

AUTO RICERCA

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

Diederik Aerts

Massimiliano Sassoli de Bianchi

Numero 24

Anno 2022

Pagine 153-216

 LAB

Riassunto

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

Premessa

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

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

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

Dialogo

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



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

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

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

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



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

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

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

RICCARDO: Sono davvero curioso, qual è questa domanda?

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

RICCARDO: Chiedo scusa?

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

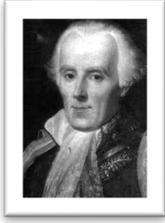


Figura 3 *Pierre-Simon Laplace* (1749–1827) è stato un matematico, fisico, astronomo e nobile francese del periodo napoleonico. Ha dato contributi fondamentali in diversi campi dello scibile umano, e in particolare in quello della teoria della probabilità, formalizzando tra le altre cose il procedimento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

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

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



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

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

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

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

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

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

TEODORICO: Sono d'accordo.

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

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



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



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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

RICCARDO: Potresti spiegarti meglio?

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

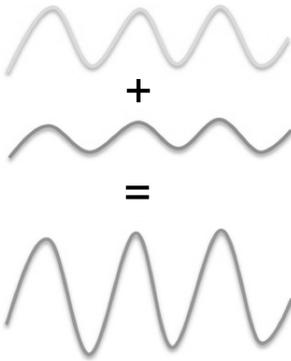


Figura 8 Il *principio di sovrapposizione* quantistico afferma che, similmente alle onde della fisica classica, due stati (funzioni d'onda) possono essere “sovrapposti” (cioè sommati, in quanto elementi di uno spazio vettoriale, detto di Hilbert \mathcal{H}) e il risultato della sovrapposizione sarà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

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

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

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

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

RICCARDO: Su questo siamo totalmente d'accordo.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

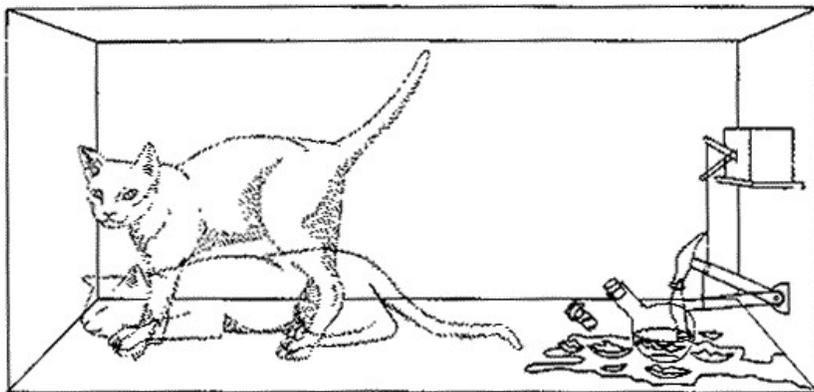


Figura 9 Quello del *gatto di Schrödinger* è un esperimento di pensiero proposto nel 1935 da *Erwin Schrödinger*, con lo scopo di mettere in evidenza che l'interpretazione di Copenaghen della meccanica quantistica conduce a dei risultati paradossali, quando applicata a un sistema fisico macroscopico,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

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

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

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

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

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

RICCARDO: Precisamente.

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

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

TEODORICO: Di solito non viene considerato come tale, sono

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

RICCARDO: Senza dubbio una misura molto strana.

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

RICCARDO: Stai forse giocando con le parole?

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

RICCARDO: E cosa direbbe questo pregiudizio classico?

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

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

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

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

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

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

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

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

apparente stranezza.

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

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

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

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

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

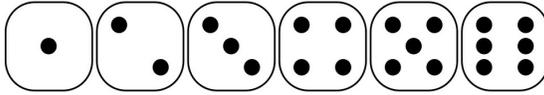


Figura 10 I sei esiti possibili quando si lancia un dado cubico tradizionale.

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

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

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

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

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

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

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

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

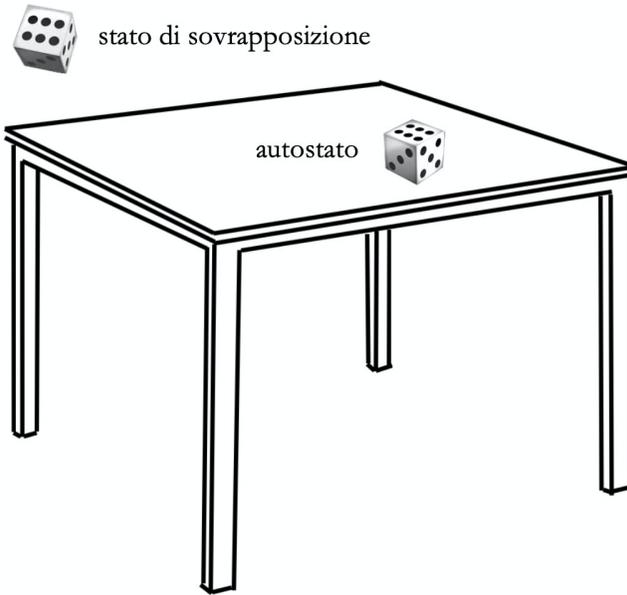


Figura 11 Un dado “fuori-tavolo” (a sinistra), corrispondente a uno stato di sovrapposizione, e un dado “sul-tavolo”, corrispondente a un autostato, qui relativo alla faccia-superiore numero 6.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

umentare la probabilità di ottenere un esito finale specifico.

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

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

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

simultaneamente due dadi che sono stati collegati?

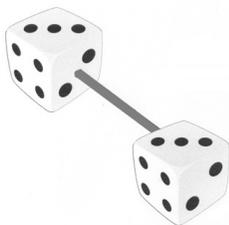


Figura 12 Se due dadi vengono collegati tramite un'asticella rigida, potranno rotolare contemporaneamente solo lungo la direzione ortogonale all'asticella, cosicché non tutte le coppie di esiti saranno possibili. In altre parole, facendo rotolare in modo coincidente i due dadi, si creeranno delle correlazioni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

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

RICCARDO: Perché Laplace non era un everettiano?

TEODORICO: Esattamente.

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

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

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

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

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

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

TEODORICO: Hai colto perfettamente il punto.

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

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

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

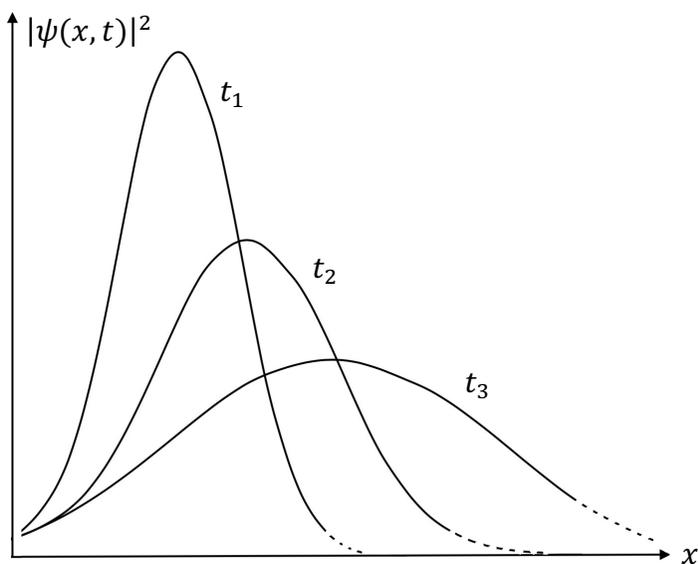


Figura 13 Un esempio di evoluzione della (densità di) probabilità $|\psi(x, t)|^2$ di un’entità microscopica. Col passare del tempo ($t_1 < t_2 < t_3$), l’entità si delocalizza, nel senso che il suo stato diviene una sovrapposizione sempre più estesa di stati associati alle diverse posizioni spaziali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

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

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

TEODORICO: Come everettiano convinto sei stato molto convincente.

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

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

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

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

semplice e diretto dal modello.

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

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

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

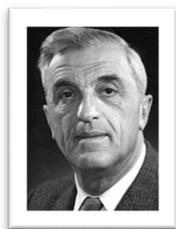


Figura 14 *Felix Bloch* (1905–1983) è stato un fisico svizzero naturalizzato statunitense, che ha contribuito alla nascita e sviluppo della *risonanza magnetica nucleare*. Fu il primo direttore generale del CERN. Tra le altre cose, a lui si deve la rappresentazione geometrica dello spazio degli stati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

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

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

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

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

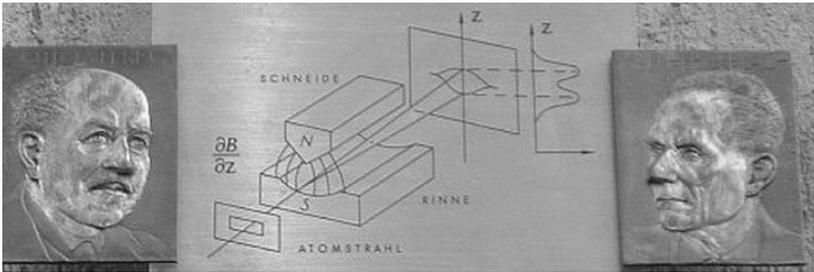


Figura 15 Nella targa commemorativa dell'esperimento di *Stern-Gerlach* si può leggere: “Nel febbraio del 1922, la scoperta fondamentale della quantizzazione spaziale dei momenti magnetici negli atomi fu fatta in questo edificio del Physikalischer Verein, Frankfurt am Main, da *Otto Stern* e *Walther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

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

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

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

quando si misura l'osservabile di spin

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

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

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

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

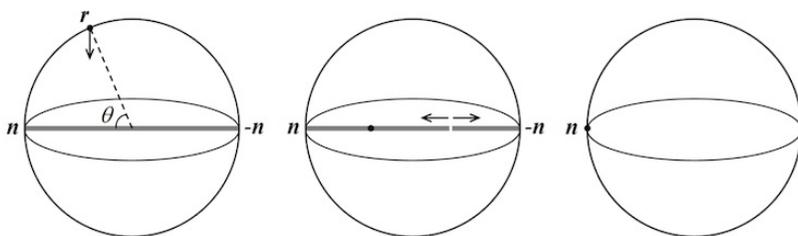


Figura 16 Lo svolgimento di un processo di misura nella macchina quantistica di spin, con il corpuscolo inizialmente situato in \mathbf{r} che “cade” ortogonalmente sull'elastico appiccicoso, il quale poi si rompe in un punto imprevedibile e contraendosi traina il corpuscolo in uno dei due punti estremi,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

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

TEODORICO: Esattamente. Per ottenere le probabilità quantistiche

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

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

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

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

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

RICCARDO: Perché pure?

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

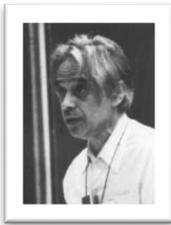


Figura 18 *Ernst Paul Specker* (1920-2011) è stato un matematico svizzero che si è occupato di logica matematica e di teoria degli insiemi, conseguendo però i suoi successi più importanti nell'ambito della meccanica quantistica, con la dimostrazione del *teorema di Kochen-Specker*, che mostra come certe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



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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

RICCARDO: Come si spiega allora questa mancanza di notorietà?

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

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

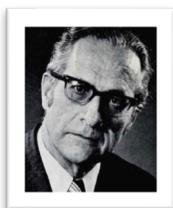


Figura 21 *Josef-Maria Jauch* (1914-1974) è stato un fisico teorico svizzero e americano. Con notevole rigore matematico ha contribuito in diversi ambiti della fisica teorica, come la teoria della diffusione quantistica, il processo di misurazione, il problema della causalità, il fenomeno dell'irreversibilità,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

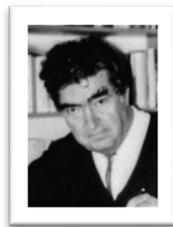


Figura 22 *Constantin Piron* (1932-2012) è stato un fisico belga che ha lavorato per gran parte della sua carriera a Ginevra, in Svizzera. Ha contribuito allo sviluppo dell'approccio della cosiddetta *scuola di Ginevra sui fondamenti della meccanica quantistica* e a lui si deve un importante teorema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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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



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

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

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

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

TEODORICO: Proprio così.

RICCARDO: Sarebbe fantastico.

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

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

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

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

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

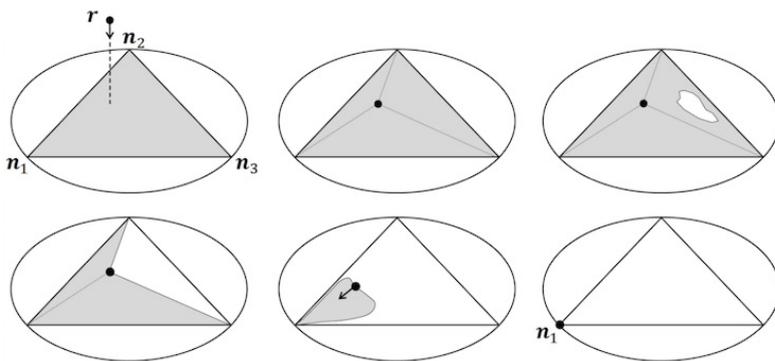


Figura 25 Il dispiegarsi di un processo di misura non degenera con tre esiti distinguibili: \mathbf{n}_1 , \mathbf{n}_2 e \mathbf{n}_3 . Il corpuscolo rappresentativo dello stato, inizialmente situato in \mathbf{r} , “cade ortogonalmente” sulla membrana triangolare elastica, definendo così tre diverse sottoregioni. La membrana si rompe quindi in una di esse, producendone la disintegrazione e il successivo distacco dei suoi due punti di ancoraggio, traendo in questo modo il corpuscolo puntiforme nella sua posizione finale, nella fattispecie \mathbf{n}_1 .

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Sei ubriaca/o?

Sì

No

X

Figura 27 Uno stato di sovrapposizione.

RICCARDO: È un'immagine molto divertente.

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

della croce in un “luogo” piuttosto inusuale.

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

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

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

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

RICCARDO: Mi stai confondendo.

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

RICCARDO: Ma non entrambe nello stesso mondo.

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

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

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

RICCARDO: Non credo di capire.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Nota finale

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

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

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

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

Bibliografia

- Aerts, D. (1982). Description of many physical entities without the paradoxes encountered in quantum mechanics, *Foundations of Physics* 12, pp. 1131-1170.
- Aerts, D. (1986). A possible explanation for the probabilities of quantum mechanics, *Journal of Mathematical Physics* 27, pp. 202-210.
- Aerts, D. (1998a). The hidden measurement formalism: what can be explained and where paradoxes remain, *Int. J. Theor. Phys.*, 37, p. 291.
- Aerts, D. (1998b). The entity and modern physics: the creation-discovery view of reality. In: *Interpreting Bodies: Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, ed. Castellani, E., Princeton University Press, Princeton.
- Aerts, D. (1999). The Stuff the World is Made of: Physics and Reality, in: *The White Book of 'Einstein Meets Magritte'*, Edited by Diederik Aerts, Jan Broekaert and Ernest Mathijs, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 129-183.
- Aerts, D. (2010). Interpreting quantum particles as conceptual entities, *International Journal of Theoretical Physics* 49, pp. 2950-2970.
- Aerts, D. (2014). Quantum Theory and Human Perception of the Macro-World, *Front. Psychol.* 5: 554.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi M. (2014). The Extended Bloch Representation of Quantum Mechanics and the Hidden-Measurement Solution to the Measurement Problem, *Annals of Physics* 351, pp. 975-1025.
- Aerts, D. and Sassoli de Bianchi M. (2015a). The unreasonable success of quantum probability I: Quantum measurements as uniform measurements,

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

- Fagan, P. J., Tüxen, J., Mayor M. & Arndt, M. (2011). Quantum interference of large organic molecules, *Nature Communications* 2, p. 263.
- Geroch, R. (1984). The Everett Interpretation, *Noûs* 18, pp. 617-633.
- Gleason, A. M. (1957). Measures on the closed subspaces of a Hilbert space, *J. Math. Mech.* 6, pp. 885-893.
- Gudder, S. P. (1970). On Hidden-Variable Theories, *J. Math. Phys* 11, pp. 431-436.
- Hartle, J. (1968). Quantum Mechanics of Individual Systems, *American Journal of Physics* 36, pp. 704-712.
- Jauch J. M. & Piron, C. (1963). Can hidden variables be excluded in quantum mechanics? *Helv. Phys. Acta* 36, 827-837.
- Kochen S. and Specker, E. P. (1967). The problem of hidden variables in quantum mechanics, *J. Math. Mech.* 17, pp. 59-87.
- Kolmogorov, A. N. (1933). *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitrechnung*, *Ergebnisse Der Mathematik*; translated as *Foundations of Probability*, New York: Chelsea Publishing Company, 1950.
- Laplace, P. S. (1814). *A Philosophical Essay on Probabilities*, New York: Dover Publications Inc. English edition 1951.
- Lockwood, M. (1996). 'Many Minds' Interpretations of Quantum Mechanics, *Brit. J. Philos. Sci.* 47, pp. 159-188.
- Piron, C. (1976). *Foundations of Quantum Physics*, Reading Mass.: W. A. Benjamin.
- Sassoli de Bianchi, M. (2013a). Using simple elastic bands to explain quantum mechanics: a conceptual review of two of Aerts' machine-models, *Centr. Eur. J. Phys.* 11, pp. 147-161.
- Sassoli de Bianchi, M. (2013b). Quantum dice, *Annals of Physics* 336, pp. 56-75.
- Sassoli de Bianchi, M. (2014). A remark on the role of indeterminism and non-locality in the violation of Bell's inequality, *Annals of Physics* 342, 133-142.
- Sassoli de Bianchi, M. (2015). God may not play dice, but human observers surely do, *Found. of Science* 20, pp. 77-105.
- Saunders, S., Barrett, J., Kent A. & Wallace D. (Eds.) (2010). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory and Reality*, Oxford University Press.
- Schlosshauer M. and Fine A. (2005). On Zurek's derivation of the Born Rule, *Found. Phys.* 35, pp. 197-213.
- Schrödinger, E. (1926). An Undulatory Theory of the Mechanics of Atoms and Molecules, *Physical Review* 28, pp. 1049-1070.
- Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Die Naturwissenschaften* 23, p. 812.
- Streater R. F. & Wightman, A. S. (1964). *PCT, spin and statistics, and all that*, W. A. Benjamin, Inc., New York.
- Von Neumann, J. (1932). *Grundlehren, Math. Wiss.* XXXVIII.
- Von Neumann, J. (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton.

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

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