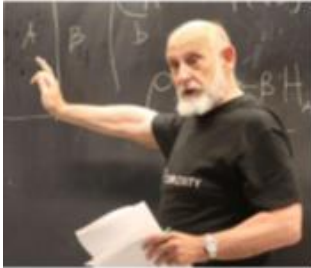


Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica

La lunghissima "battaglia" tra Susskind e Hawking, terminata con la resa del secondo, mi dà modo di trattare delle recenti teorie relative alla cosmologia, scaturite dallo studio buchi neri, che ci offrono una visione del tutto inusuale di cosa possa essere l'universo, lo spazio ed il tempo stesso.



Leonard Susskind



Gerard 't Hooft



Stephen Hawking

Al termine di questa rassegna sarò pronto finalmente ad affrontare un tema che mi sta a cuore: la cosmologia "top down" dell'ultimo Hawking e di Hertog - che ho intervistato sull'argomento all'inizio di questo mese a Genova - ed i recenti sviluppi che la legano

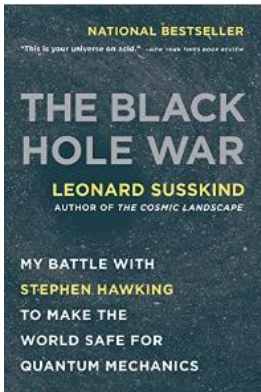
al principio olografico, là dove il tempo risulta una dimensione emergente da un ologramma.

Procediamo nel frattempo con ordine e pazienza.

Parte prima: introduzione.

Leonard Susskind, oltre che ottimo fisico, è persona dotata di grande capacità nel saper suscitare curiosità grazie ad un'attenta scelta dei titoli dei propri articoli e saggi.

Due esempi riportati qui di seguito sembrano infatti tratti da "B movies" Hollywoodiani:

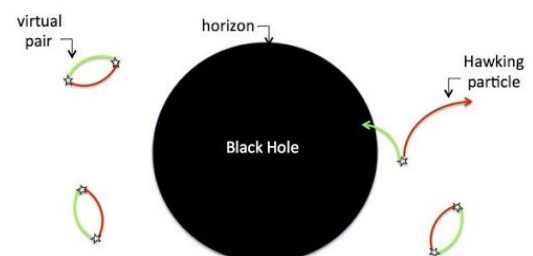


- "The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics" (2008)
- "The Invasion of the Giant Gravitons from Anti-de Sitter Space" (arXiv marzo 2000)

Il primo è il titolo di un libro dove Susskind ricostruisce le vicende del suo lungo scontro con Stephen Hawking iniziato nel lontano 1983.

Durante una riunione tenutasi in una piccola mansarda a San Francisco, Gerardus 't Hooft, un fisico che di lì a poco avrebbe vinto il Nobel, rimane a lungo imbambolato davanti ad una lavagna sulla quale un Hawking sogghignante aveva scarabocchiato alcuni simboli.

Stephen sosteneva infatti di aver dimostrato come l'evaporazione completa di un buco nero, la cui massa si riduce nel tempo in virtù di un meccanismo connesso alla radiazione che porta il suo nome, comporti la perdita definitiva di ogni informazione in esso contenuta: quella relativa al corpo celeste il cui collasso ha dato luogo alla sua esistenza così come quella riguardante tutto ciò che nel tempo ha attraversato il suo orizzonte degli eventi.



La perplessità di 't Hoof nasceva dal fatto che, a differenza della Relatività Generale, la teoria quantistica stabilisce l'informazione non possa mai andar del tutto perduta.

Tale punto di incompatibilità tra le due migliori teorie di cui oggi disponiamo prende il nome di **“paradosso dell'informazione”**, ed ha costituito una sfida per la comunità dei teorici sino ai giorni nostri.

Nel caso il paradosso fosse stato davvero risolto nel modo rivendicato da Hawking l'intera costruzione della teoria dei quanti, che sino a quel momento aveva resistito brillantemente ad ogni verifica sperimentale, sarebbe entrata in crisi con conseguenze molto serie.

Il rischio di una tale evenienza coinvolge infatti una caratteristica fondamentale della scienza: **il determinismo**.

Il determinismo stabilisce che, qualora si possieda un'informazione completa su un qualsiasi sistema, sia possibile predirne l'evoluzione futura così come ricostruirne la storia passata: è il principio in base al quale riteniamo che l'universo si evolva in modo prevedibile **(1)**.

Tutte le leggi note della fisica - anche quelle della MQ - esprimono un'evoluzione deterministica.

Se davvero i buchi neri fossero in grado di distruggere l'informazione, una loro evaporazione completa non lascerebbe alcuna traccia della loro passata esistenza: di conseguenza l'universo risulterebbe imprevedibile e ... addio scienza come la conosciamo!

Per fortuna Stephen Hawking si sbagliava: lo riconoscerà lui stesso vent'anni più tardi, nel 2004, pagando la famosa scommessa a John Preskill (un'enciclopedia del baseball).

Ad oggi siamo sicuri che l'informazione non venga distrutta una volta concluso il processo di evaporazione di un buco nero, tuttavia non abbiamo ancora compreso bene come ciò possa avvenire.



John Preskill

A grandi linee abbiamo tre scenari, ognuno esplorato da varie teorie che vi si rifanno:

1. l'informazione esce in qualche modo dal buco nero prima della sua completa evaporazione;
2. ad un certo punto il collasso del corpo che ha dato origine al buco nero si arresta raggiungendo un nuovo equilibrio là dove la “pressione quantistica” bilancia la gravità, e l'informazione rimane per sempre racchiusa in questa nuova forma;
3. ad un certo punto del collasso avviene la trasformazione del buco nero in qualcosa di diverso: la materia residua e tutta l'informazione ancora in esso contenute iniziano ad uscirne.

Lasciamo da parte per il momento il secondo scenario, che prevede un arresto dell'evaporazione alla scala di Planck con la formazione di “relic” (reliquie) **(2)**, ed il terzo - indagato da Rovelli - stelle di Planck e “buchi bianchi” **(3)**



Ahmed Almheiri

Nel primo scenario, cui appartiene l'ipotesi delle "isole nei buchi neri" sviluppata da Almheiri (4), gioca un ruolo determinante l'**entanglement**, la "spooky action" che aveva sconvolto Einstein e che invece è oggi alla base di molta tecnologia contemporanea (un esempio sono i computer quantistici).

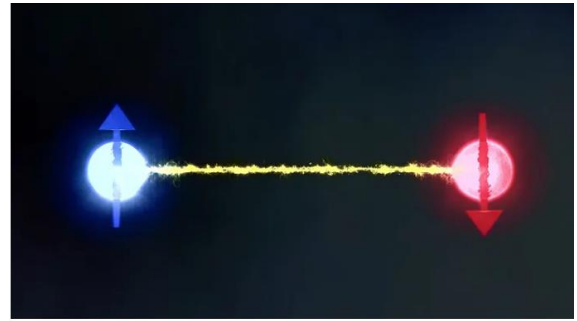
La **radiazione di Hawking**, cui si deve il progressivo "svuotamento" dei buchi neri, viene "estratta" dal **vuoto quantistico** (5).

L'emergere di coppie di particelle - particella ed antiparticella legate in entanglement - in prossimità dell'orizzonte degli eventi, fa sì che talvolta capitino che una di esse attraversi l'orizzonte e l'altra ne rimanga all'esterno, sfuggendo così all'annichilazione e diventando una particella reale.

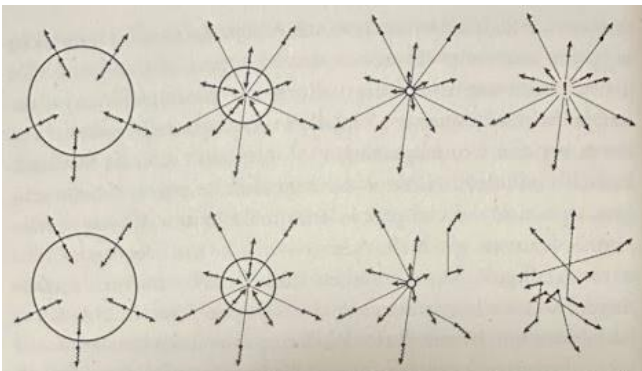
Avremo così due particelle entangled, una nel buco nero e l'altra all'esterno.

L'entanglement può così essere descritto come entanglement tra la radiazione di Hawking esterna al buco nero ed il buco nero stesso.

Con il passare del tempo emerge sempre più radiazione, e sempre più particelle della radiazione diventano entangled con il buco nero.



Una rappresentazione artistica del fenomeno quantistico dell'entanglement. Quando due particelle sono correlate da entanglement, la misurazione degli stati di una delle due (p.es. lo spin) determina che gli stati dell'altra abbiano un valore complementare. Questa misteriosa correlazione agisce qualsiasi sia la distanza che separa le due particelle



Entanglement tra radiazione di Hawking e un buco nero. In alto, come vanno le cose secondo l'originario calcolo di Hawking, in cui l'informazione va perduta. L'entanglement tra la radiazione e il buco aumenta continuamente, il che causa un rompicapo quando alla fine il buco scompare (in alto a destra). In basso, come vanno le cose se l'informazione non va perduta. L'entanglement tra il buco e la radiazione diventa lentamente entanglement soltanto all'interno della radiazione.

Nello stesso tempo succede che, a causa della radiazione di Hawking, la massa del buco nero si riduca fino a scomparire (6): viene così a mancare uno dei due elementi che risultano in entanglement.

Ciò con cui la radiazione di Hawking era entangled non esiste più, e quanto rimane del primo elemento è qualcosa di simile "al suono di una sola mano che applaude".

Diretta conseguenza di tale fatto è la violazione delle regole della Meccanica Quantistica: un sistema entangled dispone infatti di una ricca struttura che codifica l'informazione nelle correlazioni tra le parti del sistema (7), che si

viene a perdere qualora l'entanglement venga spezzato.

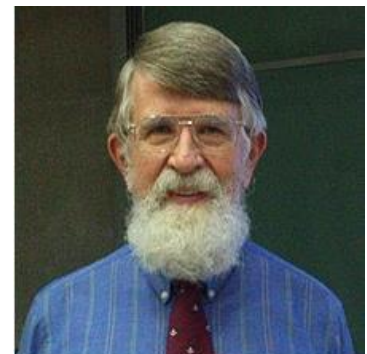
Ecco qui il motivo che portò Gerardus 't Hooft ad indugiare per più di un'ora davanti ai segni lasciati sulla lavagna da Hawking.

Nel 1993 Don Page notò che il paradosso si manifesta ben prima della completa evaporazione del buco nero: esattamente nei pressi della metà della vita del buco nero.

Vediamone il motivo.

Abbiamo affermato che buco nero e radiazione di Hawking sono un unico sistema entangled.

Via via che la radiazione viene emessa, il buco nero si contrae con il risultato che sempre più (radiazione) diventa entangled con sempre meno (il buco nero che si contrae).



Don Page

Si arriva al punto che il buco nero contratto non ha più la capacità di sostenere l'entanglement con la radiazione emessa: succede quando il buco nero arriva circa a metà della propria vita.

Un'analogia per capire il punto di vista di Page.

Immaginiamo che la scatola contenente le tessere di un puzzle sia il buco nero, mentre il tavolo su cui ci accingiamo a ricostruirlo sia lo spazio all'esterno del suo orizzonte.



L'informazione sia invece l'immagine che ci restituisce il puzzle una volta completato.

La radiazione di Hawking è la nostra mano che prende a caso una tessera alla volta e la dispone su un tavolo.

Sino a quando sul tavolo ci sono solo pochi pezzi non possiamo immaginare che facciano parte di un sistema più grande, correlato e ricco di informazioni (siano cioè entangled con quelli ancora nella scatola).

Questo numero limitato di pezzi può esser organizzato in un certo numero di disposizioni (ottenibile togliendo

da **n!** il numero di configurazioni non permesse dovute al fatto che alcuni pezzi combaciano e quindi non si devono disporre altrimenti).

Un tale metodo presenta una certa somiglianza con quello utilizzato per calcolare l'entropia di un gas secondo Boltzmann (che conteggia le disposizioni degli atomi), l'entropia termica.

Mano a mano che i pezzi del puzzle sono trasferiti sul tavolo, aumenta il numero di possibili disposizioni, ma ad un certo punto intervengono dei vincoli: alcuni pezzi cominciano a combaciare e dunque le possibili disposizioni delle tessere iniziano a diminuire sino a quando l'ultima tessera potrà esser messa in una sola posizione.

C'è perciò un punto oltre il quale aggiungere altri pezzi porta ad una diminuzione del numero di possibili disposizioni.

Page definisce "**entropia di entanglement**" il numero di possibili disposizioni delle tessere del puzzle tenendo conto del fatto che alcune di esse combaciano tra loro.

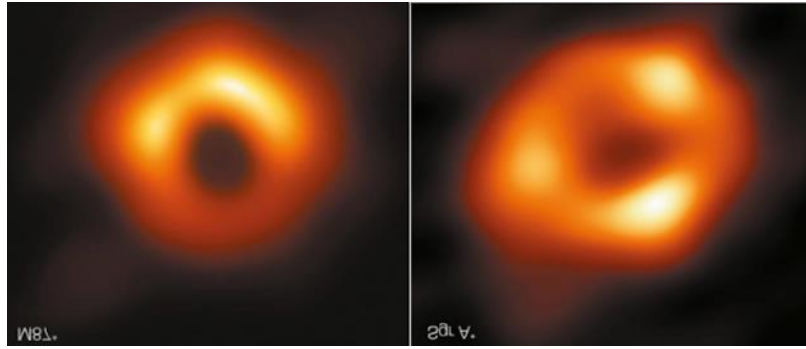


Mentre l'entropia termica può solo aumentare al passare del tempo, questo secondo tipo di entropia disegna una curva a forma di collina.

Viene chiamata **entropia di entanglement** perché tale quantità misura quanto sono "entangled" i pezzi nella scatola con quelli sul tavolo: zero prima di iniziare ad estrarli, in aumento man mano che vengono trasferiti sul tavolo, in diminuzione quando oltre la metà di essi sono già sul tavolo, zero quando sono tutti sul tavolo.

L'informazione (l'immagine che risulta dal puzzle completato) è in un posto unico solo prima di iniziare il trasferimento e al termine di questo: durante il trasferimento risulta condivisa (entangled) tra due "luoghi" diversi.

Il massimo di entanglement si registra quando circa metà delle tessere sono sul tavolo (valore massimo dell'entropia di entanglement a metà del tempo necessario al trasferimento delle tessere).



Sostituiamo la scatola con il buco nero e la nostra mano con la radiazione di Hawking e constatiamo come il “tempo di Page”, cioè il momento in cui le tessere sul tavolo sono più di quelle nella

scatola, indichi il momento in cui la radiazione comincia a portare con sé una parte significativa dell’informazione (cioè il momento in cui possiamo iniziare a decodificare l’informazione ivi contenuta).

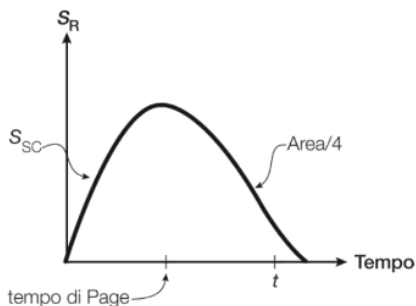
Le argomentazioni di Page rendono evidente che un processo di evaporazione di un buco nero che conservi l’informazione debba seguire la curva a collina che porta il suo nome e non la curva sempre crescente che deriva dal calcolo originario di Hawking.

Se la radiazione è termica, come accade sino al raggiungimento del tempo di Page, l’entropia di entanglement è identica all’entropia termica: non ci sono correlazioni visibili e nella (sola) radiazione non è contenuta alcuna informazione.

Superato invece il tempo di Page appaiono le correlazioni, e la radiazione si arricchisce progressivamente di informazione.



La curva di Page (in nero). La figura mostra anche il risultato di Bekenstein-Hawking per l’entropia di un buco nero (linea punteggiata) e il risultato di Hawking per l’entropia della radiazione (linea tratteggiata).



L’entropia di entanglement della radiazione R secondo la formula dell’isola. È significativo che abbia la medesima forma della curva di Page

Ora il tempo di Page corrisponde all’incirca alla metà della vita di un buco nero, che può anche superare i 100^{100} anni: questo significa che compaiono correlazioni tra particelle la cui emissione potrebbe esser separata da questo immenso periodo!

Una riflessione sul fatto che spazio e tempo possano non esser quel che sembrano è a questo punto indispensabile.

Con la nostra panoramica siamo giunti all’inizio del nuovo millennio e mancano solo quattro anni alla resa di Hawking.

Il calcolo più avanzato all’epoca era ancora quello di Hawking che non si accorda con quello di Page.

La sfida è costruire la **curva di Page** con le leggi note della fisica, senza invocare un “deus ex machina” in azione nei pressi dell’orizzonte degli eventi.

(continua)

Note:

(1) Non è questa la sede, ma tratterò in un altro post la cosmologia “top down” (di Hawking ed Hertog) che invece ipotizza un periodo della storia dell’universo, subito successivo al big bang, durante il quale le leggi della fisica si sono coevolute assieme all’universo da esse governato.

Subendo esse stesse una sorta di selezione naturale, simile a quella che ha dato luogo all’albero della vita in biologia, viene introdotto un elemento di casualità che scombina le previsioni.

(2) Barrow, Copeland e Liddle “[the cosmology of black hole relic](#)”, mar 1992.

Lehmann, Johnson, Profumo e Schwberger hanno pubblicato su Arxiv “[Direct detection of primordial black holes relics as dark matter](#)”, jun 2019

(3) Argomento sul quale ho già scritto diversi post; l’ultimo lo scorso 27 marzo intitolato “[Grappoli di buchi bianchi o modifica della RG?](#)”

(4) Vedi il mio post del 9 dicembre 2022 “[Isole nei buchi neri: è stato davvero risolto il paradosso dell'informazione?](#)”

(5) Il **vuoto quantistico** non assomiglia per nulla al concetto di vuoto che abbiamo in mente: per prima cosa è tutto meno che vuoto (misuriamo infatti una “energia del vuoto”), ed è fortemente “entangled”.

La misura in cui il vuoto è entangled è espressa dal **teorema di Rech-Schlieder**, che afferma sia possibile operare su una certa piccola regione del vuoto in modo tale che qualunque cosa possa essere creata in qualsiasi posto dell’universo.

Nella pratica non saremo mai in grado di poterlo fare, tuttavia il teorema dimostra che il vuoto possiede una tale capacità di codifica.

La radiazione di Hawking è un prodotto dell’entanglement del vuoto.

(6) Perché la radiazione di Hawking riduce la massa del buco nero.

Possiamo descrivere questo fenomeno nel modo seguente: una fluttuazione del vuoto produce una coppia particella-antiparticella che sopravvive per un istante brevissimo prima di ricombinarsi (processo di annichilazione).

Una delle due particelle può esser descritta come dotata di energia negativa, in modo tale da porre uguale a zero la somma dell’energia delle due particelle.

Ora per capire come le fluttuazioni in prossimità dell’orizzonte sottraggano energia (e quindi massa) al buco nero facciamo un’analogia.

Quando “accendiamo” un tubo a neon gli atomi del gas in esso contenuti ricevono energia, ed i loro elettroni vanno ad occupare livelli energetici più elevati rispetto allo stato fondamentale.

Questo “salto verso l’alto” dura un istante dopodiché gli elettroni ritornano ai livelli inferiori emettendo fotoni (la luce che vediamo emessa dai tubi al neon) che portano via l’energia precedentemente fornita al gas.

La ragione per cui gli elettroni ricadono subito dopo il salto nei livelli energetici inferiori dell’atomo sta nel fatto che le fluttuazioni del vuoto “stimolano” l’atomo stesso provocando l’emissione di luce.

In un modo del tutto simile le fluttuazioni del vuoto stimolano il buco nero facendogli perdere energia con l’emissione di particelle.

Attenzione!

La descrizione del processo grazie al quale viene generata la radiazione di Hawking ed il buco nero perde massa, presente nell’articolo del 1975 di Hawking, è diversa, di carattere “euristico”.

L’autore ci invita ad immaginare una coppia di particelle generate da una fluttuazione del vuoto (particelle “virtuali”) in prossimità dell’orizzonte degli eventi.

Può accadere che una particella non si ricombini con la propria partner perché quella dotata di energia negativa viene a trovarsi all’interno dell’orizzonte dove continua ad esistere sino all’incontro con la singolarità.

La ragione per cui sia possibile l’esistenza di particelle ad energia negativa all’interno dell’orizzonte è legata al fatto che in quel luogo spazio e tempo si scambiano i ruoli.

Al di fuori di questo non esistono particelle reali (cioè con una durata di vita misurabile) ad energia negativa: le coppie generate dalle fluttuazioni del vuoto quantistico immediatamente si ricombinano con la controparte e spariscono.

Possiamo interpretare l’energia negativa che si accumula all’interno del buco nero come una “compensazione” della sua massa (positiva) che così si riduce progressivamente in concomitanza con l’emissione della radiazione.

Le particelle positive “orfane” che hanno evitato la ricombinazione possono cadere nel buco nero, ma una parte di loro riesce a sfuggire e a dar luogo alla radiazione di Hawking.

Hawking precisa poi che l’immagine da lui fornita di tale processo non sia da intendere come argomentazione rigorosa: la giustificazione reale dell’emissione termica è soltanto nella sua derivazione matematica.

(7) L’entanglement è una proprietà tangibile del mondo, pur se contro intuitiva perché non ha corrispettivo nella nostra esperienza quotidiana.

È un tipo di correlazione tra due o più cose inesplicabile in termini di logica classica.

Gli oggetti entangled “avvertono” la reciproca influenza istantaneamente perché dovrebbero esser considerati realmente come un unico sistema connesso, indipendentemente dalla loro distanza.

Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica

Parte seconda: complementarità e principio olografico.

Nel precedente post siamo arrivati all'anno 2000 con il calcolo dell'entropia di un buco nero di Hawking - sempre crescente - che non si concilia con la curva a collina di Page che garantirebbe la sopravvivenza dell'informazione relativa a tutto quanto caduto in un buco nero ed al corpo che gli ha dato origine con il suo collasso.

Nonostante tutti gli sforzi profusi non si trova un errore nel calcolo di Hawking che permetta di risolvere il paradosso dell'informazione (vedi post precedente).

Una svolta parte da lontano...

All'inizio degli anni '90 Gerardus 't Hooft e Leonard Susskind svilupparono un'intuizione che sarà poi nota come "**complementarità del buco nero**" (8)

Nella nota 6 del post precedente abbiamo affermato che i buchi neri si comportano come gli atomi poiché emettono radiazione in seguito alla stimolazione da parte del vuoto (9)

In realtà c'è una profonda differenza tra l'emissione di fotoni da parte di oggetti caldi e la radiazione di Hawking rilasciata dai buchi neri: nel secondo caso sono infatti gli effetti gravitazionali a render reali le fluttuazioni del vuoto, e tale meccanismo produce tre proprietà (attribuite alla radiazione di Hawking) che, prese insieme, appaiono inconciliabili:

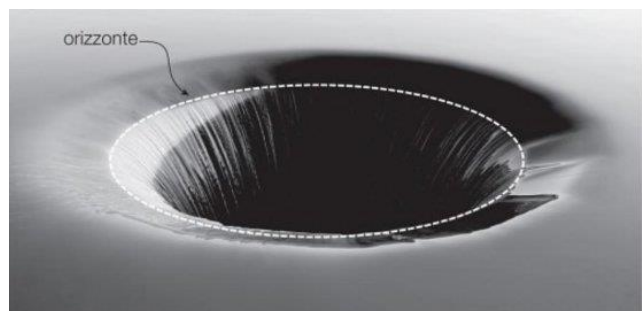


1. Per il principio di equivalenza di Einstein, un osservatore in caduta libera che attraversi l'orizzonte di un buco nero abbastanza grande (se di piccola taglia verrà invece distrutto prima dalle forze mareali) non se ne accorgerebbe, fino a quando, nel suo futuro, verrà spaghetificato avvicinandosi alla singolarità.

Nessuna radiazione in prossimità dell'orizzonte verrà quindi da lui percepita.

2. Un osservatore che voglia fermarsi appena al di sopra dell'orizzonte (accelerando per evitare di esser trascinato verso il buco nero, come farebbe un'imbarcazione avvicinandosi al bordo superiore di una cascata per sfuggire alla corrente che si fa via via più impetuosa) dal suo punto di vista sarà bombardato da tutte le particelle reali (con energia positiva) della radiazione di Hawking (10).

Quanto più sarà vicino all'orizzonte, tanto più la spinta necessaria a contrastare la gravità del buco nero sarà intensa, e così il flusso di particelle reali (con energia positiva) che lo investe: l'osservatore verrà quindi bruciato da un flusso di radiazioni caldissime.





3. Un osservatore in caduta libera molto distante dall'orizzonte e dal buco nero registra invece una radiazione fredda (alla temperatura di Hawking). Possiamo farci un'idea di come si manifesti tale radiazione da un punto di vista molto lontano pensando alle forze gravitazionali di marea. Le maree sulla Terra sono determinate dalla differenza tra l'attrazione gravitazionale della Luna in due posti diversi, e si avvertono solo se

questi sono molto lontani (niente maree nella vasca da bagno!).

Così la radiazione di Hawking si produce perché l'attrazione gravitazionale del buco nero varia da un capo all'altro di una fluttuazione del vuoto: tale fluttuazione deve risultare abbastanza grande da rendere reali le particelle, e cioè esser estesa approssimativamente sulle dimensioni del buco nero. Un osservatore molto distante percepirà dunque un flusso di particelle a grande lunghezza d'onda (cioè a bassa energia).

Ciascuna di queste tre esperienze è una descrizione legittima di quanto accade, ma da un diverso punto di vista:

- un osservatore in caduta libera verso un buco nero (abbastanza grande) ne attraversa l'orizzonte senza accorgersene, e solo quando arriva vicino alla singolarità si troverà spaghetificato;
- un osservatore posto a grande distanza vedrà invece il primo ridursi in cenere per effetto della radiazione di Hawking appena prima che questi attraversi l'orizzonte.

Due storie diverse che, secondo il **principio di complementarità**, non sono in contraddizione: il motivo sta nel fatto che, una volta attraversato l'orizzonte, l'osservatore caduto nel buco nero non può più comunicare con qualcuno che ne sia all'esterno.

Nessun osservatore può cioè essere testimone di entrambi gli eventi **(11)**.

L'informazione per l'osservatore esterno non attraverserà mai l'orizzonte (risolvendo così il paradosso che la riguarda), ma esiste anche un altro punto di vista, altrettanto valido, secondo il quale essa invece cade nel buco nero con il primo osservatore.

Il principio di complementarità ci dice in pratica che quanto accade all'interno dell'orizzonte sia una descrizione della realtà fisica altrettanto valida quanto quella di ciò che accade al suo esterno: le due descrizioni sono rappresentazioni equivalenti della medesima fisica.

Come dire che **l'interno di un buco nero risulti in qualche modo «identico» al suo esterno**.

Abbiamo così introdotto una nuova idea della fisica, battezzata "**principio olografico**", che comporta conseguenze rilevanti e rappresenta una "chiave di volta" per l'interpretazione della realtà (ne tratterò in modo diffuso nella terza parte di questo post).

Esclusa la possibilità che l'orizzonte possa in qualche modo "creare una copia" di ciò che vi cade dentro cosicché l'originale bruci appena al suo esterno e la copia venga in seguito spaghetificata al suo interno (un evento proibito dal "**teorema di non clonazione**" della fisica quantistica), non rimane che accettare l'olografia se non vogliamo esser costretti a rinunciare o alla Relatività Generale oppure alla Teoria Quantistica **(12)**.

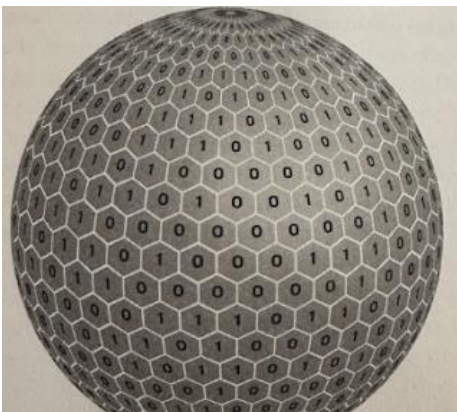
L'olografia dello spazio tempo fu proposta inizialmente da 't Hooft nel 1993 e sviluppata l'anno successivo da Susskind.

Nata in relazione allo studio dei buchi neri, si propone oggi quale caratteristica universale della natura: il principio olografico arriva a supporre che l'universo intero, quale lo percepiamo, sia in realtà un ologramma.

Nella nostra quotidiana esperienza un ologramma è una rappresentazione di un oggetto tridimensionale costruita utilizzando un'informazione immagazzinata su una superficie bidimensionale: l'informazione, stimolata da un mezzo (la luce laser), "fa emergere" una dimensione aggiuntiva.

Sappiamo, dal calcolo dell'entropia di Bekenstein **(13)**, che un buco nero è l'oggetto con la massima densità di informazione possibile, e che la quantità di quest'ultima è proporzionale all'area della superficie del suo orizzonte e non al suo volume **(14)**.

Quindi ne consegue che all'interno di qualunque regione dello spazio non ci possa stare più informazione di quanta ne sia codificabile sul contorno della stessa regione.



't Hooft e Susskind giunsero pertanto ad affermare che il contenuto d'informazione di una qualunque regione dello spazio sia codificato sul suo contorno.

Un osservatore vicino ad un buco nero ne può esplorare il contorno sotto forma della membrana infuocata prossima all'orizzonte degli eventi, ma qualora si trovi invece a grande distanza non potrebbe aver accesso a questa informazione codificata olograficamente in quanto risulta impossibile «ritagliare un pezzo di spazio vuoto» per svelare che l'informazione contenuta all'interno è codificata sulla sua superficie.

L'olografia è quindi un esempio perfetto di complementarità in azione: due descrizioni, una sul contorno di qualunque regione data dello spazio, l'altra nello spazio interno al contorno.

Di conseguenza la nostra esperienza ed esistenza può essere descritta con assoluta fedeltà in termini di informazione archiviata su un contorno lontano, la cui natura ancora non comprendiamo bene.

Ma nel 1997 ...

(continua)

Note:

(8) Vedi: "the stretched horizon and black hole complementarity" (Physical Review 1993) e "the black hole interpretation of string theory" (Nuclear Physics 1990).

(9) L'esempio riportato era quello relativo ai tubi al neon ed agli atomi contenuti.

Ricevendo energia, i loro elettroni vanno ad occupare livelli energetici più elevati rispetto allo stato fondamentale, ma dopo un istante ritornano ai livelli inferiori emettendo fotoni (la luce che vediamo emessa dai tubi al neon) che portano via l'energia precedentemente fornita al gas.

(10) Sul numero di ottobre 2023 di Le Scienze, l'articolo a firma di Manon Bischoff (vedi pag. 50 "Particelle dal nulla") tratta dell'effetto Davies-Unruh, scoperto negli anni 70, che è molto simile a quello che ho descritto.

In una regione di spazio tempo piana, lontano da ogni corpo celeste, un'astronave accelera e sperimenterà un bagno termico di particelle la cui temperatura è proporzionale all'intensità dell'accelerazione.

Per il principio di equivalenza la stessa cosa succede ad un corpo accelerato per resistere all'attrazione gravitazionale di un buco nero.

Poiché nelle immediate vicinanze dell'orizzonte la velocità "di fuga" è prossima a quella della luce, il corpo verrà vaporizzato.

(11) L'obiezione secondo la quale il secondo osservatore fuori dal buco nero potrebbe raccogliere le prove della riduzione in cenere del primo, attraversare a sua volta l'orizzonte, raggiungerlo ed informarlo su ciò che ha visto - creando così una situazione inconciliabile tra RG e MQ - è stata smontata in quanto, per compiere tutte queste azioni, è necessario del tempo.

Tempo durante il quale il primo osservatore, caduto nel buco nero, è giunto nei pressi della singolarità ed è stato spaghetificato dalle forze mareali.

(12) L'ipotesi AMPS.

In realtà c'è ancora una possibilità: che il buco nero non abbia un interno e che Einstein si sia sbagliato.

Tale prospettiva fu indagata nel 2013 da "AMPS", acronimo per Almheiri Marolf Polchonski e Sully, che pubblicarono un articolo su ArXiv il 13 luglio 2012 intitolato "Black Holes: complementarity or firewalls?".

Il ragionamento seguito (un esperimento mentale) parte dall'assunzione che l'informazione venga trasferita alla radiazione di Hawking dopo il tempo di Page, cioè all'incirca superata la metà della vita del buco nero (quando la sua massa si è oramai dimezzata).

Ho allegato un'immagine a questo post per meglio spiegare la logica di AMPS.

Le particelle virtuali create dal vuoto quantistico sono sempre in entanglement tra di loro: prendiamone una coppia formata dalle particelle A e B.

La radiazione di Hawking consiste nella particella A sfuggita all'orizzonte che tuttavia rimane legata in entanglement con la B che ora è nel buco nero.

Secondo il calcolo originale di Hawking: l'entanglement tra le particelle della radiazione ed il buco nero aumenta sempre al passare del tempo sino a quando il buco nero evapora completamente e l'entanglement "scompare": l'informazione è persa per sempre.

Per superare il paradosso che comporta la perdita dell'informazione, abbiamo sostenuto che successivamente al tempo di Page le particelle della radiazione di Hawking divengano sempre più entangled tra di loro: in pratica stiamo dicendo che la particella B, creatasi quando il buco nero era giovane e sfuggita all'orizzonte (ma ancora in entanglement con la A al suo interno), diventi ora entangled con una particella D (appartenente alla coppia C e D) sfuggita all'orizzonte DOPO il tempo di Page.

Quindi B sarebbe entangled contemporaneamente con il buco nero (dove è caduta A) e con un'altra

particella della radiazione di Hawking (D, appena sfuggita all'orizzonte).

Ma questa situazione non può verificarsi perché la teoria quantistica stabilisce che "l'entanglement sia monogamo", e cioè che se una particella è già entangled con una seconda, non possa esserlo contemporaneamente con una terza (che tra l'altro risulterebbe creata dal vuoto quantistico miliardi di anni dopo la creazione delle prime due!).

La possibilità che DOPO il tempo di Page la particella B, ora in entanglement con D, abbia perso l'entanglement con la A (immaginiamo un osservatore che, quando il buco nero ha superato la mezz'età, attraversi l'orizzonte e scopra che A non è più entangled con B) comporta conseguenze drammatiche: distruggere l'entanglement nel vuoto ha un costo elevatissimo in termini di energia necessaria, in quanto equivale ad una lacerazione dello spazio vuoto.

Si creerebbe pertanto un firewall intorno all'orizzonte che provocherebbe la distruzione dello spazio interno all'orizzonte: l'interno del buco nero cesserebbe del tutto di esistere.

Si potrebbe obiettare che ci si trovi in una condizione simile a quella che abbiamo esaminato in precedenza (dove un osservatore attraversa senza accorgersene l'orizzonte di un buco nero ed in seguito viene spaghetificato quando incontra la singolarità, mentre un secondo osservatore, distante, lo vede bruciare prima di aver attraversato l'orizzonte), e quindi invocare la complementarità degli orizzonti per risolvere anche questa contraddizione.

La differenza qui sta nel tempo a disposizione: nel caso richiamato in precedenza l'osservatore all'esterno non ha modo di comunicare con quello che per primo ha attraversato l'orizzonte, perché quand'anche questi si lasciasse cadere nel buco nero dopo aver raccolto le prove dell'incenerimento del primo "tuffatore" a causa della radiazione di Hawking, l'altro sarebbe già stato spaghetificato dalla singolarità.

Invece in questo caso l'osservatore esterno avrebbe a disposizione un sacco di tempo per rilevare l'entanglement B con D e poi attraversare l'orizzonte dove il primo confermerebbe di aver visto l'entanglement A con B oltre l'orizzonte nell'atto stesso di attraversarlo.

Secondo AMPS sorgerebbe pertanto una contraddizione che mette in discussione l'esistenza dell'interno di un buco nero:

"... La complementarità richiederebbe troppo entanglement per preservare l'informazione e l'integrità del vuoto quantistico oltre l'orizzonte: buco nero e radiazione di Hawking dovrebbero trovarsi in uno stato quantico impossibile (dopo il tempo di Page) esigendo che codifichino più informazione di quanta il sistema ne possa fisicamente sopportare ..."

Interviene l'olografia a salvare "capra e cavoli": siccome l'interno del buco nero è in relazione di dualità con l'esterno, la radiazione di Hawking quando il buco nero è giovane (B) e le particelle cadute nel buco nero (A) sono in realtà la stessa cosa; il firewall viene così evitato.

(13) Beckenstein, per salvare il secondo principio della termodinamica, ipotizzò che i buchi neri dovessero avere un'entropia proporzionale all'area dell'orizzonte, e con un calcolo ingegnoso ne ricavò il valore.

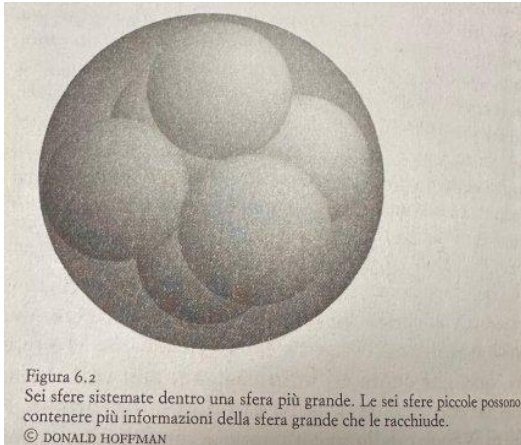
immaginò di far cadere un singolo bit di informazione oltre l'orizzonte: un fotone, particella priva di massa che immaginiamo dotato di rotazione in senso orario oppure in senso antiorario (0/1).

Il fotone trasferisce al buco nero una quantità di energia inversamente proporzionale alla sua lunghezza d'onda.

Poiché la posizione di un fotone non può esser risolta su distanze minori della sua lunghezza d'onda, il fotone che cade nel buco nero deve avere una lunghezza d'onda minore o uguale al raggio di

Schwarzschild (altrimenti resterebbe al di fuori dell'orizzonte).

Il calcolo restituisce il numero massimo di fotoni N che un buco nero può contenere, che risulta pari all'area dell'orizzonte moltiplicata per il quadrato della lunghezza di Planck.



Il significato è che l'entropia di un buco nero e cioè il numero totale di bit di informazione che nasconde al suo interno - risulta calcolabile tassellando la superficie del suo orizzonte con pixels della dimensione della lunghezza di Planck, ipotizzando che ciascuno di essi possa contenere soltanto un singolo bit.

Conseguenza di tale assunzione è curiosa.

Lasciamo cadere nel buco nero un oggetto a bassa entropia: per obbedire al secondo principio della termodinamica l'entropia del buco nero aumenta di misura pari all'entropia dell'oggetto inghiottito. L'area dell'orizzonte aumenta, ma solo in proporzione alla massa dell'oggetto (l'area dell'orizzonte è infatti proporzionale alla sola massa del buco nero).

Cosa succede lasciando cadere un oggetto di pari massa ma di entropia elevata?

In base a quanto affermato, l'aumento di area dell'orizzonte sarà la stessa che nel caso precedente. Questo significa che ogni volta che aumenta la massa del buco nero, la sua entropia aumenta della massima quantità possibile.

Quindi un buco nero presenta la massima entropia possibile: immagazzina cioè in una data regione dello spazio la massima quantità di informazione, data dall'area della superficie della regione misurata in unità di Planck.

Ne consegue l'evidenza contro intuitiva che "tutto ciò che esiste in un certo volume di spazio può esser descritto completamente da informazione localizzata su una superficie che circonda la regione": è il principio olografico.

(14) Sembra un qualcosa di contro intuitivo, ma possiamo fare un esempio pratico.

Prendiamo una sfera cava e procediamo ad inserire al suo interno 3 sfere più piccole in modo che la loro dimensione sia la massima possibile compatibilmente con le pareti interne della prima.

Sicuramente il volume della sfera più grande è maggiore della somma di quello delle tre contenute al suo interno, ma non così la superficie!

Sommando le superfici delle 3 sfere interne possiamo ottenere un valore più grande di quella della sfera esterna.

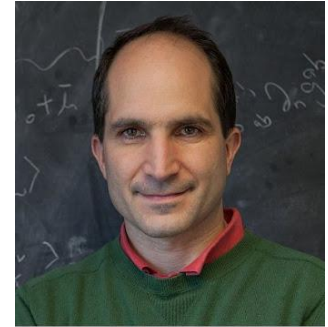
Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica

Parte terza: Maldacena e la corrispondenza AdS/CFT.

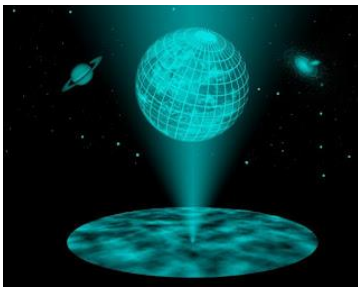
Nel 1997 il fisico argentino Juan Maldacena pubblica l'articolo "[The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity](#)", oggi in testa alla classifica che registra il numero di citazioni per ogni articolo scientifico: ben 18.000!!!

E' interessante notare come tale articolo, che negli anni a venire fornirà prove convincenti a sostegno dell'idea che il principio olografico sia vero, non era stato scritto per "sponsorizzare" l'olografia.

L'universo modello che Maldacena vi descrive è decisamente diverso dal nostro: è molto più semplice ed è costruito adoperando una geometria iperbolica.



Juan Maldacena

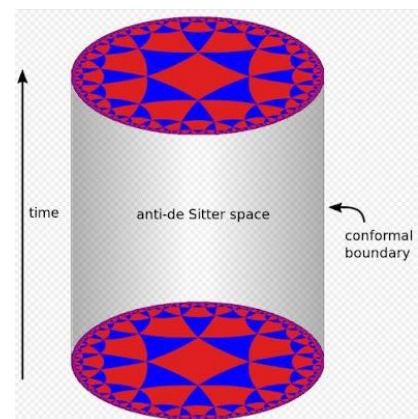


L'olografia risulta piuttosto una proprietà emergente dalla matematica di quest'ultimo.

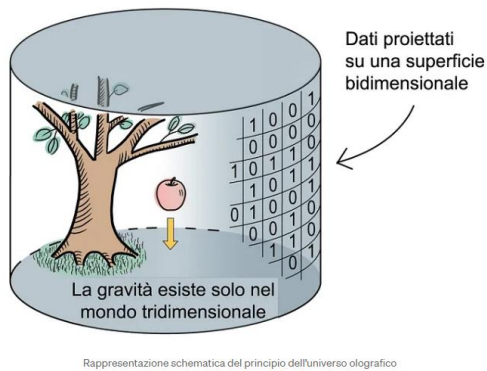
Nella sua forma originale, il calcolo di Maldacena era stato condotto nell'ambito della teoria delle stringhe con uno spaziotempo a dieci dimensioni, cinque delle quali dimensioni spaziali avvolte su sé stesse, che residuavano uno spazio iperbolico pentadimensionale con un contorno quadridimensionale (15).

Per renderci conto dell'importanza del risultato di Maldacena possiamo descriverne un esempio semplificato: una serie di "**dischi di Poincaré**" - proiezioni bidimensionali di uno spazio iperbolico 3d di cui rappresentazione in nota (16) - impilati l'uno sull'altro partendo dal basso: ognuno di essi rappresenta la configurazione dell'universo ad un certo istante, e muovendoci verso l'alto andiamo dal passato verso il futuro.

Questo tipo di spazio tempo è chiamato "**anti de Sitter**" (AdS), e possiamo immaginarlo come una lattina (un cilindro) con una superficie esterna di contorno (bidimensionale) ed un volume interno (uno spazio 3d).



Maldacena dimostrò come una particolare teoria senza gravità (una teoria quantistica), definita completamente sul contorno del cilindro, sia esattamente equivalente ad una differente teoria che includa la gravità (Relatività Generale), definita nello spaziotempo interno.



L'interno si presenta dunque come una proiezione olografica della superficie di contorno, e la gravità consisterebbe quindi in una proprietà che emerge nello spazio 3d dall'ologramma 2d presente sulla superficie di contorno (che ne è priva).

Le equazioni scritte da Maldacena dimostrano, per questo universo modello, l'esatta corrispondenza "1:1" tra i punti della superficie di contorno e quelli dello spazio 3d all'interno: una realizzazione concreta del principio olografico.

A tale corrispondenza è stato dato il nome di "**AdS/ CFT**", dove AdS sta per "**spazio anti de Sitter**" e CFT sta per "**conformal field theory**" e cioè "teoria di campo conforme" (17).

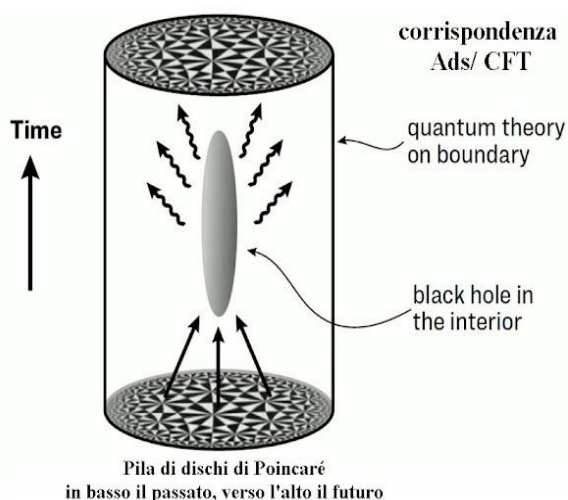
CFT è riferita ad una teoria quantistica (quindi priva di gravità) - dove troviamo particelle, entanglement ed uno stato di vuoto - che descrive un sistema fisico interamente localizzato sulla superficie del cilindro.

Immaginiamo un gas di particelle che si muovono in tutte le direzioni.

Se il sistema quantistico sulla superficie di contorno è in uno stato di puro vuoto, non ci sono particelle e lo spazio tempo interno è semplicemente l'AdS.

Se nel modello inseriamo alcune particelle sulla superficie di contorno per formare un gas, incredibilmente risulta la comparsa di un buco nero all'interno del cilindro.

Nell'immagine qui sotto a sinistra - ricavata dalle slide di una conferenza sull'argomento tenuta da Brian Cox il mese di novembre 2023 a Genova -, partendo dal basso verso l'alto, distinguiamo:



- un fascio di frecce che converge in un punto: rappresentano un grumo di materia soggetta a collasso;
- la comparsa del buco nero, un punto che si allarga mano a mano che procediamo verso l'alto (il futuro) sino a raggiungere una dimensione massima, la sezione circolare di quello strano "fuso" in piedi, circa a metà del cilindro;
- la sua riduzione di massa: dopo aver raggiunto una circonferenza massima, procedendo verso l'alto il cerchio si stringe fino a

tornare un punto;

- la sua scomparsa che lascia una nuvola di particelle: le linee a zigzag rappresentano la radiazione di Hawking.

Possiamo quindi affermare che il processo di formazione ed evaporazione di un buco nero nello spazio all'interno del cilindro (AdS) possiede anche una "**descrizione duale**" in termini della teoria

senza gravità (le teorie quantistiche ad oggi non includono la gravità) esistente sulla sua superficie: e questo sta a significare che la gravità, nello spazio interno al cilindro, emerge come effetto della meccanica quantistica di un sistema sul contorno.

Esistono quindi due descrizioni equivalenti della realtà, e poiché sono equivalenti non sono in contraddizione: quello che scopriamo esser vero in una lo sarà pure nell'altra.

Maldacena ha fornito una precisa realizzazione matematica della potenza insita nel principio olografico: nell'ultimo quarto di secolo molti problemi complicati, rinvenuti in una delle due aree, sono stati risolti utilizzando metodi propri dell'altra.

Questa nuova tecnica è molto promettente e, come vedremo in dettaglio nel post che pubblicherò sulla cosmologia top down, porterà addirittura all'ipotesi che il tempo sia esso stesso una dimensione aggiuntiva che emerge dall'ologramma sulla superficie di contorno grazie all'entanglement; così come la profondità è la dimensione aggiuntiva fornita ai nostri ologrammi bidimensionali grazie alla luce laser che li colpisce.

Ma rimaniamo sull'argomento di questo post, la soluzione del paradosso dell'informazione: **la corrispondenza AdS/CFT dimostra come l'informazione debba necessariamente uscire dal buco nero.**

Guardando cosa succede all'esterno del cilindro, intuiamo come l'intero processo possa esser descritto come un gas di particelle che evolve secondo le leggi ordinarie della meccanica quantistica sul contorno, in assenza di gravità.

La matematica di Maldacena dimostra esserci una **corrispondenza diretta tra la teoria sul contorno e quella nell'interno**: dunque se l'informazione viene conservata in una delle due teorie necessariamente deve essere conservata anche nell'altra.

Poiché la teoria sul contorno è una teoria quantistica pura, sappiamo che essa prevede la conservazione dell'informazione: di conseguenza anche i processi gravitazionali all'interno del cilindro (ricordiamo che la gravità risulta emergente) devono prevedere una sua conservazione durante sia la formazione che l'evaporazione di un buco nero.

Tale argomentazione convincerà in via definitiva Hawking del fatto di essere in torto; si innamorerà del principio olografico a tal punto da riporvi la speranza di ottenere una verifica, in un futuro non lontano, della propria teoria, la cosmologia top down.

Siamo finalmente al 2004 e la cornice è il Convegno sulla Relatività di Dublino.



Preskill e Hawking

Stephen Hawking ammette pubblicamente di aver perso la scommessa con John Preskill ed accetta il fatto che l'informazione possa riemergere dai buchi neri, lasciando così Kip Thorne da solo a sostenere che il paradosso dell'informazione reggeva ancora.

Consegna al vincitore la posta in gioco, una copia dell'enciclopedia "Total Baseball: the ultimate Baseball encyclopedia" accompagnando l'atto con il seguente commento: "è un'opera che contiene un sacco di informazioni".

Il vero motivo per cui Hawking accetta la propria sconfitta è un altro, e mi è stato raccontato un mese fa a Genova da Thomas Hertog, collaboratore di Hawking sino alla sua morte e cofondatore della cosmologia top down, nei seguenti termini:

"... ragionando sull'olografia, Stephen si rese conto che la superficie dell'ologramma codifica non soltanto una singola geometria interna curva, quanto piuttosto una mescolanza di forme di spazio tempo: la superficie di contorno delimita cioè più di un singolo interno! ..."

Si tratta di un aspetto del principio olografico ancora poco compreso: la dualità olografica si inserisce in una visione quantistica radicale sulla gravità alla Feynman.

"... a un qualche livello, la gravità non coinvolge soltanto una singola geometria spaziotemporale, ma una sovrapposizione di geometrie differenti, incoraggiandoci a pensare l'interno dell'AdS come una funzione d'onda e non come un singolo spaziotempo ..."

Con questo Hawking ed Hertog intendono dire che esistono più storie in sovrapposizione che portano all' "adesso" che noi sperimentiamo **(18)**.

E così infatti Hawking si rivolse al pubblico della conferenza di Dublino:

"... Se affermiamo che un buco nero sia descritto dalla geometria di Schwarzschild, sorge il problema della perdita dell'informazione.

Tuttavia l'informazione riguardo allo stato esatto è preservata in una geometria differente.

La confusione e il paradosso sorgono perché noi pensiamo classicamente, nei termini di un singolo spaziotempo oggettivo.

La somma sulle geometrie di Feynman, però, consente ci siano due geometrie assieme ...".

Prosegue Hertog:

"Nella dimostrazione originale dell'esistenza di una radiazione che porta il suo nome, Hawking aveva assunto che essa si muovesse nello spaziotempo del buco nero, vale a dire la geometria incurvata identificata da Schwarzschild nel 1916, e questa assunzione preclude la possibilità che, sul lungo periodo, entri in gioco una forma di spazio interamente nuova.

Dopo trent'anni si ricrede ed afferma che quando i buchi neri invecchiano gran parte delle informazioni riguardo essi stessi e la loro storia non siano più immagazzinate nella loro geometria originaria, ma in uno spaziotempo del tutto differente".

Hawking si rende conto di aver sbagliato là dove aveva assunto che lo spazio tempo fosse qualcosa di dato: una singola geometria invece che una somma di geometrie interne, cosa che costituisce un pensiero puramente quantistico.

Pardosso risolto?

In molti si resero quasi subito conto che l'affermazione di Hawking non identificava in quale forma curva potesse essere conservato il passato di un vecchio buco nero; addirittura Hawking suggerì, scorrettamente, che la semplice possibilità che all'inizio non fosse presente un buco nero bastasse a risolvere il paradosso.

Nessuno era stato infatti in grado di spiegare "come" uscisse l'informazione dal buco nero, tanto meno lui.

Per una soluzione al paradosso dell'informazione bisognerà aspettare ancora qualche anno dopo la sua morte.



Geoff Penington



Ahmed Almheiri



Netta Engelhardt



Donald MAROLF



Henry Maxfield

Nel 2019 un gruppo di giovani fisici - Geoff Penington, Ahmed Almheiri, Netta Engelhardt, Donald Marolf ed Henry Maxfield - ripartiranno da un'idea sviluppata da John Archibald Wheeler nel 1955, e cioè la possibile esistenza di uno «spazio moltepliciamente connesso», ciò che oggi chiamiamo **"wormhole"**.

Con questo nome indichiamo una "forma di spazio esotica", un ponte geometrico che collega luoghi o momenti dello spaziotempo

altrimenti lontanissimi.

I calcoli che stavano conducendo indicavano come la lenta ma progressiva accumulazione di particelle irradiate possa col tempo attivare nella sovrapposizione di Feynman la geometria latente di un wormhole, creando così una sorta di tunnel geometrico attraverso la regione dell'orizzonte utilizzabile dall'informazione contenuta al suo interno per uscire.

L'ipotesi avanzata è che la radiazione remota sfrutti il fenomeno quantistico dell'entanglement, di cui abbiamo già parlato.

L'accumularsi di entanglement ad un certo punto crea spontaneamente wormholes attraverso i quali l'informazione conservata all'interno del buco nero riesce a sfuggire.

E l'entanglement, come vedremo nell'ultima parte di questo post, si rivelerà elemento chiave nel funzionamento generale degli ologrammi di Maldacena: la presenza di particelle entangled sulla superficie di contorno "incurva" lo spazio tempo all'interno dello spazio AdS, e si presenta dunque come il motore centrale che genera la gravità e lo spaziotempo curvo nella fisica olografica.

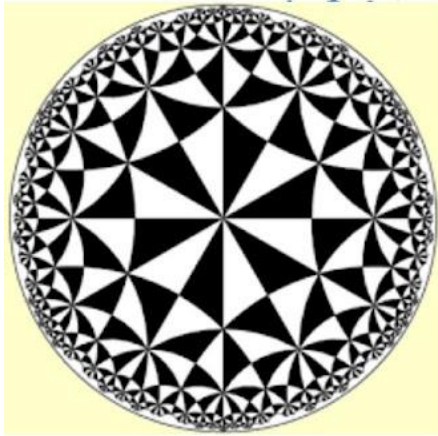
La Relatività Generale di Einstein risulta quindi emergere dall'entanglement collettivo di una miriade di particelle quantistiche che si muovono su una superficie con meno dimensioni.

(continua)

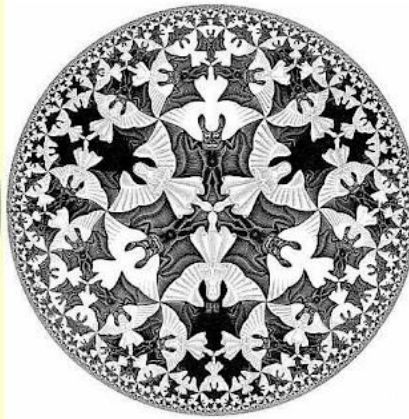
Note:

(15) In seguito sono stati proposti molti altri esempi del principio olografico che coinvolgevano un numero minore di dimensioni spaziotemporali.

(16) un disco di Poincaré si può pensare come la proiezione bidimensionale di una cupola vista dall'alto che viene tassellata con piastrelle della stessa dimensione a partire dal suo culmine; mano a mano che ci si allontana dal centro le dimensioni delle piastrelle sembrano diminuire (per l'effetto prospettico) fino a che il loro numero per disegnare una circonferenza vicino al bordo del disco diventa infinito.



Disco di Poincaré



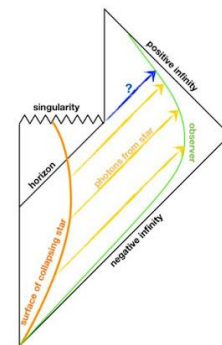
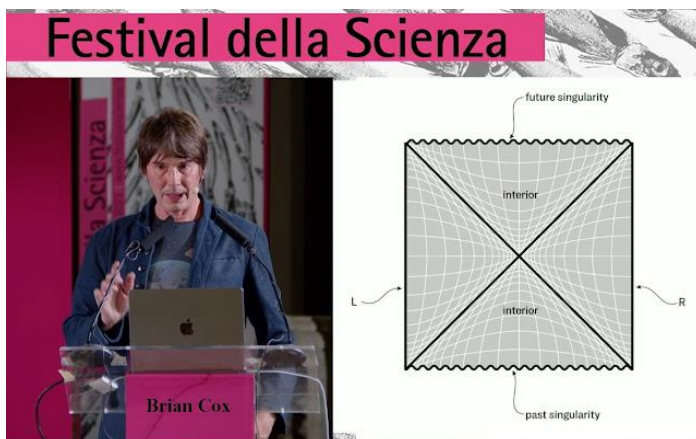
Opera di Escher

Lo spazio rappresentato in tale proiezione è infatti infinito; tale proiezione risulta poi conforme in quanto le forme delle piastrelle più piccole sono riprodotte fedelmente.

L'artista Maurits Escher ha creato una collezione di rappresentazioni di tale disco usando diverse forme (vedi ad es. "Limite del cerchio I").

(17) Le CFT rappresentano una classe di teorie quantistiche dei campi che sono del tutto simili a quelle correntemente usate per costruire i modelli della fisica delle particelle: quella usata in origine da Maldacena è analoga alla QCD, la cromodinamica quantistica che descrive l'interazione forte tra quark e gluoni, ed è stata usata con successo per fare predizioni nella QCD, utilizzando la teoria duale della gravità.

(18) Lasciamo al successivo post sulla cosmologia top down la spiegazione di questo aspetto.



Un cosiddetto "Diagramma di Penrose" che i fisici teorici usano quotidianamente per studiare la fisica dei buchi neri e cercare di risolvere il Paradosso dell'informazione

Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica

Parte quarta: Entanglement e codice sorgente dello spazio tempo.

Abbiamo concluso il precedente post suggerendo l'idea che lo spazio non sia fondamentale ma emerga dalla teoria quantistica: la sfuggente "gravità quantistica" potrebbe risolversi in una meccanica quantistica da cui emerge la gravità.

Hawking nel 2004 ha riconosciuto che il calcolo relativo alla radiazione che porta il suo nome, e che prevedeva la perdita dell'informazione quantistica relativa a tutto quanto attraversi l'orizzonte degli eventi, era da qualche parte sbagliato: ma dove?

Bisognerà aspettare ancora un decennio per iniziare a capirlo.

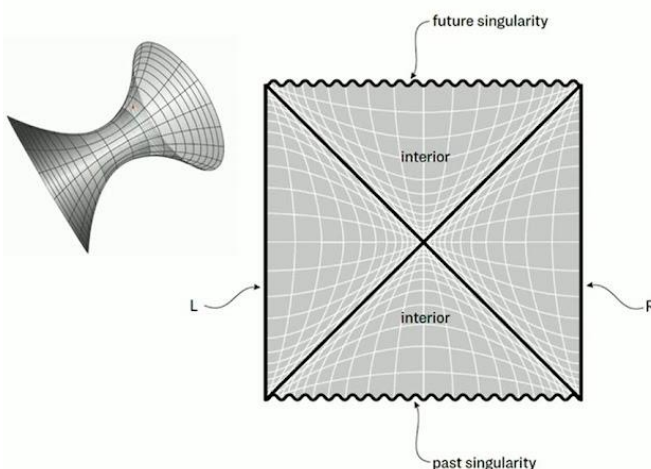
Nel frattempo alla Relatività Generale ed alla teoria quantistica abbiamo visto essersi aggiunto un nuovo formidabile strumento che inizia a produrre risultati: la **teoria olografica**, che è emersa dalla corrispondenza **Ads / CFT**, una dualità scoperta da Juan Maldacena negli ultimissimi anni del secolo scorso facendo uso della matematica utilizzata nell'ambito della teoria delle stringhe **(19)**.

Si applica ad un tipo di universo diverso dal nostro, dotato di 5 dimensioni e caratterizzato da una **curvatura AntiDeSitter** (un tipo speciale di spazio tempo della Relatività Generale con una curvatura iperbolica).

La **Teoria di Campo Conforme (CFT)** è invece un tipo di teoria quantistica ben nota dove la gravità - che Einstein ci insegna emergere dalla curvatura dello spazio - è assente, e sua caratteristica è la presenza di una dimensione in meno.

La CFT - quadridimensionale - codifica tutto ciò che riguarda lo spazio AdS a 5 dimensioni cui è associata: l'intera regione dello spazio tempo risulta cioè composta dalle interazioni tra gli elementi del sistema quantistico nella CFT.

Ma cosa genera la dimensione in più?



Nel 2006, sempre nell'ambito della teoria olografica, **Shinsei Ryu e Tadashi Takayanagi** pubblicano un articolo all'interno del quale verrà formulata una congettura divenuta in seguito nota con le lettere iniziali dei cognomi dei due fisici: la **"congettura RT"**.

Tale congettura, procedendo dalla corrispondenza **Ads / CFT**, permette di calcolare la connessione tra "entanglement quantistico" e "geometria dello spazio tempo" **(20)**.

L'**entanglement quantistico** è quella "spooky action" che aveva turbato Einstein: una connessione a lunga distanza tra oggetti, che correla istantaneamente il loro comportamento "in modi statisticamente improbabili".

Spendiamo qualche riga su questa caratteristica fondamentale della fisica quantistica.

Un modo per figurarci l'entanglement tra due particelle è immaginare di disporre di due monete dotate di una caratteristica particolare: il risultato del lancio di una delle due (Testa o Croce) viene sempre replicato dal lancio dell'altra, ovunque essa si trovi.

Sappiamo dall'esperienza che il lancio di due monete può fornire quattro diversi risultati: TT, TC, CT e CC.

Nel caso specifico di queste monete particolari, se otteniamo T dal lancio della prima sappiamo per certo che otterremo T dal lancio della seconda, indipendentemente dalla distanza a cui le due monete si trovino.

Con "modi statisticamente improbabili" si intende il fatto che, invece di avere (a priori) quattro risultati possibili, ne avremmo solo due: TT oppure CC.

La Meccanica Quantistica rende cioè possibile un nuovo grado di correlazione, più elevato rispetto a quello cui siamo abituati "nel macromondo": ci informa pure del fatto che, quando due oggetti qualunque interagiscono, generalmente entrano in entanglement e vi rimangono finché restano isolati dal resto del mondo, non importa la misura della distanza con cui vengano in seguito separati.

La distanza non conta! (ecco il principio di non località che inquietava Einstein).

Ryu e Takayanagi intuirono come **l'entanglement possa costituire ciò che genera la distanza nello spazio tempo**: due regioni di spazio vicine sul lato AdS della dualità - sostenevano - corrispondono a due componenti quantistiche "altamente entangled" della CFT.

Dunque, più grande è l'entanglement tra particelle sulla superficie di confine (lato CFT) più vicine risultano le regioni dello spazio interno (AdS).

Se la distanza emerge dall'entanglement non dovremmo più stupirci della caratteristica che aveva turbato Einstein.

Nel 2019 due gruppi di fisici teorici - il primo aveva come portavoce Netta Engelhardt, l'altro Mark Van Raamsdonk - derivano un'idea rivoluzionaria: l'emersione dello spaziotempo sul lato AdS ad opera dell'entanglement quantistico sul lato CFT non riguarda solo il caso dei buchi neri ma l'universo intero.

"... Così come una nube di vapor acqueo con densità ridotta non permette di usare le equazioni dell'idrodinamica - che tuttavia diventano determinanti non appena essa si condensa in una pozza di liquido - nello stesso modo nell'ambito di una CFT con sottosistemi quantistici, ciascuno con campi e particelle senza alcun entanglement, la descrizione AdS equivalente vedrebbe un sistema senza spazio tempo.

Tuttavia non appena l'entanglement dal lato della CFT aumenta, l'entropia di entanglement dei sottosistemi quantistici inizia a corrispondere a frammenti di spaziotempo che emergono nella descrizione AdS.

Inizialmente questi frammenti risultano fisicamente scollegati tra loro - non c'è nessuna possibilità di "spostarsi" da un frammento ad un altro, sono universi diversi privi di connessioni, che tuttavia è possibile descrivere con la Relatività Generale -, ma mano a mano che facciamo aumentare

l'entanglement dei sottosistemi quantistici nella CFT, nell'AdS i frammenti dello spaziotempo iniziano a connettersi e ci si ritrova con un volume connesso di spaziotempo.

Ecco che lo spazio tempo si presenta come una rappresentazione geometrica dell'entanglement: nessun entanglement -> niente spaziotempo.

Quindi lo spazio tempo potrebbe consistere in una proprietà emergente di una parte della natura sottostante e ingarbugliata ...

... se lo spaziotempo emerge dal grado e dalla natura dell'entanglement in un sistema quantistico a bassa dimensione, significa che il sistema quantistico è più 'reale' dello spaziotempo in cui viviamo, così come una cartolina bidimensionale risulta più reale dell'ologramma tridimensionale che crea..."

Riferendoci ad un universo con curvatura AdS, qualora le particelle presenti sulla superficie di confine non siano entangled tra di loro, esso risulta privo di spazio tempo.

Lo spazio tempo compare soltanto quando le particelle sulla superficie esterna diventano entangled: all'aumentare dell'entanglement, diverse regioni di spazio tempo prima disconnesse iniziano a connettersi.

Viceversa, al diminuire dell'entanglement, le regioni connesse si separano diventando disconnesse.

Nello stesso anno altri due gruppi di ricercatori riescono indipendentemente a ricavare la curva di Page avvalendosi di fisica "old style", e cioè utilizzando soltanto la Relatività Generale e la Meccanica Quantistica (21).

I calcoli da loro svolti dimostrano che la radiazione di Hawking lontana dall'orizzonte e quella interna all'orizzonte sono in realtà due versioni della stessa cosa, confermando così l'idea olografica di cui abbiamo già trattato.

La novità che appare nell'articolo pubblicato è invece la scoperta che un buco nero con un'età maggiore del tempo di Page (quando cioè ha perso oltre la metà della sua massa per effetto della radiazione di Hawking) si trovi nella condizione in cui parte del suo interno sia in realtà già all'esterno dell'orizzonte.

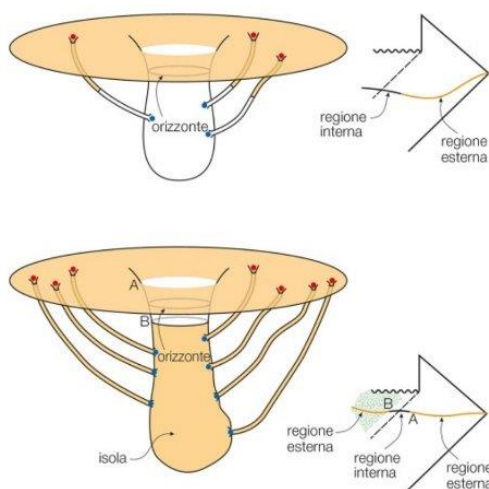


Illustrazione di come funziona l'idea dell'isola. Essa convalida sia l'idea ER = EPR sia la congettura di Ryu-Takayanagi. Per un buco nero vecchio (in basso), la maggior parte dell'«interno» del buco è fuori. In entrambe le immagini l'esterno è ombreggiato.

Le implicazioni di questa identità "interno-esterno" sono ancora in parte da comprendere, ma sappiamo che le congetture "RT" ed "ER=EPR" vi svolgono un ruolo importante (22).

Gli autori dell'articolo identificano una regione interna all'orizzonte degli eventi che viene chiamata "isola", la cui ubicazione è determinata dalla quantità di radiazione di Hawking che un osservatore, lontano ma a distanza fissa dal buco nero, sia in grado di raccogliere.

Se il tempo della raccolta è inferiore a quello di Page, l'isola semplicemente non esiste; trascorso il tempo di Page essa compare.

L'isola è delimitata da una superficie sferica chiamata **QES** (Quantum Extremal Surface), o "Superficie Quantica Estremale".

Risulta, dai calcoli svolti, come l'**entropia di entanglement** (S_r) sia direttamente proporzionale sia ad una porzione dell'**area della QES** (area $QES/4$) che all'**entropia di entanglement della radiazione di Hawking** (S_{sc}), quest'ultima ricavata includendo nel calcolo le particelle partner all'interno dell'isola (delle quali il calcolo originale di Hawking non aveva tenuto conto) **(21)**.

Sino a quando almeno la metà della radiazione di Hawking non sia stata emessa, il valore ottenuto dalla nuova formula è identico a quello ottenuto con il conteggio originale (l'entropia cresce sempre): infatti il primo termine dell'addizione è pari a zero (l'isola non esiste ancora).

Trascorso il tempo di Page tuttavia compare l'isola con la sua QES vicina all'orizzonte: le particelle di Hawking presenti all'interno dell'isola risultano "riunite" ai loro partner esterni, e dunque il loro contributo congiunto all'entropia di entanglement si annulla: l'entropia inizia così a diminuire.

Mentre prima del tempo di Page è il secondo termine della somma a determinare l'entropia di entanglement (S_{sc}), in seguito prevale il primo, e cioè l'area della QES / 4.

Riducendosi l'area dell'orizzonte a causa dell'evaporazione del buco nero, altrettanto fa la QES sino ad annullarsi con la completa scomparsa dell'orizzonte.

Rimane da spiegare come faccia l'informazione ad uscire dal buco nero.

Entrano in gioco le congetture **RT** e **ER=EPR**.

La formula relativa all'entropia di entanglement della radiazione di Hawking e quella di Ryu-Takayanagi presentano un alto grado di somiglianza: sembrerebbe esista una connessione tra entanglement e geometria.

La congettura **ER=EPR** afferma infatti che **si possa descrivere l'entanglement tra due particelle qualsiasi** - non necessariamente facenti parte della radiazione di Hawking - **come se fossero entrambe collegate da un wormhole**.

Nel caso di un buco nero, le particelle partner della radiazione di Hawking presenti all'interno sono connesse alla controparte all'esterno dell'orizzonte da minuscoli wormholes.

Considerando l'interno di tali wormholes, diventa difficile definire quale sia lo spazio esterno e quale l'interno di un buco nero: dovremmo riuscire a tracciare nel cunicolo una linea di demarcazione.

Cosa che permette la congettura RT, una volta trovata la superficie di area minima che divide le due regioni.

Quando il buco nero è giovane, l'area minima si ottiene tagliando i wormholes al loro centro.

Quando invece è superato il tempo di Page sono presenti moltissimi wormholes, e sappiamo che la superficie di RT risulta pari alla QES, la "Superficie Quantica Estremale".

Nell'immagine (anche questa ricavata dalla conferenza tenuta da Brian Cox a Genova) vediamo come in quest'ultimo caso l'interno del buco nero sia da considerare al suo esterno.

La singolarità che ne occupava il centro sembra sostituita da una rete quantistica di wormholes che connettono all'esterno.

L'astronauta che attraversa senza alcuna conseguenza l'orizzonte non avrebbe l'incontro con la singolarità distruttiva nel suo futuro, ma si imbatterebbe prima o poi in una rete di wormholes: verrebbe sì disintegrato dalla gravità mareale, ma l'informazione quantistica di cui è composto in un secondo tempo riemergerebbe attraverso questi wormholes, impressa nella radiazione di Hawking.

Rimane ancora un ultimo punto importante di questa lunga digressione: se l'universo così come lo percepiamo è un ologramma con una dimensione in meno codificato su una superficie esterna, ed è l'entanglement a far emergere lo spazio tempo (così come la luce laser fa emergere una terza dimensione spaziale negli ologrammi bidimensionali di uso comune), cosa rende "robusto" lo spazio impedendo che vada in pezzi, ed in che modo?

Dobbiamo cioè trattare del "codice sorgente" dello spazio tempo.

(continua)

Note:

(19) In realtà il "principio olografico" era già stato formulato a proposito dei buchi neri qualche anno prima da 't Hooft e Susskind.

I due, senza molto successo presso la comunità dei fisici, sostenevano che "le proprietà di una regione dello spazio possano esser completamente codificate dalla sua frontiera", e cioè che la superficie bidimensionale di un buco nero contenga tutte le informazioni necessarie per sapere cosa ci sia al suo interno, che di dimensioni spaziali ne possiede tre.

(20) La congettura Ryu-Takayanagi (RT) del 2006 è una delle idee centrali emerse dall'olografia; la sua validità è già stata dimostrata in parecchi scenari (vedi "Aspects of Holographic Entanglement Entropy", Journal of High Energy Physics, Ryu S. e Takayanagi T.).

Permette il calcolo della connessione tra entanglement quantistico e geometria dello spaziotempo.

Sfruttando la dualità AdS/CFT stabilisce infatti una connessione tra due numeri:

- Il primo numero riguarda un tipo speciale di superficie nel volume dello spazio tempo descritto dalla AdS: la "**superficie estemale**", cioè il confine intorno al buco nero dove lo spazio tempo passa da una curvatura debole ad una forte.
- Il secondo, relativo al sistema quantistico descritto dalla CFT, riguarda "**l'entropia di entanglement**", la misura cioè di quanto una parte del sistema quantistico sia interconnessa con il resto.

La congettura RT ha dimostrato che l'area della **Superficie Estemale** di un buco nero nell'AdS è legata all'entropia di entanglement del sistema quantistico nella CFT.

(21) Vedi "The Entropy of Bulk: Quantum Fields and the Entanglement Wedge of an Evaporating Black Hole", Almheiri A., Engelhardt N., Marolf D. e Maxfield H.

(22): La congettura "**ER= EPR**" sta per "Einstein Rosenberg = Einstein Podolsky Rosen", un'eguaglianza porposta nel 2013 da Juan Maldacena e Leonard Susskind dove:

ER si riferisce al ponte di Einstein Rosenberg, ciò che oggi è universalmente noto con il termine di "wormhole";

EPR è invece l'analisi condotta da Einstein, Podolsky e Rosen con cui cercarono di farsi una ragione dell'entanglement quantistico.

Secondo gli autori di tale congettura: "... un qualunque sistema correlato secondo EPR deve esser connesso da un qualche genere di ponte ER, anche se questo potrebbe essere un oggetto altamente quantistico ancora da definire ..."

"... congetturiamo che anche il più semplice stato di singoletto di due spin sia connesso da un ponte decisamente quantistico di questo tipo ..."

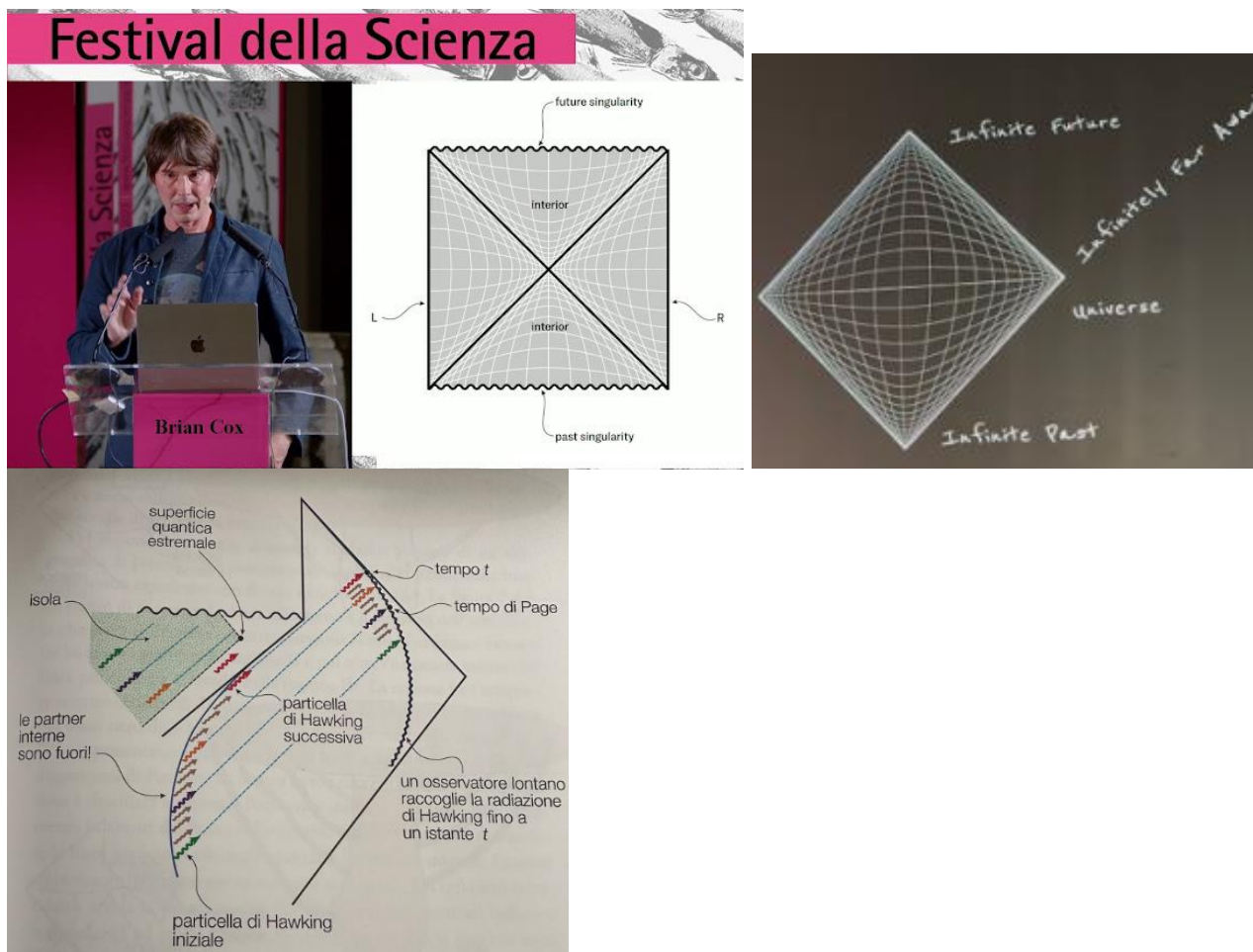
(23) Ecco la formula calcolata nel 2019 per l'**entropia di entanglement**:

$$S_r = (\text{area della QES} / 4) + S_{sc}$$

dove:

S_r = entropia di entanglement

S_{sc} = l'entropia di entanglement della radiazione di Hawking che include nel conto le particelle partner all'interno dell'isola



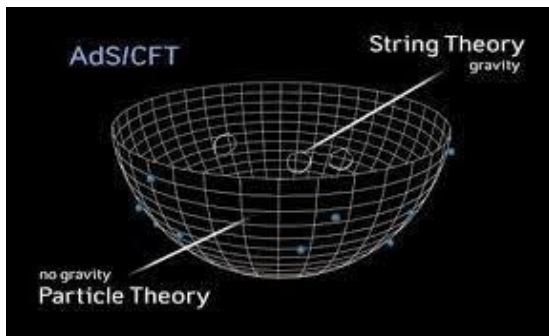
Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica

Parte quinta: l'universo è un computer quantistico? Il codice sorgente dello spaziotempo.

Nella parte precedente abbiamo visto come l'entanglement sembri esser responsabile della creazione di ciò che percepiamo come spazio, e contribuisca a renderlo "robusto" (evitare cioè che lo spazio tempo vada in pezzi disgregandosi in sottoregioni separate) pur essendo costituito a partire da elementi quantistici fragili.

Secondo Susskind "... l'entanglement è alla base della struttura dello spazio stesso, formando ordito e trama che generano la geometria del mondo .."

"... se si potesse distruggere l'entanglement tra due parti di spazio, quest'ultimo andrebbe in pezzi **DIS-EMERGENDO** ..." (con questo neologismo intende l'operazione contraria rispetto all'emergere).



Sua opinione è che non sia necessario spiegare in modo quantistico la deformazione dello spazio (gravità quantistica) perché è lo spazio ad emergere da un fenomeno fondamentalmente quantistico.

Finora abbiamo parlato solo di spazio e non di spaziotempo, ma sappiamo dalla Relatività che il tempo è strettamente legato allo spazio: quindi se lo spazio emerge dall'entanglement, anche il tempo deve emergere esso stesso in qualche modo.

Questa asserzione ci lascia disorientati con domande tipo:

- come è possibile che esistano oggetti in entanglement senza che questi stessi "siano da qualche parte"?
- come possono trovarsi in entanglement senza che subiscano gli effetti del tempo e del cambiamento? (come lo sono diventati, in entanglement, senza un tempo che scorra?)
- che tipo di esistenza può avere una cosa qualsiasi se non si trova immersa in uno spazio ed un tempo?

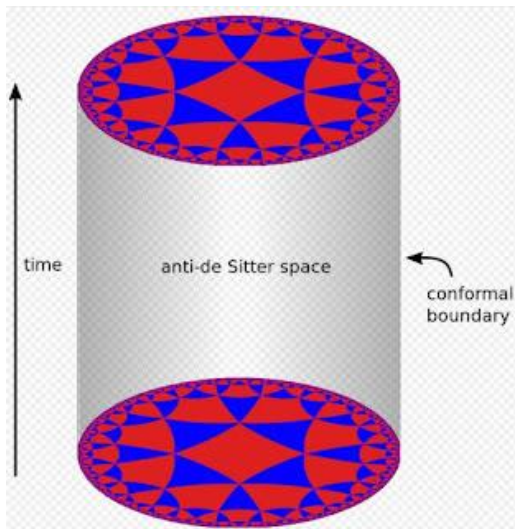
Il filosofo della scienza Christian Wuethrich a questo proposito prova a ribaltare i concetti a noi consueti:

*"... spazio e tempo potrebbero emergere da elementi che noi (erroneamente) riteniamo residenti nell'universo, e cioè la materia e l'energia: oggi diamo per scontato che l'esistenza dello **spazio** e del **tempo** preceda quella della **materia**, ma potrebbe non esser così.*

L'esistenza di qualcosa di materiale potrebbe invece essere condizione necessaria perché emergano spazio e tempo: questi risulterebbero ancora in stretta connessione (Relatività Generale) ma in ordine opposto rispetto a quanto abbiamo pensato sinora ..." (24)

Per correttezza, prima di proseguire, è opportuno rilevare come esistano altre interpretazioni ed opinioni in merito al significato del principio olografico, riassunte nella seguente nota (25).

Torniamo ora a parlare di entanglement e dell'uso di questa proprietà degli oggetti quantistici nell'ambito della tecnologia contemporanea.



Negli attuali computer quantistici l'entanglement è il mezzo attraverso il quale l'informazione viene codificata “**in modo solido**”, così da esser “resiliente ai fattori ambientali”.

L'entanglement tra due particelle permane sino a che il sistema da esse costituito non venga perturbato dall'interazione con “qualcos'altro”.

Questo è il motivo principale per cui si rivela così complicato costruire computer quantistici, all'interno dei quali i **qubits (26)** devono esser conservati a temperature vicine allo zero K ed in un ambiente privo di particelle libere di muoversi ed interagire: bisogna evitare infatti che i qubits, in entanglement tra di loro, diventino entangled con l'ambiente circostante.

Poiché l'isolamento perfetto non esiste, è importante trovare un modo efficace per proteggere i qubits più importanti dall'ambiente, cosicché l'informazione in essi contenuta sia difficile da distruggere: è questo che si intende quando parliamo di “**correzione degli errori quantistici**”.

Mentre la correzione degli errori classici si ottiene con la ridondanza delle informazioni memorizzate - ad esempio un codice QR codifica diverse copie dell'informazione che vuole conservare in diversi luoghi al suo interno, così che se una parte del codice risulti rovinata sia comunque possibile decodificarne il contenuto -, nel caso dell'informazione quantistica il **principio di non clonazione** (ne abbiamo già trattato a proposito del paradosso dell'informazione relativamente ai buchi neri) impedisce la realizzazione di una o più copie.

E' pertanto necessario individuare un “circuit quantistico” che codifichi l'informazione importante, in modo ridondante ma **SENZA** copiatura, così che risulti anche “robusto” rispetto alle possibili interazioni con l'ambiente.

La soluzione individuata è stata quella di criptare l'informazione in modo che venga in un certo senso “tenuta segreta” all'ambiente.

Gli ingegneri che progettano computer quantistici devono cioè trovare dispositivi compatti per codificare un gruppo di qubits all'interno di un blocco più ampio, così che quelli che davvero interessino risultino protetti anche nel caso i qubits più esterni vengano danneggiati da interazioni con l'ambiente.

Si tratta di trovare una combinazione ottimale di “ridondanza e segretezza” (27).

Oggi molti teorici ritengono che lo spazio sia intessuto di entanglement quantistico in modo simile a come vengono connessi i qubits per costruire computer quantistici: una nuova congettura vede un legame tra calcolo quantistico e struttura della realtà.

Ritengono lo spaziotempo un codice quantistico, e ricercano il codice sorgente dello spazio tempo nell'ologramma a dimensioni inferiori: l'universo sarebbe pertanto un “processore informatico quantistico”.

Nel 2015 Ahmed Almheiri, Xi Dong e Daniel Harlow evidenziarono un legame tra la corrispondenza **AdS/CFT** e la correzione degli errori quantistici **(28)**.

Trattando dell'olografia abbiamo visto come il contorno codifichi lo spazio interno; la novità scoperta è che lo fa utilizzando una combinazione di ridondanza e segretezza, così che risulti possibile cancellare parte del contorno senza che venga persa l'informazione custodita all'interno.

Dato che l'informazione si presenta criptata e codificata non localmente nell'entanglement quantistico, ne consegue sia molto difficile da decifrare.

Questo significa che per distruggere lo spazio all'interno - farlo "DIS-EMERGERE" come scrive Susskind - dovremmo eliminare l'entanglement su una grossa parte della superficie di contorno, cosa non certo facile!

Di qui il carattere "robusto" attribuito allo spazio di cui ho scritto all'inizio di questo post.

Sempre nello stesso anno, Daniel Harlow insieme a John Preskill, Fernando Pastawski e Beni Yoshida, escogitarono una configurazione di qubit in rete in grado di codificare in modo ridondante sul contorno l'informazione circa l'interno della rete.

Tale codifica è nota come **HaPPY**, dalle iniziali dei quattro cognomi **(29)**.

Sua proprietà è il fatto di riprodurre le caratteristiche della corrispondenza **AdS/CFT** ed in particolare il risultato di Ryu-Takayanagi.

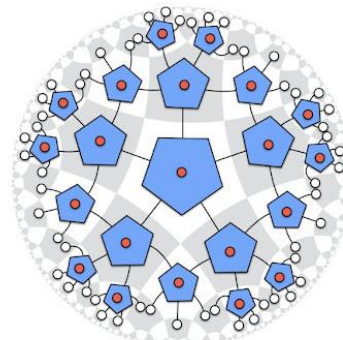
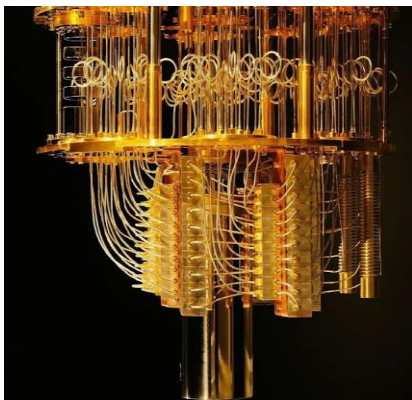


Fig B Il codice olografico pentagonale HaPPY
The HaPPY tensor network. The red dots denote logical "bulk" indices, while the white dots denote physical "boundary" indices. A "continuum" limit may be taken as we extend the network all the way to the boundary.

Il codice HaPPY è costituito da una rete di qubits, ma presenta le proprietà della situazione fisica descritta nel contesto dei buchi neri.

Il modo in cui vengono interconnessi i qubits da origine ad una geometria iperbolica emergente (simile al disco di Poincaré), dove la nozione di distanza emerge come numero dei legami che si attraversano nella rete: la distanza è infatti definita dal conteggio del numero di legami che vengono intersecati **(30)**.

Sembrerebbe dunque che lo spazio in cui viviamo possa risultare costituito da una rete entangled di "unità quantiche elementari entangled", ancora troppo piccole perché l'attuale tecnologia possa rilevarne l'esistenza; nonostante ciò risuliamo sensibili al modo in cui queste unità entangled danno origine ai fenomeni fisici che sperimentiamo, compresa l'idea stessa di "spazio".



Negli ultimi tempi si stanno accumulando prove del fatto che potremmo star vivendo all'interno di ciò che appare un gigantesco computer quantistico **(31)**.

Una tale impressione deriverebbe dall'aver intravisto un livello più profondo della realtà, la cui comprensione ci è utile per progettare nuovi computer quantistici.

L'osservazione della realtà infatti ispira nuove tecnologie, come spesso è capitato nella storia della scienza: "la natura è la nostra migliore maestra" e (ri)scopriamo di continuo tecniche che la natura ha già sfruttato.

Di conseguenza ci troviamo di fronte ad un nuovo scenario che, solo sino a qualche anno fa, appariva fantascienza: la ricerca sulla gravità quantistica potrebbe comportare risvolti sperimentali.

Potremmo in futuro approfondire la nostra comprensione della fisica dei buchi neri utilizzando computer quantistici che in un certo senso "li riproducano" in laboratorio, o viceversa la ricerca pura sui buchi neri ci permetterà di progettare e costruire computer quantistici di grandi dimensioni.

Degno di nota, e conclusione di questa rassegna, il fatto che due situazioni molto lontane - la ricerca pura su buchi neri e gravità quantistica, e la tecnologia per la costruzione di computer quantistici - risultino intimamente connesse.

Siamo ora pronti per affrontare, in un post di prossima pubblicazione, una visione particolare della cosmologia che risale all'intuizione di Hawking e che dia conto, oltre che dell'origine dello spazio di cui sin qui abbiamo trattato, anche di quella del tempo.

Note:

(24) Christian Wuethrich porta ancora una volta ad esempio l'acqua che sappiamo esser costituita da particelle elementari (quark e leptoni), le quali, esaminate alla loro scala, non presentano certo le proprietà che rileviamo per i liquidi.

Solo quando molte particelle fondamentali si uniscono in un numero sufficiente e mostrano un certo comportamento collettivo, si comportano come un liquido.

(25) Ecco alcune tra le posizioni alternative:

- Alyssa Ney ritiene che la corrispondenza AdS-CFT si possa leggere anche in senso inverso, e cioè che sia la teoria quantistica ad emergere dallo spazio tempo fondamentale, o addirittura che nessuno dei due elementi sia fondamentale ma che esista una teoria ancora più profonda ancora da scoprire.
- Susskind ci ricorda che alla base dell'olografia c'è la corrispondenza AdS-CFT, e che il nostro universo non presenta una geometria Anti DeSitter, ma semmai una geometria DeSitter: alla quale non abbiamo idea di come si possa applicare l'olografia stessa. Ci fa inoltre notare come le versioni di spazio tempo emergente facciano parte di teorie supersimmetriche (**SuSY**) che prevedono l'esistenza di particelle partner (più pesanti) per ognuna di quelle fondamentali oggi note. Particelle di cui finora non si è trovata traccia né al CERN né nei raggi cosmici prodotti da eventi estremi.
- Infine, in lizza con la teoria delle stringhe, c'è la **Quantum Loop Theory** che vede spazio e tempo costituiti da elementi discreti, "atomi di spaziotempo" collegati in una rete con superfici unidimensionali e bidimensionali che li uniscono in una "schiuma di spin" dal carattere bidimensionale. Da questa schiuma emergerebbe il nostro mondo con 3 dimensioni spaziali ed una temporale.
-

(26) Con il termine "**qubit**" si indica l'unità fondamentale alla base dei computer quantistici come il "bit" lo è per i computer classici.

I computer quantistici sfruttano le proprietà quantistiche della materia, quali la sovrapposizione degli stati e l'entanglement, al fine di effettuare operazioni su un set di dati svolgendo molti calcoli in contemporanea (superando così i limiti fisici imposti dalla legge di Moore).

Mentre un computer classico, basato su transistor, può operare soltanto su dati binari (codificati come bit, 0 o 1), un computer quantistico utilizza i qubits per i quali ad un singolo valore quantistico corrispondono simultaneamente più valori classici.

Tali qubits possono influenzarsi a vicenda, anche se non sono fisicamente connessi, grazie alla proprietà dell'entanglement.

(27) Utilizzo qui di seguito un esempio di codifica dell'informazione riportato da Brian Cox: pur non trattandosi di un esempio quantistico, la codifica utilizzata presenta la caratteristica di essere "non locale" e "ridondante".

Supponiamo di voler codificare la combinazione a tre cifre di una cassaforte, siano esse "a", "b" e "c". (ad esempio 8, 3 e 2)

Utilizziamo la funzione $f(x) = ax^2 + bx + c$ cosicché $f(x) = 8x^2 + 3bx + 2c$

Possiamo nascondere l'informazione (8, 3, 2) distribuendo ad un gran numero di persone coppie di numeri costituite da un particolare valore di x ed il valore corrispondente di $f(x)$.

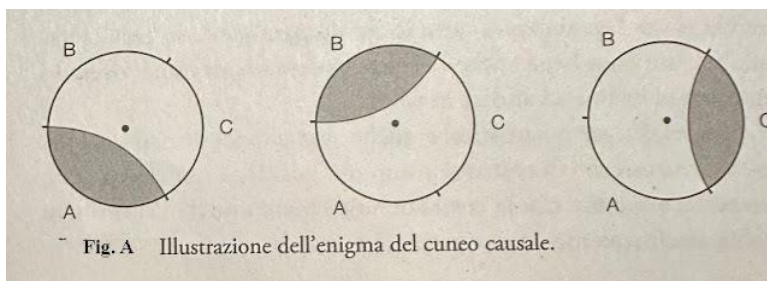
Ad esempio, ad una persona daremo $x=1$ e $f(x) = 21$; ad un'altra $x=2$ e $f(x) = 40$; ad una terza $x=3$ e $f(x) = 83$, e così via.

Per decifrare il codice (ricavare i valori di a , b e c) è sufficiente chiedere a tre persone qualsiasi le loro coppie di numeri x e $f(x)$.

Questo schema segreto di condivisione è un mezzo per codificare con ridondanza l'informazione in un modo non locale.

Il metodo è robusto rispetto alla perdita di persone: basta averne a disposizione almeno tre per esser in grado di decifrare il codice.

(28) Dovremmo qui introdurre il concetto di "**cuneo di entanglement**" e parlare dell'enigma del cuneo causale relativamente all'immagine con i 3 dischi qui di seguito inserita.



Per evitare di appesantire troppo la trattazione, salto subito alla conclusione: sul contorno del disco l'informazione associata con la regione circostante il centro non si trova in nessuna delle regioni presa singolarmente (A, B o C), ma risulta rimescolata e distribuita lungo tutto il

contorno in modo ridondante.

Qualora sia distrutta una delle 3 regioni sul contorno, l'informazione relativa alla regione vicina al centro è comunque recuperabile.

"... l'informazione necessaria per codificare lo spazio interno è rimescolata e distribuita lungo il contorno, difficile da leggere ma assai robusta rispetto alla distruzione ..."

(29) L'immagine riportata nella pagina precedente (fig "B") mostra uno schema dove i qubits sono rappresentati da cerchi all'interno di pentagoni.

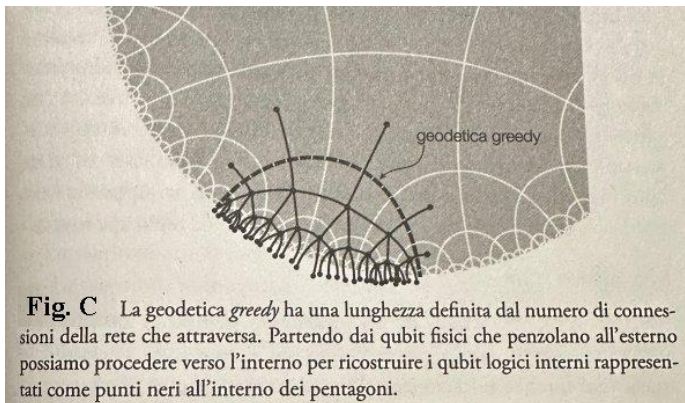
Nei computer quantistici, i qubits sul contorno sono quelli messi in pericolo dalle interazioni con l'ambiente, per cui vengono utilizzati solo quelli all'interno per le operazioni da svolgere (in sicurezza grazie alla rete).

I pentagoni rappresentano invece dispositivi che mettono in entanglement 6 qbits che vi sono connessi (uno per ogni lato più quello centrale).

Fan sì che 3 qbits qualsiasi siano in entanglement massimale con gli altri 3: da qui risulta che l'informazione codificata dal qubit centrale sia robusta rispetto alla cancellazione sino a 3 dei qubits esterni.

L'immagine ci ricorda la tassellatura iperbolica del disco di Poincaré: infatti il modo in cui sono connessi i vari qubits è determinato dalla geometria iperbolica che presenta la caratteristica saliente di riprodurre le caratteristiche della corrispondenza AdS/CFT ed in particolare il risultato di Ryu-Takayanagi.

(30) I qubits sono rappresentati da punti neri.



Rimando la descrizione del significato di questo grafico per evitare di appesantire il post.

(31) Questa affermazione non ha nulla a che vedere con il trilemma di Bostrom (di cui ho trattato in un precedente post del 2/3/2021, "il trilemma di Bostrom e la probabilità di vivere in una simulazione"), e cioè del fatto che potremmo essere creature virtuali che vivono all'interno di un universo simulato.