbiamo a che fare con delle raccolte di numerosi concetti (Aerts 2009; Aerts et al. 2015).

Ma prima di ciò, ricordiamo brevemente il significato della nozione di indistinguibilità. Due entità – chiamiamole S_1 e S_2 – si dicono distinguibili se, scambiando il loro ruolo, ciò può avere degli effetti osservabili, almeno in linea di principio. Le entità indistinguibili sono dette *identiche*, e il termine “identico” significa qui che possiedono esattamente lo stesso insieme di attributi, cioè lo stesso insieme di proprietà intrinseche, indipendenti dallo stato, come ad esempio la stessa massa, carica e spin, come è il caso per tutte le micro-entità elementari, ad esempio gli elettroni.

Ora, le entità identiche, sebbene indistinguibili, restano comunque delle entità *individuali*. Questo proprio perché hanno attributi che possono essere misurati e utilizzati per contare quante di loro sono presenti in un sistema composito. Per esempio, la carica elettrica di un insieme di elettroni, se misurata, sarà Ne , con e la carica di un singolo elettrone e N un numero intero che indica il numero di elettroni identici presenti nell'insieme. Quindi, enti identici non necessariamente corrispondono allo stesso ente, il che significa che ciò che rende distinguibili due entità non sembra essere ciò che conferisce loro anche la loro individualità.

L'indistinguibilità ha profonde conseguenze sul comportamento statistico delle entità identiche, se considerate collettivamente. Consideriamo innanzitutto il caso in cui S_1 sia in qualche modo distinguibile da S_2 , e supponiamo per semplicità che possano trovarsi solo in due diversi stati, chiamiamoli ψ_1 e ψ_2 . Quindi, le due entità, se considerate come un sistema composito formato da due sotto-entità non interagenti, possono trovarsi in 4 stati differenti [vedi la

Figura 7(a): uno in cui entrambe le entità si trovano nello stato ψ_1 uno in cui entrambe le entità si trovano nello stato ψ_2 , uno in cui S_1 si trova nello stato ψ_1 e S_2 nello stato ψ_2 , e infine uno in cui S_1 si trova nello stato ψ_2 e S_2 nello stato ψ_1 . Nel caso più generale in cui il numero di entità distinguibili è n e il numero di stati in cui possono trovarsi è m , non è difficile osservare che il numero totale N di stati del sistema composto formato da n sotto-entità non interagenti è: $N_{MB} = m^n$, dove “MB” sta per “Maxwell-Boltzmann”, poiché questo modo di contare è caratteristico della *statistica* (classica) di Maxwell-Boltzmann.

(a) Maxwell-Boltzmann					(b) Bose-Einstein				(c) Fermi-Dirac	
ψ_1	$S_1 S_2$		S_1	S_2	ψ_1	SS		S	ψ_1	S
ψ_2		$S_1 S_2$	S_2	S_1	ψ_2		SS	S	ψ_2	S

Figura 7 Il numero totale di stati per due entità che possono trovarsi in due stati differenti, ψ_1 e ψ_2 , quando (a) sono distinguibili (oggetti spaziali); (b) sono indistinguibili e possono trovarsi nello stesso stato (bosoni); (c) sono indistinguibili ma non possono trovarsi nello stesso stato (fermioni).

Ma consideriamo ora la situazione in cui le due entità sono indistinguibili. In questo caso, la situazione in cui S_1 si trova nello stato ψ_1 e S_2 nello stato ψ_2 , e la situazione in cui S_1 si trova nello stato ψ_2 e S_2 nello stato ψ_1 , non possono più essere distinte, quindi corrispondono alla stessa situazione, il che significa che ora abbiamo solo un totale di 3 stati differenti possibili [vedi la Figura 7(b)]. Anche in questo caso è possibile scrivere una formula per il caso generale, che è la seguente:

$$N_{BE} = \binom{n + m - 1}{n} = \frac{(n + m - 1)!}{n! (m - 1)!}$$

dove questa volta “BE” sta per “Bose-Einstein”, poiché questo modo di contare è caratteristico della *statistica* (quantistica) di Bose-Einstein. Per completezza, descriviamo anche una terza situazione, in cui non solo le due entità sono indistinguibili, ma esiste anche il vincolo che non possano trovarsi congiuntamente nello stesso stato (principio di esclusione di Pauli). In questo caso rimane un solo stato per il sistema composto [vedi la Figura 7(c)], e per la situazione

generale si ha la formula seguente:

$$N_{\text{FD}} = \binom{m}{n} = \frac{m!}{n! (m - n)!}$$

dove “FD” sta per “Fermi-Dirac”, poiché questo modo di contare è caratteristico della *statistica* (quantistica) di *Fermi-Dirac*.

Se l’interpretazione concettualistica è in grado di catturare correttamente la natura delle entità quantistiche, l’indistinguibilità quantistica dovrebbe manifestarsi anche nel dominio concettuale umano, se non altro in una certa misura, e produrre statistiche non classiche, cioè non deducibili dal modo di contare gli stati della statistica di MB.

Prendiamo l’esempio del concetto astratto *Animale*. Possiamo considerare un certo numero di questi concetti, ad esempio dieci di essi. Una collezione di questo tipo può essere descritta considerando la seguente combinazione di due concetti: *Dieci animali*. È chiaro allora che tutti i concetti *Animale* nella combinazione saranno completamente identici e saranno tutti esattamente nello stesso stato, cioè tutti con lo stesso significato. È altresì chiaro che siamo veramente in presenza di una collezione di entità, non di una singola entità.

In altre parole, nella combinazione concettuale *Dieci animali* l’indistinguibilità quantistica diventa perfettamente evidente, e in tal senso l’interpretazione concettualistica ne offre una spiegazione al contempo semplice e chiara. Questo non sarebbe possibile per degli oggetti spaziali, poiché è chiaro che due oggetti spaziali non sono mai indistinguibili, in quanto occupano sempre posizioni diverse nello spazio, cioè sono sempre in stati spaziali differenti. In linea di principio, possono avere tutti le stesse proprietà intrinseche, ma a causa del loro status spaziotemporale saranno sempre distinguibili. Quindi, il fatto che *Dieci animali* sia un concetto, e non un oggetto, è fondamentale affinché possa manifestare la proprietà quantistica di “essere molti e allo stesso tempo essere effettivamente indistinguibili”.

Consideriamo a questo punto due possibili esemplari di animale: *Gatto* e *Cane*, che vanno qui intesi come due possibili stati di *Animale*, cioè come stati che esprimono il significato che *L’animale è un gatto* e *L’animale è un cane*, rispettivamente. Ci troviamo quindi nella situazione in cui $m = 2$ e $n = 10$, per cui $N_{\text{BE}} = 11$. Più precisamente, gli undici stati in cui può trovarsi il concetto *Dieci animali*, quando si considerano solo i due esemplari *Gatto* e *Cane*, sono i seguenti:

$$\begin{aligned}
 \psi_{10,0} &= \text{Dieci gatti} \\
 \psi_{9,1} &= \text{Nove gatti e un cane} \\
 \psi_{8,2} &= \text{Otto gatti e due cani} \\
 &\vdots \\
 \psi_{2,8} &= \text{Due gatti e otto cani} \\
 \psi_{1,9} &= \text{Un gatto e nove cani} \\
 \psi_{0,10} &= \text{Dieci cani}
 \end{aligned}$$

Se ipotizziamo che gli stati *Gatto* e *Cane* possano essere attualizzati con la stessa probabilità, e che non vi siano modi per distinguere i singoli gatti, né i singoli cani, allora le probabilità di ottenere tutti questi stati sono esattamente le stesse e sono date da ($i = 0, \dots, 10$):

$$P_{BE}(\psi_{10-i,i}) = \frac{1}{11}$$

D'altra parte, se vi fosse una realtà sottostante che permette di operare delle ulteriori distinzioni, allora tutti questi stati avrebbero una specifica molteplicità. Più precisamente, la molteplicità dello stato $\psi_{10-i,i}$ è $\frac{10!}{i!(10-i)!}$, il che produce le seguenti probabilità di tipo MB ($i = 0, \dots, 10$):

$$P_{MB}(\psi_{10-i,i}) = \frac{10!}{i!(10-i)! 2^{10}}$$

Più specificamente:

$$\begin{aligned}
 P_{MB}(\psi_{10,0}) &= P_{MB}(\psi_{0,10}) = \frac{1}{1024}, \\
 P_{MB}(\psi_{9,1}) &= P_{MB}(\psi_{1,9}) = \frac{5}{512}, \\
 P_{MB}(\psi_{8,2}) &= P_{MB}(\psi_{2,8}) = \frac{45}{1025}, \\
 P_{MB}(\psi_{7,3}) &= P_{MB}(\psi_{3,7}) = \frac{15}{128}, \\
 P_{MB}(\psi_{6,4}) &= P_{MB}(\psi_{4,6}) = \frac{105}{512}, \\
 P_{MB}(\psi_{5,5}) &= \frac{63}{256}.
 \end{aligned}$$

Possiamo trovare evidenze di una deviazione dalla statistica di MB, a favore di quella di BE, a causa dell'indistinguibilità dei singoli concetti *Animale* nella combinazione *Dieci animali*? Una possibilità è

quella di considerare il Web come un'entità simile a una mente capace di raccontare numerose storie differenti, associate a tutte le sue pagine ricercabili. In questo modo, si possono eseguire dei conteggi, utilizzando un motore di ricerca come quello di Google, e utilizzare i numeri ottenuti come stima delle diverse probabilità [si veda Aerts et al. (2018a) per maggiori dettagli su questo modo di interrogare il Web]. Nel farlo, è però importante escludere i due stati estremi $\psi_{10,0} = \text{Dieci gatti}$ e $\psi_{0,10} = \text{Dieci cani}$, poiché queste combinazioni produrranno dei conteggi di due ordini di grandezza superiori rispetto a tutti gli altri; questo perché la frase “dieci gatti” (rispettivamente, “dieci cani”) non contiene la parola “cane” (rispettivamente, “gatto”) e può quindi facilmente combinarsi con innumerevoli altre parole. Inoltre, se usassimo la combinazione più specifica “dieci gatti e zero cani” (rispettivamente, “dieci cani e zero gatti”), non si otterrebbe alcun conteggio, poiché non esprimiamo solitamente le cose in questo modo nel nostro linguaggio umano convenzionale.

Pertanto, la nostra interrogazione del Web non fornirà dei dati corretti per i due stati $\psi_{10,0}$ e $\psi_{0,10}$, che vanno quindi scartati dalle statistiche. Ciò significa che inizieremo a contare il numero di pagine partendo dalla combinazione “nove gatti e un cane”, o “un cane e nove gatti”. Il 20 agosto 2017, Google ci ha fornito il seguente conteggio: $N_{9,1} = 3090$. Facendo lo stesso per le combinazioni “otto gatti e due cani”, o “due cani e otto gatti”, abbiamo ottenuto: $N_{8,2} = 4790$, e procedendo allo stesso modo, abbiamo raccolto i seguenti valori: $N_{7,3} = 2580$, $N_{6,4} = 7390$, $N_{5,5} = 4460$, $N_{4,6} = 3310$, $N_{3,7} = 5020$, $N_{2,8} = 3710$, $N_{1,9} = 2980$. Considerando che:

$$N = N_{9,1} + N_{8,2} + \dots + N_{1,9} = 37330$$

è possibile calcolare i seguenti pesi ($i = 1, \dots, 9$):

$$P(\psi_{10-i,i}) = \frac{N_{10-i,i}}{N}$$

e interpretarli come probabilità sperimentali per gli stati $\psi_{10-i,i}$, $i = 1, \dots, 9$. Più esattamente, queste sono:

$$P(\psi_{9,1}) = 0.083, P(\psi_{8,2}) = 0.128, P(\psi_{7,3}) = 0.069,$$

$$P(\psi_{6,4}) = 0.198, P(\psi_{5,5}) = 0.119, P(\psi_{4,6}) = 0.089, \\ P(\psi_{3,7}) = 0.134, P(\psi_{2,8}) = 0.099, P(\psi_{1,9}) = 0.080.$$

Nella Figura 8, le abbiamo rappresentate assieme alle probabilità teoriche di MB (P_{MB}) e di BE (P_{BE}) (dopo averle rinormalizzate, per tenere conto dell'eliminazione dei due stati estremali). Evidentemente, i dati forniti dai conteggi sono molto più caratteristici di una statistica quantistica, di tipo BE, con l'aggiunta di alcune fluttuazioni, che di una statistica classica di tipo MB.¹²

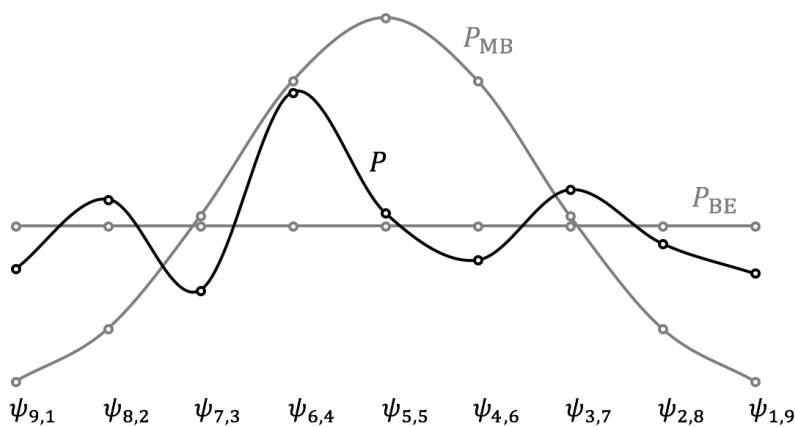


Figura 8 Confronto delle probabilità di Maxwell-Boltzmann (P_{MB}) e Bose-Einstein (P_{BE}) con quelle ottenute eseguendo i conteggi sul Web (P) con Google (il 18 agosto 2017), nella situazione in cui l'entità concettuale *Dieci animali* è considerata in relazione ai due stati-esemplari *Gatto* e *Cane*. Si noti che gli stati estremali *Dieci gatti* e *Dieci cani* non sono stati considerati nel calcolo.

Naturalmente, i conteggi di Google sono ben lungi dall'essere una stima precisa del numero effettivo di pagine web contenenti specifiche combinazioni di parole, il che significa che quanto sopra va considerato solo come un esempio illustrativo, più che

¹² Si noti che queste fluttuazioni sono realmente tali, nel senso che le deviazioni dalla "linea piatta" di Bose-Einstein saranno generalmente differenti quando si considerano dei concetti differenti, ad esempio *Cavallo* e *Mucca* invece di *Gatto* e *Cane*, per rimanere in tema di animali. In altre parole, le deviazioni osservate dalla statistica di Bose-Einstein non possono essere generalmente attribuite a una sistemica molteplicità classica degli stati.

dimostrativo. Altri esempi di conteggi sul Web si trovano in Aerts (2009) e Aerts et al. (2015). Ma soprattutto, in Aerts et al. (2015) sono stati condotti esperimenti anche con soggetti umani. Più precisamente, a 88 partecipanti è stato fornito un elenco di concetti, come *Undici animali*, *Nove esseri umani*, *Otto espressioni di emozioni*, ecc. in associazione con due dei loro possibili esemplari, come *Gatto* e *Cane* per *Animale*, *Uomo* e *Donna* per *Essere umano*, *Ridere* e *Piangere* per *Espressioni di emozione*, ecc.

Più precisamente, ogni volta venivano descritte ai partecipanti diverse combinazioni numeriche di esemplari, per ciascuno dei concetti, chiedendo loro di valutare quali fossero le combinazioni più probabili, in base alle loro preferenze. I risultati ottenuti hanno mostrato che il passaggio dalla statistica di BE (corrispondente a una percezione di stretta indistinguibilità dei concetti) a quella classica di MB dipende dai concetti e dagli esemplari considerati nell'esperimento, nel senso che più era facile rapportarli a situazioni di vita quotidiana e più la statistica ottenuta tendeva verso quella di MB. D'altra parte, meno l'immaginazione umana era influenzata da situazioni di vita reale (in cui domina la statistica di MB), cioè era lasciata correre liberamente, e più fortemente appariva la statistica quantistica di BE.

Che dire invece della statistica di Fermi-Dirac (FD), possiamo trovare traccia anche di essa nel dominio concettuale umano? A riguardo, possiamo osservare che le interfacce con cui interagiscono i concetti umani, cioè le strutture di memoria sensibili ai loro significati, sono indubbiamente organizzate secondo il *principio di esclusione di Pauli*. Prendiamo il semplice esempio di un computer che non ci permette di fare la copia di un file e nominarla esattamente allo stesso modo del file copiato, se memorizzata nella stessa cartella. Quindi, possiamo avere copie identiche di uno stesso concetto, ma queste copie identiche devono trovarsi in stati differenti all'interno di una memoria (in cartelle differenti di un computer).

Ma sappiamo anche che le entità formate da materia ordinaria (barionica), che secondo l'interpretazione concettualistica sono le entità di tipo cognitivo/mnemonico che s'interfacciano con i messaggeri bosonici, sono formate da fermioni elementari. Quindi, ci si aspetterebbe di poter identificare l'equivalente di queste entità elementari fermioniche anche nel dominio concettuale umano.

Si consideri ad esempio la ben nota distinzione tra *nomi numerabili*

e *nomi massa* (detti anche *nomi non numerabili*). I nomi (sostantivi) numerabili sono quelli che possono essere combinati con un numero (e quindi accettano anche la forma plurale). Danno origine a combinazioni come *Dieci animali*, che, come abbiamo detto, esprime una realtà di dieci entità identiche tutte nello stesso stato, tipica della materia bosonica nei cosiddetti condensati di Bose-Einstein.

D'altra parte, i nomi massa sono quelli che hanno la proprietà di non combinarsi (in modo sensato) con un numero, senza ulteriori specificazioni. Questo significa che non possiamo avere in questo caso più concetti non numerabili identici, tutti nello stesso stato. Prendiamo l'esempio del concetto *Coraggio*, la cui parola associata non ha una forma plurale. La combinazione *Due coraggio* è chiaramente priva di significato, il che significa che nel linguaggio umano *Coraggio* non è un'entità concettuale simile a un bosone, poiché non possiamo metterne un numero determinato tutte nello stesso stato. Ci è tuttavia consentito utilizzare combinazioni come *Coraggio*, *coraggio*, *coraggio*, come quando ripetiamo più volte una parola, come espediente retorico.¹³ Ci sarà però in questo un ordine, il che significa che le entità concettuali *Coraggio* nella summenzionata combinazione saranno tutte in stati diversi, motivo per cui più saranno numerose nella combinazione e maggiore sarà lo spazio necessario per scriverle su una pagina, sotto forma di parole.

Per spingere ancora oltre questo parallelo, si consideri la combinazione *Uomo di coraggio*. Anche se contiene il concetto non numerabile *Coraggio*, ora può essere combinato in modo significativo con un numero, ad esempio in: *Dieci uomini di coraggio*. Ciò significa che, combinando un concetto non numerabile con altri concetti, si può ottenere un comportamento emergente di tipo bosonico. Questo è simile alla ben nota situazione dove dei fermioni, aggregandosi, possono comportarsi come dei bosoni, come nel tipico esempio delle particelle α (nuclei di elio). Si noti che i fermioni possono diventare bosoni solo quando sono legati da un qualche tipo di interazione, che, come sappiamo, è a sua volta mediata da bosoni. Ciò significa che, in senso stretto, i fermioni da soli non possono formare un bosone: non possiamo costruire bosoni senza bosoni.

Nella combinazione di cui sopra, *Uomo* è un concetto di tipo bosonico (numerabile), mentre *Di* e *Coraggio* non lo sono. Quindi,

¹³ Si tratta di una *palilogia*, solitamente usata per dare veemenza o enfasi.

potremmo dire che i due concetti fermionici *Di* e *Coraggio* interagiscono tramite il concetto bosonico *Uomo*, producendo la combinazione *Uomo di coraggio*, il cui comportamento è bosonico. Tutto ciò è naturalmente, per il momento, puramente euristico, in quanto non possiamo aspettarci di trovare nel dominio concettuale del linguaggio umano lo stesso livello di organizzazione del dominio della microfisica (né, tra l'altro, dovremmo aspettarci che il primo si evolva necessariamente, in un futuro lontano, verso lo stesso tipo di organizzazione del secondo). A questo proposito, si consideri che la dualità fermioni/bosoni delle micro-entità è intimamente legata alle proprietà rotazionali degli spin frazionari/interi, di cui sono portatori, secondo il noto *teorema spin-statistica*.

Tuttavia, citando Aerts (2009): “[...] anche se possiamo esprimere il requisito dell'identità in termini generali, la situazione dei concetti umani e delle loro interfacce costituite da strutture di memoria, non si è evoluta a sufficienza per contenere una struttura in cui l'invarianza rotazionale possa essere espressa in termini generali. Questo è anche il motivo per cui non esiste un equivalente dello spin a questo livello”. Ciò non significa che non si potranno identificare strutture interne in grado di svolgere lo stesso ruolo dello spin e dell'invarianza rotazionale nei concetti umani, ma questa è una questione da riservare a indagini future.

Per concludere questa sezione sull'indistinguibilità, consideriamo ancora il concetto *Animali*, cioè *Animale* nella forma plurale, ma non in una specifica combinazione con un numero. Esso descrive chiaramente un insieme di entità concettuali *Animale*, tutte esattamente nello stesso stato, ma il cui numero è perfettamente indeterminato. Se scriviamo *Animali* in forma “spacchettata”, può essere intesa come la combinazione infinita: *Un animale o due animali o tre animali o quattro animali, ecc.*, che nel linguaggio matematico dello spazio di Hilbert si scriverebbe come una sovrapposizione coerente degli stati *Un animale, Due animali, Tre animali, ecc.*, corrispondenti ai diversi numeri possibili di entità concettuali *Animale* nel loro stato fondamentale.

Se pensiamo all'oscillatore armonico, ciò corrisponderebbe a uno stato $|\phi\rangle$ che è una sovrapposizione infinita di autostati dell'operatore numero ($N = a^\dagger a$): $|\phi\rangle = \sum_{n=1}^{\infty} e^{in\phi} |n\rangle$, cioè uno stato in cui, secondo la *relazione di indeterminazione numero-fase*, l'indeterminazione sul numero di entità sarebbe massima, mentre

l'indeterminazione sulle loro fasi sarebbe minima, tanto da rendere possibile la sua descrizione come fenomeno ondulatorio classico. Questo non è il caso delle entità fermioniche (non numerabili), per le quali, come è noto, non è ottenibile un'approssimazione ondulatoria classica (Lévy-Leblond e Balibar 1997).

9 Il problema della misura

Nelle sezioni precedenti abbiamo considerato diversi fenomeni quantistici e spiegato come possono essere compresi alla luce dell'interpretazione concettualistica. Nel farlo, abbiamo descritto gli apparati di misura come strutture di memoria sensibili al significato veicolato dalle entità concettuali quantistiche che vengono misurate. In questo modo, le misure sono come dei contesti interrogativi durante i quali un'entità concettuale, solitamente preparata in uno stato astratto (di sovrapposizione), è costretta ad acquisire uno stato più specifico, corrispondente a una delle possibili risposte che il contesto sperimentale consente di selezionare (analogamente a quando dobbiamo compilare un modulo a scelta multipla con delle risposte predeterminate da selezionare).

Naturalmente, il fatto che una misura sia come un processo interrogativo è una metafora che può essere utilizzata indipendentemente dall'interpretazione concettualistica. In effetti, uno scienziato, attraverso una misura, interroga indubbiamente il sistema che viene misurato, e l'esito ottenuto è la risposta che riceve. Ma questa è una descrizione solo al livello cognitivo umano, che è necessariamente sempre presente in un esperimento scientifico, come è chiaro che la scienza è un'attività umana.

L'interpretazione concettualistica, tuttavia, aggiunge un nuovo livello cognitivo: quello dell'interazione mediata dal significato tra l'entità misurata e l'apparato di misura. Sorge quindi la seguente domanda: I processi decisionali umani possono gettare una luce su ciò che accade dietro le quinte di un processo di misura quantistica e fornire un ulteriore argomento a favore dell'interpretazione concettualistica?

Per rispondere a questa domanda, dobbiamo innanzitutto

individuare quali sono gli elementi importanti che caratterizzano un processo interrogativo, quando a un'entità cognitiva viene chiesto (o imposto) di fornire una risposta, quando confrontata a una determinata situazione (che possiamo rappresentare come un'entità concettuale in un determinato stato), selezionando tale risposta tra un certo numero di possibilità predeterminate.

Possiamo chiederci cosa proviamo intuitivamente quando ci troviamo di fronte a contesti interrogativi/decisionali di questo tipo. Sicuramente, tutti noi possiamo riconoscere che ci sarà una prima fase in cui immergeremo mentalmente la situazione in questione nel contesto formato dall'insieme di risposte possibili che ci sono state fornite. Se la situazione è inizialmente descritta da uno stato $D = |\psi\rangle\langle\psi|$ (che qui scriviamo come operatore di proiezione), possiamo intendere questa prima fase come un processo di preparazione deterministico durante il quale avviciniamo il più possibile il significato della situazione in essere a quello delle diverse risposte possibili, che ovviamente possono essere descritte anche come gli stati finali possibili dell'entità concettuale oggetto dell'interrogazione. Supponendo che ci siano N risposte, chiamiamo $D_i = |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$, $i = 1, \dots, N$, questi stati finali.

Quindi, c'è un primo processo immersivo durante il quale lo stato iniziale D diventerà un nuovo stato D_e , che esprime questa connessione di significato più specifica con i diversi risultati/risposte possibili D_i . Poiché solo una di queste risposte può essere selezionata (sono risposte che si escludono a vicenda), questo processo immersivo $D \rightarrow D_e$ creerà uno stato temporaneo di *equilibrio* (da cui l'indice "e") instabile tra le tensioni concorrenti derivanti dalle diverse connessioni di significato esistenti tra D_e e gli stati D_i . Pertanto, si verificherà una seconda fase (solitamente indeterministica), che possiamo altresì percepire soggettivamente. È la fase in cui l'equilibrio tensionale mentale che è stato costruito viene improvvisamente disturbato, in un modo che di solito non può essere previsto in anticipo, con la perturbazione che provocherà un processo irreversibile durante il quale lo stato concettuale D_e viene trascinato verso una delle possibili risposte D_i .

Si tratta di un processo simile a una *rottura (ponderata) di simmetria*, che riduce le tensioni precedentemente in competizione e permette all'entità cognitiva di attualizzare una risposta.

Si noti che il processo cognitivo a due fasi di cui sopra è una descrizione generale che può rendere conto anche di situazioni particolari in cui la risposta alla domanda è nota in anticipo. In questo caso, l'equilibrio tensionale che si formerà sarà di natura triviale, nel senso che la connessione di significato con uno dei risultati possibili prevarrà sempre e produrrà immancabilmente il risultato predeterminato. Ma nelle situazioni più generali la persona interrogata non si sarà ancora formata un'opinione specifica su quale risposta debba essere selezionata, per cui tutte le risposte svolgono realmente un ruolo attivo nel concorrere alla creazione dell'equilibrio tensionale, avendo una probabilità non nulla di essere in ultimo selezionate.

È importante sottolineare che quello che stiamo qui descrivendo è in realtà un modello dei processi della mente e non un modello dei processi del cervello, e che ovviamente i processi della mente e del cervello non devono necessariamente essere gli stessi.¹⁴ Ma poiché l'interpretazione concettualistica presuppone che gli apparati di misura si comportino come delle entità cognitive, e gli apparati di misura sono proprio ciò che i fisici usano per attualizzare un esito, sorge la seguente domanda: È possibile descrivere un processo di misura quantistica come un processo a due fasi di tipo cognitivo, in cui lo stato iniziale dell'entità misurata viene prima portato in uno stato di equilibrio tensionale, che viene poi rotto in modo tale che il processo obbedisca esattamente alle previsioni della regola di Born?

La risposta è affermativa e la descrizione in questione è contenuta nel cosiddetto modello *generale di riduzione tensionale* (GTR model – general tension-reduction model) (Aerts e Sassoli de Bianchi 2015a, b, 2016c), che nel caso speciale in cui lo spazio degli stati è Hilbertiano, e le misure sono uniformi, si riduce alla *rappresentazione di Bloch estesa* (EBR – extended Bloch representation) di cui abbiamo già parlato nella Sezione 7 (Aerts e Sassoli de Bianchi 2014a, 2016b, 2017a).

Più precisamente, esiste un modo per riformulare il formalismo quantistico standard utilizzando una generalizzazione e un'estensione del modello storico tridimensionale della sfera di Bloch, che contiene una descrizione esatta del processo a due stadi di cui sopra.

¹⁴ Ad esempio, la modellazione dell'attività dell'area di Broca (regione della corteccia cerebrale nota per avere un ruolo chiave nella produzione e comprensione del linguaggio) è molto diversa dalla modellazione dell'uso del linguaggio umano, anche se, naturalmente, vi saranno dei correlati.

In altre parole, il formalismo quantistico si generalizza ed estende in modo del tutto naturale in una rappresentazione che è compatibile con la descrizione generale di una misura come processo interrogativo di tipo cognitivo.

Quando diciamo che *generalizza* il modello della sfera di Bloch, è perché si applica a dei sistemi quantistici di qualsiasi dimensione N , e anche di dimensione infinita (Aerts e Sassoli de Bianchi 2019), e quando diciamo che *estende* il modello della sfera di Bloch, è perché permette di descrivere, nella stessa rappresentazione, le *interazioni di misura* (nascoste) che sono responsabili della rottura dell'equilibrio tensionale. Naturalmente, non è lo scopo del presente scritto entrare in tutti i dettagli matematici del modello GTR o dell'EBR della meccanica quantistica. Ma forniamo nondimeno, qui di seguito, alcune informazioni aggiuntive sul funzionamento di quest'ultimo.

Introducendo una rappresentazione per i generatori di $SU(N)$, il *gruppo unitario speciale* di grado N , diventa possibile associare allo stato iniziale D e agli stati finali D_i , dei vettori unitari reali $(N^2 - 1)$ -dimensionali, che denoteremo rispettivamente \mathbf{r} e \mathbf{r}_i , $i = 1, \dots, N$. Si tratta di vettori che vivono sulla superficie di una regione convessa di stati inscritta in una sfera unitaria $(N^2 - 1)$ -dimensionale, $B_1(\mathbb{R}^{N^2-1})$, che coincide con quest'ultima solo nel caso di misure a due esiti ($N = 2$) [grazie all'isomorfismo tra $SU(2)$, e $SO(3)$]. Ora, si può dimostrare che gli N vettori \mathbf{r}_i descrivono i vertici di un simpleso $(N - 1)$ -dimensionale, Δ_{N-1} , inscritto sia nella regione convessa degli stati, sia in $B_1(\mathbb{R}^{N^2-1})$.

La prima fase della misura corrisponde quindi a un'immersione del vettore di stato \mathbf{r} all'interno della sfera, lungo un percorso ortogonale a Δ_{N-1} , raggiungendo così un punto di equilibrio $\mathbf{r}_e \in \Delta_{N-1}$. Questo è il corrispondente matematico della fase che abbiamo precedentemente descritto come l'attività cognitiva che porta l'entità concettuale in pieno contatto con la "regione di potenzialità" generata dalle N possibili risposte, che si escludono a vicenda. Da un punto di vista matematico, questo fa sì che l'operatore di proiezione iniziale D , associato a \mathbf{r} , si desincronizzi gradualmente, trasformandosi in un operatore densità completamente ridotto:

$$D_e = \sum_{i=1}^N P_B(\psi \rightarrow \psi_i) D_i$$

associato al vettore (non più unitario) sul simpleso \mathbf{r}_e , dove i numeri positivi

$$P_B(\psi \rightarrow \psi_i) = |\langle \psi_i | \psi \rangle|^2$$

corrispondono alle probabilità di Born. Questo significa che nell'EBR anche gli operatori di densità svolgono un ruolo nel rappresentare degli stati autentici (come abbiamo già spiegato nella Sezione 7, in relazione alla descrizione di sottosistemi entangled), descrivendo l'evoluzione (non unitaria) dell'entità durante la misura stessa. A questo punto, possiamo considerare le "linee di tensione" che vanno dallo stato sul simpleso \mathbf{r}_e agli N stati che descrivono gli esiti possibili \mathbf{r}_i ; linee che producono una partizione di Δ_{N-1} in N sottoregioni convesse A_i , che vanno a formalizzare l'equilibrio tensionale instabile che abbiamo precedentemente descritto.

Possiamo immaginare che queste N sottoregioni siano riempite con una sostanza astratta, elastica e disintegrabile, in modo che quando una delle regioni – diciamo la regione A_i – inizia a disintegrarsi a partire da un dato punto al suo interno (questo è la perturbazione che abbiamo descritto in precedenza, dovuta alle inevitabili fluttuazioni presenti in un contesto di misura), il processo di disintegrazione si propagherà al suo interno, così che i suoi $N - 1$ punti di ancoraggio si staccheranno, con la conseguenza che lo stato di equilibrio \mathbf{r}_e (possiamo immaginarlo come una particella puntiforme astratta attaccata alla sostanza elastica) sarà portato verso il vertice rimanente, descritto dal vettore \mathbf{r}_i , producendo così il risultato finale della misura (si veda la Figura 9, per il caso $N = 3$).

Dalle proprietà geometriche delle strutture descritte, segue che se si calcola la probabilità che il punto di disintegrazione avvenga nella sottoregione A_i , data dal rapporto $\mu(A_i)/\mu(\Delta_{N-1})$ tra il volume $(N - 1)$ -dimensionale (o misura di Lebesgue) della sottoregione A_i , e quello dell'intero simpleso Δ_{N-1} , si ottiene che tale rapporto è esattamente uguale alla probabilità $P_B(\psi \rightarrow \psi_i) =$

$|\langle \psi_i | \psi \rangle|^2$, ossia corrisponde alla regola di Born della meccanica quantistica (Aerts e Sassoli de Bianchi 2014a, 2015a).

Ricordiamo che il processo appena descritto, e la sua modellizzazione matematica, si generalizza anche alla situazione di misure degeneri (si vedano gli articoli sopra citati), quando il processo di riduzione della tensione non porta a una piena risoluzione del conflitto tra tutte le risposte in competizione, così che lo stato viene sospinto in uno stato di sub-equilibrio, tra un insieme ridotto di possibilità, descritte da un sotto-simpleso di Δ_{N-1} di dimensione inferiore.

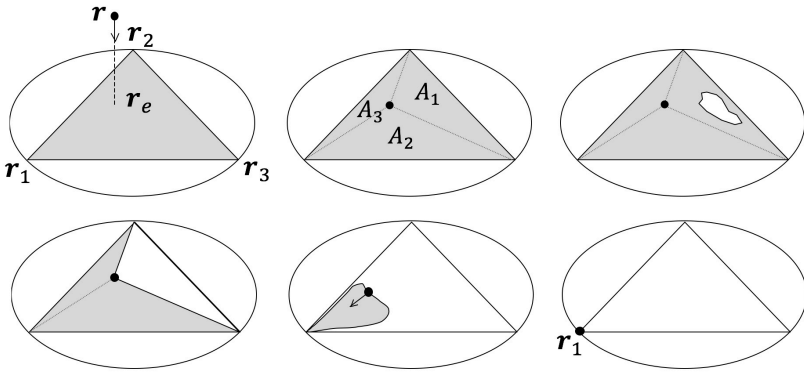


Figura 9 Lo svolgimento di una misura come processo di riduzione di tensione, qui con tre possibili esiti (non degeneri): r_1 , r_2 e r_3 . La particella astratta rappresentativa dello stato iniziale è posizionata in r , sulla superficie della palla (o sfera) a otto dimensioni $B_1(\mathbb{R}^8)$ (che ovviamente non può essere disegnata). Quindi, “cade” ortogonalmente sulla sostanza elastica triangolare Δ_2 (un triangolo equilatero) generata dai tre esiti, raggiungendo il punto r_e e definendo così tre sottoregioni convesse: A_1 , A_2 and A_3 . La sostanza di Δ_2 inizia quindi a disintegrarsi, partendo da un punto imprevedibile, qui all’interno di A_1 . In questo modo, A_1 si disintegra completamente e si stacca dai suoi due punti di ancoraggio, attirando la particella puntiforme verso la sua posizione finale, qui r_1 .

Per concludere questa sezione sulle misure quantistiche, consideriamo quella che potrebbe essere una possibile obiezione circa il nostro parallelo tra le misure nei laboratori di fisica e i processi cognitivi dove un’entità simil-mentale seleziona una tra una serie di possibili risposte, in base alle informazioni immagazzinate nella sua memoria. Come sappiamo, quando rispondiamo a una domanda, il

modo in cui lo facciamo può variare ogni volta, a seconda dello stato mentale in cui ci troviamo in quel momento. Inoltre, il modo di scegliere una risposta di una persona sarà generalmente diverso da quello di un'altra persona.

D'altra parte, uno strumento di misura sceglie sempre nello stesso modo, che è quello descritto dalla regola di Born. In altre parole, ogni persona dovrebbe essere associata a probabilità di tipo quantistico che generalmente differiscono da quelle previste dalla regola di Born. Questo è naturalmente corretto e, come abbiamo già detto, non dobbiamo pensare alla cultura umana, e ai processi cognitivi ad essa associati, come a un dominio di realtà che avrebbe raggiunto il livello di simmetria e di organizzazione del dominio della microfisica.

Ma, a dire il vero, non sappiamo se gli strumenti di misura scelgano sempre secondo la regola di Born. Sappiamo solo che la regola di Born emerge dalla statistica costruita a partire da numerosi risultati. Non possiamo quindi escludere che a ogni esecuzione j di una misura, lo strumento scelga un risultato secondo probabilità $P^{(j)}(\psi \rightarrow \psi_i)$ che in genere differiscono dalle probabilità di Born $P_B(\psi \rightarrow \psi_i)$. Ciò significherebbe che un apparato non solo attualizza un risultato da un insieme di risultati potenziali, ma anche, a un livello più profondo, attualizza un modo di scegliere un risultato da un insieme (tipicamente infinito) di modi potenziali di scegliere. Naturalmente, perché questo sia coerente con i risultati che solitamente osserviamo nei laboratori, la media

$$\langle P(\psi \rightarrow \psi_i) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P^{(j)}(\psi \rightarrow \psi_i)$$

dovrebbe tendere verso la probabilità di Born $P_B(\psi \rightarrow \psi_i)$, quando $n \rightarrow \infty$, per tutti gli $i = 1, \dots, N$.

Questo tipo di media, denominata *media universale*, può essere studiata nel modello GTR considerando delle sostanze astratte non uniformi che si disintegrano in tutti i modi possibili, dando così origine a tutti gli insiemi possibili di probabilità per i diversi esiti. Queste diverse sostanze non uniformi descriverebbero i diversi "stati mentali" dell'apparato a ogni esecuzione della misura, e il risultato rimarchevole è che è possibile dimostrare che una misura universale corrisponde esattamente (quando lo spazio degli stati è Hilbertiano)

a una misura uniforme descritta dalla regola di Born della meccanica quantistica (Aerts e Sassoli de Bianchi 2014a, 2015b, 2017a).¹⁵

10 Relatività

Per continuare la nostra esplorazione della fecondità dell'interpretazione concettualistica, nel fornire nuovi modi di spiegare i fenomeni fisici fondamentali, ci occuperemo ora della *teoria della relatività*. Infatti, anche i fenomeni relativistici, e non solo quelli quantistici, sfidano i nostri pregiudizi classici e, come andremo ora a spiegare, anche per essi l'interpretazione concettualistica è in grado di aiutarci a far luce sulla loro possibile origine. Nel farlo, ci limiteremo a considerare il cosiddetto fenomeno della *dilatazione temporale*. Inoltre, limiteremo la nostra discussione alle entità relativistiche non-quantistiche (i cosiddetti corpi classici) e forniremo alla fine alcuni spunti su come estendere il ragionamento anche al dominio quantistico.

Per cominciare, osserviamo che sebbene il termine “relatività” sia stato storicamente attribuito a Einstein, in realtà si riferisce a un principio (il *principio di relatività*) che è molto più antico, in quanto già descritto da Galileo Galilei nel suo famoso esempio della nave che avanza a velocità uniforme, con le persone chiuse nella cabina sotto il ponte che non sono in grado di stabilire se la nave si stia muovendo o se sia semplicemente ferma (Galilei 1632). In realtà, si trovano descrizioni di questo principio già nel I secolo a.C., cioè 1700 anni prima di Galileo, in Cina, nel testo: *The Apocryphal Treatise on the Shang Shu Section of the Historical Classic: Investigation of the Mysterious Brightnesses (Shang Shu Wei Kao Ling Yao)*, dove si legge: “Anche se la gente non lo sa, la terra si muove costantemente, proprio come chi è seduto in una grande barca con la finestra della cabina chiusa non si rende conto che la barca si muove”.

Un modo sintetico di esprimere il principio relativistico è il seguente: “Esistono punti di vista equivalenti sul mondo fisico”. Quando il principio viene formalizzato utilizzando la nozione di *sistema di riferimento*, tale affermazione diventa (Lévy-Leblond 1977):

¹⁵ Si veda anche Aerts e Sassoli de Bianchi (2014b), per una discussione della nozione di media universale in relazione al famoso paradosso di Bertrand.

“Per le leggi fisiche esistono dei sistemi di riferimento (sistemi di coordinate spazio-temporali) equivalenti, cioè tali che le leggi fisiche hanno esattamente la stessa forma in ognuno di essi”. Questo non significa, però, che le diverse grandezze fisiche avranno gli stessi valori nei diversi sistemi di riferimento equivalenti: significa che obbediranno esattamente alle stesse relazioni, cosicché i diversi fenomeni saranno percepiti nello stesso modo quando sperimentati a partire da tali sistemi di riferimento, differenti ma equivalenti.¹⁶

Gli esempi più semplici di sistemi di riferimento equivalenti sono quelli che vengono traslati o ruotati gli uni rispetto agli altri, ma Galileo, e prima di lui gli antichi saggi cinesi, avevano identificato una classe non-triviale di sistemi di riferimento equivalenti decisamente più interessante: quelli che si muovono gli uni rispetto agli altri a velocità costante, chiamati *sistemi inerziali*.

La notevole conseguenza del fatto che i sistemi inerziali sono sistemi equivalenti è che un oggetto che si muove a velocità costante, dal punto di vista delle leggi fisiche, deve essere descritto esattamente come un oggetto a riposo, cioè come un'entità per la quale la risultante delle forze che agiscono su di essa è nulla. Da ciò consegue subito la *prima legge di Newton*, o *principio di inerzia*: un oggetto in movimento a velocità costante, al pari di un oggetto a riposo, rimarrà per sempre in tale stato di moto, se non subisce l'azione di una qualche forza aggiuntiva.

Una conseguenza molto più rilevante deriva dall'osservazione che esistono dei fenomeni ondulatori (come quelli elettromagnetici) che sembrano propagarsi attraverso la “sostanza” stessa dello spazio, un tempo chiamata etere. Infatti, se così fosse, cioè se lo spazio fosse sostanziale e le onde potessero propagarsi attraverso il suo medium, allora alcuni effetti fisici (come gli effetti di interferenza) dovrebbero manifestarsi in modo differente nei diversi sistemi inerziali, contraddicendo così lo stesso principio relativistico. Ma se il principio è vero, come sembra essere il caso, queste differenze non dovrebbero essere osservate, e infatti finora non sono state

¹⁶ Beninteso, non tutti i sistemi di riferimento sono equivalenti. Per esempio, quando siamo su una giostra, che gira a una certa velocità, sperimentiamo dei fenomeni che sarebbero assenti se la giostra fosse ferma, come le *pseudo forze centrifughe*. Il contenuto interessante del principio di relatività è pertanto che tra gli innumerevoli sistemi di riferimento possibili, ne esistono di non triviali che sono tra loro perfettamente equivalenti.

osservate, per esempio nello storico esperimento di Michelson-Morley, e in quelli successivi, che hanno invece mostrato che la velocità di propagazione nello spazio dei campi elettromagnetici è sempre la stessa, per tutti i sistemi inerziali, in tutte le direzioni. Ciò significa che lo spazio, inteso come teatro onnicomprensivo sostanziale della realtà, diventa una nozione problematica, e che ciò che denominiamo spazio sarebbe essenzialmente un costruito relazionale, per cui ogni entità fisica, con la sua prospettiva unica, abiterebbe in realtà ‘uno spazio differente’. Come diventerà più chiaro nel seguito, ciò significa che noi non vediamo gli oggetti muoversi nello spazio perché si muoverebbero effettivamente in un teatro spaziale oggettivo, ma perché conferiamo loro un movimento al fine di mantenerli all’interno della nostra personale rappresentazione spaziale.

Ora, come è noto, quando si applica il principio relativistico in combinazione con alcune ipotesi molto generali e naturali sullo spazio e sul tempo, si ottengono le trasformazioni di Lorentz come uniche trasformazioni possibili che collegano i diversi sistemi inerziali equivalenti (Lévy-Leblond 1976). È interessante allora notare che queste trasformazioni non riguardano solo le coordinate spaziali, ma anche quelle temporali, con la conseguenza che gli oggetti, quando si muovono rispetto a un dato sistema di riferimento, sono più corti rispetto a quando sono a riposo (*contrazione delle lunghezze*), e quegli oggetti chiamati orologi, quando si muovono, ticchettano più lentamente rispetto agli orologi a riposo (*dilatazione temporale*). Ciò significa che secondo la relatività i costrutti spaziali associati alle diverse entità fisiche non possono essere solo spaziali, ma devono essere genuinamente spaziotemporali.

Per evidenziare questo fatto, si consideri il seguente esperimento mentale [si veda Aerts (1999) per una discussione più dettagliata]. Immaginate di trovarvi alla *Vrije Universiteit Brussel* (VUB), in Belgio (di solito denominata *Free University of Brussels*, in contesti anglofoni), e che sia il 29 settembre 2017, diciamo alle 3 pm.¹⁷ Possiamo

¹⁷ Il 29-30 settembre 2017, il *Centre Leo Apostel for Interdisciplinary Studies* (CLEA), in Belgio, ha organizzato il simposio internazionale “Worlds of Entanglement”, durante il quale uno degli autori ha presentato le linee guida dell’interpretazione concettualistica a un pubblico piuttosto eterogeneo, formato non solo da fisici, ma anche da matematici, scienziati sociali, biologi, artisti, filosofi, economisti, ecc. Il presente articolo è una versione estesa del contenuto di tale presentazione.

chiamare questo il vostro momento presente personale t_0 . Quando vi trovate alla VUB, al momento t_0 , poiché state avendo un'esperienza diretta con l'università, potete affermare con certezza che la VUB è reale per voi, cioè che la VUB è un elemento esistente della vostra realtà materiale personale nel presente. Ma che dire della realtà, ad esempio, dell'*Università della Svizzera italiana* (USI), in Svizzera (di solito indicata come *University of Lugano*, in contesti anglofoni)? Dal momento che al tempo t_0 vi trovate alla VUB e non state avendo un'esperienza con l'USI, potete nondimeno affermare che anche l'USI sia un elemento della vostra realtà materiale personale nel momento presente t_0 ?

La risposta è positiva e il motivo è che, secondo il criterio di realtà di EPR,¹⁸ sappiamo che la realtà è una costruzione sul possibile: se nel vostro passato aveste deciso di recarvi a Lugano, in Svizzera, allora con certezza avreste avuto un'esperienza diretta con l'USI al tempo presente t_0 , e considerando la certezza di tale previsione, potete affermare che anche l'USI è un elemento della vostra realtà personale, al tempo t_0 .

Considerate ora la VUB al tempo successivo $t_1 > t_0$, dove t_1 è il 30 settembre 2017, alle ore 3 pm, cioè un giorno in avanti nel vostro futuro, rispetto al vostro tempo presente t_0 . La VUB al tempo t_1 , è anch'essa un elemento della vostra realtà presente? Se ci basassimo solo sulla nostra concezione "parrocchiale" dello spazio e del tempo, la risposta sarebbe ovviamente negativa, ma sarebbe altresì una risposta sbagliata, se consideriamo ciò che sappiamo sugli effetti relativistici, e in particolare sull'effetto della dilatazione temporale, cioè il rallentamento del ticchettio degli orologi in movimento rispetto a quelli in stato di quiete.

Infatti, se nel vostro passato, ad esempio il 28 settembre 2017, alle ore 3 pm, aveste utilizzato un'astronave per viaggiare alla velocità $v = \sqrt{3/4} c$ (dove c è la velocità della luce nel vuoto) verso

¹⁸ In un famoso articolo scritto nel 1935, Einstein, Podolsky e Rosen (EPR) riconobbero che la nostra costruzione della realtà si basa sulle nostre previsioni su di essa. La formulazione originale del loro criterio è (Einstein et al. 1935): "Se, senza disturbare in alcun modo un sistema, possiamo prevedere con certezza [...] il valore di una grandezza fisica, allora esiste un elemento della realtà fisica corrispondente a questa grandezza fisica". Per una discussione di questo criterio, si veda Sassoli de Bianchi (2011) e i riferimenti ivi citati.

una qualsiasi destinazione, per poi tornare indietro lungo lo stesso percorso, a causa dell'effetto relativistico di dilatazione del tempo sareste potuti tornare al VUB esattamente quando il vostro smartphone avrebbe indicato il 29 settembre 2017, ore 3 pm, mentre gli smartphone di tutte le altre persone presenti al VUB avrebbero indicato il 30 settembre 2017, ore 3 pm. Quindi, se prendete sul serio il criterio di realtà di EPR, dovete concludere che la VUB, un giorno nel suo futuro, è sempre un elemento della vostra realtà personale presente.

Ora, poiché questa nostra discussione si rivolge a un pubblico interdisciplinare, riteniamo possa essere utile spiegare brevemente come si calcola la dilatazione temporale nella teoria della relatività. Ci sono due versioni dello stesso individuo, una che rimane a riposo presso la VUB,¹⁹ che chiameremo entità A , e l'altra che compie il viaggio di andata e ritorno, che chiameremo entità B (vedi la Figura 10). Se si indica con T_B il periodo temporale dell'orologio che viaggia con B , misurato da A , utilizzando un orologio identico rimasto alla VUB, il cui periodo temporale è τ_A ,²⁰ si osserverà un effetto di dilatazione del tempo, nel senso che T_B sarà maggiore di τ_A . Più precisamente, se v è la velocità di B (quando si allontana o si avvicina ad A), allora abbiamo:

$$T_B = \gamma \tau_A$$

dove

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

è il cosiddetto *fattore gamma di Lorentz*, che è esattamente uguale a 2 per il valore sopra indicato della velocità v . Quindi, abbiamo $T_B = 2\tau_A$, ossia che l'orologio che viaggia con B appare ad A avanzare

¹⁹ Essendo la VUB sulla superficie del pianeta Terra, a rigore di logica non può essere associata a un sistema di riferimento inerziale, ma per semplicità trascureremo il moto non uniforme del pianeta nel nostro ragionamento.

²⁰ Si noti che per i due periodi di tempo τ_A and T_B , utilizziamo una notazione diversa. Questo perché il primo è un cosiddetto *tempo proprio*, cioè un tempo misurato da un orologio che rimane in quiete rispetto ad A , mentre il secondo è un *tempo coordinata*, cioè un tempo misurato da un orologio che non è in quiete rispetto a B .

due volte più lentamente dell'orologio rimasto alla VUB.

Supponiamo ora che A misuri n_A cicli del suo orologio durante l'intera durata del viaggio di B .²¹ Poiché $T_B = \gamma\tau_A$, il numero di cicli n_B dell'orologio di B si otterrà risolvendo l'equazione: $n_A\tau_A = n_B T_B = n_B\gamma\tau_A$, che dà $n_B = n_A/\gamma$, e per il nostro valore della velocità v avremo: $n_B = n_A/2$.

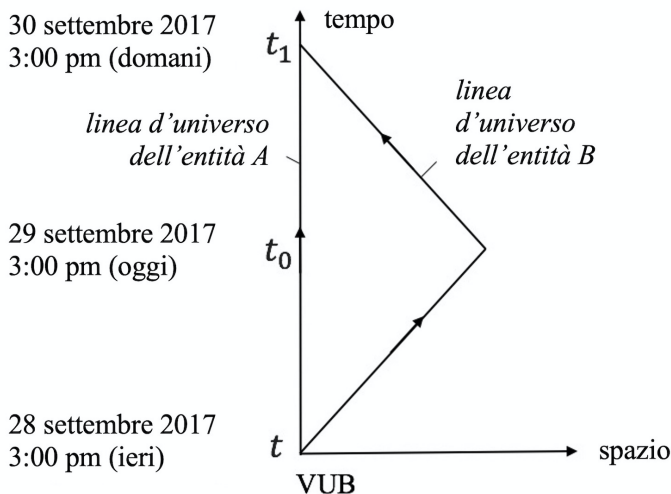


Figura 10 Le due linee di universo delle entità A e B , nella costruzione spazio-temporale associata alla prima. L'entità A è spazialmente ferma, quindi si muove solo lungo il suo asse temporale, mentre l'entità B compie un viaggio di andata e ritorno che le permette di incontrarsi nuovamente con l'entità A , nel suo futuro – un giorno dopo.

In altre parole, l'entità che viaggia, B , utilizza la metà dei cicli temporali dell'entità che non viaggia, A . Ora, per determinare il tempo $t < t_0$ (dove t_0 corrisponde al 29 settembre 2017, 3 pm) in cui B avrebbe dovuto iniziare il suo viaggio nello spazio alla velocità $v = \sqrt{3/4} c$, per essere di nuovo nello stesso luogo, alla VUB, al tempo t_1 (corrispondente al 30 settembre 2017, 3 pm), con il suo orologio che indica il 29 settembre 2017, 3 pm, possiamo ragionare come segue. Per definizione, $n_A = (t_1 - t)/\tau_A$, e denotiamo anche n'_A il

²¹ Per semplicità di trattazione, trascureremo che ci sono anche delle accelerazioni subite da B , alla partenza, all'inversione di marcia e all'arrivo.

numero di cicli corrispondenti a un periodo di un giorno (24 ore): $n'_A = (t_1 - t_0)/\tau_A$. Vogliamo che $n_B = n_A - n'_A$, cioè che l'orologio di B utilizzi 24 ore in meno rispetto all'orologio di A . Poiché $n_B = n_A/\gamma$, otteniamo $n_A = \frac{\gamma}{\gamma-1} n'_A$, cosicché per $\gamma = 2$ abbiamo $n_A = 2n'_A$. In altre parole, B deve iniziare il suo viaggio due giorni prima del 30 settembre 2017, 3 pm, cioè il 28 settembre 2017, 3 pm (vedi la Figura 10).

Tornando alla nostra discussione, essendo la nostra realtà personale presente definita in modo controfattuale, tramite il criterio EPR, dobbiamo concludere, come conseguenza degli *effetti di parallasse generalizzati* relativistici, che il nostro presente personale contiene anche una parte del nostro futuro personale. Tuttavia, questo non nel senso che tutto il nostro futuro sarebbe già dato, cioè come se l'universo fosse una sorta blocco immutabile. Infatti, se è vero che in un dato sistema di riferimento possiamo sempre attribuire delle coordinate temporali e spaziali ai diversi eventi, ciò non significa che i processi di cambiamento che li hanno creati stiano avvenendo anch'essi nello spazio e nel tempo. Infatti, questi processi originano tipicamente a partire da un dominio non-spaziotemporale, che resta nascosto alla nostra limitata prospettiva spaziotemporale.

Pertanto, se la relatività galileiana ci ha già insegnato che le entità fisiche non abitano uno spazio oggettivo sostanziale, ma che ogni entità costruisce un suo spazio relazionale tridimensionale personale, la relatività einsteiniana ha spinto questa visione un passo oltre, insegnandoci che le entità non solo non abitano uno spazio sostanziale, ma anche che non costruiscono il loro asse temporale allo stesso modo, cioè che ogni entità costruisce uno suo spaziotempo personale a quattro dimensioni.

Vediamo quindi che, analogamente alla meccanica quantistica, anche la relatività ci indica l'esistenza di un sottostante dominio non-spaziale e non-temporale. E come andremo ora a spiegare, l'ipotesi che le entità fisiche abbiano principalmente una natura concettuale non solo è in grado di offrire una spiegazione alla stranezza degli effetti quantistici, ma anche a quelli relativistici, che erroneamente vengono considerati meno strani dei primi (se si cerca di comprenderli mantenendo una prospettiva puramente spaziotemporale).

11 Dilatazione temporale

Riprendiamo l'esempio precedente, ipotizzando questa volta che A e B non siano due versioni diverse della stessa persona, che ha fatto una scelta diversa nel passato, ma due entità fisiche differenti, per cui ci troviamo nella situazione specifica del paradosso dei gemelli di Langevin. Si noti che il motivo per cui si è parlato di paradosso è il fatto che si potrebbe sostenere che, considerando il punto di vista del sistema di riferimento associato alla nave spaziale, è l'entità rimasta sulla Terra che sembra aver compiuto il viaggio di andata e ritorno. Questa apparente simmetria tra le due descrizioni viene però meno non appena si osserva che i due sistemi di riferimento non sono equivalenti, in quanto è evidente che il sistema associato all'entità B , che utilizza la nave spaziale, è un sistema non inerziale.

In altre parole, la simmetria viene rotta osservando che B sperimenta accelerazioni che non sono sperimentate da A (trascurando quelle associate alla rotazione del pianeta). Non si deve però concludere che l'effetto osservato di dilatazione temporale (o di contrazione delle lunghezze, dal punto di vista dell'entità che viaggia) sarebbe causato da queste accelerazioni: è infatti la struttura geometrica delle linee di universo associate alle due entità a essere responsabile della dilatazione temporale, che è di fatto definita dalla lunghezza Lorentz-invariante corrispondente al cosiddetto intervallo di *tempo proprio* ad esse associato (Aerts 2017).

Le due entità A e B sono qui considerate corpi macroscopici classici, cioè oggetti ordinari. Tuttavia, come abbiamo discusso nella Sezione 6, nell'interpretazione concettualistica gli oggetti sono idealizzazioni di entità concettuali simili a storie, che possono trovarsi in diversi stati di significato. Pertanto, vogliamo ora considerare le due entità A e B non come oggetti che si muovono nello spazio ma, principalmente (e più fondamentalmente), come entità concettuali che possono avere delle interazioni governate dal significato.

In relatività, si è soliti associare gli *osservatori* a entità in diversi stati di moto, dove la nozione di osservatore è tipicamente intesa come la combinazione di un sistema di riferimento e un'entità che, se fosse

presente in un luogo specifico, sarebbe in grado di percepire (rilevare, misurare) dei fenomeni relativamente al punto di vista espresso da quel sistema di riferimento, e da quel luogo specifico.²²

Assoceremo a nostra volta degli osservatori alle due entità A e B , ma li considereremo come delle entità di tipo mentale, sensibili al significato veicolato da A e B . Chiamiamoli semplicemente *osservatori cognitivi* e denotiamoli C_A e C_B . Questi due osservatori non sono però associati a dei sistemi di riferimento spaziotemporali. L'unico aspetto che distingue C_A da C_B è che il primo è focalizzato sull'evoluzione di A , mentre il secondo è focalizzato sull'evoluzione di B .

Per fissare le idee, possiamo semplicemente considerare che il processo di cambiamento di stato dell'entità A corrisponda all'attività cognitiva dell'entità C_A , che riflette su un dato problema, in modo che lo stato iniziale di A corrisponda all'*Ipotesi* che dà inizio a tale riflessione, e lo stato finale di A alla *Conclusione* raggiunta da C_A , dopo aver seguito un certo numero di *passi concettuali* intermedi. E lo stesso vale per l'osservatore cognitivo C_B , che segue l'evoluzione dell'entità concettuale B .²³

Ipotizzeremo che C_A e C_B siano solo dei testimoni del dispiegarsi dei significati veicolati da A e B , nella misura in cui si evolvono, cioè che non siano loro stessi a produrre i cambiamenti osservati dei loro stati. Inoltre, per porci nella situazione del “paradosso dei gemelli”, considereremo che C_A e C_B stiano entrambi riflettendo sullo stesso problema, partendo dalla medesima *Ipotesi* e giungendo poi, congiuntamente, alla medesima *Conclusione*. In altre parole, nel dominio concettuale astratto in cui entrambi si muovono, hanno un primo incontro nel “luogo” della loro *Ipotesi* congiuntamente condivisa, poi un secondo incontro quando raggiungono la stessa *Conclusione*.

La differenza tra C_A e C_B risiede nel fatto che il percorso cognitivo che seguono, per arrivare alla stessa *Conclusione*, partendo dalla stessa *Ipotesi*, non è il medesimo, nel senso che C_A , focalizzato sull'evoluzione di A , utilizza n_A passi concettuali per farlo, mentre C_B , focalizzato sull'evoluzione di B , utilizza un numero minore di passi

²² Per citare un passaggio di Einstein (1920) (l'enfasi è nostra): “Se l'osservatore *percepisce* i due lampi nello stesso momento, allora essi sono simultanei”.

²³ Ciò significa che stiamo considerando A e B come entità concettuali che corrispondono, rispettivamente, al *Ragionamento di C_A* e al *Ragionamento di C_B* .

concettuali $n_B < n_A$. Denotiamo $A_i, i = 0, 1, \dots, n_A$, i diversi stati attraverso i quali A passa per andare dall'*Ipotesi* $= A_0$ alla *Conclusione* $= A_{n_A}$, e denotiamo $B_i, i = 0, 1, \dots, n_B$, gli stati attraverso i quali B passa per andare anch'esso dall'*Ipotesi* $= B_0$ alla *Conclusione* $= B_{n_B}$.

Immaginiamo quindi che l'osservatore cognitivo C_A , per tenere traccia in modo ordinato del percorso concettuale seguito dall'entità A , decida di introdurre un asse per parametrizzare ciascuno dei passi concettuali di A . A tal fine, attribuirà a tale asse una lunghezza unitaria L_A , corrispondente a un singolo passo concettuale, e assumerà poi che la velocità con cui ogni passo viene compiuto sia la stessa per tutti i passi e sia pari a una data costante c , in modo che la durata di un singolo passo sia: $\tau_A = L_A/c$.

Passando dall'*Ipotesi* alla *Conclusione*, il ragionamento di C_A risponderà quindi a un movimento dell'entità A , lungo tale *asse parametrico ordinale*, che va da un punto iniziale D_0 a un punto finale $D_{n_A} = D_0 + n_A L_A = c(t_0 + n_A \tau_A)$, dove possiamo definire i tempi $t_i = (D_0 + i L_A)/c, i = 0, \dots, n_A$, associati a ciascun passo, dove $t_0 = D_0/c$ è il tempo iniziale e $t_{n_A} = D_{n_A}/c$ è il tempo finale.

Consideriamo ora l'evoluzione dell'entità B , che abbiamo ipotizzato possa raggiungere la stessa *Conclusione* seguendo un percorso concettuale più breve, fatto di soli $n_B < n_A$ passi, e per semplicità considereremo qui che $n_B = n_A/2$. L'osservatore cognitivo C_A può anch'egli decidere di concentrarsi sull'evoluzione di B , cioè voler tenere traccia anche del percorso cognitivo seguito dall'entità B , oltre che quello seguito da A . Ora, se A e B sono entità della stessa natura, si può supporre che quando producono un passo cognitivo lo facciano alla stessa velocità c . Ma poiché il percorso seguito da B nel dominio concettuale astratto è tale da poter raggiungere la stessa *Conclusione* nella metà dei passi utilizzati da A , l'osservatore cognitivo C_A non potrà rappresentare tale percorso sullo stesso asse utilizzato per parametrizzare il percorso di A , in quanto le unità di quest'ultimo sono state scelte proprio in modo da richiedere il doppio dei passi per raggiungere la *Conclusione*.

Per parametrizzare coerentemente anche l'evoluzione di B , C_A è quindi costretto a introdurre un asse aggiuntivo e utilizzare la dimensione supplementare generata da tale asse per descrivere B

come se si muovesse su una traiettoria di andata e ritorno, ora contenuta in uno spazio dimensionalmente superiore, generato sia dal primo asse parametrico – chiamiamolo *asse temporale* di A – sia da questo secondo asse parametrico – chiamiamolo *asse spaziale* di A .

Quindi, l'evoluzione dell'entità B è descritta come un movimento su un percorso che si allontana dall'asse temporale e poi vi ritorna, così da raggiungere il punto di incontro della *Conclusion*, e questo facendo esattamente $n_A/2$ passi cognitivi (si veda la Figura 11). Tuttavia, se consideriamo la costruzione di questo spazio parametrico da una prospettiva puramente *euclidea*, vediamo subito che le cose non funzionano. Infatti, se calcoliamo la lunghezza del percorso di B utilizzando il *teorema di Pitagora*, troveremo un percorso necessariamente più lungo di quello di A .

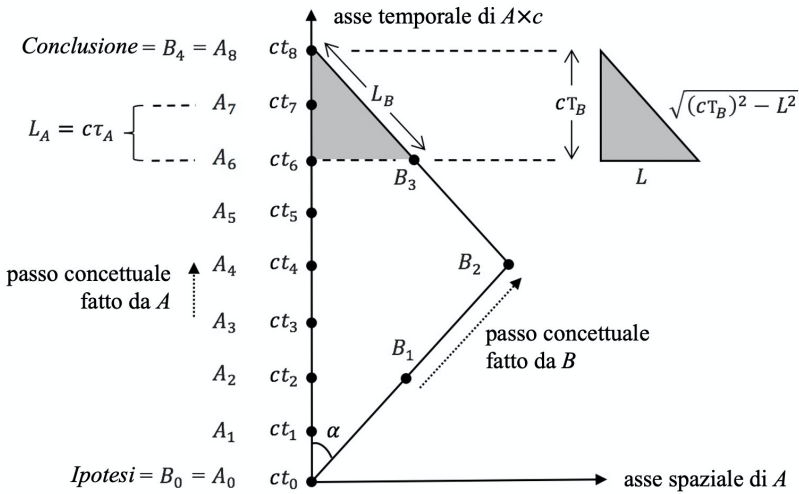


Figura 11 La coordinazione dei percorsi concettuali seguiti dalle due entità A e B , nello spaziotempo costruito dall'osservatore cognitivo C_A (qui nella situazione $n_A = 8$ e $n_B = 4$). Se misurata lungo l'asse del tempo di A (moltiplicato per la velocità costante c), la lunghezza $L_B = cT_B$ dei passi concettuali di B sembra essere maggiore della lunghezza $L_A = c\tau_A$ di quelli di A . Tuttavia, se misurata lungo la direzione del proprio movimento nello spaziotempo di A , utilizzando la metrica di Minkowski anziché quella euclidea, si scopre che i passi concettuali delle due entità sono esattamente della stessa lunghezza, in accordo con il fatto che entrambe si muovono alla stessa velocità costante (assoluta) c nel sottostante dominio concettuale.

Questo non sarebbe però corretto, essendo chiaro che B segue un percorso concettuale più breve, utilizzando solo la metà dei passaggi concettuali utilizzati da A . Pertanto, quando si misura la lunghezza del percorso concettuale di B , questa dovrebbe essere meno lunga, e non più lunga di quella di A .

Affinché C_A possa risolvere questo problema, l'unica strada è di considerare uno spazio *pseudo-euclideo*, anziché euclideo, e più precisamente quello specifico spazio pseudo-euclideo noto come spazio (o spaziotempo) di *Minkowski*, dove le distanze non vengono calcolate utilizzando il teorema di Pitagora, ma uno *pseudo-teorema pitagorico* che attribuisce un segno negativo ai quadrati delle componenti associate all'asse spaziale e un segno positivo al quadrato della componente associata all'asse temporale.

In questo modo, la lunghezza dell'ipotenusa di un triangolo rettangolo i cui cateti sono associati rispettivamente agli assi temporale e spaziale, sarà generalmente inferiore alla lunghezza del cateto temporale. È quindi possibile che la lunghezza L_B di un singolo passo concettuale di B (cfr. Figura 11) sia esattamente uguale alla lunghezza L_A di un singolo passo concettuale di A , vale a dire avere l'uguaglianza $L_A = L_B$, che è ciò che C_A vuole avere, poiché si suppone che le due entità A e B cambino stato alla stessa velocità assoluta c (la velocità della luce nel vuoto) nel loro dominio concettuale condiviso, cosicché la durata/lunghezza dei loro passi concettuali deve essere un *invariante*, cioè la stessa per tutte le entità.

Più precisamente, se L è la componente della lunghezza L_B lungo l'asse spaziale di A , allora secondo la metrica pseudo-euclidea (di Minkowski) si ha:

$$L_B^2 = (cT_B)^2 - L^2$$

per cui il requisito che $L_A = L_B$, o equivalentemente che $L_A^2 = (c\tau_A)^2 = L_B^2$, considerando che $\tau_A = T_B/\gamma$ e $c\tau_A = \frac{cT_B}{\gamma} = \sqrt{c^2 - v^2}T_B$, dà: $(c^2 - v^2)T_B^2 = (cT_B)^2 - L^2$, cioè $L = vT_B$.

In altre parole, adottando una metrica minkowskiana, l'osservatore cognitivo C_A è in grado di costruire un teatro spaziale in cui può tenere traccia, in modo coerente, non solo del processo

cognitivo associato ad A , ma anche di quello associato a B ,²⁴ e per farlo non deve fare altro che attribuire un'appropriate velocità spaziale v per caratterizzare i suoi cambiamenti di stato.

In altre parole, la ragione degli effetti di parallasse generalizzati di dilatazione temporale diventa chiara quando si prende in considerazione l'esistenza di un dominio concettuale sottostante: poiché C_A deve parametrizzare anche il percorso cognitivo di B , e non può farlo utilizzando lo stesso asse temporale, deve considerare un movimento all'interno di uno spazio dimensionalmente superiore, caratterizzato da un angolo $\alpha = \tan^{-1} \frac{v}{c}$ rispetto alla direzione del movimento di A . Questo introdurrà inevitabilmente degli *effetti di prospettiva temporale*: C_A osserverà B come se stesse producendo dei passi (o cicli) concettuali di maggiore durata $T_B = \gamma \tau_A$.

Ciò significa che un osservatore cognitivo C_A , che concentra la sua attenzione su A , quando confronta la sua attività con quella di un osservatore cognitivo C_B , che concentra la sua attenzione su B , avrà l'impressione che C_B ragioni più lentamente di lui, ma poiché ragiona anche in modo più efficace, in quanto utilizza un numero minore di passi concettuali, sono comunque in grado di incontrarsi nello stato condiviso della *Conclusion*.

Questo è solo ciò che appare al livello della costruzione parametrica dello spaziotempo operata da C_A . Al livello più oggettivo del dominio concettuale non-spaziotemporale, A e B si muovono esattamente alla stessa velocità c , che è la velocità intrinseca con cui entrambi compiono i loro passi concettuali.

La nostra descrizione degli effetti di dilatazione temporale richiederebbe ovviamente ulteriori spiegazioni e rimandiamo il lettore ad Aerts (2017), dove si possono trovare maggiori dettagli. Il nostro punto principale è stato quello di evidenziare che la teoria della relatività, analogamente alla meccanica quantistica, suggerisca l'esistenza di un dominio concettuale non-spaziotemporale. Come abbiamo già accennato, la nostra analisi indica però che la sua non-temporalità non va intesa nel senso di un'assenza di processi di cambiamento. Al contrario, ogni entità (fisica) concettuale cambierebbe

²⁴ Un singolo asse spaziale è sufficiente quando si considerano solo due entità. Tuttavia, sono necessari ulteriori assi spaziali se si considerano entità aggiuntive; si veda Aerts (2017).

incessantemente di stato, cioè produrrebbe nuovi passi concettuali, “surfando” sul dominio concettuale alla velocità della luce c . Pertanto, a un livello più fondamentale, il movimento sarebbe incessante e in un certo senso assoluto.

Questo è possibile perché non si tratta di un movimento nello spazio e nel tempo, in quanto lo spazio e il tempo emergono solo quando un osservatore cognitivo decide di coordinare l'evoluzione di una data entità concettuale con l'evoluzione di altre entità concettuali, introducendo a tal fine uno specifico sistema di coordinate cartesiane. In tale sistema, l'asse del tempo ordina i cambiamenti concettuali dell'entità su cui l'osservatore cognitivo decide di concentrarsi primariamente, mentre gli assi spaziali ordinano l'evoluzione delle altre entità concettuali, rispetto a tale asse temporale, rappresentandole come movimenti nello spazio.

Tale costruzione spazio-temporale, per essere coerente, richiede che la metrica sia minkowskiana, il che ovviamente rimane controintuitivo per noi umani, che ci siamo evoluti su questo pianeta interagendo per lo più con entità che si muovono nello spazio in modo estremamente lento l'una rispetto all'altra, cioè che sono spazialmente quasi ferme l'una rispetto all'altra, cosicché gli effetti di parallasse relativistici, essendo trascurabili, non sono stati integrati nella nostra rappresentazione mentale del mondo.

Naturalmente, questa rappresentazione spaziotemporale funziona solo per le entità concettuali che hanno raggiunto lo status di oggetti, i cosiddetti corpi macroscopici classici. Quando si considerano entità microfisiche, la dualità tempo-spazio va sostituita da una dualità più generale, tra il tempo e l'insieme degli stati-esito associati alle diverse misure possibili. Questa è ad esempio la situazione in cui l'osservatore cognitivo C_A non si limiterebbe ad assistere al surf dell'entità A sul dominio concettuale più fondamentale, ma di fatto influenzerebbe anche la sua navigazione attraverso la sua osservazione, introducendo così nella sua evoluzione l'ingrediente aggiuntivo dell'indeterminismo.

Si noti che la possibilità che C_A agisca anche come un contesto di misura quantistica per l'entità A non è incompatibile con la circostanza speciale di un'evoluzione deterministica. In effetti, ogni cambiamento di stato deterministico può essere concepito, in linea di principio, come l'effetto di una misura con un solo esito

possibile.²⁵ Ciò significa che le evoluzioni deterministiche possono essere descritte, in linea di principio, come applicazioni ricorsive di più processi di misurazione con un solo esito possibile. Alcuni di questi processi saranno governati da contesti classici, e l'evoluzione deterministica corrispondente potrà essere descritta come “evoluzione nello spazio”, mentre altri saranno governati da contesti genuinamente quantistici, e l'evoluzione deterministica corrispondente non potrà essere descritta come se avvenisse nello spazio, ma in un dominio (concettuale) più astratto, non-spaziale (e non-temporale).

Abbiamo già accennato nelle Sezioni 7 e 9 alla rappresentazione di Bloch estesa (EBR) della meccanica quantistica (Aerts e Sassoli de Bianchi 2014a, 2016b, 2017a), che può essere utilizzata per costruire un teatro quantistico in cui tutti i processi di misura associati a un'entità quantistica, e i suoi stati, possono essere congiuntamente rappresentati. Per dei contesti di misura che ammettono fino a N possibili esiti finali, il numero di dimensioni richieste per il teatro quantistico di Bloch è pari a $N^2 - 1$, che è il numero di generatori del gruppo di trasformazioni $SU(N)$.

In parole povere, queste trasformazioni possono essere interpretate come “rotazioni generalizzate”, e questo significa che per entrare in questo teatro di Bloch bisogna, in un certo senso, “ruotare via” la complessità intrinseca di un'entità quantistica, per mezzo di questi generatori. Un'analogia concettuale umana sarebbe quella di osservare che per entrare in un determinato spazio comunicativo, come quello di un programma politico, alcuni concetti devono prima ricevere un particolare “twist”. Il nostro teatro spaziotemporale, considerato come uno specifico spazio comunicativo, richiederebbe allo stesso modo l'applicazione di specifici “twist”, o “spin”, affinché le diverse entità concettuali quantistiche vi possano entrare ed essere in esso rappresentate.

Concludiamo la nostra discussione sugli effetti relativistici con una breve osservazione sulla gravitazione. Come è noto, resta ancora da scoprire una teoria soddisfacente della gravità quantistica; questo perché le forze fondamentali del *Modello Standard* della fisica delle particelle sono descritte come campi (quantizzati) su uno

²⁵ Pertanto, i processi di misura a due esiti non costituirebbero il contesto di misura più semplice che si possa immaginare.

sfondo spaziotemporale fisso, mentre le forze gravitazionali influenzano precisamente tale sfondo, rendendolo dinamico. Differentemente dal Modello Standard e da approcci simili, che attribuiscono un ruolo fondamentale alla tela spaziotemporale, l'interpretazione concettualistica afferma che la realtà non è contenuta nello spaziotempo, essendo quest'ultimo solo una costruzione relazionale che emerge ogni volta che si considera un'interfaccia molto specifica: quella tra i pezzi di materia macroscopici e i campi di forza che agiscono su di essi, cioè tra le costruzioni fermioniche e il loro modo bosonico di scambiarsi significato.

È in quest'interfaccia che si è formata l'illusione di un teatro spaziotemporale in cui la nostra realtà fisica sarebbe pienamente contenuta; un'illusione che si è poi consolidata attraverso lo stesso metodo sperimentale scientifico, costringendoci in qualche modo ad avvicinarci alla nostra realtà fisica solo attraverso una tale interfaccia, essendo chiaro che i fisici, nei loro laboratori, raccolgono dati da esperimenti che coinvolgono sempre degli strumenti formati da aggregati macroscopici di materia. Se lo spazio e il tempo (meglio sarebbe dire gli spazi e i tempi) sono dei sottoprodotti di questa interfaccia molto specifica, possiamo comprendere più facilmente il motivo delle difficoltà incontrate nei tentativi di costruire una teoria della gravità quantistica che sia del tutto coerente.

L'interpretazione concettualistica, considerando l'esistenza di un dominio più fondamentale e astratto, dove si evolvono le entità fisiche concettuali, le forze fondamentali, inclusa la gravità, possono essere intese come espressioni dei diversi modi in cui le entità concettuali possono scambiare tra loro significato e, a causa di ciò, congiungersi o separarsi.

12 Conclusione

È ora di avviarcì verso la conclusione del nostro *tour d'horizon* dell'interpretazione concettualistica e del suo potere esplicativo. In quest'ultima sezione, ci limiteremo a evocare alcune possibili direzioni per le indagini future, e a questo proposito rimandiamo i lettori interessati ad Aerts (2009, 2010a, b, 2013, 2014).

Per quanto riguarda il tentativo, finora fallito, di unificare gli elementi di realtà gravitazionali e quantistici entro un'unica costruzione teoretica coerente, di cui abbiamo parlato nella sezione precedente, possiamo osservare che l'interpretazione concettualistica porta con sé un'altra interessante linea di riflessione. È anche possibile che un'unica descrizione 'quantistica più gravitazionale' non sia realizzabile, nel senso che quella 'quantistica' e 'gravitazionale' potrebbero essere descrizioni incompatibili, nello stesso modo in cui le misure di posizione e quantità di moto sono contesti sperimentali tra loro incompatibili. In effetti, una realtà concettuale è anche una realtà contestuale, cioè una realtà in cui certi significati sarebbero attualizzati e attualizzabili solo in determinati contesti, e non in altri.

A questo proposito, la fisica classica può essere intesa anche come una descrizione che emerge da un contesto molto specifico, prodotto da noi esseri umani che per lo più ci manifestiamo e interagiamo con entità fisiche attraverso i nostri corpi densi e macroscopici. La meccanica quantistica standard, e più precisamente la sua formalizzazione attraverso il formalismo hilbertiano, può essere considerata come un altro contesto associato a delle domande differenti, poste in modo operativo, le cui risposte non possono essere tutte organizzate nello 'spazio relazionale' risultante dalla precedente costruzione classica, che forma una sorta di ambiente rappresentazionale chiuso [un po' nello spirito della nozione di *teorie chiuse* di Heisenberg (Bokulich 2008)].

Ma la rappresentazione quantistica, anch'essa con le sue limitazioni strutturali, potrebbe a sua volta costituire un ambiente chiuso, considerando ad esempio la sua incapacità di descrivere entità che possono rimanere separate in termini sperimentali (Aerts 1984, 2014; Aerts e Sassoli de Bianchi 2017b,c). In altre parole, è anche possibile che non si possa ottenere un'unica rappresentazione inclusiva, proprio perché ciò corrisponderebbe al desiderio irrealistico di attualizzare simultaneamente proprietà/significati che in ultima analisi sono associati a contesti incompatibili.²⁶

Inoltre, l'interpretazione concettualistica, con la sua ipotesi che le entità fisiche siano fondamentalmente concettuali, promuove

²⁶ Si tratta di una visione che sottende una nozione di realismo introdotta di recente e denominata *realismo multiplex* (Aerts e Sassoli de Bianchi 2017b,c).

anche una visione *pancognitivista* (come accennato nell'Introduzione), dove ogni elemento di realtà parteciperebbe di fatto alla cognizione, di cui la cognizione umana sarebbe solo un caso speciale, che appare a un livello organizzativo molto particolare. Ciò ha chiaramente delle profonde conseguenze sulla nostra visione dell'*evoluzione* in generale, in quanto l'avvento delle specie biologiche sul nostro pianeta, compresa quella umana, sarebbe solo parte di un processo di cambiamento molto più ampio e fondamentale, derivante dall'interazione delle entità concettuali con le innumerevoli strutture cognitive sensibili al loro significato, e questo fin dagli albori della formazione del nostro universo e a diversi livelli dello stesso.

Se questo è corretto, l'immagine di base che dovremmo adottare, nella descrizione della nostra realtà fisica in evoluzione, è quella di una vastissima *evoluzione culturale*, che si esplicherebbe su più livelli, o strati (Aerts e Sassoli de Bianchi 2018). Pertanto, nello stesso modo in cui noi esseri umani usiamo i concetti e le loro combinazioni per comunicare ed evolvere le nostre culture, lo stesso sarebbe avvenuto, e starebbe ancora avvenendo, nel dominio delle micro-entità, e questo ci fornisce automaticamente una spiegazione piuttosto convincente circa la natura della cosiddetta *materia oscura*, che possiamo intendere come quella parte di materia che, come interfaccia, non si è co-evoluta assieme alle entità bosoniche "messaggere".

Pensiamo all'abbondanza nel nostro ambiente umano di quelle strutture che non veicolano alcun significato umano, cioè i pezzi di materia ordinaria rispetto agli artefatti culturali, i primi essendo molto più abbondanti dei secondi. Lo stesso potrebbe valere per la materia oscura, in contrapposizione alla materia ordinaria, che non solo non interagisce con i micro-portatori di significato bosonici, ma sembra essere anche molto più abbondante. D'altra parte, la gravità, operando su una scala molto diversa da quella di tutte le altre forze, descrive probabilmente un modo più antico di scambiare significato e creare concentrazioni di esso; un modo che è rimasto in comune sia con la materia ordinaria che con quella oscura.

Questo ruolo speciale svolto dalla gravitazione può essere visto anche nella diversità dei valori di massa delle diverse entità micro-fisiche, che non sono solo multipli di una qualche unità fondamentale, come avviene ad esempio per la carica elettrica. Questo sembra suggerire che la massa non sia tanto legata alla nozione di *identità* di

una data entità concettuale, quanto piuttosto ai diversi modi possibili in cui una data identità è in grado di manifestarsi.

Si pensi alla sorprendente esistenza di tre diverse *generazioni di micro-entità elementari*. Le entità appartenenti a queste diverse generazioni interagiscono esattamente allo stesso modo, ma differiscono per la loro massa. Per fare un esempio, esistono tre diverse entità elettroniche: l'elettrone ordinario di prima generazione, con una massa di $0.511 \text{ MeV}/c^2$, l'elettrone *muonico* di seconda generazione, con una massa maggiore di $106 \text{ MeV}/c^2$, e infine l'elettrone *taunico* di terza generazione, con una massa ancora maggiore di $1777 \text{ MeV}/c^2$ (quasi il doppio della massa di un protone).

L'interpretazione concettualistica offre la seguente possibile spiegazione per queste diverse generazioni di micro-entità: esse corrisponderebbero semplicemente a delle diverse realizzazioni energetiche di una stessa entità concettuale, nello stesso modo in cui nella nostra cultura umana un concetto può manifestarsi, ad esempio, in una forma parlata, cioè energetico-sonora, in una forma elettromagnetica e/o elettronica, in una forma scolpita nella pietra, ecc., e tutte queste diverse forme, pur avendo delle masse-energie differenti, veicolano comunque sempre lo stesso significato, cioè interagiscono esattamente (o quasi esattamente) nello stesso modo in un ambiente governato dal significato.

Accenniamo per un momento anche alla questione dell'osservazione dell'espansione intrinseca dell'universo, secondo le attuali teorie del Big Bang. La domanda ricorrente è: "In che cosa si espande l'universo?". E la risposta ricorrente è: "È una domanda senza senso, perché l'universo contiene tutto e non c'è nulla in cui possa espandersi, quindi, si sta semplicemente espandendo!" Naturalmente, questo tipo di risposta viene percepita, giustamente, come altamente insoddisfacente dai non addetti ai lavori, ma riteniamo che dovrebbe esserlo anche per i fisici professionisti. Come abbiamo discusso a lungo in questo articolo (Aerts 1999):

"La realtà non è contenuta nello spazio. Lo spazio è una cristallizzazione momentanea di un teatro per la realtà dove i movimenti e le interazioni delle entità macroscopiche materiali ed energetiche hanno luogo. Ma altre entità – come ad esempio le entità quantistiche – 'hanno luogo' fuori dallo spazio, o – e questo sarebbe un altro modo per dire la stessa cosa – entro uno spazio che non è lo spazio euclideo tridimensionale".

L'interpretazione concettualistica permette di spingere ancora oltre questa affermazione, osservando che la non-spazialità del reale deriva dal suo essere fondamentalmente di natura concettuale, il che implica l'esistenza di una struttura a più livelli risultante dall'interazione tra stati con diversi gradi di astrazione e concretezza.

In altre parole, l'espansione del nostro universo sarebbe semplicemente il risultato di un'evoluzione cosmico-culturale che crea costantemente nuove storie (attraverso un meccanismo di combinazione concettuale), che emergono da un substrato di entità più astratte (cioè entità concettuali in stati più astratti) in grado di combinarsi per formare stati più complessi. Per fare un parallelo con il Web, si pensi alla costante creazione di nuove pagine web, frutto dell'attività di tutte le entità cognitive che partecipano alle relative interazioni umane governate dal significato. A questo proposito, è interessante osservare che l'espansione del Web, da quando è stato pubblicato il primo sito web nel 1991, è avvenuta in modo accelerato, per cui si può pensare che anche il tasso di espansione accelerato osservato del nostro universo sia il risultato, *mutatis mutandis*, di un meccanismo di crescita culturale accelerata.

Ricordiamo inoltre che una realtà concettuale suggerisce anche la possibilità dei multiversi (sebbene non nel senso dell'interpretazione a molti mondi), essendo chiaro che le storie che contengono significati comuni possono formare degli aggregati, e che alcuni di essi potrebbero essersi formati molto tempo fa, intorno a un "concetto seme" iniziale. Per offrire un'altra analogia, si pensi ai cosiddetti "universi cinematografici condivisi" (shared cinematic universes) della nostra cultura cinematografica degli ultimi anni: ogni universo cinematografico condiviso contiene un numero crescente di film (storie) che sono tutti collegati tra loro, incentrati su diversi personaggi o gruppi di personaggi, ma tutti parte di una stessa continuità narrativa coerente e non contraddittoria.

D'altra parte, le storie dei personaggi di un determinato universo cinematografico non appariranno mai in un altro universo cinematografico, e se nondimeno si verificassero dei cosiddetti "crossover" (si pensi a un possibile incontro tra Superman della DC Comics e l'Uomo Ragno dei Marvel Studios), le corrispondenti storie verrebbero considerate come non-canoniche, cioè corrispondenti a degli stati più astratti dei personaggi in questione, ad esempio descritti come realtà alternative, scenari "e se", come sogni, scherzi, ecc.

Quando si parla del nostro universo spaziotemporale e della sua vastità, la questione della possibile presenza di vita intelligente extraterrestre si pone in modo naturale, anche perché la maggioranza degli scienziati è fermamente convinta che degli extraterrestri intelligenti popolino lo spazio, il che ha tra l'altro permesso nel tempo di finanziare numerosi programmi scientifici per la ricerca di vita intelligente. Come diceva Carl Sagan, in un famoso romanzo di fantascienza (Sagan 1985):²⁷ “L’universo è un posto piuttosto grande. Se siamo solo noi, sembra un enorme spreco di spazio”.

Lo spazio, tuttavia, sarebbe solo la punta dell’iceberg di una realtà la cui manifestazione spaziotemporale corrisponderebbe unicamente a un suo sottile strato. Possiamo naturalmente esplorare “in larghezza” tale strato, che corrisponde certamente a un territorio molto vasto, se considerato dalla nostra limitata prospettiva umana, ma seguendo la visione che abbiamo esposto nel presente articolo, esiste un altro territorio, incredibilmente più vasto, che ha a che fare con l’esplorazione della realtà “in profondità”, cioè nella direzione dei suoi stati più astratti.

Questo è ciò che i fisici hanno iniziato a fare quando hanno progettato esperimenti sempre più raffinati sui diversi effetti quantistici e relativistici. Questi esperimenti, e i relativi sforzi per descriverne i risultati attraverso un linguaggio formale adeguato,²⁸ possono essere visti come i nostri primi passi primordiali nell’apprendimento di un proto-linguaggio non-umano più universale, e sarà forse proprio esplorando la realtà in questa direzione “in profondità” che si verificheranno i primi contatti con intelligenze extra-terrestri (extra-dimensionali), sempreché tali contatti non si siano già verificati (Aerts e Sassoli de Bianchi 2018).

Citiamo anche il famoso epiteto “it from bit” di John Wheeler, che ha usato per indicare che (Wheeler 1989): “tutte le cose fisiche sono di origine teorico-informazionale”, in un universo partecipativo. L’interpretazione concettualistica completa il racconto di Wheeler in due modi diversi. In primo luogo, estendendo la

²⁷ “The universe is a pretty big place. If it’s just us, seems like an awful waste of space.”

²⁸ L’irragionevole efficacia della matematica nelle scienze naturali (Wigner 1960) diventa improvvisamente meno irragionevole se si considera che la matematica è prima di tutto un sofisticato linguaggio concettuale e che gli enti fisici interagiscono in modo concettuale tramite la mediazione di un linguaggio.

nozione di partecipante, che non si limita agli esseri umani che creano significati azionando degli strumenti di misura, in quanto questi ultimi (e più in generale tutti i pezzi di materia) sarebbero essi stessi entità sensibili al significato, in grado di scambiare informazioni, indipendentemente dalla presenza di coscienze umane.

In secondo luogo, osservando che il “bit”, inteso come unità di misura negli scambi di significato, non è ciò che si combina per costruire le entità fisiche del nostro ambiente spazio-temporale, o per produrre più in generale i diversi fenomeni fisici.²⁹ Ciò che si combina non sono i bit di informazione, ma le entità concettuali che trasportano tali informazioni, che partecipano a una grande conversazione in cui i diversi partecipanti cognitivi, a diversi livelli organizzativi, si scambiano costantemente flussi di informazioni pregne di significato. Quindi, assecondando il desiderio di Wheeler di sintetizzare il punto centrale della teoria quantistica (e, aggiungiamo noi, della teoria della relatività) in un’affermazione semplice e concisa che chiunque possa comprendere, riteniamo che tale affermazione possa essere: *la sostanza di cui è fatto il mondo è concettuale*.

Per concludere, è importante osservare che l’interpretazione concettualistica contiene in sé anche una spiegazione che rende la nostra realtà fisica nuovamente intelligibile anche all’intuizione e pensiero umano prescientifico. E questo certamente la distingue da tutte le altre interpretazioni, conferendole anche un carattere altamente speculativo, se non altro allo stato attuale della nostra indagine. A questo proposito, è importante ricordare ancora una volta quanto sia cruciale non confondere l’ambito concettuale umano con la concettualità che sarebbe inerente al nostro mondo fisico. In epoca prescientifica, per dare un senso alle entità fisiche e ai fenomeni ad esse associati, noi uomini abbiamo cercato di psicologizzarle, conferendo loro attributi mentali, motivazioni e comportamenti simili a quelli umani.

Secondo l’interpretazione concettualistica, così facendo abbiamo commesso un grave errore, ma allo stesso tempo abbiamo anche acquisito una profonda intuizione sul mondo fisico. L’intuizione profonda è il riconoscimento che quest’ultimo condividerebbe con il mondo culturale umano la stessa natura

²⁹ Non possiamo combinare i metri cubi per costruire una casa, sebbene le sue proprietà volumetriche possano certamente essere espresse in tale unità di misura.

concettuale/cognitiva; il grave errore, consiste nel credere che le entità fisiche e le entità cognitive/concettuali umane si scambino lo stesso tipo di significato.

È lo stesso tipo di errore che abbiamo commesso quando abbiamo creduto che il pianeta Terra fosse fisso al centro dell'universo, che poi è stato ridotto a una semplice sfera celeste con le stelle appiccicate sopra. Quando siamo usciti dalla “caverna tolemaica”, in seguito alla rivoluzione copernicana, abbiamo avuto accesso a un universo incredibilmente più vasto e ricco. Allo stesso modo, uscendo dalla “caverna della nostra visione umano-centrica del mondo”, in seguito alla “rivoluzione concettualistica” (se si rivelerà tale) potremmo nuovamente accedere a una realtà incredibilmente più profonda e ricca, che richiede l'apprendimento non solo di nuovi linguaggi, ma anche della semantica non-umana ad essi associata.

Bibliografia

- 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. (1991). A mechanistic classical laboratory situation violating the Bell inequalities with 2 2, exactly ‘in the same way’ as its violations by the EPR experiments. *Helvetica Physica Acta*, 64, pp. 1-23.
- Aerts, D. (1998). The entity and modern physics: The creation-discovery view of reality. In E. Castellani (Ed.), *Interpreting bodies: Classical and quantum objects in modern physics* (pp. 223-257). Princeton: Princeton University Press.
- Aerts, D. (1999). The stuff the world is made of: Physics and reality. In D. Aerts, J. Broekaert, & E. Mathijs (Eds.), *Einstein meets Magritte: An interdisciplinary reflection* (pp. 129-183). Dordrecht: Kluwer.
- 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 mecánica 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], October 2011. Also published in: AutoRicerca, Volume 18, Year 2019, pp. 109-140.
- Aerts, D. (2014). Quantum theory and human perception of the macro-world. *Front. Psychol.* 5, Article 554. Doi: 10.3389/fpsyg.2014.00554.
- Aerts, D. (2017). Relativity theory refounded. *Foundations of Science*. Doi: 10.1007/s10699-017-9538-7.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Beltran, L., Distrito, I., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. & Veloz, T. (2018a). Towards a quantum world wide web. *Theoretical Computer Science* 752, pp. 116-131.
- Aerts, D., Aerts Arguëlles, J., Beltran, L., Geriente, S., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S., et al. (2018b). 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., et al. (2018c). Spin and wind directions II: A Bell state quantum model. *Foundations of Science* 23, pp. 337-365.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2014a). The extended Bloch representation of quantum mechanics and the hidden-measurement solution to the measurement problem. *Annals of Physics* 351, pp. 975-1025.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2014b). Solving the Hard Problem of Bertrand's Paradox. *Journal of Mathematical Physics* 55, 083503.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2015a). The unreasonable success of quantum probability I: Quantum measurements as uniform fluctuations. *Journal Mathematical Psychology* 67, pp. 51-75.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2015b). The unreasonable success of quantum probability II: Quantum measurements as universal measurements. *Journal Mathematical Psychology* 67, pp. 76-90.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2016a). A possible solution to the second entanglement paradox. In D. Aerts, C. De Ronde, H. Freytes, & R. Giuntini (Eds.), *Probing the meaning of quantum mechanics. Superpositions, dynamics, semantics and identity* (pp. 351-359). Singapore: World Scientific Publishing Company.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2016b). The extended Bloch representation of quantum mechanics. Explaining superposition, interference and entanglement. *Journal of Mathematical Physics* 57, 122110.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2016c). The GTR-model: A universal framework for quantum-like measurements. In D. Aerts, C. De Ronde, H. Freytes, & R. Giuntini (Eds.), *Probing the meaning of quantum mechanics. Superpositions, dynamics, semantics and identity* (pp. 91-140). Singapore: World Scientific Publishing Company.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2017a). *Universal measurements*. Singapore: World Scientific.
- Aerts, D., & Sassoli de Bianchi, M. (2017b). Do spins have directions? *Soft Computing* 21, pp. 1483-1504.

- Aerts, D. & Sassoli de Bianchi, M. (2017c). Multiplex realism. Presented at the 2nd International Congress of Consciousness, held in Miami (USA), the 19-21 of May 2017. Published in: *AutoRicerca*, Issue 21, Year 2020.
- 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*. Springer: The Frontiers collection, pp. 571-595.
- Aerts, D. & Sassoli de Bianchi, M. (2019). The extended Bloch representation of quantum mechanics for infinite-dimensional entities. In: *Probing the Meaning of Quantum Mechanics. Information, Contextuality, Relationalism and Entanglement*. D. Aerts, M.L. Dalla Chiara, C. de Ronde & D. Krause (eds.) World Scientific, pp. 11-25.
- Aerts, D. & Sozzo, S. (2011). Quantum structure in cognition. Why and how concepts are entangled. In: *Quantum interaction 2011. Lecture notes in computer science* (Vol. 7052, pp. 116-127). Berlin: Springer.
- Aerts, D., & Sozzo, S. (2014). Quantum entanglement in conceptual combinations. *International Journal of Theoretical Physics* 53, pp. 3587-360.
- 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*. Lecture notes in computer science (Vol. 8951, pp. 12-23). Cham: Springer.
- 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.
- Bokulich, A. (2008). *Reexamining the quantum-classical relation: Beyond reductionism and pluralism*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bunge, M. (1999). Quantum words for a quantum world. In: *Philosophy of physics*. Dordrecht: D. Reidel.
- Clauser, J. F., Horne, M. A., Shimony, A., & Holt, R. A. (1969). Proposed experiment to test local hidden-variable theories. *Physical Review Letters* 23, pp. 880-884.
- De Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des quanta (Researches on the quantum theory)*. Thesis, Paris, 1924; *Ann. de Physique* 3, 22 (1925).
- 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.
- Einstein, A. (1920). *Relativity: The special and general theory*. London: Methuen & Co Ltd.
- Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* 47, pp. 777-780.
- Galilei, G. (1632). *Dialogo dei massimi sistemi*. Fiorenza, Per Gio: Batista Landini.
- 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.

- Hampton, J. A. (1988). Disjunction of natural concepts. *Memory and Cognition* 16, pp. 579-591.
- Jacques, V., Wu, E., Grosshans, F., Treussart, F., Grangier, P., Aspect, A., et al. (2007). Experimental realization of wheelers delayed-choice gedanken experiment. *Science* 315(5814), pp. 966-968.
- Lévy-Leblond, J.-M. (1976). One more derivation of the Lorentz transformation. *American Journal of Physics* 44, pp. 271-277.
- Lévy-Leblond, J.-M. (1977). *Les relativités*, Cahiers de Fontenay N. 8, E.N.S. de Fontenay-aux-roses.
- Lévy-Leblond, J.-M., (1999). Quantum words for a quantum world. In: *Epistemological and experimental perspectives on quantum physics* (pp. 75-87). Part of the *Vienna Circle Institute Yearbook* book series (VCIY, volume 7).
- Lévy-Leblond, J.-M. & Balibar, F. (1997). *Quantique (Rudiments)*. Interéditions CNRS, 1984; new edition: Masson.
- Mervis, C. B., & Rosch, E. (1981). Categorization of natural objects. *Annual Review of Psychology* 32, pp. 89-115.
- Mondal, D., Bagchi, S., & Pati, A. K. (2017). Tighter uncertainty and reverse uncertainty relations. *Physical Review A*, 95, 052117.
- Norsen, T. (2006). Comment on “Experimental realization of Wheeler’s delayed-choice Gedanken experiment.” arXiv:quant-ph/0611034.
- O’Connell, A. D., et al. (2010). Quantum ground state and single-phonon control of a mechanical resonator. *Nature* 464, pp. 697-703.
- Rosch, E. (1999). Principles of categorization. In: E. Margolis & S. Laurence (Eds.), *Concepts: Core readings* (Vol. 8, pp. 189-206). Cambridge: MIT.
- Sagan, C. (1985). *Contact*. New York: Simon and Schuster.
- Sassoli de Bianchi, M. (2011). Ephemeral properties and the illusion of microscopic particles. *Foundations of Science* 16, pp. 393-409.
- Sassoli de Bianchi, M. (2013). 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.
- Sun, C. P., Liu, X. F., Zhou, D. L., & Yu, S. X. (2001). Localization of a macroscopic object induced by the factorization of internal adiabatic motion. *European Physical Journal D* 17, pp. 85-92.
- Wheeler, J. A. (1978). The past and the delayed-choice double-slit experiment. In: A. R. Marlow (Ed.), *Mathematical Foundations of Quantum Theory* (pp. 9-48). New York: Academic.
- Wheeler, J. A. (1989). Information, physics, quantum: The search for links. In: *Proceedings of the 3rd international symposium foundations of quantum mechanics* (pp. 354-368). Tokyo.
- Wigner, E. P. (1960). The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13, pp. 1-14.

Nota: Questo articolo è stato inizialmente pubblicato in inglese in: Aerts, D., Sassoli de Bianchi, M., Sozzo, S. et al. On the Conceptuality Interpretation of Quantum and Relativity Theories. *Found Sci* 25, 5–54 (March 2020, issue date, July 2018, publication date). Doi: <https://doi.org/10.1007/s10699-018-9557-z>. È stato pubblicato nel 2020, sempre in inglese, anche in *AutoRicerca* 21.

AUTO RICERCA

Dall'interpretazione a molti mondi di Everett- DeWitt all'approccio a misure nascoste della scuola di Geneva- Brussels

Diederik Aerts

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Numero 24

Anno 2022

Pagine 153-216

 LAB

Riassunto

Molti sostenitori dell'interpretazione di Everett-DeWitt ritengono che il loro approccio sia l'unico a prendere la meccanica quantistica davvero sul serio, e che tale approccio consente di dedurre uno scenario fantastico per la nostra realtà, che contempla un numero infinito di mondi paralleli che si diramano in continuazione. In questo testo, scritto in forma di dialogo, si suggerisce che la meccanica quantistica possa essere presa ancora più seriamente, se l'interpretazione *a molti mondi* viene sostituita da un'interpretazione *a molte misure*. Ciò permette non solo di derivare la regola Born (che consente di determinare le probabilità dei diversi processi fisici), risolvendo così il famoso problema della misura, ma altresì di dedurre l'esistenza una realtà non-spaziale, a un solo mondo, che costituisce uno scenario ancora più fantastico di quello del multiverso.

Premessa

In questo articolo, presentiamo un dialogo che ruota attorno al tema dell'interpretazione della meccanica quantistica e l'origine delle famose probabilità quantistiche. Più precisamente, due distinte visioni della realtà verranno confrontate: una a molti mondi (o universi), in cui tutti i possibili esiti di una misura quantistica sono sempre attualizzati, nei diversi mondi paralleli, e una a un solo mondo, in cui le misure quantistiche sono in grado di produrre un solo singolo esito alla volta.

Non è chiaro se questo dialogo ha avuto effettivamente luogo e, in caso affermativo, dove abbia avuto luogo, e chi siano esattamente i suoi due interlocutori. È certamente possibile che esistano solo, ed esisteranno unicamente, in qualità di personaggi immaginari nel regno astratto della cognizione umana, ma è altresì possibile che in alcuni dei mondi di una realtà a molti mondi questi personaggi non solo esistono, o esisteranno, in un senso oggettuale e concreto, ma che addirittura abbiano pronunciato, o pronunceranno, le esatte parole che verranno riportate qui di seguito, esprimendosi in un perfetto italiano.

Lasciamo al lettore il compito di decidere, dopo aver letto il contenuto di questa strana conversazione, quale di queste due possibilità sia quella più probabilmente vera, cioè se il seguente dialogo sia la trascrizione precisa di un dialogo reale, che è veramente accaduto, o accadrà con certezza su una Terra parallela di una realtà a universi multipli, o se invece sia solo una conversazione immaginaria, che sebbene in teoria sarebbe potuta avvenire nella nostra realtà, quasi certamente non è mai avvenuta, e mai verrà posta concretamente in esistenza, in quanto conversazione pienamente incarnata e attualizzata.

Dialogo

TEODORICO: Ciao *Riccardo*, Sono davvero felice che abbiamo trovato un po' di tempo per parlare nuovamente insieme. Che ne dici di riprendere il nostro scambio di idee su quella particolare visione del reale che esplorammo qualche tempo fa? Mi riferisco all'interpretazione della meccanica quantistica proposta negli anni Cinquanta del secolo scorso dal fisico americano *Hugh Everett III* (1957), resa in seguito popolare da *Bryce DeWitt* (1973), che afferma che tutti noi viviamo in uno strano *multiverso*: una realtà formata da *molteplici mondi paralleli* (vedi la Figura 1).



Figura 1 *Hugh Everett III* (1930–1982) è stato un fisico statunitense divenuto celebre per aver formulato nel 1957 l'interpretazione della meccanica quantistica detta *a molti mondi*. Il titolo originario del suo approccio era *formulazione dello "stato relativo" della meccanica quantistica*. Fu solo nella rielaborazione effettuata da *Bryce DeWitt*, che l'interpretazione fu ribattezzata con la denominazione con cui è oggi nota.

RICCARDO: Con immenso piacere *Teodorico*. Sono molto contento di questo nostro incontro, e sì, l'interpretazione everettiana è un argomento perfetto su cui discutere. Se non ricordo male, quello che era piaciuto a entrambi di questa interpretazione è che prende il formalismo della meccanica quantistica molto sul serio, ed è in grado di spiegare gli effetti quantistici consentendo alla nostra realtà fisica di essere incredibilmente più vasta di un semplice spaziotempo quadridimensionale.

TEODORICO: Vedo che ti ricordi bene, e devo dire che fui ancora più attratto dalla prospettiva del multiverso dopo aver letto un affascinante libro di *David Deutsch* (1997), dove l'autore analizzava le interferenze prodotte dagli esperimenti del tipo "a doppia fenditura" per dedurre in modo assai convincente che l'universo che osserviamo attorno a noi non possa costituire l'intera nostra

realtà e che questa necessariamente contiene un numero immenso di universi paralleli (vedi la Figura 2). Quello che sto per dirti ora potrebbe allora sorprenderti, perché vedi, nel mio tentativo di approfondire la mia comprensione di tale “realtà allargata”, ho fatto alcune scoperte inattese, che hanno messo sotto sopra il mio punto di vista su tutta la questione. Tanto che ora non sono più così convinto che gli everettiani, o i post-everettiani, prendano la meccanica quantistica così sul serio come dicono di fare.



Figura 2 *David Deutsch* è un fisico britannico, pioniere dei computer quantistici, avendo formulato una descrizione della macchina di Turing quantistica. È un convinto sostenitore dell'interpretazione a molti mondi della meccanica quantistica, basata sulle idee formulate da *Hugh Everett III* negli anni Cinquanta, che ha promosso in particolare nel suo libro intitolato *La trama della realtà*, pubblicato in Italia nel 1997 da Einaudi.

RICCARDO: Quello che mi dici è davvero sorprendente. Come sei arrivato a questa conclusione?

TEODORICO: Ebbene, di recente, e devo dire in modo del tutto casuale, mi è capitato di leggere alcuni articoli appassionanti sul problema della misura, che offrivano una prospettiva davvero inaspettata sull'intera questione; una prospettiva che ho poi sintetizzato in una domanda assai improbabile, che da allora riecheggia nella mia mente come un *mantra*.

RICCARDO: Sono davvero curioso, qual è questa domanda?

TEODORICO: La domanda è: perché *Laplace* non era everettiano?

RICCARDO: Chiedo scusa?

TEODORICO: Sì, perché mai Laplace (vedi la Figura 3) non ha considerato a sua volta l'esistenza di un multiverso per spiegare l'origine delle sue probabilità? Quello che voglio dire è che le probabilità sono relative alle *possibilità*, e dal momento che le possibilità possono essere *scelte*, perché Laplace non ha considerato che ogni volta che ciò accadeva il mondo si divideva in tutta una serie di mondi paralleli, come solitamente presumono i multimondisti?

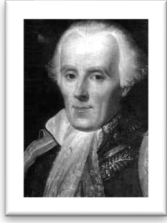


Figura 3 *Pierre-Simon Laplace* (1749–1827) è stato un matematico, fisico, astronomo e nobile francese del periodo napoleonico. Ha dato contributi fondamentali in diversi campi dello scibile umano, e in particolare in quello della teoria della probabilità, formalizzando tra le altre cose il procedimento matematico del ragionamento probabilistico per induzione.

RICCARDO: Questa è una domanda molto strana da porre. Sicuramente sai che Laplace, e gli altri padri fondatori della teoria della probabilità, elegantemente assiomatizzata da *Kolmogorov* (vedi la Figura 4) negli anni trenta del secolo scorso (Kolmogorov, 1950), avevano a che fare solo con le cosiddette *probabilità classiche*, la cui natura è ben diversa da quella delle *probabilità quantistiche*. Beh, non fondamentalmente diversa, ma questo lo sappiamo solo oggi, in seguito alla scoperta della meccanica quantistica e in seguito all'osservazione che la nostra realtà è fondamentalmente di tipo quantistico. Ma prima dell'avvento della meccanica quantistica, le probabilità classiche, che obbediscono agli assiomi kolmogoroviani, certamente ammettevano un'interpretazione assai diversa rispetto alle probabilità quantistiche, che non obbediscono a tali assiomi e che sono emerse quando abbiamo studiato le particelle microscopiche.

TEODORICO: Sì, certo che lo so, ma dimmi: sei d'accordo che da un certo punto di vista le probabilità sono relative alla nostra *mancanza di conoscenza* riguardo a ciò che potrebbe accadere in una determinata porzione del reale, in un dato contesto, a prescindere che la nostra realtà sia a un solo mondo o a più mondi, o che tale mancanza di conoscenza sia oggettiva o soggettiva? Voglio dire, sei d'accordo con l'idea che le probabilità siano delle grandezze *epistemiche*?



Figura 4 *Andrej Nikolaevič Kolmogorov* (1903–1987) è stato un matematico sovietico, tra i più importanti e influenti matematici del XX secolo. A lui si devono importanti progressi in diversi campi di indagine, tra cui la teoria delle probabilità (con l'introduzione degli assiomi del calcolo probabilistico), la topologia, la logica intuizionista, la turbolenza, la meccanica classica e la complessità computazionale.

RICCARDO: Per quanto mi riguarda, non attribuisco alcuna natura *ontica* alle probabilità in generale, quindi sì, sono d'accordo.

TEODORICO: Lo stesso vale per me, per questo ritengo sia rilevante chiedersi perché mai Laplace, con il suo calcolo delle probabilità, si sarebbe trovato in una situazione fondamentalmente diversa rispetto a quella di un moderno fisico quantistico.

RICCARDO: Ma i fisici quantistici furono confrontati con il *problema della misura*, mentre un tale problema era del tutto assente nei *giochi d'azzardo* indagati dai fondatori della teoria della probabilità.

TEODORICO: Ma non potrebbe essere che, non avendolo percepito come un problema, semplicemente non l'hanno identificato come tale?

RICCARDO: Non sono sicuro di capire cosa intendi dire con questo. Ma prima di continuare, forse sarebbe utile rinfrescarci la memoria sul problema della misura.

TEODORICO: Sono d'accordo.

RICCARDO: In breve, la teoria quantistica, nella sua formulazione standard, detta “di Copenaghen”, afferma che vi sono due processi distinti nella descrizione dell'evoluzione di un'entità quantistica. Uno è un processo di natura continua, deterministico, descritto dall'*equazione di Schrödinger* (1926) (vedi la Figura 5); l'altro è un processo di natura discontinua, indeterministico, governato dal *postulato della proiezione* e dalla corrispondente *regola di Born* (Born, 1926; Neumann, 1955) (vedi la Figura 6). Il primo descrive l'evoluzione unitaria di un sistema isolato, quando questo non è soggetto ad alcuna misura, mentre il secondo descrive l'effetto di una misura, nei termini di un *collasso* (o *riduzione*) indeterministico del vettore di stato. Tutto questo introduce nella descrizione del reale una dicotomia tra i sistemi di misura e le entità misurate, e un dualismo nei processi di cambiamento del vettore di stato. Come è ben noto, quando i sistemi di misura vengono considerati a loro volta come delle entità che possono essere misurate da altri sistemi di misura, e così via, si produce una regressione infinita, che naturalmente costituisce un problema poiché l'unico modo di interrompere tale regressione infinita è di evocare la possibilità di un qualcosa nella realtà che non sarebbe soggetto alle leggi della

meccanica quantistica, potendo così agire in qualità di sistema di misura finale. *John von Neumann* (vedi la Figura 7) usava indicare questa possibilità con il termine di *ego astratto*, e questo è il motivo per cui molti di coloro che aderiscono all'interpretazione di Copenaghen, forse senza ammetterlo, considerano che la *coscienza* svolgerebbe un ruolo speciale nella nostra realtà.



Figura 5 *Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger* (1887–1961) è stato un fisico austriaco i cui maggiori contributi portarono sulla meccanica quantistica e in particolare sull'equazione a lui intitolata, per la quale ottenne il premio Nobel per la fisica nel 1933, che in notazione di Dirac si può scrivere: $i\hbar\partial_t|\psi_t\rangle = H|\psi_t\rangle$, dove \hbar è la costante di Planck ridotta, H è l'operatore hamiltoniano e $|\psi_t\rangle$ il vettore di stato (o “funzione d'onda”).



Figura 6 *Max Born* (1882–1970) è stato un fisico tedesco naturalizzato britannico, le cui ricerche in meccanica quantistica hanno portato in particolare all'interpretazione statistica della funzione d'onda. Secondo la regola che porta il suo nome, la probabilità P che lo stato $|\psi\rangle$ del sistema collassi in un autostato $|\varphi\rangle$ dell'osservabile misurata, è data da: $P = |\langle\varphi|\psi\rangle|^2$.



Figura 7 *John von Neumann* (1903–1957) è stato un matematico, fisico e informatico ungherese naturalizzato statunitense. È considerato uno dei più grandi matematici della storia moderna e una delle personalità scientifiche preminenti del XX secolo, cui si devono contributi fondamentali in numerosi campi. Fu il primo a fornire un quadro matematico rigoroso per la meccanica quantistica.

TEODORICO: Sì, e gli everettiani, per risolvere questo problema, postulano l'esistenza di un numero infinito non numerabile di mondi paralleli non comunicanti, in crescita continua, in cui tutti i possibili esiti quantistici verrebbero sempre e immancabilmente attualizzati.

RICCARDO: A dire il vero, non postulano i mondi paralleli, semplicemente ne deducono l'esistenza dalla teoria. La loro tesi è

che tutto ciò che dobbiamo sapere di un sistema fisico, a un livello fondamentale, è contenuto nel suo vettore di stato e nell'evoluzione di quest'ultimo attraverso l'equazione puramente deterministica di Schrödinger. Dovremmo quindi abbandonare l'idea che vi sia un processo fisico distinto, associato al *collasso del vettore di stato*. La loro è indubbiamente una scelta di grande semplicità: ci sarebbe un solo processo di cambiamento fondamentale, quello unitario e deterministico descritto dall'equazione di Schrödinger, applicabile anche ai processi di misura. Quando un sistema di misura e un'entità sottoposta alla misura interagiscono, diventano *entangled*, cioè entrano in uno stato di "intricazione". L'entanglement è espressione di una sovrapposizione di diversi stati, che attraverso quel processo detto di *decoerenza* (o *desincronizzazione*), si evolvono molto rapidamente in una sovrapposizione di *alternative non interferenti*. Tutte queste alternative, o esiti, descrivono allora degli eventi attuali, che coesistono in mondi differenti, ma considerando che ogni versione dello sperimentatore, in ognuno di questi mondi paralleli, è a conoscenza di uno solo di questi esiti, verrà indotta nell'errore di credere di vivere in un unico mondo. Ma questa è solo un'illusione, conseguenza del fatto che la mente dello sperimentatore – che risulta anch'essa dall'attività di un sistema fisico – viene a sua volta divisa nel processo di misura. In altre parole, le leggi della meccanica quantistica potrebbero imporci una sorta di "visione a tunnel", creando in ognuno di noi l'illusione di un solo mondo, ma queste stesse leggi ci direbbero al contempo che abbiamo multiple esperienze simultanee, associate ai diversi esiti di una misura, aventi luogo nei diversi universi paralleli.

TEODORICO: Grazie per questo riassunto sintetico. Vorrei aggiungere che nella visione del multiverso il contenuto statistico della meccanica quantistica, così come espresso dalla regola di Born e confermato dai nostri esperimenti di laboratorio, altro non sarebbe che la conseguenza del fatto che non sappiamo in quale mondo del multiverso ci ritroviamo di volta in volta, a seguito del "processo di diramazione" prodotto dall'interazione con lo strumento di misura.

RICCARDO: Esattamente. Nessun collasso avrebbe luogo. Il multiverso viene descritto da un singolo vettore di stato che Everett

chiamava la *funzione d'onda universale*, che si evolverebbe secondo l'equazione di Schrödinger, o una qualche generalizzazione *lineare* della stessa.

TEODORICO: Il mio problema con questo “meccanismo di diramazione”, che descrive la separazione dei molteplici mondi quando un'entità misurata e un sistema misuratore entrano in interazione – ora che ho letto questi nuovi articoli di cui ti parlerò più dettagliatamente in seguito – è che sempre di più mi sembra solo un modo camuffato di parlare del postulato della proiezione. Inoltre, trovo alquanto sospetto che per prendere sul serio la meccanica quantistica la si debba privare proprio di ciò che fa parte della sua ricchezza, vale a dire il postulato della proiezione. Comprendo solo ora quanto sia pericoloso tentare di risolvere un problema eliminando il portatore stesso del problema: in un primo momento potrebbe anche sembrare che l'operazione abbia avuto successo, ma cosa accade poi se il paziente – la teoria – risulta essere morto? Naturalmente, sono d'accordo che, matematicamente parlando, e anche dal punto di vista di un approccio operativo e assiomatico alla meccanica quantistica, l'equazione di Schrödinger rappresenti la più semplice tra tutte le dinamiche, dacché induce unicamente un automorfismo dello spazio degli stati (Piron 1976). Ma perché mai dovremmo considerare una dinamica così semplice come anche la più generale? Analogamente, su quali basi dovremmo considerare che lo *spazio di Hilbert* sia la struttura più generale per descrivere l'insieme degli stati di un'entità fisica? In realtà, quello che ho realizzato oggi è che l'esistenza stessa delle cosiddette *regole di superselezione* (Streater e Wightman 1964), che limitano la validità del principio di sovrapposizione, sta proprio ad indicarci che delle strutture più generali sono suscettibili di essere presenti nella nostra realtà. E che sarebbe meno ingenuo ritenere che tanto l'evoluzione reversibile, governata dall'equazione di Schrödinger, quanto la riduzione irreversibile del vettore di stato, sarebbero solo approssimazioni idealizzate di processi più complessi di cambiamento. Tutto questo mi sembra molto naturale, dal momento che viviamo indubbiamente in una realtà molto complessa, nella quale diversi processi di cambiamento hanno luogo, a seconda dei contesti nei quali le diverse entità fisiche si trovano immerse. Non c'è dubbio che alcuni di questi processi

possano essere spiegati a partire da processi ancora più fondamentali, ma possiamo davvero affermare sin dal principio che l'evoluzione deterministica di Schrödinger sia più fondamentale dell'evoluzione indeterministica prodotta dal collasso di von Neumann? Possiamo davvero considerare che la prima sia oggettiva mentre la seconda solo soggettiva? Non dovremmo far prova di maggiore prudenza prima di assumere una posizione così drammatica e radicale?

RICCARDO: Capisco la prudenza, e mi rendo conto che nelle tue recenti letture hai approfondito nuovi approcci interessanti che ti hanno portato a riflettere molto attentamente su questi temi, dopo la nostra passata esplorazione dell'interpretazione a molti mondi. Ma non credi invece che dovremmo essere un po' più audaci ed avere il coraggio di prendere alla lettera quello che la funzione d'onda ha da dirci sulla realtà, e sulle diverse correlazioni che possono sorgere tra i diversi sottosistemi, a tutti i livelli possibili? La visione "a molti mondi", che emerge da tutto questo, è certamente sconvolgente, ma è così a quanto pare che stanno le cose, a un livello fondamentale, anche se ovviamente questo livello rimane a noi nascosto, dal momento che non possiamo percepire direttamente il processo di separazione dei mondi, così come non possiamo percepire il movimento di rotazione del pianeta Terra.

TEODORICO: Ti posso assicurare che nel riflettere sulle implicazioni di questi nuovi articoli che ho avuto modo di leggere, non è affatto l'idea di una realtà allargata a sconvolgermi. Al contrario, per citare Deutsch (1998), sono assai convinto che: "la realtà fisica è assai più estesa di quanto possa sembrare, e che per gran parte sia invisibile", e che "gli oggetti e gli eventi che noi e i nostri strumenti possiamo direttamente osservare non sono che la punta di un iceberg". Ma a seguito di queste nuove letture e riflessioni, quello che ho ora qualche difficoltà ad accettare è la facilità con cui si possono omettere alcune parti della teoria e ancora pretendere di prenderla molto sul serio. Perché per realmente farlo, non dovremmo accettare tutti i suoi postulati, anche se a prima vista potrebbero sembrarci problematici, quindi indagare, senza pregiudizi classici, quali sono le loro conseguenze per la nostra visione della reale? Condivido sempre con gli everettiani, e con te, il desiderio di poter andare oltre l'antirealismo sotteso dall'interpretazione ortodossa di

Copenaghen, e prendo molto sul serio quello che la teoria dei quanti ha da dirci sul reale. Ma come ho detto, oggi non credo più che i multi-mondisti stiano prendendo la teoria quantistica *sufficientemente sul serio!*

RICCARDO: Potresti spiegarti meglio?

TEODORICO: Quello che intendo dire è che eliminando il collasso del vettore di stato dalla teoria si elimina al contempo la possibilità di interpretare gli *stati di sovrapposizione* come degli *autentici nuovi elementi della nostra realtà*, riducendoli a delle mere rappresentazioni matematiche di insiemi di vettori di stato collassati, che descriverebbero delle entità di tipo classico nei diversi mondi paralleli.

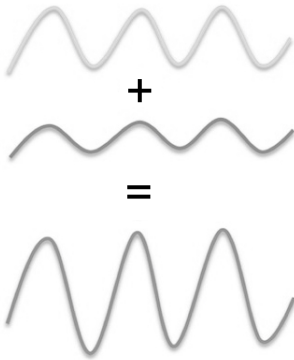


Figura 8 Il *principio di sovrapposizione* quantistico afferma che, similmente alle onde della fisica classica, due stati (funzioni d'onda) possono essere “sovrapposti” (cioè sommati, in quanto elementi di uno spazio vettoriale, detto di Hilbert \mathcal{H}) e il risultato della sovrapposizione sarà (dopo rinormalizzazione del vettore), sempre uno stato valido, che descrive una situazione fisica in linea di principio possibile. Più esattamente (in notazione di Dirac): se $|\psi\rangle, |\varphi\rangle \in \mathcal{H}$, e $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, allora: $\alpha|\psi\rangle + \beta|\varphi\rangle \in \mathcal{H}$.

RICCARDO: Sì, ma per quanto mi è dato di capire, per gli everettiani un cosiddetto stato di sovrapposizione sarebbe di fatto un autentico nuovo elemento della nostra realtà, che per l'appunto descrive una *sovrapposizione di mondi*.

TEODORICO: Lo so, ma tutti questi mondi sovrapposti sono solo dei mondi classici, in cui la *potenzialità* espressa da uno stato di sovrapposizione è totalmente assente, in quanto tale stato non può essere associato alla condizione attuale di nessuna entità fisica, in nessun singolo mondo del vasto multiverso. Ecco perché sostengo che, nell'interpretazione a molti mondi, a una sovrapposizione di stati non viene permesso di descrivere un autentico nuovo elemento di realtà; voglio dire, un autentico nuovo elemento di realtà di una realtà a un solo mondo.

RICCARDO: Non sono sicuro di capire a cosa dovrebbe corrispondere un elemento di realtà associato a una sovrapposizione di stati. Potresti farmi un esempio semplice?

TEODORICO: Certo, ma a scanso di equivoci vorrei sottolineare che quando affermo che dovremmo prendere il postulato della proiezione più seriamente, non voglio certo escludere la possibilità che la nostra realtà sia governata da processi rigorosamente deterministici. È certamente possibile, e anche ragionevole credo, ritenere che l'indeterminismo appaia solo quale conseguenza della nostra mancanza di conoscenza, o di controllo, su ciò che realmente accade "dietro le quinte", quando due sistemi fisici cominciano a interagire.

RICCARDO: Su questo siamo totalmente d'accordo.

TEODORICO: Ottimo. Permettimi allora di provare a spiegare che cosa sarebbe uno stato di sovrapposizione, secondo la mia attuale comprensione, che, come ti ho detto, è il risultato delle mie recenti letture, di cui ti dirò di più in seguito. Ma per questo devo ritornare alla mia strana domanda: perché Laplace, nella sua descrizione dei giochi d'azzardo, non si è preoccupato dell'insopportabile dicotomia di avere a che fare sia con processi deterministici che indeterministici?

RICCARDO: Non l'ha fatto perché non c'è un collasso del vettore di stato in una situazione di gioco d'azzardo, né una regola di Born che descrive le probabilità dei diversi esiti. Lanciare un dado su un tavolo non è un processo di misura.

TEODORICO: Ma non è stato proprio Laplace a enunciare un principio per assegnare e calcolare le probabilità, noto come *principio di ragion insufficiente*, o *principio di indifferenza*?

RICCARDO: Certamente, il principio, che permette di assegnare delle probabilità in assenza di qualsiasi evidenza, è stato difeso da Laplace, e se ricordo bene anche da *Pascal* e *Bernoulli*. Laplace lo riteneva così evidente che non si è nemmeno dato la briga di dargli un nome.

TEODORICO: A differenza di Laplace, facciamolo noi, e ai fini del nostro discorso chiamiamolo semplicemente *regola di Laplace*. Citando testualmente Laplace, la sua regola afferma che (Laplace 1814):

“la teoria della probabilità consiste nel ridurre tutti gli eventi dello stesso tipo a un certo numero di casi ugualmente probabili [...] e nel determinare il numero di casi favorevoli all'evento la cui probabilità è cercata. Il rapporto tra questo numero e quello di tutti i casi possibili è la misura di questa probabilità, che è così semplicemente una frazione il cui numeratore è il numero di casi favorevoli e il cui denominatore è il numero di tutti i casi possibili”.

Ora, dalla mia prospettiva, questa regola di Laplace, se correttamente intesa, può essere considerata come una versione limite della regola di Born. Ti dirò fra un minuto che cosa intendo con questo. Per il momento, permettimi di richiamare la tua attenzione sul fatto che, similmente alla regola di Born, la regola di Laplace è una *regola di corrispondenza*, che permette di porre la “teoria del caso” in contatto con gli esperimenti, che sono i “giochi d’azzardo” e i loro esiti imprevedibili. Sono perfettamente consapevole del fatto che Laplace non stava descrivendo lo stesso strato del reale indagato dai moderni fisici quantistici, ma sicuramente aveva anche lui a che fare con dei processi sia deterministici che indeterministici, reversibili e irreversibili; i primi erano descritti dalle leggi di Newton e da quelle azioni volontarie che erano sotto il pieno controllo degli esseri umani, mentre i secondi erano precisamente l’oggetto della sua teoria del caso. Considerando tutto questo, penso sia molto pertinente chiedersi perché Laplace, così come i suoi predecessori e successori, non abbia cercato di eliminare ogni forma di indeterminismo dalla sua teoria del caso, descrivendo i possibili esiti dei diversi giochi nei termini di una diramazione multipla di mondi.

RICCARDO: Non sono sicuro di comprendere la logica della tua domanda. È davvero pertinente? Come si può paragonare la situazione sperimentale cui era confrontato Laplace con quella dei moderni fisici quantistici? Laplace non studiava gli stati e le proprietà dei sistemi fisici, come fanno invece solitamente i fisici. Inoltre, quando si lancia una moneta, un dado, o si estrae una pallina da un’urna, tutti gli aspetti del processo si svolgono sotto i nostri occhi: non ci sono misteri, né problemi cognitivi; quindi, non è necessario a questo livello postulare l’esistenza di molteplici universi.

TEODORICO: Stai forse dicendo che l’interpretazione a molti mondi non si applicherebbe agli oggetti macroscopici, come il tristemente

famoso *gatto di Schrödinger* (vedi la Figura 9), ma solo a quelli microscopici?

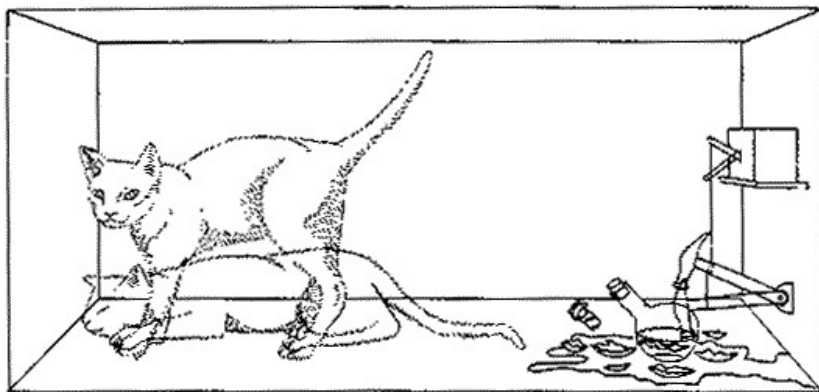


Figura 9 Quello del *gatto di Schrödinger* è un esperimento di pensiero proposto nel 1935 da *Erwin Schrödinger*, con lo scopo di mettere in evidenza che l'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica conduce a dei risultati paradossali, quando applicata a un sistema fisico macroscopico, come un gatto, che ad esempio a seguito dell'interazione con un sistema microscopico in uno stato di sovrapposizione verrebbe a sua volta a trovarsi in uno stato di sovrapposizione, ad esempio la sovrapposizione tra lo stato di un gatto vivo e lo stato di un gatto morto (a causa del fenomeno dell'entanglement). Per dirla con le parole di Schrödinger (1935): “*Si rinchioda un gatto in una scatola d'acciaio insieme alla seguente macchina infernale [...]: in un contatore Geiger si trova una minuscola porzione di sostanza radioattiva, così poca che nel corso di un'ora forse uno dei suoi atomi si disintegrerà, ma anche, in modo parimenti probabile, nessuno; se l'evento si verifica il contatore lo segnala e aziona un relais di un martelletto che rompe una fiala con del cianuro. Dopo avere lasciato indisturbato questo intero sistema per un'ora, si direbbe che il gatto è ancora vivo se nel frattempo nessun atomo si fosse disintegrato, mentre la prima disintegrazione atomica lo avrebbe avvelenato. La funzione ψ dell'intero sistema porta ad affermare che in essa il gatto vivo e il gatto morto non sono degli stati puri, ma miscelati con uguale peso.*”

RICCARDO: Certo che no: se è corretta, l'interpretazione deve potersi applicare a tutti i livelli della nostra realtà.

TEODORICO: Quindi anche ai diversi esiti di un “esperimento di lancio”, in un tipico gioco con i dadi.

RICCARDO: Penso di sì, anche quando si tira un dado i mondi si diramano, ma ciò risulta dalle leggi della meccanica quantistica, non

dalle leggi della meccanica classica. Come sai, gli everettiani credono solitamente che le leggi della meccanica *classica* siano valide a un livello fondamentale, ma che a causa della sovrapposizione dei mondi, e delle interazioni nascoste che queste sovrapposizioni producono, il comportamento effettivo delle entità microscopiche ci appare come non-classico, cioè quantistico, ma ciò sarebbe solo il frutto di un'evoluzione deterministica collettiva dei diversi mondi reciprocamente interagenti, in scissione continua. Dal momento che le entità macroscopiche sono formate a partire da quelle microscopiche, lo stesso varrebbe per loro, ma a causa del fenomeno della *decoerenza*, queste non darebbero luogo (in condizioni standard) a fenomeni di interferenza o di non-località, e sembrano così comportarsi in modo puramente classico. Ma a parte questa soppressione degli effetti quantistici a livello macroscopico, il motivo per cui non possiamo vedere degli stati di sovrapposizione resterebbe ovviamente lo stesso per i sistemi macroscopici e microscopici: non possiamo vederli perché i mondi si diramano.

TEODORICO: Sì, i probabilisti classici come Laplace, nei loro giochi d'azzardo, consideravano unicamente degli oggetti macroscopici ordinari, come delle monete, dei dadi, delle urne, ecc., quindi non potevano osservare effetti di interferenza e altri effetti quantistici. Questo significa che non potevano dedurre l'esistenza delle sovrapposizioni di stati e quindi inferire l'esistenza di diverse ramificazioni del multiverso, con i diversi esiti possibili che si verificano sempre in ciascuna di esse. In aggiunta a ciò, come hai già evidenziato, non misuravano alcuna proprietà fisica.

RICCARDO: Precisamente.

TEODORICO: Naturalmente, sono d'accordo che quando lanciamo un dado tutto, beh, quasi tutto, avviene sotto i nostri occhi. Ed è proprio questo il motivo per cui abbiamo interesse ad osservare questo processo non solo tenendo gli occhi ben aperti, ma anche la mente ben aperta. Ad esempio, sarebbe interessante chiedersi che tipo di fisica Laplace avrebbe potuto scoprire se avesse descritto il lancio di un dado usando i concetti normalmente impiegati dai fisici, come quelli di *stato*, *proprietà* e *misura*.

RICCARDO: Ma il lancio di un dado non è una misura.

TEODORICO: Di solito non viene considerato come tale, sono

d'accordo. Ma supponendo che lo fosse, che tipo di misura sarebbe?

RICCARDO: Senza dubbio una misura molto strana.

TEODORICO: Così come una misura quantistica è strana, se paragonata a una misura classica?

RICCARDO: Stai forse giocando con le parole?

TEODORICO: No, sto solo osservando che se si considera il lancio di un dado come un processo di misura, allora, secondo il nostro *pregiudizio classico* su che cosa dovrebbe essere una misura, ci troviamo in una situazione strana, molto simile a quella in cui si sono trovati i pionieri della meccanica quantistica quando hanno iniziato ad osservare le entità microscopiche.

RICCARDO: E cosa direbbe questo pregiudizio classico?

TEODORICO: Che un processo di misura è sempre un processo di pura *scoperta*, cioè un processo attraverso il quale prendiamo conoscenza unicamente di ciò che già esiste, nel senso attuale del termine, prima della sua esecuzione.

RICCARDO: Direi che non si tratta di un pregiudizio, ma della definizione di una misura.

TEODORICO: Beh, dovremmo forse verificare attentamente che le nostre definizioni siano compatibili con la struttura della realtà, e con il nostro modo di sperimentarla. Non sto dicendo che le misure del tipo 'pura scoperta' non siano delle misure autentiche. Quello che sto dicendo è che corrispondono a un tipo molto speciale di misura, poiché i processi di misura comprendono generalmente non solo un *aspetto scoperta*, ma altresì un *aspetto creazione*. Questo perché le misure sono generalmente anche in grado di cambiare lo stato dell'entità misurata.

RICCARDO: Sono certamente d'accordo che una misura, essendo il risultato di un'interazione, in linea di principio potrà influenzare il sistema misurato, ma solo nel senso di produrre un disturbo. Mi viene in mente l'esempio tipico del controllo della pressione del pneumatico di un'automobile: durante il processo è difficile non fare uscire un po' di aria, cosicché la pressione misurata potrebbe non corrispondere esattamente alla pressione del pneumatico prima

della misura. Ma in linea di principio è sicuramente sempre possibile ridurre questi effetti di disturbo al minimo, migliorando la tecnica osservativa. Pertanto, quando si affronta il problema della misura a un livello fondamentale, questi effetti non dovrebbero preoccuparci.

TEODORICO: Sì, ma l'aspetto creazione, che ritengo sia insito nei processi di misura quantistica, non può essere ridotto a un mero effetto di disturbo: si tratterebbe infatti di un aspetto di natura più fondamentale, non eliminabile con un semplice miglioramento tecnologico, essendo incorporato nei protocolli stessi che definiscono operazionalmente le proprietà misurate. Quello che sto dicendo, e perdonami se ora giocherò davvero con le parole, è che se una tipica misura quantistica ci appare così “*str-ange*” (strana), quando la consideriamo dal punto di vista dei nostri pregiudizi classici, è perché questa conterrebbe degli aspetti legati non solo alla “*str-ucture*” (struttura) dell'entità misurata, che è ciò che in parte può essere scoperto, ma anche al suo “*ch-ange*” (cambiamento), vale a dire a come tale struttura reagisce dinamicamente quando viene agita in un certo modo, nel corso di un esperimento. In poche parole, una misura quantistica non avrebbe a che fare unicamente con l'*essere* di una entità, ma anche con il suo *divenire*. Non avrebbe a che fare solo con le proprietà che possiede in senso attuale, ma anche con le proprietà che è in grado di acquisire, tramite il processo stesso di osservazione.

RICCARDO: Capisco il tuo punto, ma dobbiamo davvero considerare che un processo con un tale livello di invasività intrinseca sia una misura? Per me una misura consiste solo nell'osservare le proprietà attuali di una entità fisica.

TEODORICO: Penso si tratti più che altro di una questione di terminologia. Non ho nulla in contrario se preferisci chiamare una misura quantistica con il termine di “azione quantistica”, o qualsiasi altro termine, per distinguerla da un processo di pura scoperta. Personalmente, penso sia però più ragionevole aggiornare il concetto di misura, e più generalmente il concetto di osservazione, includendo anche gli aspetti di creazione. Ma questa è solo una scelta terminologica personale. Quello che invece è importante, è chiarire se una cosiddetta misura quantistica comporti o meno un tale aspetto di creazione, e se questo sia sufficiente a spiegare la sua

apparente stranezza.

RICCARDO: Non ho a dire il vero un problema nell'associare il concetto di creazione a una misura, è solo che non sono sicuro che sia corretto farlo nel modo in cui lo fai tu. Mi sembra che tu stia prendendo il termine "creazione" in senso troppo letterale, cioè nel senso della creazione di proprietà che il sistema misurato non possedeva prima del processo di misura. Non sono sicuro di poter essere d'accordo su questo. Se considero ad esempio la visione everettiana, l'unica cosa che una misura quantistica "creerebbe" sarebbe l'intricazione (l'entanglement) tra il sistema di misura e l'entità misurata, che a sua volta sarebbe responsabile della scissione degli universi associati ai diversi termini dello stato di sovrapposizione così ottenuto. Questi universi, o mondi, non verrebbero comunque creati dalla misura: sarebbero già esistenti e semplicemente verrebbero *separati* dall'interazione associata al processo di misura. Questo perché nell'interpretazione a molti mondi non vi è alcuna riduzione del vettore di stato, quindi nemmeno una creazione di proprietà nel senso che intendi tu.

TEODORICO: Sì, questo è quello che afferma la descrizione di Everett e DeWitt. Ma vorrei spiegarti che una diversa interpretazione è possibile, che prende la teoria quantistica ancora più seriamente di quanto fanno gli everettiani, nel senso che prende molto sul serio non solo l'equazione di Schrödinger, ma anche il postulato della proiezione, con il suo effetto di cambiamento irreversibile del vettore di stato, nel corso di un atto di misura. È interessante osservare che, come ho avuto modo di apprendere grazie alle mie più recenti letture, così come abbandonando il postulato della proiezione gli everettiani devono allargare la loro realtà, trasformandola in un multiverso, facendo l'esatto opposto, cioè mantenendo il postulato della proiezione, dobbiamo altresì considerare un notevole ampliamento della nostra realtà, ma questa volta rimanendo entro una descrizione a un solo mondo.

RICCARDO: Devo dire che questa realtà allargata a un solo mondo mi ha davvero incuriosito.

TEODORICO: Consentimi di tornare a Laplace e di considerare il lancio di un dado su un tavolo. Vorrei descrivere questo processo

come se si trattasse di una misura. Qual è l'osservabile che viene misurata? Solitamente, in un gioco di dadi, si osserva il numero di puntini sulla *faccia-superiore* del dado (vedi la Figura 10). Se il dado in questione è un dado tradizionale, a sei facce, ciò significa che i risultati possibili della misura dell'osservabile “faccia-superiore” sono i seguenti sei numeri: 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

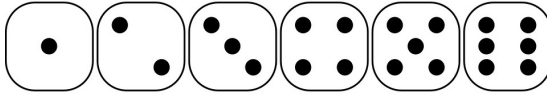


Figura 10 I sei esiti possibili quando si lancia un dado cubico tradizionale.

RICCARDO: La prima obiezione che mi viene in mente è che il valore di una faccia-superiore non corrisponde a una proprietà intrinseca del dado. Voglio dire, un dado possiede certamente sei facce, ognuna con un diverso numero di puntini, ma nessuna di queste facce è una faccia-superiore. Perciò, non possiamo realmente osservare la faccia-superiore di un dado.

TEODORICO: A rigore di logica, hai ragione. Ma vedi, sono libero di associare a un dado tutte le proprietà che desidero, purché io lo faccia in modo sensato e coerente. Non ho problemi ad ammettere che sto considerando delle proprietà di natura non-ordinaria, che solitamente non vengono studiate nella descrizione classica degli oggetti macroscopici. Se lo sto facendo è per mostrare che, nel testare queste proprietà, ci troviamo in una situazione molto simile a quella in cui si sono trovati i fisici quantistici, quando hanno avuto a che fare con le entità microscopiche. Quindi, sì, hai ragione, una faccia-superiore non è una proprietà di un dado come avere una massa, un volume, un certo numero di facce, ecc. Si tratta infatti di una *proprietà relazionale*, che diviene attuale solo quando il dado viene posto in una specifica relazione con un'altra entità fisica: il tavolo da gioco (Sassoli de Bianchi 2015).

RICCARDO: Stai forse suggerendo che le osservabili quantistiche sarebbero di tipo relazionale, come l'osservabile faccia-superiore di un dado?

TEODORICO: Non sto necessariamente affermando questo, anche se nemmeno sto negando questa possibilità. Sto solo osservando

che un oggetto comune, come un dado, può possedere molte più proprietà di quelle che solitamente gli vengono attribuite, e che senza saperlo i padri fondatori della teoria classica delle probabilità stavano proprio misurando tali proprietà non convenzionali, e che di conseguenza, sempre senza saperlo, stavano di fatto studiando dei processi quantistici, o meglio, simil-quantistici.

RICCARDO: Non vedo davvero come, ma ti prego, continua.

TEODORICO: Quello che vorrei fare è fornirti ora una definizione *operazionale* dell'osservabile faccia-superiore, cioè specificare come la si osserva. È molto semplice. Se il dado è già sul tavolo, l'osservazione consiste semplicemente nel leggere il suo valore. Se invece il dado non si trova sul tavolo, lo si deve lanciare sul tavolo e, non appena ha smesso di rotolare, semplicemente si legge il valore della faccia rivolta verso l'alto, che è allora il risultato della misura. Secondo questo protocollo sperimentale, un dado sul tavolo è un dado che si trova in un cosiddetto *autostato* dell'osservabile faccia-superiore, essendo chiaro che in questa situazione la misura della faccia-superiore non cambierà il suo "stato sul-tavolo". D'altra parte, un dado che si trova in uno "stato fuori-tavolo" non possiede una faccia-superiore, come hai giustamente osservato. Per un tale dado, avere una specifica faccia-superiore è solo una *proprietà potenziale*, non attuale, che potrà essere attualizzata solo tramite il processo di misura, quando il dado viene lanciato sul tavolo. E dal momento che tutte e sei le facce del dado sono *disponibili* a diventare una faccia-superiore, è perfettamente lecito descrivere lo stato di un dado che non si trova sul tavolo come *sovrapposizione* di sei diversi autostati dell'osservabile faccia-superiore (vedi la Figura11). Si tratta di uno *stato di sovrapposizione* rispetto alla misura dell'osservabile faccia-superiore, perché una faccia-superiore del dado non è stata ancora creata. Ma più importante ancora, e più semplicemente, si tratta di uno stato di sovrapposizione perché il dado non si trova sul tavolo.

RICCARDO: Suona un po' strano usare i concetti di "autostato" e di "stato di sovrapposizione" in relazione al lancio di un dado.

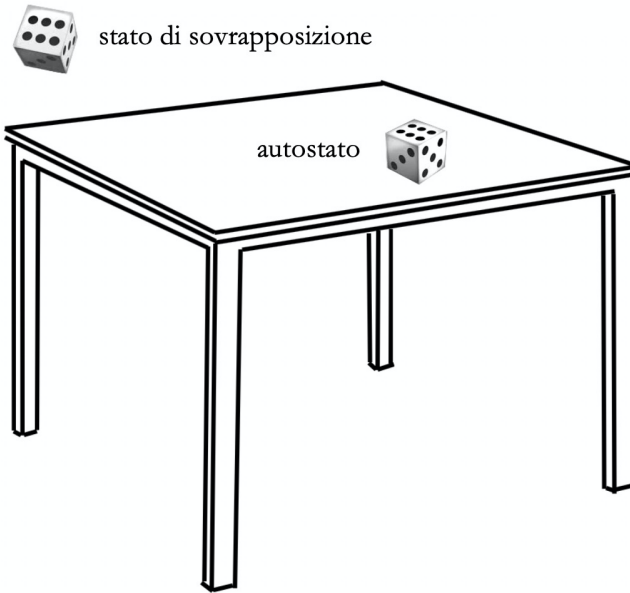


Figura 11 Un dado “fuori-tavolo” (a sinistra), corrispondente a uno stato di sovrapposizione, e un dado “sul-tavolo”, corrispondente a un autostato, qui relativo alla faccia-superiore numero 6.

TEODORICO: Sono d'accordo, ma nonostante questa stranezza, vediamo dove ci porta questo modo di descrivere il gioco del lancio del dado. Se Laplace l'avesse descritto come un processo di misura, avrebbe osservato che a parte le situazioni particolari in cui il dado è già sul tavolo, non poteva prevedere l'esito di una misura, anche conoscendo perfettamente lo stato del dado prima della misura. In altre parole, avrebbe osservato che non poteva associare la sua mancanza di conoscenza circa l'esito della misura a una conoscenza incompleta dello stato del dado. Tuttavia, avrebbe anche osservato che una previsione probabilistica dei diversi esiti restava possibile, in conformità con la sua regola di Laplace. Vorrei aggiungere che Laplace era perfettamente consapevole del fatto che oltre a questi processi indeterministici associati alle misure della faccia-superiore, c'erano anche quelli deterministici, come quando decideva di prendere il dado dal tavolo e posizionarlo in un altro luogo, in un movimento perfettamente controllato e reversibile. In altre parole, questo Laplace fittizio di cui sto parlando, che probabilmente vive in uno dei mondi paralleli descritti da DeWitt, si trovava in una

situazione che concettualmente e strutturalmente parlando è molto simile a quella di un fisico quantistico confrontato con il problema della misura. Ecco perché penso valga la pena chiedersi se c'è qualche possibilità che il Laplace di questo ipotetico mondo parallelo avesse potuto considerare un'interpretazione a molti mondi per risolvere la sua versione *ante litteram* del problema della misura.

RICCARDO: In questo momento ho la strana sensazione di trovarmi in uno stato di sovrapposizione di tipo cognitivo: da un lato capisco perfettamente perché ti stai ponendo questa domanda, ma dall'altro davvero non comprendo perché te la poni. Comunque, resto convinto che, nonostante le somiglianze concettuali e strutturali che hai evidenziato, il tuo "Laplace parallelo" non era confrontato con nessun tipo di problema.

TEODORICO: Sono perfettamente d'accordo con te su questo, e lascia anche che ti dica perché: sebbene un dado che non si trovi sul tavolo è senza dubbio in uno stato di potenzialità rispetto alla misura della sua osservabile faccia-superiore, cioè in uno stato caratterizzabile come sovrapposizione di autostati, relativi agli esiti possibili, è anche indubbio che il dado si trova in uno stato perfettamente ben definito, sempre appartenente alla stessa realtà a un solo mondo. Questa realtà a un solo mondo, tuttavia, è più grande del mero tavolo da gioco: i dadi possono essere sul-tavolo, e possedere un valore ben definito della loro faccia-superiore, ma possono anche essere fuori-tavolo, pur rimanendo parte dello stesso mondo, che si estende ovviamente oltre i confini del tavolo. Quindi, spero sarai d'accordo con me, un Laplace che adottasse un'interpretazione everettiana apparirebbe ai suoi colleghi come un individuo piuttosto eccentrico, che finge di vivere entro i confini ristretti della superficie di un tavolo da gioco, credendo che se un dado può comportarsi in modo strano, *non-locale*, come se non appartenesse sempre allo spazio del tavolo, questo sarebbe perché esistono molti mondi-tavolo interagenti nel vasto multiverso. Dimmi, tu adotteresti una a tale "visione a molti tavoli", se ti trovassi al suo posto?

RICCARDO: Ciò che dici è molto interessante, e naturalmente non adotterei mai una "visione del mondo a molti tavoli", se fossi al posto di quel Laplace, e questo per la stessa ragione che evochi tu:

vedo perfettamente con i miei occhi che il dado può esistere in uno spazio di più alta dimensione, che non è lo spazio della superficie del tavolo; quindi, non ho bisogno di ipotizzare l'esistenza di eventuali "tavoli paralleli". Ma il fatto stesso che io possa vedere il dado quando è fuori-tavolo è anche la ragione che mi fa dubitare che la tua metafora sia davvero pertinente.

TEODORICO: Oppure, al contrario, possiamo dire che è proprio questo il suo interesse: tutto avviene sotto i nostri occhi e questo è sicuramente di aiuto nel guidare la nostra intuizione. Tra l'altro, non solo l'esempio del dado ci permette di vedere che uno stato – fuori-tavolo – di sovrapposizione andrebbe considerato come elemento autentico di una realtà a un solo mondo, ma ci mostra anche quello che avviene nel corso di una misura quantistica, e come le probabilità quantistiche siano in grado di emergere.

RICCARDO: Vedi, sono d'accordo che nel tuo esempio un dado fuori-tavolo corrisponda a un elemento di realtà autentico e che entro il paradigma della tua discussione questo non possa essere inteso come una mera rappresentazione matematica di una collezione di autovettori collassati, associati ai diversi "mondi-tavolo". Ma il problema del tuo esempio è che è troppo semplificato: è davvero solo una metafora, quasi un'allegoria, troppo distante dalla struttura hilbertiana che ci ha rivelato la teoria quantistica. Per spiegarti perché non credo che la strana misura della faccia-superiore di un dado possa seriamente rappresentare una misura quantistica, prendi la regola di Laplace: le probabilità dei sei diversi esiti sono tutte uguali, non dipendono dallo stato del dado prima della misura. Invece, la regola quantomeccanica di Born descrive una statistica dove gli esiti dipendono dallo stato di pre-misurazione dell'entità misurata.

TEODORICO: Sono d'accordo con te che l'esempio del dado costituisca un modello molto semplice, a dire il vero troppo semplice. Ma non perché non sarei in grado di descrivere una situazione sperimentale più articolata: se mi sono limitato a considerare un numero minimo di elementi era solo per illustrarti in modo semplice questo "punto di vista a un solo mondo". Sono pure d'accordo con te sul fatto che la regola di Laplace sia molto diversa dalla regola Born. Considera però che per descrivere correttamente la statistica degli esiti della misura della faccia-superiore non possiamo usare la

regola di Laplace in senso stretto, ma una forma già modificata della stessa. Infatti, la probabilità $P_\psi(n)$ dell'esito n , con $n = 1, \dots, 6$, è uguale a $1/6$ soltanto se lo stato ψ di pre-misurazione corrisponde a uno stato fuori-tavolo, mentre è uguale a 1 se il dado è già sul tavolo e mostra la faccia-superiore n , ed è uguale a 0 se è già sul tavolo e mostra una faccia-superiore m , con m diverso da n . Riassumendo:

$$P_\psi(n) = \begin{cases} \frac{1}{6}, & \text{se } \psi \equiv \text{fuori-tavolo} \\ 1, & \text{se } \psi \equiv \text{autostato } n \\ 0, & \text{se } \psi \equiv \text{autostato } m \neq n \end{cases}$$

Quindi, vedi, siamo già in una situazione in cui la probabilità non è del tutto insensibile allo stato del dado prima della misura. Questo perché la misura della faccia-superiore, così come l'ho definita, è una cosiddetta *misura del primo tipo* (Neumann 1955), cioè una misura tale che se una seconda misura, identica alla prima, venisse realizzata, subito dopo la prima, si otterrebbe lo stesso esito con certezza. Ma sono d'accordo, quanto ho descritto non è rappresentativo di ciò che solitamente accade in una misura quantistica. In realtà, dovremmo chiamare la misura della faccia-superiore del dado *misura solipsistica* (Aerts e Sassoli de Bianchi 2015a,b), essendo un processo in cui viene massimizzato l'aspetto creazione.

RICCARDO: Solipsistica? Che cosa avrebbe a che fare la mente dell'osservatore con tutto questo?

TEODORICO: Assolutamente nulla, sto solo usando il termine "solipsistico" in senso metaforico, per indicare che la misura non ci rivela quasi nulla circa l'entità misurata, considerando che tutti gli stati che non sono autostati sono statisticamente equivalenti, in quanto producono esattamente le stesse statistiche di risultati. In altri termini, non è possibile ricostruire, nemmeno in parte, uno stato prima della misura che non sia un autostato, analizzando la statistica dei risultati, e questo significa che l'*aspetto scoperta* della misura è ridotto al minimo. Naturalmente, c'è un motivo per cui i classici giochi d'azzardo sono stati associati unicamente a delle misure solipsistiche: è perché storicamente venivano usati per scommettere del denaro e naturalmente si voleva evitare che i giocatori, controllando lo stato prima della misura, potessero

umentare la probabilità di ottenere un esito finale specifico.

RICCARDO: Sì, questa è la ragione per cui sono stati chiamati “giochi d’azzardo” e non “giochi d’abilità”.

TEODORICO: Precisamente. Nessun livello di controllo è consentito dal protocollo di misura. Naturalmente, dal momento che noi non siamo interessati al gioco d’azzardo, ma alla fisica, siamo liberi di rimuovere questo vincolo ed esplorare delle misure che offrano un migliore equilibrio tra scoperta e creazione. Come avrai certamente notato, non ho specificato come il dado deve essere lanciato sul tavolo. Questo perché un essere umano non è solitamente in grado di controllare la traiettoria del dado e anche la più infinitesimale delle fluttuazioni può cambiare radicalmente l’esito di un lancio. Per questo motivo tutte le facce possono diventare una faccia-superiore, con uguale probabilità. Ma è certamente possibile, e facile, immaginare protocolli più sofisticati, che permettano di controllare alcuni aspetti del processo di lancio, e non altri, per esempio imponendo al dado di rotolare solo attorno a un asse predeterminato. Questo, come puoi immaginare, farà sì che la regola di Laplace non si applichi più, in quanto la scelta di un asse di rotolamento specifico, dato un orientamento iniziale del dado, potrà precludere alcune facce dal diventare facce-superiori. Ad assi di rotolamento differenti potranno allora essere associate delle osservabili faccia-superiore differenti, e dal momento che le rotazioni in generale non commutano, queste osservabili a loro volta non commuteranno. E come sono sicuro tu saprai, non appena abbiamo a che fare con delle osservabili incompatibili, la formula classica delle *probabilità totali* può facilmente essere violata, a causa della presenza di termini detti *di interferenza*. Ma si può anche andare oltre, e prendere in considerazione delle *misure di coincidenza*, eseguendo degli esperimenti con delle coppie di dadi in uno stato di *entanglement*, ossia, dadi che vengono incollati insieme, o collegati in un qualche altro modo, consentendo la *creazione di facce-superiori correlate*, quando vengono fatti rotolare contemporaneamente. E questo meccanismo di *creazione di correlazioni* è facilmente in grado di violare le famose *disuguaglianze di Bell* (vedi la Figura 12).

RICCARDO: Mi stai forse dicendo che possiamo creare degli effetti di interferenza facendo semplicemente rotolare un dado rispetto ad assi differenti e violare le disuguaglianze di Bell facendo rotolare

simultaneamente due dadi che sono stati collegati?

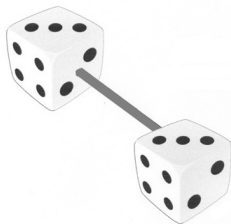


Figura 12 Se due dadi vengono collegati tramite un'asticella rigida, potranno rotolare contemporaneamente solo lungo la direzione ortogonale all'asticella, cosicché non tutte le coppie di esiti saranno possibili. In altre parole, facendo rotolare in modo coincidente i due dadi, si creeranno delle correlazioni tra le facce-superiori.

TEODORICO: Sì, questo è quello che ho avuto modo di scoprire, non senza una certa sorpresa devo dire. Leggendo e studiando due di questi nuovi articoli di cui ti ho parlato (Sassoli de Bianchi 2013b, 2014), e osservando come l'autore fosse in grado di mostrare che anche un dado può essere considerato al pari di un'entità quantistica quando viene sottoposto a determinati esperimenti, ho cominciato a dubitare che l'interpretazione a molti mondi fosse davvero quella che prende la meccanica quantistica più sul serio. Questo mi ha fatto anche pensare a quanti fenomeni quantistici questo nostro "Laplace alternativo" avrebbe potuto potenzialmente scoprire. E dal momento che stavo leggendo anche quel bellissimo libro di cui ti ho accennato all'inizio della nostra conversazione (Deutsch 1998), dove l'autore promuove la visione everettiana del multiverso, ho cominciato a pormi la mia strana domanda.

RICCARDO: Perché Laplace non era un everettiano?

TEODORICO: Esattamente.

RICCARDO: Ora capisco un po' meglio la tua traiettoria cognitiva.

TEODORICO: Vedi, questa metafora del tavolo da gioco è realmente emblematica della drammatica differenza che esiste tra una visione a un solo mondo allargato, in cui possono esistere degli autentici stati di sovrapposizione, al di fuori dello "spazio-tavolo", e una visione a molti mondi, dove esistono solo degli "spazi-tavolo". Puoi usare tante "tavole parallele" quante vuoi, ma questo non ti consentirà mai di catturare la realtà di uno stato fuori-tavolo, che è uno stato fondamentalmente diverso. Inoltre, in un multiverso fatto solo di tavoli, i processi di creazione non possono esistere. Questo perché un atto di creazione richiede uno stato di sovrapposizione,

cioè uno stato fuori-tavolo, e non esistono stati di questo genere nel multiverso. Questo perché i multi-mondisti hanno eliminato dalla teoria il postulato della proiezione, che descrive per l'appunto dei processi che comprendono non solo un aspetto scoperta, ma anche un aspetto creazione.

RICCARDO: Se ho capito bene, nella metafora del tavolo da gioco, il tavolo corrisponderebbe al nostro *spazio euclideo*, è corretto?

TEODORICO: Precisamente. Il tavolo sarebbe il luogo di residenza delle entità spaziali classiche, il teatro in cui, prima dell'avvento della fisica quantistica, si riteneva appartenessero tutte le entità fisiche. Tuttavia, se prendiamo la metafora sul serio, la nostra realtà sarebbe troppo grande per essere messa in scena in un teatro spaziale tridimensionale. Le entità microscopiche, per esempio, quando non sono parte integrante di strutture macroscopiche, passerebbero la maggior parte del loro tempo in uno stato “fuori-spazio”, cioè uno stato che descrive una condizione *non-spaziale*, generalmente indicata con il termine di “non-località”.

RICCARDO: Vedo bene il parallelo che stai tracciando tra la misura della faccia-superiore del dado e, ad esempio, la misura della posizione di un elettrone isolato. A causa del noto fenomeno della *diffusione (spreading) della funzione d'onda* sappiamo che lo stato dell'elettrone si evolve rapidamente in una sovrapposizione di stati di diversa posizione (vedi la Figura 13), e se prendo seriamente la tua idea che uno stato di sovrapposizione di questo tipo, che naturalmente non può più essere associato a una condizione di tipo spaziale, è pur sempre un elemento della nostra realtà, voglio dire, un elemento di una realtà a un solo mondo, allora devo concludere, come fai tu, che la maggior parte di questa realtà sarebbe non-spaziale, e corrisponderebbe nella tua metafora a tutti quei luoghi che un dado può occupare in aggiunta a quelli presenti sul tavolo di gioco.

TEODORICO: Hai colto perfettamente il punto.

RICCARDO: Quello che mi piace di questo punto di vista è che anch'esso riconosce, proprio come il punto di vista di Everett, che la nostra realtà racchiude molto di più di quello che i nostri occhi sono in grado di vedere.

TEODORICO: Sì, ed è per questo che ero così interessato ad avere

con te questa discussione sulle “realtà allargate”: mi ricordavo infatti di come eravamo entrambi affascinati dall’allargamento di prospettiva offerto dall’interpretazione everettiana. Ma quando ho scoperto che anche degli oggetti semplici come dei dadi potevano diventare quantistici, la visione everettiana ha cominciato ad apparirmi assai meno convincente. Tu che mi dici?

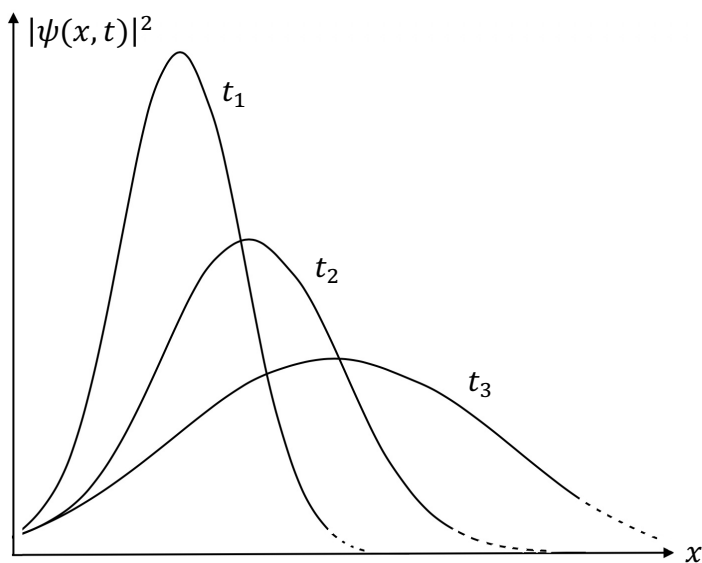


Figura 13 Un esempio di evoluzione della (densità di) probabilità $|\psi(x, t)|^2$ di un’entità microscopica. Col passare del tempo ($t_1 < t_2 < t_3$), l’entità si delocalizza, nel senso che il suo stato diviene una sovrapposizione sempre più estesa di stati associati alle diverse posizioni spaziali x . Questo fenomeno è detto di diffusione (*spreading*) della funzione d’onda.

RICCARDO: Non posso parlare per gli everettiani, dacché non sono sicuro di essere uno di loro. La mia comprensione di questi temi delicati è ancora in evoluzione, e probabilmente continuerà ad esserlo per molto tempo. Tuttavia, se cerco di mettermi nei panni di un multi-mondista convinto, ti direi che non posso pensare di cambiare la mia visione del mondo, nemmeno in via provvisoria, solo sulla base di una metafora, per quanto intelligente essa sia. L’interpretazione a molti mondi si basa su un linguaggio matematico sofisticato – quello hilbertiano – scoperto quando abbiamo cercato di comprendere la nostra realtà fisica al suo livello

più fondamentale, quello dei costituenti microscopici. Non c'è nulla *ad hoc* nel formalismo di Hilbert, e mi spingerei fino a dire che la visione a molti mondi è la sola ontologia realistica che può essere associata a tale formalismo. Al contrario, il tuo modo di descrivere gli esperimenti con i dadi mi sembra decisamente *ad hoc*: un puro “esercizio di stile”, difficile da prendere sul serio.

TEODORICO: Come everettiano convinto sei stato molto convincente.

RICCARDO: Ad essere sincero, penso che l'obiezione che ti ho appena fatto sia piuttosto seria.

TEODORICO: Certo. Ma allora dimmi, rimanendo sempre nei panni di un everettiano convinto: che cosa renderebbe questo mio “esercizio di stile” più serio ai tuoi occhi, e meno *ad hoc*?

RICCARDO: Per cominciare, sapresti fornirmi un esempio di un'entità macroscopica, sulla falsariga del tuo esempio metaforico del dado, perfettamente in grado di simulare con il suo comportamento un sistema quantistico? Intendo dire con questo un *isomorfismo* perfetto. Puoi descrivermi un modello esplicito in cui la regola di Born, e non una qualche modifica *ad hoc* della regola di Laplace, possa essere interamente derivata e spiegata, e in cui uno stato di sovrapposizione possa essere visto come condizione oggettiva dell'entità in esame, entro lo stesso uni-mondo? Se sei in grado di fare questo, allora certamente inizierei a prestare molta più attenzione al tuo punto di vista.

TEODORICO: Questo è esattamente quello che mi sono chiesto anch'io, durante la lettura di quegli articoli sulla quantisticità di un dado. E con grande stupore ho scoperto che delle “macchine quantistiche” macroscopiche erano di fatto state descritte in altri articoli della collezione che stavo leggendo e che mi ha fatto rimettere in questione la concezione a molti mondi. Sorprendentemente, queste macchine quantistiche sono in grado di modellizzare completamente un processo di misura quantistico. Un esempio paradigmatico è la cosiddetta “macchina quantistica di spin” (*spin-quantum machine*), che descrive delle misure perfettamente isomorfe a quelle effettuate sullo spin di un'entità di spin-1/2 (Aerts 1986, 1998a,b, 1999; Sassoli de Bianchi 2013a). E per quanto riguarda la regola di Born, anch'essa può essere ricavata in modo

semplice e diretto dal modello.

RICCARDO: Adesso hai tutta la mia attenzione: sono davvero impaziente di scoprire come funziona questa improbabile macchina di spin.

TEODORICO: Come vedrai, è molto semplice. L'entità sottoposta alle misure è un corpuscolo materiale puntiforme, localizzato sulla superficie di una sfera cava tridimensionale, di raggio unitario. I diversi stati del corpuscolo corrispondono quindi ai diversi luoghi che questo può occupare su tale superficie.

RICCARDO: Si tratta di una rappresentazione della famosa *sfera di Bloch* (vedi la Figura 14)?

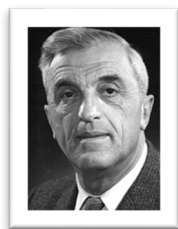


Figura 14 *Felix Bloch* (1905–1983) è stato un fisico svizzero naturalizzato statunitense, che ha contribuito alla nascita e sviluppo della *risonanza magnetica nucleare*. Fu il primo direttore generale del CERN. Tra le altre cose, a lui si deve la rappresentazione geometrica dello spazio degli stati di un sistema quantistico bidimensionale, oggi detta *sfera di Bloch*.

TEODORICO: Precisamente, e come sai, ogni punto della sfera di Bloch si trova in una corrispondenza uno-a-uno con lo stato di spin di un'entità di spin-1/2.

RICCARDO: Di solito considero i punti della sfera di Bloch unicamente come rappresentazione astratta dei vettori complessi di uno spazio di Hilbert a due dimensioni, è quindi un po' strano considerarli come le posizioni di un punto materiale, ma ti prego continua.

TEODORICO: Ora ti dirò come sono definiti, *operazionalmente* parlando, i processi di misura su questo corpuscolo materiale puntiforme. Ogni possibile diametro della sfera, caratterizzato da due opposti *versori* (vettori di modulo unitario) \mathbf{n} e $-\mathbf{n}$, definisce una diversa *osservabile* $S_{\mathbf{n}}$. Per misurare $S_{\mathbf{n}}$, la procedura è la seguente: un elastico uniforme e appiccicoso viene posto in tensione tra \mathbf{n} e $-\mathbf{n}$. Quindi, si lascia “cadere” il corpuscolo materiale sull'elastico, dalla sua posizione iniziale (specificata da un vettore \mathbf{r}), lungo una traiettoria ortogonale alla direzione

dell'elastico, ed essendo quest'ultimo appiccicoso, il corpuscolo si attaccherà fermamente ad esso. A questo punto, si attende che l'elastico si rompa, in un punto che in alcun modo è possibile prevedere in anticipo, cosicché il corpuscolo, incollato a uno dei due frammenti dell'elastico, verrà trainato verso uno dei due punti opposti di ancoraggio, \mathbf{n} o $-\mathbf{n}$, e tale posizione corrisponderà all'esito finale dell'esperimento, vale a dire allo stato acquisito dall'entità in seguito alla misura di S_n . Con un po' di trigonometria elementare è facile calcolare le probabilità di transizione verso questi due possibili stati finali e mostrare che corrispondono esattamente alle probabilità che si ottengono in una tipica misura di *spin* in un esperimento di tipo *Stern-Gerlach* (vedi la Figura 15).

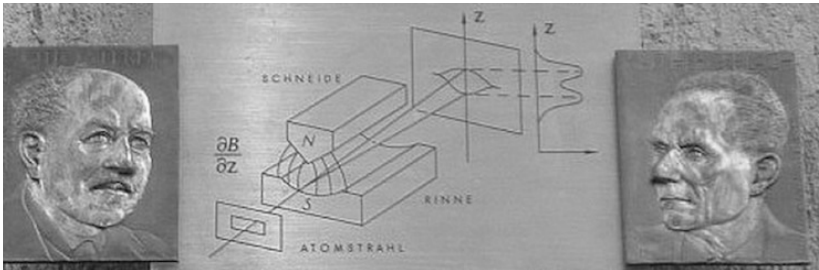


Figura 15 Nella targa commemorativa dell'esperimento di *Stern-Gerlach* si può leggere: "Nel febbraio del 1922, la scoperta fondamentale della quantizzazione spaziale dei momenti magnetici negli atomi fu fatta in questo edificio del Physikalischer Verein, Frankfurt am Main, da *Otto Stern* e *Walther Gerlach*. L'esperimento di Stern-Gerlach è il fondamento di importanti sviluppi della fisica e tecnologia del ventesimo secolo, come il metodo della risonanza nucleare, l'orologio atomico, o il laser. Otto Stern ricevette il premio Nobel per questa scoperta nel 1943".

Infatti, la probabilità che il corpuscolo termini la sua corsa nel punto \mathbf{n} è data dalla lunghezza del frammento di elastico tra il corpuscolo e il punto opposto $-\mathbf{n}$, diviso per la lunghezza totale dell'elastico, che è due volte il raggio unitario della sfera. Pertanto, se θ è l'angolo tra \mathbf{n} e \mathbf{r} , si ottiene che la probabilità dell'esito \mathbf{n} è data da:

$$P_r(\mathbf{n}) = \frac{1}{2}(1 + \cos \theta) = \cos^2 \frac{\theta}{2}$$

che è esattamente la probabilità quantistica $|\langle \mathbf{n} | \mathbf{r} \rangle|^2$ che si ottiene

quando si misura l'osservabile di spin

$$S_n = \frac{\hbar}{2} (|\mathbf{n}\rangle\langle\mathbf{n}| - |-\mathbf{n}\rangle\langle-\mathbf{n}|)$$

su un'entità di spin-1/2, preparata nello stato $|\mathbf{r}\rangle$, secondo la regola di Born. Allo stesso modo, la probabilità che il corpuscolo termini la sua corsa nel punto diametralmente opposto $-\mathbf{n}$, è data dalla lunghezza del frammento di elastico tra il corpuscolo e il punto \mathbf{n} , diviso per la lunghezza totale dell'elastico. Pertanto, la probabilità dell'esito $-\mathbf{n}$ è data da:

$$P_r(-\mathbf{n}) = \frac{1}{2}(1 - \cos \theta) = \sin^2 \frac{\theta}{2}$$

che ancora una volta è esattamente la probabilità quantistica $|\langle-\mathbf{n}|\mathbf{r}\rangle|^2$, data dalla regola di Born, per la misura della summenzionata osservabile di spin. E naturalmente, se si ripete la misura con il corpuscolo in uno dei due punti estremi dell'elastico, il medesimo risultato verrà ottenuto con certezza, il che significa che il processo appena descritto obbedisce alla “condizione del primo tipo” di von Neumann. Ho fatto uno schizzo del processo, così ti sarà più facile visualizzarlo (vedi la Figura 16).

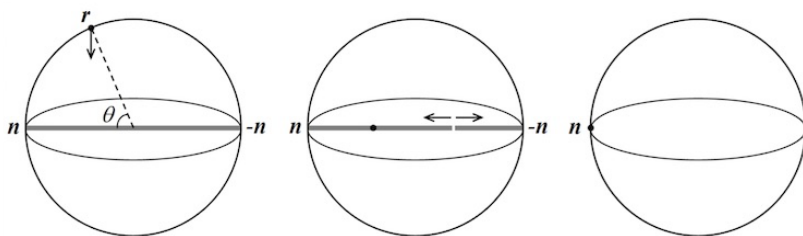


Figura 16 Lo svolgimento di un processo di misura nella macchina quantistica di spin, con il corpuscolo inizialmente situato in \mathbf{r} che “cade” ortogonalmente sull'elastico appiccicoso, il quale poi si rompe in un punto imprevedibile e contraendosi traina il corpuscolo in uno dei due punti estremi, corrispondenti ai due esiti possibili della misura. In questo caso, l'esito è \mathbf{n} .

RICCARDO: Davvero considerevole, lo devo ammettere. Le probabilità quantistiche prodotte da questa “macchina” risultano dalla rottura imprevedibile della banda elastica, giusto?

TEODORICO: Esattamente. Per ottenere le probabilità quantistiche

si deve usare un elastico *uniforme*, cioè una struttura che abbia la stessa possibilità di rottura in ognuno dei suoi punti. Ma naturalmente, si è liberi di definire misure molto più generali, considerando anche degli elastici *non uniformi* (Aerts e Sassoli de Bianchi 2014, 2015a,b). Se per esempio si usa un elastico che può rompersi soltanto nelle sue due estremità, con uguale probabilità, le due transizioni avranno luogo sempre con probabilità $1/2$, a prescindere dallo stato di pre-misura in cui si trova il punto materiale (specificato dal vettore \mathbf{r}).

RICCARDO: Si tratterebbe in questo caso di una misura di tipo solipsistico, come nel tuo esempio precedente del dado?

TEODORICO: Sì, di una misura in cui l'aspetto creazione viene massimizzato e di conseguenza l'aspetto scoperta viene minimizzato.

RICCARDO: È possibile definire anche delle misure che minimizzano l'aspetto creazione e massimizzano l'aspetto scoperta?

TEODORICO: Certo, sono associate a degli elastici che si possono rompere in un unico punto predeterminato, così che sia possibile prevedere in anticipo se il corpuscolo, in un dato stato iniziale, finirà in \mathbf{n} o in $-\mathbf{n}$, escludendo ovviamente la circostanza eccezionale di un corpuscolo che “atterrerebbe” esattamente sul punto di rottura, in quanto ciò corrisponderebbe a una situazione di equilibrio instabile. Gli elastici che si possono rompere in un solo punto prestabilito descrivono dei processi quasi deterministici, detti *misure pure*.

RICCARDO: Perché pure?

TEODORICO: Perché sono associate a una *singola interazione di misura*. Vedi, ogni punto rompibile dell'elastico corrisponde a una diversa interazione tra l'elastico e il corpuscolo ad esso appiccicato. Questo significa che un elastico uniformemente rompibile è espressione di una collezione di diverse *misure pure potenziali*, ciascuna associata a una diversa interazione di misura. Ho letto che esiste una nozione matematica specifica, detta *esperimento prodotto* (Aerts 1982, Piron 1976), che permette di definire in modo generale queste collezioni di misure pure potenziali, ma vediamo di mantenere semplice la discussione. Prima di cadere ortogonalmente sull'elastico, il

corpuscolo posizionato in \mathbf{r} si trova in uno stato di sovrapposizione rispetto alla misura di S_n , se $\mathbf{r} \neq \pm \mathbf{n}$. Questo stato di sovrapposizione corrisponde a un elemento di realtà dell'*uni-mondo sferico* del corpuscolo, come possiamo entrambi verificare con i nostri occhi, ed è espressione del fatto che non possiamo prevedere in quale punto, in ultimo, l'elastico si romperà. Quando il corpuscolo cade ortogonalmente sull'elastico, sperimenta una sorta di processo di *decoerenza*, e quando si attacca all'elastico il suo stato descrive ancora una "sovrapposizione di possibilità," se non altro fino a quando l'elastico rimane ancora integro. Quando si rompe, *una sola* delle possibili interazioni di misura viene attualizzata e il corpuscolo viene di conseguenza trainato verso *uno solo* dei due punti finali possibili. Com'era il caso per l'esperimento con il dado, non c'è ovviamente alcun bisogno di ipotizzare l'esistenza di multipli mondi ramificanti in interazione per spiegare il funzionamento della macchina quantistica di spin, l'esistenza di *multiple interazioni di misura* essendo più che sufficiente. In questo modo, non solo possiamo mantenere la nostra realtà all'interno di un solo mondo, ma possiamo altresì arricchirne la trama con l'aggiunta degli stati di sovrapposizione, che descrivono una dimensione di *potenzialità autentica*. Questa realtà a un solo mondo non contiene ogni situazione classica che noi immaginiamo possa essere successa o potrà succedere: si tratta infatti di una realtà in cui è ammessa una chiara distinzione tra "ciò che esiste" e "ciò che possibilmente può essere posto inesistenza". In altri termini, si tratta di una realtà in cui le nostre esperienze, ed esperimenti, sono in grado di contenere non solo degli aspetti di scoperta, ma anche di creazione, e in cui gli elastici rompibili non vengono confusi con gli elastici rotti! Ultimo ma non meno importante, si tratta di una realtà in cui la regola di Born può essere interamente derivata e spiegata, come media uniforme su tutte le possibili interazioni di misura (Aerts 1986, Coecke 1995, Aerts and Sassoli de Bianchi 2014). Se ricordo bene, la derivazione della regola di Born resta problematica nell'interpretazione a molti mondi.

RICCARDO: Alcuni everettiani hanno affermato di avere ricavato la regola di Born ragionando a partire dalla teoria delle decisioni (Deutsch 1999, Wallace 2003), ma per quanto ne so la validità della loro derivazione rimane ad oggi controversa, a causa di problemi di

circularità nelle loro argomentazioni (Barnum 2000, Baker 2007). Quindi, sono davvero colpito dal fatto che in questa macchina quantistica di spin la regola di Born può essere derivata in modo così semplice e oggettivo. Di sicuro, se un tale modello potesse essere preso sul serio, come descrizione di una vera misura quantistica, non solo rimetterebbe completamente in questione l'interpretazione a molti mondi, suggerendo la sua sostituzione con un'interpretazione *a molte interazioni di misura*, ma anche tutte le altre interpretazioni attualmente esistenti della fisica quantistica.

TEODORICO: Penso anch'io che questa derivazione della regola Born sia davvero notevole. Non solo perché, per quanto mi è dato di sapere, l'interpretazione a molti mondi non è stata in grado di derivarla in modo convincente, ma anche perché nessuna interpretazione della meccanica quantistica sembra essere mai riuscita in questo (Cassinello and Sanchez-Gomez 1996, Caves and Schack 2005, Schlosshauer and Fine 2005), a parte beninteso questa interpretazione "a molte misure" che ho recentemente scoperto (Aerts 1986, Coecke 1995, Aerts and Sassoli de Bianchi 2014, 2016). Ma perché affermi che non possiamo prendere il modello di spin che ti ho presentato sul serio? Tutte le misure sono state definite in modo preciso e coerente, e il modello è perfettamente isomorfo a un'entità quantistica di spin- $1/2$. Ovviamente, non si tratta di una entità quantistica di spin- $1/2$, ma l'insieme dei suoi stati ha esattamente la stessa struttura, e possiede esattamente le stesse osservabili. Quindi, se l'interpretazione a molte interazioni di misura permette di spiegare l'origine delle probabilità quantistiche e la realtà degli stati di sovrapposizione nel caso della macchina quantistica di spin, perché non puoi considerare che tale spiegazione possa essere valida, *mutatis mutandis*, anche per delle entità microscopiche, come ad esempio gli elettroni, i protoni, i neutroni, eccetera?

RICCARDO: Permettetemi di essere chiaro: penso che la possibilità di sostituire il postulato della regola di Born con una derivazione non soggettiva e non circolare della regola non sia solo un obiettivo straordinario da poter raggiungere nella teoria quantistica, indicherebbe anche che l'approccio in grado di farlo ha delle buone possibilità di fornire l'immagine corretta di ciò che realmente accade nel corso di una misura quantistica. Ora, il modello della macchina

quantistica di spin è sicuramente affascinante, ma ho paura che rimanga, come la metafora del dado, una costruzione *ad hoc*.

TEODORICO: Sono confuso. Prima mi hai detto che se ero in grado di esibire un modello che può fare ciò che la macchina quantistica di spin è in grado di fare avresti preso l'intero approccio più seriamente. Cosa ti ha fatto cambiare idea così repentinamente?

RICCARDO: È semplice: mentre mi descrivevi il modello, mi sono improvvisamente ricordato che *Simon Kochen* ed *Ernst Specker* (vedi le Figure 17 e 18) negli anni Sessanta del secolo scorso, sono stati in grado anche loro di esibire una realizzazione macroscopica esplicita dello spin di un'entità quantistica di spin-1/2 (Kochen and Specker 1967). E mi sono anche ricordato che hanno sottolineato, a più riprese, che il loro modello poteva essere costruito solo per un'entità quantistica in uno spazio di Hilbert di dimensione non superiore a due. In aggiunta a ciò, so anche che il celebre *teorema di Gleason* (1957) (vedi la Figura 19), che afferma che la regola di Born consegue in modo naturale dalla struttura dello spazio complesso di Hilbert (se s'ipotizza che i suoi vettori forniscano una descrizione completa degli stati di un'entità fisica), è valido solo per degli spazi di Hilbert di dimensione tre o maggiore. Sono sicuro che sei perfettamente consapevole che il teorema di Gleason è stato determinante nell'escludere l'esistenza delle spiegazioni a variabili nascoste per la teoria quantistica, senza però escludere tale possibilità per i sistemi bidimensionali. Ora, la tua macchina quantistica di spin è isomorfa a un sistema a due dimensioni, e da quello che mi sembra di capire si tratta proprio di un modello a variabili nascoste. Quindi, la mia ipotesi per il momento è che quest'affascinante costruzione sia solo un'anomalia bidimensionale, e che la spiegazione a molte interazioni di misura non possa assurgere a validità universale e soppiantare le altre interpretazioni, come quella a molti mondi. Vorrei aggiungere che la sola teoria a variabili nascoste che non sia stata invalidata dal teorema di Gleason, e dagli altri *teoremi d'impossibilità* (Von Neumann 1932, Bell 1966, Jauch 1963, Kochen and Specker 1967, Gudder 1970), è la *meccanica bohmiiana* (Bohm 1952, 1957). Questo perché nell'approccio di *David Bohm* (vedi la Figura 20), così come nell'interpretazione a molti mondi, il collasso della funzione d'onda non viene considerato un processo fisico, non avendo conseguenze

per le traiettorie delle particelle puntiformi descritte dalla teoria. Ma non si tratta probabilmente di un caso, perché l'*onda pilota* di Bohm può essere interpretata come funzione d'onda del multiverso, che guida l'universo singolo di Bohm lungo la sua traiettoria. A questo proposito, se ricordo bene, David Deutsch ha detto una volta che (Deutsch 1996) "le teorie dell'onda pilota sono teorie a universi paralleli in uno stato di diniego cronico".



Figura 17 *Simon Bernhard Kochen* è un matematico canadese, noto per i suoi contributi in teoria dei modelli, teoria dei numeri e meccanica quantistica. Nel 1967, ha dimostrato il teorema di impossibilità oggi noto con il nome di *teorema di Kochen-Specker*. Nel 2004, assieme a *John Horton Conway* ha inoltre dimostrato il "free will theorem" (teorema del libero arbitrio).

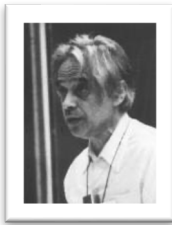


Figura 18 *Ernst Paul Specker* (1920-2011) è stato un matematico svizzero che si è occupato di logica matematica e di teoria degli insiemi, conseguendo però i suoi successi più importanti nell'ambito della meccanica quantistica, con la dimostrazione del *teorema di Kochen-Specker*, che mostra come certe tipologie di teorie a variabili nascoste siano impossibili.



Figura 19 *Andrew Mattei Gleason* (1921-2008) è stato un matematico con contributi fondamentali in vaste aree della matematica. A lui si deve il teorema che porta il suo nome, che dimostra come la regola di Born per le probabilità quantistiche si deduca da alcune ipotesi su come i processi di misura vengono rappresentati matematicamente.

TEODORICO: Ora capisco meglio le ragioni della tua esitazione. Tutto quello che dici è certamente corretto, ma stai facendo un po' di confusione. Lasciami spiegare. Il modello della macchina quantistica di spin è indubbiamente un modello a variabili nascoste; tuttavia, le variabili nascoste non sono qui associate allo stato dell'entità, ma alle interazioni di misura. Per questo la loro introduzione non ripristina il determinismo, che è quello che i fisici hanno storicamente cercato di ottenere esplorando i diversi modelli a variabili nascoste. In altre parole, i teoremi d'impossibilità (*no-go*

theorems) vietano la sostituzione della meccanica quantistica con una teoria più fondamentale in cui le entità si troverebbero sempre in autostati di tutte le misure significative, cioè con una teoria completamente deterministica in cui le probabilità di avere o non avere una determinata proprietà possono assumere solo i valori **0** o **1**. Questo non è il caso della macchina quantistica di spin, che è un modello a “misure nascoste” e pertanto non può essere fermato dai celebri teoremi d’impossibilità. Può nondimeno essere fermato da quel pregiudizio che porta molti scienziati a pensare che una misura ideale debba obbligatoriamente essere un processo senza fluttuazioni, e che la nostra realtà fisica debba essere sempre rappresentabile entro un teatro spaziale, o spaziotemporale. Quindi, spero di averti rassicurato: i teoremi d’impossibilità non si applicano a un’interpretazione a molte misure.



Figura 20 *David Bohm* (1917-1992) è stato un fisico e filosofo statunitense, noto soprattutto per aver elaborato un’interpretazione della meccanica quantistica che ha espanso il concetto di onda pilota inizialmente proposto da *Louis de Broglie*, ponendosi così anche tra i critici dell’interpretazione di Copenaghen.

RICCARDO: Questo è un punto importante, che mi accorgo ora di avere completamente frainteso. La macchina quantistica di spin non ha a che fare con l’aggiungere variabili allo stato dell’entità, ma con l’aggiungere interazioni ai suoi processi di misura, e i teoremi d’impossibilità non hanno in effetti alcun potere di impedire questa possibilità.

TEODORICO: Esattamente. Ma dimmi, ora che abbiamo chiarito questo punto essenziale, sei più favorevole nel considerare questa interpretazione a molte misure come un serio competitore nella descrizione della realtà quantistica?

RICCARDO: In un certo senso, sì, ma vedi, sto ancora pensando che se è possibile costruire un così bel modello meccanico per un’entità di spin- $1/2$, è solo perché lo spazio bidimensionale di Hilbert può essere rappresentato entro una sfera unitaria bidimensionale reale. E anche se, come hai giustamente osservato, i teoremi d’impossibilità non possono impedire la costruzione di un modello a molte misure al di là della situazione bidimensionale, diciamo per

un'entità di spin-1, considerando che la rappresentazione sferica di Bloch non esiste per degli spazi di Hilbert di dimensione tre o maggiore, resto convinto che questo meccanismo a molte misure sia più che altro una sorta di patologia bidimensionale. Quindi, per rispondere alla tua domanda, penso che potrei iniziare a prendere molto più sul serio questo approccio se fosse possibile usarlo per generalizzare la derivazione della regola di Born a un numero arbitrario di dimensioni. Come hai giustamente ricordato, nessuna derivazione generalmente accettata della regola Born è stata fornita ad oggi, il che naturalmente non significa che una tale derivazione sia impossibile, e se questa idea di aggiungere più interazioni di misura fosse in grado di farlo, ebbene, penso si tratterebbe di un vero e proprio punto di svolta.

TEODORICO: Sono d'accordo, e la grande notizia è che la regola di Born emerge di fatto in modo del tutto naturale e generale da questo approccio a molte misure, così come ho avuto modo di apprendere, non senza una certa sorpresa (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014, 2016), anche perché l'approccio è rimasto pressoché sconosciuto e questo nonostante il fatto che i primi risultati incoraggianti siano già apparsi quasi trent'anni fa (Aerts 1986).

RICCARDO: Penso che si debba restare molto prudenti. Se l'approccio è così poco dibattuto tra i fisici, ma avrebbe permesso di fare quello che tutte le altre interpretazioni, a quanto pare, non sono state in grado di fare, beh, forse allora che è semplicemente sbagliato.

TEODORICO: Sì, questa è stata la mia prima reazione. Poi però ho iniziato a studiare con attenzione la derivazione, da un punto di vista tecnico, e al meglio delle mie conoscenze posso affermare che non ci sono errori.

RICCARDO: Come si spiega allora questa mancanza di notorietà?

TEODORICO: Ad essere sincero, non lo so. La mia ipotesi è che potrebbe trattarsi di una combinazione di più fattori. Uno di questi sarebbe storico e relativo al fatto che l'interpretazione a molte misure è emersa dai risultati della *scuola di Ginevra di meccanica quantistica*, che in passato fu molto attiva nello sviluppo di un approccio operativo e assiomatico delle teorie fisiche, in particolare grazie al lavoro pionieristico di fisici come *Josef-Maria*

Jauch e *Constantin Piron* (vedi le Figure 21 e 22). Non era certamente l'unica scuola che indagava la meccanica quantistica secondo un approccio di tipo operativo, ma so che gran parte della ricerca in questo campo ha avuto luogo nei paesi non anglosassoni. Quindi, dal momento che oggi buona parte della ricerca fondamentale si fonda su una prospettiva ben diversa, quella di un paradigma a base di cosmologia e teoria delle stringhe, di origine anglosassone, questo sicuramente non ha contribuito a portare maggiore attenzione a queste importanti idee. Naturalmente, anche dei fattori psicologici potrebbero avere avuto un ruolo, come la difficoltà ad accettare che una misura non sia necessariamente un processo di scoperta, o che la nostra realtà non possa essere rappresentata nel troppo ristretto teatro spaziale, sia esso a tre, quattro o undici dimensioni, come ipotizzato da alcuni teorici delle stringhe.

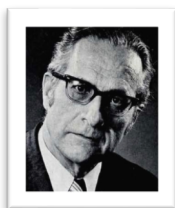


Figura 21 *Josef-Maria Jauch* (1914-1974) è stato un fisico teorico svizzero e americano. Con notevole rigore matematico ha contribuito in diversi ambiti della fisica teorica, come la teoria della diffusione quantistica, il processo di misurazione, il problema della causalità, il fenomeno dell'irreversibilità, l'invarianza di gauge, e i fondamenti stessi della meccanica quantistica.



Figura 22 *Constantin Piron* (1932-2012) è stato un fisico belga che ha lavorato per gran parte della sua carriera a Ginevra, in Svizzera. Ha contribuito allo sviluppo dell'approccio della cosiddetta *scuola di Ginevra sui fondamenti della meccanica quantistica* e a lui si deve un importante teorema di logica quantistica, sulla rappresentazione dei reticoli di proprietà quantistici.

RICCARDO: Ma i multi-mondisti accettano l'idea di una realtà fisica molto più estesa, tipicamente infinito-dimensionale.

TEODORICO: Hai ragione, ma ricorda che tutti questi molteplici mondi ramificanti rimangono essenzialmente dei "mondi-tavolo" di tipo classico, e non vi sono processi di creazione in un multiverso everettiano. Comunque, penso che ci sia un motivo in più che può aiutare a spiegare questa mancanza di conoscenza dei risultati dell'interpretazione a molte misure. A proposito, continuo a chiamarla in questo modo perché nella nostra discussione

l'abbiamo confrontata con l'interpretazione a molti mondi, ma il suo nome storico è *approccio a misure nascoste* (hidden-measurement approach), o *interpretazione a misure nascoste* (hidden-measurement interpretation).

RICCARDO: Quindi, quale sarebbe questo motivo in più a cui ti riferisci?

TEODORICO: È lo stesso che hai menzionato anche tu, quando hai dubitato che un modello a variabili nascoste potesse essere costruito al di là di una situazione a due soli esiti possibili, a causa dei teoremi d'impossibilità. Vedi, come ho avuto modo di leggere, la dimostrazione che è perfettamente possibile creare dei modelli a misure nascoste anche per delle entità quantomeccaniche generali, di dimensione finita o infinita, esiste da decenni (Aerts 1986, Coecke 1995). Ma è pur vero che solo nel caso bidimensionale era stato possibile fornire una modellizzazione al contempo naturale e completa del processo di misura, utilizzando la rappresentazione della sfera di Bloch.

RICCARDO: Ti riferisci alla macchina quantistica di spin che mi hai descritto?

TEODORICO: Sì. Penso che questa mancanza di una generalizzazione naturale della macchina quantistica di spin, per dei sistemi di dimensione superiore, possa in parte spiegare la mancanza di interesse per una spiegazione a base di misure nascoste. Posso infatti capire che per chi ha poca familiarità con gli approcci operazionali alla meccanica quantistica, la spiegazione sia rimasta difficile da valutare.

RICCARDO: Com'è allora che nel tuo caso le cose sono andate in modo diverso? Mi sembra che tu abbia molta considerazione per questo approccio.

TEODORICO: È vero, per lo stesso motivo per cui entrambi avevamo molta considerazione per l'interpretazione a molti mondi: penso che prenda la meccanica quantistica molto sul serio. Ma in aggiunta a questo, e diversamente dall'interpretazione a molti mondi, e da tutte le altre interpretazioni esistenti, è il solo approccio che io conosca che consente di derivare in modo fisicamente chiaro e matematicamente preciso la regola di Born. Non si tratta di un

aspetto minore, se consideri che la regola Born è il postulato centrale della meccanica quantistica. Ma c'è sicuramente anche un motivo più circostanziale che mi ha convinto dell'interesse di questo approccio. Ho avuto la fortuna di scoprire di recente dei lavori in cui gli autori fanno esattamente quella cosa che tutti volevano vedere: forniscono una generalizzazione naturale della macchina quantistica di spin (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014, 2016). Posso dirti che durante la lettura di questi articoli ho avuto un momento di vera e propria epifania: tutto a un tratto ho potuto comprendere che cosa sia una misura quantistica. Ero già abbastanza stupito quando gli autori avevano introdotto la macchina quantistica di spin, corrispondente al caso a due esiti, ma ero ancora più stupito quando hanno poi mostrato che l'intera costruzione può essere generalizzata in modo molto naturale per descrivere un numero arbitrario di esiti possibili.

RICCARDO: Ora sono davvero curioso, e interessato. Come possono farlo, dal momento che non esiste una sfera di Bloch al di là del caso bidimensionale?

TEODORICO: Questo è il punto: non è così, e questo è l'equivoco che probabilmente ha ritardato la scoperta di una generalizzazione naturale, a più dimensioni, dell'intero approccio. Vedi, la sfera di Bloch può essere generalizzata per rappresentare degli stati anche con un numero arbitrario di dimensioni. La differenza con il caso bidimensionale è che non tutti i punti della sfera saranno allora rappresentativi di uno stato, cioè, solo una porzione della sfera conterrà degli stati, ma si tratta di una porzione che formerà comunque un insieme *convesso*. Prima che ti spieghi in termini molto generali come tutto questo funziona, vorrei evidenziare un aspetto sul quale non ci siamo soffermati, quando ti ho descritto la macchina quantistica di spin. Quando il corpuscolo materiale, inizialmente nella posizione \mathbf{r} sulla superficie della sfera unitaria tridimensionale, viene sottoposto a un processo di misura, questo penetra all'interno della sfera, per poter entrare in contatto con l'elastico e incollarsi ad esso. Nella rappresentazione di Bloch, i punti che si trovano all'interno della sfera, come probabilmente sai, sono rappresentativi non dei *vettori di stato*, ma degli *operatori di stato*, solitamente denominati *matrici densità*.

RICCARDO: Sì, vengono utilizzati in meccanica quantistica per descrivere delle misture statistiche di vettori di stato.

TEODORICO: Possono certamente essere utilizzati a tal fine, ma la loro interpretazione come misture statistiche di vettori di stato non può essere presa in senso troppo letterale, essendo chiaro che una matrice densità può avere infinite rappresentazioni come combinazione lineare convessa di proiettori ortogonali unidimensionali, vale a dire, come mistura di vettori di stato. In altri termini, il formalismo hilbertiano già ci dice che una matrice densità non può essere coerentemente interpretata come descrizione di una *mistura attuale*, ma solo come descrizione di una *mistura potenziale*. Nella macchina quantistica di spin tutto questo è perfettamente evidente, se si osserva che i punti interni della sfera, rappresentati da vettori non-unitari, possono anch'essi essere sottoposti a diverse misure, e quindi non possono essere intrinsecamente associati a una coppia predeterminata di esiti.

RICCARDO: Sono d'accordo che siccome i punti interni della sfera corrispondono a degli stati *autentici* del corpuscolo materiale, e che nel linguaggio degli spazi di Hilbert vengono descritti da delle matrici densità, questi dovrebbero poter essere interpretati come degli stati "puri", nel senso di genuini, se non altro nell'ambito di questo particolare modello meccanico. Personalmente ho sempre e solo considerato le matrici densità come degli strumenti matematici utili, non come delle descrizioni della realtà oggettiva di un'entità. Stai forse suggerendo che la loro interpretazione, in quanto stati genuini, dovrebbe essere più generale e non limitarsi agli stati specifici del corpuscolo puntiforme della macchina di spin?

TEODORICO: Se prendo sul serio la macchina quantistica di spin, in quanto modellizzazione di ciò che realmente accade, in termini strutturali, nel corso di una misura quantistica, mi sembra una conclusione del tutto inevitabile. E in linea di principio è anche una conclusione verificabile, se solo troviamo un modo per sondare il dispiegarsi di un collasso quantistico (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014). Naturalmente, non vi è alcuna garanzia che ciò sia possibile, perché potrebbe benissimo essere che nel caso delle entità microscopiche il processo sia non solo non-spaziale, ma altresì non-temporale (o in parte non-temporale). Comunque, permettimi ora di spiegarti come si generalizza in modo naturale la macchina

quantistica di spin. Limiterò la mia descrizione al caso semplice di una misura a tre esiti possibili, cioè di un'osservabile con tre soli *autovalori*. Un esempio tipico può essere quello dello spin di un'entità di spin-1. Considererò unicamente la situazione di una misura *non degenera*. Questo non perché io ti voglia nascondere delle eventuali difficoltà: tutto quello che sto per dirti può essere magnificamente generalizzato, in modo del tutto naturale, a situazioni con un numero arbitrario di esiti, considerando anche le cosiddette misure degeneri. Semplicemente, non voglio perdermi in tecnicismi e mantenere la nostra discussione per lo più a un livello concettuale, anche perché sono sicuro che se come me rimarrai incuriosito da quello che sto per dirti, troverai poi il tempo di approfondire tutti gli aspetti matematici del modello (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014, 2015a,b, 2016).

RICCARDO: Certamente, spiegami solo a grandi linee in che modo il modello della macchina quantistica di spin può essere generalizzato; mi fido naturalmente che hai verificato la correttezza della matematica insita nel modello.

TEODORICO: Molto bene. Quello che è importante osservare è che la rappresentazione standard della sfera di Bloch si fonda sul fatto che le tre *matrici di Pauli* (vedi la Figura 23), che, come sai, sono matrici di *traccia* nulla, formano assieme all'operatore identità \mathbb{I} una base per l'insieme di tutti gli operatori lineari su \mathbb{C}^2 . Pertanto, è sempre possibile sviluppare su tale base una matrice densità, e dal momento che si tratta di una matrice *autoaggiunta*, di traccia uguale a 1, questa potrà generalmente scriversi nella forma:

$$D(\mathbf{r}) = \frac{1}{2}(\mathbb{I} + \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\sigma})$$

dove $\boldsymbol{\sigma}$ è un vettore tridimensionale le cui componenti sono le tre matrici di Pauli σ_i , $i = 1,2,3$, e \mathbf{r} è un vettore reale appartenente alla sfera unitaria tridimensionale. Se \mathbf{r} è di lunghezza unitaria, $D(\mathbf{r})$ è allora un operatore di proiezione unidimensionale, mentre se \mathbf{r} è di lunghezza inferiore a 1, si tratta di una matrice densità.



Figura 23 *Wolfgang Ernst Pauli* (1900-1958) è stato un fisico austriaco e uno dei padri fondatori della meccanica quantistica. A lui si deve, tra le altre cose, il famoso *principio di esclusione*, l'introduzione di specifiche matrici 2×2 come basi per le operazioni sugli spin, e l'ipotesi dell'esistenza dei *neutrini*.

RICCARDO: Sì, questa biiezione tra l'operatore di stato $D(\mathbf{r})$, e i vettori reali \mathbf{r} , appartenenti alla sfera unitaria, è esattamente l'espressione del ben noto *omomorfismo* tra $SU(2)$ e $SO(3)$. Non sapevo però che potesse essere generalizzato a dimensioni superiori.

TEODORICO: Non l'omomorfismo, beninteso, ma è ancora possibile rappresentare gli stati quantistici entro una sfera unitaria e, di conseguenza, le misure come delle "strutture elastiche rompibili" che agiscono al suo interno. Prendiamo in considerazione l'esempio di \mathbb{C}^3 . Anche in questo caso possiamo trovare delle matrici di traccia nulla che assieme all'operatore identità formano una base per tutti gli operatori lineari che agiscono su \mathbb{C}^3 , di modo che sia ancora possibile scrivere una matrice densità in tutta generalità nella forma:

$$D(\mathbf{r}) = \frac{1}{3}(\mathbb{I} + \sqrt{3} \mathbf{r} \cdot \boldsymbol{\lambda})$$

Nello stesso modo in cui le tre matrici di Pauli sono i generatori di $SU(2)$, le otto componenti λ_i , $i = 1, \dots, 8$, del vettore $\boldsymbol{\lambda}$, sono i generatori di $SU(3)$, e corrispondono alle cosiddette *matrici di Gell-Mann* (vedi la Figura 24). Dal momento che abbiamo otto generatori, il vettore reale \mathbf{r} rappresentativo dello stato dell'entità è ora a otto dimensioni. Come ho già precisato, un'importante differenza rispetto al caso a due esiti, in aggiunta all'aumento del numero di dimensioni, è che la sfera non è più completamente riempita di stati. Questo perché non tutti i suoi vettori possono essere associati a un operatore $D(\mathbf{r})$ che sia *positivo*.



Figura 24 *Murray Gell-Mann* (1929-2019) è stato un fisico statunitense a cui si deve (tra le altre cose) l'ipotesi dei *quark* e una classificazione delle particelle elementari scoperte sperimentalmente a partire dagli anni Cinquanta che sfrutta le proprietà di simmetria del gruppo $SU(3)$.

RICCARDO: Capisco, per avere ancora una rappresentazione degli stati nella sfera di Bloch, oltre il caso bidimensionale, il prezzo da pagare è la perdita della simmetria sferica, a causa dell'assenza di un omomorfismo tra $SU(3)$ e $SO(8)$.

TEODORICO: Sì, è così che stanno le cose, ma questa mancanza di simmetria sferica non è di per sé un problema. Infatti, ciò che importa nella modellizzazione dei processi di misura è che i vettori rappresentativi degli stati formino un insieme convesso chiuso, come è sempre il caso. Ma fammi spiegare come funziona la cosa. Un'osservabile non-degenere è caratterizzata da tre esiti distinti, associati a tre autostati distinti. Denotiamo \mathbf{n}_1 , \mathbf{n}_2 e \mathbf{n}_3 i tre vettori unitari associati a questi tre autostati ortogonali. È possibile dimostrare che all'interno della sfera otto-dimensionale questi formano esattamente un *triangolo equilatero inscritto*. Questa struttura triangolare bidimensionale rappresenta il contesto sperimentale relativo alla misura dell'osservabile in questione, così come la banda elastica unidimensionale rappresentava il contesto di una misura nel caso di un'osservabile a due esiti.

RICCARDO: Stai dicendo che è possibile associare una sorta di membrana elastica a questo triangolo equilatero e descrivere il processo di misura esattamente come hai fatto prima con l'elastico?

TEODORICO: Proprio così.

RICCARDO: Sarebbe fantastico.

TEODORICO: Sono d'accordo con te. Quindi, questa volta anziché una banda elastica uniforme e unidimensionale abbiamo a che fare con una membrana elastica uniforme e bidimensionale. Come prima, durante la misura il corpuscolo puntiforme, inizialmente nella posizione \mathbf{r} , "cadrà ortogonalmente" sulla superficie della membrana, rimanendo attaccato ad essa. In questo modo, andrà a definire tre sottoregioni triangolari distinte, delimitate dai segmenti

di retta che collegano la posizione del corpuscolo ai tre vertici della membrana. Devi pensare a questi segmenti di retta come a delle “linee di tensione” che alterano la fisica della membrana, nel senso che questa si romperà meno facilmente lungo di esse. Ora, una volta che il corpuscolo è atterrato sulla membrana, e si trova saldamente ancorato ad essa, a un certo momento quest’ultima si romperà, in un punto imprevedibile, appartenente a una di queste tre sottoregioni. La lacerazione si propagherà allora all’interno di questa specifica sottoregione, come un processo di tipo disintegrativo, ma non nelle altre due sottoregioni, a causa delle linee di tensione. Questo farà sì che i due punti di ancoraggio della sottoregione che subisce la disintegrazione si staccheranno, producendo il distacco della membrana, la quale, essendo elastica, si contrarrà in direzione dell’unico punto di ancoraggio rimasto, portando in quella posizione anche il corpuscolo attaccato ad essa, che in questo modo raggiungerà il suo stato finale, corrispondente all’esito della misura. Riesci a visualizzare il processo che sto descrivendo?

RICCARDO: Penso di sì, ma un disegno sarebbe sicuramente utile.

TEODORICO: Certo, a tal fine supponiamo che il risultato finale corrisponda al vertice descritto dal vettore \mathbf{n}_1 . Naturalmente, non posso disegnare la silhouette completa di una sfera otto-dimensionale, ma posso sicuramente rappresentare la sezione circolare bidimensionale contenente la membrana triangolare. Tra l’altro, mentre faccio il disegno (vedi la Figura 25), vorrei chiederti: non trovi sorprendente che sia possibile visualizzare in questo modo una misura quantistica, smentendo il preconetto assai diffuso che i processi quantistici siano impossibili da immaginare, a differenza dei processi classici? E questa volta il processo contempla tre esiti possibili, perciò non possiamo più sostenere di essere nell’ambito di una possibile anomalia bidimensionale.

RICCARDO: Sono d’accordo, è una cosa del tutto inaspettata, che sembra invalidare la famosa citazione di *Feynman* (vedi la Figura 26) dove il fisico statunitense affermava che nessuno capiva la meccanica quantistica (Feynman 1992). Ma come emerge la regola di Born da ciò che descrivi?

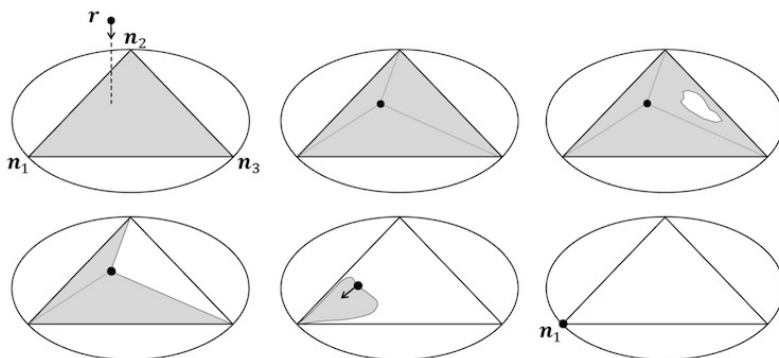


Figura 25 Il dispiegarsi di un processo di misura non degenera con tre esiti distinguibili: n_1 , n_2 e n_3 . Il corpuscolo rappresentativo dello stato, inizialmente situato in r , “cade ortogonalmente” sulla membrana triangolare elastica, definendo così tre diverse sottoregioni. La membrana si rompe quindi in una di esse, producendone la disintegrazione e il successivo distacco dei suoi due punti di ancoraggio, traendo in questo modo il corpuscolo puntiforme nella sua posizione finale, nella fattispecie n_1 .

TEODORICO: Come per il caso a due esiti, in modo molto semplice. Ogni possibile punto di rottura della membrana triangolare è associato a una misura pura potenziale, in grado di portare il corpuscolo in uno specifico autostato. Queste misure pure sono tutte deterministiche, salvo naturalmente quelle associate ai punti di rottura situati esattamente sulle linee di tensione, in quanto corrispondono a delle situazioni di equilibrio instabile, dove resta indeterminata la sottoregione che in ultimo si disintegrerà. Ma non dobbiamo preoccuparci di queste interazioni di misura eccezionali, poiché sono *di misura nulla* (nel senso della teoria della misura in analisi matematica) e non contribuiscono alla determinazione delle probabilità dei diversi esiti. Queste possono essere calcolate osservando che la membrana, essendo per ipotesi una struttura uniforme, la probabilità di rottura in una data sottoregione è data semplicemente dal rapporto tra la superficie della sottoregione e la superficie totale della membrana. Se fai questo calcolo correttamente, e qui naturalmente devi fidarti di me, otterrai esattamente la regola Born. In altre parole, le misure descritte dalla membrana uniforme sono perfettamente isomorfe alle misure di un'osservabile non degenera in uno spazio di Hilbert complesso tridimensionale.

RICCARDO: E mi dicevi che questo schema a “interazione multipla” può essere generalizzato a un numero arbitrario di esiti possibili e descrivere anche le situazioni delle misure degeneri?



Figura 26 *Richard Phillips Feynman* (1918-1988) è stato un fisico statunitense, noto per la sua teoria degli *integrali sui cammini* della meccanica quantistica, per l'elettrodinamica quantistica, la fisica della superfluidità dell'elio liquido e il modello a partoni.

TEODORICO: Sì, questo è quello che gli autori dell'articolo di cui ti parlavo sono stati in grado di fare (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014, 2016). Per la situazione generale, con un numero arbitrario N di esiti, la rappresentazione nella sfera di Bloch diventa $(N^2 - 1)$ -dimensionale e la struttura elastica che descrive la misura viene rappresentata da un *simplexso* $(N - 1)$ -dimensionale, sempre inscritto nella sfera, o meglio, nell'*ipersfera*. Le misure degeneri sono solo leggermente più complesse, nel senso che corrispondono a situazioni in cui un certo numero di sottoregioni, precisamente quelle associate agli autovalori degeneri, sono fuse assieme e formano delle sottoregioni composite più estese (non più convesse). Quando il punto di rottura iniziale avviene all'interno di una di queste sottoregioni composite, il processo traina il corpuscolo non più verso un vertice del simplexso, ma all'interno di uno dei suoi sotto-simplessi. Il collasso rimane perfettamente compatibile con la *formula di proiezione di Lüders-von Neumann* della meccanica quantistica, ma per completare il processo la particella dovrà in questo caso riemergere dalla membrana, per raggiungere in modo deterministico la sua posizione finale. In altre parole, nel caso generale il processo di misura è un processo tripartito formato da (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014):

- (1) un processo iniziale *di tipo decoerenza*, corrispondente al corpuscolo puntiforme che raggiunge deterministicamente la “regione di potenzialità della membrana”;
- (2) da un successivo processo *di tipo collasso*, indeterministico, corrispondente alla rottura della membrana e al corpuscolo che viene trainato verso uno dei suoi punti periferici;

- (3) da un eventuale processo finale *di tipo purificazione*, deterministico, che riporta il corpuscolo a una distanza unitaria rispetto al centro della sfera.

Ovviamente, tutto quello che ti ho detto può essere espresso in termini molto precisi, e certamente l'intera spiegazione diventa molto più convincente quando si considerano tutti gli aspetti matematici della sua derivazione. Ma ai fini del nostro scambio informale, penso di averti fornito abbastanza informazioni su cui riflettere.

RICCARDO: Questo è sicuro. Quindi, se tutto quello che mi hai spiegato è corretto, se ne deduce che questo meccanismo a base di misure nascoste non può essere considerato come semplice anomalia bidimensionale, ma realmente come una soluzione del problema della misura.

TEODORICO: Considerando che, per quanto mi è dato di sapere, si tratta dell'unica derivazione – non circolare – esistente della regola di Born, penso sia del tutto corretto affermarlo. Permettimi anche di dire, en passant, che è possibile rilassare l'ipotesi che le membrane siano uniformi. Infatti, se si realizza la media di tutte le possibili membrane non uniformi, è possibile mostrare che anche in questo caso la regola Born può essere dedotta (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014). Ma dimmi, pensi sempre che sia una buona idea eliminare sin dal principio il postulato della proiezione dal formalismo quantistico, come proposto da Everett?

RICCARDO: Beh, se la matematica a sostegno di tutto quello che mi hai descritto è solida, penso che dovrò considerare questa interpretazione a un solo mondo e a misure nascoste come un serio rivale dell'interpretazione a molti mondi. Quindi, in sostanza, se ho capito bene, se il postulato della proiezione viene mantenuto come ingrediente fondamentale della teoria quantistica, la molteplicità dei mondi dev'essere sostituita con la molteplicità delle interazioni di misura, e dotando la realtà a un solo mondo di tutte queste interazioni aggiuntive, questa diventerebbe automaticamente molto più vasta, inclusiva di entità anche non-spaziali.

TEODORICO: Sì, e questo lo si può già vedere nell'esempio della misura a tre esiti possibili, che richiede una sfera unitaria a otto

dimensioni per rappresentare la realtà dell'entità in questione, e i suoi possibili contesti di misura. Nessuna macchina quantistica di spin tridimensionale sarà mai in grado di simulare l'intero funzionamento di una misura, al di là della situazione a due esiti possibili. A questo proposito, avevi ragione quando dicevi che la situazione a due dimensioni era patologica. Lo era non nel senso che un'interpretazione a misure nascoste non era fattibile oltre il caso bidimensionale, ma nel senso che la descrizione di un'entità quantistica certamente richiede di andare oltre il teatro spaziale tridimensionale ordinario. A dire il vero, è già così anche per le entità bidimensionali, se si osserva che il gruppo di rotazione $SO(3)$ viene *rivestito due volte* da $SU(2)$, ma è meglio non entrare in queste questioni delicate, che riguardano la possibilità di comprendere come lo spazio tridimensionale che percepiamo con i nostri sensi ordinari, come il senso del tatto (Aerts 2014), possa emergere da un autentico substrato non spaziale multidimensionale, possibilmente infinito-dimensionale. Parlando di multidimensionalità, lasciami ancora dire che secondo me la straordinarietà della visione del mondo everettiana è del tutto sovrastimata, poiché una visione a un solo mondo che prende sul serio il postulato della proiezione produce una realtà ancora più straordinaria. Dico questo perché, come ho già evidenziato nella nostra conversazione, tutti i mondi dell'interpretazione a molti mondi sono soltanto dei mondi classici. Pertanto, nella visione everettiana non si fa altro che clonare la stessa struttura classica *ad infinitum*, e questo naturalmente non aggiunge nulla di nuovo alla realtà, in termini strutturali. Naturalmente, i diversi mondi paralleli non sono totalmente paralleli, in quanto ogni universo interagisce con tutti gli altri, tramite i fenomeni d'interferenza. Tuttavia, il quadro complessivo rimane disperatamente classico.

RICCARDO: Immagino che un everettiano convinto, più esperto di me, avrebbe molte cose da dire al riguardo. Personalmente, pur essendo un simpatizzante dell'interpretazione a molti mondi, sono anche molto aperto a prendere in considerazione approcci alternativi, e questa interpretazione a misure nascoste, che hai scoperto di recente, è senza dubbio un serio contendente, che sicuramente non mancherò di indagare più attentamente. Devo dire che quest'idea che la maggior parte della nostra realtà sia non-

spaziale è molto affascinante, ed è assai probabile che il multiverso sia solo un modo un po' goffo di cercare di rappresentare la natura di queste entità non-spaziali, che spero concorderai con me restano alquanto misteriose.

TEODORICO: Concordo, ma partendo da questa prospettiva non spaziale, non credi che sia l'esistenza stessa di una "finestra" spaziale, in cui noi esseri umani viviamo con i nostri corpi macroscopici, e con i quali siamo in grado di rilevare delle entità non spaziali, di più alta dimensione, a costituire il vero mistero da spiegare? Come emerge il nostro spazio tridimensionale, o spazio-tempo quadridimensionale, da questo reame multidimensionale, possibilmente infinito-dimensionale, di natura non-spaziale?

RICCARDO: È un interessante rovesciamento di prospettiva. Devo proprio ringraziarti per questo scambio stimolante di idee. Sarebbe bello se potessimo incontrarci nuovamente, dopo aver meditato su tutto ciò di cui abbiamo discusso.

TEODORICO: Grazie a te, e sì, è davvero un'ottima idea quella di incontrarci di nuovo e confrontare l'evoluzione dei nostri punti di vista. Ma prima di lasciarci, e per concludere la nostra conversazione su una nota umoristica, vorrei mostrarti un'immagine che ho ricevuto oggi, tramite il mio social network, perché improvvisamente mi rendo conto di quanto sia pertinente rispetto a tutto ciò che ci siamo detti (vedi la Figura 27). Come puoi vedere, l'immagine mostra due caselle di un tipico questionario a scelta multipla. Solo due risposte sono permesse – "sì" o "no" – e al di sopra delle caselle c'è la domanda: "Sei ubriaca/o?"

Sei ubriaca/o?

Sì

No

X

Figura 27 Uno stato di sovrapposizione.

RICCARDO: È un'immagine molto divertente.

TEODORICO: Sì, il suo effetto umoristico è prodotto dalla presenza

della croce in un “luogo” piuttosto inusuale.

RICCARDO: Infatti, ma non sono sicuro di capire in che modo questa immagine avrebbe a che fare con la nostra discussione.

TEODORICO: Ha molto a che fare. Descrive un *esperimento-sì/no*, che in meccanica quantistica è associato a un *operatore di proiezione ortogonale*: un’osservabile con due soli autovalori: **1** e **0**. Nel caso di specie, l’osservabile riguarda la proprietà di “essere ubriachi”, e l’autovalore **1** corrisponde a una croce posta sulla “casella sì”, mentre l’autovalore **0** corrisponde a una croce posta sulla “casella no”. Ma permettimi di chiederti: perché trovi l’immagine divertente?

RICCARDO: Perché la persona che ha risposto alla domanda era ovviamente ubriaca.

TEODORICO: Devo dire che la tua è un’affermazione piuttosto singolare, dal momento che la proprietà “essere ubriachi” corrisponde a una croce posta sulla “casella sì”.

RICCARDO: Mi stai confondendo.

TEODORICO: Ora ti spiego, ma prima vorrei ricordare che secondo le “regole standard di compilazione di un questionario”, solo una delle due caselle può essere vidimata tramite una croce. Ciò riflette il fatto che non si può essere ubriachi e sobri allo stesso tempo, così come il famigerato *gatto di Schrödinger* (vedi la Figura 9), per quanto ne sappiamo, non può essere vivo e morto contemporaneamente. Questa è la differenza fondamentale tra una realtà a un solo mondo e una realtà a molti mondi. Nella prima una sola vidimazione è possibile, mentre nella seconda entrambe le caselle possono essere vidimate.

RICCARDO: Ma non entrambe nello stesso mondo.

TEODORICO: Sì, per evitare l’assurdo di due possibilità mutualmente esclusive che verrebbero attualizzate contemporaneamente i multi-mondisti considerano che invece di una coppia di caselle, ci sono due coppie di caselle, così che possa esserci una persona ubriaca in un mondo e una persona sobria in un altro mondo.

RICCARDO: Esattamente, invece di un questionario, ce ne sono due.

TEODORICO: Il problema è che nel multiverso non esistono i questionari.

RICCARDO: Non credo di capire.

TEODORICO: Nel multiverso everettiano esistono solo le caselle. Tra l'altro, le caselle, con i loro quattro lati, simboleggiano perfettamente gli eventi di uno spazio-tempo quadridimensionale. Il problema che pone la croce "fuori luogo" è che si trova al di fuori dello spazio, o spazio-tempo. Quella croce fuori-casella non può esistere in un multiverso everettiano. Ma se prendiamo sul serio questa immagine, non possiamo negare la sua esistenza, dal momento che è stata tracciata proprio lì.

RICCARDO: Mi ricorda gli "stati fuori-tavolo" del tuo esperimento col dado. Dunque, come devo intendere la croce fuori-casella? Come uno stato di sovrapposizione?

TEODORICO: Precisamente. La croce fuori-casella ci ricorda che una persona può trovarsi in stati che non possono essere descritti dicendo semplicemente: "sono ubriaca/o" o "sono sobria/o".

RICCARDO: Se si tratta di uno stato di sovrapposizione, dovrebbe essere possibile portarlo in una delle due caselle, per mezzo di una misura.

TEODORICO: Ti rendi conto vero che dicendo questo non stai più pensando come un everettiano?

RICCARDO: A quanto pare sono stato contaminato dalla visione a molte misure.

TEODORICO: Se la croce rappresenta uno stato di sovrapposizione, che descrive la condizione della persona prima dell'esperimento-sì/no, puoi naturalmente immaginare che tramite il collasso di una "membrana mentale", sia possibile spostarla da una posizione fuori-casella a una posizione nella-casella. Ma penso che ci sia di più nella metafora espressa da questa immagine. Il motivo per cui è così divertente è che raffigura una sorta di paradosso, che rivela un'intrigante possibilità, ossia, che non tutti gli stati della nostra realtà non-spaziale sono necessariamente spazializzabili, nel corso di una misura. Come abbiamo osservato, la croce non può essere associata allo stato di una persona ubriaca, ma che dire di una

persona “straubriaca”? Quando chiediamo a una persona straubriaca se sia ubriaca, tramite un questionario, difficilmente otterremo un risultato significativo. Ma questo non significa che la persona non si trovi in uno stato ben definito e oggettivo.

RICCARDO: Stai forse dicendo che non tutti gli stati di sovrapposizione sarebbe collassabili in uno stato spaziale?

TEODORICO: Pensa al *confinamento di colore*, la ben nota difficoltà che abbiamo nell’osservare direttamente e singolarmente delle entità con una carica di colore, come i *quark*. Solo quando queste si combinano per formare strutture più complesse, come i *mesoni* e i *barioni*, diventa possibile rilevarle nello spazio. Non potrebbe essere proprio questa la caratteristica degli stati non-spaziali che non possono essere tratti nello spazio tramite una misura, come se i singoli quark fossero le lettere di uno strano linguaggio non umano, e che solo una volta assemblate possono formare delle parole portatrici di significato, vale a dire delle parole che i nostri strumenti spaziali sarebbero in grado di comprendere, quindi di rilevare (Aerts 2010)?

RICCARDO: È un’immagine molto suggestiva, su cui dovrò meditare.

TEODORICO: La mia tesi è che se adottiamo una visione della realtà che contempli sia i processi di scoperta che i processi di creazione, allora non possiamo e non dobbiamo decidere in anticipo quali sono i possibili stati spaziali e non-spaziali, quali tra quelli non-spaziali possono essere spazializzati e quali invece non possono esserlo. D’altra parte, se supponiamo, come gli everettiani solitamente fanno, che lo spazio di Hilbert sia l’unica struttura matematica a dover essere utilizzata per rappresentare gli stati di una qualsivoglia entità fisica, in un qualsivoglia contesto, concluderemo che tutte le possibili “sovrapposizioni di mondi” devono esistere nel multiverso. Ma vedi, se rimetti in campo nella teoria il postulato della proiezione, o meglio, se in primo luogo non te ne sbarazzi, ma lo spieghi per mezzo di un meccanismo a base di misure nascoste, non potrai più attribuire un tale ruolo di primo piano allo spazio di Hilbert, nella descrizione degli stati delle entità fisiche. Questo a maggior ragione se prendiamo in considerazione anche le misure caratterizzate da membrane non uniformi, essendo molto facile in questo caso ottenere dei modelli di probabilità che

non rientrano più in una struttura hilbertiana (Aerts and Sassoli de Bianchi 2015a,b).

RICCARDO: Potresti farmi un esempio di sovrapposizioni che dovrebbero esistere secondo una visione puramente hilbertiana, ma che secondo una visione più generale, non necessariamente hilbertiana, potrebbero benissimo non esistere?

TEODORICO: Viviamo circondati da oggetti macroscopici di ogni tipo, che apparentemente non producono degli effetti quantistici. Questa sedia, per esempio, su cui sono seduto, è un'entità in uno stato spaziale ben definito, stabilmente localizzata in questa stanza. Se ipotizziamo che il formalismo hilbertiano sia universale, allora, nelle appropriate condizioni, e in linea di principio, questa stessa sedia potrebbe esistere anche in uno stato non-spaziale, ottenuto sovrapponendo due stati della sedia associati a due luoghi anche molto distanti tra loro. Può esistere una sedia in tale condizione non-spaziale, di delocalizzazione? Secondo la visione everettiana, la risposta, in senso stretto, è negativa, in quanto lo stato di sovrapposizione corrisponde a due sedie distinte, in due luoghi differenti, ognuna in un diverso mondo parallelo. Secondo l'interpretazione standard della meccanica quantistica, che ritiene che lo spazio lineare di Hilbert sia l'unico spazio degli stati ammissibile, la risposta è affermativa. Un tale stato delocalizzato della sedia potrebbe essere estremamente difficile da realizzare, ma in linea di principio sarebbe uno stato possibile. Infine, secondo l'interpretazione a misure nascoste, che non attribuisce a priori allo spazio di Hilbert un ruolo fondamentale, entrambe le possibilità restano aperte e la questione dovrà semplicemente decidersi sulla base dei futuri dati sperimentali.

RICCARDO: Se non sbaglio, stati di sovrapposizione non-spaziali di questo genere sono già stati ottenuti con delle grandi molecole organiche (Gerlich et al. 2011). Non credi allora che la cosa dovrebbe essere possibile anche per degli oggetti macroscopici, anche se, naturalmente, potremmo non riuscire a creare le condizioni sperimentali adatte alla loro realizzazione per moltissimo tempo, o addirittura mai?

TEODORICO: Ebbene, ad essere sincero, davvero non lo so. Ma sono convinto che per indagare questioni fondamentali di questo

tipo sia molto meglio non limitare sin dal principio la struttura dello spazio degli stati e accettare il fatto che delle strutture matematiche più generali possano avere un ruolo da svolgere nell'indagine delle entità che popolano la nostra realtà fisica incredibilmente vasta.

RICCARDO: Capisco il tuo punto: effettivamente, questo non lo possiamo fare se rimaniamo entro i confini di un approccio puramente hilbertiano, sia esso con o senza il postulato della proiezione.

TEODORICO: Esattamente, abbiamo bisogno di approcci che siano sufficientemente ricchi se vogliamo spiegare tutta la complessità del reale. A proposito, vorrei menzionare un'altra caratteristica problematica della visione a molti mondi, se non altro da un punto di vista intuitivo, che invece non appare affatto problematica nella visione a molte misure. Che mi dici di una sedia che non esiste?

RICCARDO: Mi stai chiedendo che cos'avrebbe da dire la visione a molti mondi sulle entità che non esistono?

TEODORICO: Precisamente. Abbiamo parlato della possibilità per una sedia di essere in uno stato non-spaziale. Che dire invece di una sedia non-esistente? Non pensi che nella nostra costruzione del reale dovremmo essere anche in grado di distinguere l'esistenza dalla non-esistenza? Cioè distinguere le sedie che sono presenti in questa camera dalle sedie che non sono presenti in questa stanza, non perché sarebbero in uno stato non-spaziale, o si troverebbero altrove nello spazio, ma semplicemente perché non sarebbero state ancora costruite, e potrebbero benissimo non essere mai costruite, quindi esisterebbero unicamente come delle possibilità.

RICCARDO: Capisco, nell'interpretazione a molti mondi tutte le cose che possono esistere, in accordo con le leggi della fisica, devono esistere in almeno uno degli universi. Quindi, non potrà mai esistere qualcosa come una *sedia possibile*, perché se le leggi della fisica ne consentono l'esistenza, in uno degli universi dovrà necessariamente esistere, in senso attuale. Nell'interpretazione a molti mondi diventa effettivamente molto difficile, se non impossibile, distinguere tra esistenza e non-esistenza.

TEODORICO: Devo ammettere che quando ho capito che nell'approccio a molte misure la nozione di *esistenza* non

rappresentava un problema, essendo distinguibile rispetto alla nozione di *esistenza possibile*, nel senso di non dover considerare l'esistenza possibile come un'esistenza in un altro universo, questo è stato per me un elemento di evidente attrattività rispetto all'interpretazione a molti mondi. Naturalmente, questa mancanza di distinzione tra esistenza ed esistenza possibile, nell'interpretazione a molti mondi, è dovuta alla scelta di descrivere gli stati di sovrapposizione come insiemi di stati collassati nei diversi universi. Considera ancora una volta l'esempio dei mondi-tavolo. Nell'interpretazione a molti mondi un dado fuori-tavolo viene rappresentato come un insieme di dadi differenti, posti su tavoli differenti, in tutti i possibili stati sul-tavolo ottenibili lanciando il dado sul tavolo. D'altra parte, come abbiamo già osservato, nella visione a molte misure anche a un dado fuori-tavolo viene permesso di esistere, nel senso di corrispondere a uno stato autentico di sovrapposizione; inoltre, se tale dado fuori-tavolo viene lanciato su un tavolo, questo esisterà solo come dado sul-tavolo relativamente a quello specifico tavolo: in nessun modo esisterà anche come dado sul-tavolo relativamente ad altri tavoli, su cui avrebbe potuto essere lanciato. In questo senso, anche se la visione a molte misure, similmente alla visione a molti mondi, consideri che la realtà sia molto più vasta delle sue regioni collassate, non vi è in essa alcuna logica che porti all'introduzione di una relazione intuitivamente problematica con la nozione di non-esistenza. I dadi possono trovarsi in autentici stati di sovrapposizione, quando non vengono lanciati su alcun tavolo, ma è pure possibile considerare dei dadi che non esistono affatto, anche quando le leggi fisiche non ne proibiscono l'esistenza: i dadi che non si trovano in stati di sovrapposizione, o in stati collassati, sono solo dei *dadi possibili*, e nulla più. Lo stesso vale per le sedie: possiamo scegliere di avere un'esperienza con una delle sedie presenti in questa stanza, o presenti in altri luoghi, scegliendo di sederci su di esse, e in linea di principio possiamo avere anche una "esperienza di seduta" con un'ipotetica sedia che si trova in un qualche stato non-spaziale, sebbene in questo caso l'esito dell'esperienza non sarebbe certo in anticipo; ma con certezza non saremo mai in grado di sederci su una sedia non-esistente, cioè su una sedia che non è stata ancora creata da un falegname, e che forse non verrà mai creata.

RICCARDO: Sì, mentre nella realtà a molti mondi abbiamo sempre la possibilità di “sederci su una sedia non-esistente”, nel senso che tutte le sedie che in linea di principio possono essere create sono state create, da qualche parte nel multiverso.

TEODORICO: Proprio così, e per di più, tutte le sedie che in linea di principio possono essere distrutte, non sono state distrutte, da qualche parte nel multiverso. A proposito, permettetemi di dire che, apparentemente, la questione di poter distinguere tra entità esistenti e non-esistenti non è solo accademica. Per esempio, quando ci poniamo il difficile problema di trovare un quadro coerente comune per la teoria quantistica e la relatività, una distinzione chiara tra elementi creati e increati della nostra realtà è di fondamentale importanza, in particolare per quanto attiene alla questione di stabilire se parte della nostra realtà futura esiste anche nel nostro presente, come ho avuto modo di apprendere leggendo alcuni dei lavori di cui ti ho parlato (Aerts, 1999). Ma ci vorrebbe troppo tempo per spiegare tutto questo, quindi suggerisco di lasciare la cosa per una nostra possibile futura discussione.

RICCARDO: Sono d'accordo. Beh, lasciami dire ancora una volta che è stata una conversazione appassionante. Da una prospettiva a molti mondi, sono certo di biforcare presto in un mondo in cui ci incontreremo di nuovo e continueremo il nostro scambio di idee. E da una prospettiva a molte misure, spero che creeremo presto questa opportunità.

TEODORICO: Ben detto, e ad ogni modo ci vediamo presto.

Nota finale

Un'ultima osservazione è d'obbligo. Lo scopo principale di questo dialogo era di presentare alcune delle idee e dei risultati dell'interpretazione a misure nascoste della meccanica quantistica, ponendole in leggera contrapposizione con le idee solitamente difese dai multi-mondisti.

Non pretendiamo di avere presentato queste ultime in modo completo, o di avere preso la loro difesa con sufficiente

convinzione; questo non solo perché non era il nostro obiettivo farlo, ma anche perché diverse interpretazioni conflittuali sembrano coesistere riguardo al modo in cui il programma di Everett dovrebbe essere compreso e implementato (Everett 1957, Deutsch 1999, 1996, DeWitt and Graham 1973, Hartle 1968, Geroch 1984, Albert and Loewer 1988, Lockwood 1996, Gell-Mann and Hartle 1993, Saunders et al. 2010).

Speriamo tuttavia che gli “everettiani”, e più generalmente i fisici e filosofi interessati alle questioni fondazionali, verranno stimolati dal dialogo di cui sopra e decideranno – come uno dei personaggi sembra aver fatto – di dare un’occhiata più da vicino all’approccio (a un solo mondo) a misure nascoste e alla soluzione che esso è in grado di offrire al problema della misura (Aerts and Sassoli de Bianchi 2014, 2016).

Bibliografia

- Aerts, D. (1982). Description of many physical entities without the paradoxes encountered in quantum mechanics, *Foundations of Physics* 12, pp. 1131-1170.
- Aerts, D. (1986). A possible explanation for the probabilities of quantum mechanics, *Journal of Mathematical Physics* 27, pp. 202-210.
- Aerts, D. (1998a). The hidden measurement formalism: what can be explained and where paradoxes remain, *Int. J. Theor. Phys.*, 37, p. 291.
- Aerts, D. (1998b). The entity and modern physics: the creation-discovery view of reality. In: *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, ed. Castellani, E., Princeton University Press, Princeton.
- 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. (2010). Interpreting quantum particles as conceptual entities, *International Journal of Theoretical Physics* 49, pp. 2950-2970.
- Aerts, D. (2014). Quantum Theory and Human Perception of the Macro-World, *Front. Psychol.* 5: 554.
- Aerts, D. and 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.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi M. (2015a). The unreasonable success of quantum probability I: Quantum measurements as uniform measurements,

- Journal Mathematical Psychology 67, pp. 51-75.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi M. (2015b). The unreasonable success of quantum probability II: Quantum measurements as universal measurements, Journal Mathematical Psychology 67, pp. 76-90.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi M. (2016). The Extended Bloch Representation of Quantum Mechanics. Explaining Superposition, Interference and Entanglement. J. Math. Phys. 57, 122110.
- Albert, D. and Loewer, B. (1988). Interpreting the many worlds interpretation, Synthese 77, pp. 195-213.
- Baker, D. J. (2007). Measurement outcomes and probability in Everettian quantum mechanics, Stud. Hist. Phil. Mod. Phys. 38, pp. 153-169.
- Barnum, H., Caves, C. M., Finkelstein, J., Fuchs, C. A. & Schack, R. (2000). Quantum probability from decision theory? Proc. Roy. Soc. Lond. A456, pp. 1175-1182.
- Bell, J. S. (1966). On the Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics, Rev. Mod. Phys. 38, pp. 447-452.
- Bohm, D. (1952). A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of Hidden Variables, II, Phys. Rev., 85, pp. 180-193.
- Bohm, D. (1957). *Causality and Chance in Modern Physics*, Routledge & Kegan Paul, London, p. 117.
- Born, M. (1926). Quantenmechanik der Stoßvorgänge, Z. Phys. 38, pp. 803-827.
- Cassinello A., & Sanchez-Gomez, J. L. (1996). On the probabilistic postulate of quantum mechanics, Found. Phys. 26, pp. 1357-1374.
- Caves, C. and Schack, R. (2005). Properties of the frequency operator do not imply the quantum probability postulate, Ann. Phys. (N.Y.) 315, pp. 123-146.
- Coecke, B. (1995). Generalization of the proof on the existence of hidden measurements to experiments with an infinite set of outcomes, Found. Phys. Lett., 8, p. 437.
- Deutsch, D. (1996). Comment on Lockwood, Br. J. Philos. Sci. 47, pp. 222-228.
- Deutsch, D. (1997). *The Fabric of Reality*, Penguin Book, London. [Edizione Italiana: *La trama della realtà*, Einaudi]
- Deutsch, D. (1999). Quantum Theory of Probability and Decisions, Proc. Roy. Soc. Lond. A455, pp. 3129-3137.
- DeWitt, B., and Graham, N. (Eds.) (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton.
- Everett, H. (1957). "Relative State" Formulation of Quantum Mechanics, Review of Modern Physics 29, pp. 454-462.
- Feynman, R. P. (1992). *The Character of Physical Law*, Penguin Books.
- Gell-Mann, M., and Hartle, J. (1993). Classical Equations for Quantum Systems, Phys. Rev. D 47, pp. 3345-3382.
- Gerlich, S., Eibenberger, S., Tomandl, M., Nimmrichter, S., Hornberger, K.,

- Fagan, P. J., Tüxen, J., Mayor M. & Arndt, M. (2011). Quantum interference of large organic molecules, *Nature Communications* 2, p. 263.
- Geroch, R. (1984). The Everett Interpretation, *Noûs* 18, pp. 617-633.
- Gleason, A. M. (1957). Measures on the closed subspaces of a Hilbert space, *J. Math. Mech.* 6, pp. 885-893.
- Gudder, S. P. (1970). On Hidden-Variable Theories, *J. Math. Phys* 11, pp. 431-436.
- Hartle, J. (1968). Quantum Mechanics of Individual Systems, *American Journal of Physics* 36, pp. 704-712.
- Jauch J. M. & Piron, C. (1963). Can hidden variables be excluded in quantum mechanics? *Helv. Phys. Acta* 36, 827-837.
- Kochen S. and Specker, E. P. (1967). The problem of hidden variables in quantum mechanics, *J. Math. Mech.* 17, pp. 59-87.
- Kolmogorov, A. N. (1933). *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitrechnung*, *Ergebnisse Der Mathematik*; translated as *Foundations of Probability*, New York: Chelsea Publishing Company, 1950.
- Laplace, P. S. (1814). *A Philosophical Essay on Probabilities*, New York: Dover Publications Inc. English edition 1951.
- Lockwood, M. (1996). 'Many Minds' Interpretations of Quantum Mechanics, *Brit. J. Philos. Sci.* 47, pp. 159-188.
- Piron, C. (1976). *Foundations of Quantum Physics*, Reading Mass.: W. A. Benjamin.
- Sassoli de Bianchi, M. (2013a). Using simple elastic bands to explain quantum mechanics: a conceptual review of two of Aerts' machine-models, *Centr. Eur. J. Phys.* 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, 133-142.
- Sassoli de Bianchi, M. (2015). God may not play dice, but human observers surely do, *Found. of Science* 20, pp. 77-105.
- Saunders, S., Barrett, J., Kent A. & Wallace D. (Eds.) (2010). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory and Reality*, Oxford University Press.
- Schlosshauer M. and Fine A. (2005). On Zurek's derivation of the Born Rule, *Found. Phys.* 35, pp. 197-213.
- Schrödinger, E. (1926). An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules, *Physical Review* 28, pp. 1049-1070.
- Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften* 23, p. 812.
- Streater R. F. & Wightman, A. S. (1964). *PCT, spin and statistics, and all that*, W. A. Benjamin, Inc., New York.
- Von Neumann, J. (1932). *Grundlehren, Math. Wiss.* XXXVIII.
- Von Neumann, J. (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton.

Wallace, D. (2003). Everettian Rationality, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 34, pp. 87-105.

Nota: Questo articolo è una rivisitazione ed estensione di un articolo precedentemente pubblicato in inglese, nel 2015, nella rivista *Foundations of Science* 20 (pp. 399-427), con il titolo “Many-Measurements or Many-Worlds? A Dialogue.”

Invito alla lettura

Misure universali

Come prendere tre piccioni con una fava

Autori: Diederik Aerts & Massimiliano Sassoli de Bianchi; *pagine:* 140; *anno:* 2019; *editore:* Aracne; *ISBN:* 9788825526370

Un testo che si rivolge a un ampio spettro di lettori, dagli appassionati di scienza ai ricercatori di professione, in cui gli autori presentano alcune loro recenti scoperte, in tre campi distinti ma intimamente collegati: la teoria delle probabilità (paradosso di Bertrand), l'osservazione in fisica (problema della misura) e la modellizzazione degli esperimenti di psicologia cognitiva (cognizione quantistica). In tutti e tre questi campi di indagine, e relativi problemi, gli autori spiegano come sia possibile sfruttare in modo vantaggioso una nozione chiave, quella di misura universale, che costituisce il fil rouge dell'intero scritto *Come prendere tre piccioni con una fava*.



Estratto: In numerose lingue [...] viene operata un'importante distinzione tra due diverse forme di mancanza di conoscenza. In italiano ad esempio, abbiamo il termine “aleatorio” (o il termine equivalente “azzardo”), che indica un pericolo, un rischio, cioè un qualcosa che ci può accadere e che in nessun modo siamo in grado di controllare. Lo stesso significato lo ritroviamo ad esempio nel termine olandese “toevallig”, composto da “fallen”, che significa “cadere”, e da “toe” che significa “verso di noi”. Dunque: “ciò che può cadere verso di noi”, che può “accaderci”, come ad esempio perdere dei soldi in una scommessa ai dadi, cioè in un gioco d'azzardo. In italiano c'è però anche il termine “arbitrario” (“willekeurig”, in

olandese), che designa “ciò che dipende dalla volontà o opinione di un singolo individuo”, come ad esempio quando decidiamo di effettuare un particolare esperimento piuttosto che un altro. In altre parole, i nostri antenati, in un’epoca in cui il linguaggio si stava sviluppando, erano già a conoscenza della differenza che esisteva tra la casualità prodotta dagli oggetti della loro esperienza, espressa dalla parola “aleatorio”, o “azzardo”, e la casualità prodotta da loro stessi, cioè dalle loro azioni, in quanto soggetti in grado di effettuare delle scelte, espressa dalla parola “arbitrario”. Quando effettuiamo un esperimento, queste due forme di casualità sono sempre presenti, se non altro quando nulla interviene per cercare di controllarle. La prima forma corrisponde al livello di imprevedibilità associato all’esperimento stesso, una volta definito il protocollo da seguire, mentre la seconda corrisponde alla mancanza di conoscenza dell’esperimentatore circa l’esperimento che di fatto sceglierà (o ha scelto) di effettuare. Solitamente solo il primo tipo di casualità viene preso in considerazione in fisica, sia in termini concettuali che formali. Questo perché si ritiene che la selezione dell’esperimento da eseguire sia un processo sempre sotto il pieno controllo cosciente dell’esperimentatore e che quindi, in tal senso, non sarebbe casuale. Ma non è sempre così, come abbiamo cercato di evidenziare in questo nostro libricino.

Numeri precedenti

Numero 1, Anno 2011 – Lo Stato Vibrazionale

Numero 2, Anno 2011 – Fisica e Realtà

Numero 3, Anno 2012 – L'Arte di Osservare

Numero 4, Anno 2012 – Scienza e Spiritualità

Numero 5, Anno 2013 – OBE

Numero 6, Anno 2013 – Energia

Numero 7, Anno 2014 – Scienza, Realtà & Coscienza

Issue 7, Year 2014 – Science, Reality & Consciousness (E)

Numero 8, Anno 2014 – Archetipi

Numero 9, Anno 2015 – Corrispondenze

Numero 10, Anno 2015 – Studi sulla Coscienza

Numero 11, Anno 2016 – Corrispondenze bis

Numero 12, Anno 2016 – Dialogo sulla realtà

Issue 12, Year 2016 – Talking about reality (E)

Numero 13, Anno 2017 – Dialogo sulla malattia

Numero 14, Anno 2017 – NDE

Numero 15, Anno 2018 – Sàdhàna

Numero 16, Anno 2018 – Due cuori

Issue 16, Year 2018 – Two hearts (E)

Numero 17, Anno 2019 – Spunti di Osservazione

Issue 18, Year 2019 – The secret of life (E)

Numero 19, Anno 2019 – Effetto Osservatore

Issue 19, Year 2019 – Observer Effect (E)

Issue 20, Year 2020 – Subtle energies and vibrational states (E)

Issue 21, Year 2020 – Quantum physics, relativity and conceptuality (E)

Numero 22, Anno 2021 – Un antidoto alla divisione (I+E)

Numero 23, Anno 2021 – L'abbraccio della dea Chione

LAB