

La Fisica come Informazione: l'universo è un grande automa quantistico*

Giacomo Mauro D'Ariano †

26 luglio 2011

Sommario

In this note I will briefly report on a new research program based on the *informational* paradigm. The idea is to substitute Quantum Field Theory (QFT) with a more fundamental theory given in terms of a Quantum Cellular Automata (QCA). Physics emerges from the quantum computation, as if we regarded reality as indistinguishable from a quantum-computer simulation. The QCA framework in a nutshell is the idea that Physics be described by nothing more than interacting quantum systems—an idea that comes back to Feynman [1]. It is also the Church-Turing thesis restated by David Deutsch's in form of a physical principle [2]. The QCA theory works as a more fundamental layer for QFT, which is recovered for large-scales delocalized states: we can imagine QCA as the Planck-scale core of the usual QFT which should be thought as an approximate phenomenological theory valid at Fermi scales. The QCA framework has numerous advantages, including the cure of all localization and causality issues of QFT, along with all problems arising from the continuum. In addition, the QCA framework is exactly causal and automatically Lorentz-covariant: Relativity emerges from the computation as a consequence of causality of Quantum Theory. Covariance is clearly broken at Planck-scale momenta and/or localization, and, in addition, one has interesting violations of dispersion relations, e.g. a mass-dependent vacuum refraction index with information halt at the Planck mass, a phenomenon evocative of the holographic principle. The emergence from computation provides also new interpretations and definitions of fundamental physical notions, including a kinematical definition of inertial mass and a reinterpretation of the Planck constant. In one space-dimensions the quantum field is eliminated, and we are left with a genuine quantum computation on qubits. In larger space dimensions auxiliary Majorana fields are needed, suggesting the neutrino-lepton association. The elimination of quantum fields allows to formulate the theory as quantum *ab initio*, without canonical

*Memoria presentata all'Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, nell'adunanza del 16 dicembre 2010.

†Dipartimento di Fisica "A. Volta", via Bassi 6, I-27100 Pavia, Italy, <http://www.qubit.it>

quantization. On the contrary, we now have the possibility of a “classicalization” procedure, with the classical trajectories emerging from the quantum automata.

In questa memoria si introduce brevemente il nuovo programma basato sul paradigma informazionale. L’idea è quella di sostituire la teoria quantistica di campo con una teoria più fondamentale, assegnata in termini di un automa cellulare quantistico (QCA). La fisica emerge dalla computazione quantistica, come se la realtà fosse indistinguibile dalla simulazione di un quantum computer. La teoria QCA in sintesi non è altro che la formalizzazione dell’idea che la fisica sia descritta da null’altro che sistemi quantistici interagenti, idea che fu anche di Feynman [1].

1 Introduzione

Nell’adunanza del 31 gennaio 2008 presentai una memoria [3] su un mio lavoro in corso, iniziato nell’agosto 2003, sulla fondazione assiomatica della Teoria Quantistica—la struttura teorica portante di tutta la fisica contemporanea. Il programma di assiomatizzazione [4] ha recentemente raggiunto il risultato voluto con due lunghi lavori pubblicati su *Physical Review A* [5, 6] in collaborazione con i miei allievi Paolo Perinotti e Giulio Chiribella. La Teoria Quantistica viene derivata da assiomi di natura puramente *informazionale*. In sintesi, la Teoria Quantistica è una vera e propria Teoria dell’Informazione, anche se di un’informazione di tipo speciale: l’Informazione Quantistica. I postulati sono principi generali di epistemologia, esprimibili in un linguaggio umano, comprensibile anche ai non addetti ai lavori. Presenterò in futuro una memoria divulgativa su questo risultato.

Nella presente memoria desidererei invece parlare della naturale continuazione di questa linea di ricerca, ovvero la riformulazione della Relatività e della Teoria Quantistica dei Campi—quindi essenzialmente di tutta la Fisica—in termini di Teoria dell’Informazione Quantistica. È questo il nuovo paradigma informazionale profetizzato da John Archibald Wheeler, ben sintetizzato dal suo dictum *It from Bit*: un mondo fisico fatto di *bits*. Con il senno di poi, dovremmo oggi dire: un mondo fatto di *qubits*, di “bit quantistici”. Un mondo fatto di software senza hardware, ovvero: *la Fisica come Informazione*. Cosa vuol dire?

Si deve immaginare che non esistono atomi, particelle e fotoni, ma che essi emergano come figure da una pura “computazione”. È come se la realtà fisica—spazio-tempo, massa, energia, gravitazione—fosse il risultato di un’enorme simulazione che avviene su un immenso computer, ma un computer di un tipo diverso da quelli usati quotidianamente: un computer quantistico (del *quantum computer* parlai in Accademia la prima volta il 18 novembre del 1998 nell’ambito di un ciclo di Conferenze su *Scienza e Tecnologie Avanzate*: per un breve presentazione divulgativa suggerisco al lettore l’estratto della relazione [7]).

La domanda che più frequentemente mi viene posta quando introduco il paradigma computazionale è: Da che hardware è supportato il software se viene

simulata la materia stessa? Di cosa sono fatti i qubits? “Software supportato da hardware” o “Hardware simulato da software”? È un po’ come il problema dell’uovo o della gallina. Dobbiamo pensare alla “simulazione” come una “teoria” essa stessa, e fra le due possibilità—l’uovo o la gallina—il rasoio di Occam sceglie quella più parsimoniosa di ipotesi, ovvero: “software senza hardware”—il paradigma di Wheeler, paradigma che promette di derivare l’intera fisica dalla sola Teoria Quantistica, con l’aggiunta di poche semplici regole sulla “architettura” del software—quali ad esempio la località delle interazioni—nonchè un pizzico di software nella scelta dell’automa cellulare quantistico (QCA), che in questo contesto corrisponde alla legge fisica—o, se si preferisce, alla Lagrangiana o Hamiltoniana. Il vantaggio è notevole: basti solo pensare alla possibilità di derivare la Relatività dalla Teoria Quantistica, aprendo la strada maestra alla riconciliazione fra le due teorie—problema chiave della fisica teorica contemporanea.

Sostituire un mondo fatto di particelle che viaggiano in uno spazio-tempo Minkowskiano con un cosmo evanescente fatto di pura informazione è indiscutibilmente un cambiamento di ontologia notevole: di primo acchito il fisico teorico potrebbe essere riluttante ad adottare il nuovo punto di vista. Ma non bisogna dimenticare che anche le nozioni di spazio-tempo e di particella sono ontologicamente inconsistenti se guardate con gli occhi della fisica teorica contemporanea. Ad esempio, la particella è solo uno “stato quantistico” del campo, ovvero una semplice regola di probabilità (nell’interpretazione soggettiva della probabilità di Bayes e de Finetti, lo stato quantistico è un’entità soggettiva, a *state of belief* come dice Chris Fuchs [8]). Si pensi poi alla schizofrenia ontologica del dualismo onda-corpuscolo. Il concetto stesso di spazio-tempo non è da meno: un “non essere” che si può curvare e possiede metrica, un oggetto puramente matematico.

Nel breve spazio di questa memoria mostrerò qualitativamente e con l’ausilio di semplici formule, il meccanismo con il quale la Relatività Speciale emerge dalla computazione, e come la covarianza relativistica della teoria sia automatica. Vedremo ad esempio, come l’equazione di Dirac può essere derivata come equazione descrivente il flusso libero dell’informazione sulla rete computazionale, senza invocare la covarianza relativistica.

2 L’emergere dello spazio-tempo dalla computazione

Nel paradigma informazionale, le entità reali, le primitive osservative, sono gli “eventi”—i “fatti” del Tractatus di Ludwig Wittgenstein. Formulare una teoria per gli eventi osservati (o osservabili in linea di principio), significa costruire una rete di connessioni causali fra gli eventi. Gli eventi sono la nozione primordiale: essi non accadono nello spazio tempo, viceversa è lo spazio-tempo un costrutto emergente dalla rete causale degli eventi. In altri termini, lo spazio-tempo è solo un nostro modo di organizzare gli eventi in una rete causale. Einstein

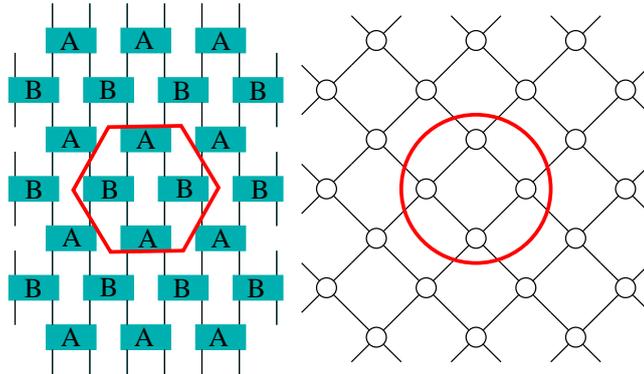


Figura 1: Una porzione di circuito quantistico (figura di sinistra) e sua rappresentazione a rete causale. L'esagono (e il cerchio corrispondente sulla destra) rappresentano l'automa cellulare quantistico (QCA), la mattonella fondamentale traslando la quale si ricostruisce l'intero circuito. Il QCA gioca il ruolo della legge fisica, o, se si vuole, della Lagrangiana o Hamiltoniana della teoria.

stesso diceva: *Time and space are modes by which we think and not conditions in which we live* [9]. Darò ora una “dimostrazione visiva” [10] di come lo spazio-tempo Minkowskiano emerge dal network causale degli eventi. In particolare, mostrerò come la dilatazione del tempo e la contrazione dello spazio di Lorentz possano essere ottenuti da puro conteggio di eventi.

In un computer quantistico gli eventi sono le trasformazioni unitarie dei “gates”—le “subroutines” della computazione. I links causali sono i sistemi quantistici, i qubits—i registri sui quali viene scritta e letta l'informazione. In Fig. 1 il gate “legge” l'informazione dai due registri (qubits) di input i quali a loro volta sono gli output di altre subroutines, e via dicendo. Per descrivere una legge fisica che ipotizziamo valida sempre e ovunque, la rete deve essere “omogenea”, ovvero deve essere ottenuta dalla ripetizione di una mattonella di subroutines collegate fra loro. Questa mattonella è il QCA, l'automa cellulare quantistico. A causa della discretezza del reticolo causale l'informazione può fluire alla velocità massima di 1 gate-per-step (GPS). Non potrebbe fluire ad esempio alla velocità di 2 GPS (Fig. 2), altrimenti sarebbe forzata a procedere anche dall'output verso l'input, ovvero dall'effetto verso la causa. Inoltre (Fig. 2), a causa della discretezza (dettata dalla necessità di distinguere logicamente fra eventi e relazioni causali), l'informazione fluisce in una direzione fissa solo alla velocità massima di 1 GPS: se si vuole rallentare l'informazione, occorre zigzagare, ovvero cambiare ripetutamente direzione (il zigzag è l'analogo del Zitterbewegung dell'elettrone di Dirac). Dobbiamo infine ricordare che la relazione causale è una relazione d'ordine parziale: vi sono eventi causalmente dipendenti—connessi da un percorso che non torna indietro sul circuito—ed eventi causalmente indipendenti—collegabili solo da percorsi che devono necessariamente anche regredire dall'output verso l'input. La stessa relazione d'ordine

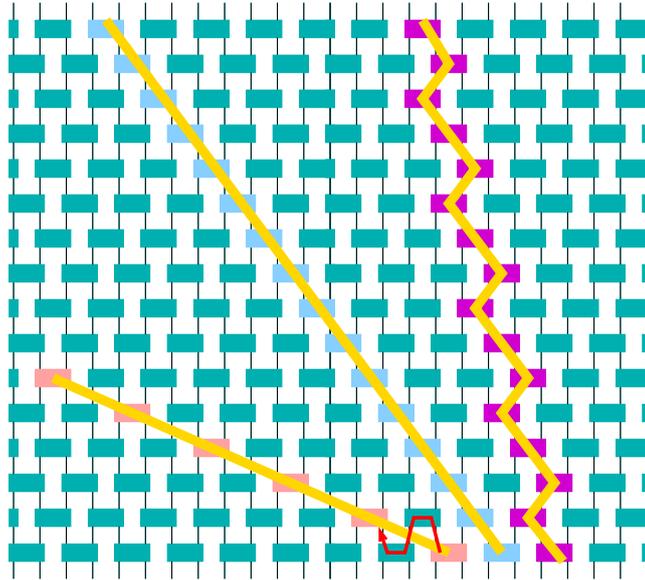


Figura 2: A causa della discretezza del reticolo causale l'informazione può fluire alla velocità massima di 1 gate-per-step (GPS). Non potrebbe fluire ad esempio alla velocità di 2 GPS, altrimenti sarebbe forzata a procedere anche dall'output verso l'input, ovvero dall'effetto verso la causa. Inoltre, a causa della discretezza, l'informazione fluisce in una direzione fissa solo alla velocità massima di 1 GPS: se si vuole rallentare l'informazione, occorre zigzagare, ovvero cambiare ripetutamente direzione.

può essere definita per i link causali, anziché fra gli eventi. Vediamo ora come lo spazio-tempo Minkowskiano emerge dalla rete causale.

Possiamo definire il sincronismo solo per eventi causalmente indipendenti, ed è l'osservatore a stabilire quali sono gli eventi sincroni. La situazione è analoga a quella che si ha quando si devono sincronizzare le chiamate di subroutine in un calcolo parallelo distribuito [11]. Scegliendo quali eventi sincronizzare si costruisce una foliazione, classificando tutti gli eventi in fogli di eventi sincroni. La foliazione è l'analogo informazionale della costruzione di Tomonaga-Schwinger. Nell'esempio in Fig. 3 la foliazione è scelta in modo uniforme, e rappresenta quello che tecnicamente è chiamato un *boost*, ovvero un osservatore o sistema di riferimento inerziale. Stirando il circuito possiamo geometricamente disporre i fogli su linee parallele orizzontali, in modo che l'asse verticale rappresenti il tempo di sincronizzazione. Lo stiramento lascia la topologia del circuito invariante, ovvero il circuito rappresenta lo stesso processing di informazione, lo stesso "calcolo parallelo": fili più corti o più lunghi rappresentano comunque le stesse connessioni causali, gli stessi qubits. Consideriamo ora il *tic-tac* di un orologio di Einstein, fatto con luce che rimbalza fra due specchi—nel nostro caso informazione che rimbalza a velocità massima di 1 GPS fra due posizioni

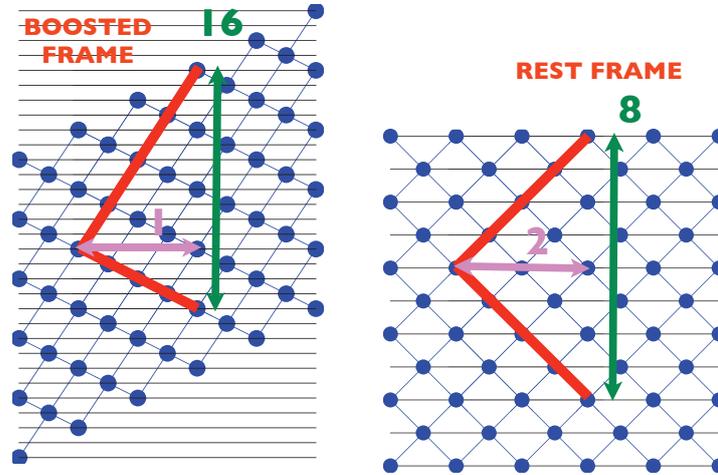


Figura 3: Versione digitale della dilatazione del tempo e della contrazione di dello spazio di Lorentz (se veda testo).

diverse. Consideriamo quindi lo stesso *tic-tac* nei due sistemi di riferimento, corrispondenti al circuito originale e quello stirato. Contiamo gli eventi trascorsi durante il *tic-tac* nei due casi: vediamo che nel circuito originario il *tic-tac* trascorre in 8 eventi, mentre in quello stirato in 16. Questo corrisponde ad avere una dilatazione di Lorentz del tempo di un fattore 2. Similmente si vede che la distanza fra gli specchi nel circuito originario è di due eventi, mentre nel circuito stirato è di un solo evento, ovvero si ha una contrazione di Lorentz dello spazio di un fattore $1/2$.

Con il mio studente di dottorato Alessandro Tosini abbiamo dato una derivazione matematica delle trasformazioni di Lorentz in questo approccio [12]. Per costruire una versione “digitale” delle trasformazioni di Lorentz, occorre compensare il fattore irrazionale $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Questo avviene tramite una costante addizionale per la conversione digitale-analogica che dipende dal sistema di riferimento. Ciò può essere fatto semplicemente con il procedimento Einsteiniano di inviare informazione fra osservatore ed eventi alla velocità massima di 1 GPS. Come mostrato in Fig. 4, quando il segnale torna indietro all’orologio dell’osservatore (quest’ultimo rappresentato dal zig-zag), si stabilisce il sincronismo dell’evento remoto con l’evento al tempo intermedio fra l’istante al quale è stato inviato il segnale e quello al quale è stato ricevuto. In questo modo si determina anche la distanza dell’evento, costruendo così l’intero sistema di coordinate. Poiché il minimo intervallo di tempo è la durata del *tic-tac* dell’orologio, ci sono eventi non discriminabili, i quali dovranno quindi essere raggruppati in insiemi che condividono le stesse coordinate digitali, in modo tale che i nuovi eventi ora dotati di volume proprio siano collegati fra loro in una rete causale

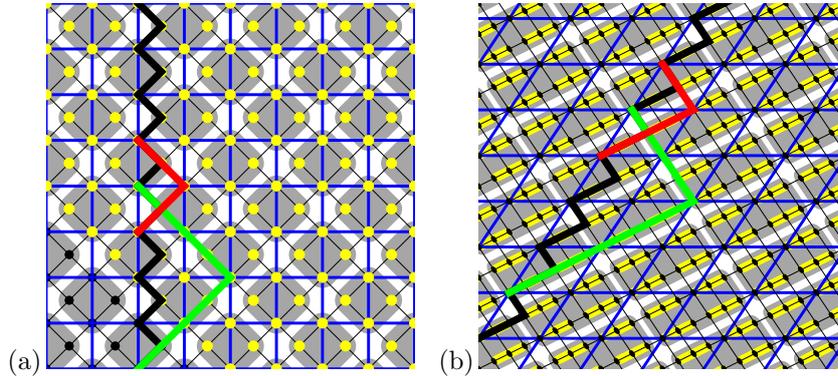


Figura 4: Sistemi di coordinate ottenuti inviando informazione avanti e indietro fra l'osservatore e l'evento (si veda testo), nel sistema di riferimento in quiete (a), e in un sistema inerziale (b) (da Ref. [[13]]). La linea nera a zig-zag rappresenta l'orologio di sincronizzazione. Poichè la precisione temporale è data dalla durata dell'intero tick-tack, vi sono eventi che non possono essere discriminati, e quindi devono essere raggruppati in insiemi che condividono le stesse coordinate digitali.

con la stessa struttura topologica di quella originale. Come mostrato in figura si costruisce in questo modo una versione digitale delle trasformazioni di Lorentz. Nel sistema di riferimento in quiete, questa procedura conduce a raggruppare gli eventi in insiemi di quattro a forma di diamante. I nuovi eventi "a grana grossa" sono ora connessi mediante "doppietti causali", e questo può suggestivamente essere re-interpretato come insorgenza topologica dello spin. Nella conversione analogico-digitale, in aggiunta alla procedura di interpolazione occorre riscalfare le coordinate digitali del valore di una costante che corrisponde alla radice quadrata del volume dell'evento misurato come conteggio del numero di eventi-diamanti contenuti.

3 Equazione del flusso libero di informazione quantistica: Dirac in 1+1 dimensioni

Che la Relatività sia già scritta nel circuito e lo spazio tempo relativistico Minkowskiano emerga naturalmente si può vedere immediatamente anche dal fatto che l'equazione di Dirac si ricava in modo immediato nel nuovo paradigma informazionale, senza invocare la Relatività. Ciò è davvero sorprendente, se si considera la difficoltà tecnica per ricavare l'equazione di Dirac avendo come punto di partenza l'equazione di Schrödinger, la quale non è relativisticamente covariante. Rimaniamo in una dimensione spaziale, ma il ragionamento si generalizza a più dimensioni.

Come già detto, nel circuito quantistico l'informazione può fluire solo in due direzioni, e se la direzione è fissata può fluire solo alla velocità massima di 1 GPS. Nel circuito tutto è digitale: la metrica è adimensionale, è puro conteggio di eventi. Se vogliamo recuperare l'usuale nozione di spazio-tempo, dobbiamo introdurre i fattori di conversione digitale-analogico da puri conteggi verso metri e secondi. I fattori si possono interpretare semplicemente come la distanza minima fra eventi a e la durata temporale dell'evento τ . (La velocità massima dell'informazione diventa allora $c = a/\tau$, e se prendiamo tale rapporto come universale, allora c è la velocità della luce. Descriviamo quindi il puro flusso di informazione nelle due direzioni—destra e sinistra—mediante due campi ϕ^+ e ϕ^- . In equazioni abbiamo:

$$\widehat{\partial}_t \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \phi^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\widehat{\partial}_x & 0 \\ 0 & -c\widehat{\partial}_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \phi^- \end{bmatrix}, \quad (1)$$

Il cappuccio sulle derivate denota che esse sono in realtà differenze finite, e generalmente coinvolgono più di una step. Come già detto, l'unico modo di rallentare in modo sistematico l'informazione è quello di avere un cambiamento periodico di direzione. Euristicamente ciò è descritto da un accoppiamento fra i due campi ϕ^+ e ϕ^- mediante una costante immaginaria. Se denotiamo con ω la frequenza angolare di questo cambiamento periodico di direzione otteniamo

$$\widehat{\partial}_t \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \phi^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\widehat{\partial}_x & -i\omega \\ -i\omega & -c\widehat{\partial}_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi^+ \\ \phi^- \end{bmatrix}. \quad (2)$$

che è appunto l'equazione di Dirac (più precisamente l'equazione di Dirac senza spin, detta equazione di Weyl). Per introdurre l'accoppiamento fisicamente in un circuito quantistico bisogna disporre di due gates diversi. Lo spin deriva dal fatto che per accoppiare i modi ci vogliono due tipi diversi di gates, e si ritorna alla rete originale con tutti i gates uguali (pura topologia), se si raggruppano i gates in gruppi di quattro, in tal modo trasformando i fili dei link causali in "doppietti".

3.1 Definizione cinematica informazionale di massa inerziale

Il rallentamento del flusso di informazione rappresenta il significato informazionale di massa inerziale, e ω ne rappresenta il valore. La nozione di massa inerziale è ancora uno dei grandi problemi di fondamento irrisolti della fisica, considerata la circolarità della definizione in dinamica. Max Jammer, che ha dedicato alla nozione di massa due delle sue grandi monografie [14, 15], sostiene a ragione che la circolarità della definizione di massa inerziale è inevitabile, sussistendo un salto logico incolmabile fra cinematica e dinamica, e argomenta così che l'unica soluzione risiede in una definizione cinematica, come è appunto il caso della definizione informazionale.

È ancora da rimarcare che l'equazione (2) è stata derivata senza utilizzare la Relatività.

3.2 Interpretazione informazionale della costante di Planck

L'analogia con l'equazione di Dirac ci porta a scrivere la costante di accoppiamento fra i campi in termini della lunghezza d'onda Compton $\lambda = c\omega^{-1} = \hbar/(mc)$. Questo ci permette di stabilire la relazione $m = c^{-2}\hbar\omega$ fra la massa inerziale usuale m espressa in Kg e quella informazionale ω espressa in sec^{-1} , e la costante di Planck risulta così essere semplicemente il fattore di conversione fra le due nozioni di massa inerziale. Si noti anche come l'equivalenza corrisponda all'identificazione del quanto di Planck con l'energia a riposo di Einstein.

3.3 Indice di rifrazione di vuoto e principio olografico

Quando si introduce l'accoppiamento fisico fra i campi destro e sinistro mediante gates quantistici si produce una rinormalizzazione nell'equazione di campo della velocità c , che viene modificata da c a ζc con $\zeta = \zeta(m)$, $0 < \zeta < 1$, ovvero un indice di rifrazione di vuoto funzione della massa. Il fenomeno dell'indice di rifrazione di vuoto massa-dipendente è generale, non dipende dalla forma dell'equazione di campo, ed è dovuto unicamente all'unitarietà delle trasformazioni associate ai gates. Infatti, la riga della matrice unitaria contiene un termine diagonale di propagazione in direzione fissata ed uno fuori diagonale di accoppiamento fra le due direzioni, e la normalizzazione della riga dovuta all'unitarietà conduce a un trade-off fra i due termini. Per l'equazione di Dirac si ha semplicemente [16]

$$\frac{1}{n} = \sqrt{1 - \left(\frac{m}{M}\right)^2}, \quad (3)$$

dove $M = \hbar/(2ac)$. L'informazione si ferma completamente al valore della massa M . Se si prende la distanza minima fra due gates $2a$ pari alla distanza di Planck l_P , la massa M coincide con la massa di Planck del principio olografico. La massa di Planck è una massa enorme: è pari a 10^{-5} g, ovvero $4 * 10^{21}$ volte quella dell'elettrone. Si potrebbe qui speculare sul fatto che il fermarsi dell'informazione corrisponda formalmente al mini buco nero avente raggio di Schwartzild uguale lunghezza d'onda Compton, ipotesi alla base del dibattito principio olografico secondo il quale l'informazione non scompare nel buco nero, ma si localizza sulla sua superficie.

4 Eliminazione dei campi

Il paradigma informazionale conduce a una nuova teoria di campo, automaticamente relativistica e con molte proprietà desiderate, soprattutto localizzabilità e causalità. In 1+1 dimensioni utilizzando la costruzione di Jordan-Wigner è possibile eliminare i campi fermionici ed avere i gates che coinvolgono solo gli operatori di Pauli associati ai link causali (per i campi Bosonici la situazione è molto più semplice, in quanto i campi sono già descritti da operatori locali). Per dimensione spaziale maggiore di 1 l'eliminazione dei campi attraverso la costruzione di Jordan-Wigner necessita dell'introduzione di campi ausiliari di

Majorana [17], fatto suggestivo dell’associazione neutrino-leptone. L’Hamiltoniana di campo emerge dalla differenza delle trasformazioni unitarie dei gates. Tutta la teoria quindi è ottenuta a partire da un insieme numerabile di qubits, e dalla mattonella di gates del QCA che riproduce per traslazione il reticolo computazionale. In sintesi, l’usuale teoria quantistica di campo sarebbe una teoria effettiva fenomenologica valida alla scala del Fermi, teoria che emergerebbe dalla nuova teoria computazionale data dal QCA, la quale avrebbe invece validità alla scala di Planck. È da ricordare che la scala di Planck è enormemente più piccola di quella di Fermi: se prendiamo il raggio dell’elettrone pari al raggio della galassia, la lunghezza di Planck è un decimillimetro.

5 “Classicalizzazione”

Mediante la costruzione di Jordan-Wigner è possibile ricostruire i campi quantistici dai qubit computazionali e derivare quindi la Lagrangiana della teoria classica corrispondente via l’Hamiltoniana emergente dalle trasformazioni unitarie locali. In questo modo si ha un procedimento inverso a quello della quantizzazione canonica, ovvero si parte da un network quantistico ab initio (senza quantizzazione canonica) e si ritrova all’incontrario la teoria classica corrispondente. La prima quantizzazione—ovvero gli stati a numero definito di particelle—corrisponde ad adottare come stato di vuoto uno stato che è annihilato dall’operatore di campo e che resta localmente invariante sotto l’azione dei gates. È facile vedere che in 1+1 dimensioni l’unico stato annihilato dall’operatore di campo nella realizzazione di Jordan-Wigner è lo stato fattorizzato con tutti i qubits nello stato $|0\rangle$ di “zero” (spin-down). Lo stato di particella singola perfettamente localizzata in una data posizione è quindi ottenuto mediante l’applicazione al vuoto dell’operatore di campo valutato nella posizione voluta. Questa operazione produce un qubit-up nella stessa posizione. Alla particella viene imposto un momento delocalizzando lo spin-up su diverse posizioni con uno shift in fase. Le traiettorie classiche corrispondono alle traiettorie “tipiche” dell’informazione sul circuito computazionale, ovvero alla successione nel tempo delle posizioni dei qubits con ampiezza di probabilità massima sullo stato di particella singola $|1\rangle$ (si veda la Fig. 5).

6 Il programma

La riformulazione computazionale della teoria quantistica di campo che ho brevemente delineato rappresenta un ampio programma di ricerca. Molte punti presentati, anche se il relativo percorso è ben delineato, necessitano ancora di analisi dettagliata. Ad esempio, occorre derivare esplicitamente le rappresentazioni unitarie delle trasformazioni di Poincaré del QCA, occorre scrivere in dettaglio tutte le realizzazioni QCA corrispondenti alle diverse rappresentazioni dell’equazione di Dirac, esplicitando i campi associati di Majorana. Una successiva step consiste quindi nel formulare il QCA di una semplice teoria di gauge,

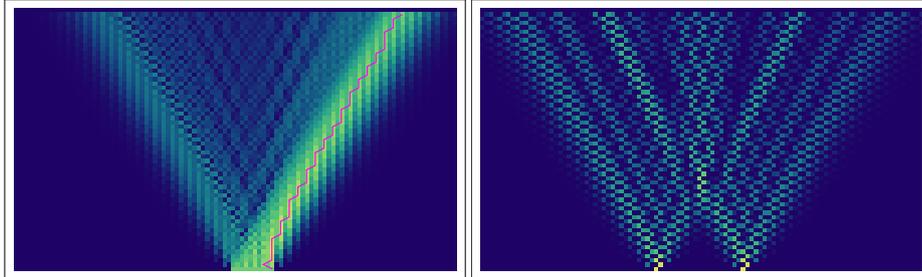


Figura 5: Evoluzione della distribuzione di probabilità di uno stato ad una particella secondo l'automa quantistico di Dirac-Weyl in Eq. (2) (l'asse verticale rappresenta il tempo, quello orizzontale lo spazio). Nella figura a sinistra si ha uno stato dotato di momento. La curva nera a zigzag rappresenta la traiettoria “tipica”, ovvero quella che massimizza la probabilità di trovare la particella nella posizione data. Nella figura di destra si vede l'interferenza di due stati di particella singola localizzati in sovrapposizione con la stessa fase.

in particolare la QED. Occorre infine formalizzare matematicamente il processo di “classicalizzazione”. La strada è ben delineata, e molti degli obiettivi sopraddetti saranno verosimilmente raggiunti entro il 2012.

Ai suddetti problemi a breve termine se ne aggiungono altri a lungo termine, totalmente inesplorati. Ad esempio, se si crede nel principio di equivalenza, la gravità dovrebbe emergere dalla semplice teoria libera di Dirac. Che la gravità possa essere un puro effetto quantistico potrebbe sembrare un'idea folle. In realtà quest'idea è già stata proposta da Sakharov più di cinquant'anni fa [18]. Più recentemente un'idea che presenta delle forti analogie è stata proposta da Jacobson e da Verlinde [19, 20]: in questi lavori la gravità Einsteniana non sarebbe una forza fondamentale, bensì una forza macroscopica di natura entropica, connessa al principio olografico [21]. Nel caso della teoria di campo computazionale, l'effetto dovrebbe essere legato alla struttura a QCA della teoria, dal quale dovrebbe essere derivato il principio olografico. Per poter analizzare quest'ipotesi occorrerà innanzitutto stabilire un modo sistematico di introdurre termini correttivi QCA alla teoria di campo usuale.

Riferimenti bibliografici

- [1] R. P. Feynman, *Simulating physics with computers*, Internat. J. Theoret. Phys. **21**, 467 (1981).

- [2] D. Deutsch, Proc. Royal Soc. London **400** 97 (1985)
- [3] G. M. D'Ariano, *Da quali principi discende la Meccanica Quantistica?* Rendiconti Istituto Lombardo - Accademia di Scienze e Lettere **142** 23 (2008)
- [4] G. M. D'Ariano, in *Philosophy of Quantum Information and Entanglement*, ed. by A. Bokulich and G. Jaeger (Cambridge University Press, Cambridge UK 2010)
- [5] G. Chiribella, G. M. D'Ariano, and P. Perinotti, *Probabilistic theories with purification*, Phys. Rev. A **81** 062348 (2010)
- [6] G. Chiribella, G. M. D'Ariano, and P. Perinotti, *Informational derivation of Quantum Theory*, Phys. Rev A **84** 012311 (2011) in press
- [7] G. M. D'Ariano, *Ottica Quantistica: Applicazioni e Nuovi Esperimenti Fondamentali*, Scienza e Tecnologia Avanzate, Lezioni, anno 1998/1999, Istituto Lombardo - Accademia di Scienze e Lettere (2010 Milano), pag. 9-48
- [8] C. A. Fuchs, *Quantum Mechanics as Quantum Information (and only a little more)*, eprint arXiv:quant-ph/0205039v1 (2002)
- [9] Aylesa Forsee, *Albert Einstein: Theoretical Physicist* (Collier-Macmillan, 1963) p.81
- [10] Perimeter Institute Recorded Seminar Archive PIRSA:10020037 at <http://pirsa.org>. See also the more recent seminars: PIRSA:10110080 and the 2010 Fermilab Colloquium at <http://www-ppd.fnal.gov/EPPOffice-w/colloq/colloq.html>
- [11] L. Lamport, Comm. ACM **21** 558 (1978)
- [12] G. M. D'Ariano and A. Tosini, arXiv:1008.4805v1 (2010)
- [13] G. M. D'Ariano and A. Tosini, arXiv:1008.4805v2 (in preparation)
- [14] Max Jammer, *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*, (Dover 1997)
- [15] Max Jammer, *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy*, (Princeton University Press, Princeton 2000)
- [16] G. M. D'Ariano, *The Quantum Field as a Quantum Computer*, arXiv:1012.0756
- [17] F. Verstraete and J. I. Cirac, *Mapping local Hamiltonians of fermions to local Hamiltonians of spins*, J. Stat. Mech. **9** 12 (2005)
- [18] A. D. Sakharov, *Vacuum Quantum Fluctuations in Curved Space and the Theory ohm Gravitation*, Gen. Rel. Grav. **32** 365 (2000), [translated from Doklady Akademii Nauk SSSR **177** (1967)]

- [19] T. Jacobson, *Thermodynamics of Spacetime: The Einstein Equation of State*, Phys. Rev. Lett. **75** 1260 (1995)
- [20] E. P. Verlinde, *On the Origin of Gravity and the Laws of Newton*, arXiv 1001.0785 (2010)
- [21] R. Bousso, *The holographic principle*, Rev. Mod. Phys. **74** 825 (2002)