



JOHN TEMPLETON FOUNDATION
SUPPORTING SCIENCE—INVESTING IN THE BIG QUESTIONS
Project: A Quantum-Digital Universe, Grant ID: 43796



1

Verso una dematerializzazione della fisica

Giacomo Mauro D'Ariano
Università degli Studi di Pavia

Realtà senza Realismo
7 giugno 2016
Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere

Per evitare un possibile fraintendimento del titolo della mia presentazione, devo premettere innanzitutto che mi definisco realista, intendendo con questo che assumo che esista una realtà indipendente da noi che la osserviamo e la descriviamo, e che le diverse descrizioni, al di là dei diversi linguaggi e dei diversi schemi teorici, convergono verso un omomorfismo—una corrispondenza di relazioni—con un substrato comune ai fenomeni osservati. Ciò ovviamente implica l'assunzione della traducibilità fra i diversi linguaggi, nonché l'ipotesi di una matematica e di una logica condivise.

Essere realista senza essere *materialista*

La *realificazione* intrappola il paradigma scientifico

Il punto è che però essere realista in questo senso non significa essere "materialista". Philip Clayton dice: "A differenza della maggior parte delle posizioni filosofiche, che sono tenute ben distinte dalle teorie scientifiche, la visione del mondo materialista è sempre stata largamente accettata come implicazione diretta della scienza, quasi un sine-qua-non dell'attività scientifica."

Ebbene, essere realista, invece, non vuol dire credere in un mondo fatto di materia, particelle, energia, o dello spazio tempo incurvabile della relatività generale Einsteniana. Non vuol dire essere "meccanicista", o essere "determinista". L'errore che soggiace a questo tipo di realismo è quello della "realificazione" della teoria, ovvero l'identificazione degli oggetti della teoria—quali la particella o lo spazio tempo incurvabile—con elementi della realtà. La realificazione intrappola il paradigma scientifico, e nel caso del materialismo lo intrappola nel meccanicismo deterministico, conducendo a forzature, quali le azioni istantanee a distanza della meccanica Bohmiana, oppure l'idea di pensare che la meccanica quantistica suggerisca un nuovo tipo di logica, come pensavano Birkoff e von Neumann. Personalmente credo che la logica della fisica e della scienza debba essere la logica classica, e che questo sia necessario per poter soddisfare il criterio di Popper di demarcazione fra scienza e pseudoscienza. Quello che invece è necessario è una riflessione seria sul metodo scientifico, ed un cambio di paradigma. Ed è di questo di cui oggi desidero parlare.

Informazionalismo

Il nuovo paradigma *algoritmico* del mondo

Oggi vi parlerò di un paradigma nuovo che sta emergendo in fisica, in quella fisica teorica che studia il substrato più profondo della realtà, il suo stesso tessuto, ciò di cui sono fatte le particelle e lo spazio-tempo. Un paradigma che appare molto potente. Si tratta di quello che chiamiamo "informazionalismo", ovvero il paradigma "algoritmico" del mondo, da contrapporsi al paradigma corrente "meccanicistico" fatto di particelle che si urtano, interagiscono, o di stringhe o membrane che vibrano. Come già ha detto Kuhn, quando cambia il paradigma scientifico cambia la nostra visione del mondo: creiamo una nuova ontologia. E il mio obiettivo oggi è quello di condurvi ad intuire una nuova visione del mondo, un mondo non fatto di particelle che si urtano e scambiano energia, bensì costituito da un immenso computer quantistico. Per dirla molto in breve, anticipando la sintesi della costruzione teorica che presenterò, il paradigma è quello di un Universo fatto di "puro software". Non siamo noi che scriviamo il programma. E allora, qual'è il programma? Come vedremo, è il più semplice programma che si possa scrivere.

Informazionalismo

It from Bit
Software senza hardware



Il paradigma informazionale fu preconizzato da John Archibald Wheeler e dallo stesso Richard Feynman, sintetizzato dallo slogan di Wheeler: “It from Bit”. “Software senza hardware”: non c'è materia che supporta il software, ma la materia, gli atomi, le particelle, i fotoni, lo stesso spazio-tempo, e tutto quanto osserviamo non sono altro che icone tridimensionali risultanti da una soggiacente computazione quantistica, che avviene in un tessuto composto solamente da bit quantistici (per la precisione Fermionici).

In una visione realista meccanicista il paradigma "software senza hardware" sembra assurdo: come è possibile avere un software senza il supporto dell'hardware? Si può immaginare un supporto, se lo si desidera, ma esso non ha una posizione nello spazio, non è fatto di "oggetti": l'ente elementare non ha altra caratteristica che quella di avere due stati discriminabili, 0 e 1, nonché le loro sovrapposizioni quantistiche. Il paradigma “Software senza hardware” potrebbe sembrare all'antitesi del realismo Einsteiniano. Esso però identifica una nuova ontologia: l'ontologia quantistica digitale, di cui anche filosofi, come Luciano Floridi e Terrel Bynum, stanno discutendo in questi giorni.

Informazionalismo

Il sesto problema di Hilbert: l'assiomatizzazione della Fisica



Ma la grandezza della fisica teorica, ciò che la distingue dalla fantascienza, sono il rigore logico e la falsificabilità sperimentale, che devono esplicitarsi liberi da preconcetti, e capaci, se necessario, anche di abbandonare un vecchio paradigma consolidato per esplorarne uno nuovo. E il paradigma informazionale, ha la grande potenzialità di rendere completa la coerenza logica della fisica teorica, risolvendone il problema dell'assiomatica posto da David Hilbert nel 1900 nel sesto dei suoi famosi ventitré problemi.

E la motivazione fondamentale del mio discorso è quindi essenzialmente di natura metodologica: si tratta di ricostruire l'edificio della fisica su fondamenti solidi, per ritrovare una struttura logica coerente, che ne risolva le contraddizioni interne, fra le quali la più rilevante ed urgente resta l'incompatibilità fra teoria quantistica e relatività generale—le due più consolidate e generali teorie fisiche—incompatibilità a causa della quale non disponiamo ancora di una teoria microscopica della gravità. E l'informazionalismo, come vedremo, rappresenta storicamente la prima opportunità di risolvere il problema assiomatico della fisica, e potenzialmente di risolvere il conflitto fra la teoria quantistica e la relatività generale.

Informazionalismo

Il sesto problema di Hilbert: l'assiomatizzazione della Fisica



Devo premettere che, considerata la composizione eterogenea del pubblico, dovrò necessariamente esporre a due livelli paralleli, quello tecnico e quello divulgativo. Il mio compito è arduo: devo convincere tecnici e non tecnici con argomenti logici e scientifici a considerare una nuova visione del mondo. Chiedo pertanto alla audience non tecnica di perdonare qualche breve interludio specialistico, ma allo stesso tempo chiedo ai colleghi fisici e filosofi di tenere ben distinti i due livelli e di non fraintendere la divulgazione per argomentazione rigorosa. Vi chiedo di concentrare l'attenzione più sulla logica del discorso, che sui contenuti specifici, e cercherò per questo di aiutarmi con dei diagrammi.

Informazionalismo *quantistico*

Perché bit quantistici e non classici?

"Teoremi di epistemologia"

- no realismo locale
- olismo
- complementarità
- incompatibilità della nozione di "oggetto"
- ...

La prima domanda è: perché bit quantistici e non bit classici?

La Meccanica Quantistica ci ha insegnato una lezione che va ben oltre un insieme di nuove leggi fisiche: ci ha dotato di veri e propri "teoremi di epistemologia". Ora sappiamo che ci sono circostanze nelle quali l'osservazione del mondo non può essere concepita come lettura di una realtà locale pre-esistente l'osservazione, come dimostrano le violazioni delle disuguaglianze di Bell. Ci sono circostanze nelle quali la conoscenza del tutto non implica la conoscenza delle parti, ovvero si dice che si ha "olismo": questo è il caso di due sistemi in uno stato massimamente entangled puro, dove lo stato congiunto è noto con assoluta precisione, mentre lo stato di ogni singolo sistema è completamente misto, ovvero totalmente sconosciuto: la conoscenza del tutto non implica la conoscenza delle parti. Sappiamo che esistono proprietà complementari incompatibili, come la posizione e il momento di una particella, e sappiamo che esistono proprietà del "tutto" incompatibili con qualunque proprietà di ognuna delle "parti", come nel caso di una proprietà entangled. La nozione di "oggetto" definito in termini delle sue "proprietà" entra quindi in contrasto con la connotazione "mereologica" di componibilità degli oggetti a formare nuovi oggetti.

8

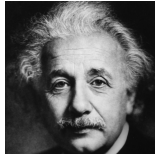


Infine, in teoria quantistica di campo la stessa ontologia di particella come ente localizzabile è in contrasto con un noto teorema di Malament. Meinard Kuhlman dice: “i fisici normalmente descrivono l'universo come costituito di piccolissime particelle subatomiche, ma questo modo di vedere butta sotto il tappeto un fatto non molto conosciuto: l'interpretazione di particella della fisica quantistica, come anche quella di campo, abusano dei concetti di particella e di campo al punto che sempre più persone pensano che il mondo potrebbe essere fatto di qualcosa di completamente diverso.”

Informazionalismo *quantistico*

Perché non classico?

probabilità quantistiche non epistemiche



Ottenere la meccanica quantistica da quella classica era il sogno rimasto irrealizzato di Einstein, che credeva di potere ridurre la teoria ad una meccanica statistica classica. Ma la violazione del bound di Bell ci insegna che le probabilità quantistiche non possono avere interpretazione realistica-epistemica (ovvero probabilità come mancanza di conoscenza di una realtà oggettiva ben definita), se non al prezzo di avere un realismo contestuale non-locale, ovvero una realtà che si legge localmente, ma che dipende istantaneamente da azioni eseguite a distanza. La presenza di complementarità, ovvero l'esistenza di osservabili che non possono essere entrambe determinate, come la posizione e il momento di una particella, è una lezione ineludibile della meccanica quantistica, e il tentativo di Einstein di dimostrare l'incompletezza della teoria quantistica nel famoso articolo EPR (dalle iniziali dei tre autori: Einstein Podolski e Rosen) del 1935 si basava su un ragionamento contro-fattuale. La Meccanica Bohmiana il cui fascino è innegabile (e della quale parlerà Nino Zanghì), riduce meccanicamente le osservabili complementari della particella alla sola posizione, ma al caro prezzo di traiettorie frattali complicatissime che sono modificate a distanza istantaneamente. Ma il prezzo più alto è che la richiesta di basare tutta la teoria sull'ontologia della particella entra in collisione con la possibilità di farne una teoria di campo relativistica. Dopo quasi novant'anni dalla prima formulazione di De Broglie e 65 anni dal primo lavoro di Bohm, la teoria non riesce ancora a descrivere processi di creazione e annichilazione di particelle, non sa descrivere particelle indistinguibili—Fermioni e Bosoni—e fra queste i fotoni, ovvero la teoria non sa descrivere il campo elettromagnetico. Altrettanto potremmo dire di una teoria dell'informazione classica digitale che emuli la teoria quantistica: si tratterebbe di una emulazione estremamente inefficiente: necessiterebbe di un numero fattoriale di connessioni input-output non-locali fra tutti i bit classici coinvolti nella computazione. La lezione che abbiamo appreso dall'esperienza nella nuova disciplina della quantum information, è che l'informatica quantistica è esponenzialmente più potente di quella classica.

La teoria quantistica è una teoria dell'informazione

Selected for a **Viewpoint in Physics**
PHYSICAL REVIEW A **84**, 012311 (2011)

Informational derivation of quantum theory

Giulio Chiribella*

*Perimeter Institute for Theoretical Physics, 31 Caroline Street North, Ontario, Canada N2L 2Y5**

Giacomo Mauro D'Ariano[†] and Paolo Perinotti[‡]

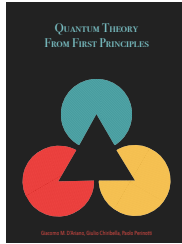
QUIT Group, Dipartimento di Fisica "A. Volta" and INFN Sezione di Pavia, via Bassi 6, I-27100 Pavia, Italy[‡]

(Received 29 November 2010; published 11 July 2011)

We derive quantum theory from purely informational principles. Five elementary axioms—causality, perfect distinguishability, ideal compression, local distinguishability, and pure conditioning—define a broad class of theories of information processing that can be regarded as standard. One postulate—purification—singles out quantum theory within this class.

DOI: [10.1103/PhysRevA.84.012311](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.012311)

PACS number(s): 03.67.Ac; 03.65.Ta



La teoria quantistica generale dei sistemi astratti, ovvero la teoria privata delle sue connotazioni meccaniche—se volete, la teoria dei bit quantistici o qubits—è una vera e propria teoria dell'informazione. Nel 2011 con Paolo Perinotti e Giulio Chiribella abbiamo derivato la teoria quantistica da principi di teoria dell'informazione. Il lavoro, ha ricevuto un Viewpoint dall'American Physical Society, si può dire consolidato, essendo stato oggetto di studio di vari gruppi di ricerca, con lavori e sezioni di conferenze dedicate, ed utilizzato da vari autori, con alcune centinaia di citazioni, è stato oggetto di capitoli di libri. È in corso di stampa un libro di testo della Cambridge University Press.

Programma

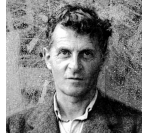
Derivare la Fisica assiomaticamente

da principi enunciati in con assiomi puramente matematici
 assiomi senza primitive fisiche
 ma con interpretazione fisica completa

Soluzione: informazionalismo

primitive fisiche: massa, forza, barre, orologi,...

A livello metodologico il lavoro rappresenta quello che io ritengo dovrebbe essere il metodo di ricostruzione assiomatica della fisica, ovvero derivare la fisica da principi enunciati in assiomi puramente matematici, ma con interpretazione fisica. Assiomi che, in quanto matematici, non contengano primitive fisiche, come i concetti di massa e di forza, o i concetti di orologio e sbarra rigida usati in teoria della relatività, concetti questi ultimi dei quali lo stesso Einstein dichiarò il suo imbarazzo in svariate occasioni. Assiomi quindi puramente matematici, epurati delle primitive fisiche, ma con piena interpretazione fisica. Fisica come interpretazione della matematica. L'interpretazione fisica è cruciale, e deve propagarsi a tutti gli stadi della teoria, dagli assiomi ai teoremi, trasformandosi in un vero e proprio apparato concettuale, per poter ragionare con la fisica, e non basarsi solo sul risultato di calcoli teorici. La necessità di un'interpretazione fisica è un'ovvietà, ma l'assiomatica della teoria quantistica di von Neumann che usiamo tutt'oggi notoriamente non ha interpretazione fisica, cosa che motivò il programma della quantum logic dello stesso von Neumann.



12

La teoria quantistica è una teoria operativa

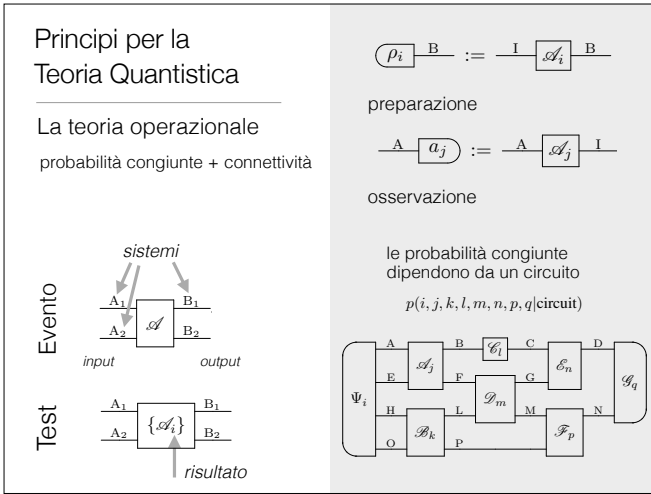
La nozione di oggetto è sostituita da quelle di evento e di sistema

TRACTATUS LOGICO-PHILOSOPHICUS

- 1* The world is all that is the case.
- 1.1 The world is the totality of facts, not of things.
 - 1.11 The world is determined by the facts, and by their being all the facts.
 - 1.12 For the totality of facts determines what is the case, and also whatever is not the case.
 - 1.13 The facts in logical space are the world.
- 1.2 The world divides into facts.
 - 1.21 Each item can be the case or not the case while every-thing else remains the same.
- 2 What is the case—a fact—is the existence of states of affairs.
- 2.01 A state of affairs (a state of things) is a combination of objects (things).

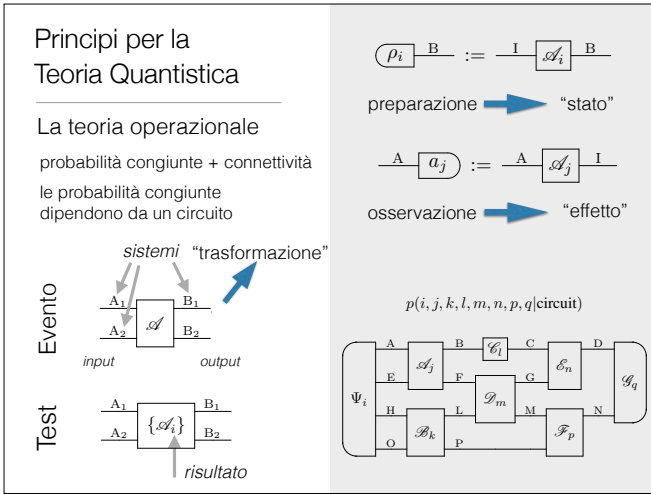
In sintesi, nella nostra assiomatizzazione la teoria quantistica è una teoria “operazionale”. Nella teoria operativa la nozione realistica di “oggetto”, viene sostituita dalle due nozioni di “evento” e di “sistema”. L’evento è il dato sperimentale, l’accadimento oggettivo. Il sistema invece è una nozione teorica, e rappresenta una connessione input-output fra due eventi. In una teoria causale il sistema rappresenta una connessione causale. La connessione causale è quindi una nozione teorica, non oggettiva, affermazione che avrebbe trovato d'accordo David Hume.

Gli “eventi” sono i “fatti” del Tractatus Logico-Philosophicus di Ludwig Wittgenstein, che recita: “Il mondo è la totalità dei fatti, non delle cose.”



Quindi, la teoria operativa è una teoria probabilistica dotata di regole di connettività fra gli eventi, ovvero connette gli eventi mediante connessioni input-output.

La nozione di “evento”, e con essa quella di “test”—la collezione di tutti i possibili eventi alternativi—viene perciò “vestita” di “fili” di input sulla sinistra e di output sulla destra, i cosiddetti “sistemi”, che rappresentano le connessioni con altri eventi. Come ogni buona teoria la teoria operativa contiene ben delineato l’ingrediente che descrive il dato sperimentale obiettivo, e per la teoria operativa questo è il “risultato” (in Inglese “outcome”) ovvero quale dei possibili eventi è avvenuto. L’evento è descritto in linguaggio sperimentale, e rappresenta quindi l’interfaccia fra il dato sperimentale obiettivo e la teoria. Esistono particolari eventi che non hanno input, detti “preparazioni”, ed eventi che non hanno output, detti “osservazioni”, e si costruisce un circuito chiuso aciclico che, come ogni teoria deve fare, connette preparazioni con osservazioni.



Ci si restringe quindi al solo aspetto probabilistico e si fa classe di equivalenza, definendo "trasformazione" della teoria la classe di equivalenza di tutti gli eventi che avvengono con la stessa probabilità congiunta quando inseriti nello stesso circuito, trascendendo quindi da altre caratteristiche particolari. La classe di equivalenza delle preparazioni è quello che noi chiamiamo "stato", mentre classe di equivalenza delle osservazioni è quel che chiamiamo "effetto".

Quindi, in definitiva si ha un circuito chiuso direzionato da sinistra a destra che inizia con stati e si chiude con effetti. La costruzione del circuito si ottiene per composizione in serie e in parallelo di trasformazioni e di sistemi. L'interpretazione fisica è quella delle operazioni fatte in laboratorio o eseguite dalla natura, o più generalmente quella di ciò che chiamiamo un "processo": è il run di un programma computazionale, un processing di informazione.

La teoria quantistica è un'estensione della logica

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



Ricapitolando, la teoria operativa associa ad ogni distribuzione di probabilità congiunta di eventi un circuito chiuso che ne rappresenta le connessioni teoriche. La teoria quantistica quindi, in quanto teoria operativa, è un'estensione della teoria delle probabilità, la quale, come dicono anche Edwin Jaynes e Richard T. Cox, a sua volta è un'estensione della logica. Non si tratta quindi di modificare la logica, come intendeva von Neumann, bensì di estenderla, come in un qualsiasi processo di inferenza. E l'estensione è la teoria operativa, ovvero una teoria dell'informazione.

Il paradigma quindi non vede più il fisico teorico come il “meccanico” che cerca di determinare il meccanismo di funzionamento del mondo,



FISICO TEORICO “MECCANICO”

17



bensì quello di un hacker informatico che decodifica il programma del software di cui è fatto il mondo. In linguaggio divulgato, quello che noi vediamo, gli eventi oggettivi, sono "icone" con le quali interagiamo in una sorta di enorme schermo multidimensionale, del quale noi stessi facciamo parte, con immagini 3D, suoni, forze, gravità, chimica, odori, sapori... La teoria è l'algoritmo soggiacente che noi vogliamo decodificare, che è eseguito su qubits. La teoria quantistica è il sistema operativo. Ma quali sono le regole di questo software?

Principi per la Teoria Quantistica

Causalità
Discriminabilità perfetta
Discriminabilità locale
Atomicità della composizione
Compressione ideale
Purificazione

Nella teoria operativa si definiscono gli assiomi della teoria quantistica:

**Causalità,
Discriminabilità perfetta,
Discriminabilità locale,
Atomicità della composizione,
Compressione ideale,
Purificazione.**

Analizziamo succintamente solo l'assioma numero uno: la causalità.

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

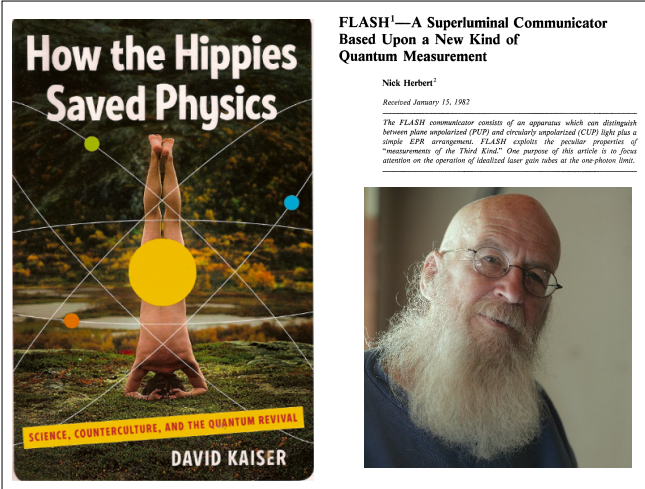
Marginal probability

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

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

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

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 un'osservazione. La nozione importante da rimarcare è che in una teoria operativa la dipendenza dal circuito della probabilità congiunta implica che se si considera la distribuzione di probabilità di un pezzo di circuito (tecnicamente si chiama probabilità marginale), questa generalmente dipende da tutto il resto del circuito collegato. Ebbene, ciò che afferma il postulato di causalità è che la probabilità della preparazione è indipendente dalla scelta del test di osservazione.



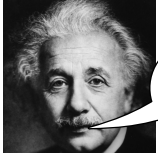
Il postulato è molto potente, se si pensa che nel 1982 Nick Herbert proponeva sulla rivista *Foundation of Physics* un metodo di comunicazione istantanea a distanza basato sulla condivisione di uno stato entangled, metodo che Herbert brevettò ottenendo finanziamenti dal Pentagono, come riportato sul libro di David Kaiser "Come gli Hippies salvarono la Fisica".

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

Nick Herbert²

Revised January 15, 1982

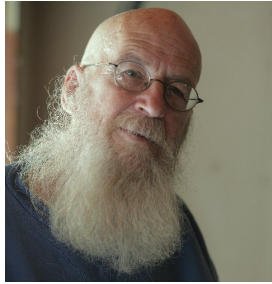
The FLASH communicator consists of an apparatus which can distinguish between plane polarized (PP) and circularly polarized (CP) light plus a simple EPR arrangement. FLASH exploits the peculiar properties of "measurements of the Third Kind". One purpose of this article is to focus attention on the operation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



SPOOKY ACTION AT DISTANCE!



PEACEFUL COEXISTENCE BETWEEN QUANTUM MECHANICS AND RELATIVITY

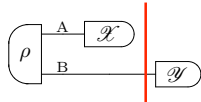


Fraintendere l'entanglement con la possibilità di comunicare istantaneamente era errore comune, ed in parte indotto dall'espressione spiritosa di Einstein "Spooky action at distance" — azione fantasmatica a distanza. E la non ovvietà dell'impossibilità di comunicare istantaneamente in presenza della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

La probabilità delle preparazioni è
indipendente dalla scelta delle osservazioni



impossibilità di comunicare senza interazione

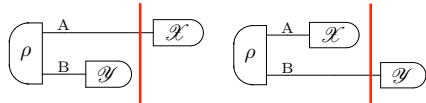


L'impossibilità di comunicare senza interazione condividendo uno stato entangled è semplicemente una conseguenza immediata della causalità. Il circuito che descrive la condivisione di uno stato entangled "rho" fra Alice e Bob che eseguono osservazioni/trasformazioni locali può essere diviso in una preparazione che include lo stato entangled e anche la misura di Alice, e in una osservazione, che contiene solo la misurazione di Bob, e la causalità sancisce l'indipendenza della probabilità di preparazione di Alice dalla scelta della osservazione di Bob, stabilendo l'impossibilità per Bob di comunicare ad Alice.

La probabilità delle preparazioni è
indipendente dalla scelta delle osservazioni



impossibilità di comunicare senza interazione



Lo stesso ragionamento si può fare scambiando simmetricamente i ruoli di Alice e Bob.

Rilevanza epistemologica dei postulati
per la falsificabilità della teoria

Causalità
Discriminabilità perfetta
Discriminabilità locale
Atomicità della composizione
Compressione ideale
Purificazione

Tutti e sei i postulati hanno una rilevanza epistemologica, e riguardano la falsificabilità delle proposizioni della teoria.

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. Si noti che la presente nozione di causalità corrisponde anche all'uso standard della causalità nei processi di inferenza (si veda il libro sulla causalità di Judea Pearl), e si può dimostrare che è equivalente alla causalità Einsteniana.

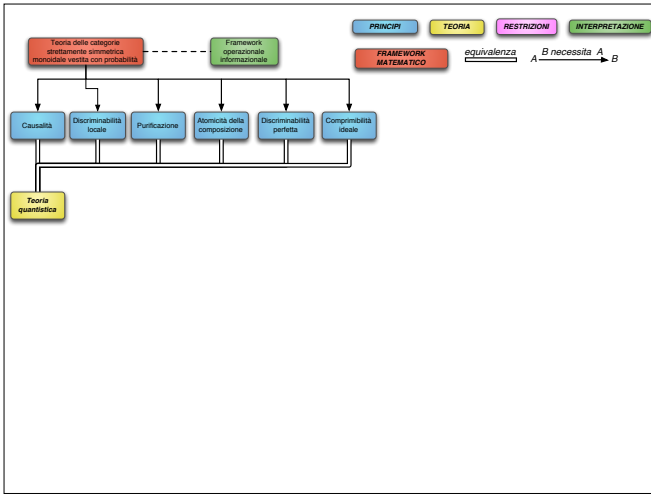
La discriminabilità perfetta garantisce la falsificazione delle proposizioni della teoria.

La discriminabilità locale garantisce che per proposizioni nonlocali la falsificazione sia ottenibile con osservazioni locali, riconciliando l'olismo della teoria con il riduzionismo.

L'atomicità della composizione garantisce che non ci sia perdita di informazione sulla trasformazione risultante dalla composizione di due trasformazioni.

La comprimibilità ideale garantisce che ogni sorgente di informazione ridondante possa essere compressa in modo reversibile ad una sorgente non ridondante.

Mentre i primi cinque assiomi sono comuni alla teoria classica, l'assioma di purificazione è quello che discrimina la teoria quantistica. L'assioma della purificazione è la conservazione dell'informazione, e ha come conseguenza che l'irreversibilità è sempre riconducibile ad una mancanza di controllo su un "environment", ovvero che ogni processo irreversibile può essere ottenuto da un processo reversibile di interazione con un environment.



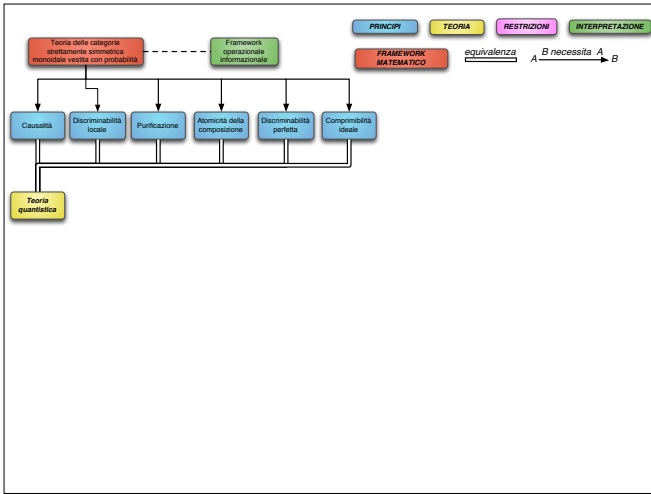
Riporto uno schema dei principi che ora estenderemo:
 la doppia linea indica equivalenza. In effetti i sei assiomi possono essere ricavati dalla teoria quantistica di von Neumann viceversa come teoremi.

Fisica senza fisica

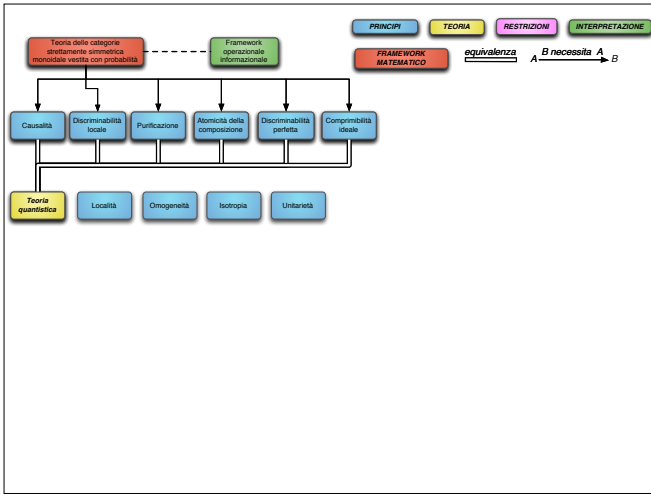
Da dove viene la meccanica?

Ma fino a questo punto abbiamo visto solo la teoria quantistica dei sistemi astratti. La domanda è: da dove vengono le particelle? Come si fa ad ottenere la meccanica senza primitive fisiche negli assiomi? Fisica senza fisica? Fisica come pura interpretazione della matematica?

Abbiamo visto che la teoria quantistica è il sistema operativo: ora analizziamo il programma, le subroutines che danno luogo alla meccanica.



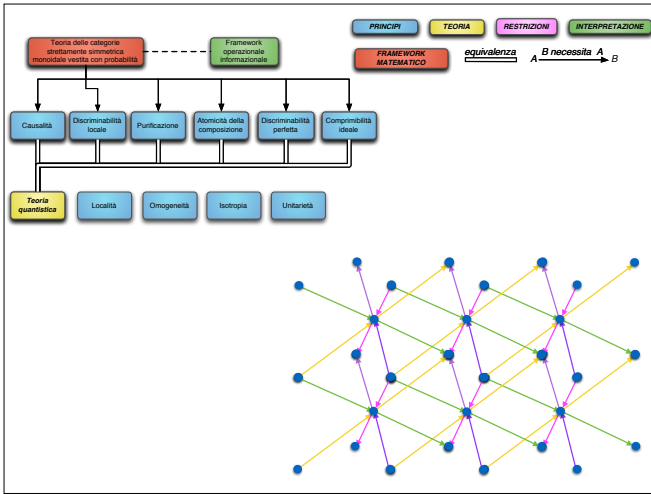
Abbiamo derivato i sistemi quantistici e le loro interazioni. Consideriamo quindi semplicemente un insieme contabile di sistemi quantistici in interazione, ed aggiungiamo alcuni principi generali che regolano queste interazioni.



I principi sono:

- Unitarietà,
- Località,
- Omogeneità,
- Isotropia.

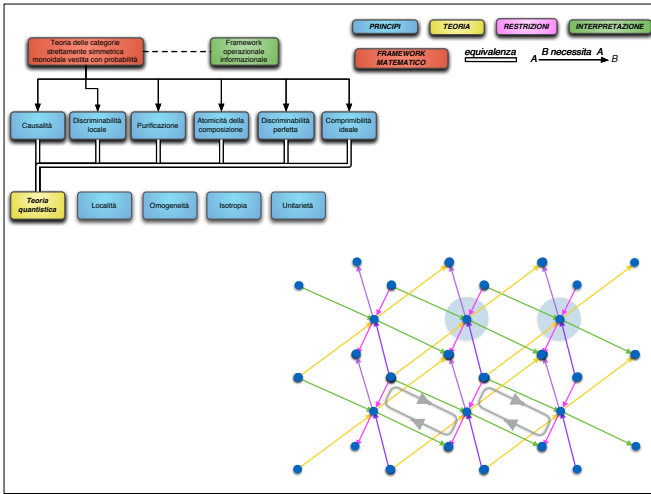
Tutti gli assiomi corrispondono al principio generale di semplicità dell'algoritmo, ovvero sono principi di minimizzazione della complessità algoritmica.



L'assioma di unitarietà tecnicamente afferma che l'evoluzione è descritta da un operatore unitario, che corrisponde ad una singola step di evoluzione discreta. La rete di interazioni fra i sistemi è descritta da un grafo colorato e direzionato di cui i sistemi sono i nodi e i links colorati descrivono le diverse interazioni.

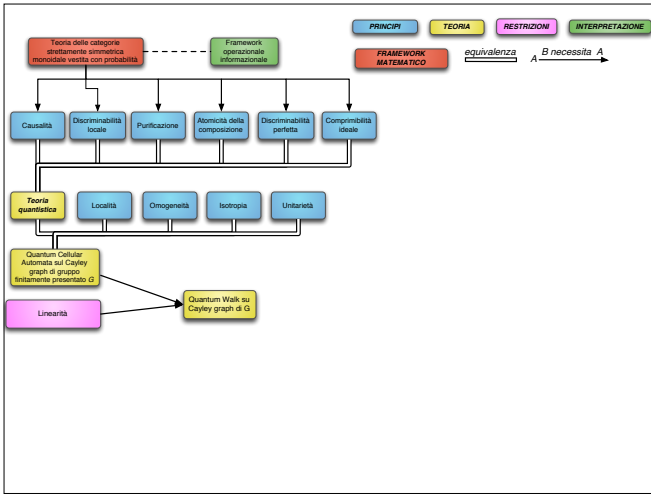
L'assioma di località stabilisce che c'è un numero massimo di sistemi che interagiscono con ogni sistema, e quindi l'informazione non può fluire da un sistema all'altro se non percorrendo il grafo.

L'assioma di omogeneità stabilisce nel modo più generale che il circuito delle connessioni fra i vari sistemi è lo stesso visto da ogni sistema.



Ne consegue che il numero di sistemi che interagiscono con ogni sistema è uguale per tutti i sistemi, il ventaglio dei link colorati attorno ad ogni sistema è lo stesso per tutti i sistemi, ed infine che tutte le loop colorate sono le stesse attorno ad ogni sistema.

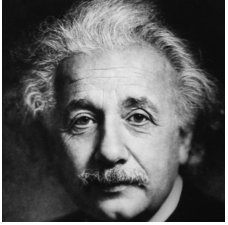
L'assioma di isotropia corrisponde a richiedere che esiste un gruppo di permutazione dei colori che equivale a ruotare il grafo, nonché un corrispondente gruppo di trasformazioni unitarie dei sistemi che compensa la rotazione del grafo lasciando invariata la dinamica. Questa nozione corrisponde alla concetto di spin.



Dai quattro assiomi discende che tecnicamente il grafo è il grafo di Cayley di un gruppo G finitamente presentato

L’algoritmo è quindi un automa cellulare quantistico sul grafo di Cayley di un gruppo G finitamente presentato, e nel caso semplice lineare (che corrisponde alla teoria di campo libera) l’algoritmo è un quantum walk sul grafo di Cayley.

La suddetta costruzione matematica, che segue direttamente dagli assiomi collega la teoria ad una branca della matematica pura contemporanea, la “geometric group theory”.

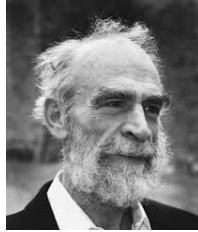


"But you have correctly grasped the drawback that the continuum brings. If the molecular view of matter is the correct (appropriate) one, i.e., if a part of the universe is to be represented by a finite number of moving points, then the continuum of the present theory contains too great a manifold of possibilities. I also believe that this too great is responsible for the fact that our present means of description miscarry with the quantum theory. The problem seems to me how one can formulate statements about a discontinuum without calling upon a continuum (space-time) as an aid; the latter should be banned from the theory as a supplementary construction not justified by the essence of the problem, which corresponds to nothing "real". But we still lack the mathematical structure unfortunately. How much have I already plagued myself in this way!"

Devo qui rimarcare che Einstein stesso aveva considerato che lo spazio tempo potesse non essere continuo, bensì sussistesse una possibile costruzione discreta, ma lamentava l'assenza di una matematica adeguata.

Una nuova matematica: la *geometric group theory*

Lo spazio emerge
come organizzazione di eventi
non come "teatro" per gli eventi



Mikhail Gromov

Ebbene, questa matematica oggi esiste: è la “geometric group theory”. Nata all’inizio degli anni 90 da un’idea di Mikhail Gromov, consiste nello studiare le proprietà di un gruppo finitamente presentato in termini delle proprietà dello spazio metrico nel quale i suoi grafi di Cayley si embeddano come si dice tecnicamente “quasi-isometricamente”, conducendo ad una geometrizzazione del problema gruppale. Ad esempio, teoremi dovuti a Gromov e altri matematici dimostrano che per gruppi infiniti come a noi interessano, l’essere Euclideo per lo spazio metrico in cui si embedda il gruppo corrisponde alla proprietà di virtuale Abelianità del gruppo, altrimenti lo spazio è necessariamente iperbolico.

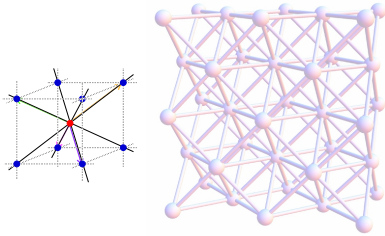
Una nuova matematica: la *geometric group theory*

Lo spazio emerge
come organizzazione di eventi
non come teatro per gli eventi

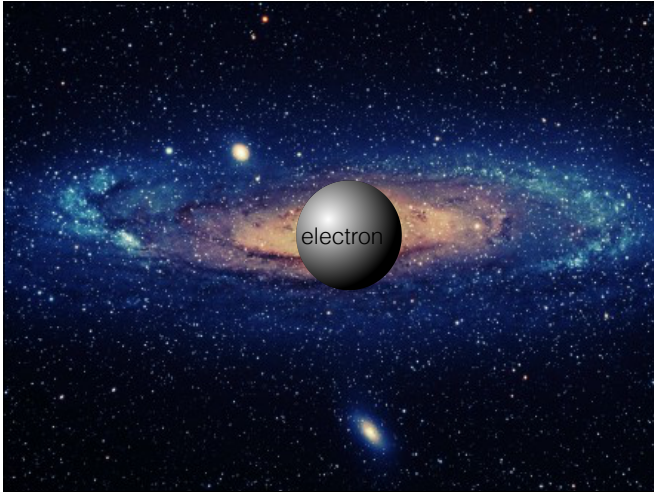
Nel nostro caso lo spazio metrico nella teoria rappresenta lo spazio che emerge dalle interazioni fra i qubits: uno spazio che emerge come organizzazione di eventi, e non uno spazio teatro per gli eventi. La restrizione di embeddabilità a spazi Euclidei corrisponde a ritrovare la fisica nello spazio Euclideo.

L'automa cellulare quantistico più semplice
corrisponde al Fermione di Weyl

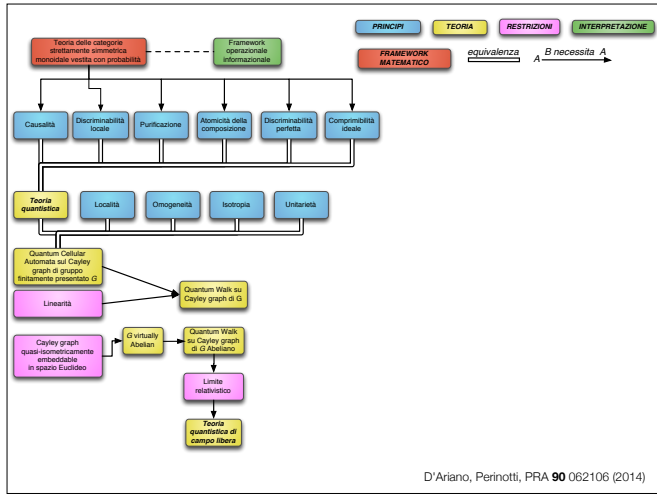
$$\mathbb{Z}^3 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$$



Per dirla in breve, si dimostra che l'algoritmo più semplice che deriva dalla teoria embeddabile nello spazio Euclideo \mathbb{R}^3 , è l'automa cellulare quantistico avente per grafo di Cayley il reticolo cristallino cubico a corpo centrato corrispondente al gruppo Abeliano \mathbb{Z}^3 delle terne di numeri interi. Si dimostra che per spin zero l'automa è triviale (ovvero non evolve), mentre per spin $1/2$ ci sono solo due automi, che nel limite relativistico di piccoli vettori d'onda danno esattamente le due equazioni di campo di Weyl per particella senza massa con chiralità sinistrorsa e destrorsa.

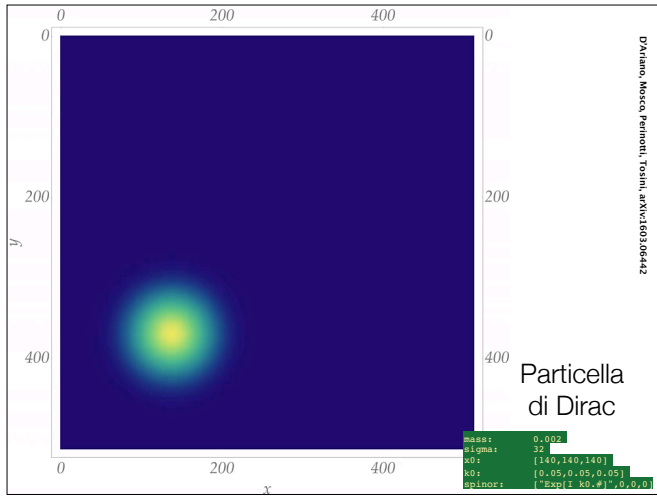


Come vedremo la scala di piccolezza dell'atomo è la scala di Planck, che è una scala piccolissima: 10^{-33} cm. In proporzione, se ingrandissimo una lunghezza di Planck ad un centimetro, un elettrone diventerebbe grande come una galassia. Viceversa, l'energia di Planck è enorme: 10^{28} eV. In unità Planckiane i raggi cosmici ultra energetici osservati alcuni anni orsono e che sono enormemente più energetici di quelli ottenibili al LHC di Ginevra e non sono spiegabili all'interno del cosiddetto modello Standard delle particelle, hanno vettore d'onda 10^{-8} ovvero di un centomillesimo: quindi tutto quello che abbiamo osservato nella storia della fisica rientra ampiamente nel limite relativistico.



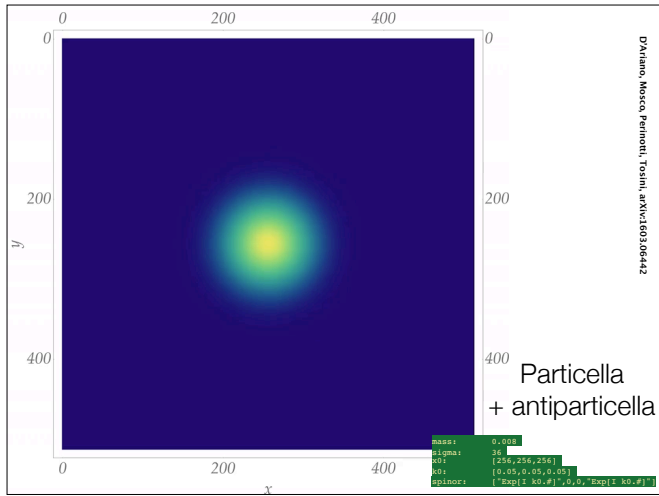
Componendo due automi di Weyl in modo da soddisfare ancora tutti i principi, otteniamo nuovi automi. Ebbene questi, nel limite relativistico, danno l'equazione di Dirac per particelle con massa e le equazioni di Maxwell per i fotoni. Otteniamo quindi la teoria quantistica relativistica di campo libera.

38



Qui si vede come l'algoritmo dell'automata produce il movimento e il leggero sparpagliamento, esattamente come fa l'equazione di Dirac della particella.

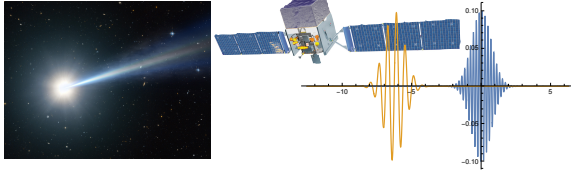
39



E qui si vede il caso di una sovrapposizione di particella e antiparticella che si separano restando fra loro entangled, con una piccolissima oscillazione iniziale che è il moto cosiddetto di Zitterbewegung.

Previsioni

Il vuoto si comporta come un solido cristallino

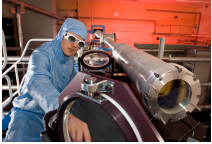


La precisione con la quale la dinamica discreta riproduce la teoria di campo libera è purtroppo ottima: dico “purtroppo”, perché gli effetti dovuti alla discretezza sono troppo piccoli per essere osservati. Questi si possono riassumere nel fatto che lo spazio vuoto si comporta un po’ come un solido cristallino, e l’effetto più visibile è la dispersione, ovvero la dipendenza della velocità della luce dalla lunghezza d’onda. Benchè l’effetto sia piccolissimo, esso si accumula su grandissime distanze, ed è potenzialmente visibile nella rivelazione di raggi gamma ad altissime energie provenienti da quasar ai limiti dell’universo visibile: per un medesimo gamma-ray burst della quasar vedremmo pervenire pacchetti a frequenza diversa con un ritardo temporale di alcuni secondi fra loro. Eventi gamma di questo tipo sono visibili potenzialmente dal Fermi Gamma-ray Space Telescope.

Previsioni

Natura Fermionica della radiazione

Esiste una massa limite M per le particelle



mini buco nero

Un altro effetto è quello che i fotoni risultano composti da una coppia di Fermioni entangled (come in una vecchia teoria di de Broglie), ma questo effetto non è visibile nemmeno con la radiazione più potente che abbiamo a disposizione, quella del Vulcan laser, che ha una potenza di 1 PW, pari alla potenza di 50 delle più potenti centrali idroelettriche esistenti. Infine, un effetto combinato della discretezza e dell'unitarietà è il fatto che la massa dell'automa di Dirac è limitata. L'esistenza di una massa limite è anche prevista dalla teoria quantistica di campo in combinazione con la relatività generale, che prevedono che se la massa è più grande della massa di Planck la particella diventerebbe un mini buco nero. Effettivamente quando la massa raggiunge il valore limite, l'informazione dell'automa smette di propagarsi, ovvero l'automa si comporta come un buco nero, per cui euristicamente deduciamo che il valore della massa limite sia dell'ordine di grandezza della massa di Planck.

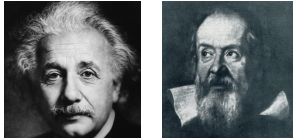
La teoria contiene le unità di misura

$$M \simeq \frac{1}{\sqrt{3\pi}} \frac{\hbar k}{c(k) - c(0)} \quad c \equiv c(0) = \frac{a}{\tau}$$

$$\hbar = Mac$$

È notevole che la teoria fondata su assiomi puramente matematici, e quindi con tutte le variabili necessariamente adimensionali, contenga al suo interno le misure campione attraverso la discretezza stessa della teoria ed il valore limite della massa. Questo non sarebbe stato possibile in una teoria nel continuo.

Il valore della massa limite M potrebbe essere ricondotta al ritardo dei pacchetti da rivelazione di raggi gamma ad altissime energie provenienti da quasar ai limiti dell'universo, visibili come già detto dalla missione Fermi, mentre, una volta nota la massa limite, il valore dell'unità di tempo "tau" e dell'unità di spazio "a" sarebbero determinati dalla velocità della luce a bassa frequenza e da una interessante relazione che li lega alla costante di Planck, e che attribuisce alla costante di Planck il valore del prodotto della massa limite "M" moltiplicato la lunghezza minima "a" per la velocità della luce "c", ovvero un'interpretazione puramente meccanica, come deve essere, avendo la costante di Planck dimensioni meccaniche.



Fisica da informazione e relatività

Fisica derivata senza: meccanica, cinematica, spazio-tempo, relatività, ...!!

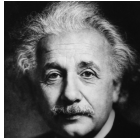
Principio di relatività: invarianza delle leggi fisiche per riferimenti inerziali

- Riferimento inerziale: rappresentazione dell'algoritmo quantistico (automa)
- Legge fisica: equazione agli autovalori dell'automa
- Relatività della *località* (relative locality)

- *Particella*: invariante del gruppo di Poincaré

È anche rimarchevole che la teoria relativistica di campo sia stata ottenuta senza assumere ne' meccanica, ne' cinematica, ma soprattutto senza assumere la relatività ristretta, e nemmeno il principio di Galileo, che poi coincide con quello di Einstein dell'invarianza per riferimenti inerziali delle leggi fisiche, a patto di includere anche l'elettromagnetismo. Ma cos'è un sistema di riferimento in un universo discreto senza spazio-tempo? La nozione di sistema di riferimento non è altro che quello che tecnicamente in teoria quantistica si chiama "rappresentazione", e la dinamica tecnicamente è l'equazione agli autovalori dell'automa. Pertanto la traduzione del principio di Galileo è che i sistemi di riferimento inerziali sono le rappresentazioni dell'algoritmo quantistico che lasciano l'equazione agli autovalori invariante. I cambi di rappresentazione formano un gruppo che per massa zero è una versione nonlineare del gruppo di Lorentz, che nel limite relativistico di piccoli vettori d'onda recupera perfettamente il gruppo delle trasformazioni di Lorentz della relatività. Invece, ad energie elevatissime Planckiane si hanno distorsioni che evidenziano la granularità quantistica dello spazio tempo. Un effetto ad altissime energie è quello della "relatività della località" (relative locality), ovvero non solo la simultaneità del tempo di due eventi, ma anche essere nello stesso luogo, dipende dal sistema di riferimento.

Un altro fatto notevole è che l'unica nozione di particella non problematica in teoria di campo—ovvero la particella come rappresentazione invariante del gruppo di Poincaré—è vera a tutte le energie, anche alla scala di Planck. Sopravvive quindi il concetto di particella come simmetria.

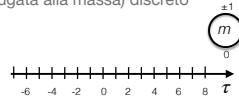


Fisica da informazione e relatività

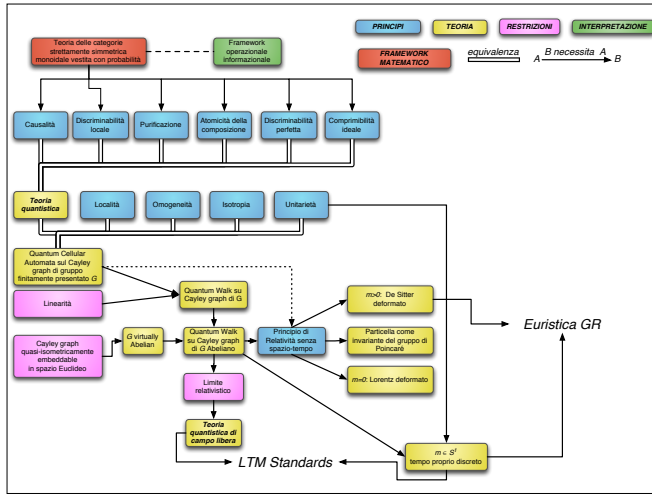
Relatività generale? Gravità?

Euristica:

- Massa limite per la particella: mini buco nero
- La massa a riposo m viene coinvolta nelle trasformazioni: relatività di de Sitter
- Consistenza teoria: tempo proprio (variabile coniugata alla massa) discreto




Per particella con massa, anche la massa a riposo viene coinvolta nelle trasformazioni, e il gruppo di trasformazioni diventa quello di De Sitter, che coincidentalmente nella teoria della relatività generale è una soluzione altamente simmetrica di vuoto che richiede costante cosmologica, e supporta l'idea di una relatività de Sitter-invariante anziché Poincaré-invariante. Questa coincidenza, insieme all'euristica del mini buco nero già citata, hanno un sapore promettente di relatività generale. Un altro fatto promettente è che la massa in realtà ha la topologia di un cerchio, in quanto può essere negativa, e ai valori limite $+1$ e -1 la dinamica coincide. La topologia del cerchio ci dice che la sua variabile coniugata, che secondo la meccanica Hamiltoniana è il tempo proprio, è discreta, con una non banale consistenza interna della teoria.



Il cerchio si chiude: ritroviamo la relatività di Einstein, la teoria di campo libera, ritroviamo il concetto di particella come simmetria, troviamo gli standard di lunghezza, tempo e massa, e sembra di vedere all'orizzonte una luce che promette uno spiraglio sulla gravità.

L'informazione quantistica sembra avere un ruolo cruciale nella teoria della gravità quantistica

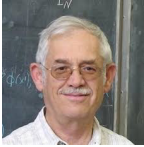
PERIMETER  INSTITUTE FOR THEORETICAL PHYSICS ENGLISH | FRANÇAIS | 中文

ABOUT | RESEARCH | TRAINING | OUTREACH | PEOPLE | EVENTS | VIDEO LIBRARY | NEWS | SUPPORT |

[Home](#) > [Quantum Information in Quantum Gravity I](#)

QUANTUM INFORMATION IN QUANTUM GRAVITY II

Conference Date: Monday, August 17, 2015 (All day) to Friday, August 21, 2015 (All day)
Press Collection: Quantum Information in Quantum Gravity II
Scientific Areas: Quantum Fields and Strings
 Quantum Gravity
 Quantum Information



This workshop is dedicated to the memory of Jacob Bekenstein (May 1, 1947 - August 16, 2015.)
 A pathfinder who never stopped looking for new horizons.

D'altra parte è ormai assodato dalla letteratura recente sui buchi neri che l'informazione quantistica deve giocare un ruolo cruciale in quello che sarà la teoria microscopica della gravità, la cosiddetta "quantum gravity", come avviene ad esempio per il famoso bound di Bekenstein che connette l'entropia di un buco nero all'area del suo orizzonte degli eventi, e che è connesso al principio "olografico", ovvero lo spazio-tempo dell'universo è descrivibile da una superficie poliedrica con facce di area Planckiana, ognuna corrispondente a un qubit d'informazione.

Principi non falsificabili?

Principi che riguardano la falsificabilità della teoria:

- Principi della teoria quantistica
- Località

Concludo con alcune considerazioni generali sui principi dai quali è stata dedotta assiomaticamente la teoria. Come abbiamo visto, i principi della teoria quantistica hanno tutti a che fare con la falsificabilità delle proposizioni della teoria. In quanto tali, si potrebbe concludere che non sono per definizione falsificabili. Resta comunque il fatto che possano esistere variazioni dei principi, quali ad esempio un indebolimento del principio della Discriminabilità Locale che conduce alla teoria quantistica Fermionica. Occorrerebbe uno studio approfondito congiunto epistemologico-teorico dei principi.



Hans Reichenbach

Principi non falsificabili?

Convenzionalismo:

- Omogeneità
- Isotropia
- Relatività

Semplicità
della teoriaMinimizzazione della
complessità algoritmica

Simmetrie



Adolf Grünbaum

Per quanto riguarda invece i principi di omogeneità e di isotropia—ma anche lo stesso principio di relatività, che non è stato utilizzato come assioma, bensì derivato dagli assiomi—si tratta in tutti i casi di principi di natura convenzionale. Spiego cosa vuol dire con due esempi storici.

Hans Reichenbach, riguardo il protocollo di Einstein per la sincronizzazione degli orologi, notava che per sincronizzare orologi distanti mediante segnali luminosi occorre conoscere la velocità della luce su un percorso aperto, ma d'altra parte per determinare la velocità della luce su un percorso aperto occorre possedere due orologi sincronizzati distanti. Si ha quindi un circolo vizioso. Possiamo solo conoscere la velocità della luce su un percorso chiuso utilizzando un unico orologio. L'uguaglianza delle velocità di andata e ritorno della luce è quindi convenzionale. Wesley Salmon conclude che all'interno dello stesso sistema di riferimento la simultaneità è convenzionale, come conseguenza della convenzionalità dell'uguaglianza delle velocità di andata e ritorno della luce.

Micheal Friedman rigetta la convenzionalità della simultaneità, in quanto la struttura di spazio-tempo Minkowskiano è intimamente connessa alla simultaneità alla Einstein, e una convenzione diversa distruggerebbe l'intera costruzione. In definitiva Friedman assume come motivazione della nozione Einsteiniana di simultaneità un argomento di semplicità della teoria.



Hans Reichenbach

Principi non falsificabili?

Convenzionalismo:

- Omogeneità
- Isotropia
- Relatività

Semplicità
della teoria

Minimizzazione della
complessità algoritmica

Simmetrie



Adolf Grünbaum

Adolf Grünbaum argomenta che lunghezze in luoghi diversi non sono confrontabili, e altrettanto vale per gli intervalli di tempo, e pertanto le nozioni di congruenza sia spaziali che temporali sono convenzionali.

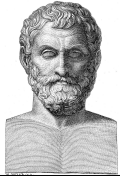
[[[[

Reichenbach decreta che l'uniformità dell'orologio è solo per semplicità descrittiva, e che l'orologio più preciso è quello che semplifica la coerenza logica interna dell'intera descrizione teorica.

]]]]

In definitiva, omogeneità e isotropia di spazio e tempo sono convenzionali, e la motivazione generale sottostante a tutte queste convenzioni è la semplicità della teoria. Anche nel nostro caso, i principi di omogeneità e isotropia sono dettati dalla minimizzazione della complessità algoritmica dell'algoritmo quantistico che rappresenta la legge fisica.

γνῶθι σεαυτὸν



Forse, la lezione più profonda che abbiamo appreso da tutto quanto ho detto è che molta fisica—e non sappiamo fino a che punto forse tutta la fisica!—discende da principi di epistemologia, che riguardano la falsificabilità stessa della teoria e il nostro stesso modo di fare teoria e di fare scienza. Descrivendo la natura, riscopriamo un po' di noi stessi. E ritroviamo la saggezza Socratica (che probabilmente risale a Talete) del “gnotzi seautòn”: “conosci te stesso”.