

Oggettività, Soggettività, Teoria, Realificazione della Teoria. Caso di studio: la causalità in fisica

Giacomo Mauro D'Ariano
Università degli Studi di Pavia

 Istituto Lombardo
ACCADEMIA DI SCIENZE E LETTERE

Convegno

Lost in physics and metaphysics
Questioni di realismo scientifico

25 febbraio 2018

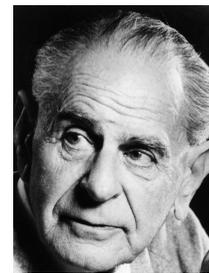


Premessa terminologica

Realtà oggettiva "locale"

Noumeno

Comincio con una breve premessa terminologica su alcune parole che userò sovente in seguito. In modo particolare utilizzerò il termine “realtà” con una connotazione implicita di verificabilità e oggettività. Più esplicitamente, con il termine “realtà oggettiva” intendo una realtà che può essere condivisa, ovvero verificabile unanimemente ~~da ogni possibile osservatore~~, ad esempio l’esito “testa o croce” del lancio di una moneta, o il numero rappresentato da un frequenzimetro digitale. Si noti che fra “obiettivo” e “oggettivo” esiste una lieve differenza di significato. "Obiettivo" è aggettivo che indica imparzialità. "Oggettivo" indica che sta alla realtà dei fatti: concreto, che si fonda su dati e cose sperimentabili, che si attiene ai fatti senza intervento del soggetto. Ma poiché in questo contesto useremo il termine “realtà” intendendola come indipendente dal soggetto, i due termini diventano effettivamente sinonimi, e verranno usati interscambiabilmente. Faccio notare che invece solitamente con il termine “realtà” si intende “ciò che esiste effettivamente”, in contrapposizione a ciò che è illusorio, immaginario o fittizio, ad esempio contrapposto al sogno o al credo. Ebbene: non è quello che io intendo. Il termine “realtà” qui verrà usato solo con la connotazione di leggibilità e condivisibilità. Per denotare la “cosa in se” che generalmente non può essere percepita in modo oggettivo, ma che può essere concepita intellettivamente useremo (anche se sporadicamente) il termine “noumeno”, il quale, ad esempio, può corrispondere ad un elemento teorico. Ad esempio: l’onda elettronica o elettromagnetica, o la particella elettrone, sono da considerarsi noumeni, non realtà oggettiva, come ad esempio: scintillazioni su un tubo catodico, o delle tracce di particelle in una camera a bolle. Con il termine “realtà locale”, invece, intendo una realtà oggettiva che sia indipendente da operazioni eseguite remotamente.



La lezione metodologica della meccanica quantistica

Distinzione fra esperimento e teoria

Crisi del "realismo"

La lezione metodologica più profonda che ci viene dalla meccanica quantistica è la necessità logica di tenere assolutamente distinti esperimento e teoria, ovvero realtà obiettiva condivisa/condivisibile da un lato, e teoria con la quale descriviamo e prevediamo la realtà dall'altro. Ciò è cruciale per poter applicare il criterio di demarcazione di Popper basato sulla falsificabilità della teoria. Prima della meccanica quantistica questa distinzione non costituiva un problema, in quanto nella fisica classica ogni elemento della teoria aveva un corrispondente nella realtà oggettiva. Diciamo che la teoria classica è "realistica", ovvero è una teoria che soddisfa la corrispondenza fra elemento della teoria ed elemento della realtà fisica oggettiva. La meccanica quantistica ha messo in crisi una tale forma di realismo, e lo ha fatto principalmente mettendo in evidenza l'esistenza della "non località", ovvero l'impossibilità di interpretare l'osservazione come lettura di una realtà locale pre-esistente l'osservazione (rammento che per "locale" si intende "indipendente da operazioni eseguite remotamente"). La lezione che ne deriviamo è che forzare l'osservazione ad essere la lettura di una realtà preesistente oggettiva porta alla vittoria di Pirro che tale realtà deve poter dipendere da operazioni eseguite a distanza qualunque, e, in quanto tali, non conoscibili anche in linea di principio. A peggiorare la situazione vi è il fatto che tale dipendenza da operazioni remote deve essere istantanea, il che significa che, in accordo alla relatività ristretta, l'operazione remota avviene prima o dopo l'osservazione, a seconda della scelta del sistema di riferimento inerziale. Non può quindi sussistere alcuna connotazione causale di tale dipendenza da operazioni remote.

Impossibile interpretare la probabilità nella
misurazione come *“lack of knowledge”*

Risultato non come lettura di realtà pre-esistente,
ma “generato” all’atto della misurazione

Stato quantistico: informazione “privata”

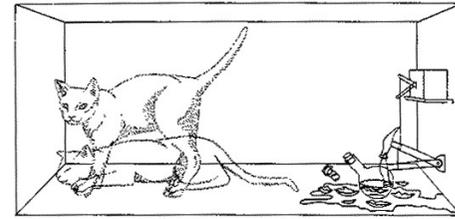
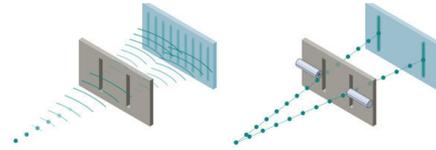
Risultato della misurazione: informazione “pubblica”

Non è quindi possibile interpretare la probabilità nella misurazione come “lack of knowledge”, ovvero come mancanza di conoscenza di una realtà locale oggettiva pre-esistente la misurazione stessa. Il risultato della misurazione, non potendo essere la lettura passiva di una realtà oggettiva locale, è pertanto generato all’atto stesso della misurazione. Ciò non vuol dire che non dipenda da qualcosa di pre-esistente la misurazione, altrimenti ne sarebbe vanificata la sua stessa finalità. Il risultato della misurazione dipende infatti dallo stato quantistico del sistema sul quale la misurazione è eseguita. Possiamo quindi vedere lo stato quantistico come un “noumeno” non oggettivabile pre-esistente la misurazione. Lo stato quantistico rappresenta quello che chiamiamo anche “informazione quantistica”: **<P>** si tratta di un’informazione “privata”, conosciuta solo da chi ha preparato lo stato quantistico, a differenza dell’informazione acquisita nell’osservazione, che è informazione “pubblica”, condivisibile. Informazione privata quantistica—l’informazione della crittografia quantistica—in contrapposizione con informazione pubblica classica.



“Collasso”
da informazione quantistica “privata”
in informazione classica “pubblica”

Attuazione condivisa/condivisibile di potenzialità



In sintesi abbiamo quindi “informazione quantistica privata” che all’atto dell’osservazione “collassa” ad “informazione classica pubblica”. **<P>** È questo il cosiddetto “collasso della funzione d’onda”: l’informazione quantistica non divisibile, non “clonabile” (si veda il teorema del no cloning quantistico), non oggettiva, che si trasforma in un risultato oggettivo. Informazione quantistica che diventa informazione classica. È l’attualizzazione condivisa e divisibile di una potenzialità: è il mistero del collasso del postulato di von Neumann che ha tormentato e tormenta la comunità dei fisici teorici **<P>** da quando Schrödinger introdusse il suo famoso paradosso del gatto. Ma, a ben pensare, è anche l’unica implementazione di quel che si intende per “probabilismo inerente”, come è quello proprio della teoria quantistica, ovvero probabilismo non interpretabile come “lack of knowledge” [mancanza di conoscenza di una realtà oggettiva locale], bensì realtà oggettiva generata all’atto della misurazione.

Riassumendo quanto detto sinora: l’osservazione non è la lettura di una realtà locale oggettiva preesistente, bensì il risultato dell’osservazione viene generato nell’atto stesso come attualizzazione oggettiva di una potenzialità soggettiva, “privata”.

QBISM

Interpretazione “Bayesiana” della probabilità della misurazione secondo la regola di Born, una volta che sia noto lo stato quantistico dalla sua procedura di preparazione

L'aggettivo “soggettivo” ben si adatta al Qbism di Chris Fuchs, ~~Carlton Caves e Rüdiger Schack~~, corrispondente all'interpretazione Bayesiana della probabilità della misurazione, e all'interpretazione della regola di Born come normativa di decision-making.

“Bit quantistici”

Informazione quantistica

Lo stato quantistico rappresenta quindi informazione di tipo diverso da quella usuale dell'informatica: è “informazione quantistica”. In effetti, la teoria quantistica generale dei sistemi astratti, ovvero la teoria senza le sue connotazioni meccaniche, elettromagnetiche, di campo—in sintesi, la grammatica della fisica teorica—è una vera e propria teoria dell'informazione: è l'informazione dei bit quantistici o “qubits”. Di questo parleremo fra breve.

Soggettivo = non scientifico ...



"realificazione" (ipostatizzazione) della teoria

Il termine "soggettivo" stimola spesso reazioni negative di "non scientificità" nei fisici, e, in generale, in chi si occupa di scienza. Strettamente parlando, invece, la teoria permette di fare previsioni seguendo un processo di inferenza logica sulla base di ipotesi, e l'ipotesi non è necessariamente condivisa o condivisibile. La teoria stessa è un ipotesi che potrebbe essere falsificata, ed, in quanto tale, non condivisibile in un futuro. La necessità di obiettività, che rappresenta il trademark della scientificità stessa, riguarda invece il dato oggettivo, assieme alle stesse regole di inferenza logica, non riguarda certo la condivisione di ipotesi, inclusa la stessa teoria. E forse è questa richiesta di oggettivazione delle ipotesi la motivazione principale della "realificazione" della teoria (quello che tecnicamente viene chiamata "ipostatizzazione" della teoria, [~~ovvero concretismo, la fallacia della concretezza fuori luogo~~): il trattare la teoria stessa come reale e oggettiva. Ma se fosse tale, la teoria non sarebbe falsificabile: per definizione il dato oggettivo falsifica, non è falsificato.

“Interpretazioni” della probabilità:

Bayesiana (soggettiva)

frequentista (oggettiva)

Probabilità come regola normativa di decision-making!

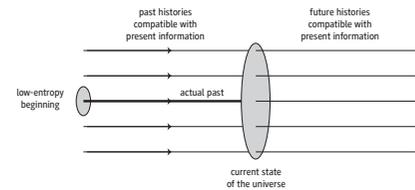
Il caso del concetto di probabilità è l'esempio più comune di realificazione della teoria, allorché si parla di “interpretazioni” della nozione di probabilità: interpretazione “Bayesiana soggettivista” versus interpretazione “frequentista oggettivista”, quest’ultima come se la probabilità fosse una realtà oggettiva che viene misurata (è anche il caso dell’interpretazione di “propensità” di Popper, dove la probabilità è supposta connessa ad un meccanismo obiettivo, laddove invece il meccanismo è teoria). Il valore della probabilità di un evento è sempre la conseguenza di una ipotesi: tipicamente, in accordo alla regola di Laplace di equiprobabilità, un ipotesi di simmetria, di equivalenza di eventi. Anche nel caso in cui determiniamo il valore di una probabilità con prove ripetute, esso è la conseguenza dell’ipotesi dell’interscambiabilità delle prove, come diceva Bruno de Finetti, interscambiabilità che corrisponde ad assumere a priori una distribuzione di probabilità di una miscela di valori della probabilità “misurata”. Infatti, se consideriamo solo la logica e l’oggettività del risultato della prova ripetuta, senza ulteriore ipotesi, possiamo al più affermare che se un evento è obiettivamente accaduto la sua probabilità è strettamente maggiore di zero, se non è accaduto, la sua probabilità è strettamente minore di uno. Ma, a parte i bound zero e uno, non si può affermare logicamente nessun bound più stringente, e men che meno affermare che la probabilità ha un preciso valore obiettivo. La probabilità, come è sempre stato, sin dalle sue origini basate sul gioco d’azzardo, è una regola normativa di decision-making che ultimamente si riconduce ad una assunzione di equiprobabilità.

Richiesta di *realismo* della teoria:
realificazione del *determinismo*

Probabilità come "lack of knowledge"

La richiesta stessa di realismo della teoria è automaticamente una sua realificazione. È il caso molto comune della realificazione del determinismo, ovvero il richiedere che la realtà stessa sia deterministica, e la probabilità sia quindi solo ed esclusivamente "lack of knowledge".

than we do its future. But we think we know more about where it came from than where it might be going. Ultimately, even if we don't realize it, the source of our confidence is the fact that entropy was lower in the past. We are very used to unbroken eggs breaking; that's the natural way of things. In principle, the set of things that could befall the egg in the future is precisely the same size as the set of ways it could have arrived in its present condition, as a consequence of conservation of information. But we use the Past Hypothesis to rule out most of those possibilities about the past.

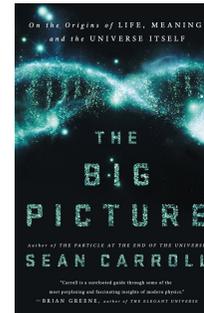


The Past Hypothesis of a low-entropy beginning breaks the symmetry between the past, on the left, and future, on the right.

The story of the egg is a paradigm for every kind of “memory” we might have. It’s not just literal memories in our brain; any records that we may have of past events, from photographs to history books, work on the same principle. All of these records, including the state of certain neuronal connections in our brain that we classify as a memory, are features of the current state of the universe. The current state, by itself, constrains the past and future equally. But the current state plus the hypothesis of a low-entropy past gives us enormous leverage over the actual history of the universe. It’s that leverage that lets us believe (often correctly) that our memories are reliable guides to what actually happened.

Back in chapter 4 we highlighted how Laplace’s conservation of information undermines the central role that Aristotle placed on causality.

Causalità: la Cenerentola della Fisica



La realificazione del determinismo e l’identificazione del determinismo con la causalità ha portato ad abolire la nozione stessa di causalità, nozione che usiamo quotidianamente, non solo in scienza. Qui riporto quello che sostiene il “mainstream” in fisica teorica, in un popolarissimo testo di Sean Carrol: <P>

“Abbiamo già evidenziato come la legge di conservazione di Laplace (qui Carrol intende la reversibilità dell’evoluzione dinamica) mina il ruolo centrale posto da Aristotele sulla causalità.”

Carrol parte quindi da una visione completamente deterministica alla Laplace.

Concepts like "cause" appear nowhere in Newton's equations, nor in our more modern formulations of the laws of nature. But we can't deny that the idea of one event being caused by another is very natural, and seemingly a good fit to how we experience the world. This apparent mismatch can be traced back to entropy and the arrow of time.

It might seem strange to describe the world as operating according to unbreakable physical laws, and then turn around and deny causality a central role. After all, if the laws of physics predict what will happen at the next moment from what the situation is now, doesn't that count as "cause and effect"? And if we don't think that every effect has a cause, aren't we unleashing chaos on the world, and saying that basically anything can happen?

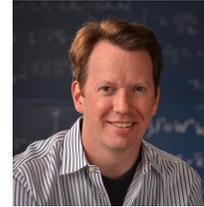
The strangeness evaporates once we appreciate the substantial difference between the kind of relationship of the past to the future that we get from the laws of physics, and the kind we usually think of as cause and effect. The laws of physics take the form of rigid patterns: if the ball is at a certain position and has a certain velocity at a certain time, the laws will tell you what the position and velocity will be a moment later, and what they were a moment before.

When we think about cause and effect, by contrast, we single out certain events as uniquely *responsible* for events that come afterward, as "making them happen." That's not quite how the laws of physics work; events simply are arranged in a certain order, with no special responsibility attributed to one over any of the others. We can't pick out one moment, or a particular aspect of any one moment, and identify it as "the cause." Different moments in time in the history of the universe follow each other, according to some pattern, but no one moment causes any other.

Understanding this feature of how nature works has led some philosophers to advocate that we eliminate cause and effect entirely. As Bertrand Russell once memorably put it:

The law of causality, I believe, like much that passes muster among philosophers, is a relic of a bygone age, surviving, like the monarchy, only because it is erroneously supposed to do no harm.

Causality: the Cinderella of Physics



Continuando:

“Concetti come "causa" non appaiono da nessuna parte nelle equazioni di Newton, né nella nostra moderna formulazione delle leggi della Natura. Ma non possiamo negare che l'idea che un evento sia causato da un altro è molto naturale ed apparentemente si adatta bene al modo in cui viviamo il mondo. Questa apparente discrepanza può essere fatta risalire all'entropia e alla freccia del tempo.”

Della freccia del tempo parlerò in seguito.

PAPERS READ BEFORE THE SOCIETY,

1912-1913.

I.—ON THE NOTION OF CAUSE.

By BERTRAND RUSSELL.

In the following paper I wish, first, to maintain that the word "cause" is so inextricably bound up with misleading associations as to make its complete extrusion from the philosophical vocabulary desirable; secondly, to inquire what principle, if any, is employed in science in place of the supposed "law of causality" which philosophers imagine to be employed; thirdly, to exhibit certain confusions, especially in regard to teleology and determinism, which appear to me to be connected with erroneous notions as to causality.

All philosophers, of every school, imagine that causation is one of the fundamental axioms or postulates of science, yet, oddly enough, in advanced sciences such as gravitational astronomy, the word "cause" never occurs. Dr. James Ward, in his *Naturalism and Agnosticism*, makes this a ground of complaint against physics: the business of science, he apparently thinks, should be the discovery of causes, yet physics never even seeks them. To me it seems that philosophy ought not to assume such legislative functions, and that the reason why physics has ceased to look for causes is that, in fact, there are no such things. The law of causality, I believe, like much that passes muster among philosophers, is a relic of a bygone age, surviving, like the monarchy, only because it is erroneously supposed to do no harm.

A

Causality: the Cinderella of Physics



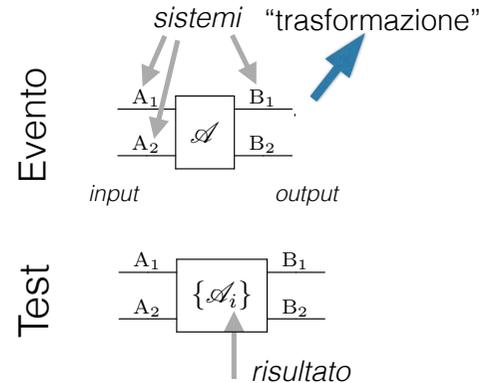
E Carrol prosegue con la popolare citazione di Bertrand Russell, che viene reiterata nella letteratura contraria alla causalità, facendo leva sul cosiddetto effetto Matthew, ovvero, al fine di avere credito, citare uno scienziato molto accreditato, a maggior ragione un grande logico-matematico come Bertrand Russell:

“La legge della causalità, credo, come molte cose che passano ai filosofi, è una reliquia dell'età del passato, sopravvive come la monarchia, perché è erroneamente supposta non fare alcun danno.”

Come ora vedremo, invece, la causalità è un teorema della teoria quantistica, ed è falsificabile. Ed è essenzialmente lo stesso concetto di causalità che intendeva Einstein.

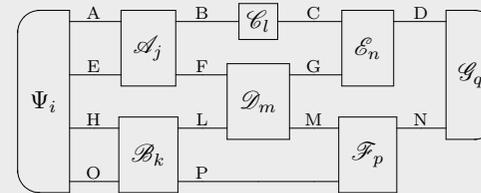
Principi per la Teoria Quantistica

La teoria operativa
probabilità congiunte + connettività



le probabilità congiunte
dipendono da un circuito

$$p(i, j, k, l, m, n, p, q | \text{circuit})$$



In quanto teoria dell'informazione, la teoria quantistica si può formulare come teoria operativa. Si tratta di un'estensione della teoria probabilistica, che alla probabilità congiunte di eventi multipli associa anche una connettività fra gli eventi stessi, **<P>** connettività rappresentata da un grafo unidirezionato aciclico chiuso di relazioni di input-output fra gli eventi, detto circuito. **<P>** Dobbiamo vedere ogni evento come l'elemento della collezione completa di tutti i possibili eventi alternativi, detta "test", o, in altri termini, l'evento costituisce un particolare risultato ("outcome") del test. La teoria operativa associa al circuito la distribuzione di probabilità congiunta dei suoi test. La connettività fra gli eventi o i tests li veste di "fili" di input sulla sinistra e di output sulla destra, i cosiddetti "sistemi", che permettono di connetterli con altri eventi.

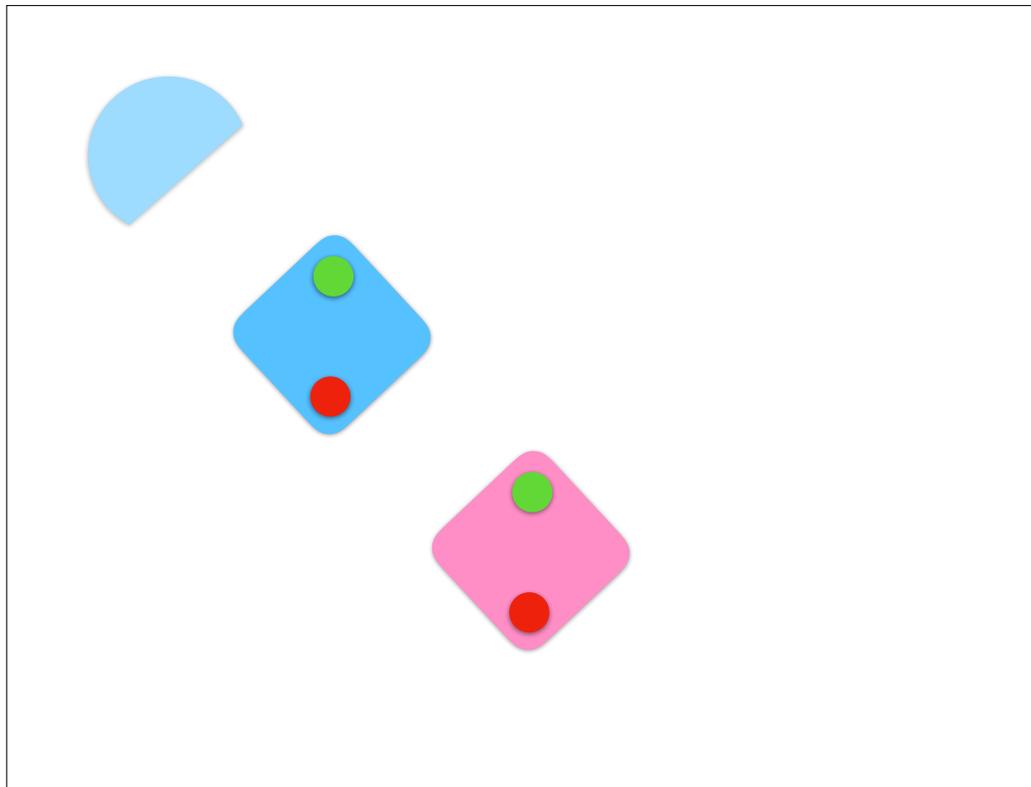
La nozione di "sistema" corrisponde quindi ad una relazione input-output fra eventi diversi, rappresentata da un link che li connette, dall'output di un evento a sinistra all'input di un secondo evento sulla destra. Il grafo complessivo è unidirezionato aciclico (in quanto ogni sistema rappresenta una connessione univoca, dall'output all'input), ed è chiuso (ovvero il grafo complessivamente non ha sistemi né input né di output), in quanto ogni sistema deve connettere eventi osservabili. La teoria è quindi formulata in termini di un grafo aciclico unidirezionato (in gergo DAG: directed acyclic graph) di connessioni fra eventi, quello che normalmente chiamiamo "circuito quantistico". **<P>** Per costruire un circuito chiuso si utilizzano particolari eventi che non hanno input, detti "preparazioni", ed eventi che non hanno output, detti "osservazioni".

Evento: nozione oggettiva

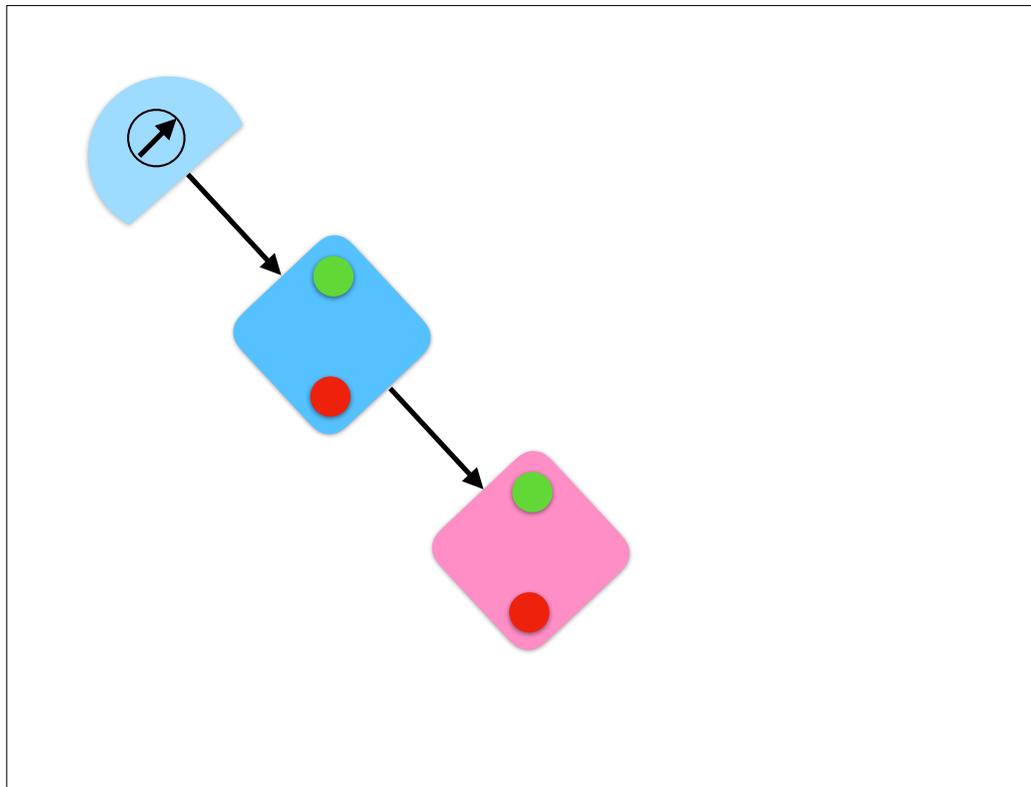
Sistema: nozione teorica

La teoria assegna le probabilità congiunte degli eventi per ogni circuito.

La nozione di “evento” rappresenta la componente oggettiva della teoria, mentre i sistemi, ovvero le connessioni fra gli eventi, sono elementi strettamente teorici. La teoria assegna poi le probabilità congiunte di ogni circuito.



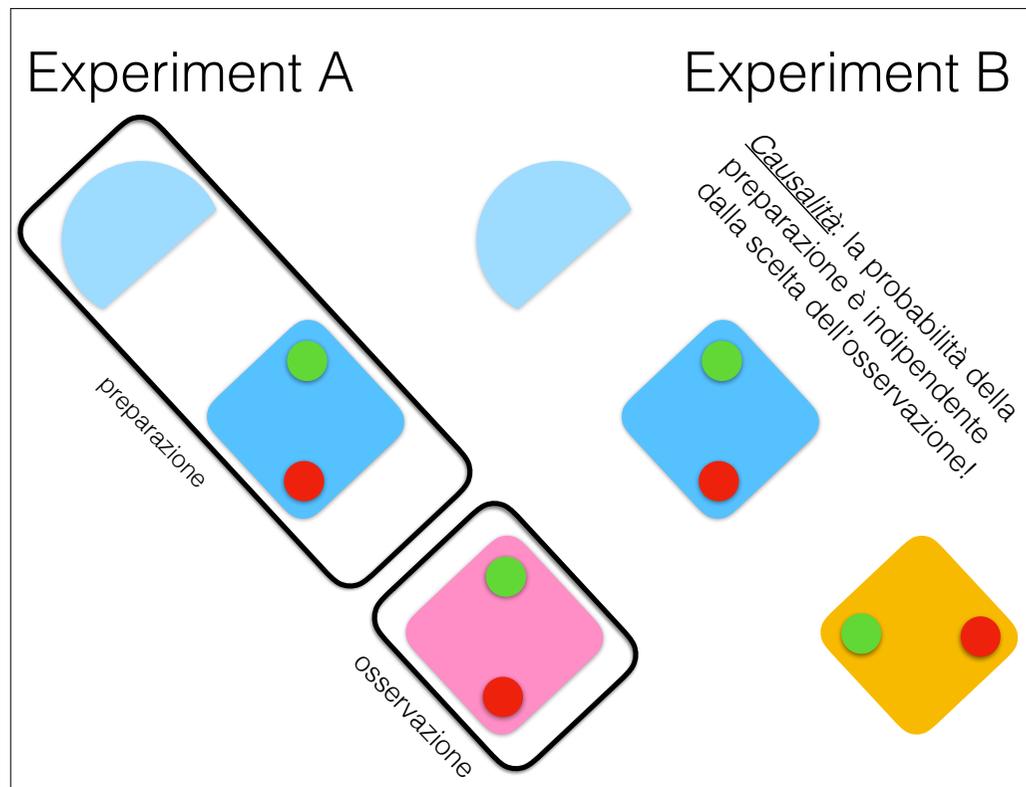
Il più semplice semplice esempio di circuito quantistico è il caso di due Stern-Gerlach in cascata preceduti da una preparazione di un fascio di particelle. Nel caso della preparazione l'evento è deterministico, essendo l'unico evento possibile. I due apparati di Stern-Gerlach messi in cascata di fronte al generatore del fascio sono due test binari, con possibili risultati "up" e "down". Tutti e tre i test sono costituiti da ben precisi setup sperimentali e ogni evento descrive il setup del test con un determinato risultato.



In base alla teoria quantistica, noi immaginiamo la particella con spin $1/2$ che transita successivamente attraverso i due apparati Stern-Gerlach e fa accendere il led del corrispondente rivelatore di particelle presso il “pinhole” attraverso il quale è passata la particella. In realtà, come avrebbe fatto notare Niels Bohr, non vediamo nessuna particella, ma solo l’accensione dei led. La particella è nella nostra immaginazione: è un elemento della teoria. **<P>** Tracciamo una linea direzionata che unisce i due box degli apparati. Questi segmenti direzionati sono quello che chiamiamo “sistema”. In tal senso il sistema è una nozione prettamente teorica, e rappresenta una connessione fra due eventi distinti.

La causalità è falsificabile!

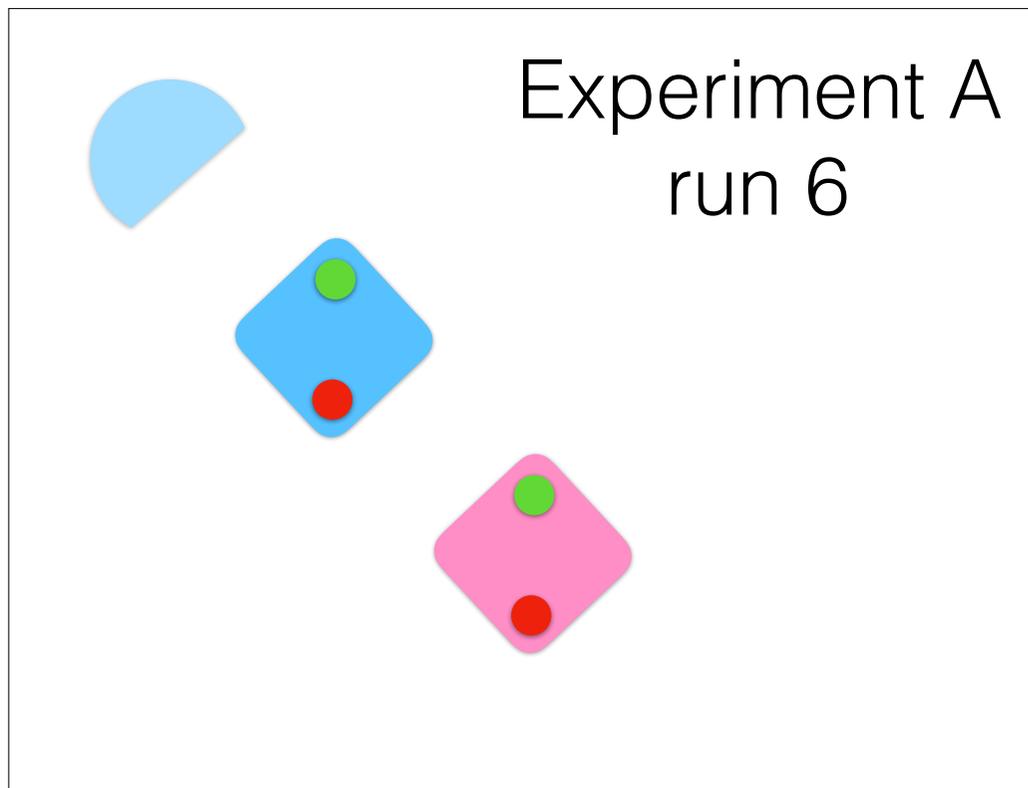
Illustro immediatamente cosa intendiamo per causalità nella teoria quantistica, con un esperimento concepito per falsificarla.



Consideriamo un esperimento che chiameremo “esperimento A” che consiste in un generatore di fascio di particelle seguito da due apparati di Stern-Gerlach in cascata, entrambi con il gradiente di campo magnetico verticale. E consideriamo un secondo “esperimento B”, in cui invece il secondo apparato della cascata di Stern-Gerlach ha il gradiente orizzontale. **<P>** Possiamo considerare il generatore di fascio seguito dal primo Stern-Gerlach come una nuova preparazione “probabilistica” dei due fasci con spin opposto” e il secondo Stern-Gerlach in cascata come una “osservazione del fascio”. **<P>**

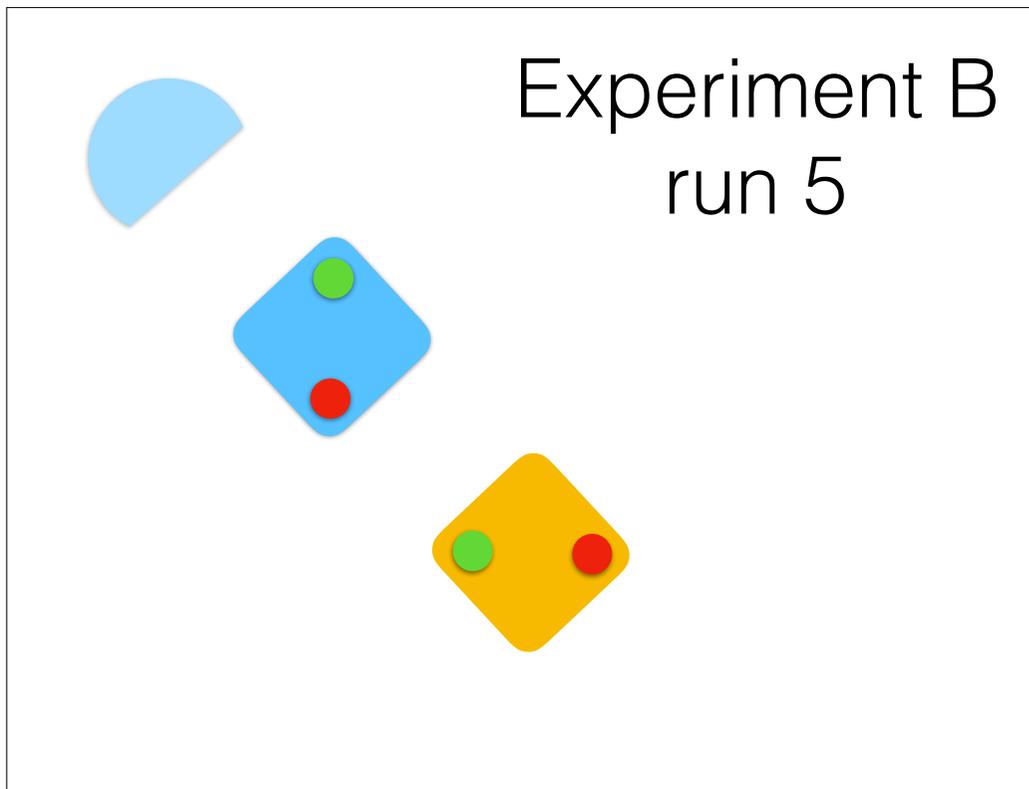
La causalità della teoria quantistica dice che la probabilità della preparazione è indipendente dalla scelta dell'osservazione.

Nel nostro caso questo vorrebbe dire che la distribuzione di probabilità del primo Stern-Gerlach della cascata non dipende da quale Stern-Gerlach lo segue nella cascata, ovvero sia esso con gradiente verticale o orizzontale. Vediamo come tale ipotesi sarebbe falsificata.



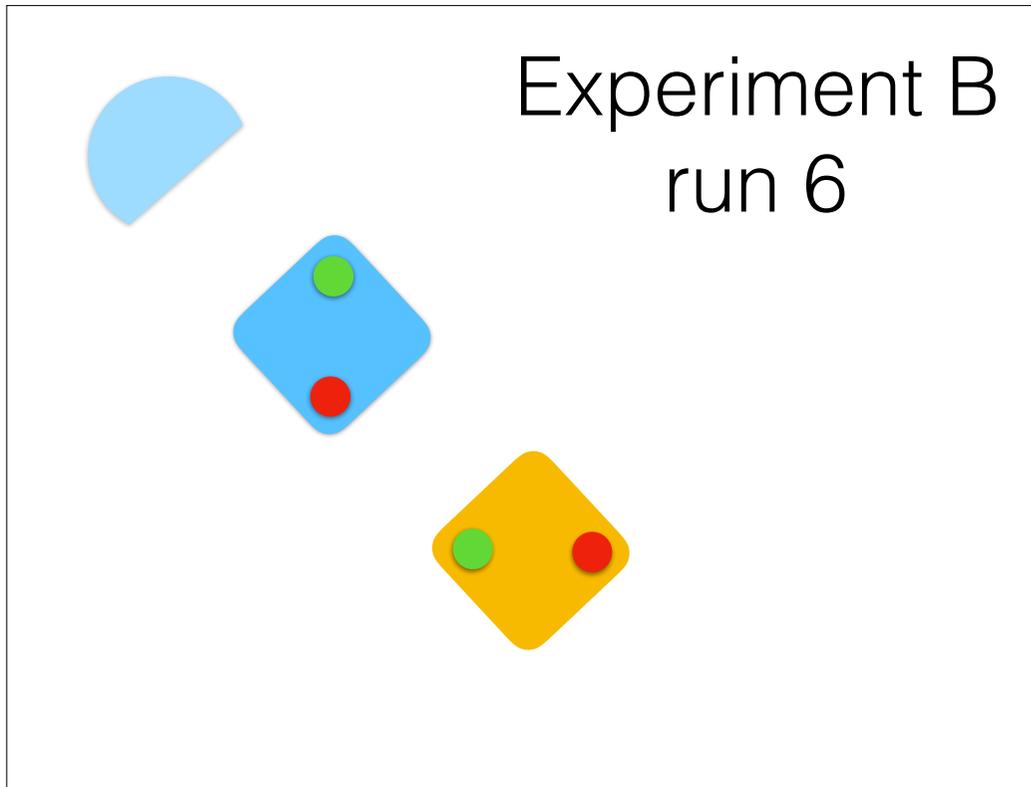
Eseguiamo il primo esperimento e constatiamo che nel primo Stern-Gerlach la luce verde si accende due volte su tre.

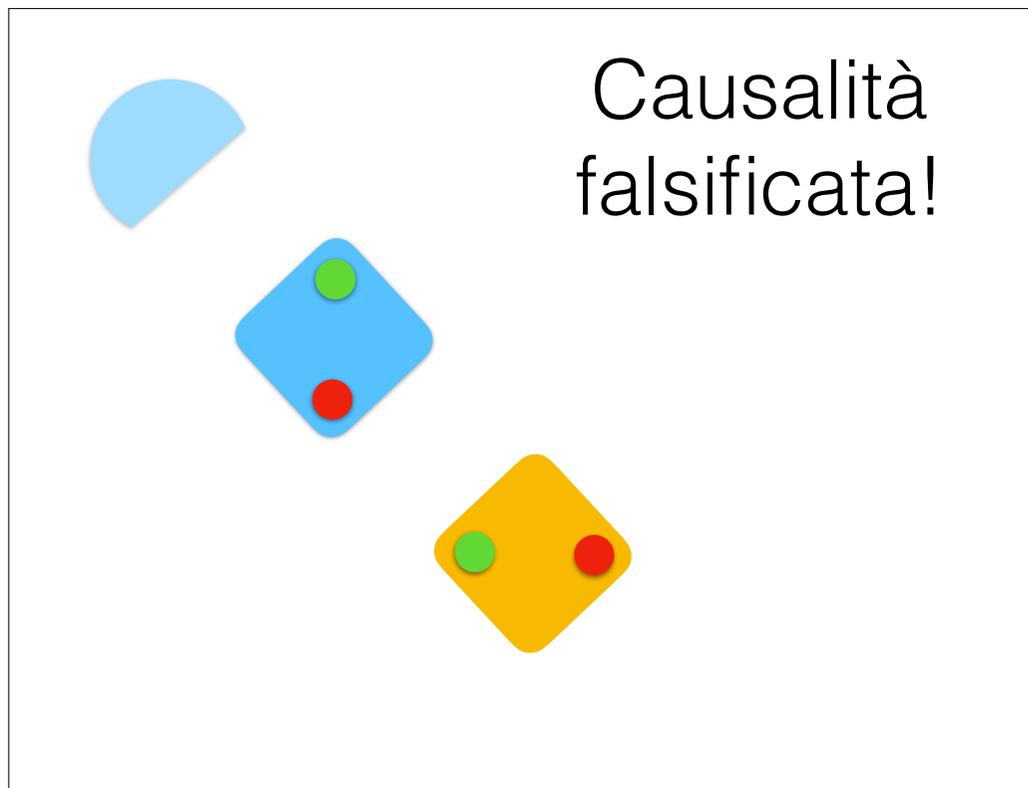
Experiment B run 5



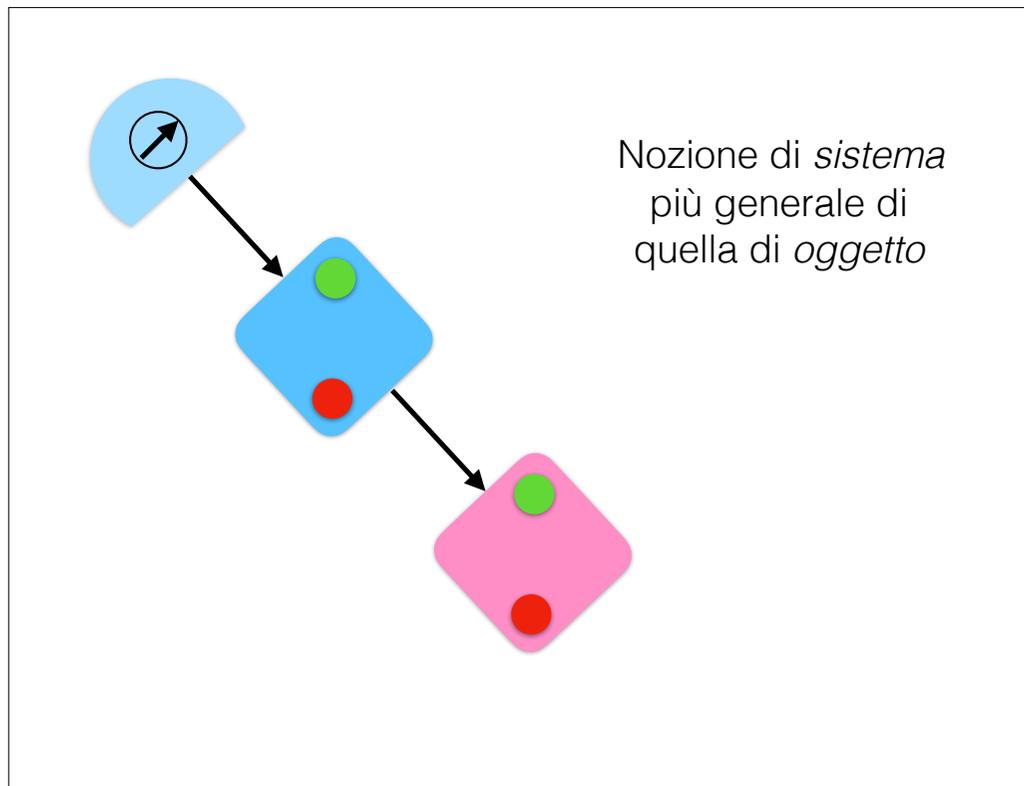
Eseguiamo ora il secondo esperimento e questa volta è la luce rossa che si accende due volte su tre.

Experiment B
run 6





Avremmo in tal modo falsificato la causalità. La causalità è pertanto falsificabile: quindi la causalità è scienza!



Vediamo ora in maggior dettaglio l'apparato concettuale teorico che supporta la nozione di causalità. **<P>** Abbiamo detto che la particella è nella nostra immaginazione: è un elemento della teoria. Abbiamo tracciato una linea direzionata che unisce i due box degli apparati. Questi segmenti direzionati sono quello che chiamiamo "sistema". Il sistema quindi è una nozione prettamente teorica, che rappresenta una connessione fra due eventi distinti. Normalmente la nozione di "sistema" viene considerata alla stessa stregua di quella di "oggetto", ma è una nozione molto più ampia. Infatti, come ho già avuto altre volte occasione di rimarcare in questa sede, la nozione di "oggetto" in quanto definito da un insieme di proprietà non è compatibile con la connotazione "mereologica" di componibilità degli oggetti a formare nuovi oggetti, in quanto non si accorda con l'olismo quantistico, ovvero:

OLISMO QUANTISTICO

Le proprietà del tutto sono incompatibili con tutte le proprietà delle parti

La conoscenza del tutto non implica la conoscenza delle parti



insostenibilità della nozione di *oggetto*:

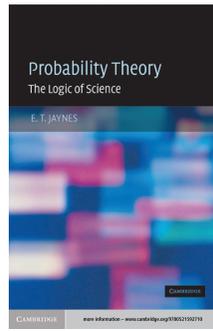
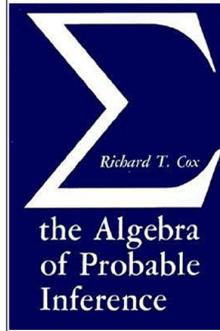
Olismo:

In termini di osservabili: le proprietà del tutto sono generalmente incompatibili con tutte le proprietà delle parti. Matematicamente una proprietà è associata ad un proiettore ortogonale su un sottospazio di Hilbert, e la situazione tipica è quella di proiettore entangled, che non commuta con nessun proiettore locale.

In termini di stati: la conoscenza del tutto non implica la conoscenza delle parti. Questa è una conseguenza del fatto che per la maggioranza degli stati congiunti di “oggetti” multipli, possiamo estrarre più informazione dagli oggetti assieme che la somma delle informazioni estraibili da ognuno separatamente. Nella teoria quantistica l’informazione estraibile da un set di oggetti visti come un tutt’uno è fornita dal loro “stato quantistico congiunto”, mentre l’informazione estraibile da ogni oggetto separatamente è data dal suo “stato quantistico marginale”. ~~La situazione olistica è “tipica”, nel senso che il set degli stati congiunti per cui non si ha olismo è di misura nulla nel set di tutti gli stati congiunti.~~ La situazione estrema è quella di uno stato massimamente entangled puro di due oggetti, i cui stati marginali sono quindi massimamente misti: lo stato puro corrisponde a conoscenza massima (~~ad esempio conoscenza del valore esatto di un set massimale di osservabili commutanti~~), mentre lo stato misto corrisponde a conoscenza nulla (~~ad esempio distribuzioni uniformi dei valori delle osservabili~~).

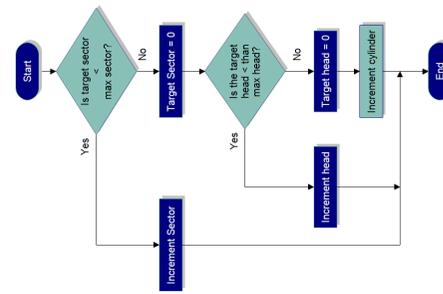
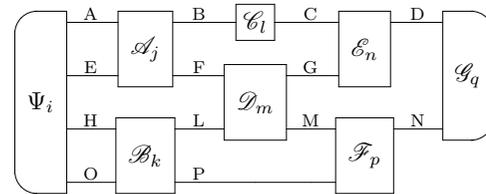
La teoria quantistica è un'estensione della logica

Non si tratta quindi di modificare la logica, bensì di estenderla.

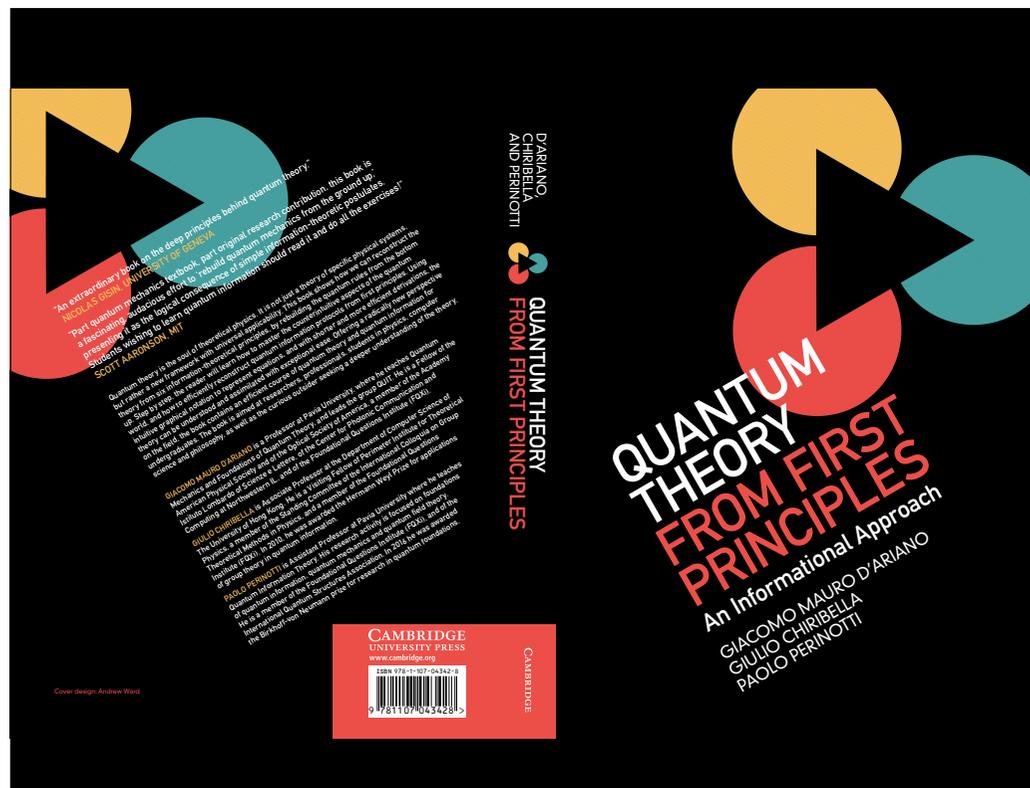


La teoria quantistica, in quanto teoria operativa, è un'estensione della teoria delle probabilità, la quale, come diceva Edwin Jaynes, è un'estensione della logica, come in effetti Richard T. Cox ha mostrato nel suo libro "The Algebra of Probable Inference", ~~dove ha dedotto le regole dell'inferenza probabilistica a partire dall'algebra Booleana delle proposizioni (incluse regole di somma, prodotto, Bayes, ...)~~ Non si tratta quindi, come pensava von Neumann con il suo programma di "quantum logic" condiviso con Birkoff, di modificare la logica, bensì di estenderla. La teoria è quindi l'ampliamento di un processo di inferenza.

Una teoria operativa è una teoria dell'informazione



D'altro canto, una teoria operativa è anche una teoria generale dell'informazione. Ciò può essere compreso pensando al circuito come il run (non il flowchart!) di un programma di calcolo, laddove i tests sono le "subroutines" e i sistemi sono i "registri di memoria" dove le subroutines si scambiano dati, ovvero rappresentano le connessioni input-output fra le subroutines.



E, in effetti,

nel 2011 con Paolo Perinotti e Giulio Chiribella abbiamo derivato la teoria quantistica da principi di teoria dell'informazione. Il lavoro, che è stato oggetto di analisi approfondite dalla comunità internazionale, ottenendo vari riconoscimenti, è divenuto un libro di testo sulla teoria quantistica della Cambridge University Press, testo presentato a questa stessa Accademia dal Prof. Attilio Rigamonti il 6 aprile 2017.

Principi per la Teoria Quantistica

Causalità

Discriminabilità perfetta
Discriminabilità locale
Atomicità della composizione
Compressione ideale
Purificazione

La probabilità delle preparazioni è indipendente dalla scelta delle osservazioni

Marginal probability

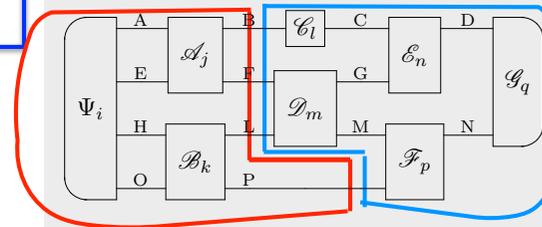
$$\sum_{i,k,\dots} p(i, j, k, \dots | \text{circuit}) =$$

$$p(j | \text{circuit})$$

$$(\Psi_i, \mathcal{A}_j, \mathcal{B}_k) \xrightarrow{\text{BFLP}} (\mathcal{D}_m, \mathcal{F}_p, \mathcal{E}_l, \mathcal{E}_n, \mathcal{G}_q)$$



$$p(i, j, k, l, m, n, p, q | \text{circuit})$$

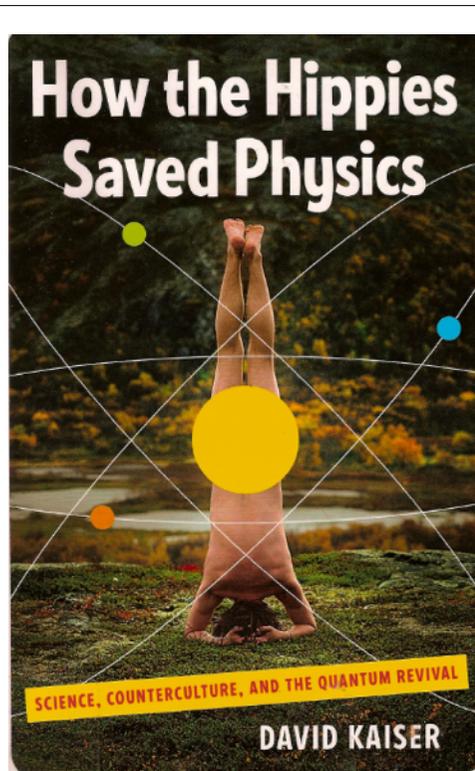


Nel framework operativo la teoria quantistica è derivata dai seguenti sei postulati

QUI ELENCATI

dei quali il primo è la causalità, sul quale ci concentriamo oggi. In precedenti memorie presentate in questa Accademia ho analizzato tutti i sei postulati, e ne ho discusso la rilevanza epistemologica, notando come in un modo o nell'altro hanno tutti a che fare con la possibilità di falsificare proposizioni della teoria con operazioni locali.

Il postulato della causalità si esprime quindi precisamente come segue. L'ingrediente non banale da rimarcare è che in una teoria operativa la dipendenza parametrica dal circuito della probabilità congiunta di tutti gli eventi implica che anche le probabilità marginali su tests del circuito generalmente dipendono ancora dal test marginalizzato. Ora, siccome ogni preparazione seguita da trasformazioni è ancora una preparazione (e similmente un'osservazione preceduta da trasformazioni è ancora un'osservazione), ogni circuito chiuso si può dividere in una preparazione e una osservazione. Quello che afferma il postulato di causalità è che la probabilità marginale della preparazione è indipendente dalla scelta del test di osservazione (mentre il viceversa, ovviamente, non è generalmente vero).

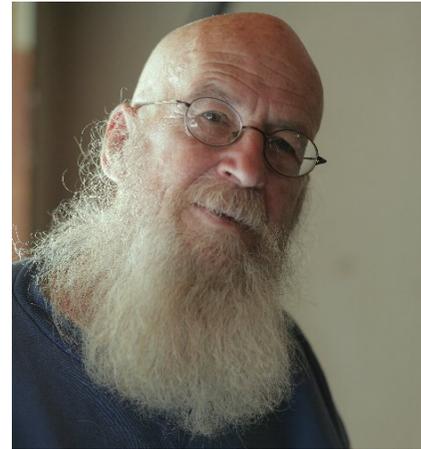


FLASH¹—A Superluminal Communicator Based Upon a New Kind of Quantum Measurement

Nick Herbert²

Received January 15, 1982

The FLASH communicator consists of an apparatus which can distinguish between plane unpolarized (PUP) and circularly unpolarized (CUP) light plus a simple EPR arrangement. FLASH exploits the peculiar properties of "measurements of the Third Kind." One purpose of this article is to focus attention on the operation of idealized laser gain tubes at the one-photon limit.



Il postulato può apparire ovvio, ma non lo è per nulla, ed è molto potente, e, come vedremo subito, vieta le comunicazioni a distanza senza interazione.

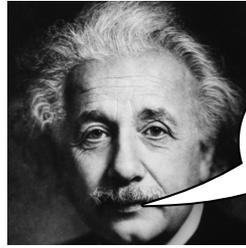
Qui si deve ricordare che nel 1982 Nick Herbert proponeva sulla rivista *Foundation of Physics* un metodo di comunicazione istantanea a distanza basato sulla condivisione di uno stato entangled, metodo che Herbert brevettò ottenendo cospicui finanziamenti dal Pentagono, come riportato sul libro di David Kaiser "How the Hippies Saved Physics". Il metodo era basato sulla possibilità di condividere un singolo stato di polarizzazione di fotone, di eseguire misurazioni locali di polarizzazione, e di clonare gli stati di polarizzazione mediante amplificazione stimolata di radiazione. L'emissione stimolata produce copie perfette di fotoni polarizzati: l'errore di Nick Herbert era stato quello di sottovalutare l'effetto dell'emissione spontanea. Ma la verifica teorica lungo un tale percorso è complessa, e il risultato fu che l'articolo venne esaminato da una dozzina di Referees e venne pubblicato anche se errato. Pochi mesi dopo apparve su *Nature* una breve comunicazione di Wootters e Zurek che dimostrava che il cloning perfetto di stati era impossibile perché contraddiceva la linearità della teoria quantistica. Questo "no-cloning theorem", comunque, pur mostrando che l'analisi di Nick Herbert era scorretta, non ne dimostrava il non funzionamento, in quanto il cloning perfetto è possibile probabilisticamente, e, comunque, è possibile cloning non perfetto, e se la comunicazione è affetta da errori, questi possono essere corretti mediante codifica se la probabilità di errore nel comunicare un bit non è esattamente 1/2. Quindi, il "no cloning theorem" non dimostrava affatto l'impossibilità di comunicare superluminalmente secondo lo schema proposto da Nick Herbert.

FLASH¹—A Superluminal Communicator Based Upon a New Kind of Quantum Measurement

Nick Herbert²

Received January 15, 1982

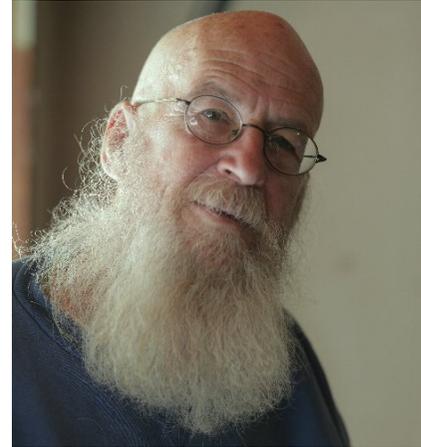
The FLASH communicator consists of an apparatus which can distinguish between plane unpolarized (PUP) and circularly unpolarized (CUP) light plus a simple EPR arrangement. FLASH exploits the peculiar properties of "measurements of the Third Kind." One purpose of this article is to focus attention on the operation of idealized laser gain tubes at the one-photon limit.



SPOOKY
ACTION AT
DISTANCE!



PEACEFUL COEXISTENCE
BETWEEN QUANTUM
MECHANICS AND RELATIVITY

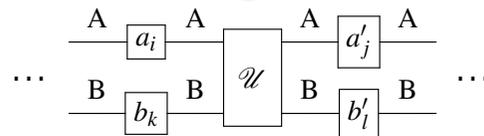
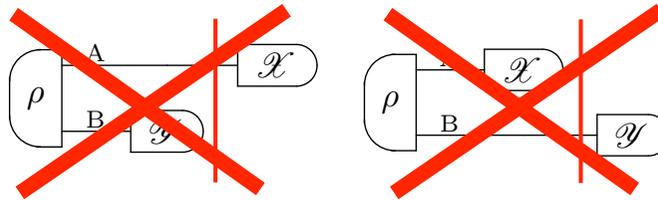


Bisogna dire che fraintendere l'entanglement con la possibilità di comunicare istantaneamente era errore alquanto comune nella comunità, ed in parte indotto anche dall'espressione spiritosa di Einstein "Spooky action at distance" — azione fantasmatica a distanza. E la non ovvietà dell'impossibilità di comunicare istantaneamente in presenza della non-località quantistica era dimostrata dall'espressione di Abner Shimony : "peaceful coexistence between quantum mechanics and special relativity".

La probabilità delle preparazioni è indipendente dalla scelta delle osservazioni



impossibilità di comunicare senza interazione



L'impossibilità di comunicare senza interazione condividendo uno stato entangled è invece semplicemente una conseguenza immediata della causalità. Il circuito che descrive la condivisione di uno stato entangled "rho" fra Alice e Bob che eseguono osservazioni/trasformazioni locali può essere diviso in una preparazione che include lo stato entangled e anche la misura di Alice, e in una osservazione, che contiene solo la misurazione di Bob, e l'indipendenza della probabilità di preparazione di Alice dalla scelta della osservazione di Bob sancisce l'impossibilità per Bob di comunicare ad Alice. **<P>** Lo stesso ragionamento si può fare scambiando simmetricamente i ruoli di Alice e Bob. **<P>** Ne concludiamo che è impossibile comunicare solo condividendo uno stato: occorre avere interazione, ovvero con uno schema di questo tipo!

Rilevanza epistemologica dei postulati per la falsificabilità della teoria

Causalità

garantisce un cono spazio-temporale
di schermatura dell'esperimento

Discriminabilità perfetta

Discriminabilità locale

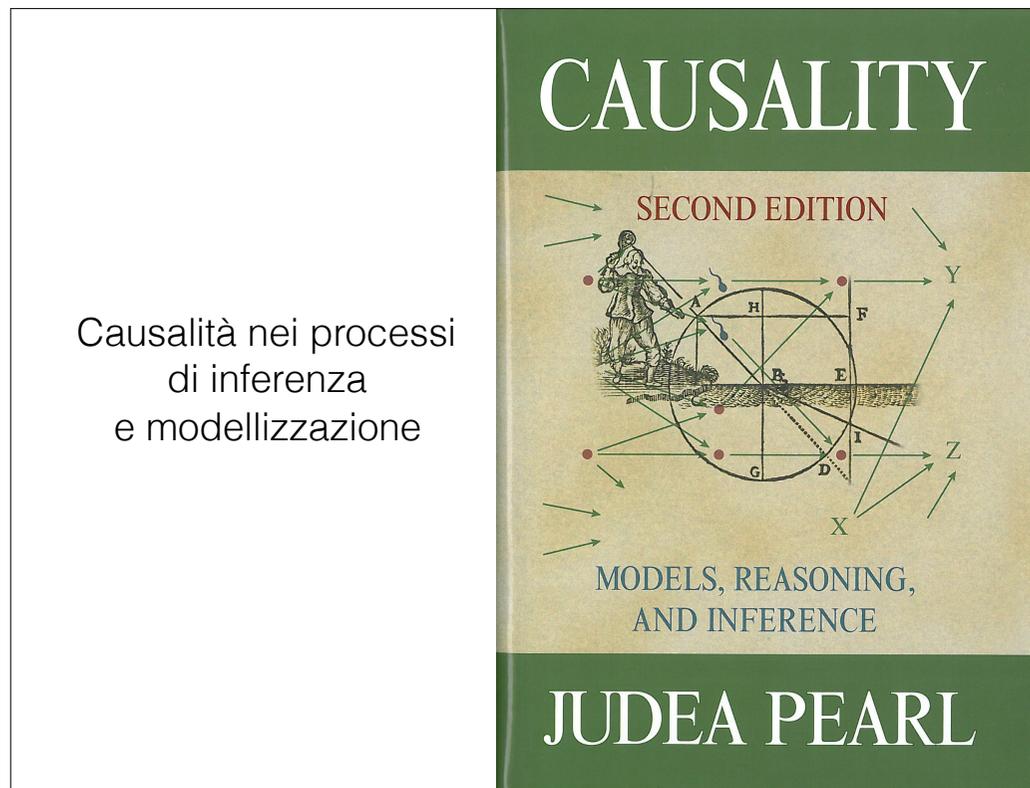
Atomicità della composizione

Compressione ideale

Purificazione

Come ho detto precedentemente, tutti e sei i postulati hanno una rilevanza epistemologica, e riguardano la falsificabilità delle proposizioni della teoria in situazione di controllo locale. La causalità stessa è necessaria per garantire un cono spazio-temporale di schermatura dell'esperimento, garantendo che la falsificazione non sia dovuta ad un'azione a distanza o dal futuro.

Causalità nei processi
di inferenza
e modellizzazione

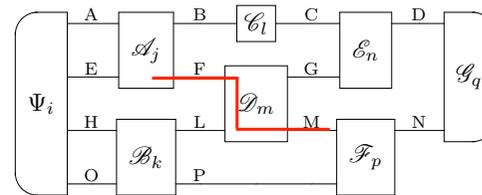


Si noti che la presente nozione di causalità corrisponde anche all'uso standard della causalità nei processi di inferenza e modellizzazione (si veda il libro sulla causalità di Judea Pearl).

Causalità quantistica e relativistica

la causalità introduce
una relazione d'ordine
parziale fra eventi

Una teoria è causale se e solo se la probabilità marginale di ogni test può dipendere solo dalla scelta di test che lo "precedono"



\mathcal{F} "segue" \mathcal{A}
 \mathcal{B} non segue \mathcal{A}

Si può anche mostrare l'equivalenza concettuale fra il principio di causalità che ho esposto e il concetto di causalità Einsteniana della relatività ristretta.

Infatti, la causalità può essere riformulata come segue:

Diciamo che "un test A precede un test F" quando A è connesso a F da un percorso unidirezionato da un output di A a un input di F.

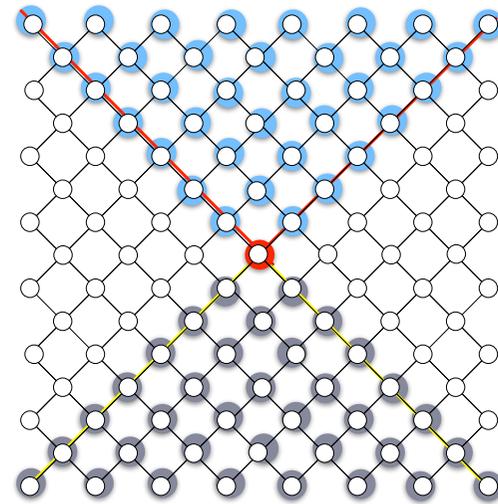
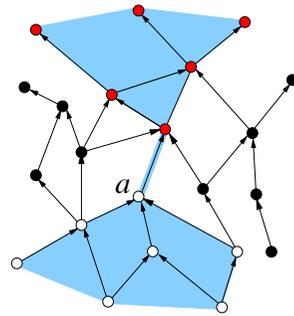
Una teoria operativa è causale se la probabilità marginale di ogni test può dipendere solo dalla scelta di un test che lo precede.

La relazione di precedenza è una relazione d'ordine parziale fra eventi.

Causalità quantistica e relativistica

la causalità introduce
una relazione d'ordine
parziale fra eventi

ordinamento parziale = cono



+ località, omogeneità, ed isotropia

G. M. D'Arano and A. Tosini, *Studies in Hist. Phil. Mod. Phys.* **44** 294 (2013)

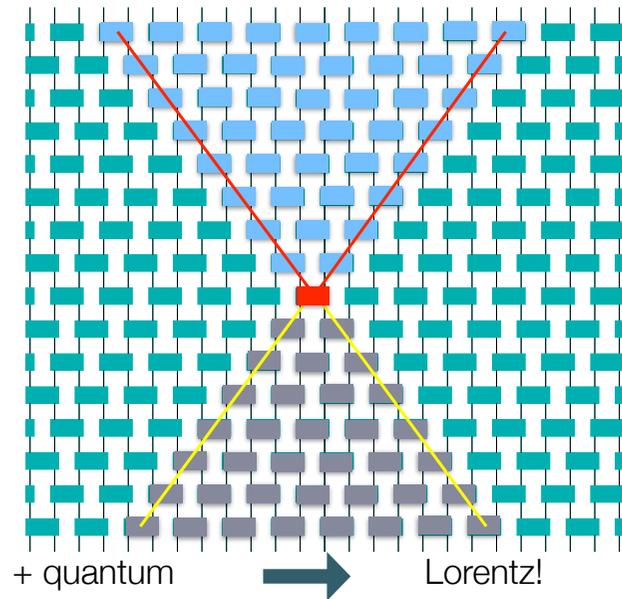
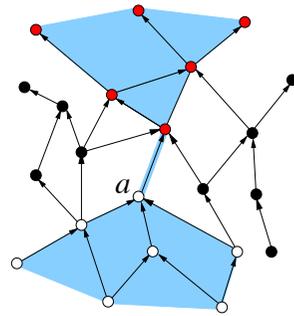
Come ogni relazione d'ordine parziale, la causalità definisce un "cono": questo è il cono causale dell'evento, o cono di output di un evento, ovvero l'insieme di tutti gli eventi che lo seguono. Simmetricamente definisce il cono di input di un evento, ovvero degli eventi che precedono. In questo vediamo una stretta analogia con la causalità della relatività ristretta, ovvero con il cono futuro e il cono passato di un evento nello spazio-tempo. La relatività ristretta prevede che un evento spazio-temporale possa essere causalmente (e quindi temporalmente) preceduto da un altro se si trova nel suo cono futuro, mentre il cono passato contiene tutti gli eventi che causalmente lo possono precedere. Anche per la teoria operativa il cono può essere usato inversamente per stabilire l'esistenza di connessione causale. Abbiamo quindi una corrispondenza biunivoca fra relazione d'ordine parziale e cono. Come nella teoria della relatività ristretta anche per la teoria operativa si possono definire foliazioni sul circuito, anziché nello spazio tempo. <P>

Se aggiungiamo le ulteriori richieste di località, omogeneità, ed isotropia alla rete causale di eventi (la località consiste nel requisito che ogni evento sia connesso ad un insieme finito di eventi), allora dalla rete causale ritroviamo esattamente la forma dei coni causali della relatività ristretta.

Quantum causality is the same of Einstein's!

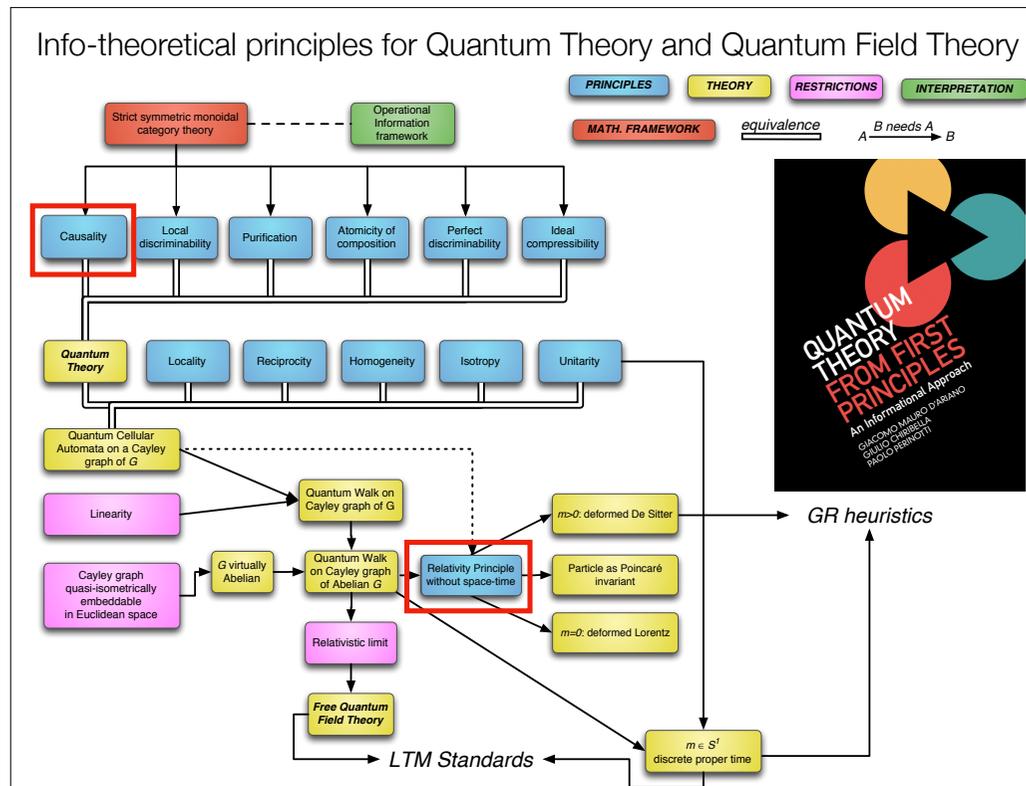
la causalità introduce
una relazione d'ordine
parziale fra eventi

ordinamento parziale = cono



A. Bisio, G. M. D'Ariano, P. Perinotti, PRA 94 042120 (2016)

Ma per ritrovare le trasformazioni di Lorentz dobbiamo anche richiedere che la rete causale sia un circuito quantistico, ovvero sia quello che chiamiamo un automa quantistico cellulare.



E qui menziono solamente che aggiungendo ulteriori principi che riguardano il circuito quantistico, quali omogeneità, località, isotropia, linearità, in effetti si riottiene la teoria di campo libera (di questo avevo parlato nel 2016 in questa stessa sede nella giornata di studio “Realtà senza Realismo”).

La causalità fissa la freccia del tempo.

La causalità stabilisce in modo ovvio la freccia del tempo, identificando il cono di input come il cono passato, e quello di output come cono futuro. Anche la stessa irreversibilità del processo di misurazione (ovvero il collasso della funzione d'onda) corrisponde ad una connessione causale fra eventi: la preparazione dello stato e l'osservazione successiva.

Causality: the Cinderella of Physics

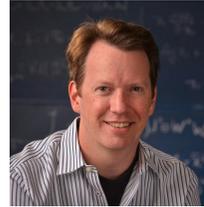
The reason why there's a noticeable distinction between up and down for us isn't because of the nature of space; it's because we live in the vicinity of an extremely influential object: the Earth. Time works the same way. In our everyday world, time's arrow is unmistakable, and you would be forgiven for thinking that there is an intrinsic difference between past and future. In reality, both directions of time are created equal. The reason why there's a noticeable distinction between past and future isn't because of the nature of time; it's because we live in the aftermath of an extremely influential event: the Big Bang.

...

The thing we need to add is an assumption about the initial condition of the observable universe, namely, that it was in a very low-entropy state. Philosopher David Albert has dubbed this assumption the Past Hypothesis.

...

What we know is that this initially low entropy is responsible for the "thermodynamic" arrow of time,...



Ma per chi non crede nella causalità (e quindi, direi, non crede nella teoria quantistica, o forse non l'ha capita) la freccia del tempo si ottiene in un altro modo. È questo il caso della Past Hypothesis di David Albert. E sempre dallo stesso libro di Sean Carroll leggiamo:

“La ragione per cui c'è una netta differenza fra sopra e sotto per noi non è per la natura stessa dello spazio, ma perché viviamo in prossimità di un oggetto molto influente: la Terra. Il tempo funziona alla stessa maniera. Nel mondo di tutti i giorni la freccia del tempo è ben chiara, ed è comprensibile che tu creda che esista una differenza intrinseca fra passato e futuro. In realtà, entrambe le direzioni del tempo sono create uguali. La ragione per la quale sussiste una differenza così evidente fra passato e futuro non è nella natura del tempo, ma perché viviamo nella ripercussione di un evento estremamente influente: il Big Bang.

...

Quel che dobbiamo aggiungere è una assunzione circa le condizioni iniziali dell'universo osservabile, ovvero che esso originariamente era in uno stato di entropia molto bassa. Il filosofo David Albert ha soprannominato questa assunzione la “Past Hypothesis”.

...

Quel che sappiamo è che questo stato iniziale di entropia bassa è responsabile per la freccia “termodinamica” del tempo.”

Peccato che la Past Hypothesis non sia falsificabile in alcun modo.

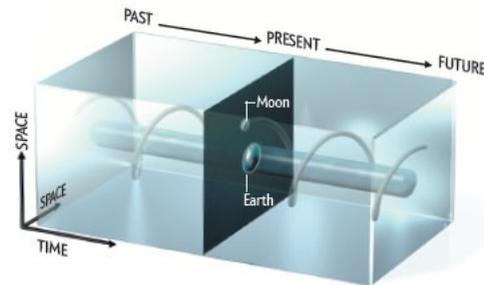
II Block Universe

BLOCK TIME

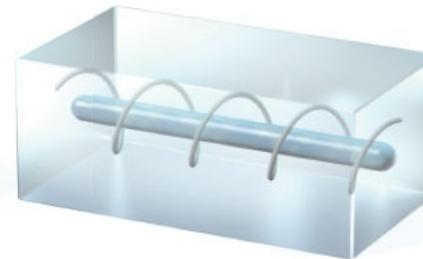
All Time Like the Present

According to conventional wisdom, the present moment has special significance. It is all that is real. As the clock ticks, the moment passes and another comes into existence—a process that we call the flow of time. The moon, for example, is located at only one position in its orbit around Earth. Over time it ceases to exist at that position and is instead found at a new position.

Researchers who think about such things, however, generally argue that we cannot single out a present moment as special when every moment considers itself to be special. Objectively, past, present and future must be equally real. All of eternity is laid out in a four-dimensional block composed of time and the three spatial dimensions. (This diagram shows only two of these spatial dimensions.)



Conventional view: Only the present is real



Block universe: All times are equally real

È questa la visione cosiddetta a “Block Universe” sostenuta da molti relativisti, fra i quali Carlo Rovelli, Julian Barbour, e altri ancora. Tutto il tempo è equivalente al presente. Qui leggiamo: “Obiettivamente (e sottolineo “obiettivamente”: ecco la realificazione della teoria), passato presente e futuro devono essere uguali. Tutta l’eternità è disposta in un blocco uni-dimensionale composto di tempo e tre dimensioni spaziali.”



Ma per lo stesso ragionamento di David Albert potremmo allora dire che se dopo il Big Bang ci fosse un Big Crunch perché l'universo è chiuso, allora $\langle P \rangle$ come oggi vediamo le uova rompersi e non ricomporsi, e un'onda quantistica collassare in risultati di una misurazione, in futuro potremmo vedere viceversa le uova ricomporsi e tutti gli eventi cancellarsi e ritornare nel noumeno dell'onda ...

Avete quindi capito causalità e probabilismo inerente della teoria quantistica ci conducono al "presentismo", ovvero ovvero alla realtà del presente, al futuro come creazione, e al passato come memoria.

“Grazie per l’attenzione”

**Istituto Lombardo**
ACCADEMIA DI SCIENZE E LETTERE

Convegno

Lost in physics and metaphysics
Questioni di realismo scientifico