Clara Moskowitz è *senior editor* di «Scientific American» e si occupa di spazio e di fisica. È laureata in astronomia e fisica alla Wesleyan University e in giornalismo all'Università della California a Santa Cruz.

"Tutto il mondo è un palcoscenico», scriveva Shakespeare, e anche i fisici tendono a essere d'accordo. Il loro palcoscenico è lo spazio nel suo complesso e, in genere, lo spazio non sembra altro che lo sfondo su cui agiscono forze e campi che vi risiedono: di per sé, secondo il pensiero tradizionale, lo spazio non è fatto di niente. Gli scienziati però hanno cominciato a mettere in dubbio questa convenzione. Lo spazio – o meglio, nel linguaggio della relatività generale, lo spazio-tempo – potrebbe essere composto da minuscoli elementi di informazione. Questi frammenti, secondo la teoria, interagirebbero tra loro per generare lo spazio-tempo e far emergere sue proprietà, fra cui la curvatura che provoca la gravità. Se questa idea è corretta, non si limiterebbe a spiegare lo spazio-tempo, ma contribuirebbe anche a raggiungere l'agognata teoria quantistica della gravità, che fonderebbe relatività generale e meccanica quantistica, le due imponenti teorie della fisica che tendono a non andare d'accordo fra loro.

Di recente centinaia di fisici si sono entusiasmati per questa possibilità, e si incontrano circa ogni tre mesi nell'ambito di un progetto chiamato «It from Qubit».

L'«It», la cosa, in questo caso è lo spazio-tempo, mentre il qubit (da *quantum bit*, bit quantistico) rappresenta la minima quantità possibile di informazione, analoga a un bit informatico ma su scala quantistica. L'idea che anima It from Qubit è che l'universo si sia formato in base a qualche codice e che se riuscissimo a decrittarlo avremmo trovato un modo per capire la natura quantistica degli eventi su larga scala del cosmo. Il più recente incontro di It from Qubit (IfQ) si è tenuto nel luglio 2016 presso il Perimeter Institute for Theoretical Physics, in Ontario. Gli organizzatori si aspettavano circa 90 partecipanti, ma hanno ricevuto così tante richieste di iscrizione che alla fine ne hanno accettate 200 e hanno tenuto cinque sessioni simultanee collegate via satellite in diverse università. «Penso che questa sia una delle più promettenti, se non la più promettente, direzione di ricerca sulla gravità quantistica», dice Netta Engelhardt, ricercatrice alla Princeton University, che non fa parte ufficialmente di IfQ ma ne ha seguito alcuni incontri. «Sta spiccando il volo».

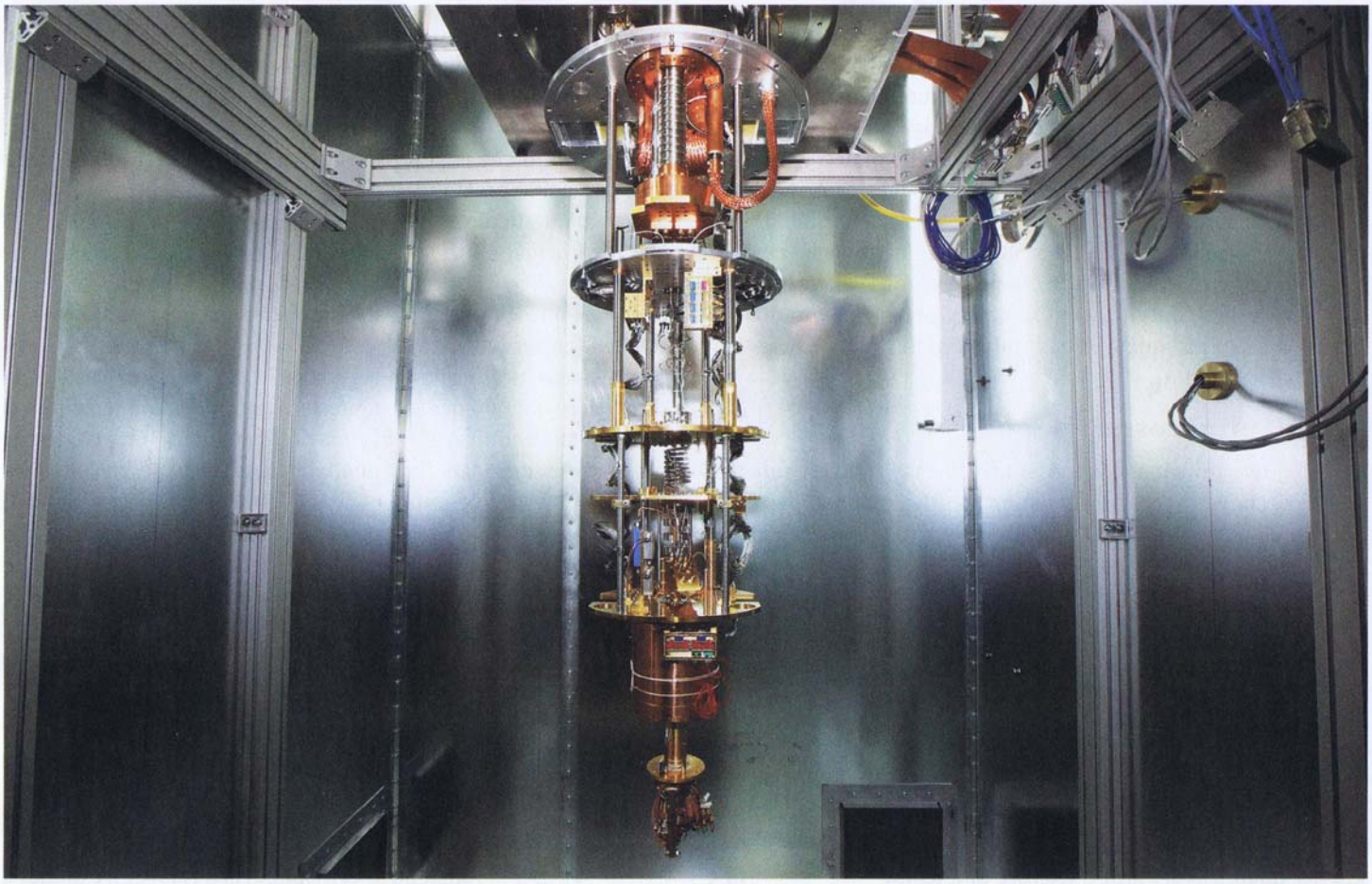
Dato che il progetto riguarda sia l'informatica quantistica sia lo studio dello spazio-tempo e della relatività generale, mette insieme due gruppi di ricercatori che in genere non collaborano: da una parte studiosi di informazione quantistica e dall'altra fisici delle alte energie e teorici delle stringhe. Circa un anno fa la Simons Foundation, un'organizzazione privata che sostiene la ricerca scientifica, ha concesso un finanziamento per la collaborazione It from Qubit e per i fisici intenzionati a studiare e a tenere incontri sull'argomento. Da allora l'entusiasmo è cresciuto, e in incontri successivi si sono aggiunti sempre più ricercatori, alcuni membri ufficiali delle collaborazione finanziata dalla Simons Foundation e molti altri semplicemente interessati all'argomento. «Il progetto affronta questioni molto importanti, ma assai difficili», spiega il collaboratore IfQ Beni Yoshida, ricercatore al Perimeter. «La collaborazione è necessaria, non è un problema che possa risolvere qualcuno da solo».

Anche scienziati al di fuori del progetto hanno mostrato estremo interesse. «Se il collegamento con l'informazione quantistica si rivela fondato come è previsto da qualcuno, allora ne potrebbe nascere una nuova rivoluzione nel nostro modo di concepire lo

IN BREVE

È possibile che lo spazio-tempo sia formato da minuscoli elementi fondamentali di informazione? Se così fosse, questi componenti potrebbero essere tenuti insieme dall'entanglement quantistico, in cui due particelle mantengono un collegamento istantaneo anche separate da una grande distanza. **Gli scienziati** perseguono questa idea con un programma di ricerca chiamato «It from Qubit», che mette insieme informatici quantistici e fisici che studiano la relatività generale e la teoria delle stringhe. **L'obiettivo** è trovare una teoria quantistica della gravità che possa fondere le teorie incompatibili della meccanica quantistica e della relatività generale.

Illustrazione Kenn Brown, Mondolithic Studios (*pagine precedenti*)



I computer quantistici, come questo realizzato da D-Wave Systems, potrebbero aiutare i ricercatori a capire la forza di gravità.

spazio e il tempo», afferma il teorico delle stringhe Brian Greene, della Columbia University, che non è coinvolto in IfQ. «È una questione di grande importanza, ed è davvero appassionante», sottolinea Greene.

Spazio-tempo aggrovigliato

L'idea che lo spazio-tempo abbia componenti oppure sia «fatto» di qualcosa si allontana dall'immagine tradizionale data dalla relatività generale. La nuova idea è che lo spazio-tempo, anziché essere qualcosa di fondamentale, «emergerebbe» dalle interazioni fra i qubit. Ma di che cosa sono fatti questi elementi, e che tipo di informazione contengono? Gli scienziati non lo sanno, ma curiosamente la cosa non sembra turbarli. «Quello che importa sono le relazioni» fra i bit, più che i bit stessi, dice il collaboratore IfQ Brian Swingle, della Stanford University. «È da queste relazioni collettive che proviene la ricchezza del modello; l'aspetto cruciale non sono i costituenti, ma il modo in cui si organizzano».

La chiave di questa organizzazione potrebbe essere lo strano fenomeno noto come *entanglement* quantistico, uno bizzarro tipo di correlazione che può esistere fra due particelle, grazie a cui le azioni eseguite su una delle due possono avere effetto sull'altra anche se le separa una distanza enorme. «Secondo un'affascinante proposta formulata di recente, la struttura dello spazio-tempo è tenuta insieme dall'entanglement quantistico dei sottostanti "atomi" di spazio-tempo, qualunque cosa siano», spiega Vijay Balasubramanian, fisico dell'Università della Pennsylvania e ricercatore IfQ. «Se è vero, è entusiasmante».

Il ragionamento dietro questa idea deriva da scoperte precedenti di numerosi fisici, come l'articolo del 2006 di Shinsei Ryu, dell'Università dell'Illinois a Urbana-Champaign, e Tadashi Takayanagi, dell'Università di Kyoto, che mostrava una connessione fra entanglement e geometria dello spazio-tempo. Nel 2013, a partire da questo lavoro, Juan Maldacena, dell'Institute for Advanced Study, a Princeton, e Leonard Susskind, della Harvard University, hanno trovato che se due buchi neri diventano *entangled* generano un *wormhole*, una scorciatoia nello spazio-tempo prevista dalla relatività generale. Questa scoperta (soprannominata ER = EPR, le abbreviazioni con cui i fisici si riferiscono ai wormhole e all'entanglement in base ai nomi degli scienziati che li hanno teorizzati) e altre collegate fanno pensare, sorprendentemente, che l'entanglement – che non si riteneva provocasse alcun collegamento fisico – possa produrre strutture nello spazio-tempo.

Per capire come lo spazio-tempo possa essere prodotto dall'entanglement, i fisici devono prima capire meglio come funziona quest'ultimo. Il fenomeno è sembrato «inquietante», come lo definì Einstein, fin da quando lo stesso Einstein e i suoi collaboratori lo previdero nel 1935, perché coinvolge un collegamento istantaneo fra particelle a grande distanza che sembra sfidare il limite secondo cui nulla può muoversi a velocità maggiore della luce. Di recente sono stati studiati vari tipi di entanglement: quello convenzionale consiste nel collegare un'unica caratteristica (come lo spin) di svariate particelle dello stesso tipo diffuse nello spazio. Ma «l'entanglement convenzionale non basta», come dice Balasubramanian. «Mi sono reso conto che ci sono altre forme di entanglement che sono importanti per questo progetto di ricostruzione dello spazio-tempo». Si possono per esempio porre in entanglement particelle di un certo tipo in una certa posizione con altre di un tipo diverso ma nella stessa posizione: è un entanglement che

Kim Stallknecht/Redux Pictures

non riguarda lo spazio. Si studiano anche gli aspetti via via più complessi dell'entanglement fra grandi numeri di particelle.

Una volta chiarite le dinamiche dell'entanglement, gli scienziati sperano di capire come ne deriva lo spazio-tempo, allo stesso modo in cui i movimenti microscopici delle molecole nell'aria generano complessi schemi termodinamici e meteorologici. Sono fenomeni emergenti, dice Engelhardt. «Quando guardiamo qualcosa da molto lontano, vediamo un'immagine diversa, che non sappiamo essere derivata dalla dinamica a una scala inferiore. È uno degli aspetti più affascinanti di IfQ, perché ancora non capiamo la dinamica quantistica fondamentale da cui emergerebbe lo spazio-tempo».

Ologrammi cosmici

L'obiettivo principale di questo lavoro è raggiungere una teoria che descriva la gravità da una prospettiva quantistica, ma da un secolo i fisici che se ne occupano incontrano ostacoli; Einstein stesso cercò con tenacia una teoria simile fino alla morte, ma senza successo. I ricercatori di It from Qubit sperano che li possa aiutare un'idea nota come principio olografico.

Questo principio suggerisce che alcune teorie fisiche siano equivalenti a teorie più semplici che funzionano in un universo di dimensione inferiore, allo stesso modo in cui una cartolina bidimensionale con un ologramma di un unicorno contiene le informazioni necessarie per descrivere e mostrare la forma tridimensionale dell'unicorno. Dato che è difficile trovare una teoria funzionante per la gravità quantistica, l'idea è scoprire una teoria equivalente, ma più facile da trattare, in un universo con meno dimensioni del nostro.

Una delle incarnazioni più riuscite del principio olografico è la scoperta nota come corrispondenza AdS/CFT (un acronimo per indicare la corrispondenza anti-de Sitter/teoria di campo conforme), secondo cui è possibile descrivere un buco nero descrivendo che cosa accade sulla sua superficie. In altre parole, la fisica dell'interno – il volume tridimensionale – corrisponde alla fisica dell'esterno – la frontiera bidimensionale. Maldacena ha scoperto questa relazione nel 1997, lavorando nell'ambito della teoria delle stringhe, che è un altro tentativo di gravità quantistica. La teoria delle stringhe sostituisce tutte le particelle fisiche fondamentali con minuscole corde vibranti.

AdS/CFT potrebbe permettere ai fisici di scoprire una teoria che sia equivalente alla gravità quantistica, ne raggiunga tutti gli obiettivi, possa descrivere gli stessi fenomeni e con cui sia più facile lavorare... escludendo la gravità. «È molto difficile ottenere descrizioni quantistiche delle teorie che includono la gravità, mentre quelle in cui non c'è sono molto più facili da descrivere», spiega Balasubramanian. Ma ci si potrebbe chiedere: come si fa, escludendo la gravità, a ottenere una teoria della gravità quantistica? Forse quello che chiamiamo gravità e spazio-tempo è solo un altro modo di vedere il prodotto finale dell'entanglement o, in altre parole, l'entanglement potrebbe in qualche modo codificare l'informazione relativa al volume tridimensionale nei bit memorizzati sulla frontiera bidimensionale. «È una direzione di ricerca molto promettente», conclude.

Negli ultimi vent'anni si è visto che la corrispondenza AdS/CFT funziona, dando una teoria bidimensionale che può descrivere una situazione tridimensionale, uno schema detto dualità, ma non si capisce ancora pienamente perché. «Sappiamo che queste teorie sono duali, ma non ne comprendiamo del tutto il motivo», dice Swingle. «Un risultato di It from Qubit in cui possiamo sperare è una teoria su come emergano queste dualità: penso proprio che ci si possa riuscire, e che ci si riuscirà grazie a questa collaborazione, o per lo meno che faremo grossi passi avanti in questa direzione».

La teoria dell'informazione quantistica può essere d'aiuto grazie al fatto che un concetto di questa disciplina noto come «codici di correzione degli errori quantistici» potrebbe essere presente anche nella corrispondenza AdS/CFT. Gli esperti di informatica quantistica hanno messo a punto questi codici per evitare di perdere informazioni quando qualcosa interferisce con l'entanglement fra i bit. Anziché codificare le informazioni in singoli bit, i computer quantistici usano stati di bit multipli altamente entangled. In questo modo un singolo errore non può danneggiare la precisione di un'informazione. La cosa strana, però, è che l'apparato matematico dei codici appare anche nella corrispondenza AdS/CFT; sembra che l'organizzazione dell'entanglement di bit multipli che si usa per le reti a prova di errore possa anche essere quella che usa l'entanglement per codificare l'informazione dell'interno dei buchi neri sulla loro superficie. «È curioso che si possano trovare codici di correzione di errori nei buchi neri», dice l'informatica quantistica Dorit Aharonov, ricercatrice IfQ alla Hebrew University di Gerusalemme. «Perché mai dovrebbe succedere? Questi collegamenti sono affascinanti».

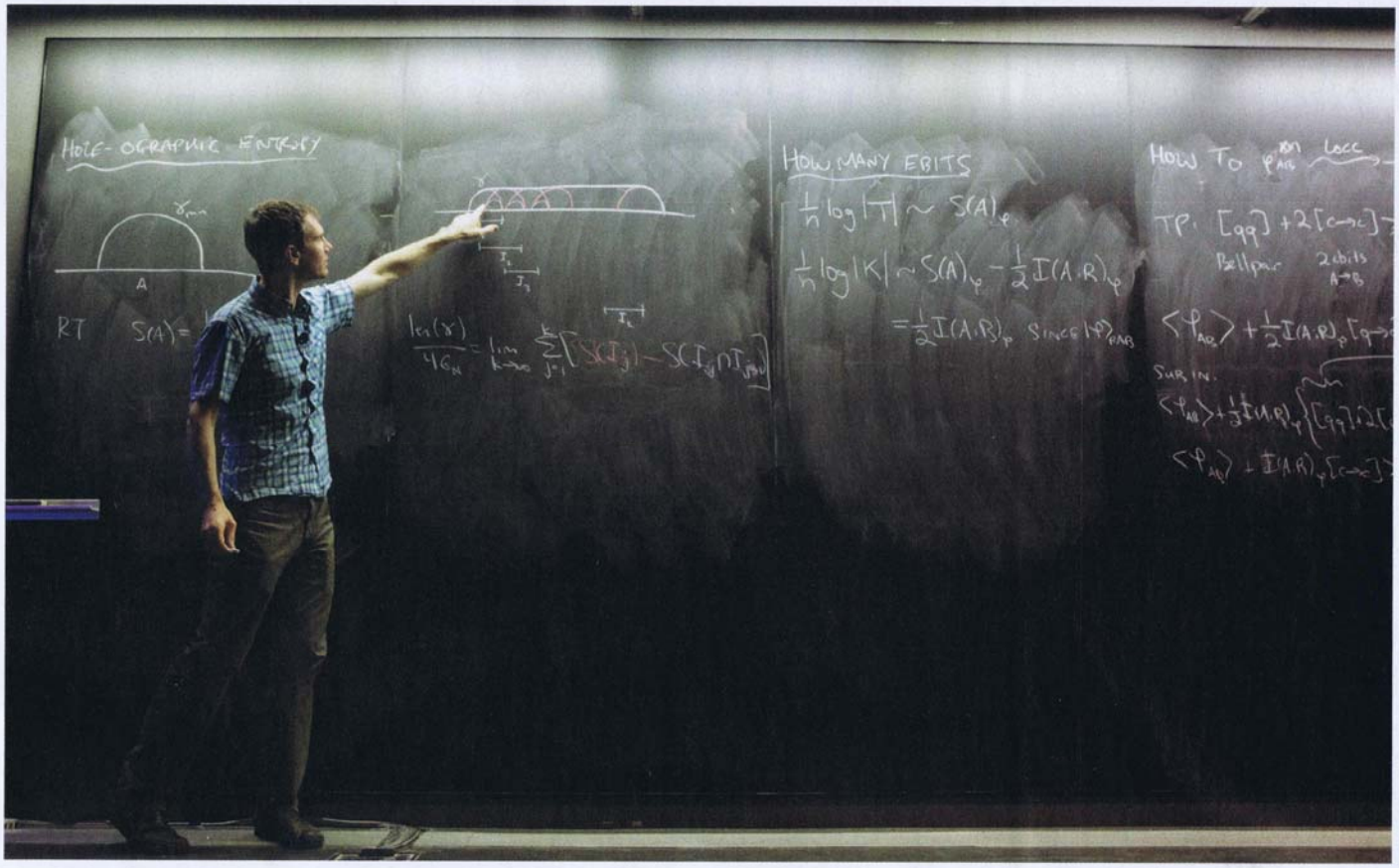
Forse quello che chiamiamo gravità e spazio-tempo è solo un altro modo di vedere il prodotto finale dell'entanglement

Se anche i fisici riusciranno a capire come funziona la corrispondenza AdS/CFT e quindi a sviluppare una teoria in bassa dimensione che funziona come gravità quantistica, non saranno ancora arrivati a destinazione. La corrispondenza stessa funziona solo in un «modellino» dell'universo un po' semplificato rispetto al cosmo in cui viviamo. In particolare, tutte le regole della gravità valide nel nostro universo reale non sono in vigore nel mondo semplificato della corrispondenza. «AdS/CFT ha una specie di gravità, ma non è la teoria della gravità di un universo in espansione come il nostro», spiega Swingle. «Descrive un universo come se fosse in una bottiglia: se accendiamo un fascio luminoso, si riflette contro le pareti dello spazio, il che non succede nel nostro universo che si espande». Questo modello fornisce ai fisici un utile ambiente teorico in cui mettere alla prova le loro idee e in cui la situazione semplificata rende più facile affrontare la gravità quantistica. «Speriamo che sia una tappa utile sulla via per capire la gravità del nostro universo», dice Swingle.

Se IfQ è fondato su basi non realistiche, dicono alcuni scettici, a quali risultati potrà portare? «È una critica valida», risponde Engelhardt. «Perché ci concentriamo su questo modellino? Tutto dipende dalla validità del modello e dall'idea che alla fine rappresenti bene il nostro universo. Vorrei essere sicura che se capiamo il modellino, poi capiremo la vita vera». I ricercatori IfQ contano sul fatto che partendo da un'immagine semplificata con cui è più facile lavorare possano poi aggiungere la complessità necessaria per applicare la teoria al mondo reale.

Il risultato finale

Nonostante i loro dubbi, sia gli scienziati del progetto sia quelli esterni a IfQ lo considerano un approccio che vale la pena di esplorare, e che ha già rivelato nuove strade da percorrere. «Da



Patrick Hayden, fisico a Stanford, parla nel corso dell'incontro di It from Qubit di luglio 2016 al Perimeter Institute for Theoretical Physics.

Cortesia Jongbum Park, Perimeter Institute for Theoretical Physics

tempo ho l'impressione che il rapporto fra informazione quantistica e gravità quantistica sia di importanza fondamentale», dice Raphael Bousso, fisico dell'Università della California a Berkeley, che non è membro di IfQ ma ha lavorato con alcuni dei suoi collaboratori. «Il collegamento si è approfondito nel corso degli anni, e sono entusiasta del fatto che tanti scienziati di talento siano al lavoro insieme per affrontare queste domande e vedere dove ci portano». Eva Silverstein, fisica teorica alla Stanford University che non fa parte della collaborazione, concorda: «Sicuramente è il caso di sviluppare e applicare l'informazione quantistica a questi problemi. Ma per capire la dinamica della gravità quantistica serve molto altro, ed è importante che in questo campo non ci si concentri troppo su un solo approccio».

Inoltre, se anche il progetto non raggiungerà una teoria della gravità quantistica, è comunque probabile che dia risultati utili. Mettere insieme tecniche e idee della teoria delle stringhe e della relatività generale per affrontare questioni di informazione quantistica può aiutare, per esempio, a definire meglio i diversi tipi di entanglement, sia per capire lo spazio-tempo che per costruire computer quantistici. «Quando si comincia a giocare con questi strumenti in un ambiente nuovo, è molto probabile che portino a idee interessanti, che si riveleranno utili in altri ambiti», commenta Aharonov. «A quanto pare si stanno facendo progressi su questioni che sono aperte da molti anni». Si è scoperto, per esempio, che è possibile misurare il tempo all'interno dei wormhole considerando il wormhole stesso come un circuito quantistico.

Inoltre unire l'informatica quantistica alla teoria delle stringhe può essere d'aiuto non solo per trovare una teoria della gravità quantistica ma anche per dare una valutazione di eventuali altre teorie trovate. Qualsiasi teoria fisica può essere considerata come un computer, in cui l'input e l'output corrispondono allo stato iniziale della teoria e a un successivo stato misurabile, e alcuni computer sono più potenti di altri. Una volta trovata una teoria della gravità, ci si potrà chiedere quale sia la sua potenza di calcolo. «Se questa potenza risulta eccessiva, se il nostro modello di gravità quantistica fosse in grado di calcolare cose che non crediamo sia possibile calcolare nel nostro mondo, questo metterebbe in dubbio la teoria», dice Aharonov. «È un modo per capire se la teoria è sensata o no da un altro punto di vista».

Ad alcuni fisici questo progetto fa pensare ai giorni inebrianti del passato, in cui prendevano il via altre grandi idee. «Ho cominciato il dottorato nel 1984, quando è arrivata la cosiddetta prima rivoluzione della teoria delle stringhe», ricorda Hirosi Ooguri, fisico del California Institute of Technology. «Era un periodo molto eccitante, quando questa teoria si proponeva come candidata principale al ruolo di teoria unificata di tutte le forze fisiche. L'entusiasmo attuale è simile: in questo campo è un momento stupendo sia per i giovani sia per quelli fra noi che hanno preso il dottorato qualche decina di anni fa». ■

PER APPROFONDIRE

The Large-N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity. Maldacena J., in «International Journal of Theoretical Physics», Vol. 38, n. 4, p. 1113-1133, aprile 1999. Preprint: **https://arxiv.org/abs/hep-th/9711200.**

Sito web del progetto It from Qubit: **www.simonsfoundation.org/mathematics-and-physical-science/it-from-qubit-simons-collaboration-on-quantum-fields-gravity-and-information.**

Entanglement quantistico e geometria. Maldacena J., in «Le Scienze» n. 570, febbraio 2016.