

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 depono 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.

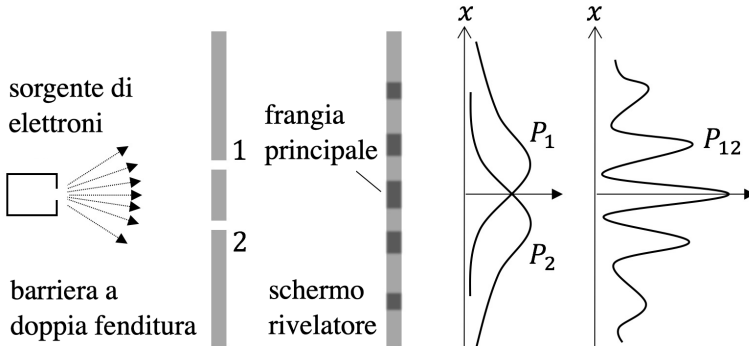


Figura 1 Nell'esperimento a doppia fenditura, una sorgente di elettroni spara quest'ultimi verso una barriera con due fenditure. Se la fenditura 1 è aperta e la fenditura 2 è chiusa, la distribuzione di probabilità per la rilevazione di un elettrone a una distanza x dal centro dello schermo rivelatore 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.

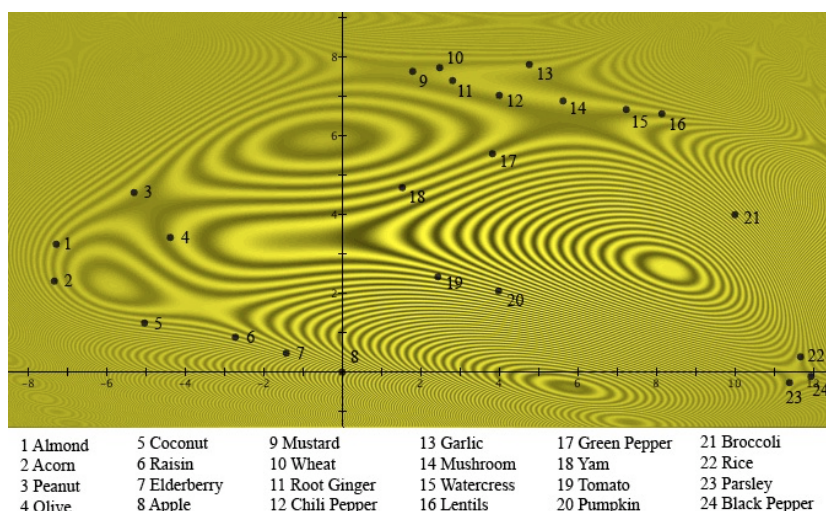


Figura 2 La figura di interferenza che descrive gli effetti di sovraestensione e sottoestensione contenuti nei dati di Hampton, quando ai partecipanti viene chiesto di selezionare degli esemplari rappresentativi della disgiunzione *Frutto o verdura*. Per maggiori dettagli su come è stata ottenuta questa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

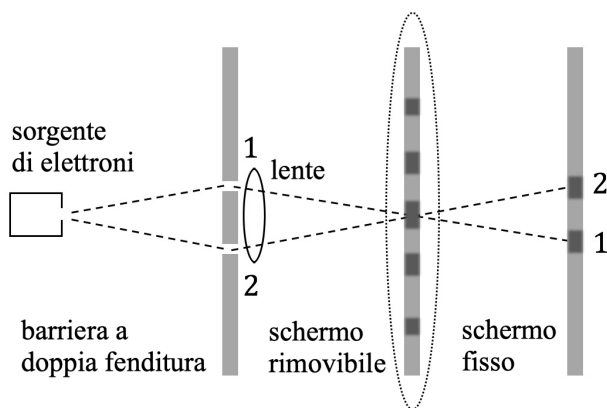


Figura 3 Lo schema dell'esperimento a scelta ritardata, in cui uno dei due schermi di rilevamento è rimovibile, permettendo di creare un contesto ondulatorio o particellare, lasciandolo lo schermo rimovibile in posizione, o rimuovendolo, rispettivamente. La lente in prossimità della doppia fenditura 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 “*istanziatura*” 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).

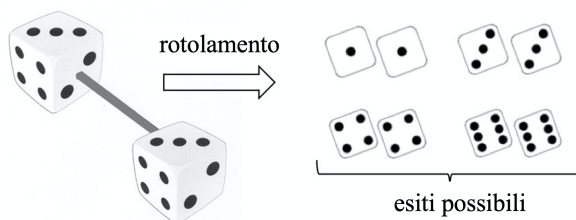


Figura 6 Quando due dadi separati vengono fatti rotolare, ci sono 36 coppie di esiti possibili, equiprobabili, per le loro facce superiori (nessuna correlazione). Se invece i due dadi vengono collegati tramite un'asticella rigida, quando vengono fatti congiuntamente rotolare si possono ottenere solo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

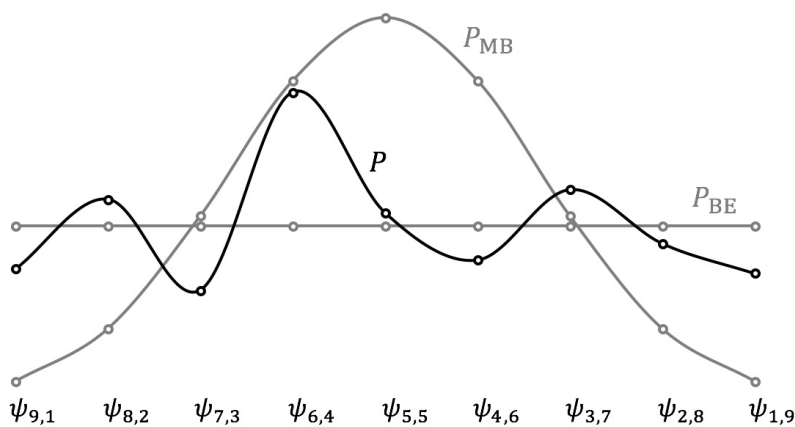


Figura 8 Confronto delle probabilità di Maxwell-Boltzmann (P_{MB}) e Bose-Einstein (P_{BE}) con quelle ottenute eseguendo i conteggi sul Web (P) con Google (il 18 agosto 2017), nella situazione in cui l'entità concettuale *Dieci animali* è considerata in relazione ai due stati-esemplari *Gatto* e *Cane*.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

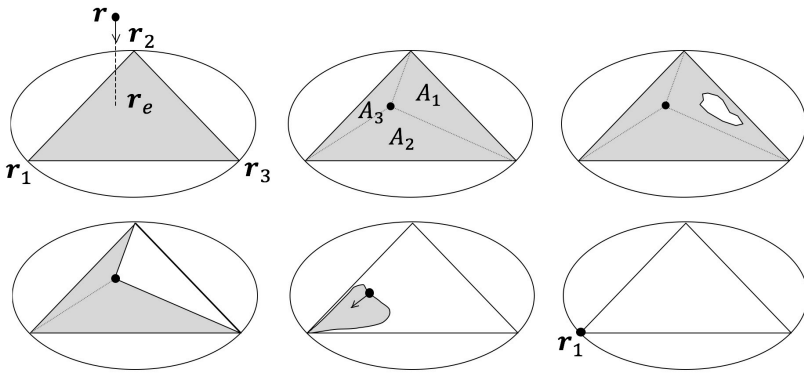


Figura 9 Lo svolgimento di una misura come processo di riduzione di tensione, qui con tre possibili esiti (non degeneri): r_1 , r_2 e r_3 . La particella astratta rappresentativa dello stato iniziale è posizionata in r , sulla superficie della palla (o sfera) a otto dimensioni $B_1(\mathbb{R}^8)$ (che 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: $n_B = n_A/2$.

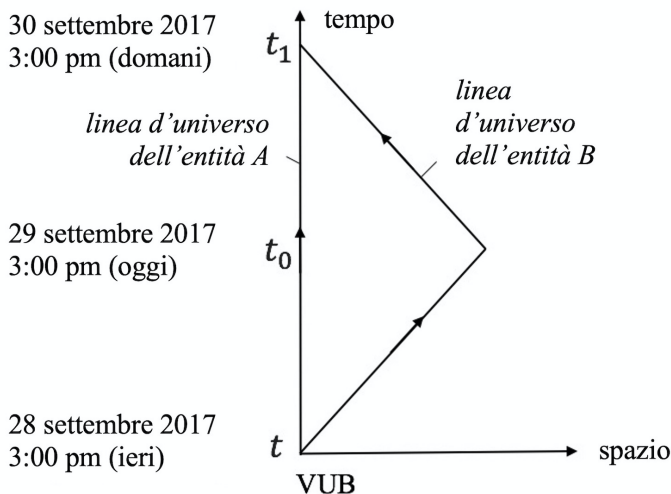


Figura 10 Le due linee di universo delle entità A e B , nella costruzione spaziotemporale associata alla prima. L'entità A è spazialmente ferma, quindi si muove solo lungo il suo asse temporale, mentre l'entità B compie un viaggio di andata e ritorno che le permette di incontrarsi nuovamente con l'entità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

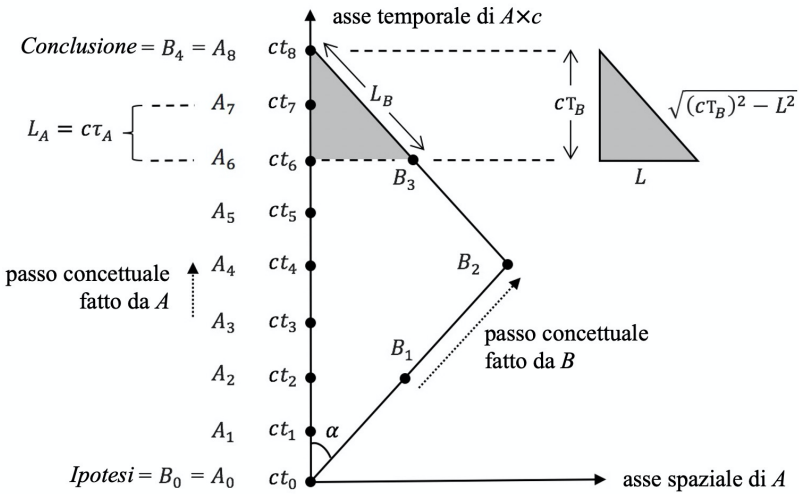


Figura 11 La coordinazione dei percorsi concettuali seguiti dalle due entità A e B , nello spaziotempo costruito dall'osservatore cognitivo C_A (qui nella situazione $n_A = 8$ e $n_B = 4$). Se misurata lungo l'asse del tempo di A (moltiplicato per la velocità costante c), la lunghezza $L_B = cT_B$ dei 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.