

L'Universo è un laboratorio di gravità quantistica

Giovanni Amelino-Camelia

Università di Napoli "Federico II"

Il cosiddetto “problema della gravità quantistica” consiste nel fatto che la relatività generale, la descrizione Einsteiniana dei fenomeni gravitazionali, non è compatibile logicamente con il concetto di *quanto*, il concetto centrale della meccanica quantistica. La relatività generale usa una matematica che è specializzata al caso di quantità fisiche continue (come un fluido) mentre la meccanica quantistica descrive tutto in termini di mattoncini fondamentali (come le molecole nell'acqua). La straordinaria scoperta a cui si è giunti con la relatività generale è che c'è un condizionamento reciproco tra le proprietà dello spaziotempo (la sua curvatura) e le proprietà della materia che si trova in quello spaziotempo.

Una equazione di condizionamento reciproco come quella della relatività generale non può avere da un lato quantità quantizzate e dall'altro quantità continue: quando la matematica dice che due cose sono uguali devono essere proprio uguali, mentre c'è una ineludibile profondissima differenza tra grandezze continue e grandezze quantizzate. Una manifestazione molto chiara di questa inadeguatezza sta nel fatto che in relatività generale è necessario associare a ciascun corpo o particella una specifica traiettoria spaziotemporale, mentre in meccanica quantistica, per

le particelle microscopiche, il concetto di traiettoria perde senso, proprio non è possibile associare ad una particella una sua specifica univoca traiettoria spaziotemporale.

Ancora non abbiamo indizi robusti su come debba essere la gravità quantistica. In scienza gli unici indizi affidabili sono i fatti sperimentali ed è molto difficile ottenere fatti sperimentali sulla gravità quantistica. Per spiegare le difficoltà che abbiamo nel provare ad ottenere indizi sperimentali sulla gravità quantistica posso far ricorso ad una analogia con quando Einstein scoprì che l'acqua era fatta di molecole, basandosi sul moto Browniano di granelli di polline sospesi in acqua. La molecola d'acqua ha dimensioni di circa un decimo di miliardesimo di metro e nel 1905, quando Einstein analizzò il moto Browniano, si era ben lontani dal poter osservare direttamente qualcosa con dimensioni così piccole. Non potendo osservare direttamente le molecole, Einstein ne dedusse l'esistenza comprendendo che il moto Browniano dei granelli di polline era dovuto alla esistenza delle molecole d'acqua. Il moto browniano è un moto disordinato che viene causato dai tantissimi urti tra granello di polline e molecole d'acqua: la singola collisione tra molecola d'acqua e granello di polline ha effetti così

minuti da non poter osservati con le tecniche osservative disponibili nel 1905, ma l'effetto cumulativo dei tantissimi urti è osservabile (appunto il moto Browniano). Importante per il successo di Einstein con il moto Browniano fu il fatto che le molecole d'acqua sono circa 100 mila volte più piccole di un granello di polline.

Proviamo ad immaginare cosa sarebbe successo se le molecole d'acqua fossero state ancora più piccole, ad esempio non 100 mila ma un milione di miliardi di volte più piccole dei granelli di polline. In quel caso (assumendo immutata la loro frequenza) anche gli effetti cumulativi dei tanti urti sarebbero stati troppo piccoli per la loro osservazione sperimentale. I quanti di acqua (le molecole) sono molto piccoli ma almeno grandi abbastanza da poter osservare i loro effetti cumulativi in certi contesti sperimentali.

La ricerca in gravità quantistica sta essenzialmente cercando i quanti di spaziotempo ed abbiamo motivo di ritenere che questi quanti siano estremamente piccoli. Le stime più accreditate suggeriscono che i quanti di spaziotempo dovrebbero essere 10^{-26} volte più piccoli delle molecole d'acqua. Sono state formulate numerose proposte di teorie della gravità quantistica, ma senza misure almeno indirette dei quanti di spaziotempo non potremo sapere quale di queste teorie è corretta ed in realtà non possiamo escludere per ora nemmeno l'ipotesi che nessuna di queste teorie sia corretta, che la teoria corretta non sia stata ancora proposta.

Le varie teorie della gravità quantistica attualmente disponibili sono ovviamente solo delle ipotesi, mancandone la conferma sperimentale, ma sono comunque tutto quello che abbiamo per formarci un intuito su cosa potrebbe caratterizzare il regime fisico della gravità quantistica. Alcune delle predizioni più promettenti sono legate al concetto di "schiuma spaziotemporale": un tipo di geometria dello spaziotempo tale che non solo dovremmo trovare la corretta formulazione matematica dei quanti di spaziotempo ma anche esser pronti a gestire la possibilità che nel derivare la sua influenza sulle particelle lo spaziotempo non possa essere gestito come una entità univoca, ma piuttosto come un qualcosa che ha proprietà che fluttuano in maniera caotica, governate esclusivamente da leggi statistiche.

Se si osserva con una buona lente di ingran-

dimento la schiuma che fa il sapone (o anche la schiuma sul cappuccino) si può notare che le bolle si sviluppano e spariscono seguendo comportamenti che individualmente non riusciamo a prevedere, possiamo solo caratterizzarli in modo statistico. Questo è un quadro generale che per certi aspetti è vago ma che poi in alcuni specifici modelli di gravità quantistica viene compiutamente caratterizzato a livello matematico e di predizioni fisiche.

Stabilire le proprietà della schiuma spaziotemporale è difficilissimo perché, come ho già sottolineato, i quanti di spaziotempo sono piccolissimi. Nel 1905 potevamo vedere le molecole d'acqua solo tramite le loro manifestazioni che producono il moto Browniano, ma ora le molecole d'acqua le vediamo proprio, con i nostri attuali potentissimi microscopi. Però siamo comunque lontanissimi dalla possibilità di vedere i quanti di spaziotempo (se davvero sono 10^{-26} volte più piccoli delle molecole d'acqua, come molte analisi suggeriscono). Questo fa sì che l'unica speranza [1,2] di ottenere degli indizi sperimentali sulla gravità quantistica è quella di prendere a modello l'analisi di Einstein del moto Browniano: trovare un qualche meccanismo di amplificazione di una manifestazione della schiuma spaziotemporale, una amplificazione sufficiente a poter trovare traccia di questi effetti piccolissimi in un esperimento realistico. Nel caso del moto Browniano la manifestazione delle molecole d'acqua sono i loro urti con i granelli di polline, mentre l'amplificatore è fornito dal numero elevatissimo di collisioni che anche in una frazione di secondo si verificano tra le molecole d'acqua ed i granelli di polline. L'amplificazione necessaria per studiare la schiuma spaziotemporale deve essere ancora molto più grande, vista la piccolezza dei quanti di spaziotempo.

Arrivati a metà degli anni '90, erano state già analizzate tantissime misure che si possono fare in laboratorio, trovando sempre inevitabilmente che gli effetti della schiuma spaziotemporale erano molto più piccoli di quanto fosse possibile rilevare con la precisione raggiungibile in quegli esperimenti. La svolta che consentì di vedere l'Universo come un (peculiare) laboratorio maturò nel 1997, quando si ebbero [3] alcuni progressi molto significativi in un'area di ricerca apparentemente scollegata dalla gravità quanti-

stica, quella dello studio del fenomeno astrofisico noto come “*gamma-ray bursts*”. I gamma-ray bursts sono potentissime esplosioni, le più potenti che abbiamo osservato nel cosmo, e tipicamente si verificano a distanze grandissime dalla Terra, distanze di miliardi di anni luce. Alcuni gamma-ray bursts hanno durata molto breve, in alcuni casi di circa un secondo. Dal punto di vista spaziotemporale un gamma-ray burst di quel tipo è un segnale stupendo: un enorme numero di fotoni di alte energie che viene emesso quasi simultaneamente e viaggia per miliardi di anni.

Il tipo di manifestazione della schiuma spaziotemporale che si può esplorare con i gamma-ray bursts ha a che fare con il modo in cui i fotoni viaggiano nella schiuma. Nel quadro teorico classico-Einsteiniano lo spaziotempo è descrivibile come una superficie molto ben levigata e le particelle come i fotoni si propagano nello spaziotempo tutte allo stesso modo. Alcuni dei modelli matematici più studiati come formalizzazione del concetto di schiuma spaziotemporale sono tali che invece la propagazione delle particelle risente della struttura quantistica dello spaziotempo in un modo che rassomiglia a quando delle biglie si propagano su una superficie un po' scabra, non ben levigata. Su una superficie scabra anche un gruppo di biglie lanciate simultaneamente e nella stessa direzione faranno un percorso leggermente diverso tra loro, con differenze governate solo da una legge statistica. Ciascuna biglia ha casualmente dei sobbalzi diversi dovuti alla scabrosità della superficie.

L'analisi matematica della sequenza temporale di fotoni osservati da un gamma-ray burst potrebbe essere usata per ottenere delle informazioni sui quanti di spaziotempo. I piccolissimi effetti della schiuma spaziotemporale potrebbero essere osservabili grazie alla amplificazione fornita dai lunghissimi tempi di viaggio. Nella mia analogia delle biglie che viaggiano su una superficie scabra è facile capire che il tempo di viaggio ha il ruolo di amplificatore: più tempo la biglia viaggia sulla superficie scabra più accumula effetti dovuti alla scabrosità della superficie. Purtroppo non è facile fare una stima affidabile su quanto sia probabile la scoperta della schiuma spaziotemporale seguendo questa strategia. La nostra capacità di avere un intuito per questa probabilità di scoperta è limitata dal fatto che esistono

molte descrizioni matematiche alternative della schiuma, con predizioni molto diverse sulla intensità degli effetti, e tutte queste descrizioni alternative paiono essere ugualmente plausibili allo stato attuale. La scoperta dei quanti di spaziotempo tramite osservazioni di gamma-ray bursts sarà possibile nei prossimi 10 o 15 anni solo se la Natura si accorda ai modelli più ottimistici degli effetti in gioco (i modelli matematici della schiuma spaziotemporale che predicono effetti meno piccoli per i gamma-ray bursts). Ed in realtà quanto tempo sarà necessario non dipende solo dalla intensità degli effetti, ma anche da come si comporta il nostro Universo laboratorio.

Quando la fisica fondamentale fa un esperimento in un laboratorio tradizionale tutti gli aspetti dell'esperimento sono pianificati dai fisici, che hanno anche l'opportunità di modificare alcune delle impostazioni della procedura di misura se i primi esiti delle investigazioni incoraggiano tali modifiche. Ma quando il laboratorio è l'Universo ovviamente non abbiamo alcun controllo, non sono misure da noi preparate, siamo piuttosto nella posizione di “pescatori di scienza”: i nostri telescopi sono come canne da pesca, e noi proviamo ad attrezzarci con i migliori telescopi/canne da pesca che siamo in grado di fare, ma se la pesca sarà fruttuosa dipende anche dai pesci, non solo dalle abilità del pescatore e dalla qualità dei suoi attrezzi. Se capita che in zona pesci non ne passano, o passano solo pesci piccoli, la pesca non sarà fortunata. I gamma-ray bursts sono un po' come i pesci, per quanto concerne la gravità quantistica: alcuni gamma-ray bursts sono molto luminosi (e con i loro tanti fotoni possiamo usare potenti metodi di investigazione statistica) ed hanno durata molto breve (avvicinandosi meglio alla idealizzazione di una gara tra fotoni partiti simultaneamente), fornendoci informazioni piuttosto significative per la gravità quantistica, ma molti gamma-ray bursts non sono tanto luminosi ed hanno durata piuttosto lunga (anche centinaia di secondi). Se ad esempio l'Universo laboratorio ci desse una mano con un gamma-ray burst di luminosità record e di brevissima durata si potrebbe avere la scoperta della schiuma spaziotemporale anche immediatamente, ma è piuttosto improbabile.

A volte finisco a pensare al fatto che comunque l'Universo una grande mano già ce l'ha data:

è un Universo vastissimo e quella sua vastità ha reso possibili questi studi. In molti casi il segnale di un gamma-ray burst raggiunge i nostri telescopi dopo un viaggio di oltre 10 miliardi di anni (viaggiati alla velocità della luce!) e per le investigazioni di schiuma spaziotemporale che ho descritto gli effetti in gioco sono così piccoli che un viaggio così lungo ha durata giusto sufficiente a rendere plausibile l'accumulo di effetti di schiuma spaziotemporale a livelli osservabili. Se l'Universo fosse stato più piccolo, ad esempio 100 milioni di anni luce, sarebbe stato comunque vastissimo (grande abbastanza da contenere tantissime galassie) ma non grande abbastanza da consentire queste investigazioni di schiuma spaziotemporale. Se qualcuno mi avesse chiesto di progettare un Universo da usare come laboratorio di gravità quantistica avrei proprio progettato il nostro Universo, almeno nel senso che le sue dimensioni sono giusto quelle necessarie per fare delle investigazioni di schiuma spaziotemporale del tipo che ho descritto.



- [1] G. Amelino-Camelia: *Gravity-wave interferometers as quantum-gravity detectors*, *Nature*, 398 (1999) 216.
- [2] G. Amelino-Camelia: *Quantum theory's last challenge*, *Nature*, 408 (2000) 661.
- [3] G. Amelino-Camelia, J.R. Ellis, N.E. Mavromatos, D.V. Nanopoulos, S. Sarkar: *Tests of quantum gravity from observations of γ -ray bursts*, *Nature*, 393 (1998) 763.



Giovanni Amelino-Camelia: si è laureato in Fisica all'Università Federico II di Napoli nel 1990 e ha acquisito il Dottorato di Ricerca presso la Boston University nel 1994. Attualmente è professore ordinario di fisica teorica alla Federico II. La sua ricerca, che concerne prevalentemente l'investigazione del problema della gravità quantistica, ha prodotto studi che sono stati citati complessivamente oltre 15mila volte, collocandolo tra gli studiosi di gravità quantistica più citati al mondo, ed ha ricevuto riconoscimenti dall'Accademia dei Lincei, dalla Gravity Research Foundation e dal Foundational Questions Institute.