

# Stephen Hawking e Thomas Hertog, la "Top Down Cosmology" ed una focaccia divisa a tarda notte.

## Cap 1: Introduzione.

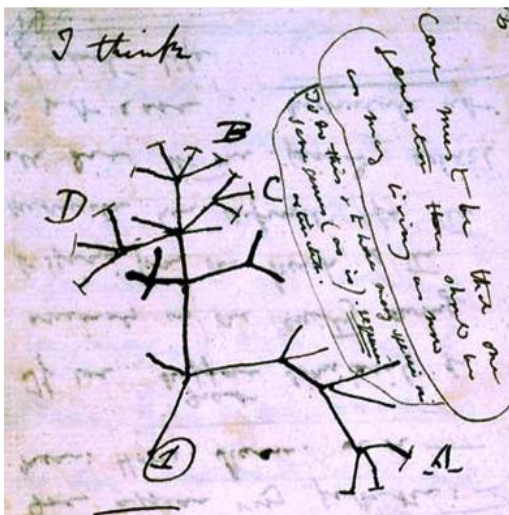
Negli ultimi mesi ho più volte anticipato la pubblicazione di un post su questo argomento.

La ragione per cui è stata rimandata sino ad oggi sta nel fatto che, per comprendere a fondo le conseguenze della sottile intuizione di Hawking che ha prodotto la **Top Down Cosmology (TDC)**, sarebbe auspicabile disporre di qualche informazione - perlomeno generica - sullo sviluppo delle nuove idee della fisica che hanno portato alla **teoria olografica**.

Perseguendo questo fine, nel periodo tra il 30 novembre ed il 29 dicembre scorso, ho scritto e pubblicato sul mio profilo (e su alcuni gruppi FB) il post "*Leonard Susskind e la sua guerra per la salvezza della Meccanica Quantistica*" - diviso in cinque parti - che ne ricostruisce la storia (1).

Tuttavia, qualora l'intento di chi mi stia leggendo si limiti al farsi un'idea di cosa si intenda per **TDC**, la lettura del post cui ho appena fatto riferimento non risulta indispensabile: il pensiero di Hawking che ne sta alla base può benissimo esser compreso pur ignorando la fisica olografica (2).

La scelta del termine "**top-down**" nel definire la propria cosmologia è un riferimento voluto ad una figura classica nell'ambito della della biologia: all'**albero della vita**, che Charles Darwin disegnò per la prima volta su uno dei suoi taccuini (vedi immagine qui sotto), ed al suo modo di procedere nell'indagare il corso dell'evoluzione.



Partendo dalle forme di vita contemporanee, localizzate idealmente sulle fronde dell'albero, Darwin provò a ricostruirne a ritroso il percorso evolutivo tentando di scendere giù sino alla radice, là dove individuava i primi organismi mai vissuti sulla Terra, alla ricerca di "**LUCA**", l'antenato comune (3).

Il metodo seguito da Darwin è rigoroso: attraverso l'identificazione di fossili e tracce cristallizzate dal tempo selezionare ad ogni snodo dell'albero il percorso effettivamente seguito dall'evoluzione tra i molti possibili.

Grandissimo merito di questo scienziato è l'aver superato l'idea di un "disegno intelligente", un progetto già esistente agli albori della vita sul nostro pianeta (codificato nei geni delle creature primordiali) che avrebbe portato, dopo miliardi di anni, alla comparsa dell'*Homo Sapiens* e della sua coscienza: **variazioni casuali e selezione naturale operata dall'ambiente** sono da soli sufficienti a dar conto dell'evoluzione, senza bisogno di invocare leggi strettamente deterministiche.

Da ciò consegue che, anche qualora fossimo in grado di riprodurre esattamente le condizioni presenti ad un certo punto della storia passata del nostro pianeta, è probabile che, trascorso un intervallo di tempo tale che corrisponda all'oggi, il risultato ottenuto sia molto diverso rispetto al mondo che ci circonda: "la casualità vince sul determinismo".

L'intuizione di Hawking ha a che fare proprio con questo.

*"Fino al 2004 tutti i cosmologi hanno cercato di capire l'evoluzione dell'Universo partendo dal Big Bang e seguendo la direzione del tempo, in un modo deterministico; si cercava una legge, un modo di predire come l'Universo debba essersi evoluto partendo da essa" - così, seduti davanti ad una focaccia a tarda notte, mi spiegava lo scorso novembre a Genova Thomas Hertog, che con Stephen Hawking è stato il fondatore della Top Down Cosmology.*



Erano cioè alla ricerca di una legge fisica che si riteneva dovesse esser immutabile nel tempo, un "a priori" all'interno di una visione platonica dove leggi matematiche "al di fuori del tempo" governano l'intero Universo.

Una tale visione deterministica, come vedremo nel proseguo di questo post, si scontra con difficoltà insormontabili nel momento in cui ci si appresta ad indagare ere remotissime, vicine al Big Bang.

*"E' questo un modo di procedere completamente diverso da come viene studiata e compresa l'evoluzione biologica" - continua Hertog.*

*"Le leggi alla base della teoria dell'evoluzione di Darwin non predicano la forma che prenderà l'albero della vita partendo dai primi esseri viventi apparsi sul nostro pianeta.*

*Semmai la biologia compie il cammino contrario: si inizia dalle forme attuali e, via via cercando evidenze, si ripercorrono gli snodi indietro verso le radici.*

*Il fine rimane quello di spiegare come noi tutti siamo stati originati, ma partendo dai rami e cercando di ricostruire la storia passata, dall'alto verso il basso e non viceversa ...".*

E' la visione Top-Down della biologia che ha permesso a Darwin di scrivere "L'origine della specie" e di formulare le leggi dell'evoluzione.

*"Ciò che Hawking ed io affermiamo è che dobbiamo cercare di comprendere l'evoluzione dell'Universo seguendo le stesse modalità con le quali si fanno indagini in biologia: ed il motivo di questa scelta sta nel fatto che nei primi istanti di vita dell'Universo c'era molta casualità, moltissimi cambiamenti casuali, che hanno dato luogo ad uno sviluppo di 'rami casuali' nel suo albero evolutivo.*



Alcuni momenti dell'intervista che ho fatto a Thomas Hertog

*Accidenti che solo in seguito si sono congelati nelle leggi della fisica che oggi riscontriamo ed erroneamente crediamo siano sempre esistite.*

*Se insistiamo a far partire il nostro studio da questi primi istanti non siamo in grado di predire come le leggi della fisica si evolveranno in seguito, così come in biologia se partiamo da LUCA non è possibile predire che si*

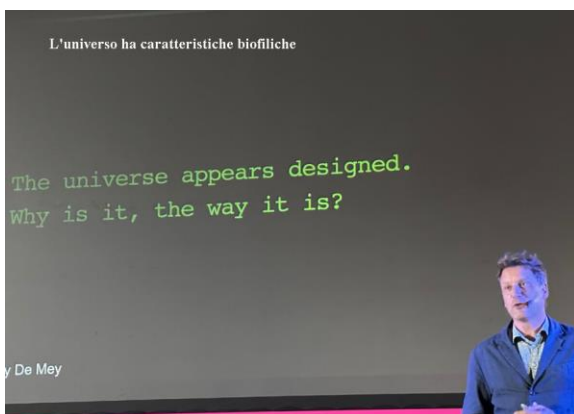
*arriverà all'Homo Sapiens".*

Quindi, per Hertog, è possibile solo retrocedere, ricostruire "l'albero dell'evoluzione dell'Universo" partendo dai rami (Top) e scendendo verso il Big Bang (Down): bisogna abbandonare la rigida e deterministica visione di Einstein - che presuppone l'esistenza di una legge universale ed eterna - per abbracciare il metodo con cui si studia l'evoluzione darwiniana.

Considerare cioè le leggi della fisica che oggi ci governano quale prodotto esse stesse dell'evoluzione avvenuta nei primissimi istanti di vita dell'Universo.

*"Le leggi che governano l'attuale Universo sono il risultato di una evoluzione di metaleggi che l'ambiente primordiale ha ad un certo punto cristallizzato" -*, insisteva a ripetermi Hertog quella sera.

*"Per verificare questa teoria dobbiamo trovare 'i fossili' di questa evoluzione. Oggi ci troviamo nell'identica posizione in cui si trovava Darwin nel XIX secolo: disponiamo di una elegante e funzionale teoria, ma nell'universo ci sono davvero poche evidenze riscontrabili per testarla".*



La **TDC** è una "teoria scientifica" (e non una mera congettura o ipotesi) in quanto, come vedremo nel dettaglio, è l'unica a dar conto delle caratteristiche biofiliche del nostro Universo, cosa che ad esempio la concorrente Teoria del Multiverso non è in grado di fare.

Una teoria scientifica deve produrre previsioni verificabili, e la TDC lo fa, ma al momento mancano verifiche sperimentali perché la nostra tecnologia per ora non è in grado di ottenerle.

*"Cos'è che può costituire un fossile per la teoria TOP-DOWN? Dove possiamo iniziare a cercare?" -* continuava Hertog.

*"Può essere poi che le leggi della fisica si siano cristallizzate, ma non completamente, così da lasciare minuscoli segni.*



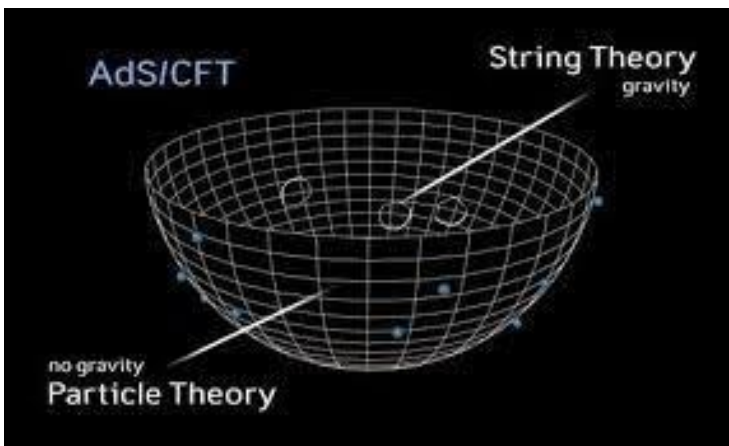
*Un posto dove iniziare a cercare è nella forma delle onde gravitazionali, che dal Big Bang attraversano l'Universo senza trovare ostacoli: i futuri progetti LISA ed Einstein Telescope, finalizzati alla rilevazione di gravitational waves dotate di estrema lunghezza d'onda, potrebbero rinvenirvi indizi importanti.*

A differenza delle onde elettromagnetiche, per le quali esiste un orizzonte temporale prima del quale non è possibile indagare, le onde gravitazionali potrebbero fornirci informazioni sull'Universo primordiale precedenti il periodo cui si riferisce la mappa **CMBR** (Cosmic Microwave Background Radiation, ricostruita a partire dai dati raccolti dal satellite Planck), che risale a circa 400.000 anni dopo il Big Bang (4).

*"Un'altra direzione in cui guardare è alle nuove teorie che vengono via via sviluppate: potrebbero infatti indicarci dove e cosa cercare.*

*Oggi in biologia disponiamo di teorie di genetica molecolare (un campo della genetica che studia la struttura e la funzione dei geni a livello molecolare), cioè di teorie microscopiche dell'evoluzione di Darwin che permettono di testare quest'ultima in profondità. (5)*

*Il futuro passo corrispondente per la cosmologia potrebbe rivelarsi lo sviluppo della fisica olografica insieme alle teorie microscopiche ed alla quantum gravity, che già oggi costruiscono lo scheletro della prospettiva Top-Down: sono personalmente convinto che se in qualche modo comprenderemo completamente la natura olografica della gravità e della realtà, il resto diventerà evidente ..."*



Come ho già accennato, negli ultimi tempi Hawking si era innamorato della teoria olografica in quanto in grado di spiegare la gravità quantistica là dove la teoria di Einstein fallisce: all'interno dei buchi neri.

Hertog, come vedremo, ritiene che la cosmologia olografica sarà la chiave di volta per descrivere in modo accurato il nostro Universo, permettendo di spiegare cosa sia il tempo e cosa la gravità.

Termino qui l'introduzione alla **TDC**.



Nelle prossime parti di questo post:

- partirò col definire cosa si intenda con il termine "cosmologia" (un termine non certo nuovo in ambito filosofico ma che in ambito scientifico ha storia recente);
- spiegherò PERCHE' ad un certo punto Hawking decise di abbandonare la sua prima ipotesi sul Big Bang, l'**assenza di confini** ("no boundary proposal"), passando da una posizione di sostenitore della teoria del multiverso a suo feroce critico;
- tratterò infine dello sviluppo della **TDC**, unica teoria al momento in grado di offrire una possibile soluzione al "**problema della misura dell'inflazione**", e delle conferme che Thomas Hertog, il fisico che ha raccolto l'eredità di Hawking, si aspetta di trovare nei dati che verranno accumulati grazie alle osservazioni di strumenti oggi in fase di progettazione (quali l'Einstein Telescope e l'interferometro satellitare LISA), e dagli sviluppi della fisica olografica.

Fonti di questo post sono:

- "The origin of time" il libro di Thomas Hertog (aprile 2023) che è il "manifesto" della Cosmologia Top Down, della cui scrittura l'autore fu incaricato dallo stesso Hawking in occasione di un incontro poche settimane prima della sua morte **(6)**;
- la conferenza omonima, tenuta dallo stesso Hertog, al Festival della Scienza di Genova lo scorso novembre, nel corso della quale gli ho posto domande su ciò che non mi era chiaro;
- una piacevole chiacchierata (su disparati argomenti), intrattenuta con l'autore passeggiando per le vie di Genova, e un'intervista che ho registrato a tarda notte mentre dividevamo una focaccia al formaggio;
- l'intervista su YouTube che gli ha fatto Robinson Erhardt ("Thomas Hertog: Stephen Hawking, Cosmology, and the Origin of Time, Robinson's Podcast #135")

Siamo ora pronti ad iniziare questo viaggio emozionante!

### **Note:**

**(1)** Avevo già fatto menzione della Top Down Cosmology nella terza parte del post menzionato, il cui sottotitolo è "Maldacena e la corrispondenza ADS- CFT".

Trattando della resa di Hawking nel 2004, culminata con la sua pubblica ammissione di aver perso la scommessa con Preskill, accennavo a quanto mi aveva ribadito Hertog nel corso della nostra chiacchierata notturna seguita al suo intervento al Festival della Scienza di Genova.

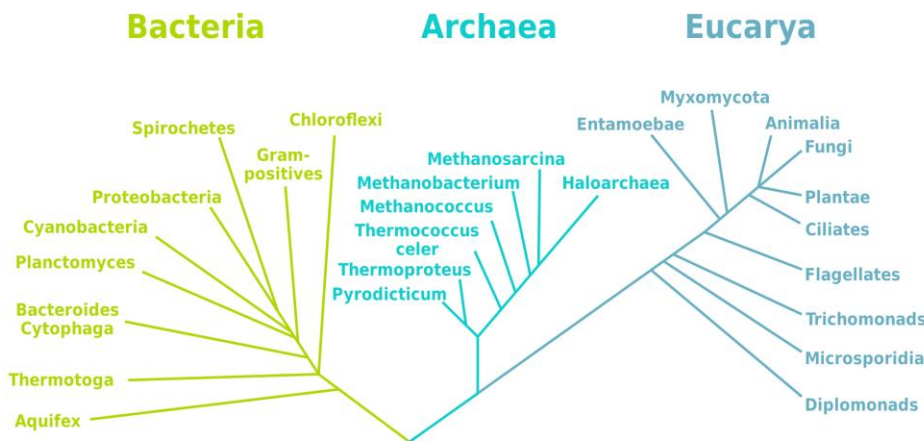
E cioè al fatto che ciò che convinse Hawking a dichiararsi sconfitto fu non tanto l'aver riscontrato come la fisica olografica potesse dar conto del superamento del paradosso dell'informazione (come nel processo di evaporazione di un buco nero venga conservata l'informazione quantistica su tutto ciò che aveva attraversato l'orizzonte degli eventi in precedenza), quanto l'aver compreso prima di altri che l'ologramma sulla superficie di contorno codificati non soltanto un singolo interno (il

nostro spaziotempo quadridimensionale per come lo percepiamo), ma “una sovrapposizione di geometrie differenti”.

“L’internò AdS” - sostiene Hertog - “è da immaginare non come un solo spazio tempo, ma come una funzione d’onda alla Feynman”.

(2) Lo sviluppo della **Teoria Olografica** - come vedremo nel corso di questo post - è semmai ciò che ha convinto Hawking di essere sulla pista giusta; un universo olografico si presta alla descrizione della cosmologia top down meglio di uno non dotato di questa caratteristica.

(3) “**LUCA**” (Last Unique Common Ancestor), l’antenato comune a tutte le specie sinora identificate ad aver popolato il pianeta, potrebbe non coincidere con la prima forma di vita apparsa sulla Terra.



Una possibilità non trascurabile è che forme di vita si siano sviluppate da materia inorganica (ad oggi non sappiamo ancora come) in modo spontaneo ed autonomo in più luoghi ed in tempi diversi durante l’infanzia del nostro pianeta: in tal caso questo processo di “emersione” della materia vivente potrebbe

aver prodotto “soluzioni diverse” delle quali alcune si sono estinte senza aver lasciato una traccia rilevabile con la tecnologia odierna, lasciando LUCA da solo a colonizzare la Terra.

Con queste linee estinte non avremmo antenati comuni.

(4) Prima di raggiungere quell’età, l’Universo era caratterizzato da dimensioni limitate e temperature elevatissime, ed inoltre era permeato da una radiazione uniforme che interagiva strettamente con il plasma di idrogeno.

L’alta energia dei fotoni presenti in questa fase della sua vita impediva agli elettroni di legarsi ai protoni, non consentendo la formazione di atomi.

L’universo intero era immerso in una “nebbia” luminescente.

Il progredire della sua espansione, ed il conseguente raffreddamento di plasma e radiazione, comportò il raggiungimento di una temperatura limite sotto la quale il livello di energia dei fotoni

non bastava ad impedire la formazione dei primi atomi, che non riuscirono più ad assorbire la radiazione termica.

In quel momento l'Universo divenne trasparente alla radiazione e ... "luce fu!".

Questi primi fotoni che riuscirono a propagarsi nel vuoto, pur stirati dall'espansione che ha interessato lo spazio negli ultimi 13 miliardi di anni e che li ha resi via via meno energetici, sono ancor oggi rilevabili da radiotelescopi: si tratta della **CMBR** (Cosmic Microwave Background Radiation) di cui avremo modo di trattare.

(5) Nei primi anni del 900 aveva fatto scalpore l'esperimento della riproduzione di topi albin.

Selezionati ceppi di topi che si potevano considerare linee pure, vennero incrociati due ceppi diversi entrambi albin, e, contrariamente ad ogni previsione, tutti i figli della prima generazione ibrida erano pigmentati, cosa in apparenza in contrasto con le leggi dell'ereditarietà.

Essendo l'albinismo un fenotipo recessivo, ai genitori albin dei topi pigmentati avrebbero dovuto mancare totalmente dei geni necessari per produrre la melanina.

Lo sviluppo della genetica molecolare fu in grado di dar conto di tale risultato confermando la teoria di Darwin.

(6) Hertog mi ha raccontato le vicende che l'hanno legato per tre lunghi anni alla scrittura del libro.

La cura nel controllare le traduzioni nelle diverse lingue (alcune delle quali si accorse travisavano il testo originale); il suo timore di non riuscire a trasmettere con efficacia il messaggio di Hawking diretto al pubblico non specialistico; le sue lunghe riflessioni per evitare di confondere inconsapevolmente le idee di Hawking con le proprie.

## Cap 2^: il significato di Cosmologia nell'ambito della scienza contemporanea.

Nella prima parte di questo post - pubblicata qualche giorno fa - ho cercato di chiarire quale fosse l'aspetto dirompente insito in un cambio di prospettiva nello studio della storia del nostro universo, reso possibile dall'adozione del metodo "**top-down**" che Stephen Hawking ha mutuato dalla biologia: strumento la cui efficacia nel ricostruire l'evoluzione della vita sul nostro pianeta dimostrò a suo tempo Charles Darwin.

Prima di proseguire è indispensabile definire cosa si intenda oggi con la parola "**cosmologia**".

Chiunque abbia seguito un corso di filosofia delle scuole secondarie ricorderà che questo termine ricorre nei testi sin dalle fonti più remote.

In ambito filosofico la **cosmologia** è definibile come "*studio della struttura materiale e delle leggi che regolano l'universo, concepito come insieme ordinato*".

Ad essa si collega la **cosmogonia**, che raccoglie invece ipotesi sull'origine (e talvolta sul destino) dell'universo stesso.

Il termine **cosmos** - "ordine" in greco antico - si contrappone a **chaos** che significa "confusione".

Questa "scelta di campo" risulta legata alle esperienze personali sperimentate dagli individui della nostra specie.

La durata limitata della vita umana ha fatto sì che (quasi) tutto ciò che si ponga in relazione alla sfera celeste ci dia l'impressione di esser regolare e prevedibile: hanno infatti carattere periodico l'alternanza giorno/notte, la successione delle stagioni, le rivoluzioni dei pianeti intorno al Sole e l'alternarsi delle costellazioni nei nostri cieli.

Eventi rari, quali ad esempio le eclissi di sole o l'improvvisa comparsa di una cometa nel cielo stellato, pur avendo anch'essi natura periodica venivano considerati "prodigi" dai nostri avi: quando infatti la lunghezza del periodo eguaglia o supera la durata della vita umana, l'evento viene percepito come una "violazione dell'ordine", e per tale ragione (capita non di rado ancor oggi) gli viene assegnata una valenza negativa dalla superstizione. (7)

Tutto ciò ha contribuito a radicalizzare nei millenni un pregiudizio, e cioè che esista una sorta di "corpus di **leggi di natura**", con **carattere eterno ed immutabile**, in grado di "tenere in ordine" l'universo stesso.

Fino a poco meno di un secolo fa cosmologia e cosmogonia restavano argomenti trattati nell'ambito della filosofia e della religione, non essendo disponibili osservazioni scientifiche che potessero corroborare una tra le diverse congetture.

L'universo descritto da Newton nel '600, che avrebbe fornito una cornice di riferimento per quasi 300 anni, presenta le caratteristiche di un orologio cosmico, e si pone nella traccia della tradizione classica: leggi naturali eterne ed immutabili regolano i movimenti degli astri con precisione assoluta sin dall'inizio dei tempi.



Portrait of Newton at 46, 1689



Dio ha creato il mondo così come lo vediamo e gli ha dato leggi matematiche che ne descrivono i mutamenti.

Pure Einstein, negli anni in cui formulò la Relatività Generale (1915), si limitò a sostituire il dio creatore di Newton con la Natura: l'universo esiste da sempre, ed è costituito dalla galassia (a quel tempo si riteneva infatti esistesse soltanto la Via Lattea).

La sfida era per lui decifrare le leggi fondamentali che governano l'universo nella speranza che, una volta comprese, il futuro non costituisca più un'incognita.

Tuttavia, sin dall'epoca in cui Newton formulò la sua Legge di Gravitazione Universale, era già chiaro qualcosa non quadrasse con il modello di **universo statico** di cui anche Einstein fu sostenitore. (8)

Applicando all'universo nel suo insieme le equazioni che portano il suo nome, Einstein si rese subito conto che, qualora la distribuzione di materia risultasse omogenea, anche se l'universo fosse infinito, tenderebbe comunque a collassare su sé stesso per effetto della curvatura impressa dalla materia allo spaziotempo.

**Equazioni di campo di Einstein**

Lambda, la costante cosmologica, è un termine che può descrivere una forza repulsiva in tutto lo spazio

$$G_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- $G_{\mu\nu}$  descrive la curvatura dello spazio-tempo
- $g_{\mu\nu}$  descrive la struttura dello spazio-tempo
- $G$  è la costante gravitazionale
- $c$  è la velocità della luce
- $T_{\mu\nu}$  descrive l'energia e la quantità di moto della materia e della radiazione

Ma un "**big crunch**", pur in un remoto futuro, strideva con le sue convinzioni; così, per "correggere" tale sgradita previsione, introdusse artificialmente nelle equazioni della Relatività Generale una costante, indicata con la lettera greca  $\Lambda$  (lambda), che chiamò "termine cosmologico" ed oggi è universalmente nota col nome di "**costante cosmologica**".

Fine di questa correzione era controbilanciare la tendenza alla contrazione per ottenere un modello di universo statico che rimanga tale in eterno.

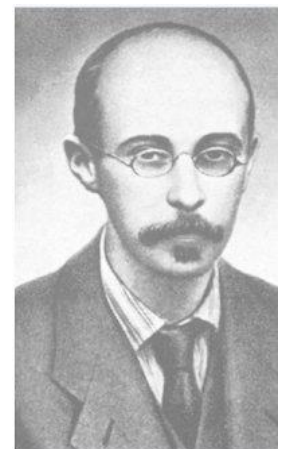
Einstein riteneva  $\Lambda$  "*una sorta di energia oscura dello spazio che si manifesta su larghissime scale*

*dell'universo, dando luogo a una sorta di antigravità*".

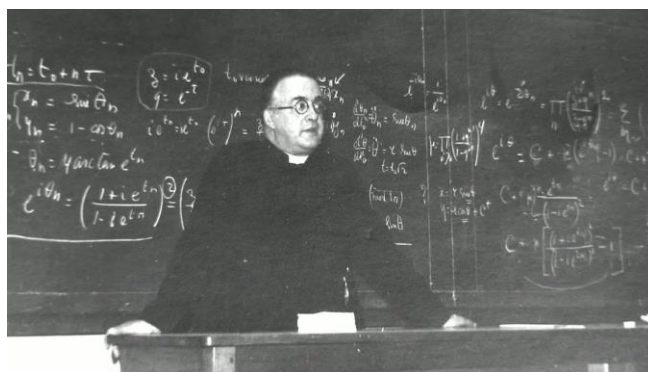
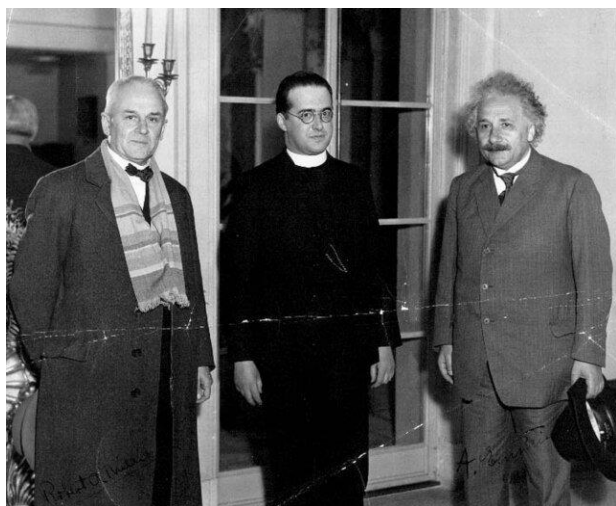
Non passarono molti anni che due fisici - **Aleksandr Aleksandrovic Fridman** nel 1922 ed il prete cattolico belga **George LeMaitre** nel 1927 - si accorsero (in maniera indipendente) come le sue stesse equazioni contraddicessero le conclusioni che Einstein aveva tratto circa natura dell'universo.

Procedendo all'indietro nel tempo, da esse risultava esser esistito un singolo momento nella storia dell'universo in cui tutta quanta la materia si trovava concentrata in punto.

Ne seguì un durissimo scontro tra LeMaitre ed Einstein - quest'ultimo solo anni dopo e davanti a prove inconfutabili ammetterà il proprio errore - di cui ho già trattato in un altro post (9)



Aleksandr Aleksandrovich Fridman



Un miglioramento degli strumenti ottici a disposizione degli astronomi consentì nel 1925 di confermare l'esistenza di altri agglomerati di stelle posti a grandi distanze, ben oltre i limiti della nostra galassia, cui venne assegnato il nome di **universi isola**.

Un nuovo telescopio Hooker da 100", installato sul monte Wilson nei pressi di Pasadena, permise infatti ad **Edwin Hubble** (ed ai suoi colleghi), sfruttando proprietà caratteristiche di un tipo di stelle a luminosità variabile chiamate **cefeidi (10)**, di identificare come galassie autonome le nebulose di Andromeda e del Triangolo.



Edwin Powell Hubble



Vesto Melvin Slipher, U...

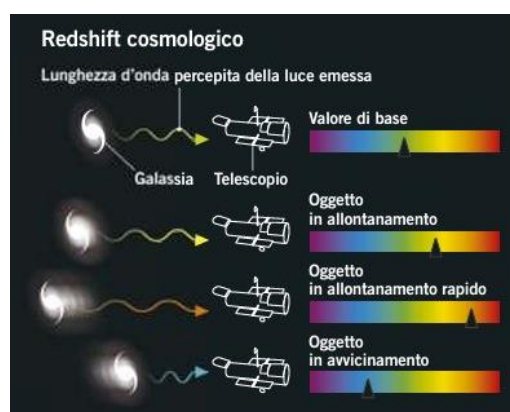
Già nel 1917 **Vesto Slipher**, astronomo presso l'osservatorio Lowell nei pressi dei Gran Canyon, aveva rilevato come gli spettri della luce provenienti da 25 "nebulose a spirale" fossero marcatamente spostati verso lunghezze d'onda più lunghe (**spostamento verso il rosso**).

L'interpretazione di tale fenomeno era spiegabile con l'**effetto Doppler**: l'intensità del **red shift** è in funzione della velocità con la quale l'oggetto che emette luce si allontana dall'osservatore.

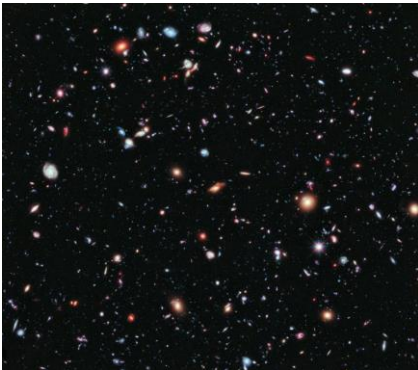
Alla metà degli anni '20, quando fu chiaro si trattasse non di nebulose ma di galassie indipendenti, Slipher era arrivato ad analizzare gli spettri di 42 di queste: ne risultò che soltanto 4 galassie risultavano in avvicinamento mentre le restanti 38 mostravano invece un diverso grado di "arrossamento" del proprio spettro, indice di una velocità di allontanamento enorme (fino a 1800 km/sec) se confrontata con quella dei corpi celesti noti all'epoca.

Fu LeMaitre a comprendere come questa situazione fosse una evidenza a favore di un universo in espansione, in conflitto con l'idea di Einstein relativa ad un universo immutabile ed eterno, ed a pubblicare le sue tesi in un articolo del 1927.

Slipher e Hubble interpretavano, erroneamente, il reciproco allontanarsi delle galassie l'una dall'altra alla maniera con cui si guarda ad un'esplosione che le avesse disperse.



LeMaitre comprese invece che il red shift non aveva nulla a che fare con l'effetto Doppler: non erano le galassie a disperdersi, lanciate da una esplosione iniziale, ma lo spazio stesso "a gonfiarsi", ad espandersi, portandole con sé.



Un'esplosione comporta la presenza di un punto di origine, cosicché ciò che si vede appare diverso a seconda della direzione in cui guarda l'osservatore.

L'espansione invece non ha un punto di origine, ed ogni osservatore, indipendentemente dalla sua posizione, ha l'impressione di trovarsi al centro.

Il red shift non è quindi causato dal movimento effettivo delle galassie, ma dal fatto che la luce, viaggiando da una galassia all'altra, subisce uno "stiramento" delle proprie onde luminose per effetto dell'espansione dello spazio stesso: la lunghezza d'onda incrementa quanto più a lungo dura il viaggio, causando così l'arrossamento del colore della luce.

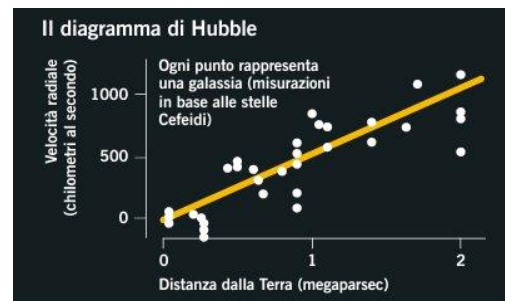
Se il ritmo di espansione è costante, ragionava LeMaitre, deve allora esistere una relazione lineare tra la velocità di allontanamento di una galassia e la sua distanza rispetto all'osservatore.

Nell'articolo "*Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*" pubblicato nel 1927 da LeMaitre sugli "*Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*", compare l'equazione

$$v = H r$$

dove "v" è la velocità apparente di allontanamento, "H" è una costante che misura il tasso di espansione dell'universo ed "r" la distanza dall'osservatore.

Basandosi su questa ipotesi, ed utilizzando le misurazioni di Slipher e Hubble, stimò che la velocità apparente di allontanamento delle galassie aumentasse di 575 km/sec ogni 3 milioni di anni luce di distanza in più. (11)



Corollario di tale intuizione è un metodo per stimare il tempo trascorso dall'inizio del processo di allontanamento reciproco delle galassie: da  $v = H r$  si ricava il rapporto tra distanza e velocità

$$r/v = 1/H$$

che permette di calcolare l'intervallo temporale durante il quale l'espansione ha avuto luogo, e dunque ottenere "la data di inizio" (oggi stimata intorno ai 13.8 miliardi di anni fa).

Le sue riflessioni furono a quel tempo ignorate, ma vennero in gran fretta riesumate nel '29, in seguito alla pubblicazione dei risultati delle osservazioni di Hubble e Humason condotte all'osservatorio del monte Wilson.

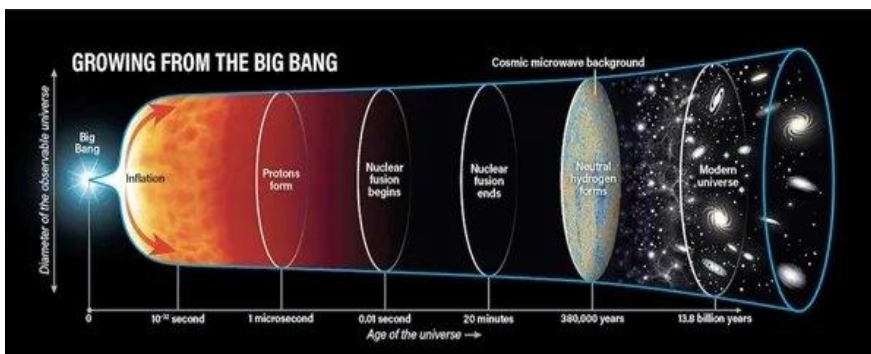
All'inizio degli anni '30 è ormai chiaro come l'universo sia in espansione, e come la legge che porta il nome di **Hubble-Lemaître** consenta di individuare un preciso istante nel passato quando tutta quanta la materia doveva trovarsi in una regione molto piccola.

Einstein dovette ammettere la propria sconfitta e così cancellò definitivamente la costante cosmologica dalla Relatività Generale (12).

Nel 1931, LeMaitre individuò nell' "**atomo primitivo**" - una regione di spazio tempo del diametro della lunghezza di Planck - il limite massimo alla possibilità di contrarsi da parte della materia contenuta nell'universo. (13)

Là dove la relatività vedeva degli infiniti, la meccanica quantistica provvedeva a mettere limiti.

*"... Utilizzando la legge di Hubble e ricostruendo la storia dell'universo in direzione del passato, si arriva ad un istante nel quale tutta la materia risulta concentrata all'interno di questo diametro: chiedersi cosa ci fosse prima di questo istante non ha significato in quanto lo spazio tempo non poteva esistere".*



L'Universo aveva quindi una data di nascita, ma fu subito chiaro che la Relatività Generale falliva avvicinandosi a tale momento: la **cosmologia relativistica** trova nel Big Bang la sua ragione d'essere, ma non è in grado di descriverlo.

Le leggi di natura, decodificate dalla Relatività Generale, consentivano di individuare il momento esatto prima del quale tempo e spazio non potevano esistere: le stesse leggi, se utilizzate "guardando in direzione del futuro", avrebbero consentito di indagare sul destino dell'universo.

LeMaitre, appellandosi alla teoria quantistica, supera il determinismo proprio delle teorie classiche, nel quale ricade anche la Relatività: secondo questo schema, ogni inizio richiede condizioni iniziali che presentino lo stesso grado di regolazione dell'universo che si evolve da esse.

Un universo che si sviluppa diventando complesso in un momento successivo della sua evoluzione richiede già fin dall'inizio delle condizioni di partenza di quello stesso livello di complessità: tutto ciò rimanda all'idea di un progetto complesso che ha messo in moto l'universo, un "**disegno**", un "atto divino".

Per "*rompere la catena di cause ed effetti*" LeMaitre chiama in causa la "vaghezza" propria della meccanica quantistica, ipotizzando così che "*sotto le condizioni estreme presenti nelle primissime fasi di vita dell'universo anche spazio e tempo diventino indeterminati e perdano il loro significato*" (14)

*"... spazio e tempo acquisirebbero un significato ragionevole solo dopo la divisione del quanto originario in un numero sufficiente di quanti ... e se questo è corretto l'inizio dell'universo è avvenuto prima dell'inizio di spazio e tempo ..",* scriveva.

LeMaitre riteneva cioè che **salti quantistici casuali** potrebbero aver dato origine ad un universo complesso partendo da un semplice atomo primitivo: la complessità odierna come risultato di accidenti congelati nell'evoluzione embrionale del cosmo.

“... dallo stesso inizio avrebbero potuto evolversi universi molto differenti ...” (15)

L'indeterminismo quantistico si sostituisce al determinismo classico.

Gli anni 30 rappresentano la “**primavera della cosmologia**”: grandiose speculazioni ma assenza di dati che le supportino.

Il termine stesso di **Big Bang** trae origine da un commento ironico espresso da Fred Hoyle durante una trasmissione della BBC nel 1949 dove criticava le idee di LeMaitre ed i modelli cosmologici che prevedevano “un inizio” (16).



Ralph Asher Alpher



George Gamow

Sviluppando le idee di LeMaitre, nel 1948 George Gamow e Ralph Alpher pubblicarono un articolo che introduceva il concetto di “**nucleosintesi primordiale**” (17), affrontando così di petto il problema della formazione della materia che costituisce l'universo a partire dall'atomo primordiale.

Secondo gli autori, densità e temperatura dell'universo primordiale erano talmente elevate da non permettere l'esistenza di nuclei atomici ad esclusione di quello dell'idrogeno (formato

da un solo protone).



L'intero universo sarebbe stato pieno di un plasma caldo e denso - che Gamow chiamò  $\upsilon\lambda\eta$  (“materia” in greco antico) - composto da elettroni, protoni e neutroni in libero movimento ed immersi in un bagno caldo di radiazione.

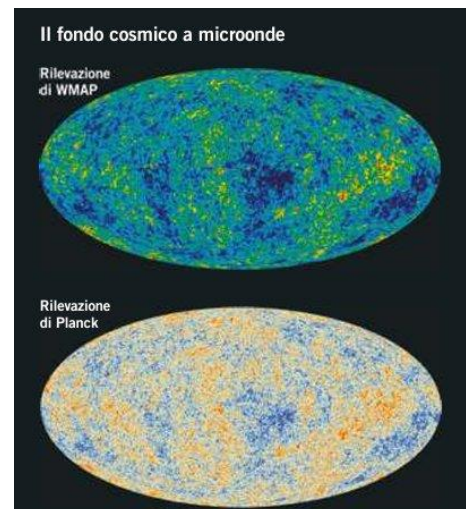
Il successivo raffreddamento, dovuto all'espansione dello spazio, permise l'assemblaggio dei primi nuclei atomici più pesanti dell'idrogeno: trascorsi i primi 100 secondi dal Big Bang, l'universo si comportò per la durata di qualche minuto come un immenso reattore nucleare sino a quando la temperatura scese a 100 milioni di gradi.

In questo intervallo di tempo 1/4 di tutti i protoni presenti si trasformò

in elio (ed in qualche traccia di berillio e litio).

Le previsioni sulle abbondanze di tali elementi furono verificate da successive misurazioni, e costituiscono ad oggi una delle due “prove chiave” a favore della teoria del **Big Bang caldo**.

La seconda prova riguarda invece la predizione - ad opera di Alpher, Gamow ed Herman - relativa alla presenza di un mare di radiazione che ancor oggi permea tutto lo spazio, derivante dal calore liberato durante il processo di sintesi dei nuclei atomici.



Secondo i loro calcoli, gli oltre 13 miliardi di anni di espansione cosmica avrebbero raffreddato tale radiazione termica sino a 5°K, rendendola rintracciabile nella banda di frequenza delle microonde.

La **radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB, Cosmic Microwaves Background)**, lontana eco del momento in cui i fotoni poterono scorrere liberi nello spazio, fu rilevata fortunosamente da Arno Penzias e Robert Wilson nel 1964 presso i laboratori Bell nel New Jersey utilizzando un'enorme antenna a tromba che doveva tracciare i satelliti Echo; si accorsero che, ovunque tale antenna venisse puntata, un rumore era sempre presente, e che corrispondeva ad una lunghezza d'onda pari a 7.35 cm.



Arno Allan Penzias

Robert Woodrow Wilson

Oggi si considera **data di inizio della cosmologia del Big Bang come scienza quantitativa** quella in cui è stato pubblicato l'articolo "*The Origin of Chemical Elements*" su Physical Review nel 1948 a firma di R.A. Alpher, Hans Bethe e George Gamow.

In realtà Bethe, amico di Gamow, con l'articolo non c'entrava nulla: fu quest'ultimo ad insistere con Alpher per mettere anche Bethe tra i firmatari allo scopo di avere le tre iniziali dei cognomi (A, B, G) che ricordassero i tre tipi fondamentali di radiazioni ionizzanti ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ).

Nasceva così la Cosmologia moderna, una scienza che cerca di descrivere l'universo nel suo insieme tentando di offrire una spiegazione scientifica alla sua origine ed alla sua evoluzione.

LeMaitre venne informato della scoperta della CMB il 17 giugno del 1966, a soli 3 giorni dalla sua morte: lasciò questo mondo conscio che la radiazione fossile aveva dimostrato la correttezza delle sue ipotesi.

A chi gli chiedeva se non percepisse un conflitto tra la sua posizione di prete cattolico e di "padre del Big Bang" rispondeva:

*"... una volta che si sia compreso che la Bibbia non ambisce ad essere un manuale scientifico, e che la Relatività è irrilevante per la salvezza dell'anima, il conflitto tra religione e scienza svanisce ..."*

### **Note:**

(7) In contrapposizione all'apparente "ordine dei cieli", ciò che "accade quaggiù sulla Terra" veniva nei tempi passati percepito come caotico, imprevedibile.

Il contesto cambia repentinamente, l'ambiente è in perenne mutamento, le interazioni tra gli individui presentano un carattere complesso che si fa fatica a decifrare.

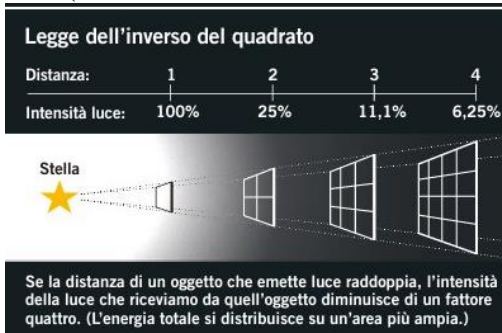
Su Youtube è rintracciabile un'interessante conferenza che tratta (anche) di questi argomenti: "*Bosis 25: Guido Tonelli La complessità del cervello, la complessità del cosmo*"

(8) Nel 1693, sei anni dopo la pubblicazione dei "Principia", Newton si rese conto del fatto che un universo dove tutta la materia si attrae reciprocamente sarebbe destinato ad un collasso: avrebbe

quindi potuto intuire, con tre secoli di anticipo, l'espansione dell'universo, e invece ... lasciò correre (Vedi su Le Scienze, Feb 2024 "Sorprese Cosmiche").

(9) Einstein arrivò ad accusare LeMaitre di voler introdurre a forza l'atto divino della creazione nella scienza: vedi il mio post sull'argomento pubblicato il 13 maggio 2023 con il titolo "*La carta millimetrata con le possibili evoluzioni dell'universo .. e l'universo esitante di LeMaitre*".

(10) L'astronomo Edwin Hubble riuscì a calcolare la distanza di tali galassie in un milione di anni luce (oltre 10 volte il diametro della Via Lattea) utilizzando come "candela standard", la luminosità delle stelle cefeidi che è legata in modo stretto al loro periodo di pulsazione.



Usò per tal scopo la **legge dell'inverso del quadrato** ("*raddoppiando la lontananza di una fonte di luce, la sua luminosità diminuisce di un fattore 4*"): conoscendo l'intensità luminosa assoluta di una cefeide è infatti possibile, attraverso l'utilizzo di un fotometro, calcolarne la distanza approssimativa.

(11) Oggi questa equazione è conosciuta come "**legge di Hubble**" (in realtà il nome completo è "legge di Hubble-Lemaître") nonostante il fatto che Hubble non abbia mai fatto cenno all'espansione dell'universo in tutta la sua vita: interpretava infatti le proprie osservazioni in termini di effetto doppler.

Gli si deve piuttosto il merito di aver calcolato con più precisione il valore di **H** - fissandolo a 513 km/sec - basandosi su osservazioni condotte insieme con Humason su un campione di 24 galassie: una misura che non si scosta molto dai 575 km/sec calcolati da LeMaitre.

(12) Mentre Einstein cancellava rabbiosamente il termine  **$\Lambda$**  dal lato sinistro dell'equazione della Relatività Generale - abbandonando così l'idea di un universo statico -, LeMaitre riteneva dovesse semplicemente esser spostata sul suo lato destro, quale parte del bilancio energetico dell'universo.

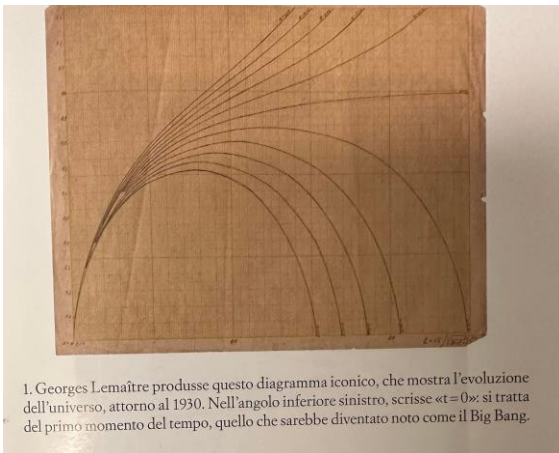
"... *Funzione di  $\Lambda$  dovrebbe esser quella di riempire lo spazio tempo di energia e pressione: come se l'energia del vuoto fosse diversa da zero ...*"

L'effetto antigravitazionale di tale costante si viene a creare perché la pressione con cui riempie lo spazio è negativa: una **tensione**, come quando tiriamo per le estremità un elastico e questo accumula tanta più energia quanto più viene teso.

Questa "tensione" è ciò che fa accelerare l'espansione.

Quando infatti lo spazio si dilata, le sue **proprietà intrinseche** non cambiano: semplicemente ne abbiamo di più.

E questa è la ragione per cui l'energia oscura dello spazio tempo non si diluisce con l'espansione: addirittura, almeno in alcuni modelli, potrebbe diventare il fattore determinante nell'evoluzione dell'universo con la crescita dello spazio.



LeMaitre, sul famoso disegno su carta millimetrata cui ho fatto accenno in nota (9), aveva tracciato diverse "traiettorie" seguite dall'evoluzione di universi che presentavano un differente valore di  $\Lambda$ : in alcuni, dove il valore della costante è piccolo, lo spazio si dilata per poi collassare in un secondo tempo per effetto della gravità, in altri invece si espande indefinitamente.

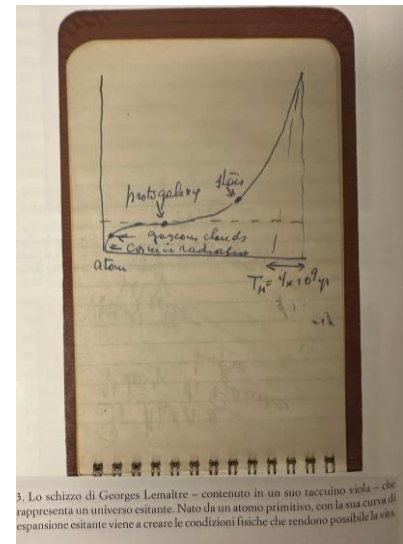
Un'altra ragione portò poi LeMaitre a sostenere l'importanza della presenza di una costante cosmologica: la considerazione che noi esistiamo implica che l'universo debba possedere

**caratteristiche biofiliche**, esser cioè adatto ad ospitare la vita ad un certo punto della sua evoluzione.

Tra i diversi modelli indagati da LeMaitre soltanto uno, relativo ad un universo in cui la costante cosmologica assume un determinato valore, soddisfa questa condizione: infatti affinché si possano formare galassie, stelle e pianeti è necessario che nella storia dell'universo ad una fase iniziale di espansione violenta succeda un rallentamento, grazie al quale la gravità (attrazione) predomina sulla forza repulsiva che provoca l'espansione, permettendo il collasso di nubi interstellari in corpi celesti ed in seguito il loro accorpamento in gruppi.

Definì questo modello "**universo esitante**".

Se avesse proseguito nei calcoli che ne disegnavano l'evoluzione avrebbe scoperto che, dopo un lungo periodo di relativa quiete (espansione a tasso ridotto), la crescita dell'universo avrebbe ripreso un ritmo accelerato, anticipando così di 80 anni una scoperta di fine millennio.



(13) LeMaitre immaginò l'origine dell'universo come un "atomo primitivo" superpesante la cui disintegrazione ha prodotto l'universo così come lo conosciamo (vedi l'articolo "*L'Hypothèse de l'atome primitif*" del 1946).

Immaginò pure che i raggi cosmici avrebbero potuto conservare informazioni sui primi momenti dell'universo, di "*questo giorno senza ieri*".

(14) "*The Beginning of the World from the Point of View of Quantum Theory*", Nature maggio 1931.



(15) Paul Dirac, sostenitore della teoria dell'atomo primitivo, ipotizzò che i salti quantistici nell'universo primordiale avrebbero potuto rimpiazzare del tutto la necessità di una condizione iniziale:

*“... è possibile che in un'origine quantistica la causalità svanisca, che il mistero della «causa prima» venga a evaporare ...”.*

(16) Fred Hoyle, insieme a Hermann Bondi e Thomas Gold, nel 1948 propose con discreto successo un modello alternativo alla cosmologia del Big Bang: la "**teoria dello stato stazionario**", secondo la quale la "diluizione della materia" (diminuzione di densità) dovuta all'espansione dell'universo veniva bilanciata da una continua creazione spontanea di particelle.



Hermann Bondi

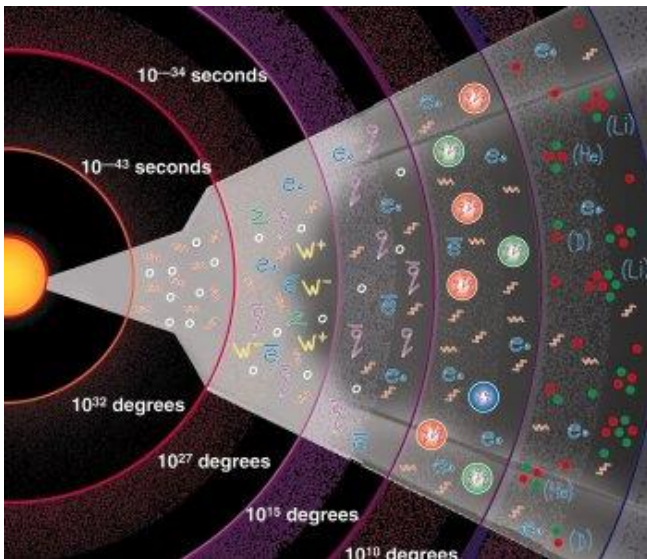


Fred Hoyle



Thomas Gold

(17) La **nucleosintesi primordiale (BBN, Big Bang Nucleosynthesis)** è un processo manifestatosi nelle prime fasi dell'esistenza dell'universo grazie al quale si sono formati nuclei atomici più pesanti dell'idrogeno, in prevalenza elio insieme a piccole quantità di deuterio e litio.



I primi tre minuti dell'universo sono quando elementi leggeri, come l'idrogeno ed elio, sono stati formati.

Siamo in grado di controllare le nostre teorie sulla nucleosintesi confrontando le quantità previste di H e He con quantità riscontrate nelle stelle più antiche:

75% H  
25% He  
0,01% elementi più pesanti.

## Cap 3^: l'ipotesi dell'assenza di confini.

Nella seconda parte di questo post, pubblicata la scorsa settimana, ho raccontato la nascita negli anni '60 del '900 della cosmologia moderna quale scienza quantitativa, momento che coincide con la rilevazione della CMB, il fondo di radiazione - previsto in precedenza dai modelli teorici del "Big Bang caldo" - che permea tutto lo spazio e costituisce una eco lontana del periodo in cui l'universo primordiale divenne improvvisamente trasparente ai fotoni, circa 380.000 anni dopo il Big Bang.

Ho poi spiegato come le equazioni di campo della Relatività Generale di Einstein comportino la capacità, da parte della materia/energia, di incurvare lo spaziotempo, e dunque di generare una forza di gravità attrattiva: se non fosse all'opera una forza di segno contrario, che causa l'espansione dell'universo, quest'ultimo finirebbe prima o poi per collassare su se stesso.

LeMaitre e Fridman negli anni '20 giustificarono in questo modo i propri modelli di universo in espansione, ma sfuggì loro una conseguenza che Stephen Hawking coglierà oltre trent'anni dopo.



Dennis W. Sciama



Roger Penrose



Stephen W. Hawking

Nei primi anni '60, neo laureato ad Oxford, Hawking si trasferì a Cambridge dove venne assegnato quale dottorando a Dennis Sciama, un ex studente di Paul Dirac.

Sciama lo mise in contatto con Roger Penrose, che in quel periodo aveva pubblicato un breve articolo (di sole 3

pagine) dove dimostrava come il collasso gravitazionale di una stella di grande massa comporti necessariamente la creazione di una singolarità spaziotemporale, nascosta al mondo esterno da un orizzonte degli eventi: un buco nero. (Nella **figura 1** lo schizzo originale di Penrose).

Hawking, dopo averlo letto, intuì che, invertendo la direzione del tempo, il lavoro di Penrose poteva essere utilizzato per dimostrare come nel passato di un universo in espansione ci sia sempre una singolarità dove lo spaziotempo si pieghi sino al punto di rottura **(18)**.

*"Il tempo finisce all'interno dei buchi neri"*, affermava Penrose nel suo articolo;

Hawking, nella sua dissertazione di dottorato del 1966, aggiunse: *"il tempo inizia con il Big Bang"*.

Lo zero indicato sulla coordinata tempo che appariva nei modelli ipersferici di LeMaitre acquisiva così un significato fisico.

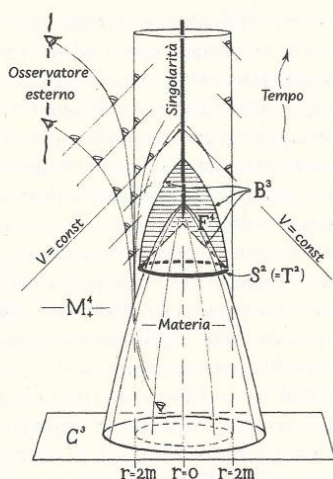
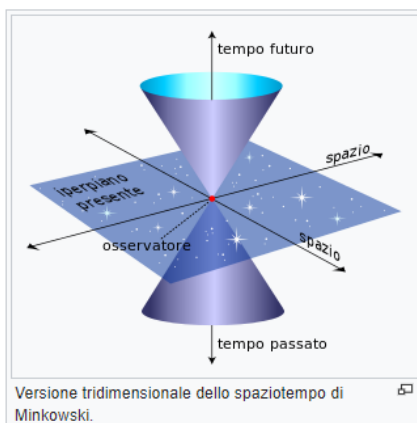


FIGURA 1 Il disegno, fatto da Roger Penrose nel 1965, del collasso di una stella con la formazione di un buco nero. Quando la stella si contrae, nello spazio vuoto che la circonda appare una superficie intrappolata, mostrata nella figura come l'anello nero al centro. In corrispondenza di tale superficie, nemmeno la luce può allontanarsi dalla stella. Penrose ha dimostrato su basi puramente matematiche che, a prescindere dalla forma della stella, l'emergere di questa superficie che intrappola la luce indica l'inevitabile formazione di un buco nero, con al centro una singolarità circondata da un orizzonte degli eventi cilindrico. All'interno del buco nero, l'inclinazione estrema dei coni di luce futuri significa che ci si dovrà continuare a muovere verso la singolarità; tuttavia, quell'inclinazione significa anche che un osservatore esterno non vede mai gli ultimi stadi del collasso, e men che meno la singolarità all'interno del buco nero.

Per capire l'importanza del risultato conseguito da Hawking dobbiamo introdurre il concetto di "cono di luce" di Minkowski.



Poiché nulla può viaggiare più veloce della luce, un evento accaduto in un luogo posto ad una distanza tale che la luce impieghi un minuto a raggiungerci potrà avere effetto su di noi non prima che tale intervallo di tempo sia trascorso.

Se ad esempio il Sole esplodesse, passerebbero circa 8 minuti - tempo necessario ai fotoni da esso emessi per completare il loro tragitto verso la Terra - in cui noi continueremmo a vedere la nostra stella con le medesime fattezze e sentirne il solito calore dei raggi (vivendo questo lasso di tempo ignari della catastrofe imminente).

Se ad esplodere in supernova fosse invece una stella appartenente alla galassia di Andromeda ce ne accorgeremmo soltanto tra milioni di anni, quando i fotoni testimoni di quel lontano evento ci raggiungeranno dopo un lunghissimo viaggio.

Il nome "**cono di luce passato**" si riferisce alla rappresentazione grafica del luogo dei punti dello spaziotempo, posti nel nostro passato, in corrispondenza dei quali eventi accaduti potrebbero determinare effetti causali sul nostro presente. (19)

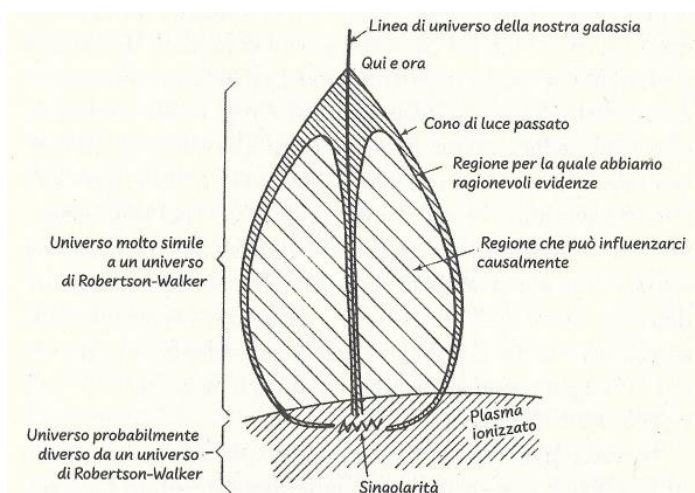


FIGURA 2 . Il disegno, fatto da George Ellis nel 1971, dell'universo osservabile e delle sue parti (quelle finemente ombreggiate) che possiamo osservare in modo più dettagliato. Noi ci troviamo in corrispondenza della punta superiore, dove c'è scritto «Qui e ora». La materia fa convergere i raggi di luce nel passato, piegando verso l'interno il nostro cono di luce passato e delineando così una regione a forma di pera: il nostro passato. Dato che la luce pone un limite di velocità cosmico, questa è l'unica parte dell'universo che, in linea di principio, possiamo osservare. Stando al teorema di Stephen Hawking, il concentrarsi dei raggi di luce nel passato significa che quest'ultimo deve terminare in una singolarità iniziale; tuttavia, noi non possiamo vedere direttamente fino alla singolarità perché, nel plasma ionizzato ultracaldo che riempie l'universo neonato, le particelle di luce si scontrano continuamente con tutte le altre cose sparpagliandosi nel processo di *scattering*, con il risultato di rendere opaco l'universo.

Hawking estendendo il cono di luce verso un passato remoto, quando l'universo era molto più piccolo e la densità di materia elevata, comprese che la curvatura impressa allo spaziotempo dalla materia contribuisce a "piegare verso l'interno il cono di luce al cui vertice - dalla parte opposta - siamo noi, delineando una regione a forma di pera" (vedi figura 2)

La deformazione dello spaziotempo, indotta dalla concentrazione di materia, ha effetto sulla forma del cono che viene "curvato" verso l'origine dell'espansione stessa, e cioè verso il luogo in cui è avvenuto il Big Bang: la base del cono (che rappresenta il passato), invece di allargarsi progressivamente, da un certo punto in poi inizia a stringersi rapidamente sino a "chiudersi in un punto" alla massima distanza possibile dal nostro presente. (20)

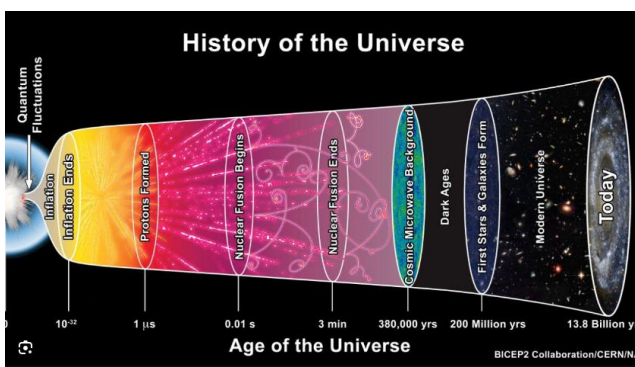
Punto fondamentale del teorema di Hawking:

*"... se la materia fa convergere i coni di luce passati, la storia non può estendersi all'infinito verso il passato, ma deve raggiungere un **bordo del tempo**, un confine in fondo al passato dove l'universo di spazio e tempo non esiste più ...".*

Come è possibile comprendere comparando la **figura n.1 e n.2**, il disegno di Penrose relativo alla **formazione di un buco nero** e quello fatto nel 1971 da George Ellis per Hawking relativo all'**universo osservabile** sono quasi simmetrici: un universo in espansione è simile ad un buco nero rivoltato e capovolto dove la singolarità all'inizio del tempo forma il margine "passato" del nostro cono di luce passato.

La differenza sta nel fatto che, mentre in un buco nero l'**orizzonte degli eventi** ripara un osservatore esterno dalla violenza della **singolarità** contenuta all'interno, nel caso del nostro universo la **singolarità del Big Bang** si trova all'interno del nostro **orizzonte cosmologico**.

La "pera" disegnata da Ellis rappresenta l'unica parte del nostro passato che possiamo osservare (almeno in linea di principio), e "contiene" la singolarità che ha rappresentato la nascita dell'universo. **(21)**



Tale visione ci è (almeno per il momento) preclusa in quanto l'universo primordiale era costituito da plasma ionizzato caldissimo che lo permeava ovunque.

I fotoni che venivano emessi si scontravano continuamente con le altre particelle presenti, spargendosi in un processo di "scattering", cui effetto era rendere opaco l'universo stesso. **(22)**

Ci vollero 380.000 anni, periodo durante il quale l'Universo continuò ad espandersi, perché la temperatura scendesse sotto i  $3000^\circ\text{C}$ , cosicché divenisse conveniente ai nuclei atomici combinarsi con gli elettroni e dar luogo agli atomi (epoca della **ricombinazione**): senza elettroni in libero movimento, i fotoni iniziarono a scorrazzare per tutto l'universo.

Le lunghezze d'onda di tali fotoni, per effetto dell'espansione dell'universo, si allungavano nel frattempo sino a 1000 volte, passando dalla luce rossa nella banda visibile sino ad arrivare all'attuale radiazione a microonde, che costituisce la **CMB**: ecco il vero motivo per cui il cielo notturno ci appare buio e non splendente **(23)**.

La mappa della CMB (oggi ricostruita in dettaglio grazie ai satelliti) rappresenta per noi un orizzonte che "nasconde" la singolarità del Big Bang, così come la fotosfera del Sole ci impedisce di vedere cosa accade al suo interno.

È tuttavia probabile che nel prossimo futuro si riesca ad ottenere informazioni su epoche antecedenti quella della **ricombinazione** utilizzando "messaggeri" diversi dalla radiazione elettromagnetica: candidati sono i neutrini e le onde gravitazionali.

L'analisi delle informazioni raccolte sulla CMB, che appare distribuita in modo uniforme in tutto lo spazio, pose subito un nuovo quesito che impensierì per decenni gli astrofisici: com'è possibile che

fotoni provenienti da direzioni opposte - dunque mai incontratisi prima del loro rilevamento - presentino una temperatura omogenea, con variazioni nell'ordine di 1/10.000 di grado? (vedi figura n.3).

**Il teorema della singolarità di Hawking** afferma che l'universo ha avuto un inizio, ma non da spiegazioni sul come né sul perché di tante sue caratteristiche biofiliche, tra le quali la quasi uniformità della CMB.

*"Le singolarità spaziotemporali che emergono dalla Relatività Generale" - scrisse Wheeler - "rappresentano la fine del principio di causa sufficiente e quindi della predicibilità e della fisica stessa."*

Se infatti il Big Bang segna il collasso di spazio e tempo, viene meno la relazione tra la causa (prima) e l'effetto (dopo), ciò che in fisica si usa per predire cosa avverrà.

La fisica utilizza due distinte fonti di informazione che, combinate, consentono di fare predizioni (sul futuro così come sul passato):

- **le leggi di evoluzione:** equazioni matematiche che prescrivono come i sistemi fisici cambino nel tempo, passando da uno stato all'altro;
- **le condizioni al contorno:** la descrizione dello stato di un sistema in un certo momento.

Ecco un esempio:

- la mela si è staccata dal ramo a 3 metri da terra ed è in caduta libera (condizioni al contorno);
- applico la legge di Newton (leggi di evoluzione);
- ricavo che la mela toccherà il terreno tra 0.7822 secondi (predizione)

Le leggi della fisica non spiegano perché in un dato momento le condizioni al contorno sono di un tipo e non di un altro.

Le condizioni al contorno cioè non discendono da una specifica legge: "*servono a delineare le particolari domande che poniamo alle leggi fisiche*" ci informa Hawking.

Mentre le leggi fisiche si applicano ad innumerevoli situazioni (hanno carattere universale), le condizioni al contorno specificano quale sia il caso particolare.

Benché una tale distinzione sia utile allo studio dei fenomeni della natura, quando arriviamo al Big Bang essa fallisce e diventa di intralcio: "*se non c'è un 'prima', chi stabilisce le condizioni al contorno?*" - si chiedeva Hawking - "*L'inizio dell'universo pone un problema di condizioni al contorno che noi non controlliamo.*" (24)

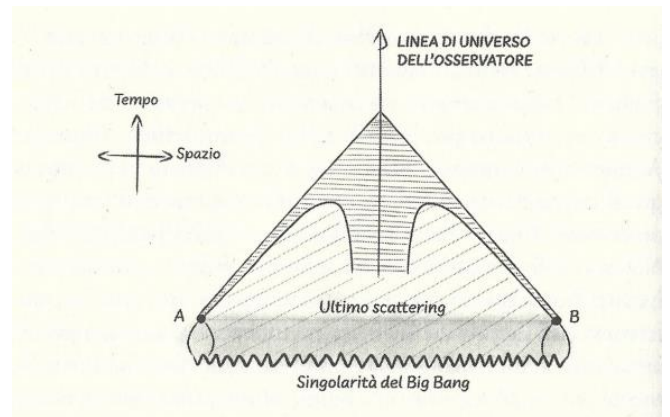


FIGURA 3 . Il nostro passato, stando al modello del Big Bang caldo degli anni Sessanta. Noi ci troviamo nel qui e ora alla sommità del cono. I fotoni dalla radiazione di fondo a microonde che ci raggiungono da direzioni opposte nel cielo hanno origine dai punti A e B sul nostro cono di luce passato. Ciascuno di questi punti si trova molto al di fuori dell'orizzonte cosmologico dell'altro; tornando indietro fino all'origine, i loro coni di luce passati - a forma di pera - non hanno mai modo di sovrapporsi. Tuttavia, osserviamo che le temperature dei fotoni che ci arrivano da A e da B coincidono con un margine di accuratezza di un millesimo dell'un per cento. Com'è possibile?

Hawking riteneva non fosse il Big Bang a dover rimanere off-limits per la scienza, quanto piuttosto la descrizione di Einstein, relativa ad uno spaziotempo malleabile, a venir meno in tali condizioni estreme:

*"immergendoci nel Big Bang la casualità su piccola scala della teoria quantistica sale alla ribalta: come se spazio e tempo volessero liberarsi dai vincoli strutturali imposti dalla teoria deterministica di Einstein".*

Come già aveva suggerito LeMaitre, poiché l'universo primordiale che emerge dal Big Bang ha dimensioni infinitesimali, sarà la teoria quantistica a prevalere e che dovremo usare per darne una descrizione.

L'**indeterminazione quantistica** è una proprietà fondamentale che pone limiti stringenti circa la quantità di informazioni che è possibile estrarre dai sistemi fisici. (25)

Comporta l'abbandono del **determinismo**, cioè dell'idea che la scienza sia in grado di fare predizioni precise e ben definite riguardo al futuro degli eventi: possiamo infatti predire soltanto la probabilità dei diversi possibili esiti delle misurazioni, e se effettuassimo più volte lo stesso esperimento otterremmo risultati diversi.

Senza approfondire in questa sede le vicende che hanno portato Schroedinger a scrivere l'**equazione della funzione d'onda**, ricordiamo che essa **non risolve il dualismo "leggi evoluzione / condizioni al contorno"** in quanto è sempre necessario specificare COSA si stia evolvendo.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t}(\mathbf{r}, t) = \hat{H}\Psi(\mathbf{r}, t)$$

"Se non c'è domanda non c'è risposta", scriveva Wheeler.



Richard Phillips Feynman



John A. Wheeler

Feynman, allievo di Wheeler, sviluppò negli anni '40 un modo pratico di pensare alle particelle quantistiche ed alla loro funzione d'onda: cioè di immaginarle quali oggetti localizzati - il loro viaggio parte da un punto ed arriva in un altro, come nel caso della fisica classica -, ma che invece di completare un unico tragitto tra la posizione di partenza e quella di arrivo, queste seguono simultaneamente ogni possibile percorso, ciascuno dotato di un suo grado di probabilità.

Quindi la predizione che una particella si trovi in un determinato punto viene espressa in forma probabilistica. (26).

Sviluppò nel 1948 un'alternativa a Schroedinger, un'equazione che costruisce la funzione d'onda di una particella sommando tutti i percorsi che terminano in un determinato punto (**l'Integrale sui cammini**); lo schema di interferenza che vediamo nell'esperimento della doppia fenditura è conseguenza del mescolarsi delle traiettorie appartenenti alla somma di Feynman che emergono dalle fenditure (27)

Ciò che è rilevante per la nostra storia è che dall'osservazione dello schermo non è possibile determinare attraverso quale fenditura sia passata la particella: esistendo molte storie simultaneamente, la teoria dei quanti limita ciò che possiamo dire del passato.

*"Il passato quantistico è intrinsecamente vago". (28)*

Il determinismo classico (una sola storia) "emerge" dal comportamento collettivo delle storie quantistiche microscopiche casuali.



James Hartle

Nei primi anni 70 Jim Hartle e Stephen Hawking utilizzarono questa tecnica per dimostrare l'esistenza della radiazione che porta il nome di quest'ultimo. (29)

Provarono poi ad applicarla anche allo studio della singolarità del Big Bang.

L'indeterminazione quantistica, applicata ad una particella, stabilisce che la sua posizione e velocità risultino un po' imprecise.

Se l'applichiamo invece allo spaziotempo, significa che spazio e tempo stessi risultino un po' vaghi, con fluttuazioni quantistiche che "spalmano" punti nello spazio e momenti nel tempo.

Nell'universo odierno gli effetti sono irrilevanti, ma nelle sue primissime fasi di vita, quando densità e curvatura erano enormi, gli effetti quantistici avrebbero **reso sfocata la distinzione tra spazio e tempo**: intervalli di spazio che talvolta si comportavano come intervalli di tempo e viceversa.

I due fisici ricavarono la somma di Feynman su questa "vaghezza spaziotemporale" ottenendo la **funzione d'onda dell'universo. (30)**

Il risultato fu l'intuizione che gli effetti quantistici, avvicinandoci al Big Bang, avrebbero impedito la singolarità prevista dalla Relatività Generale (curvatura e densità infinita), trasformando la dimensione temporale in una spaziale.

In **figura n. 4** una comparazione grafica tra le predizioni della teoria di Einstein - dove, al fondo del cono capovolto, troviamo la singolarità presso cui le leggi della fisica perdono validità -, e la teoria quantistica di Hartle-Hawking, dove invece il cono termina con una punta arrotondata a forma di scodella.

L'idea della coppia di fisici è che la sfocatura di spazio e tempo farebbe ruotare la direzione verticale del tempo trasformandola in una direzione spaziale orizzontale.

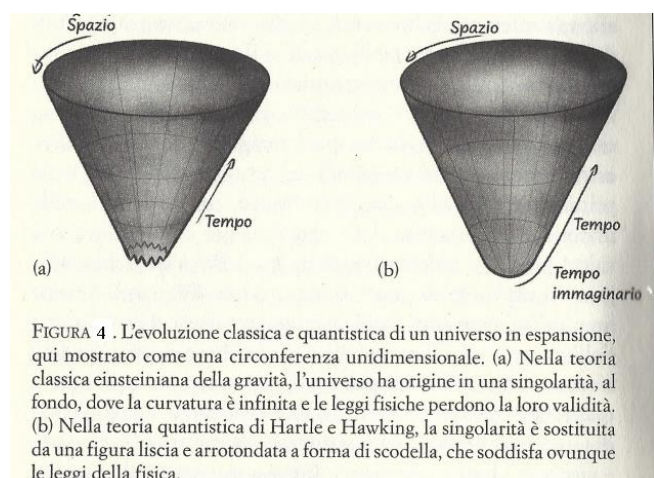


FIGURA 4 . L'evoluzione classica e quantistica di un universo in espansione, qui mostrato come una circonferenza unidimensionale. (a) Nella teoria classica einsteiniana della gravità, l'universo ha origine in una singolarità, al fondo, dove la curvatura è infinita e le leggi fisiche perdono la loro validità. (b) Nella teoria quantistica di Hartle e Hawking, la singolarità è sostituita da una figura liscia e arrotondata a forma di scodella, che soddisfa ovunque le leggi della fisica.

Caratteristica importante di tale superficie bidimensionale a scodella, liscia ed arrotondata, è che soddisfa ovunque le leggi della fisica.

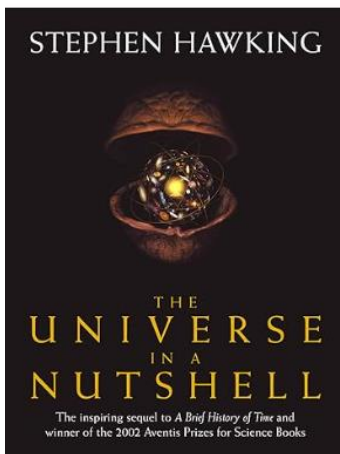
Un universo in espansione non avrebbe quindi alcuna singolarità nel proprio passato in quanto la dimensione tempo, procedendo in direzione del "passato", si dissolverebbe nella vaghezza quantistica: divenendo dunque spazio il tempo, non avrebbe alcun significato chiedersi cosa ci fosse prima.

"Chiedersi cosa sia venuto prima del Big Bang sarebbe come chiedersi cosa ci sia a Sud del Polo Sud".

Hawking ed Hartle battezzarono la propria cosmogenesi quantistica "**ipotesi dell'assenza di confini**" (No boundary proposal). (31)

Tale ipotesi presenta due proprietà:

- il passato è finito (la base arrotondata della scodella ne segna il limite);
- non esiste un momento in cui "*il tempo viene acceso*" (niente istante della creazione).



Hawking vedeva l'universo neonato come un guscio di noce nella propria mano.

Il titolo del secondo libro divulgativo di Hawking, "**The universe in a nutshell**", prende spunto dall'Amleto di Shakespeare, là dove il protagonista afferma:

*"potrei esser rinchiuso in un guscio di noce e tuttavia ritenermi re dello spazio infinito"*

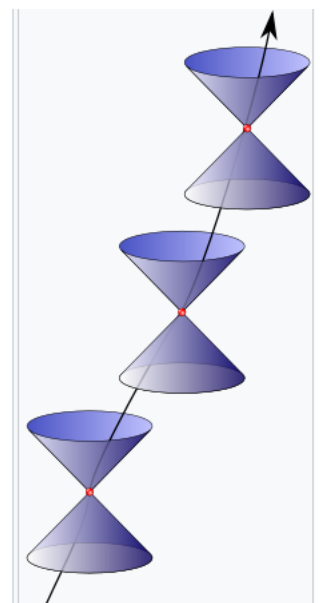
L'approccio alla gravità quantistica, sviluppato da Hawking e dai suoi allievi a Cambridge, si basava ancora sul linguaggio geometrico di Einstein, ma invece di trattare di spaziotempo incurvato dotato di 3 dimensioni spaziali ed una temporale, utilizzava forme curve in 4 dimensioni spaziali, senza una direzione temporale.

Vediamo in dettaglio cosa significhi e cosa comporti.

Nella teoria della Relatività spazio e tempo, seppur unificati nello spaziotempo quadridimensionale, rimangono in realtà cose differenti: infatti mentre la freccia del tempo punta ovunque all'interno del cono di luce futuro, così non succede con le direzioni spaziali.

Hawking riteneva che "*le geometrie curve con 4 dimensioni spaziali avrebbero dovuto incapsulare le proprietà quantistiche profonde della gravità*" (e difatti il suo programma di ricerca divenne noto come **approccio euclideo alla gravità quantistica**).

Dal punto di vista della geometria, trasformare il tempo in spazio significa effettuare una rotazione di 90° della direzione del tempo: sul fondo della scodella in figura 4, il tempo "inizia a scorrere" sul piano orizzontale (come la dimensione circolare dello spazio) per poi risalire in verticale.



La linea di universo percorsa da un corpo nello spaziotempo di Minkowski. Il corpo viaggia in direzione 'tempo futuro' e la direzione limite è tangente alle superfici dei coni quando il corpo viaggia alla velocità della luce.



Tale rotazione è spesso descritta come "**rendere immaginario il tempo**" in quanto matematicamente si ottiene **moltiplicando il tempo per radice quadrata di -1**, ottenendo così un numero immaginario.

Certo, in un tempo immaginario "*qualunque concetto soggettivo di tempo collegato alla coscienza o alla capacità di compiere misurazioni verrebbe a finire*" affermava Hawking.

Grazie ad operazioni come questa, lavorando con le forme euclidee dei buchi neri, Hawking fu in grado di comprendere perché questi ultimi irradiano particelle quantistiche come i comuni corpi caldi con una determinata temperatura. (32)

Tale successo lo portò ad affermare:

*"si potrebbe assumere la posizione secondo la quale la gravità quantistica, e di fatto l'intera fisica, sia realmente definita nel tempo immaginario; il fatto che interpretiamo l'universo nel tempo reale è semplicemente una conseguenza della nostra percezione"*. (33)

Il succo della questione è che secondo Hawking all'inizio dell'universo il tempo non c'era: l'ipotesi **assenza di confini** risolve il **problema delle condizioni al contorno** allo zero del tempo eliminando l'istante "zero".

Tuttavia si manifestava una spiacevole conseguenza: tale ipotesi non ci diceva nulla su cosa possa succedere in assenza del tempo, né su quale sia il tipo di microscopica schiuma quantistica che, una volta sommata, produce questa geometria a scodella.

(Continua)

### **Note:**

(18) Usando l'equazione della Relatività Generale, Hawking mostrò che procedendo indietro nel tempo i valori assunti da entrambe le sue parti (a destra ed a sinistra del segno di eguale) raggiungono l'infinito: una curvatura infinita dello spazio corrisponde ad una densità infinita della materia.

(19) Come si ottiene un cono di luce?

Disegniamo su un foglio un punto che rappresenta la nostra posizione "adesso".

Su un altro foglio una circonferenza quale luogo dei punti che distano dal centro ad esempio 300.000 km (percorso completato dalla luce in un secondo)

Su un altro ancora una circonferenza i cui punti distano dal centro 600.000 km; e così via.

Otterremo, sovrapponendo tali fogli, un cono al cui vertice ci siamo noi ORA (il punto iniziale) e scendendo verso il basso (muovendoci verso il nostro passato) circonferenze sempre più larghe mano a mano che torniamo indietro nel tempo.

Solo quanto giace sui punti che costituiscono la superficie del cono o il suo interno possono produrre effetti sul nostro presente.

Tutto ciò che sta fuori, essendo la velocità della luce limitata, avrà bisogno di altro tempo.

Un discorso simmetrico si applica al futuro: possiamo infatti disegnare un "cono di luce futuro" a partire dal punto "noi oggi": la nostra "linea di universo" potrà snodarsi solamente all'interno di esso (in quanto non possiamo spostarci più veloci della luce).

**(20)** Tale distanza oggi è stimata in 13.8 miliardi di anni.

Le rocce ritrovate sul nostro pianeta ne datano la nascita 4.6 miliardi di anni fa; l'età dell'universo supera quindi di 3 volte l'età della Terra.

**(21)** Alcuni studi hanno provato a calcolare il raggio di un orizzonte degli eventi per un buco nero di massa pari a quella del nostro universo, ed il risultato è vicino a 13 miliardi di Anni Luce, un valore simile alla distanza che ci separa dal Big Bang.

Qualcuno ha allora ipotizzato che il nostro universo possa essere l'interno di un buco nero.

Vedi il video disponibile su Youtube "[Odifreddi dialoga con Tonelli su i tempi, i buchi neri e gli universi](#)", dal minuto 51.20

**(22)** Un fenomeno simile verrebbe riscontrato da un ipotetico osservatore che si trovasse all'interno del nostro Sole: lì i fotoni vengono continuamente emessi e riassorbiti con il risultato di creare una nebbia luminescente che avvolge tutto quanto.

Solo quando i fotoni raggiungono (dopo un lunghissimo tempo) la fotosfera, diventano finalmente liberi di muoversi e di viaggiare nello spazio.

**(23)** Qualora l'evoluzione ci avesse dotati di organi di vista in grado di percepire la radiazione nella banda delle microonde, vedremmo ancor oggi il cielo notturno splendente.

**(24)** Hawking, che si era da tempo reso conto del problema, già nella propria tesi di dottorato scriveva:

*«Uno dei punti deboli della teoria della relatività di Einstein è dato dal fatto che, anche se ci fornisce le equazioni di campo dinamiche, non ci indica le condizioni al contorno da usare con esse; per questo motivo, la teoria di Einstein non ci dà un unico modello di universo.*

*È chiaro che una teoria che ci fornisse le condizioni al contorno sarebbe molto allettante. [...] La teoria di Hoyle fa proprio questo.*

*Purtroppo, le sue condizioni al contorno escludono quegli universi che sembrano corrispondere all'universo reale, ossia i modelli in espansione».*

A 15 anni dalla pubblicazione della sua tesi, chiamato nel 1979 a ricoprire la cattedra Lucasiana, tornò sull'argomento nella lezione inaugurale "*Is the end in sight for theoretical Physics?*":

*«Una teoria completa include, oltre ad una teoria delle dinamiche, anche un insieme di condizioni al contorno.*

*Molte persone sosterranno che il ruolo della scienza sia confinato al primo di questi elementi e che la fisica teorica avrà raggiunto il suo obiettivo quando avremo ottenuto un insieme di leggi dinamiche locali.*

*Ai loro occhi, la questione delle condizioni al contorno dell'universo appartiene al regno della metafisica o della religione.*

*Noi, però, non avremo una teoria completa fino a quando potremo fare qualcosa di più che limitarci a dire che le cose sono così come sono perché erano così come erano».*

(25) Vedi il principio di indeterminazione di Heisenberg.

(26) Commentando l'iconico esperimento a doppia fenditura, Feynman affermò:

*«L'elettrone fa tutto quello che gli piace. Semplicemente, va in ogni direzione e a qualunque velocità, avanti o indietro nel tempo, come gli pare; voi dovete poi sommare le ampiezze dei loro percorsi ed ottenete la funzione d'onda».*

Per predire la probabilità che un elettrone arrivasse in un dato punto dello schermo, Feynman associava ad ogni percorso un numero complesso che specifica il suo contributo alla probabilità ed anche il modo in cui interferisce con i percorsi vicini.

(27) Il numero complesso assegnato a ciascuna traiettoria significa che i differenti percorsi possono rafforzarsi o indebolirsi a vicenda, come i frammenti d'onda.

(28) Quella di Feynman è divenuta nota come la "**formulazione a molte storie**".

(29) Vedi il mio post "Leonard Susskind e la sua guerra per la salvezza della Meccanica Quantistica" pubblicato in 5 parti nello scorso mese di dicembre.

(30) "Wave function of the Universe", J. B. Hartle and S. W. Hawking, Phys. Rev. D 28, 2960 – 15 December 1983

(31) Hawking ed Hartle presentarono l'articolo relativo alla "no boundary proposal" per la pubblicazione su Physical Review del luglio 1983.

Un primo referee suggerì di non pubblicarlo perché veniva applicata all'intero universo una estrapolazione della somma sulle storie di Feynman.

Decisero poi per la pubblicazione in quanto si trattava di un lavoro "determinante".

Trasformava infatti il manifesto del 1931 di LeMaitre - che chiedeva l'adozione di una prospettiva quantistica sull'origine del Big Bang - in una ipotesi scientifica.

(32) La geometria di un buco nero quantistico nel tempo immaginario ha la forma di un sigaro adagiato su un piano (**Figura 5**), e muoversi in avanti nel tempo immaginario corrisponde a girarci attorno.

All'estrema sinistra, un punto che rappresenta l'orizzonte del buco nero.

La rotondità della punta è correlata alla grandezza della dimensione circolare del tempo immaginario, che a sua volta determina la temperatura del buco nero e dunque l'intensità della radiazione di Hawking che viene emessa nel tempo reale.

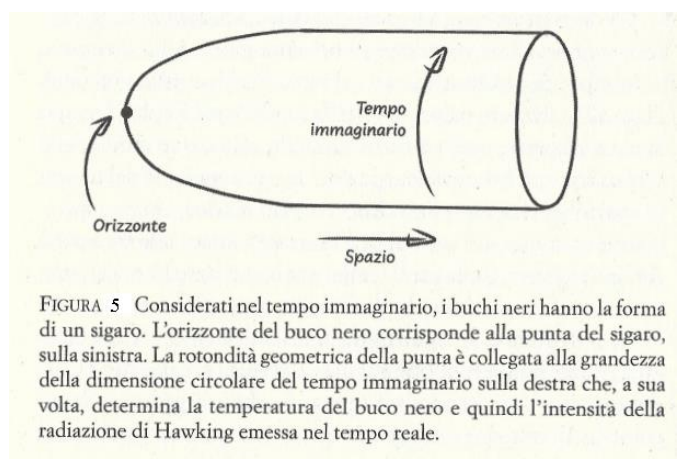


FIGURA 5 Considerati nel tempo immaginario, i buchi neri hanno la forma di un sigaro. L'orizzonte del buco nero corrisponde alla punta del sigaro, sulla sinistra. La rotondità geometrica della punta è collegata alla grandezza della dimensione circolare del tempo immaginario sulla destra che, a sua volta, determina la temperatura del buco nero e quindi l'intensità della radiazione di Hawking emessa nel tempo reale.

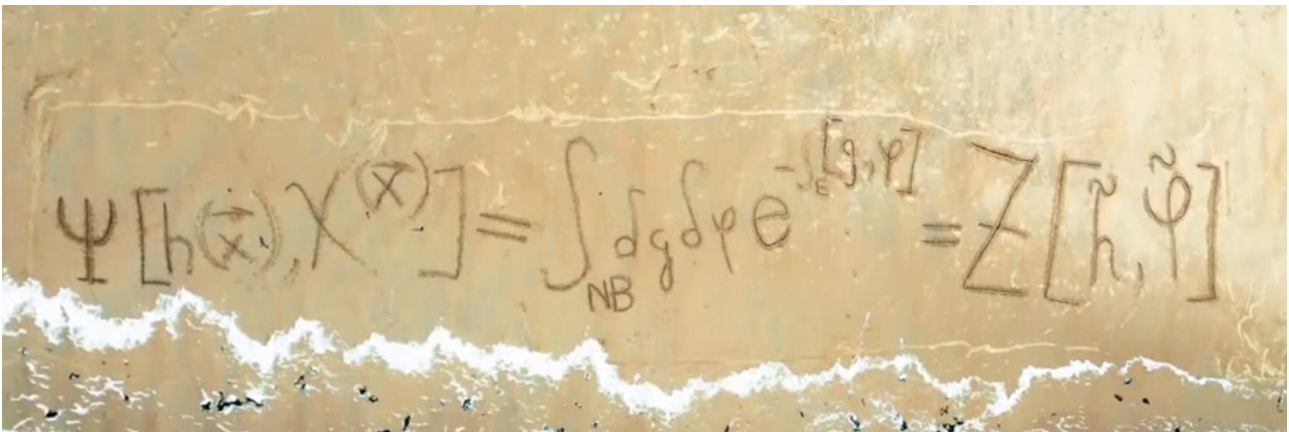
Come possiamo vedere non c'è alcuna singolarità, ovunque le leggi quantistiche della fisica sono rispettate.

Il diametro del sigaro specifica la temperatura del buco nero, come viene misurata da un osservatore remoto.

E' una relazione inversa: più grande è il diametro, minore sarà la temperatura del buco nero.

(33) In meccanica quantistica ordinaria (senza la gravità) si usa la rotazione del tempo in spazio per calcolare le somme di Feynman sulle storie delle particelle perché semplifica i calcoli; al termine del calcolo si ruota nuovamente la dimensione spaziale ricavata dalla rotazione iniziale del tempo per riottenere il tempo reale.

Ma nelle intenzioni di Hawking questo "ritorno" sarebbe superfluo.



$$\Psi[h(\vec{x}), X(\vec{x})] = \int_{NB} dg d\varphi e^{-iS[g, \varphi]} = Z[\tilde{h}, \tilde{\varphi}]$$

## Cap 4<sup>^</sup>: la teoria dell'inflazione e lo stato di Hartle-Hawking.

Nella parte precedente abbiamo trattato dello **stato di Hartle-Hawking**, noto anche come **ipotesi assenza di confini** (“**no boundary proposal**”), una teoria **semi-classica** (che cioè mescola Relatività e Fisica Quantistica) sviluppata da Hawking ed Hartle a partire dal 1983.

Tale "**cosmogenesi quantistica**" sebbene permetta di schivare la domanda “*cosa c'era prima del Big Bang?*”, non è tuttavia in grado di fornire informazioni su cosa possa succedere in una condizione di assenza del tempo, né quale possa essere il tipo di microscopica schiuma quantistica che, una volta sommata, dia luogo alla "**geometria a scodella**" caratteristica di tale modello.

Negli anni in cui Hawking ed Hartle stavano sviluppando il loro modello cosmologico, la **teoria classica del Big Bang caldo** (proposta da Friedmann a partire dalle equazioni della Relatività Generale) aveva già conseguito una importante conferma sperimentale: verso la metà degli anni '60 Penzias e Wilson avevano infatti fortunatamente rilevato la diffusa presenza della radiazione cosmica di fondo a microonde, la **CMB**, la cui esistenza era stata predetta da Alpher e Gamow alla fine degli anni '40. (34)

Nonostante il successo del modello di Friedmann, parecchi aspetti dell'universo in cui ci troviamo a vivere rimanevano privi di una spiegazione soddisfacente:

- **Perché esistono pianeti, stelle e galassie?** Il Big Bang, secondo il modello originale, avrebbe dovuto dar luogo ad una sfera di plasma omogenea che, raffreddatasi in seguito all'espansione, avrebbe mantenuto tale caratteristica. Tuttavia un Universo perfettamente identico in ogni sua parte contrasta con la nostra esperienza di diversi gradi di aggregazione della materia: vuoto, nubi di idrogeno, pulviscolo e corpi celesti (che a loro volta danno luogo ad enormi strutture quali le galassie e gli ammassi). Piccole fluttuazioni dovevano dunque esser presenti sin dall'inizio, quando tutta la materia e l'energia si trovavano concentrate in un volume ridottissimo. (35)
- **Che cosa ha provocato il Big Bang?** Da dove proveniva il gas caldo che si stava espandendo? (il cosiddetto **problema del Bang**).
- **Perché le equazioni utilizzate da Friedmann**, che indicavano come - a partire da un certo istante **t(1)** - l'universo si stesse espandendo così rapidamente da raddoppiare le proprie dimensioni ogni secondo, **forniscono predizioni assurde** spostandosi nel tempo 1/3 di secondo prima di **t(1)**? (Al tempo "t-1/3 di secondo" la densità dell'universo risulta esser pari ad infinito, ed ogni cosa in reciproco allontanamento a velocità infinita).
- **Perché le misure della temperatura del fondo a microonde risultano ovunque pressoché uniformi (fino alla quinta cifra decimale)?** Succede pure in relazione a regioni del nostro cielo così distanti tra di loro da risultare impossibile ci sia stato un reciproco scambio di informazioni in quanto la luce, dal momento della nascita dell'Universo ad oggi, non avrebbe fatto in tempo a raggiungerle. (36)
- **Perché l'universo sembra essere "piatto" intorno a noi?** (37)

Hawking era consapevole del fatto che anche la sua nuova teoria messa insieme nei primi anni '80, pur attingendo ad elementi della meccanica quantistica (lo "stato di Hartle-Hawking" vede l'universo nascere "dal nulla", da una regione di grandezza infinitesimale di puro spazio), non

riusciva a dar giustificazione delle minuscole differenze di temperatura rilevate nella mappa della CMB, disegnata grazie alle informazioni fornite dal satellite COBE.

### La teoria dell'inflazione cosmica.

Nello stesso periodo, nel tentativo di dare una risposta a questi interrogativi, **Aleksej Starobinskij**



Alexei Starobinsky

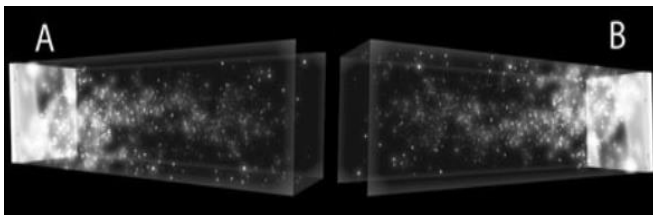
ed **Alan Guth** - cui si aggregarono in seguito Andrej Linde, Paul Steinhardt ed Andreas Albrecht - svilupparono in modo indipendente la **teoria dell'inflazione cosmica**, secondo la quale nell'universo primordiale vi fu un brevissimo "**scatto di espansione**" dello spazio a velocità iperluminare.



Alan Guth

Nella sua formulazione originale, in un tempo infinitesimale (circa  $10^{-30}$  secondi) il nostro universo avrebbe visto aumentare le proprie dimensioni di un fattore pari a  $10^{30}$ , superiore a quello relativo a tutti i 13.8 miliardi di anni successivi. **(38)**

In virtù di questo "scatto", tutto l'universo osservabile risulterebbe aver avuto una comune origine



causale (sarebbe cioè compreso nel nostro cono di luce del passato): regioni oggi lontanissime sarebbero dunque state a contatto prima dello scatto inflazionario, e poi, una volta esauritosi quest'ultimo, ne sarebbero emerse quasi identiche ovunque.

Tale ipotesi rappresentava una valida soluzione al **problema dell'orizzonte** di cui tratta la **nota 36**.

Responsabili di questo "scatto" sarebbero stati i **campi scalari**, forme esotiche di materia che riempiono lo spazio. **(39)**

Alcuni di essi, quale ad esempio il campo di Higgs (il cui bosone corrispondente è stato individuato al CERN nel 2012), sono previsti dal Modello Standard della fisica delle particelle.

Seppur sinora non risulti ancora identificato, è stato dato il nome di **inflatone** a quello responsabile dell'inflazione. **(40)**

Mentre il valore di una **costante cosmologica** (come quella introdotta da Einstein) rimane appunto "costante nel tempo", quello del **campo inflatone** è soggetto a cambiamenti: tale sua caratteristica può fornire una spiegazione sia all'accensione dello scatto inflazionario che al suo seguente spegnimento. **(41)**

Nel momento in cui si esaurisce lo scatto inflazionario, il campo inflatone - a causa dell'espansione dello spazio- si trova ad aver immagazzinato una quantità di energia enorme che viene trasformata in calore: l'universo, trovatosi pieno di radiazione calda, ne vede una parte trasformarsi in materia secondo la nota equazione  $E=mc^2$ . **(42)**

Infine, ecco la spiegazione proposta da questa teoria circa la presenza delle piccole differenze di temperatura rilevate nella CMB.

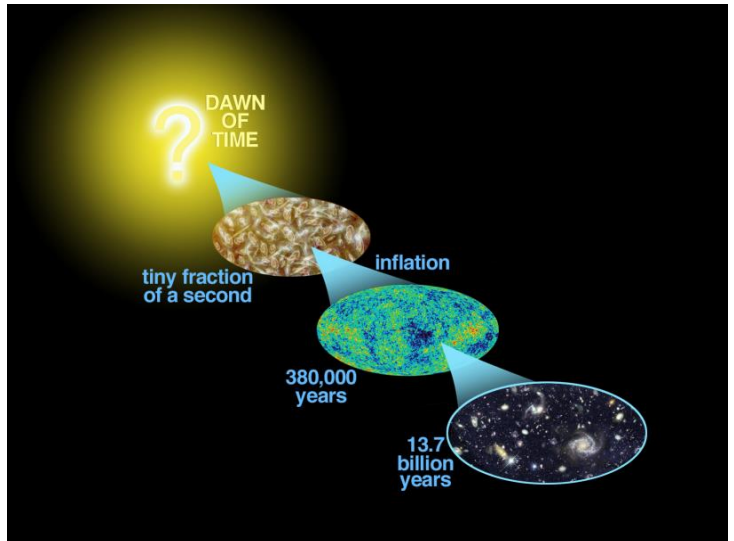
Essendo l'inflatone un campo quantistico, esso è soggetto al principio di indeterminazione di Heisenberg ("l'irriducibile vaghezza quantistica") e dunque a fluttuazioni quantistiche (43):

*"... lo scatto d'inflazione amplifica tali fluttuazioni microscopiche traghettandole nel macrocosmo: all'uniformità generale dell'universo in espansione si sovrappone così uno schema ondulatorio di variazioni del campo, simile alle increspature che si formano sulla superficie di uno stagno in quiete sino a quel momento quando vi cade un sasso ..."*

Al termine dell'inflazione, quando l'inflatone rilascia la sua energia trasformata in calore, le piccole variazioni originali vengono ereditate dal gas caldo che riempie l'universo appena nato.

Per tale ragione, qualunque tipo di universo venga ad emergere dall'inflazione, esso risulta necessariamente punteggiato di piccole irregolarità, sia nella temperatura della radiazione che nella densità della materia.

Di pari passo con il rallentamento dell'espansione del cosmo, una quantità sempre maggiore di queste increspature primordiali - che oggi possiamo osservare come differenze di temperatura nella mappa della CMB - entra nel nostro orizzonte cosmologico, diventando così rilevabile dai nostri strumenti.



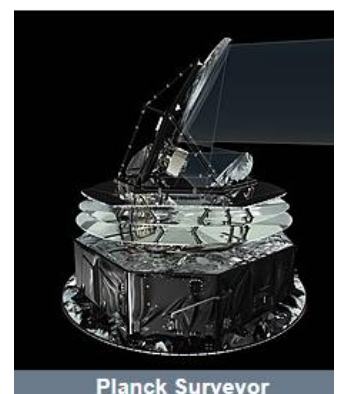
Tali differenze di densità della materia sono i semi intorno ai quali si sono sviluppate le galassie: infatti le zone dove la densità era inferiore sono state progressivamente svuotate dalla gravità esercitata dalla materia presente in quelle circostanti (creazione di zone di vuoto).

La materia così "rubata" è confluita là dove la densità era più elevata, contribuendo ad aumentarla ulteriormente.

Questo è il meccanismo che ha prodotto la vasta rete di galassie che oggi osserviamo.

Predizione della teoria dell'inflazione era dunque la presenza di uno schema riconoscibile, impresso dall'inflazione stessa, nelle fluttuazioni di temperatura della CMB; si trattava di attendere l'avvento di una tecnologia capace di realizzare uno strumento sufficientemente sensibile in grado di tracciarne una mappa da confrontare con i valori attesi.

Le informazioni dettagliatissime fornite dal satellite Planck - che dal 2009 per 15 mesi ha raccolto i fotoni della radiazione fossile - confermarono le previsioni (44):



**la meccanica quantistica risultava dunque essenziale anche per la cosmologia.**

Fluttuazioni sono pure all'origine di un altro fenomeno quantistico che era stato in precedenza descritto da Hawking: la radiazione che porta il suo nome e che si manifesta nei pressi dell'orizzonte di un buco nero (45)

Possiamo considerare le macchie ed i puntini che appaiono sulla mappa della CMB come un corrispondente cosmologico della radiazione di Hawking:

*"... la storia di un universo in espansione è quindi simile a quella di un buco nero rivoltato dall'interno; l'espansione inflazionaria amplifica le fluttuazioni quantistiche associate all'orizzonte cosmologico che ci circonda provocando uno 'sfarfallamento leggero' dell'universo nella banda di frequenza delle microonde.*

*L'inflazione predice cioè che siamo immersi in un mare di radiazione di Hawking ..."* - afferma Hertog.

Possiamo pensare alla mappa della CMB come ad un disegno che tappezzi completamente la superficie interna di una sfera che ha noi come centro ed il cui raggio sia pari a 13.8 miliardi di anni luce, la distanza a cui si trova il nostro attuale orizzonte cosmologico: fotoni originati a distanze maggiori non hanno ancora avuto il tempo di raggiungerci perché questa è l'età dell'universo oggi. **(46)**

La teoria dell'inflazione offre un'ulteriore predizione: l'esistenza di un fondo di onde gravitazionali, **le onde gravitazionali primordiali.**

Diffusesi nell'universo sin dal momento della sua nascita, la loro attuale lunghezza d'onda, in conseguenza dello stiramento dovuto all'espansione dello spazio, risulta decisamente esclusa dalle possibilità di rilevazione da parte degli attuali interferometri.

Tuttavia potrebbero esser individuate tracce della loro esistenza in maniera indiretta, analizzando la polarizzazione dei fotoni della CMB: nel tragitto seguito dalle origini sino ai nostri strumenti questi fotoni "fossili" hanno viaggiato attraverso una geometria leggermente ondeggiante che ne dovrebbe aver influenzato la polarizzazione.

Sono attualmente in sviluppo parecchi progetti cui fine è la ricerca di tale impronta. **(47)**

Rimaneva senza risposta una domanda fondamentale: **che cosa può aver dato via all'inflazione?**

L'ipotesi **assenza di confini** di Hawking ed Hartle predice l'universo abbia avuto origine da uno scatto inflazionario: il processo di creazione senza confini (la chiusura del fondo della scodella) richiede la presenza di una materia esotica scalare che eserciti una pressione negativa, la stessa la cui esistenza è prevista dalla teoria dell'inflazione.

Un universo creato dal nulla, secondo le regole dell'ipotesi di Hawking, ha più probabilità di entrare nell'esistenza con un breve scatto di espansione inflazionaria per poi rallentare, e ciò costituirebbe una proprietà strutturale dell'evoluzione cosmologica.

L'innovazione apportata dal modello Hawking-Hartle alla teoria dell'inflazione sta nel fatto che mentre quest'ultima ritiene esserci stato **prima** il Big Bang e solo **in seguito** l'inflazione (due eventi distinti), nel caso dell'ipotesi "assenza di confini" è previsto **un unico evento**: l'inflazione risulta già integrata nel processo fisico che crea il tessuto spaziotemporale, è essa stessa "l'inizio". Dunque non è più necessario cercarne una causa prima.

Nonostante l'eleganza di tale soluzione, un grave problema divenne immediatamente evidente: l'ipotesi assenza di confini predice un piccolo scatto inflazionario, "un soffio" lo definì Hawking:



del tutto insufficiente a giustificare un universo pieno di materia e galassie come quello che osserviamo oggi.

Questo fu il motivo per cui la comunità dei fisici che si occupavano di cosmologia accolse con freddezza tale modello. (48)

Il problema di individuare l'origine dell'inflazione è legato alla direzionalità della freccia del tempo: quest'ultima emerge dalla tendenza del disordine ad aumentare sempre, fenomeno indicato col termine **entropia**. (49)

L'entropia al passare del tempo può quindi soltanto aumentare; è stato così persino durante l'inflazione.

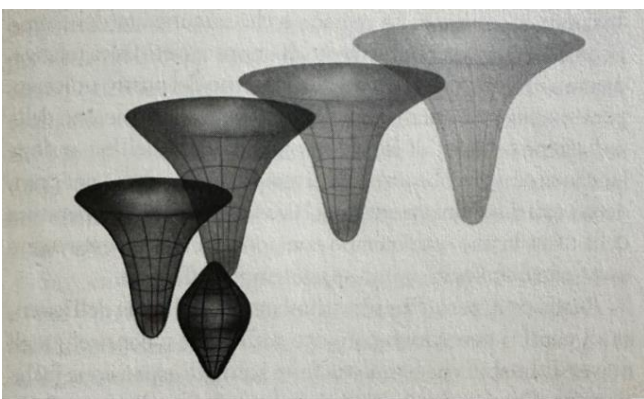
Se tale affermazione è corretta ne consegue che, alle sue origini, il nostro universo doveva possedere un livello di entropia incredibilmente basso: si tratta di una misteriosa **proprietà biofilica** cui non sappiamo dar spiegazione.

La "proposta assenza di confini" predice invece un livello di entropia intermedio (50): è dunque la seconda legge della termodinamica ad invalidare senza appello il modello di Hawking ed Hartle.

Prima di arrendersi all'evidenza, i due fisici si misero a riflettere sulla natura quantistica di tale ipotesi; implicando un'origine "un po' vaga" del cosmo, essa permette di scrivere una **funzione d'onda dell'universo**.

Così come accade con la funzione d'onda di un elettrone, che racchiude un'amalgama di traiettorie dello stesso, "... un universo quantistico non è costituito da un singolo spazio in espansione, ma dall'insieme di tutte le diverse possibili storie di espansione che vivono in uno stato di sovrapposizione, ognuna con il proprio grado di probabilità." - affermava Hawking.

"... la funzione d'onda dell'assenza di confini copre un vasto assortimento di universi inflazionari, ciascuno con un diverso valore di partenza dell'inflatone ...".



Nella meccanica quantistica, la funzione d'onda di una particella contiene un amalgama di tutte le possibili traiettorie di tale particella. Analogamente, la funzione d'onda dell'universo nella cosmologia quantistica descrive una collezione di tutte le possibili storie di espansione. A un primo sguardo, la forma della funzione d'onda dell'universo nell'ipotesi dell'assenza di confini di Hawking è dominata dagli universi che hanno un piccolo scatto di inflazione e poi ricollassano rapidamente su se stessi. Gli universi con un forte scatto di inflazione, che formano galassie e diventano abitabili, non sono completamente esclusi dalla teoria, ma sono comunque a malapena visibili, risiedendo nell'estremità della coda della funzione d'onda.

Sebbene tale funzione d'onda assegni alle storie in cui sia presente uno scatto inflazionario di entità simile a quello rilevato per il nostro universo una piccolissima probabilità, queste non sono escluse dall'esistenza; semplicemente trovano collocazione nell'estremità della sua coda.

Altra importante conseguenza coinvolge la variabile tempo.

Il fatto di raccogliere tutte insieme le diverse storie di espansione significa che la funzione d'onda, presa nel suo complesso, non cambia al passare del tempo.

Nella cosmologia quantistica **il tempo perde il suo significato come principio organizzativo fondamentale, e viene dimenticato**: lo spaziotempo risulta infatti quantomeccanico e fluttuante, dunque non ci rimane nulla a disposizione che possa funzionare come orologio universale.

Il tempo emerge quindi solo come qualità intrinseca all'interno di ciascun singolo spazio in espansione, in quanto la sua misura richiede sempre il cambiamento di una proprietà fisica relativamente ad un'altra.

Per esempio, nel nostro universo potremmo usare come misura del tempo il raffreddamento monotono della CMB con il procedere dell'espansione del cosmo; ma un "orologio" di tal guisa non avrebbe senso se usato in uno spaziotempo differente.

Nel 1997 Stephen Hawking insieme a Neil Turok tentarono un ultimo disperato salvataggio della teoria cooptando il **principio antropico**.



Neil Geoffrey Turok

*"Dobbiamo davvero aspettarci di vivere nell'universo più probabile?" - si chiedeva Hawking.*

*"Anche se universi come il nostro si trovano all'estremità della coda dell'onda di probabilità, ciò che importa è che vi dimori un osservatore, cosa impossibile laddove non ci siano galassie; quindi quello che davvero conta non è ciò che sia più probabile nella teoria, ma ciò che sia più probabile venga osservato." (51)*

Tale difesa naufragò quando si rese conto che, pur integrando il principio antropico, l'ipotesi assenza di confini arrivava al massimo a predire la formazione di un universo con un'unica galassia.

Nel frattempo due giovani fisici russi stavano provando a riconsiderare la questione da un altro punto di vista ...

(continua)

### **Note:**

(34) La teoria del Big Bang caldo predice infatti la presenza di tre "residui" (**relics**) dell'universo primordiale in grado di offrire preziose informazioni su quel lontano periodo:

- abbiamo già detto della **CMB**, la **radiazione cosmica di fondo a microonde** (individuata a  $2,73^\circ\text{K}$ ), che ci fornisce un'istantanea dell'universo all'età di appena 379.000 anni, quando ancora la sua temperatura era pari a  $3000^\circ\text{K}$ . Grazie al satellite Planck, dal 2009 disponiamo di una sua mappa dettagliata;
- il **fondo cosmico di neutrini** (indicato con le sigle **CvB** o **CνB**, cosmic neutrino background, e che dovremmo trovare a  $1,95^\circ\text{K}$ ) si è formato circa un secondo dopo il Big Bang. Finora - purtroppo - non è stato possibile rilevare traccia di questi "neutrini fossili" che sappiamo trasportare informazioni sull'universo quando aveva soltanto pochi istanti di vita ed una temperatura elevatissima, pari a  $10^{10}^\circ\text{K}$ ;
- infine il **fondo di gravitoni cosmici** (indicato dalla sigla **CGB**, Cosmic Graviton Background) che si pensa essersi formato al tempo di Planck, cioè  $10^{-42}$  secondi dopo il Big Bang, quando la temperatura dell'universo era immensa, pari a  $10^{32}^\circ\text{K}$ .

(35) Sin dal momento in cui venne formulata la teoria del Big Bang caldo era chiaro che l'universo, al momento della sua nascita, non poteva esser esattamente uniforme.

I calcoli della competizione tra espansione dello spazio ed attrazione gravitazionale, basati sul riscontro dell'attuale esistenza di galassie ed ammassi, indicavano come, nell'universo neonato, dovessero esser già presenti variazioni di densità pari ad almeno una parte su centomila.

Rilevata l'esistenza della CMB da Penzias e Wilson, l'obiettivo cui i cosmologi subito puntarono fu la creazione di una mappa dettagliata della sua temperatura in ogni punto della volta celeste che circonda il nostro pianeta.

Una successiva analisi degli scostamenti rispetto al valore medio, pensavano, avrebbe consentito di individuare tracce delle originali variazioni di densità rimaste impresse nella temperatura dei fotoni non appena furono liberi di muoversi nel vuoto.

Tale compito fu portato a termine per la prima volta nel 1989 dal satellite **COBE** (Cosmic Background Explorer), il quale misurò le differenze di temperatura della CMB trovandole nell'ordine dello 0.002%, in perfetto accordo con le previsioni.



(36) Si tratta del cosiddetto "**problema dell'orizzonte**" così chiamato perché riguarda ciò che vediamo nei pressi del nostro orizzonte cosmico, costituito dalle regioni più distanti che ci è dato poter osservare.

Dall'analisi della CMB sembra infatti che regioni del cielo, lontanissime tra di loro, abbiano avuto la possibilità in passato di essere a stretto contatto così da aver potuto "mescolare" il proprio contenuto, uniformando la temperatura.

Tale ipotesi è in contrasto col fatto che la luce proveniente da queste regioni si sia incontrata oggi per la prima volta.

(37) E' il "**problema della piattezza**": misure recenti confermano la geometria "piatta" (euclidea) dell'Universo.

Secondo il modello di Friedmann una simile condizione sarebbe del tutto instabile (come una matita in equilibrio sulla propria punta), ed in breve tempo dovrebbe mutare in una geometria non euclidea condannando l'universo ad un "**big chill**" (espansione eterna con riduzione della temperatura a 0 K) oppure ad un "**big crunch**" (contrazione che lo riporti alla condizione iniziale con temperatura e densità infinita).

(38) Un tale valore corrisponde alla differenza di scala tra un atomo e la Via Lattea.

(39) I **campi scalari** appaiono sul lato destro dell'equazione di Einstein, dove sono presenti tutte le forme della materia.

Condividono alcune proprietà con la **costante cosmologica**, il termine  $\Lambda$  che Einstein aveva in un primo tempo aggiunto (poi pentendosi) all'equazione della Relatività Generale.

Mentre la materia riempie lo spazio di energia positiva che genera gravità attrattiva, i campi scalari lo riempiono uniformemente anche di pressione negativa (una tensione) in grado di generare una forza di segno opposto alla gravità.

L'antigravità dei campi scalari supera la loro gravità, accelerando così l'espansione.

Mentre la materia perde energia con l'espandersi dello spazio (si diluisce), la pressione negativa con cui il campo inflatone riempie l'universo ne provoca l'aumento.

Secondo i calcoli di Alan Guth la forza gravitazionale repulsiva, generata dalla sua pressione negativa, sarebbe circa tre volte più intensa della forza gravitazionale attrattiva generata dalla sua massa: pertanto la gravità di una sostanza sottoposta ad inflazione ad un certo punto la farà esplodere.

**(40)** Ad oggi non sappiamo ancora se il bosone di Higgs possa o meno identificarsi con l'inflatone.

A domanda diretta che ho posto a Guido Tonelli in occasione di una sua conferenza a Camogli nel settembre 2022, "*Può essere il bosone di Higgs l'inflatone responsabile del fenomeno dell'inflazione cosmica?*", questi ha risposto "*Rimane un'ipotesi plausibile che tuttavia non è stata ancora confermata*".

Ci si aspetta infatti esista un'intera "famiglia" di bosoni parenti dell'Higgs:

*"... L'Higgs è stato trovato a 125 GeV; per meccanismi intrinseci alla meccanica quantistica, sappiamo che ogni particella è perennemente avvolta da una nuvola di particelle virtuali (particelle-fantasma che vengono estratte dal vuoto per un brevissimo istante per tornarvi subito dopo, appena vengono riassorbite).*

*È un meccanismo inevitabile che, nel caso del bosone di Higgs, comporterebbe una crescita incontrollata della sua massa.*

*Non conosciamo ad oggi nessun meccanismo che possa proteggere una particella scalare da questo fenomeno: eppure la massa dell'Higgs sta lì, immobile, a 125 GeV. Ci deve pertanto essere per forza qualcosa di cui ignoriamo l'esistenza ..."*

(Tratto dal mio post del 16 settembre 2023 "Una nuova fisica dietro l'angolo? Le 'sorprese di Higgs' e quella di Guido Tonelli").

**(41)** Alcune versioni della teoria dell'inflazione ritengono che l'intero processo inflazionario possa esser durato  $10^{-35}$  secondi durante i quali la massa dell'universo è raddoppiata ogni  $10^{-38}$  secondi per 260 volte, creando così tutta la massa dell'Universo osservabile.

Tale teoria offre soluzione alle discrepanze che abbiamo indicato esserci tra le osservazioni e la teoria del Big Bang:

- **"il problema del bang"**: suo diretto responsabile è il processo di raddoppio ripetuto. Al termine del processo inflazionario la sostanza che si stava espandendo decade trasformandosi in materia ordinaria: l'espansione del cosmo continua mantenendo inizialmente la velocità acquisita durante la fase di inflazione per poi rallentare gradualmente per effetto della gravità.
- **"il problema dell'orizzonte"**: l'espansione risulta ovunque uniforme perché al raddoppio della distanza tra due regioni corrisponde quello della velocità con cui esse si allontanano reciprocamente (che viene così a superare abbondantemente quella della luce). Durante le prime fasi dell'inflazione regioni oggi distanti erano invece vicinissime, e quindi ebbero il

tempo di interagire; con l'espansione esplosiva dell'era inflazionaria esse si separarono per rientrare in contatto (grazie ai fotoni emessi) soltanto oggi.

- **"Il problema della piattezza"**: espandendosi violentemente lo spazio tridimensionale, il volume racchiuso in ogni centimetro cubico diventa quasi perfettamente piatto, così come una porzione della superficie di una sfera enorme appare piatta ad un osservatore di minuscole dimensioni.

(42) L'energia racchiusa nei  $10^{27}$  K avrebbe pertanto creato le  $10^{50}$  tonnellate di materia che si ritiene contenga il nostro universo osservabile.

(43) Le fluttuazioni quantistiche risalgono a  $10^{-32}$  secondi dopo il Big Bang.

(44) una prima conferma in realtà venne dai dati raccolti dal satellite COBE nel 1989, di cui ho già scritto in **nota 35**

(45) Per una trattazione dettagliata circa la radiazione di Hawking vedi il mio precedente post "*Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica*" pubblicato in 5 parti nel corso del mese di dicembre 2023.

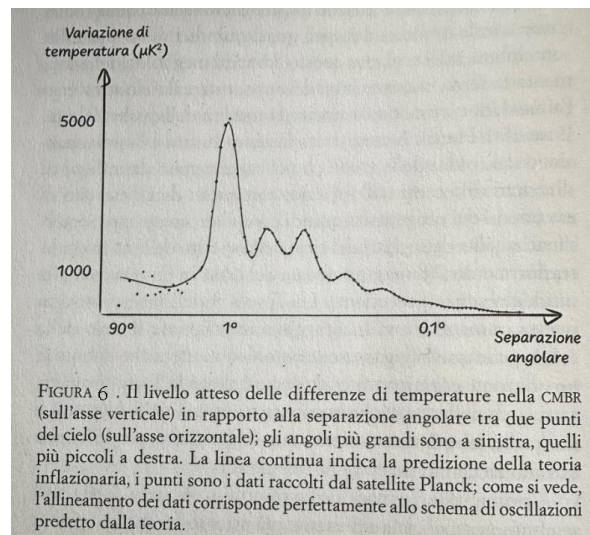
(46) I dati forniti dal satellite Planck hanno permesso di disegnare il grafico in **figura 6**: possiamo vedere come la parte puntinata, che rappresenta i dati ottenuti dalle rilevazioni degli strumenti imbarcati, si sovrappone alla curva continua (che posiziona le predizioni della teoria).

Le oscillazioni nel livello delle variazioni della CMB offrono informazioni sia sulla composizione dell'universo attuale che sul suo futuro, in quanto dipendono (anche) dalla geometria dell'intero universo nel corso della sua evoluzione.

- Il primo picco ci racconta che la forma spaziale dell'universo osservabile non sembra esser curva: qualora tuttavia le 3 dimensioni spaziali si incurvino a formare una ipersfera, questa deve essere incredibilmente grande in quanto il nostro orizzonte cosmologico appare oggi "piatto".
- L'altezza del secondo picco ci dice che la **materia ordinaria** (protoni e neutroni) ammonta solo al 5% del contenuto totale dell'universo.
- Il terzo picco mostra come l'universo contenga circa il 25% di **materia oscura**, qualcosa di cui non sappiamo null'altro che il ruolo da essa svolto nella formazione delle galassie.

Infine risulta che la quota mancante (il 70%) non sia costituita da materia, ma da ciò che viene indicato col nome di **energia oscura**, ritenuta responsabile della progressiva accelerazione dell'espansione dell'universo.

Non ne conosciamo la natura tuttavia sappiamo che, qualora essa si riveli simile alla costante cosmologica " $\Lambda$ " di Einstein (cioè si tratti di un'**energia associata allo spazio vuoto**), la sua spinta non si esaurirà come avvenne nel caso dell'inflazione causata dall'inflatone, ma continuerà a far accelerare l'espansione per sempre, guidando così l'universo verso una **morte termica**.



(47) Una conferma dell'esistenza di tali onde gravitazionali costituirebbe anche la prima prova indiretta dell'esistenza della radiazione di Hawking.

(48) Abbiamo in precedenza spiegato come la presenza della materia in un universo sia il risultato dell'enorme energia accumulata durante l'inflazione (l'energia si trasforma in calore e quindi in materia secondo la nota equazione  $E=mc^2$ ).

Uno scatto inflazionario di minor intensità porterebbe fornire un livello di energia in grado di produrre troppo poca materia, o addirittura un universo vuoto destinato a collassare su sé stesso in un breve tempo.

(49) Solo stati con un livello di complessità (disordine) sufficiente possono dar luogo ad un cosmo abitato da forme di vita; al contrario un universo costituito soltanto da un plasma di gas omogeneo (basso grado di entropia) non può contenere forme complesse in grado di riprodursi.

(50) Non è questa l'unica predizione che pone l' "ipotesi assenza di confini" in una posizione difficile da difendere.

Nel corso del nostro incontro a Genova, Thomas Hertog mi spiegava come il "modello a scodella" di Hawking sia da vedersi come un "**evento di creazione**" - (là dove invece la prospettiva della **Top Down Cosmology** lo considera "un viaggio a ritroso nel tempo per arrivare ad una conclusione del passato") - che, tra l'altro, **prevede l'esistenza di un antiuniverso**.

La **Top Down Cosmology**, come vedremo, oltre a far a meno dell'esistenza di un antiuniverso predice la nascita di un universo dotato di grande inflazione e di molte galassie, in accordo con le osservazioni condotte relativamente a quello in cui viviamo.

(51) Gli universi che non producono osservatori non contano nel momento in cui si confrontano le nostre teorie con le nostre osservazioni.

## Cap 5^: il multiverso.

### Che cosa ha "acceso" l'inflazione?

L'**ipotesi assenza di confini** di Hawking poteva fornire una elegante soluzione a questo problema, ma nella parte precedente di questo post abbiamo visto come questa teoria, pur arruolando il principio antropico, non sia in grado di dar conto della molteplicità di galassie che osserviamo nel nostro universo.

Un'idea del tutto rivoluzionaria fu proposta nei primi anni '80 dal russo **Andrej Linde** e dall'ucraino **Aleksander Vilenkin**: la teoria dell'**inflazione eterna**.

*"Se non si riesce a trovare una causa che giustifichi il via all'inflazione può essere che questa sia sempre esistita; che costituisca cioè lo stato di default dell'universo, e che il difficile sia piuttosto fermarla".*

La proposta dei due fisici prende in considerazione lo stesso tipo di fluttuazioni quantistiche che hanno lasciato un'impronta nella CMB e contribuito a costituire i semi delle galassie (regioni uscite dall'inflazione con una densità maggiore rispetto alle confinanti e che quindi con la propria gravità le hanno contribuito a svuotarle).



Qualora l'inflazione abbia stirato ulteriormente tali fluttuazioni, creando onde dotate di una lunghezza superiore al nostro orizzonte cosmologico, è comprensibile che in tali enormi distanze la forza del campo inflatone si trovi a fluttuare da un punto all'altro.

Queste onde quindi in alcune regioni faranno scendere il valore dell'inflatone provocando un arresto dell'inflazione ed un big bang caldo seguito da una espansione più lenta; in altre invece lo rafforzeranno, così da causare un'accelerazione del processo inflazionario.

Pur se meno frequenti rispetto alle altre, nelle regioni in cui il tasso di inflazione risulti rafforzato viene a generarsi un volume di spazio enorme, tale da far sì che esistano sempre regioni dove le fluttuazioni che rafforzano l'inflatone predominino.

*"... l'inflazione si può concepire come una reazione a catena, un processo in grado di autosostenersi dove regioni in inflazione generano altre regioni in inflazione, che a loro volta producono sia big bang locali che ancora più inflazione, e così via per sempre ..."*

Linde con l'espressione "inflazione eterna" intende sottolineare che essa non ha un'origine - cosa che richiederebbe di identificare quale ne sia la causa - ma neppure una fine:

*"... l'universo nel suo complesso è un sistema che si autoriproduce e che esiste senza fine e - forse - senza inizio ..."*

Il nostro universo osservabile sarebbe quindi un mero **universo isola** all'interno di uno spazio molto più grande, ed il cosmo sarebbe invece una complicata sovrastruttura che è stata battezzata col nome di **multiverso**.

All'interno di ciascuna singola isola le fluttuazioni quantistiche estese su scale cosmiche costituirebbero i semi delle galassie mentre le fluttuazioni estese su scale enormemente più grandi genererebbero isole separate.

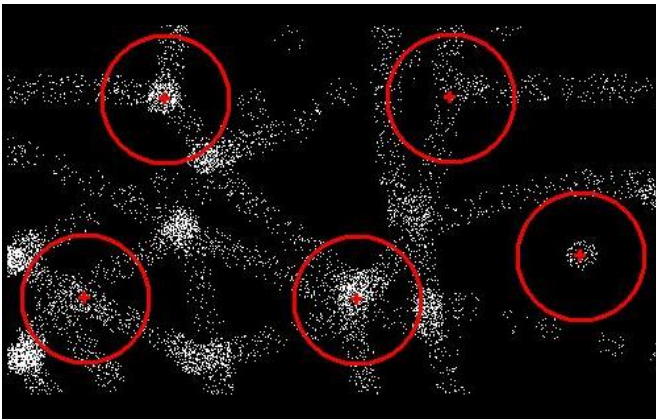
"... Se potessimo osservarlo dall'esterno, il cosmo ci apparirebbe come un complesso mosaico di isole in lenta espansione - le regioni dove l'inflazione è terminata con un big bang ed un universo si sta evolvendo - inglobate in uno spazio gigantesco, forse infinito, che cresce a velocità inflazionaria ..."

Tali isole sono di diverso tipo a seconda della durata e dell'intensità dell'inflazione che le ha create:

- quelle dove il processo inflazionario è durato abbastanza a lungo ed è stato molto intenso risulteranno piene di galassie, come l'universo in cui viviamo;
- altre invece, dove l'inflazione è terminata all'improvviso, si presenteranno vuote (di materia) o quasi, destinate a collassare su sé stesse in breve tempo.

Spostarsi (o spostare informazione) tra un'isola e l'altra è impossibile: la rapida espansione inflazionaria dello spazio tra le isole avviene a velocità iperluminare.

Quindi ciascuna isola viene a costituire un universo separato senza comunicazione con gli altri.



Un multiverso infinito ed in continua espansione, al cui interno si formano incessantemente universi isola, assomiglia ad un immenso frattale, tant'è che si parla a suo proposito, di **cosmografia di tipo frattale**.

Una caratteristica dei frattali è l'**autosomiglianza**; quando infatti andiamo ad ingrandire una piccola parte di uno di essi ci ritroviamo con un motivo che assomiglia all'originale.

Riferendo tale caratteristica al multiverso, risulta necessaria l'esistenza di infiniti universi copia (o quasi copia) del nostro al cui interno si trovano copie di noi stessi; c'è chi, sulla scorta di queste premesse, ha stimato a quale distanza debba trovarsi la nostra copia più vicina a dove ora ci troviamo. (52)

Ad Hawking, che lo incontrò a Mosca in occasione di una conferenza, il multiverso di Linde non piaceva affatto.

Gli sembrava una riedizione in ambiente semiclassico della teoria (classica) dello stato stazionario di Hoyle, dove alla creazione di nuova materia per riempire i vuoti tra le galassie prevista da quest'ultimo veniva sostituita la creazione di nuovi universi-isola ad opera dell'inflazione: un nuovo "stato stazionario" questa volta del multiverso.

L'esatto opposto dell'assenza di confini di Hawking (che porta agli estremi l'idea di evoluzione cosmica di LeMaitre "*piegando il tempo in spazio all'inizio dell'inflazione*").

Mentre la cosmologia del multiverso presume un fondo stabile di uno spazio in eterna inflazione al cui interno accade ogni cosa, quella di Hawking assegna alla meccanica quantistica un'importanza



fondamentale nel primissimo universo, tale da cancellare anche il tessuto dello spaziotempo (che invece costituisce il fondo stabile al multiverso).

Mentre Hawking rimproverava alla teoria del multiverso di essere "una estensione eccessiva della realtà fisica, irrilevante per qualunque cosa potessimo mai sperare di osservare", Linde rinfacciava all'ipotesi dell'assenza di confini l'incapacità di produrre un cosmo pieno di materia come quello in cui viviamo: "innumerevoli copie di noi stessi" contro "un universo senza di noi".

In questo contesto, in cui si scontrano le due principali teorie cosmologiche ciascuna "zoppa", si affaccerà verso la fine del secolo la **teoria delle stringhe** che offrirà al multiverso nuovi "strati".

(continua)

### Note:

(52) "... *la più vicina copia perfetta di noi stessi si trova a soli  $10^{10^{118}} \times 10^{27}$  metri da noi* ...", scrive Max Tegmark in "L'universo matematico":

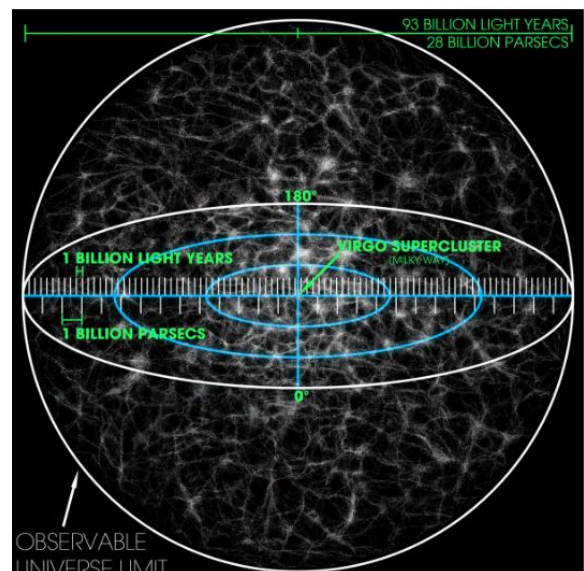
Vediamo come si giunge ad una tale conclusione e come è stata realizzata questa stima.

*"... l'inflazione è un processo che prosegue indefinitamente, ed è in grado di generare un volume infinito in uno spazio finito, partire da qualcosa più piccolo di un atomo e creare al suo interno uno spazio infinito, contenente un'infinità di galassie, senza impatto alcuno sullo spazio esterno ..."*

Se lo spazio è infinito, lo deve essere anche la quantità di materia presente al suo interno, distribuita in modo complessivamente uniforme.

L'**universo osservabile** è una sfera che ci circonda il cui raggio misura  $5 \times 10^{26}$  metri (pari a circa  $4,6 \times 10^{10}$  anni luce); poiché postulato della teoria dell'inflazione è l'omogeneità della distribuzione della materia a grande scala, possiamo stimare esso contenga circa  $10^{11}$  galassie,  $10^{23}$  stelle,  $10^{80}$  protoni e  $10^{89}$  fotoni.

Da una situazione iniziale fortemente omogenea emerge dall'inflazione un cosmo con piccole differenze di densità e temperatura che, col passar del tempo, vengono amplificate e producono "storie diverse" ("gli studenti dei vari universi paralleli imparano le stesse cose nel corso di fisica ma cose diverse in quello di storia" afferma Tegmark)..



Gli eventi casuali che ci hanno portato ad esser oggi ciò che siamo sono innumerevoli e la probabilità che siano accaduti proprio nella stessa sequenza in un altro universo è infinitesimale ma diversa da zero: se il numero degli universi paralleli è infinito, un evento pur improbabile è comunque destinato a verificarsi, quindi c'è almeno una copia esatta di noi in un altro universo.

Poiché una qualsiasi frazione di un numero infinito, per quanto piccola, restituisce sempre un numero infinito, da qui la garanzia di esistere in una infinità di universi paralleli: ci saranno nostre copie fedeli ed altre che presentano invece lievi differenze.

Ora:

- la fisica classica prevede che un universo possa organizzarsi in un'infinità di modi diversi (disposizioni della materia e del vuoto); quindi, pur essendo gli universi infiniti, non v'è modo di esser sicuri che due di essi siano identici tra di loro;
- la meccanica quantistica contribuisce invece a limitare considerevolmente la varietà di organizzazioni, anche ad un livello fondamentale: l'incertezza ad essa connaturata fa sì che non abbia senso chiedersi dove si trovi un corpo al di là di un certo livello di precisione.

Ne consegue come il numero totale di "possibili varianti del nostro universo" risulti un numero enorme ma finito.

Contando tutti i possibili stati quantistici più freddi di  $10^8$  gradi che un universo può assumere, il valore  $10^{118}$  rappresenta il massimo numero di protoni che il principio di esclusione di Pauli permette di racchiudere in una sfera con raggio pari a  $5 \times 10^{26}$  metri a temperatura inferiore a  $10^8$  gradi.

Il nostro universo si ritiene ne contenga solamente  $10^{80}$ : questo perché ognuna delle  $10^{10^{118}}$  "caselle" può essere sia occupata che non occupata, dunque il numero di possibilità da considerare risiede nell'intervallo tra  $2^{10^{118}}$  e  $10^{10^{118}}$  (esiste una stima ancora più prudentiale, basata sul principio olografico, pari a  $10^{10^{124}}$  configurazioni possibili; al di sopra di questa il buco nero risultante avrebbe dimensioni maggiori dell'universo).

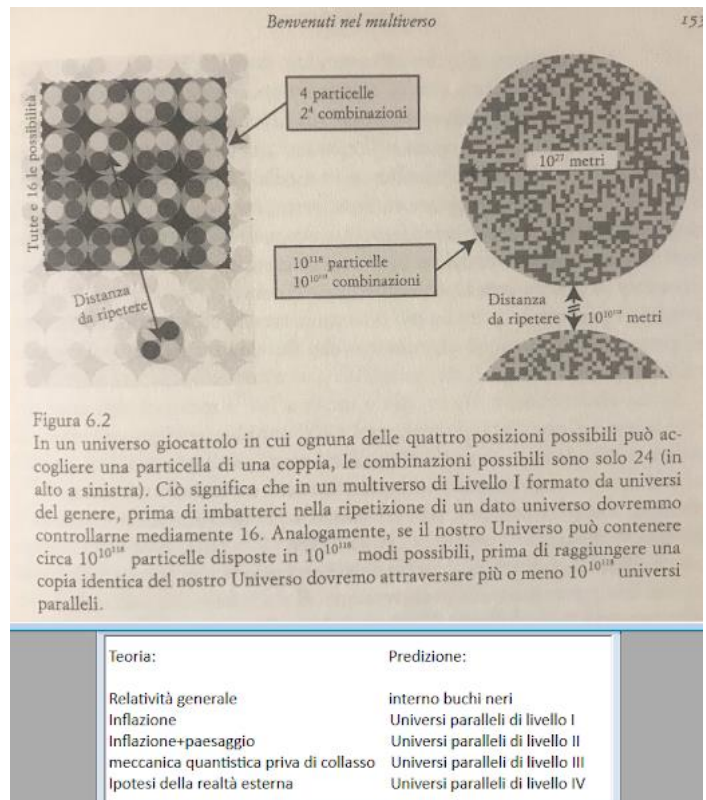
Se dunque il numero delle configurazioni che può assumere un universo è limitato, in uno spazio infinito sarà possibile trovare infinite copie identiche così come tirando parecchie volte un dado a 6 facce prima o poi uscirà lo stesso numero.

La distanza minima dalla nostra prima copia:

- per trovare una copia di un determinato tipo di universo abbiamo visto sarà necessario controllare in media  $10^{10^{118}}$  universi;
- il diametro del nostro universo misura  $10^{27}$  metri.

Se per trovare una sua copia dovremo spostarci di  $10^{10^{118}}$  diametri, ne consegue che la nostra copia più vicina disterà da noi  $10^{10^{118}} \times 10^{27}$  metri.

Tuttavia, aggiunge Tegmark, non sarà necessario andare così lontano:



*"... a circa  $10^{10^{91}}$  metri di distanza da noi dovrebbe esserci una sfera di raggio pari a 100 AL identica a quella al cui centro siamo noi così succederà nei prossimi 100 anni che le nostre controparti al suo interno proveranno le nostre identiche sensazioni..."*.

Dunque a "soli"  $10^{10^{91}}$  metri di distanza dovremmo trovare una nostra copia identica

(Per maggiori dettagli puoi vedere il mio post "Il multiverso di livello I e la copia perfetta di noi stessi a soli  $10^{10^{118}} \times 10^{27}$  metri da noi" del 31 luglio 2021).

## Cap 6<sup>^</sup>: il Modello Standard, le GUT e l'evoluzione "darwiniana" delle leggi fisiche dell'universo nel primo miliardesimo di secondo dal Big Bang.

Nell'introduzione alla Top Down Cosmology avevo già sottolineato la novità rappresentata dall'approccio "biologico-evoluzionistico" applicato alla cosmologia proposta da Hawking ed Hertog.

L'intuizione che ha guidato i due cosmologi scaturisce dall'incapacità della teoria fisica attualmente in uso di ricavare matematicamente il valore delle cosiddette "costanti di natura" senza l'utilizzo di misure sperimentali.

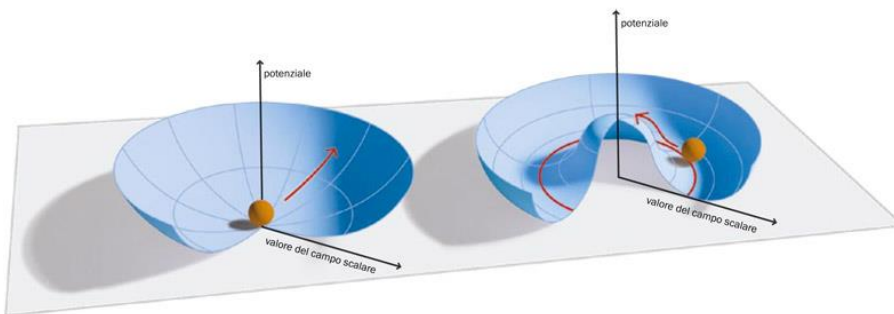
Nella parte 5<sup>^</sup> abbiamo introdotto la teoria del Multiverso; in questa parte e nella prossima vedremo il percorso che ha portato Hawking a passare da suo sostenitore a feroce critico.

La migliore descrizione della realtà fisica di cui oggi disponiamo è rappresentata dal **Modello Standard della fisica delle particelle**, forse la teoria in assoluto meglio testata di ogni tempo (53).

Si tratta di una teoria quantistica che descrive in termini di campi sia le **particelle materiali** che le **forze**: secondo questa teoria le particelle di materia, quali elettroni e quark, non sarebbero altro che **eccitazioni locali di campi estesi**.

Il Modello Standard, chiamando in causa il **meccanismo di Higgs**, è in grado di spiegare il motivo per cui alcuni tipi di particelle (ad esempio elettroni, quarks e neutrini) siano dotate di massa, mentre altri (i fotoni) ne siano privi.

Tale teoria ritiene l'intero cosmo permeato da un campo scalare, il **campo di Higgs**; non appena l'universo primordiale iniziò ad espandersi, e di conseguenza la temperatura a diminuire, il campo di Higgs iniziò ad interagire con le particelle in modo diverso a seconda del tipo di particella.



Subito dopo il Big Bang tutte quante si spostavano alla velocità della luce, ma non appena la temperatura scese al di sotto di un valore critico una parte di esse venne rallentata dalla presenza di tale campo.

Per ciascun tipo di particella l'entità del rallentamento risulta proporzionale al grado di interazione con quest'ultimo: maggiore è l'interazione, più elevato risulta lo specifico valore che oggi chiamiamo "massa".

Limite del Modello Standard è l'incapacità di definire il valore della massa per ciascun tipo di particella: sappiamo perché quark ed elettroni siano dotati di una massa ma non il motivo per il quale possiedono quella determinata massa e non un'altra.

Sebbene in grado di produrre ottime predizioni, i valori di una ventina di parametri presenti nelle equazioni che lo descrivono sono stati calcolati sperimentalmente ed inseriti a mano nelle formule; a questi parametri non ricavabili da un modello matematico è stato assegnato il nome di **costanti di natura** (54)

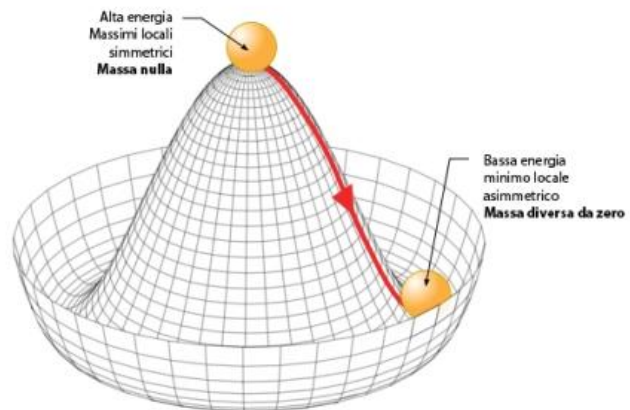
Se il valore di una sola di queste costanti fosse stato leggermente diverso oggi ci troveremmo in un universo dove la vita (così come la conosciamo) non avrebbe avuto l'opportunità di svilupparsi (55).

Dobbiamo dunque pensare di esser in presenza di un **disegno intelligente** che ha guidato sin dall'inizio lo sviluppo dell'universo, fornendogli leggi "biofiliche" che miliardi di anni dopo lo hanno reso adatto alla nostra esistenza?

Il meccanismo di Higgs suggerisce piuttosto che il modo in cui viene generata la massa sia il risultato di un processo dinamico conseguente l'espansione dello spazio: dopo il Big Bang caldo la disponibilità di un ambiente via via più grande porta ad una diminuzione della temperatura, e di conseguenza ad una **rottura casuale** di una simmetria matematica astratta.

Sappiamo che le simmetrie dei sistemi fisici tendono a rompersi al diminuire della temperatura, facendo così emergere strutture più ricche e fornendo un maggior spazio per la complessità (56).

Al termine dell'inflazione, il campo di Higgs fluttuava caoticamente e la media netta del suo valore era pari a zero; tutte le particelle avevano massa pari a zero, il massimo della simmetria, che si ruppe  $10^{-11}$  secondi dopo il Big Bang allorché la temperatura scese sotto i  $10^{15}^{\circ}\text{C}$  (57).



Tale rottura spontanea ha restituito un valore casuale, come la direzione in cui cade una matita che sino a quel momento era in equilibrio sulla propria punta.

**Il Modello Standard suggerisce cioè che l'universo non sia già nato con i valori delle masse delle particelle e l'intensità delle forze che oggi misuriamo**, ma che questi valori rappresentino le proprietà di uno stato di simmetria rotta che si è cristallizzata in seguito al raffreddamento conseguente l'espansione dell'universo.

*Nelle primissime fasi dell'espansione cosmica una parte della struttura fondamentale delle leggi della fisica si è coevoluta insieme all'universo che esse governano, ed il risultato di questa evoluzione è casuale!*

Il termine **leggi effettive** viene usato per indicare le leggi che **oggi** governano la fisica delle particelle; "effettive" per sottolineare il fatto che esse hanno valore solo nell'ambiente emerso dopo che l'universo ha iniziato ad espandersi e la cui temperatura è relativamente bassa: ciò significa che se la storia dell'universo dovesse ripartire dal Big Bang sarebbe davvero improbabile ritrovarci con le stesse leggi di natura (così come se la storia dell'evoluzione dovesse ricominciare dalla prima cellula, non è per nulla scontato che ci ritroveremmo con i sapiens dopo qualche miliardo di anni).

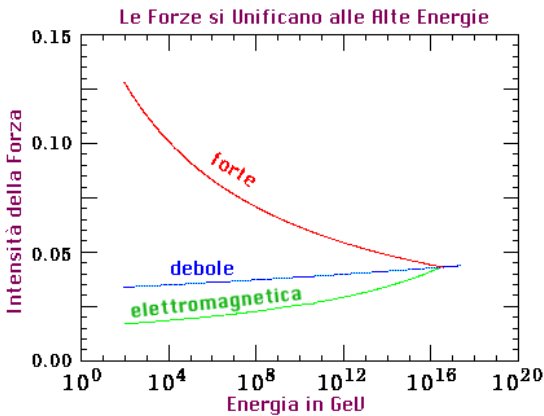
Più che di leggi a valore universale si tratta infatti di aver individuato "regolarità" che tornano utili a descrivere fenomeni che si verificano in un determinato ambiente, cioè in un universo ed in un tempo come quello in cui ci troviamo a vivere; la loro efficacia predittiva è dunque limitata in tal senso.

Ne consegue come il Modello Standard sia soltanto una parte della storia della fisica delle particelle: infatti non da ragione della materia e dell'energia oscura, non include la curvatura dello spazio tempo (la gravità), e prevede la produzione a carico del Big Bang della stessa quantità di materia e antimateria (che nei primissimi istanti avrebbero dovuto annichilirsi tra di loro lasciando l'universo privo di materia).

Perché dunque non ipotizzare che, tornando indietro nel tempo, esistesse una maggior simmetria ed una maggior semplicità unificatrice nei primissimi attimi di vita dell'universo?

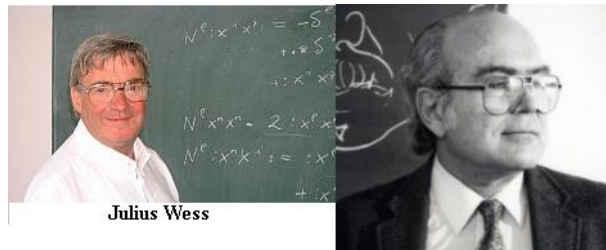
Il meccanismo di rottura della simmetria che sta dietro alla separazione della forza elettrodebole potrebbe esser valido anche più in generale: in presenza di temperature più elevate ed in tempi ancora più ravvicinati al Big Bang anche la forza di gravità e ipotetiche "forze oscure" (all'origine di ciò che chiamiamo energia oscura) potrebbero risultare unificate con le altre forze, e di conseguenza una parte ancora maggiore della struttura di leggi effettive della fisica sarebbe destinata a svanire.

Stiamo così introducendo estensioni del Modello Standard cui è stato assegnato il nome di **GUT (Grandi Teorie Unificate)** che ritengono possano esistere meccanismi di rottura di simmetria e campi loro associati simili a quello di Higgs (58).



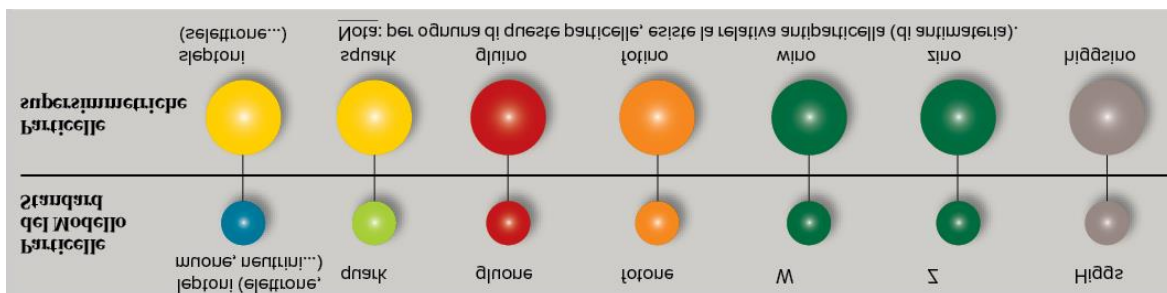
Esistono diverse teorie GUT, ma non disponiamo della necessaria tecnologia per verificare quale tra di esse descriva l'evoluzione del nostro universo da un **Big Bang ultracaldo**; qualora i principi generali di simmetria su cui si basano risultassero corretti è possibile che alcune proprietà fondamentali del mondo fisico, come l'esistenza di massa e materia, non siano verità matematiche a priori ma il risultato di una serie di transizioni che hanno rotto la simmetria primordiale trasformandola in complessità.

Nel 1974 **Julius Wess** e **Bruno Zumino** ipotizzarono l'esistenza di una **supersimmetria** (o **SUSY**) che addirittura unificherebbe le particelle con le forze, cioè campi di forza con campi materiali, la cui rottura spiegherebbe anche la comparsa di particelle di materia oscura governata da forze di tipo diverso rispetto alle 4 che conosciamo. (59)



Julius Wess

Bruno Zumino



Per concludere "... le GUT prevedono che, mentre l'universo si raffreddava dal Big Bang ultracaldo, diverse simmetrie matematiche si sarebbero rotte innescando una serie di transizioni che avrebbero prodotto un insieme strutturato di leggi effettive valide a temperature più basse ..."

L'universo primordiale avrebbe quindi assistito nelle sue primissime fasi ad una **metaevoluzione** durante la quale **furono le stesse leggi fisiche stesse a cambiare** e trasformarsi:

"... il passaggio da un universo iniziale, simmetrico ed uniforme, all'ambiente fisico complesso e diversificato in cui viviamo oggi, adatto alla vita. In tutto ciò un elemento casuale è insito nelle transizioni con le rotture di simmetria ..."

E' opportuno ribadire il fatto che le GUT non determinino affatto in modo univoco il risultato dell'evoluzione primordiale: le simmetrie possono infatti rompersi in molti modi differenti, quindi portare a leggi diverse per gli stati a bassa temperatura.

Le proprietà del modello standard e della materia oscura non sono dunque stabilite dalla matematica delle GUT ma riflettono gli esiti dei primissimi istanti della storia del nostro universo.

Tutto ciò - secondo **Thomas Hertog** - assomiglia molto alla descrizione della storia dell'**evoluzione biologica**:

"... la straordinaria complessità della vita è costruita su un numero enorme di accidenti congelati accumulatisi nel corso della storia ...  
... schemi assimilabili a leggi che troviamo in ambito biologico codificano gli esiti di innumerevoli eventi casuali che, in un periodo di miliardi di anni e in un ambiente a sua volta in evoluzione, hanno permesso l'emergere di strati su strati di complessità.  
Alcune leggi del mondo vivente possono anche essere fatte risalire a eventi fortuiti di rottura di una simmetria non dissimili dalle transizioni cosmiche ..."

L'esempio che Hertog ripropone in conferenza e nel suo libro "L'origine del tempo" è quello relativo all'orientamento destrorso della struttura elicoidale del DNA proprio di ogni specie conosciuta:

"... le leggi dell'elettromagnetismo, su cui si basa la chimica molecolare, sono indifferenti all'orientamento, perciò tale 'preferenza' nella direzione di avvolgimento potrebbe esser conseguenza di un accidente fortuito accaduto intorno a 3,7 miliardi di anni fa, quando le prime forme di vita stavano sviluppandosi.  
Una volta avvenuto questo **evento di rottura della simmetria**, tale particolare configurazione molecolare è diventata parte della sua architettura fondamentale: una legge della vita sulla Terra ..."

Quindi procedendo con il parallelo 'evoluzione in biologia' - 'evoluzione in cosmologia' Hertog afferma:

"... in modo simile le GUT ci dicono che molte delle proprietà delle leggi effettive della fisica hanno le loro radici in eventi accidentali verificatisi nelle primissime fasi dell'evoluzione del nostro universo, che si sono in seguito congelati entrando a far parte della sua struttura fisica ..."

La componente casuale è fornita dal carattere quantomeccanico delle leggi della fisica (la meccanica quantistica NON è infatti deterministica):

"... i salti quantistici casuali dei campi subito dopo il Big Bang hanno influenzato l'ordine in cui si sono verificate le rotture di simmetria (la loro sequenza). (60)

*Poiché tuttavia i campi nell'universo primordiale sono intrecciati l'uno all'altro (hanno infatti tutti origine comune), i cambiamenti in un campo influiscono sui rimanenti, e così il numero di percorsi che l'evoluzione può prendere ha comunque un limite ..."*

Conseguenza di queste premesse è il fatto che nelle primissime fasi dell'evoluzione dell'universo, al livello più fondamentale delle leggi della fisica, ci sarebbe un'interazione tra **variazione casuale** e **selezione**: una sorta di **processo darwiniano**.

Come nel caso della vita sulla Terra, l'esito di questa evoluzione avrebbe potuto portare a leggi molto differenti:

"... 6 specie di neutrini invece di 3, 4 tipi di fotoni, un'interazione forte tra materia visibile e materia oscura, ad esempio ..." continua Hertog, "... le forze relative alle particelle mediatrici di forza, le masse, le specie di particelle finanche l'esistenza stessa di materia e forza potrebbero esser resti fossili di un'epoca di evoluzione antica e in gran parte nascosta seguita immediatamente alla cosmogenesi ..."

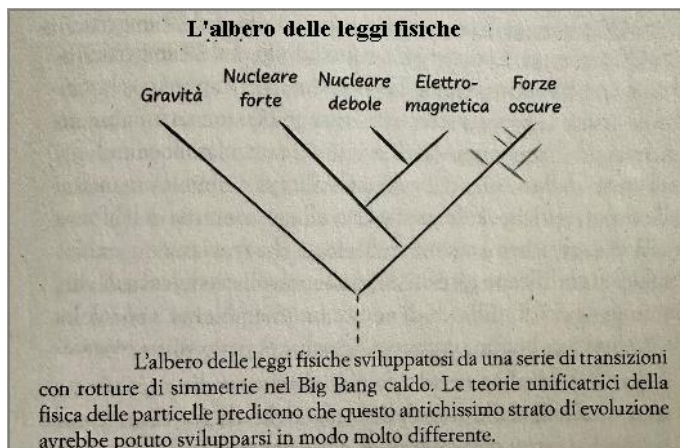
Degno di nota il fatto che l'intervallo di tempo in cui si è svolta questa "evoluzione" sia inferiore a  $1/10^9$  secondi; questa è infatti la distanza temporale dal Big Bang alla quale la temperatura risulta esser scesa ad un solo miliardo di gradi, ed il momento in cui le leggi effettive della fisica si sono cristallizzate.

A differenza dell'evoluzione biologica, che si è svolta in miliardi di anni, la finestra temporale di evoluzione delle leggi della fisica è strettissima.

Tuttavia, pur se il tempo a disposizione è stato brevissimo, il range di temperature assunte dall'universo all'interno di tale intervallo è immenso, cosa che ha portato a numerose transizioni. (61)

La domanda che si pone Hertog a questo punto è "*la struttura dell'albero delle leggi fisiche del nostro universo (vedi disegno allegato) è dettata primariamente da profonde simmetrie matematiche che stanno alle sue radici oppure è stata plasmata da accidenti storici?*"

Domina la Necessità o la Casualità?



iniziare ad abbozzare la cosmologia Top Down.

Nella prossima parte ci occuperemo della Teoria delle Stringhe che risponde a questa domanda dichiarando vincitrice la casualità.

Se variazione e caso vincono sulla necessità, di conseguenza la teoria delle stringhe si rivela non una legge ma una metalegge incapace di fornire previsioni su dove dovremmo trovarci nel multiverso e cosa dovremmo osservare.

E cioè al punto di svolta che portò Hawking ad abbandonare la teoria del multiverso per



**Note:**

(53) Il "**Modello Standard della fisica delle particelle**", sviluppato nella seconda metà del XX<sup>o</sup> secolo, è in grado di descrivere le interazioni fondamentali (elettromagnetica, debole e forte), e di classificare tutte le particelle elementari ad oggi note.

La sua affidabilità è conseguenza della conferma sperimentale di numerose predizioni - tra le quali l'esistenza dei quark (quark top 1995), del neutrino tau (2000) e del bosone di Higgs (2012) - e dell'accuratezza con cui ha descritto varie proprietà delle correnti deboli neutre e dei bosoni W e Z.

Tuttavia non costituisce una "**Teoria del tutto**" in quanto:

- non incorpora l'interazione gravitazionale: **manca una quantizzazione della gravità**;
- non spiega in maniera compiuta l'asimmetria barionica: non risponde cioè alla domanda "**dov'è finita l'antimateria?**" che il modello prevede formatasi dopo il Big Bang in quantità identica alla materia ordinaria;
- non tiene conto dell'espansione accelerata dell'universo: cioè non da conto di ciò che viene indicato col termine **energia oscura**;
- non prevede alcuna particella di **materia oscura**;
- non spiega le **oscillazioni dei neutrini** e di conseguenza la loro massa.

E' tuttavia in grado di fornire una spiegazione ad vasta gamma di fenomeni - tra i quali la rottura spontanea di simmetria -, le anomalie ed i comportamenti non perturbativi.

(54) Si è utilizzato il termine "costanti" perché i valori di questi parametri sembrano non mutare nel tempo e nello spazio, quanto meno in tutto l'universo osservabile.

(55) Se ad esempio il bosone di Higgs avesse avuto una massa leggermente diversa, i nuclei atomici non avrebbero potuto formarsi; niente atomi significa niente materia, un universo vuoto.

(56) E' infatti noto come il raffreddamento porti spesso ad una rottura di simmetrie matematiche:

- la disposizione delle molecole d'acqua è eguale in tutte le direzioni, non c'è un orientamento preferenziale (**simmetria rotazionale**); tuttavia quando la temperatura scende al di sotto del punto di congelamento, ci ritroviamo con cristalli di ghiaccio dotati di strutture geometriche che rompono tale simmetria.
- Cosa simile accade con i magneti: se la temperatura supera i 770°C i campi magnetici fluttuanti degli atomi di ferro non sono allineati (campo magnetico all'esterno mediamente pari a zero, indice della presenza di simmetria rotazionale), ma raffreddandosi la simmetria viene rotta e compare un "polo nord" la cui direzione è casuale (non prevedibile).

(57) Quando il campo di Higgs aveva valore zero ad esser prive di massa erano non solo le particelle di materia, ma pure le **mediatrici** della forza nucleare debole; la rottura di simmetria causò la differenziazione tra forza nucleare debole e forza elettromagnetica.

(58) Così chiamate in quanto riuniscono **forza elettrodebole** e **forza nucleare forte** in uno schema unificante.

Ritornando ad un momento del passato, in cui la temperatura sarebbe stata pari a miliardi di volte quella del Sole, le GUT prevedono l'esistenza di un'unica forza - che riunisce le due -, ed una perfetta simmetria tra materia ed antimateria.

Tale simmetria risulterebbe tuttavia incrinata dal fatto che, dal mescolamento delle forze costituenti, pur molto raramente un positrone si potrebbe trasformare in un protone, creando così un leggero eccesso di materia sull'antimateria in una transizione che, raffreddatosi l'universo, avrebbe rotto la simmetria primordiale della GUT.

La teoria prevede che tutta l'antimateria si sia annichilita con la materia nel plasma primordiale, inondando l'universo di fotoni ad alta energia.

La minuscola parte di materia sfuggita all'annichilazione, pari a circa un milionesimo di quella originariamente prodotta dal Big Bang, sarebbe andata a costituire le  $10^{50}$  tonnellate di materia di cui stiamo fatto l'universo, mentre i fotoni creati dall'annichilazione avrebbero prodotto la radiazione cosmica del fondo a microonde (CMBR).

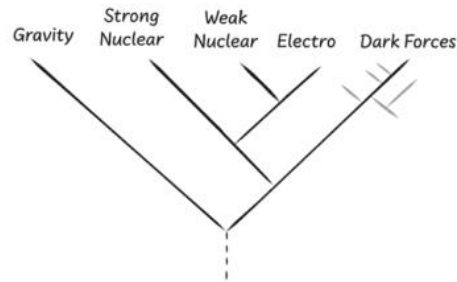
**(59)** Sparirebbe la distinzione stessa tra particelle di materia e particelle mediatrici di forza; una serie di transizioni simili a quella del campo di Higgs avrebbero rotto la supersimmetria iniziale e potrebbero aver generato particelle di materia oscura governate da un nuovo tipo di forza che si aggiungerebbe quindi alle 4 forze che già conosciamo.

**(60)** Vedi il disegno allegato relativo all' "albero delle leggi fisiche", la sequenza temporale della rottura di simmetrie che ha dato luogo alle leggi effettive che regolano oggi il nostro universo.

**(61)** Meno tempo a disposizione per le variazioni casuali ma una variabilità dell'ambiente enorme che agisce sulla selezione.

## Cap 7^: La teoria delle stringhe.

Avevamo concluso la parte precedente chiedendoci se la struttura delle ramificazioni dell'albero delle leggi fisiche del nostro universo fosse imposta da profonde simmetrie matematiche presenti sin dalle sue radici (dunque la successione delle rotture di simmetria sia necessariamente quella, ed obbedisca a leggi di natura) oppure da accidenti storici (è un caso che, ad esempio, la separazione della forza nucleare debole da quella elettromagnetica sia avvenuta successivamente alla separazione della forza nucleare forte da quella elettrodebole).



*The tree of physical laws grew out of a series of symmetry-breaking transitions in the hot big bang. Unifying particle theories predict that this most ancient layer of evolution could have turned out very differently.*

La struttura dell'universo a basse temperature, quale è quello in cui viviamo, è conseguenza del caso oppure è il risultato di leggi deterministiche preesistenti ancora non decifrate?

Per cercare di fornire una risposta a questo quesito dobbiamo scendere verso il basso, verso le radici dell'albero, andando alla ricerca del momento in cui si sia separata la gravità dalle altre forze: un compito estremamente complesso.

La gravità è descritta dalla Relatività Generale di Einstein come un campo "rigidamente classico" (dove lo spaziotempo è un continuum frammentabile all'infinito) mentre il Modello Standard e le GUT si riferiscono a campi quantistici fluttuanti.

Unificare le due diverse visioni sembrerebbe richiedere di ripensare gravità e spaziotempo in termini quantistici ("quantizzare la gravità") ipotizzando l'esistenza di **gravitoni** (o **quanti di gravità**), particelle elementari responsabili della **mediazione della interazione gravitazionale**.

L'**approccio euclideo alla gravità quantistica** di Hawking - in precedenza descritto al capitolo 3^ - pur rappresentando un passo in tale direzione, è incapace di fornire una descrizione della natura dei quanti che stanno dietro allo spaziotempo.

Una difficoltà che si incontra nel tentativo di unificazione sta nel fatto che, procedendo l'indagine verso scale sempre più piccole, le microscopiche fluttuazioni dello spaziotempo creano un ciclo all'interno del quale si autorinforzano presentandosi ogni volta più frenetiche; sino a che, raggiunta un'intensità limite, provocano la paradossale distruzione della struttura fondamentale dello spaziotempo stesso.

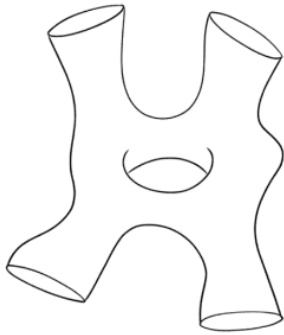
Per comprenderne il motivo dobbiamo tener presente che mentre nella Teoria dei Quanti gli altri campi oscillano su uno sfondo fisso di spazio e tempo (Modello Standard e GUT non includendo una descrizione dello spaziotempo lo vedono come un background immutabile), invece **la gravità è lo spaziotempo**.

Negli anni '80 del secolo scorso viene proposta la **Teoria delle Stringhe** che sembra superare questa empassa,

Secondo quest'ultima alla base di tutta la materia invece che particelle puntiformi ci sono minuscoli filamenti vibranti, tutti identici tra di loro, la cui dimensione è di molti ordini di grandezza inferiore a quella degli elettroni (62).

La distinzione che sperimentiamo tra i diversi tipi di particella - elettroni, quark e mediatrici - sarebbe solo conseguenza di modi diversi in cui questi filamenti si trovano a vibrare (**modi di vibrazione**).

Un modo particolare di vibrazione farebbe sì che una stringa presenti proprietà tali da comportarsi come un quanto di gravità. **(63)**



**Diagramma di Feynman che rappresenta l'interazione tra due gravitoni filamentosi.**

**Il processo di scattering è spalmato nello spazio e nel tempo ed è impossibile individuare la posizione esatta in cui i due gravitoni a forma di anello interagiscono**

Il problema costituito dal ciclo di fluttuazioni che si autorinforzano verrebbe risolto 'spalmando' i punti in filamenti vibranti; le fluttuazioni quantistiche dello spaziotempo su scale microscopiche verrebbero così "domate".

**I gravitoni** sono infatti descritti dalla teoria come minuscoli anelli vibranti: al di sotto di una scala minima lo spazio risulta intrinsecamente vago, così da impedire che le fluttuazioni microscopiche dello spaziotempo crescano senza limite. **(64)**

Questa **vaghezza** - che abbiamo già incontrato nell'ipotesi 'assenza di confini' di Hawking - si estenderebbe anche allo spaziotempo: Einstein nella Relatività descrive lo spaziotempo come deformabile, la Teoria delle Stringhe lo dipinge addirittura dotato di una "**geometria non fissata in modo univoco**".

Si tratta di una caratteristica molto importante: nel paesaggio delle stringhe intere dimensioni possono apparire o scomparire, a seconda della prospettiva con cui lo si guarda.

Un aspetto originale, che comporta una importante conseguenza di cui tratteremo in dettaglio in seguito: se la geometria dello spaziotempo non risulta fissata in modo univoco, è possibile imbattersi in sue forme differenti che tuttavia descrivono situazioni fisicamente equivalenti.

Nella Teoria delle Stringhe possiamo scoprire come due diverse geometrie dello spaziotempo siano in realtà riferibili alla stessa situazione.

Tali forme sono state definite con il termine **duali** e le operazioni matematiche che mettono in collegamento geometrie differenti sono state chiamate **dualità**. **(65)**

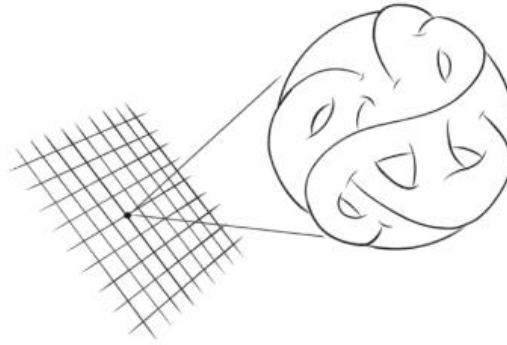
Trattando più avanti della Top Down Cosmology vedremo come la dualità olografica, alla base della fisica olografica, sia determinante per comprenderne la portata.

Nonostante l'obiettivo originale della Teoria delle Stringhe fosse l'unificazione tra Gravità e Meccanica Quantistica, negli anni il suo campo si è espanso relazionandosi con altre branche della fisica e della matematica, tra le quali la **fisica dei superconduttori**, l'**informatica quantistica** e la **cosmologia quantistica**.

Tuttavia, a differenza di quanto succede con la Relatività Generale e la Teoria dei Quanti, ad oggi non disponiamo ancora di una singola equazione generale che racchiuda il nocciolo della Teoria.

Inoltre, per garantirne la coerenza matematica, è indispensabile prevedere l'esistenza di (almeno) ulteriori **6 dimensioni spaziali** che vanno ad aggiungersi alle 3 che sperimentiamo (il nostro universo risulterebbe così costituito da ben 9 dimensioni spaziali ed una temporale); dimensioni che si immagina siano "*straordinariamente piccole ed arrotolate su sé stesse*", dunque invisibili ai nostri strumenti. **(66)**

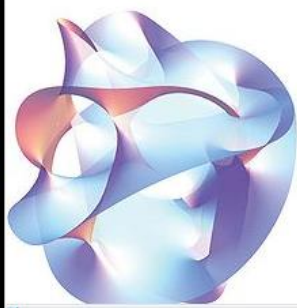
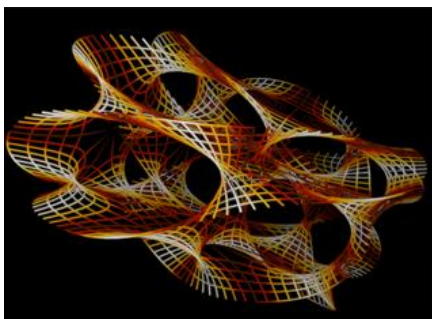
Ciò che oggi ci sembra un punto adimensionale rappresenterebbe invece un **grumo esadimensionale**, e sarebbe quindi la geometria di questo grumo a determinare quali specie di particelle e di forze vengano portate all'esistenza dalle stringhe con le loro vibrazioni.



*String theory predicts that if we could magnify the fabric of space enormously, we would find that every point in the familiar three large dimensions consists of tiny extra dimensions. Moreover, the shape of this extra-dimensional nugget hiding at every point impacts the amalgam of forces and particles that exist in the three large dimensions.*

Il nostro mondo visibile sarebbe dunque solo un riflesso di una realtà molto più complessa, caratterizzata da un numero maggiore di dimensioni; quindi sia la natura della materia che le leggi fisiche effettive di cui facciamo esperienza dipenderebbero dal modo in cui le sei dimensioni aggiuntive sono arrotolate su sé stesse.

La speranza riposta dai fondatori della Teoria delle Stinghe era quella di trovare un principio matematico che ne costituisse il nucleo, in grado di selezionare l'unica forma possibile di dimensioni aggiuntive: cioè arrivare a ricavare matematicamente i valori delle costanti di natura del Modello Standard, fornendo così una giustificazione alla **biofilia** del nostro universo, il motivo per cui esiste una **regolazione fine** tale che, miliardi di anni dopo il Big Bang ed il raffreddamento conseguente l'espansione dello spazio, si siano realizzate condizioni favorevoli alla comparsa della vita.



— Nel corso degli anni '90 si scoprì invece che il numero dei diversi **modi in cui si possono arrotolare** queste 6 dimensioni è spaventosamente elevato, addirittura superiore a quello degli atomi che costituiscono l'universo osservabile:  **$10^{500}$**  modi contro i soli  **$10^{82}$**  atomi.

E' bene precisare come ognuna di queste forme descriva un diverso possibile universo, dotato di uno specifico insieme di leggi effettive.

Alcuni di questi possibili universi sarebbero molto simili al nostro, caratterizzati magari da piccole differenze nella misura delle masse delle particelle.

La stragrande maggioranza risulterebbe tuttavia formata da possibili universi caratterizzati da combinazioni di particelle e di forze di cui non abbiamo neppure modo di farci un'idea.

Come si differenziano gli esiti (gli universi risultanti) partendo da una stessa condizione iniziale?

- La modellazione delle dimensioni extra sembrerebbe far parte della catena di transizioni, segnate dalle rotture delle simmetrie, che, come abbiamo visto, contribuiscono a dar forma alla struttura dell'albero delle leggi effettive.
- Lo scatto di inflazione, la transizione durante la quale 3 delle 9 dimensioni spaziali sono "diventate grandi" espandendosi, costituirebbe pure lui una parte del processo di

modellazione della realtà iperdimensionale che ha fatto seguito alla nascita del nostro universo.

- Ha il carattere di rottura di simmetria persino l'evento da cui è nato l'universo stesso: in tale occasione lo spazio potrebbe essersi diviso in spaziotempo.
- Infine i salti quantistici aggiungono un elemento di casualità all'intero processo; in genere non lasciano traccia, ma quelli che hanno innescato le transizioni che segnano la rottura di simmetrie sono stati amplificati e congelati come parte delle nuove leggi effettive che via via emergono.

L'incredibile varietà costituita dalle possibili configurazioni delle 6 dimensioni extra comporta che la risposta fornita dalla Teoria delle Stringhe alla domanda posta all'inizio di questa parte sia: **la variazione e il caso vincono sulla necessità. (67)**

Sebbene - a differenza del Modello Standard - la Teoria delle Stringhe non presenti parametri liberi che debbano essere misurati sperimentalmente prima di poter fare predizioni, il fatto stesso che risulti compatibile con un'enormità di leggi effettive la condanna a configurarsi non come una legge fisica ma come una **metalegge**.

In ognuno degli insiemi di leggi effettive che tale teoria è in grado di codificare risulta tuttavia presente un elemento emergente (soggetto al caso).

Nel multiverso della Teoria delle Stringhe le leggi della fisica sarebbero piuttosto delle **regolarità locali**, dei residui congelati che riflettono il particolare modo in cui la nostra specifica regione di spazio si è raffreddata dopo il suo Big Bang caldo.

Si era di nuovo in una situazione di stallo.

Nel marzo 2003 **Leonard Susskind** tenne alla Stanford una lezione dal titolo "**The anthropic landscape of string theory**" nel corso della quale affermò:

*"... la Teoria delle Stringhe si basa su principi matematici solidi e profondi, ma non è una legge fisica nel senso usuale del termine; dovremmo invece pensarla come una metalegge che governa un multiverso nel quale coesistono innumerevoli universi-isola, ognuno dotato di proprie leggi fisiche locali ...".*

Qualche mese dopo, nel corso di un seminario tenuto a Santa Barbara, Andrej Linde sostenne che l'**inflazione eterna** - il meccanismo generatore di universi da lui proposto all'inizio degli anni '80 insieme ad Alex Vilenkin - *"... avrebbe potuto produrre una interminabile proliferazione di universi-isola in grado di occupare ogni regione del paesaggio matematico della teoria delle stringhe ..."*.

Intendeva dire che l'inflazione eterna (in quanto eterna) avrebbe potuto aver creato una varietà così grande di universi-isola tale da essere in grado di coprire **tutte quante** le  $10^{500}$  tipologie di universo previste dalla matematica della Teoria delle Stringhe (*'un paesaggio matematico immenso!'*); venendo così a costituire un mosaico cosmico reale, il **Multiverso**.

Rovescio della medaglia è che in questo modo la fisica perderebbe la sua caratteristica di predittività: infatti nelle metalegge della Teoria delle Stringhe non si trova nulla che possa dirci dove dovremmo trovarci all'interno di un tale mosaico, e neppure quale tipo di universo dovremmo aspettarci di vedere intorno a noi.

Susskind ritenne tuttavia che fosse possibile restituire la capacità predittiva alla fisica qualora si combini il **Multiverso** con il **Principio Antropico**.

Abbiamo già trattato del Principio Antropico nel 4<sup>a</sup> capitolo raccontando come, in una sua formulazione indipendente, solo qualche anno prima avesse illuso Hawking e Turok di poter salvare l' "ipotesi senza confini".

Utilizzato in tandem con la teoria del multiverso sembrava permettere di selezionare una regione biofilica nel multiverso, e così di risolvere il vecchio "problema del disegno" con la seguente considerazione:

*"... se esiste un multiverso, in qualche raro universo isola vigeranno leggi locali idonee alla vita, ed è ovvio essa emergerà solo lì; gli universi isola dove le condizioni non sono biofiliche rimarranno inosservati perché non potremo certo metterci ad osservare in un luogo dove non possiamo essere ..."* (68)

La **cosmologia del multiverso antropico**, come venne chiamata, nelle intenzioni dei suoi estensori arriverebbe a sostituire la cornice concettuale ortodossa basata su leggi oggettive ed eterne.

La proposta di Susskind, relativa ad una reintroduzione del Principio Antropico, scaturisce da un cambio di prospettiva determinato da un evento inatteso.

Nel 1998 Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam Riess, sulla base di osservazioni di supernove di tipo Ia in galassie molto distanti, scoprirono che l'espansione dell'universo negli ultimi 5 miliardi di anni aveva subito una accelerazione (e ricevettero per questo il Nobel nel 2011).

Per dare conto di tale fenomeno venne recuperato il famoso termine  $\Lambda$  (**lambda**), introdotto - e poi rinnegato - da Einstein nell'equazione della Relatività Generale; l'energia oscura e la pressione negativa associate a tale termine fanno sì che la gravità, a grandi scale, diventi repulsiva.

Il valore che dovremmo assegnare a  $\Lambda$  perché sia in grado di spiegare l'accelerazione misurata sperimentalmente risulta spaventosamente piccolo.

Al contrario, un conteggio dell'energia del vuoto basato sulla Meccanica Quantistica (69) porta ad un risultato paradossale: un valore così elevato che il nostro universo avrebbe dovuto lacerarsi rendendo impossibile la formazione di galassie, e quindi il sorgere della vita.

Per risolvere questa tensione tra ciò che ci si aspettava e ciò che era stato misurato ci si rivolse alle nuove idee che emergevano dalla Teoria delle Stringhe e del Multiverso: invece di insistere a cercare una legge in grado di spiegare il motivo per cui  $\Lambda$  dovesse avere un valore così basso, venne naturale immaginare che la quantità di energia oscura dipenda anch'essa dal caso, ed il suo valore possa cambiare da un universo-isola ad un altro.

Il microscopico valore ricavato dalle nostre osservazioni è stato semplicemente selezionato dal Principio Antropico, in quanto un valore diverso avrebbe impedito l'evoluzione di un universo biofilico e quindi di osservatori al suo interno. (70)

*"... Viviamo in una rara regione biofilica scelta dal principio antropico dentro un mosaico di universi isola che sono per la stragrande maggioranza privi di vita.*

*Il nostro universo è dotato di leggi biofiliche solo perché non avremmo potuto evolverci in un universo diverso: vediamo che la fisica dell'universo osservabile è proprio quella che è perché siamo qui ad osservarla ..."*

Secondo Hawking il punto debole di tale Cosmologia sta nel fatto che il Principio Antropico si basi sull'assunzione secondo la quale noi saremmo gli "abitanti tipici" del multiverso:

*"... i sostenitori dell'inflazione eterna e del multiverso si stanno infilando nel vicolo cieco della questione di ciò che vedrebbe un osservatore tipico" - rivelò ad Hertog dopo aver ascoltato Linde a Santa Barbara - "... nel loro quadro 'siamo tutti cinesi' ..."*

L'errore è da ricercarsi nel modo in cui vengono selezionate quelle proprietà biofiliche del mondo fisico che si ritiene siano "importanti" per la vita: che cioè **qualcuno** ritiene importanti, procedendo così alla selezione di un loro gruppo a discapito delle rimanenti, compiendo una scelta soggettiva. (71)

La loro prevalenza viene infatti usata, insieme alle proprietà statistiche del Multiverso, per dedurre in quale universo isola noi **abitanti tipici del multiverso** dovremmo trovarci, e che sorta di fisica potremmo aspettarci di scoprire.

Non disponendo di un preciso criterio che specifichi la corretta classe di riferimento degli abitanti del multiverso, ne consegue che tutte le predizioni teoriche offerte da tale cosmologia diventino ambigue in quanto legate a scelte soggettive.

E' il cosiddetto **problema della misura della cosmologia del multiverso**:

*"... una teoria che per le sue predizioni si basi su distribuzioni casuali di cui possiamo osservare solo un'istanza, non permette predizioni non ambigue; si trova dunque ad esser priva di qualunque capacità esplicativa ..."*

Appellarsi ad un processo di selezione casuale in aggiunta alle metaleggi ci porta a dare per scontata la possibilità di una visione del metaverso "dall'alto", come se "lo vedessimo dall'esterno e potessimo scegliere chi siamo noi tra tutti gli osservatori a noi simili" (72)

La Teoria delle Stringhe descrive un universo che al momento della formazione delle sue leggi fisiche effettive (dopo Big Bang) si trova di fronte ad un'immensità di possibili storie, ed il percorso che si troverà a compiere dipende da salti casuali e transizioni segnate da rotture di simmetrie; "non c'è necessità che un esito sia tipico o probabile a priori!"

Invece, così come è formulata, la Cosmologia del Multiverso Antropico sostiene che l'intera idea di evoluzione presenti dei limiti fondamentali: ritiene infatti esistano metaleggi eterne ed immutabili - nella forma di un'equazione fondamentale che governa il mosaico cosmico nel suo complesso - da cui siano derivabili predizioni probabilistiche per le osservazioni a basse energie come le nostre.

In questa visione, l'evoluzione e l'emergenza sono cioè fenomeni di secondaria importanza rispetto alle metaleggi eterne.

In soldoni: per Linde vince l'eternità mentre per Hawking è il caso a trionfare.

"E' ora di smettere di giocare a fare dio" (Stephen Hawking)



**Note:**

(62) La scala di lunghezza caratteristica delle stringhe è assunta essere dell'ordine della lunghezza di Planck, pari a  $10^{-35}$  metri; la dimensione di una stringa sta a quella di un atomo come la dimensione di un atomo sta a quella del Sistema Solare.

(63) Il **gravitone**, che la Teoria delle Stringhe descrive come *'stato privo di massa di una stringa fondamentale'*, è previsto debba possedere due caratteristiche:

- esser privo di massa per potersi muovere alla velocità della luce (la forza di gravità presenta un lunghissimo raggio d'azione);
- essere un bosone con  $\text{spin}=2$  (in quanto la sorgente della gravitazione è il tensore energia impulso, un tensore di secondo ordine).

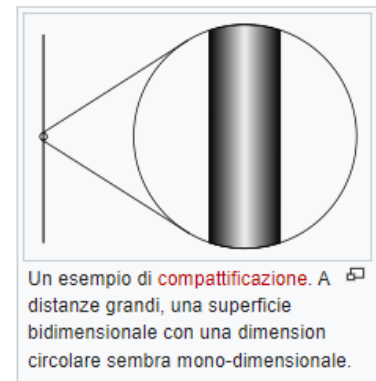
(64) Nell'immagine allegata un diagramma di Feynmann mostra l'interazione tra due gravitoni; il processo di scattering risulta spalmato nello spazio e nel tempo, rendendo impossibile determinare la posizione esatta dove i due gravitoni interagiscono.

(65) Ho già trattato in dettaglio della dualità olografica nel post **Leonard Susskind e la sua guerra per la salvezza della Meccanica Quantistica**, pubblicato sul mio profilo nel mese di dicembre 2023.

(66) L'esempio classico è quello della cannuccia o del cavo elettrico; se li guardiamo da molto distante vengono scambiati per linee unidimensionali e ci sfugge la loro dimensione circolare arrotondata.

(67) Proprio come capita in biologia con l'albero della vita.

(68) E' doveroso ricordare come "l'inflazione eterna" preveda che il processo inflazionario - cioè l'espansione dello spazio a velocità iperluminari - sia la regola (ne abbiamo parlato nella parte 5<sup>a</sup> di questo post).



Solo in alcuni luoghi esso si arresta, dando luogo ad un Big Bang caldo (attraverso il processo di **termalizzazione**, grazie al quale l'energia del vuoto si trasforma in energia termica, ed in seguito in materia che andrà a formare stelle e galassie) ed alla nascita di un universo-isola.

La creazione di universi isola avviene di continuo, tuttavia lo spazio che separa l'uno dall'altro per effetto dell'inflazione continua a gonfiarsi a velocità superiore a quella della luce.

L'informazione, per spostarsi da un universo isola ad un'altro, dovrebbe viaggiare ad una velocità maggiore, cosa che sappiamo essere impossibile.

Quindi siamo destinati a rimaner confinati nel nostro universo-isola e non poter ricevere (o trasmettere) informazioni da altri universi.

(69) La Meccanica Quantistica, tramite il principio di indeterminazione di Heisenberg, ci informa che uno **spazio vuoto** - privo cioè di materia e radiazione - pullula di particelle virtuali (fluttuazioni del vuoto quantistico), alla cui attività è associata un'energia.

Tale energia dovrebbe dar luogo ad una costante cosmologica.

Tuttavia la misura di questo valore, che si ottiene sommando i contributi di tutte le particelle virtuali, produce un valore spropositato per  $\Lambda$ .

**(70)** A sostegno della riabilitazione del Principio Antropico ci fu una predizione sul valore che avrebbe dovuto assumere  $\Lambda$  - poi confermata dopo un decennio dalle misure effettuate da Perlmutter, Schmidt e Riess - ad opera di Steven Weinberg nel 1987.

**(71)** E' un errore comune in statistica; quando si procede ad inferire all'insieme studiato i dati ricavati da un suo campione, bisogna esser sicuri che il campione sia rappresentativo: "non siamo tutti cinesi" (per parafrasare Hawking).

**(72)** Hawking parla di prospettiva "occhio di dio" (vedere l'universo "da fuori") cui contrappone la prospettiva "occhio del verme" (guardarlo dal nostro punto di vista all'interno); "bottom up" e "top down", come vedremo in seguito.

## Cap 8^: i limiti del multiverso e l'origine della cosmologia quantistica.

Qualche settimana fa, incontrandolo a Torino, ho chiesto a Gian Francesco Giudice, il direttore del dipartimento di fisica teorica del Cern, quale fosse la sua opinione sulla Top Down Cosmology e le idee messe in campo da Stephen Hawking nell'ultimo periodo della sua vita.

Giudice - fautore della cosmologia del multiverso (72) - pur sposando una tesi incompatibile con la proposta di Hertog ed Hawking, riconosce tuttavia a quest'ultimo il merito di aver costretto la comunità dei cosmologi a tener conto dell'importanza di **adottare una prospettiva soggettiva** nello studio dell'evoluzione dell'universo in quanto noi stessi ne facciamo parte:

*"l'occhio del verme in contrapposizione all'occhio di dio". (73)*

Vediamo in dettaglio di cosa si tratti.

La fisica ortodossa distingue tra **dinamiche** - governate dalle leggi della natura - e **condizioni al contorno** - costituite dall'apparato sperimentale e dallo stato iniziale del sistema: suo obiettivo è cercare di scoprire quali siano queste leggi tenendo sotto controllo le seconde.

Questa separazione da una parte regala alla scienza una capacità predittiva - replicando un esperimento in un identico contesto esso deve produrre lo stesso risultato - ma al contempo ne limita la portata: com'è infatti possibile applicarla allo studio dell'universo stesso?

Quali sarebbero le condizioni al contorno che dovremmo cercar di tener sotto controllo?

Hawking ci fa notare che la cosmologia del multiverso evita di affrontare queste domande scomode usando l'artificio di "spostare il punto di osservazione" dall'interno del nostro universo al suo esterno, dando quindi per scontata l'esistenza di uno "sfondo fisso" che di esso non ne fa parte.

Se il nostro universo possiede una storia ed un inizio (prima del quale non esisteva), deve quindi esserci un qualcosa di immutabile all'interno del quale ad un certo punto questi ha iniziato ad esistere:

*"... uno spazio di configurazione dei fenomeni fisici integrato in una struttura di fondo fissa che possiamo pensare di afferrare e gestire ...",* scrive.

Il multiverso stesso, con tutti i suoi universi isola, viene descritto dalla teoria come se lo si stesse osservando da una posizione elevata posta al suo esterno, una prospettiva che Hawking definisce **occhio di dio**.

*"Punto debole di tale modello",* continua, *"è l'esser costruito come un ibrido tra il pensiero classico e quello quantistico".*

Pur prevedendo la creazione di una varietà di universi isola quale conseguenza di **salto quantistici casuali**, nella cosmologia del multiverso tutto quanto "accade" all'interno di un gigantesco spazio vuoto preesistente, in uno stato di eterna espansione inflazionaria.

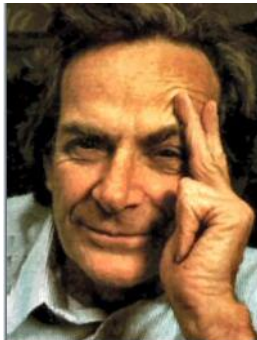
Si tratta cioè di uno **sfondo classico**, peraltro simile a quello del modello newtoniano; in entrambe le teorie infatti lo sfondo è costituito da uno spazio vuoto ed infinito, che nel caso del multiverso, invece di rimanere fisso come quello immaginato da Newton, si espande continuamente.

*"Pertanto",* conclude Hawking, *"quella del multiverso è una filosofia bottom-up della cosmologia in cui immaginiamo l'evolversi del cosmo in avanti nel tempo, così da poter predire ciò che dovremmo vedere ..."*

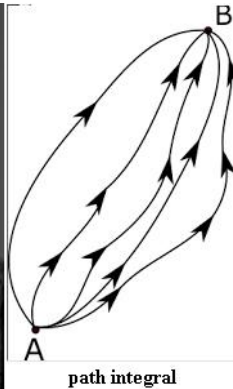
Ogni eventuale "abitante" di un dato universo-isola viene descritto come dotato di un passato unico e ben definito: **il multiverso risulta avere una sola storia**, dato un punto di partenza l'evoluzione segue un unico percorso. (74)

Per Hawking è invece irrinunciabile considerare l'**aspetto quantistico** del nostro universo "nel suo complesso", e cioè non solo a livello di micromondo. (75)

"... viviamo in un universo quantistico che dovrebbe piuttosto essere descritto attraverso una sovrapposizione di storie alla Feynman, ciascuna con il proprio valore di probabilità ..."



Richard P. Feynman



Un universo quantistico deve risultare "indeterminato" non solo a scale microscopiche (a livello di particelle o di stringhe), ma anche se considerato a scale che arrivano ben oltre il nostro orizzonte cosmologico.

In quest'ottica, quando pensiamo all'evoluzione del cosmo dobbiamo abbandonare la visione di un universo con una singola storia che

si sviluppa su uno sfondo costituito da uno spazio tempo classico; dovremmo piuttosto pensare all'universo come ad una sovrapposizione di molti possibili spazi tempo, ognuno con la propria storia individuale.

È un cambio di paradigma che, come vedremo tra un attimo, comporta conseguenze molto serie e profonde.

Se le storie dell'universo sono più di una, l'indagine cosmologica non può procedere da un inizio (qualunque esso sia) e predire quale sarà l'evoluzione dell'universo a partire da quel punto - **prospettiva bottom-up** -, si deve piuttosto procedere al contrario, partire dal NOSTRO presente per ricostruire passo a passo il NOSTRO particolare passato - **prospettiva top-down**. (76)

"... è necessario procedere all'indietro nel tempo a partire dalla superficie delle nostre osservazioni ..."

(dove qui con "superficie" Hawking intende "una fetta" tridimensionale dello spaziotempo immediatamente all'interno del nostro cono di luce passato).

L'elevato prezzo da pagare per questo cambio di prospettiva è la **crisi del rapporto causa-effetto**.

"... la storia dell'universo non è più oggettiva, ma dipende dalla domanda che gli poniamo ...", continua Hawking.

Intendeva dire che il passato (la nostra storia specifica) dipende dall'atto di osservazione, da quanto OGGI misuriamo.

Sebbene questa asserzione ci faccia sentire disorientati, è in fondo quanto la Meccanica Quantistica, da più di un secolo, ci ha dimostrato essere vero: gli atti di osservare e misurare compiuti dallo sperimentatore entrano esplicitamente nel processo di predizione.

Il senso di fastidio che ci provoca l'asserzione di Hawking è conseguenza della incapacità di comprendere cosa induca le funzioni d'onda della meccanica quantistica a passare da una spettrale **sovrapposizione di più realtà** a quella singola realtà di cui facciamo ogni giorno esperienza.

La scuola di Bohr ne dà un'interpretazione "strumentalista": il collasso della funzione d'onda in un singolo valore è dovuto all'intervento dello sperimentatore.

La cosiddetta **interpretazione di Copenhagen** sostiene infatti che sia l'atto di osservare a costringere la natura a scegliere tra un set di valori, ognuno con un diverso grado di probabilità, uno solo di essi.



Niels Bohr e Albert Einstein

Tuttavia, cosa significhi "osservare" o "misurare", ed il motivo per il quale si assiste al collasso della funzione, non sono chiariti nell'ambito di tale approccio.

Inoltre Bohr si guardò bene dal tracciare una linea netta di confine tra micromondo (nell'ambito del quale si applica la Meccanica Quantistica) e macro mondo

(dove invece si applica la teoria classica).



Hugh Everett III

Per capire cosa vuole dirci Hawking dobbiamo partire dalla tesi di dottorato di un fisico che rimase deluso dall'accoglienza del proprio lavoro presso la comunità scientifica, e che di conseguenza lasciò la fisica teorica per dedicarsi - con successo - alla ricerca in campo militare.

Suo figlio, Marc Everett, è frontman degli Eels ed ha imprestato la voce, nella versione anglosassone, al personaggio "Shreck" nell'omonimo film.



Mark Everett, rockstar e figlio di Hugh riflette insieme a Max Tegmark

Verso la metà degli anni '50 un allievo di John Wheeler, Hugh Everett III, propose - a quel tempo con scarso successo - una soluzione che in seguito venne definita l'**interpretazione a molti mondi** (abbreviata in **MWI**). (77)

Everett fece notare che l'equazione di Schroedinger non prevede collassi, e poiché ha dimostrato di funzionare benissimo con elettroni e quarks, ritiene non ci sia ragione per cui non debba farlo per gli oggetti più grandi da loro composti, indipendentemente dal numero di particelle coinvolte.

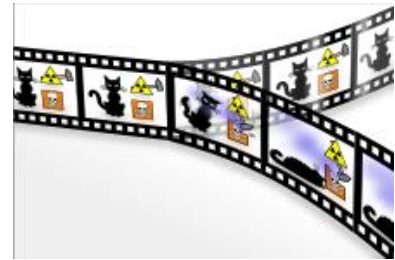
Quindi deve esistere un'unica **funzione d'onda dell'universo** che non collassa mai e che include ogni cosa, non solo l'oggetto dell'osservazione ma pure la descrizione dell'osservatore e dei suoi strumenti.

In quest'ottica l'universo è un sistema chiuso, non c'è nessuno all'esterno dell'universo che possa interferire e provocare un collasso.

Ogni processo di misurazione - che avviene dunque solo all'interno della "scatola universo" - si limita a produrre una ramificazione della funzione d'onda in ognuno dei possibili risultati, e se mettessimo insieme tutti quanti i diversi rami della funzione d'onda che esistono in un certo istante ci ritroveremmo con la funzione d'onda completa.

Un **atto di osservazione quantistico** si può descrivere in questo modo: quando gli sperimentatori fanno una misurazione, l'interazione tra questi ed il sistema misurato mette prima in correlazione lo stato quantistico del sistema con alcune particelle, poi con l'apparato sperimentale ed infine **con il loro stato mentale**.

Ne consegue che la ramificazione della funzione d'onda in più frammenti distinti, uno per ciascuno dei possibili risultati della misurazione, farà sì che anche gli osservatori si duplichino in copie quasi identiche, una per ogni ramo, distinguibili solo dal risultato della misurazione registrato da ciascuna di esse.



Ogni frammento della funzione d'onda si comporta come ramo separato della realtà, e descrive un particolare **percorso storico** nel quale l'osservatore è inconsapevole dell'esistenza delle proprie copie in quanto queste *"... vivono il resto delle loro vite in storie differenti, cavalcando creste diverse dell'onda quantistica universale ..."*

*"E' uno schema oggettivamente deterministico con la probabilità che compare solo a livello soggettivo"* scrisse Everett (78)

Le probabilità, secondo lui, quantificano l'incertezza e l'equazione di Shroedinger può dunque esser usata per predire in anticipo le altezze relative dei frammenti d'onda che corrispondono a tutti i possibili esiti di una misurazione;

*"... i quadrati di tali ampiezze rappresentano la strategia ottimale per fare scommesse ..."*

L'osservazione in questo contesto equivale ad una potatura dell'albero dei possibili futuri: la storia si divide ed ogni copia dell'osservatore vede sopravvivere soltanto il proprio ramo.

I rami della storia che non interferiscono più sono definiti **disaccoppiati** (o **decoerenti**).

Il classico esempio di storie che non si decoerentizzano è offerto dall'esperimento della doppia fenditura; in assenza di strumenti di misurazione (osservazione) le traiettorie dell'elettrone non si disaccoppiano ma si frammischiano producendo schemi di interferenza.

Tuttavia qualora l'ambiente sia saturato con un gas di particelle, gli elettroni che emergono da ciascuna fenditura interagiscono col gas e perdono la capacità di interferire ulteriormente tra di loro: sparisce così lo schema di interferenza sullo schermo al termine della loro traiettoria.

*"l'ambiente delle particelle del gas ha compiuto, vicino alle fenditure, un atto di osservazione che provoca la decoerentizzazione dei frammenti d'onda"* scrive Everett.

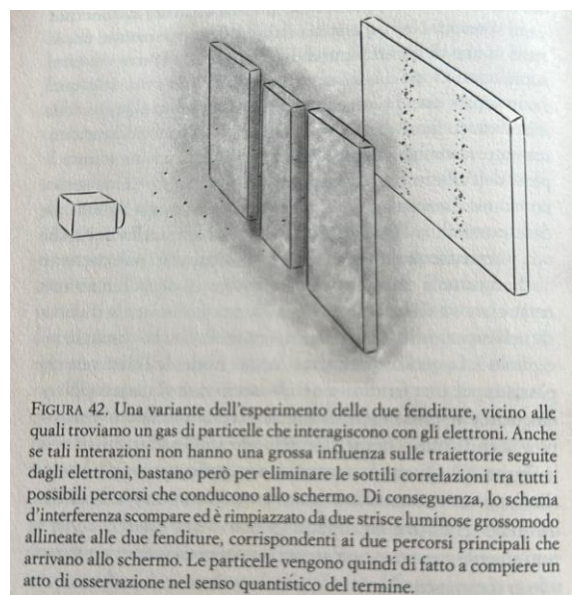


FIGURA 42. Una variante dell'esperimento delle due fenditure, vicino alle quali troviamo un gas di particelle che interagiscono con gli elettroni. Anche se tali interazioni non hanno una grossa influenza sulle traiettorie seguite dagli elettroni, bastano però per eliminare le sottili correlazioni tra tutti i possibili percorsi che conducono allo schermo. Di conseguenza, lo schema d'interferenza scompare ed è rimpiazzato da due strisce luminose grossomodo allineate alle due fenditure, corrispondenti ai due percorsi principali che arrivano allo schermo. Le particelle vengono quindi di fatto a compiere un atto di osservazione nel senso quantistico del termine.

Sono due le proprietà chiave dello schema di Everett:

- la natura esatta delle domande che poniamo determinano la formazione della struttura ad albero con rami indipendenti;
- è possibile fare predizioni sensate (scommesse ragionevoli dove la somma delle probabilità sia eguale a 1) solo riguardo a percorsi storici indipendenti, decoerenti e che si differenzino in modo sostanziale (un punto importantissimo come vedremo per la cosmologia top down).

E' l'ambiente, in ogni momento, a compiere atti di osservazione, cancellando così interferenza quantistica trasformando innumerevoli potenzialità in qualche attualità (decoerentizzazione); svolge cioè il ruolo di ponte tra micromondo e macromondo, rendendo possibile l'esistenza di una solida realtà classica nonostante le continue fluttuazioni quantistiche che si verificano a scala microscopica.

"... Ogni atto di osservazione insieme agli innumerevoli risultati casuali accumulatisi nel corso di miliardi di anni contribuisce con un po' di informazione al nostro ramo della storia ..." e conferisce specificità al mondo che ci circonda.

E' importante specificare come le due interpretazioni (quella di Bohr e quella di Everett) producano predizioni diverse: l'interpretazione di Everett ci informa che, qualora fossimo in grado di invertire tutte le interazioni che vengono a formare un'osservazione, potremmo ricombinare i diversi rami della funzione d'onda e farli interferire di nuovo.

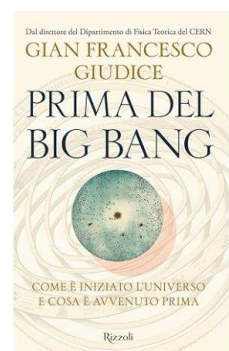
**Saremmo cioè in grado di determinare retrospettivamente il passato**, cosa che risulta impossibile in base all'interpretazione di Bohr con il suo modello di collasso. (79)

L'interpretazione a molti mondi, che vede "*l'universo nel suo complesso come un sistema a sé stante non replicato e non contenuto in una scatola ancora più grande*", è alla base della cosmologia quantistica che sarà sviluppata molti anni dopo da Hawking e dal suo gruppo di Cambridge, con l'abbandono della prospettiva "occhio di dio" in favore di una visione cosmologica dal punto di vista "occhio del verme", dal basso e dall'interno.

### Note:

(72) Gian Francesco Giudice è autore di un ottimo saggio divulgativo sull'argomento, "Prima del Big Bang", pubblicato nel 2023.

(73) "*Le nostre teorie fisiche non abitano in un cielo platonico; non siamo angeli che vedono l'universo dall'esterno, ma ne facciamo parte così come le nostre teorie che non sono mai del tutto disaccoppiate da noi: abbandoniamo la prospettiva dal di fuori, l'occhio di dio, per abbracciare quella dal basso, l'occhio del verme*" (Hawking).

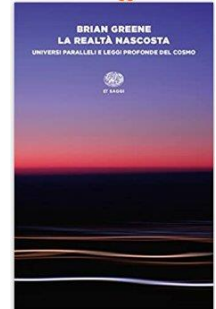


(74) Hawking definisce quella del multiverso una teoria "*semiclassica*": l'evoluzione dell'universo presenta caratteristiche quantistiche ma sostanzialmente non si discosta da un "racconto classico", come lo sono quello ricavato dalla Relatività Generale e dalla meccanica di Newton.

Anche l'ipotesi **assenza di confini**, sviluppata in precedenza insieme ad Hartle (abbiamo già raccontato come tale modello fallisca nel descrivere l'evoluzione del nostro universo in quanto

predice la creazione di un cosmo sostanzialmente vuoto), pur proponendo una descrizione dell'origine quantistica dello spazio tempo (un universo che si crea dal nulla) presenta lo stesso limite riscontrato per il multiverso: l'essere una visione **bottom-up**, una sola storia che si dipana dall'origine sino al presente.

(75) Se un elettrone, un quark, un muone, un neutrino o un fotone possono esistere in sovrapposizione di più stati (quindi possedere ciascuno più di una storia), e dunque esser descritti da onde di probabilità (l'esistenza stessa del dispositivo che utilizzate per leggere questo post lo dimostra), se questi sono gli elementi fondamentali con cui l'universo è formato, perché anche l'universo stesso non dovrebbe esser descrivibile con una funzione d'onda (si chiedeva Everett)?



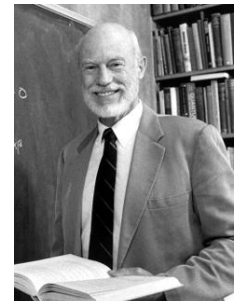
"Ogni anno che passa" - scrive Brian Greene in "**La realtà nascosta**" - "gli sperimentatori confermano che l'equazione di Schroedinger funziona per collezioni sempre più grandi di particelle, ed abbiamo ragione di credere che funzioni per collezioni enormi, come quelle che compongono noi e l'universo stesso".

(76) Abbiamo già visto Il paragone con la biologia e la storia della vita sulla Terra: risulta inutile la ricerca di una legge deterministica che, partendo dalla prima forma di vita, sia in grado di predire la comparsa dei sapiens perché in tal caso dovremmo disegnare innumerevoli "alberi della vita", uno per ogni possibilità che in ogni istante si sia palesata, che tuttavia **non si sono attuati**.

Meglio allora partire dal presente dalle estremità dell'albero della vita, e ricostruire a ritroso il percorso evolutivo, prendendo così in considerazione solo i tracciati effettivamente seguiti dall'evoluzione sino a scendere alla sua radice.

(77) The **Many-Worlds interpretation of Quantum Mechanics (MWI)** prende spunto dal lavoro condotto nel 1957 da Everett per la sua tesi di dottorato, successivamente ripreso da Bryce Seligman DeWitt.

Fu DeWitt a coniare il termine "**a molti mondi**" per riferirsi all'idea che la misurazione di una proprietà di uno stato quantistico abbia come conseguenza la divisione della storia dell'universo in molti mondi distinti, ciascuno dei quali caratterizzato da diversi risultati della misura.



Bryce DeWitt

(78) Un argomento sviluppato poi da Bruno De Finetti:



Bruno De Finetti

*"... tutti noi quando ci interroghiamo sulle probabilità di qualcosa usiamo le probabilità soggettive per quantificare la nostra incertezza in situazioni di conoscenza incompleta; cioè il grado di credenza nel verificarsi di un evento assegnato da una persona in un dato istante e con un dato insieme di informazioni.*

*Nel corso della vita acquisiamo confidenza nelle probabilità soggettive perché verifichiamo che gli eventi più probabili si verificano più spesso ...".*

Vedi i post che ho scritto su di lui:

- il 7 ottobre 2023 "*Il carattere delle probabilità nelle interpretazioni della meccanica quantistica: Copenhagen, Everett e "l'affidabilità" delle probabilità soggettive di de Finetti.*"
- il 18 ottobre 2019 "*Probabilità, certezza ed affidabilità: l'incredibile contributo del matematico*



*italiano Bruno De Finetti, un uomo che nella seconda metà del '900 ha "salvato" la reputazione della scienza:*

**(79)** La capacità di predire retrospettivamente il passato al fine di comprendere come è emerso il presente risulta di centrale importanza in cosmologia.

Il modello di collasso di Bohr ci dice invece che non serve a nulla far girare l'equazione di Shroedinger all'indietro nel tempo per scoprire com'era il passato in quanto gli atti di osservazione passati hanno interferito con l'evoluzione prescritta dall'equazione.

## Cap 9^: la cosmologia quantistica.

Nella parte precedente ci siamo chiesti come affrontare il problema di descrivere la storia dell'universo risolvendo il dualismo *dinamiche e condizioni al contorno*.

Abbandonando l'idea di un *multiverso* - con la sua arena costituita da uno spazio vuoto, infinito ed in continua espansione - per abbracciare quella di un universo quantistico, tale dualismo sparisce: insieme però alla *capacità predittiva* del metodo scientifico.

Hawking ci invita a prendere in esame una **struttura predittiva più generale**, che intrecci i seguenti 3 elementi in ciò che definisce "*un tritico interconnesso*":

- un **modello di cosmogenesi** (quale l'*ipotesi senza confini*)
- una **nozione di evoluzione** (quale l'*idea di Feynman delle molte storie nel paesaggio delle stringhe*)
- l'**osservazione** (vedi in nota il significato di *osservazione quantistica*). (80)

**Evoluzione (dinamica)**, **origine (condizioni al contorno)** e **osservazione (domande)** risultano così raccolte in un singolo schema, e la loro interconnessione ci suggerisce come, all'interno di questo modello, le leggi di natura vengano ad emergere dalla fusione di questi tre elementi.

Vediamo come.

In primo luogo ci troviamo di fronte a tutte le possibili storie di espansione dell'universo; ognuna con origine in un **inizio senza confini**.

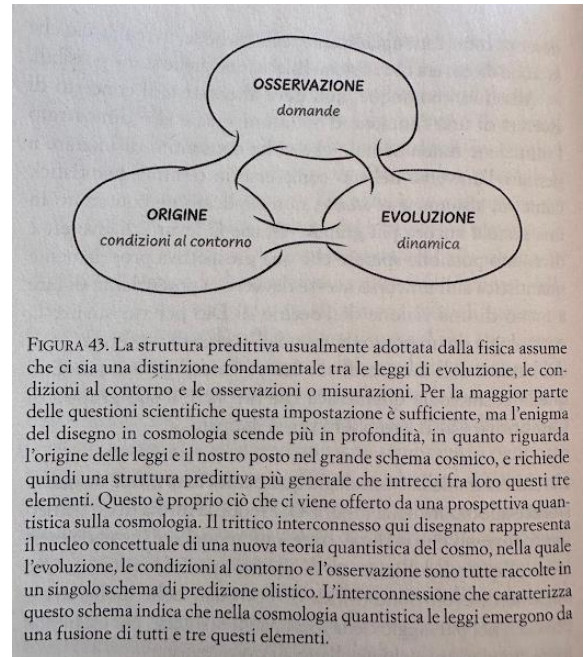
Poi ogni storia si ramifica, con ogni snodo che comporta un **elemento di casualità**, così da produrre diversi rami di leggi effettive della fisica, e - forse - livelli più alti di complessità.

"*E' la descrizione del cosmo in uno stato di preesistenza:*" - scrive Hertog - "*indeterminazione e potenzialità. Fin qui non ci sono predizioni, equazioni unificatrici, nozione di tempo: nulla di definito, solo uno spettro di possibilità*".

In secondo luogo, il processo interattivo che definiamo **osservazione** trasforma le possibilità in qualcosa che accade, producendo la realtà fisica che ci circonda.

"*In un universo quantistico la realtà fisica tangibile emerge da un ampio orizzonte di possibilità per mezzo di un continuo processo di domande ed osservazioni*".

Nell'ambito di una prospettiva soggettiva, abbiamo visto come Everett ci informasse del fatto che l'atto di osservazione corrisponda alla potatura dell'albero dei possibili percorsi che si aprono davanti a noi: dalla verifica del risultato conseguente il lancio di una moneta o da una particolare misurazione ottengo un valore specifico, e così nella mia personale esperienza tutti gli altri valori, possibili sino a quel momento, vengono esclusi per sempre.



"... nell'esperienza di un dato osservatore sopravvive un solo ramo ...". (81)

Hawking si spinge ancora più in là, rispetto a Everett, sostenendo che **tale potatura non riguardi solo il futuro ma si estenda anche in direzione del passato:**

"... la storia dell'universo dipende dalla domanda che gli poni ...".

Con questa affermazione intendeva dire che le osservazioni che compiamo oggi oltre a "soltire i possibili futuri" selezionano, tra i molti possibili, soltanto quei percorsi dall'origine ad oggi (le storie dell'universo dal Big Bang ad oggi) che siano compatibili con ciò che misuriamo.

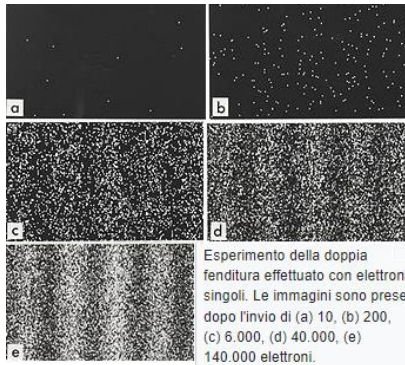
"... l'intera collezione di fatti caratterizzanti l'universo che ci circonda (noi stessi, la biosfera, le leggi effettive della fisica che osserviamo) costituisce una domanda che poniamo a quest'ultimo, e **tale domanda fa retroattivamente venire all'esistenza** quel numero limitato di rami della storia del cosmo che hanno le proprietà attualmente osservate ..."

Per Hawking l'osservazione è quindi una parte indispensabile del continuo processo attraverso il quale la realtà fisica viene ad emergere: **universo quantistico ed osservatori emergono in sincronia.**

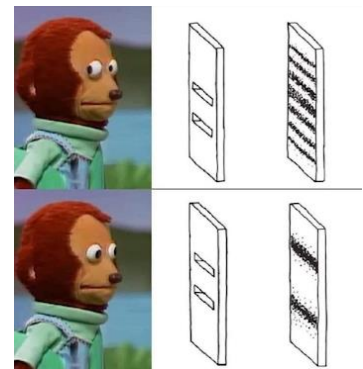
Ma cosa significa affermare che *l'osservazione di oggi può selezionare un passato tra i molti possibili?*

**John Wheeler, l' "esperimento della scelta ritardata" e l'universo "partecipativo".**

Abbiamo già illustrato in precedenza il significato dell'esperimento della doppia fenditura; il tipico schema di interferenza che si forma sullo schermo scompare qualora sia stato posto un rivelatore nei pressi di una delle due fenditure.



Il rivelatore infatti, compiendo un atto di osservazione, provoca il disaccoppiamento dei frammenti d'onda. (82)



Negli anni '70 **John Archibald Wheeler** immagina una variante di tale esperimento (che sarà poi realizzato solo nel 1984) dove, al posto dello schermo su cui si dovrebbe formare l'interferenza viene posizionata una veneziana, in grado di aprirsi e chiudersi, che nasconde il rivelatore.

Lasciandola chiusa (rivelatore non in funzione) si forma lo schema di interferenza, ma non appena viene aperta (rivelatore in funzione) quest'ultimo scompare.



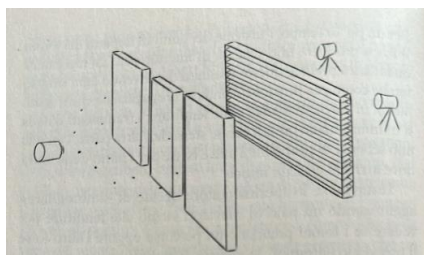


FIGURA 45. Una variante dell'esperimento della doppia fenditura compiuto da Young con i fotoni, in cui la lastra fotografica sulla destra è sostituita da una veneziana dietro alla quale ci sono una coppia di rivelatori, ognuno puntato su una delle due fenditure. Lo sperimentatore che controlla i rivelatori può aspettare fino al momento in cui ogni singolo fotone raggiunge la veneziana prima di decidere se lasciare che quest'ultima resti chiusa (compiendo così l'esperimento della doppia fenditura nella sua forma originale, con la produzione delle frange d'interferenza) oppure aprirla e verificare da quale fenditura è passato il fotone. La cosa sorprendente è che questa scelta ritardata non confonde affatto i fotoni. La natura è intelligente e i fotoni si comportano sempre nel modo giusto; ciò dimostra che l'atto di osservazione nella teoria quantistica estende in modo sottile la propria influenza anche nel passato.

E' esattamente lo stesso risultato riscontrato con l'esperimento originale: dov'è allora la differenza?

L'esperimento originale prevedeva il controllo del passaggio dell'elettrone (o del fotone) appena PRIMA delle fessure, cioè prima che esso possa "scegliere" dove passare.

Una tale situazione, ragionava Wheeler, consentirebbe comunque a qualcuno di obiettare *che la scelta di dove passare sia stata influenzata da tale osservazione.* (83)

Nella sua variante invece la scelta di lasciar chiusa o aprire la veneziana viene effettuata soltanto DOPO che la particella è passata attraverso le fenditure:

"come fanno dunque i fotoni a sapere ciò che lo sperimentatore deciderà di fare, dopo che questi hanno già attraversato le fenditure?" - si chiedeva Wheeler.

La **sequenza temporale causa-effetto** ne esce completamente distrutta.

Si tratta di una ulteriore "stranezza quantistica" che interessa esclusivamente il micromondo delle particelle?

Per ovviare a questa obiezione, poco tempo dopo Wheeler escogitò una replica dell'esperimento che tuttavia implichi l'utilizzo di oggetti di dimensioni macroscopiche ed agisca su intervalli di tempo enormi: **l'esperimento a scelta ritardata cosmica** (vedi voce relativa su wikipedia)

La luce di un remotissimo quasar risulta schermata dalla presenza, tra noi ed il quasar, di un corpo dotato di grande massa, quale un buco nero oppure una galassia.

La gravità di quest'ultimo curva la traiettoria dei fotoni - che hanno lasciato il quasar dirigendosi verso punti lontani da noi - permettendo loro così di "girare intorno all'ostacolo" e raggiungerci.

Risultato è che noi vediamo l'immagine del quasar moltiplicata (**effetto lente gravitazionale**); i suoi fotoni ci raggiungono infatti seguendo più di un singolo percorso.

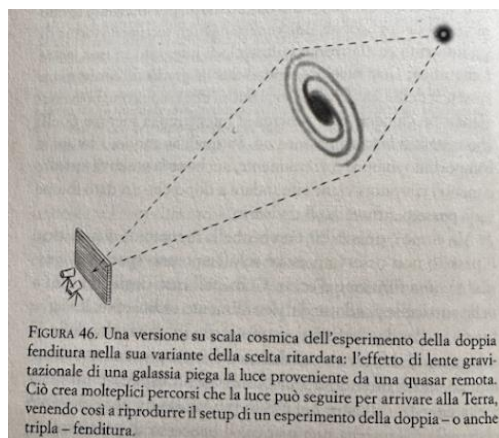


FIGURA 46. Una versione su scala cosmica dell'esperimento della doppia fenditura nella sua variante della scelta ritardata: l'effetto di lente gravitazionale di una galassia piega la luce proveniente da una quasar remota. Ciò crea molteplici percorsi che la luce può seguire per arrivare alla Terra, venendo così a riprodurre il setup di un esperimento della doppia - o anche tripla - fenditura.

Per semplicità, immaginiamo ci arrivino soltanto due fasci di fotoni, come nel caso del **Twin Quasar QSO 0957+561** scoperto nel 1979. (84)



Doppio Quasar (QSO 0957+561), meglio conosciuto come "Twin Quasar", distante 9 miliardi di anni luce [9].

Se fossimo in grado di raccogliere un numero sufficiente di fotoni per ciascun fascio - non disturbati nel loro percorso attraverso lo spazio che ci separa -, proiettando su uno schermo la luce dei due fasci osserveremmo la figura di interferenza.

Se in prossimità di uno dei due fasci in arrivo OGGI posizionassimo un rivelatore, essa dovrebbe sparire.

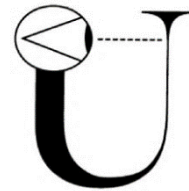
Avremmo così influenzato con un atto compiuto oggi un evento successo miliardi di anni fa. (85)

La spiegazione che offre Wheeler ad un tale risultato è che *il passato non osservato esista solo come spettro di possibilità* (funzione d'onda).

"... noi siamo inevitabilmente coinvolti nel causare ciò che sembra semplicemente accadere: non siamo solo spettatori ma partecipanti ... in un certo strano senso il nostro è un universo partecipativo ..." - scrisse.

Accompagnò queste parole con uno schizzo, che nelle sue intenzioni rappresentava l'evoluzione dell'universo dal Big Bang ad oggi: una specie di lettera U con la gamba rivolta a sinistra che cresce di spessore e termina con un occhio gigante (l'osservatore oggi).

Il suo sguardo è fisso verso l'estremità sottilissima dove inizia l'altra gamba (il Big Bang).



Il significato che voleva dare al suo disegno è che l'universo, partito da una dimensione piccolissima, si è ingrandito col tempo sino a generare osservatori i cui atti di osservazione, miliardi di anni dopo, conferiscono una realtà tangibile al passato; anche a quel passato remoto quando gli osservatori non esistevano ancora.

Nel 2002, quarant'anni dopo, Hawking utilizzò tale concetto per determinare retroattivamente non solo i percorsi delle particelle quantistiche, ma anche quello seguito dall'universo nel suo complesso.

"... Le osservazioni (le domande che facciamo oggi alla natura) trasformano retroattivamente ciò che potrebbe esser accaduto in ciò che è accaduto, contribuiscono cioè a delineare il passato ..."

Qui bisogna fare estrema attenzione al significato delle parole usate da Hawking: non è infatti che l'osservazione condotta oggi sia in grado di modificare il passato, non possiamo mandare segnali indietro nel tempo.

La cosmologia Top Down non nega che il passato sia accaduto: piuttosto l'osservazione fa emergere più solidamente il passato nell'esistenza, affina il significato di "accadere", di ciò che si può o non si può dire riguardo al passato stesso.

Ci sono cioè molte diverse storie che possono portare al presente, a ciò che ora osserviamo ora: l'osservazione non ne crea di nuove, ma in un certo senso "restringe" il gruppo selezionando quelle che meglio si accordano con le nuove osservazioni.

Hertog, ad imitazione di Wheeler, schizza un albero con un tronco dove è posizionato un grosso occhio (che rappresenta l'osservatore oggi); dal tronco si ramifica il futuro sotto forma di chioma dell'albero (orizzonte di possibilità), ma dalla sua base parte una ramificazione delle radici che rappresentano i possibili passati.

L'occhio interagisce con entrambe le ramificazioni.

"... nell'universo quantistico le osservazioni di oggi sviluppano radici di possibili passati e rami che delineano possibili futuri ritagliandoli dal vasto regno di ciò che può essere ..." - è il commento di Hertog al proprio disegno.

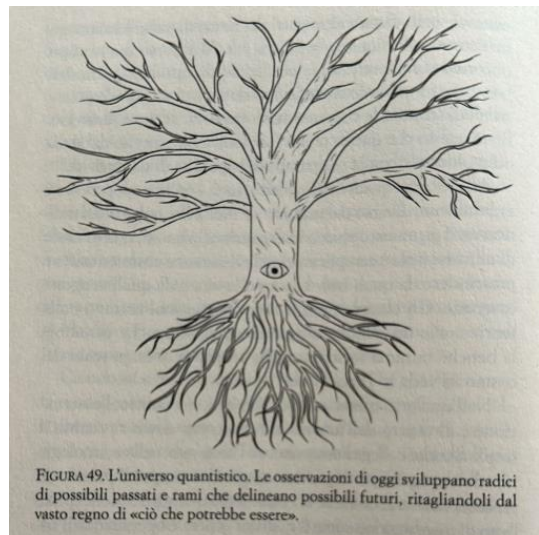


FIGURA 49. L'universo quantistico. Le osservazioni di oggi sviluppano radici di possibili passati e rami che delineano possibili futuri, ritagliandoli dal vasto regno di «ciò che potrebbe essere».

Wheeler era solito illustrare la propria visione con una variante del **gioco delle 20 domande**.

Il gioco classico prevede che da un gruppo di persone venga isolato un soggetto; il gruppo, ad insaputa di quest'ultimo, si accorda su una parola che l'escluso, una volta riammesso, dovrà indovinare facendo 20 domande ai soggetti del gruppo.

Nella variante di Wheeler, il gruppo decide di non accordarsi su una singola parola, ma di agire come se l'avesse fatto: gli interrogati potranno rispondere cosa vogliono, rispettando tuttavia la condizione che quanto dicano sia coerente con tutte le risposte date in precedenza.

La successione delle domande poste selezionerà in breve tempo una singola parola definita, pur senza che nessuno in precedenza l'avesse scelta!

Quest'ultima dipende infatti dalla sequenza delle domande poste (e da un poco di casualità).

Se infatti le stesse domande fossero state poste in una sequenza diversa, il risultato sarebbe stato diverso.

E lo sarebbe stato anche se, replicando il gioco, la sequenza delle domande venisse replicata tale e quale: entrerebbe infatti in gioco il "poco di casualità".

*"... nessuna parola è una parola sino a che essa viene promossa a realtà dalla scelta delle domande poste a delle risposte date ..." - scrive Wheeler.*

*"... nello stesso modo l'universo quantistico non è dotato di una storia come sequenza lineare di avvenimenti, ma è una sintesi che include anche noi, dove ciò che accade ora plasma retroattivamente cosa c'era prima ..."*

E' questo un elemento "top down" che assegna agli osservatori *"un sottile ruolo creativo nelle vicende cosmiche, donando alla cosmologia un delicato tocco soggettivo"*;

*"... senza domande non c'è storia!"* scrive Hertog interpretando il pensiero di Hawking.

Dal 2006 al 2012 assistiamo alla seconda fase di sviluppo della cosmologia top down: obiettivo di Hawking è sempre quello di cercare di giustificare la particolare natura biofilica del nostro universo, senza chiamare in causa il multiverso con le sue metaleggi e la perdita di capacità predittiva da parte della scienza.

Il suo modo di procedere prevede l'identificazione, tramite l'osservazione, del maggior numero possibile di schemi assimilabili a leggi.

Questi ultimi vengono poi usati per costruire storie dell'universo che finiscano con un cosmo come quello che osserviamo: storie che in un secondo tempo saranno messe insieme per costruire il nostro passato sino a raggiungere il cuore della fase quantistica primordiale del cosmo, portandoci nell'era del Big Bang caldo dove si trova il carattere evolutivo delle leggi fisiche:

*"... poniamo la superficie di osservazione vicino alla fine dell'inflazione e guardiamo indietro da lì, dentro il Big Bang stesso ..."*

Qui assistiamo ad una **metaevoluzione**, cioè ad una evoluzione delle leggi della fisica; un processo di ramificazione di tipo darwiniano, con variazione e selezione, che può esser compreso solo in retrospettiva.

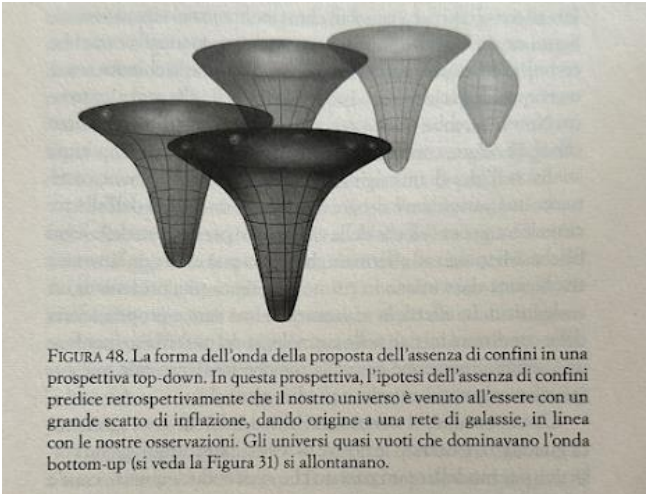


FIGURA 48. La forma dell'onda della proposta dell'assenza di confini in una prospettiva top-down. In questa prospettiva, l'ipotesi dell'assenza di confini predice retrospettivamente che il nostro universo è venuto all'essere con un grande scatto di inflazione, dando origine a una rete di galassie, in linea con le nostre osservazioni. Gli universi quasi vuoti che dominavano l'onda bottom-up (si veda la Figura 31) si allontanano.

Mentre altri approcci tentano ad esempio di spiegare il motivo per il quale oggi esistano solo 3 dimensioni spaziali estese, assegnando un grado di probabilità a ciascuna delle differenti possibili combinazioni di dimensioni previste dalla teoria delle stringhe, quello **Top Down** si limita a **predire retrospettivamente** che l'osservazione compiuta dall'**ambiente primitivo** (del fatto che 3 dimensioni si erano liberate ed avevano iniziato ad espandersi) selezioni, tra tutte le storie possibili, solo quelle che finiscono con 3 dimensioni estese.

"... *In biologia*" - osserva Hertog - "*non ci si interroga sul grado di probabilità del nostro albero della vita rispetto a tutti gli alberi possibili completamente diversi: l'evoluzione ha preso una via, quelle alternative (spettro di possibilità) non contano più ...*". (86)

Il **Modello Standard**, con la sua ventina di parametri "da inserire a mano", non è certamente l'unico risultato possibile della sequenza di transizioni segnate da rotture di simmetria avvenute nelle primissime fasi dopo il Big Bang; in base alla Teoria delle Stringhe risulta infatti molto improbabile che l'evoluzione dell'universo abbia prodotto proprio queste condizioni.

L'approccio Top Down immagina invece che le osservazioni compiute dall'ambiente nell'**universo primordiale**, i cui risultati sono codificati in quegli accidenti congelati che costituiscono le leggi effettive, selezionino - tra tutte le storie cosmologiche possibili - soltanto quelle coerenti con il Modello Standard.

Infine, cosa importantissima per Hawking, questa visione riabilita la sua **ipotesi dell'assenza di confini**.

Sebbene, come abbiamo visto in precedenza, in una **prospettiva bottom-up** tale modello predica una minima quantità di inflazione, dunque una prevalenza di universi vuoti, la **prospettiva Top Down** predice invece retrospettivamente che il nostro universo ha avuto origine con un forte scatto di inflazione, una situazione in linea con le nostre osservazioni di oggi:

"... *il passato dipende dal presente ...*"

Ci si può chiedere a questo punto quale debba essere il ruolo rivestito da una **teoria dell'origine** in una tale prospettiva.

"... *l'assenza di confini sta alla cosmologia come L.U.C.A. sta all'evoluzione biologica ...*" - ribadisce Hertog.

La composizione biochimica di **L.U.C.A. (Last Unique Common Ancestor)**, l'antenato comune a tutti gli esseri viventi qui sulla Terra, non determina certo quale tra i numerosissimi alberi della vita crescerà a partire da questo portandoci alle forme di vita che vediamo intorno a noi; d'altra parte senza L.U.C.A. oggi non ci sarebbe alcun albero della vita.

Nello stesso modo l'**origine senza confini** è sì cruciale per l'esistenza dell'universo, ma non predice il particolare albero delle leggi fisiche che da esso emergerà.

L'utilità dell'approccio Top Down sta piuttosto nella capacità di **svelare l'interconnessione del cosmo**, la presenza di nuove correlazioni tra quelle che potrebbero sembrare proprietà indipendenti dell'universo.

Ad esempio le variazioni di temperatura nel fondo a microonde: i tratti statistici delle variazioni di temperatura nella CMB risultano allineati con quelli delle fluttuazioni generate negli universi con un forte scatto di inflazione. Quindi, dal punto di vista Top Down, questi ultimi sono i più probabili.

L'approccio Top Down predice una forte correlazione tra le variazioni di temperatura osservate nella CMB e altre parti dei nostri dati che selezionano uno scatto inflazionario significativo. Ha dunque potenzialità per scoprire la coerenza nascosta codificata nell'universo (al contrario dell'ipotesi del multiverso, che registra invece una perdita di predittività).

Resta a questo punto da chiarire un punto: **la Cosmologia Top Down è al momento solo un'ipotesi.**

Si trova oggi in una posizione non differente rispetto a quella in cui si trovava la teoria di Darwin nel XIX secolo: una buona teoria che tuttavia non dispone di sufficienti dati per validarla o confutarla.

I dati oggi a disposizione sono ancora troppo scarsi per permetterci di ricostruire come sia emerso l'albero delle leggi dal Big Bang caldo: non sappiamo cosa sia la materia oscura e l'energia oscura, le componenti prevalenti del nostro universo, né come siano emerse dall'evoluzione dell'universo primordiale.

Ad oggi, una parte rilevante di coloro che si occupano di cosmologia è infatti ancora alla ricerca di un set di "*principi perenni*" che chiariscano il motivo per cui l'universo non poteva che svilupparsi così.

Vedremo nei prossimi post quali contemporanei sviluppi della fisica sembrano indicare la strada verso un tentativo di verifica della Top Down.

### Note:

**(80)** Si tratta naturalmente dell'**atto di osservazione quantistico** di cui abbiamo trattato nella parte precedente, che **può esser eseguito anche dall'ambiente**, non necessariamente da un essere cosciente.

L'osservazione è il processo nel quale, in corrispondenza dei punti di ramificazione della storia, un particolare risultato tra i molti possibili si converte in un fatto.

Potrebbe esser compiuta da un rilevatore, dalla rottura delle simmetrie nell'universo primordiale o da un singolo fotone della CMB (il fondo a microonde).

**(81)** Se infatti lancio una moneta, da quel momento in poi la funzione d'onda si ramifica e ci sarà un "me stesso" che vede uscire croce, ed un altro "me stesso" che vede uscire testa: ognuno dei due "me stesso" ricorderà tuttavia solo un risultato.

**(82)** In un certo senso il rilevatore con il suo atto di osservazione "costringe" la luce a mostrare la propria natura corpuscolare.



(83) Si mantiene infatti così una sequenza temporale logica: dapprima si controlla dov'è la particella e così facendo si influisce sulla sua futura condotta, e a lei non resta che adeguarsi. Anche se con più di una forzatura, l'*effetto si manifesterebbe comunque dopo la causa*.

(84) Il Doppio Quasar (conosciuto anche come Twin Quasar, Double Quasar o QSO 0957+561 A/B) è stato il primo oggetto con lente gravitazionale ad essere stato osservato; risulta visibile in due immagini distinte grazie all'effetto lente prodotto dalla galassia YGKOW G1 che è posizionata tra la Terra e quest'ultimo.

(85) Ad oggi non è ancora stato possibile eseguire un tale esperimento per due motivi:

- il numero limitato di fotoni che ci raggiunge: l'attuale tecnologia non ci consente (ancora) di realizzare l'esperimento;
- nel corso del lunghissimo percorso da essi completato, i fotoni si sono mossi in uno spazio che sembra vuoto ma che sappiamo non esserlo (rischio interferenze).

(86) Non possiamo infatti ricavare la storia di *homo sapiens* partendo dal primo essere vivente la cui evoluzione ha prodotto tutte le forme di vita che riscontriamo oggi sul pianeta; da quest'ultimo avrebbero infatti potuto dipanarsi innumerevoli alberi della vita profondamente diversi.

Esiti casuali (quali le mutazioni indotte da eventi esterni) producono ramificazioni dell'albero e possono dar luogo ad accidenti congelati.

Qui dobbiamo tuttavia fare un distinguo: il paragone della cosmologia top down con la biologia regge solo fino ad un certo punto.

Nella biologia infatti non esistono molteplici alberi della vita in stato di sovrapposizione.

Nell'evoluzione biologica lo stato quantistico alla base della realtà può esser ignorato in quanto, per effetto dell'ambiente, i percorsi evolutivi si disaccoppiano subito: occorre una frazione di secondo perché una mutazione innescata da un evento quantistico si decoerentizzi.

Quindi mentre il nostro albero della vita si è evoluto indipendentemente dagli alberi alternativi, le storie dell'universo in un certo senso evolvono insieme sino a che un osservatore non le seleziona con la misurazione.

## Cap 10^: la rivoluzione olografica.

Nelle parti precedenti abbiamo trattato di *cosmologia del multiverso* e di *cosmologia quantistica*. Entrambe sono alla ricerca del motivo per il quale il nostro universo ha quelle caratteristiche biofiliche che hanno favorito lo sviluppo di vita sul nostro pianeta a distanza di miliardi di anni dal Big Bang.

Non avendo trovato alcuna "legge di natura" (una legge "a priori", un disegno, che dal Big Bang conduca sino ad oggi) in grado di darne conto, chiamano in causa la complessità:



- la prima, ipotizzando che il nostro sia solo uno tra gli infiniti universi isolati che vengono continuamente creati, afferma che, dato che tutte le combinazioni possibili esistono nel multiverso, noi abitiamo in uno dei pochi dove la vita si possa sviluppare;

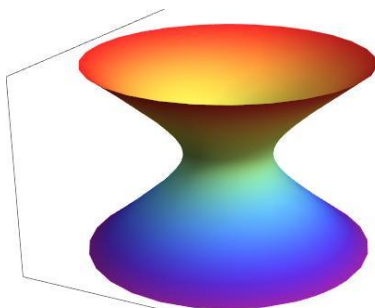
- la seconda ritiene invece esista un solo universo, ma con caratteristiche quantistiche tali che più storie della sua evoluzione possano esistere in sovrapposizione.

Anche se a prima vista entrambe le soluzioni richiamano un'enorme varietà (di "universi" la prima e di "storie in sovrapposizione" la seconda), tra le due c'è una differenza sostanziale: la complessità della struttura ad albero - cui fa riferimento la cosmologia quantistica - risulta decisamente inferiore a quella del multiverso; questo perché *la maggioranza degli universi con una storia diversa dal nostro che si dipana dallo stesso istante iniziale non assomiglia per nulla al nostro, dunque non compaiono nelle ramificazioni.* (87)

Dal 2006, dopo una lunga pausa in cui si dedicò ad altro, Jim Hartle tornò a lavorare con Stephen Hawking, aprendo così la *seconda fase della cosmologia top-down*.

Nel frattempo, partendo da un'intuizione di **Juan Maldacena** risalente ad una decina di anni prima, i teorici delle stringhe avevano iniziato a prender in considerazione l'ipotesi che "*un certo tipo di universi (pur se diversi dal nostro) godessero di proprietà olografiche*".

Hawking, venuto a conoscenza di questi studi, si chiese se anche il nostro universo osservabile potesse esser pensato come una membrana olografica quadridimensionale che avvolge uno **spazio anti de Sitter (AdS)** con 5 dimensioni.



Category:Anti-de Sitter spaces

La versione sviluppata da Maldacena ed altri della fisica olografica racconta come un *universo con curvatura negativa* (AdS) dotato di 3 dimensioni spaziali ed una dimensione temporale possa in realtà costituire la manifestazione di una realtà nascosta, localizzata su una sottile fetta di spaziotempo.

**Gravità e spaziotempo curvo** sarebbero pertanto una proiezione nelle 4 dimensioni estese di un "mondo ombra" tridimensionale - che di esse ne è privo - costituito da particelle e campi quantistici, una sorta di ologramma.

Se questo fosse vero, **gravità** (Relatività Generale) e **teoria quantistica** potrebbero essere **due descrizioni diverse ma complementari di una sola realtà fisica**; qualora riuscissimo a decodificare l'ologramma nascosto, comprenderemo la natura più profonda di tale realtà.

Riassumiamo brevemente l'origine di tale idea, che ho raccontato nei dettagli in "*Leonard Susskind e la sua guerra ventennale per la salvezza della Meccanica Quantistica*". (88)

All'inizio degli anni 70' Hawking aveva scoperto che, analizzando i buchi neri da una prospettiva semiclassica - combinando cioè i principi della teoria quantistica e della Relatività Generale - si arriva ad un risultato sorprendente: i processi quantistici che si verificano in prossimità dell'orizzonte danno luogo ad un flusso di radiazione termica diffuso verso l'esterno cui è stato assegnato il nome di **radiazione di Hawking**.

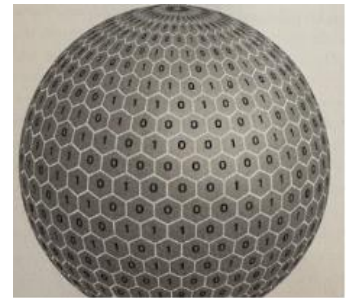
La sua sola presenza significa che i buchi neri possiedono una temperatura maggiore dello zero Kelvin (per la seconda legge della termodinamica).

Nel 1974 Stephen dimostrò che questi ultimi si comportano come "un corpo nero" irradiando calore pur essendo dotati di una temperatura bassissima (inferiore a  $10^{-7}$  K), enormemente più bassa rispetto a quella che caratterizza la CMB (la radiazione cosmica del fondo a microonde) che risulta pari a 2.7 K.

Questa considerazione portò Hawking a ricavare la famosa formula per individuarne la temperatura di un buco nero, cosa che gli fornì fama imperitura nel mondo della fisica, un modo per calcolarne l'entropia (89) e di conseguenza la quantità di informazione quantistica che quest'ultimo può contenere.

Ne risultò che i buchi neri siano i dispositivi di immagazzinamento più efficienti dell'universo, in proporzione allo spazio usato.

Mentre la teoria classica li descrive come oggetti semplicissimi caratterizzati da due soli numeri, la massa ed il momento angolare ("*black holes have no hairs*" diceva Wheeler), dal punto di semiclassico risultano tra gli oggetti più complessi che si trovino in natura.



Tra l'altro, sorprendentemente, **l'entropia di un buco nero risulta proporzionale all'area della superficie** e non al suo volume.

Se quindi tutta l'informazione risulta disposta sulle loro superfici degli eventi, è come se in pratica i buchi neri non avessero un interno: **come se i buchi neri fossero ologrammi**. (90)

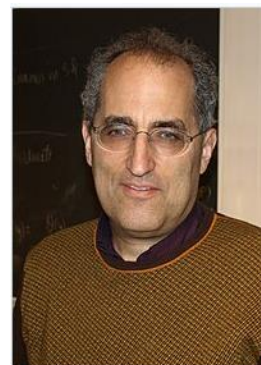
Poiché i buchi neri irradiano calore, prima o poi saranno destinati a scomparire: cosa succede all'informazione quantistica che vi è caduta dentro durante l'intera vita di un buco nero?

La teoria dei quanti ci informa che le **funzioni d'onda** di ogni sistema si evolvono in modo da **preservare l'informazione**: poiché la somma delle probabilità deve sempre dare 1, queste ultime si possono modificare, processare ed anche criptare, ma non si possono distruggere.

Secondo i calcoli di Hawking la radiazione che porta il suo nome abbandona il buco nero, ma, in quanto pura radiazione termica, non può contenere informazione quantistica: come fa quindi quest'ultima ad uscirne prima della completa evaporazione?

E' il famoso **paradosso dell'informazione**, la cui storia ho ricostruito in "*Leonard Susskind e la sua guerra per la salvezza della Meccanica Quantistica*".

Il passo successivo sulla via della Fisica Olografica fu compiuto da **Edward Witten** nel 1995 (Witten sarà l'artefice della "**seconda rivoluzione teoria delle stringhe**").



Edward Witten

La **teoria delle stringhe** - la cui origine si può far risalire ad un lavoro di **Gabriele Veneziano** che nel 1968 intuì come la **funzione beta di Eulero** fornisse informazioni importanti sul fenomeno dell'**interazione forte** - si era evoluta nel corso dei decenni successivi in 5 diverse varianti (91), più una sesta - la **supergravità in 11 dimensioni** - che a differenza delle altre 5 chiama in causa non filamenti unidimensionali ma oggetti simili a membrane 2D chiamati appunto "**brane**".

Witten sostenne che le 5 varianti insieme alla supergravità non dovevano essere considerate quali teorie separate, ma differenti facce di un singolo edificio matematico; con raffinati artifici risultava infatti possibile tramutare l'una nell'altra e creare così una struttura reticolare che le vede reciprocamente collegate: ad una tale struttura Witten assegnò il nome di **Teoria M**.

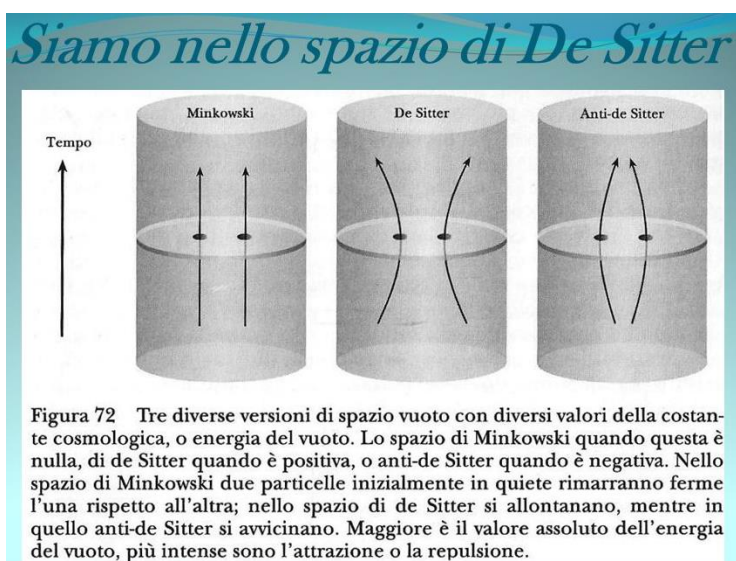
La semplice presenza di un collegamento suggeriva esistesse qualcosa di più profondo ad unirle, quasi fossero strade complementari che portavano agli stessi risultati.

In fisica le relazioni matematiche che trasformano l'una nell'altra teorie in apparenza distinte vengono chiamate dualità: due teorie duali sono in un certo senso equivalenti in quanto descrivono una medesima situazione fisica usando un linguaggio matematico differente. (92)

La cosa interessante che fa della Teoria M uno strumento potente è il fatto che una situazione complessa che si presenta di difficile soluzione in una delle 6 teorie talvolta si rivela semplice utilizzandone un'altra.

Un paio di anni dopo la presentazione al pubblico delle idee di Witten si registrò una scoperta rivoluzionaria.

Nel 1997 **Juan Maldacena** si imbattè in una dualità che collegava alcune **teorie delle stringhe con gravità con teorie delle particelle senza gravità**, caratterizzate queste ultime da un numero di dimensioni inferiore: la *teoria delle particelle risultava così un ologramma di quella della gravità*. (93)



La dualità individuata da Maldacena, che venne indicata col nome di **corrispondenza AdS-QFT** dove AdS sta per spazio **Anti de Sitter** e QFT per **Quantum Field Theory**, interessa un ipotetico universo con 3 dimensioni spaziali (estese) ed una temporale, diverso dal nostro in quanto dotato di curvatura negativa.

**DeSitter** era un astronomo olandese che nel 1917 trovò una soluzione alle equazioni di Einstein per un universo dotato di una **costante cosmologica positiva** ( $\Lambda > 0$ ) la quale, contrastando l'effetto gravitazionale della materia, consente una espansione eterna dello spazio.

Al contrario, uno **spazio Anti de Sitter** presenta una **costante cosmologica negativa** ( $\Lambda < 0$ ) che impedisce allo spazio di espandersi; è in qualche modo assimilabile all'interno di una sfera la cui superficie esterna risulta impenetrabile per chi vi si trovi all'interno.

Sul lato opposto dell'uguaglianza troviamo Teorie Quantistiche delle Particelle, QFT, del tutto simili al Modello Standard. **(94)**

Esse descrivono le particelle e le forze come eccitazioni localizzate di campi estesi: le QFT sono quindi simili alla  **Cromodinamica Quantistica**, la parte del Modello Standard che descrive **la forza nucleare forte**.

I campi quantistici descritti sul lato destro dell'uguaglianza non penetrano nell'interno AdS, possiamo immaginarli confinati alla superficie delimitante: operano cioè in uno spaziotempo con una dimensione in meno.

Mancano infatti alla QFT la dimensione curva che corre perpendicolarmente alla sua superficie delimitante (cosa che le permetterebbe di penetrare all'interno dello Spazio Anti de Sitter) e la gravità (nelle QFT non c'è nulla che assomigli ad un'attrazione gravitazionale).

Essendo tuttavia le due teorie equivalenti, ne consegue che tutto quanto ci sia da conoscere sulle stringhe e la gravità in un universo AdS con 4 dimensioni (estese) possa esser cifrato nelle interazioni quantistiche di campi e particelle ordinari localizzati sulla superficie di confine con una dimensione in meno: **l'universo della superficie funzionerebbe come una sorta di ologramma, di modello, rispetto all'universo interno all'Ads, in quanto ne conterrebbe tutte le informazioni.**

*"... un mondo di confine delle particelle e dei campi quantistici descrive completamente il comportamento della gravità e della materia all'interno dell'AdS: risulta così che relatività e teoria quantistica siano punti di vista alternativi di una stessa fisica. L'olografia ci dice che i sistemi fisici possono essere gravitazionali e quantistici allo stesso tempo, anche se in dimensioni differenti ..."* scrive Hertog.

*"... l'olografia ... ci offre un modello funzionante di una teoria quantistica completa della gravità e della materia ..."*

Come abbiamo visto succeda con altre dualità della teoria M, la natura della relazione tra i due lati di una dualità olografica è tale che quando da un lato i calcoli sono lineari dall'altro risultano incredibilmente complicati:

*"... quando la gravità è debole - siamo cioè in presenza di universo Ads con curvatura modesta -, nella descrizione della superficie delimitante compaiono interazioni quantistiche tra i suoi costituenti così forti che la QFT diventa ingestibile, e persino il concetto di particelle individuali potrebbe cessare di aver significato ..."*

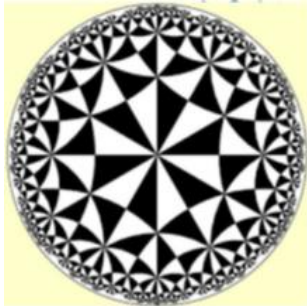
Questa caratteristica permette ai teorici di usare la Relatività Generale insieme alla supergravità per studiare fenomeni nuovi nel mondo quantistico delle particelle e viceversa. **(95)**

Ad imitazione di quanto succede con gli ologrammi bidimensionali di cui abbiamo ogni giorno esperienza, la superficie delimitante presenta le informazioni relative all'universo AdS interno scombinata e criptata in un modo che le rende irricognoscibili. **(96)**

Si rende perciò indispensabile ricavare un "**dizionario matematico AdS-QFT**" per decrittare l'ologramma presente sulla superficie di contorno.

Una delle prime voci di tale dizionario ad esser state rintracciate è la spiegazione di come facciamo particelle e campi sulla superficie di contorno a catturare tutto quanto accade nella profondità interna dell'AdS, ad assorbire cioè un'intera dimensione.

Caratteristica dello spazio AdS è una forte curvatura negativa: una sua proiezione su un piano



Disco di Poincaré



Opera di Escher

produce un **effetto anti Mercatore (97)**, cioè le *regioni vicine al confine sembrano più piccole mano a mano che ci si avvicina al bordo*, il contrario di quanto succeda con le mappe che mostrano il nostro globo basate sulla proiezione di Mercatore.

Un buon esempio è il **disco di Poincaré** o la rappresentazione di angeli e demoni nell'opera di Escher "**Limite del cerchio IV**" (vedi il post

richiamato in nota 88) di cui qui allego immagine.

Qualora lo spazio AdS contenga oggetti tutti della stessa dimensione distribuiti uniformemente, la loro proiezione sul bordo interno del disco che lo circonda - che ne rappresenta la superficie di contorno - risulterà più o meno grande a seconda della distanza dell'oggetto dal bordo stesso.

Più ci si allontana dal centro del disco, più le dimensioni degli oggetti contenuti diminuiscono rapidamente sino ad arrivare a punti infinitesimali, e viceversa.

**La dualità di Maldacena traduce** infatti *profondità interna nell'AdS in grandezza sul confine*: al diminuire o al crescere di grandezza nel mondo della superficie di confine corrispondono sul lato dell'universo curvo AdS l'avvicinarsi o l'allontanarsi dal margine procedendo lungo la direzione perpendicolare alla superficie delimitante stessa.

Ora diventa importante sottolineare come **nella fisica delle particelle la grandezza sia proporzionale all'energia**.

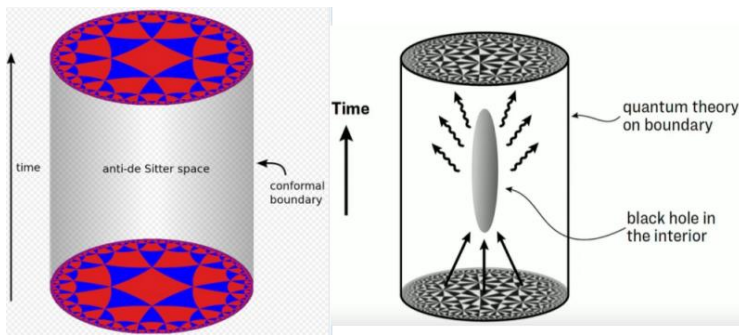
Pensiamo ad esempio agli acceleratori: quanto sono più grandi tanto più consentono di raggiungere energie maggiori negli scontri tra particelle, e di conseguenza di sondare la natura su distanze sempre più piccole.

*"... la collezione di particelle (come eccitazioni) e di forze (come interazioni) descritte da una data QFT dipende dalla risoluzione della distanza che abbiamo in mente: il contenuto di una QFT usata a bassa energia (o a grandi scale di lunghezza) può essere molto diverso da quello che esiste nella stessa teoria utilizzata ad energie più alte ..."*

*"... le proprietà di una certa QFT cambiano al variare della scala su cui essa viene usata, dunque nelle teorie quantistiche dei campi la nozione fondamentale di grandezza (o energia) contiene informazioni aggiuntive: questa proprietà viene sfruttata dalla dualità di Maldacena ..."*

Questa **dimensione dell'energia** sul lato delle QFT viene quindi tradotta in una **dimensione spaziale incurvata** sul lato della gravità.

Poco dopo la pubblicazione dell'articolo di Maldacena, **Edward Witten** indagò a cosa potesse



corrispondere, sul lato CFT, un buco nero presente nello spaziotempo AdS, ed incredibilmente trovò la risposta in uno sciame di particelle calde in movimento dotato di una funzione d'onda che evolve in maniera liscia e regolare.

Ne risulta che la storia olografica del ciclo vitale di un buco nero visto dall'altro lato della dualità consista in un

semplice riscaldamento e successivo raffreddamento di un plasma di gluoni e quark caldi, qualcosa che succede quasi ogni giorno nei colliders utilizzati per la ricerca.

L'entropia termica di questa zuppa di quark caldi sulla superficie di contorno risulta eguale all'entropia di un buco nero nello spazio interno AdS, e nello stesso tempo offre una spiegazione al fatto che l'entropia di un buco nero cresca in proporzione all'area della sua superficie: **la superficie dell'orizzonte e la zuppa di quark vivono infatti nello stesso numero di dimensioni.**

Come ho già raccontato in maniera più dettagliata (vedi indicazioni in nota 87), **l'olografia non risolve tuttavia da sola il paradosso dell'informazione**: afferma infatti che l'informazione debba sfuggire prima dell'evaporazione totale del buco nero ma non ci dice in che modo.

La teatrale "resa" di Hawking (al convegno di Dublino del 2004) nella sua disputa con Preskill e Thorne sull'argomento - Hawking accettò ad un certo punto l'ipotesi che l'informazione potesse uscire dal buco nero dopo averlo negato per molti anni - precede la soluzione che sarà proposta solo dopo la sua morte.

Hawking in quell'occasione si arrese e pagò la scommessa perché aveva intuito, applicando la visione top down, come "... *la superficie dell'ologramma non codifichi soltanto una singola geometria interna curva, ma una mescolanza di forme differenti di spaziotempo, una sovrapposizione di geometrie differenti...*"

**L'interno dell'AdS doveva esser interpretato alla Feynman, come una funzione d'onda e non come singolo spaziotempo.**

"... *L'informazione, quando i buchi neri invecchiano, mano a mano viene trasferita dalla sua geometria originaria in uno spaziotempo differente ...*".

Tuttavia sarà solo a partire dal 2019 che Penington, Almheiri, Engenhardt, Marolf e Maxfield troveranno evidenza del fatto che, **a metà strada del processo di evaporazione** di un buco nero, **una lenta ma progressiva accumulazione di particelle irradiate** (la radiazione di Hawking) **attivi** nella sovrapposizione di Feynman **la geometria latente di un wormhole**: un tunnel geometrico attraverso la regione dell'orizzonte che offre la via di fuga all'informazione.

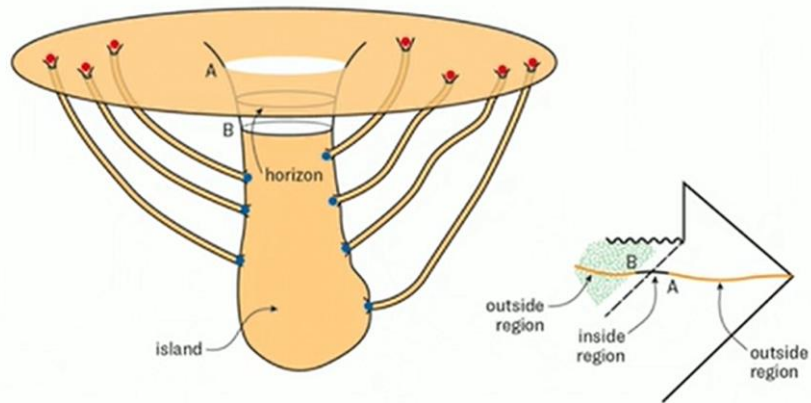
**La creazione di questo tunnel risulta legata alla proprietà quantistica dell'entanglement** che tiene legati tra di loro i componenti della coppia particella-antiparticella, la cui separazione nei pressi dell'orizzonte degli eventi ha dato luogo alla radiazione di Hawking.

La particella sfuggita all'orizzonte del buco nero rimane infatti in entanglement con quella che invece l'ha attraversato.

"... se si misura la radiazione della sola particella sfuggita al buco nero, essa sembra una radiazione termica casuale, ma se fossimo in grado di considerare congiuntamente i due membri della coppia, scopriremmo che contengono informazioni codificate in sottili correlazioni che collegano tra loro le proprietà individuali .." - scrivono gli autori.

Qualcosa di simile succede quando criptiamo i nostri dati con una password generata casualmente: i dati e la password, presi separatamente, non ci dicono nulla, solo disponendo di entrambi possiamo ricostruire l'informazione originale.

"... L'accumularsi nel corso di eoni di sempre più entanglement tra interno ed esterno di un buco nero evaporante può esser pensato come la generazione di un wormhole che passa attraverso l'orizzonte ..."



L'entanglement è anche l'elemento chiave nel funzionamento degli ologrammi di Maldacena: svolge la stessa identica funzione del laser per i comuni ologrammi.

Mentre per questi ultimi il laser decodifica i dati relativi alla profondità criptati sul quadratino argentato, l'entanglement genera lo spazio curvo e dunque la gravità, che risultano così **fenomeni emergenti**.

Si è infatti scoperto come non basti disporre di un enorme numero di elementi costitutivi particellari sulla superficie di contorno per ottenere una geometria interiore curva: quest'ultima appare soltanto se tali elementi risultano connessi da entanglement.

Ne consegue che sia **l'entanglement a generare la gravità**.

Per Einstein la gravità è una manifestazione della curvatura dello spaziotempo: tale curvatura - ci suggerisce l'olografia - viene tessuta dall'entanglement.

La Relatività Generale emerge quindi dall'entanglement collettivo di numerosissime particelle quantistiche che si muovono in una superficie con meno dimensioni.

- Regioni che sono confinanti all'interno dello spazio AdS corrispondono a componenti sulla superficie di contorno con un forte entanglement.
- Regioni che risultano invece distanti nell'AdS corrispondono a componenti sulla superficie di contorno dotati di un grado minore di entanglement.
- Se la configurazione della superficie di contorno presenta uno schema di entanglement ordinato, l'interno risulta quasi vuoto.
- Se il sistema superficiale invece è in uno stato caotico con tutti i suoi componenti legati in entanglement l'uno all'altro, allora nello spazio AdS troviamo un buco nero.

Ed infine se potessimo compiere un'operazione straordinariamente complessa sugli elementi legati in entanglement al fine di leggere la storia del buco nero, troveremmo la geometria interna di un wormhole.



L'interpretazione di questi fatti da una prospettiva top down ci consente di affermare come gli **elementi legati in entanglement sulla superficie di contorno adempiano al ruolo dell'atto di osservazione, selezionando un passato da una miriade di possibili passati.**

Dal canto suo l'olografia predice che, in modo simile, gli schemi di entanglement su una superficie sferica di confine determinino la forma di una dimensione interiore.

**Sia la visione top down che l'olografia confermano che lo spaziotempo venga dopo la domanda posta su una qualche superficie di confine.**

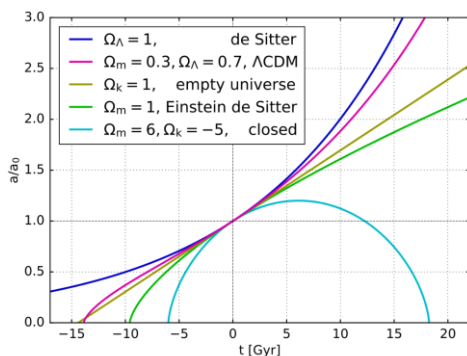
### Dalla teoria all'esperimento.

Fisici sperimentali cercano oggi di creare sistemi quantistici dotati di un forte entanglement, costituiti da atomi intrappolati o ioni che imitino alcune proprietà fisiche dei buchi neri (in pratica modellini di buchi neri) nella speranza di capire:

- quali schemi di entanglement stiano alla base dello spaziotempo curvo;
- cosa succeda alla geometria quando l'entanglement viene a rompersi.

Siamo infatti passati dal considerare un singolo spaziotempo ad un insieme di spaziotempo emergenti, e ciò decreta la fine della contrapposizione tra riduzionismo ed emergenza.

L'olografia afferma cioè che anche le più elementari regolarità assimilabili a leggi sono fondate nella complessità dell'universo che ci circonda.



Tutto quanto sin qui affermato riguardo l'olografia vale per uno spazio AdS, uno spazio chiuso, un universo caratterizzato da una costante cosmologica negativa ( $\Lambda < 0$ ); **noi invece viviamo in uno spazio DeSitter**, in un universo in espansione dove  $\Lambda > 0$ .

Nella prossima - e conclusiva - parte vedremo come trattare la dualità olografica dS-QFT.

### Note:

(87) Provo a spiegarmi meglio con un parallelo, anche se non è del tutto corretto.

Immaginando di lanciare 10 volte un dado, il multiverso prende in considerazione ogni possibile combinazione dei risultati.

Nel caso dell'universo quantistico, invece, ogni nuovo risultato in qualche modo dipende dal precedente lancio: se è uscito 1, tutte le combinazioni che iniziano con una cifra iniziale diversa sono scartate.

(88) Una trattazione più articolata sulla fisica olografica la si può trovare nel mio scritto "Leonard Susskind e la sua

entropia di Bekenstein-Hawking

$$S_{BH} = \frac{k_B A}{4\ell_P^2}$$

dove  $A = 4\pi R^2$  è l'area dell'orizzonte degli eventi

$k_B$  è la costante di Boltzmann

$\ell_P = \sqrt{G\hbar/c^3}$  è la lunghezza di Planck

guerra per la salvezza della Meccanica Quantistica” parte 3<sup>a</sup> "Maldacena e la corrispondenza AdS/CFT".

Vi si racconta la genesi della fisica olografica e della corrispondenza AdS-CFT quali passi in direzione della soluzione del paradosso dell'informazione.

**(89)** L'idea che i buchi neri potessero avere un'entropia era già stata proposta da Bekenstein qualche anno prima.

La congettura di Bekenstein metteva in relazione l'entropia di un buco nero con l'area del suo orizzonte; Hawking ne fissò la costante di proporzionalità a  $\frac{1}{4}$ .

L'entropia di Bekenstein-Hawking fornisce anche l'indicazione sull'entropia massima che può essere confinata in un volume di spazio che contiene una data quantità di energia.

**(90) L'entropia di un buco nero** risulta eguale ad un quarto del numero di cellette con dimensione pari all'**area di Planck** necessarie a tassellare completamente il suo orizzonte degli eventi; ogni celletta contiene un bit di informazione.

**(91)** Le 5 varianti sono: tipo I, tipo IIA, tipo IIB, E8xE8 Eterotiche e SO(32) Eterotiche.

**(92)** L'esempio classico è costituito dalla dualità onda particella.

Nel caso delle sei teorie studiate da Witten si scoprì che potevano essere unificate tramite trasformazioni matematiche dette S-dualità e T-dualità.

**(93)** Gli ologrammi di uso comune raccolgono in un quadratino bidimensionale le informazioni relative ad una forma 3D la cui profondità appare illuminandolo con un laser. In questo caso le dimensioni dell'ologramma sono 3 e la 4<sup>a</sup> emerge grazie a un meccanismo che Maldacena non aveva ancora identificato.

**(94)** La **Teoria Quantistica dei Campi** è una teoria fisica che unifica la Meccanica Quantistica, la Teoria dei Campi Classica e la Relatività Ristretta: si applica ad uno spaziotempo piatto che lascia fuori la Relatività Generale e dunque la gravità.

**(95)** La fisica olografica è oggi utilizzata per evidenziare relazioni che interconnettono rami diversi della fisica quali Relatività Generale, fisica della materia condensata, fisica nucleare, informatica quantistica, astrofisica e molti altri.

**(96)** Gli ologrammi bidimensionali rivelano la struttura 3D quando sono illuminati da un laser, ma se osserviamo soltanto il quadratino argentato - che pure contiene tutte le informazioni relative alla forma 3D che apparirà - non siamo in grado di capire quale essa possa essere in quanto tali informazioni vi risultano criptate e scombinare.

**(97)** Per capire cosa significhi "**effetto anti-Mercatore**", spieghiamo cosa significhi l'**effetto Mercatore**.

La superficie terrestre ha curvatura positiva (la somma degli angoli di un triangolo disegnato su di essa è sicuramente  $>$  di  $180^\circ$ ); non potendo esser tale situazione rappresentata su un piano euclideo, la proiezione di Mercatore fa sì che, mano a mano che ci si avvicini ai poli, le forme vengano ingrandite rispetto alla dimensione reale (pensiamo ad esempio alla Groenlandia o ad altri territori vicini ai poli).

I poli stessi, invece di presentare un aspetto puntiforme, vengono rappresentati da una linea continua.

## Cap 11^: La dualità olografica dS-QFT e le conclusioni finali.

Nella parte precedente abbiamo descritto la dualità AdS-CFT di Maldacena e spiegato come sia l'entanglement - una proprietà quantistica che lega tra di loro particelle indipendentemente dalla reciproca distanza - a generare la curvatura dello spazio e la gravità all'interno di quello strano **universo Anti deSitter (AdS)**, chiuso su sé stesso e circondato da una superficie delimitante dove tali particelle dimorano, dotata di una dimensione spaziale in meno.

Il **nostro universo in espansione** - dotato di curvatura positiva ("**deSitter**", **dS**) - non assomiglia a quello descritto; tuttavia è lecito chiedersi se sia possibile applicare anche in questo caso l'olografia per sfruttare le potenzialità indagatorie che questa tecnica offre.

I due tipi di spazio - AdS e dS - presentano proprietà diverse:

- **la curvatura negativa dell'AdS** crea un campo gravitazionale che attira assieme tutti gli oggetti che contiene in direzione del proprio centro, causandone il collasso.
- **quella positiva del dS** fa invece sì che tutte le cose si respingano a vicenda.

La differenza tra i due si può ricondurre al valore della **costante cosmologica  $\Lambda$** , negativo nel primo caso e positivo nel secondo, che rappresenta l'intensità dell'energia oscura nell'equazione di Einstein.

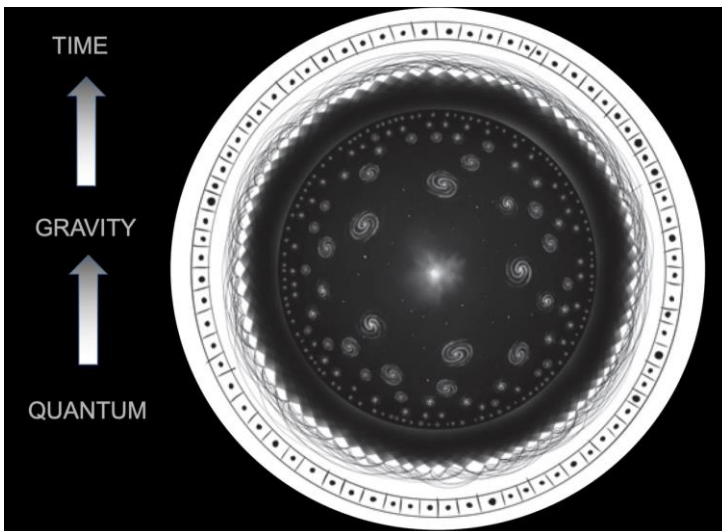
Universi in espansione quale il nostro (dove  $\Lambda > 0$ ) potrebbero addirittura non aver neppure una superficie di confine in grado di ospitare un ologramma (98)

Ma se, come abbiamo già fatto in precedenza, **abbandoniamo la prospettiva classica per adottarne una semiclassica** considerando **AdS e dS in un tempo immaginario**, ci rendiamo conto di come le due forme risultino strettamente imparentate. (99)

Hawking figurava una rappresentazione dell'universo quantistico in un tempo immaginario, là dove tutte le dimensioni si comportano come direzioni spaziali.

Una sua proiezione piana (vedi *l'ologramma dS* qui sotto rappresentato) dove anche il tempo è tramutato in spazio rappresenta **al centro di un disco l'origine senza confini**, e **l'universo**

**attuale** giace invece schiacciato contro il **confine circolare del disco stesso**.



Ragionando in 4 dimensioni estese (cosa che non possiamo visualizzare se non attraverso una elaborata proiezione in 3D), quella che nella figura appare come una **circonferenza delimitante sarebbe in realtà una ipersfera**, cioè la superficie tridimensionale dello spazio a 4 dimensioni dove sono confinate (quasi) tutte le nostre osservazioni dell'universo.

"... nella proiezione 2D rappresentata dalla figura Ologramma dS l'espansione dell'universo fa sì che la maggior parte del volume spaziotemporale che costituisce il nostro passato finisca schiacciata verso il bordo del disco, e cioè che la stragrande maggioranza delle stelle e delle galassie sia ammassata vicino alla superficie di confine ... una configurazione che è davvero simile al disco di Poincaré che abbiamo visto a proposito dell'universo AdS ... " - ci informa Hertog.

Entrando nel tempo immaginario le due forme sono davvero simili, con la maggior parte del volume schiacciato contro la superficie delimitante, ed è in questo modo che una visione semiclassica unifica AdS e dS.

"... è come se, nel regno della gravità quantistica, la costante cosmologica  $\Lambda$  non avesse alcun significato reale ..." - scrisse Hawking.

Questa sua intuizione permette di pensare ad una **dualità olografica dS-QFT** dove, come nel caso AdS-CFT, esiste una superficie di confine in grado di contenere una descrizione olografica di un universo, in questo caso di un universo in espansione come il nostro.

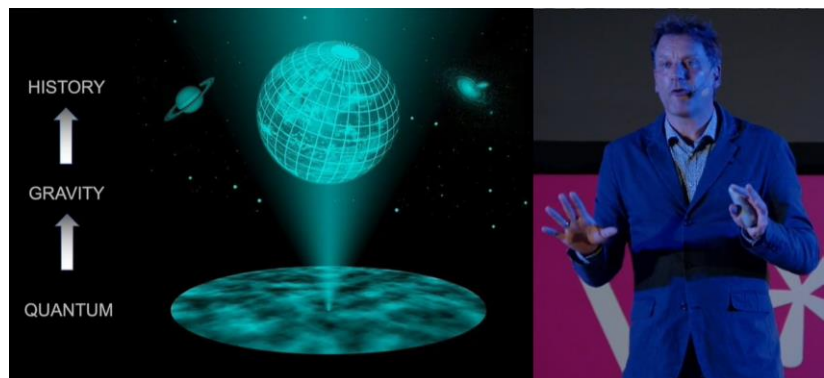
A questo punto non resta che capire quali siano i dettagli relativi alle particelle ed ai campi duali posti sulla superficie di contorno che determinano se al suo interno si venga a creare uno spazio con curvatura negativa AdS (incapace di dar luogo ad un universo in grado di sviluppare forme di vita), oppure un universo biofilico in espansione quale il nostro.

### ... ed ora il colpo di scena ...

"... **La differenza tra ologrammi che generano un interno AdS oppure un interno dS**" - scrive Hertog - "**sta nella natura delle dimensioni extra che emergono ...**"

Nel caso AdS abbiamo visto come la direzione emergente sia una dimensione spaziale curva, la profondità interna nell'AdS che da luogo alla gravità.

Nel caso invece di un universo in espansione dS come il nostro "**... la dimensione emergente risulta il tempo, e ciò sta a dire che la storia stessa sia cifrata nell'ologramma!**" - ammonisce Hertog.



Dunque **tempo ed espansione risultano qualità emergenti dell'universo**, qualcosa che "viene dopo". (100)

Già George LeMaitre aveva scritto negli anni 30 del secolo scorso:

"... il tempo inizierebbe ad avere un significato ragionevole soltanto dopo la divisione del quanto originario in un numero sufficiente di quanti ..."

Dopo oltre mezzo secolo fu la volta di Hawking ed Hartle, presentando l'ipotesi senza confini, ad affermare:

"... quando ci si avvicina all'inizio il tempo si tramuta in spazio ..." (101)

L'olografia infine fa del tutto a meno del concetto di tempo:

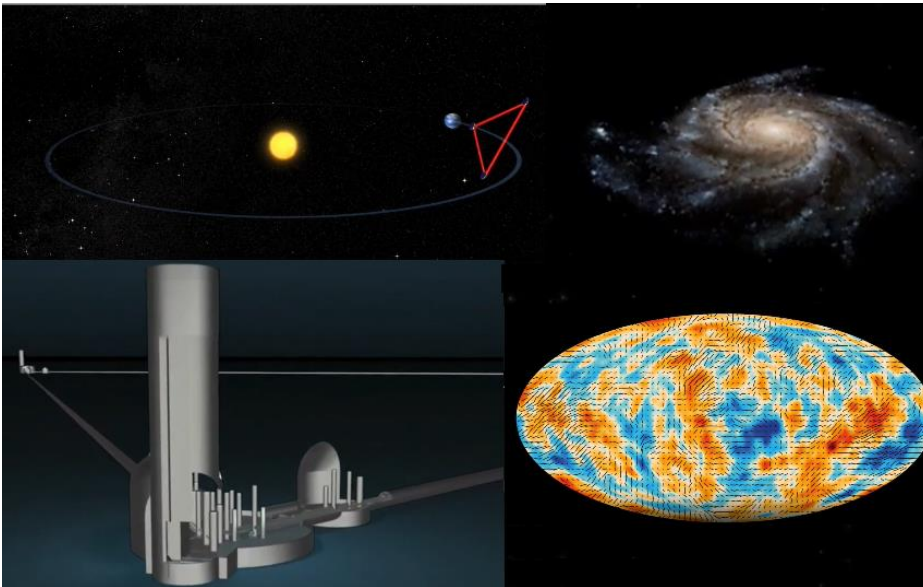
"... gravità ed evoluzione cosmica sono risultato di interazioni quantistiche confinate ad una superficie tridimensionale; il tempo diventa una specie di illusione così come la profondità lo è relativamente agli ologrammi di uso comune ...".

Siamo arrivati a concepire "un tempo senza tempo"!

Attenzione però!

"... al momento non è ancora stato decifrato il tipo di ologrammi che codifica storie di espansione di universi esitanti come il nostro ..." - ci avverte Hertog - "... e non sarà nell'immediato futuro: la teoria di Einstein funziona ancora molto bene per descrivere l'universo su larga scala ... semmai l'olografia assumerà importanza laddove le equazioni di Einstein perdono validità: nei pressi dei buchi neri e vicino al Big Bang ..."

Quando - nel corso dell'intervista cui l'ho sottoposto - Hertog afferma la rilevanza degli sviluppi dell'olografia per individuare evidenze a favore dell'ipotesi top down, si riferisce alla possibilità che le fondamenta olografiche dell'espansione possano esser state determinanti durante l'inflazione.



"... sottili impronte lasciate da questo processo nelle fluttuazioni della CMB potrebbero venir rilevate con future osservazioni delle onde gravitazionali effettuate con nuovi strumenti quali Einstein Telescope e LISA..."

"... Il principio fondamentale della cosmologia olografica" - continua Hertog - "sta nel fatto che il passato

emerge da una rete di particelle quantistiche legate in entanglement che formano un ologramma in una superficie con meno dimensioni: e **questo implica necessariamente una visione top down dell'universo** ... l'olografia afferma infatti che la superficie delle nostre osservazioni sia tutto quanto esiste ..."

"... esiste dunque un'entità più fondamentale del tempo, **un ologramma, dal quale il passato emerge: in un universo olografico il cosmo in evoluzione e in espansione non è il punto di partenza ma il risultato** ..."

A questo punto possiamo comprendere la distinzione tra il *pensiero semiclassico* (in relazione alla cosmologia quantistica) e quanto afferma la *teoria olografica*:

- nel primo caso gli elementi che abbiamo visto costituire il trittico top down (vedi quanto scritto nella parte 9 "cosmologia quantistica") e cioè osservazione (atto di osservazione), origine (genesi) ed evoluzione (storie) pur essendo intrecciati rimanevano tuttavia entità concettualmente distinte.
- nel secondo caso la fusione risulta completa: *"... eliminando il tempo l'olografia rende indistinguibili dinamica e condizioni di contorno (origine), e ponendo l'entanglement olografico prima dello spaziotempo integra il ruolo dell'osservatore ..."*

*"... la matematica che sta dietro la cosmologia olografica racchiude questa sintesi in un'unica equazione unificata ..." - scrive Hertog - "... al cuore del trittico ... la capacità dei sistemi di immagazzinare e processare le informazioni ..."*

Per l'olografia cioè la realtà fisica include, oltre a "cose reali" quali particelle di materia o di radiazione ed al campo stesso dello spaziotempo, un'entità astratta: l'informazione quantistica. **(102)**

La dualità dS-QFT sancisce come *"... l'informazione quantistica iscritta in un ologramma atemporale astratto, fatto di qubit legati in entanglement, costituisca il filo che tesse la realtà: ... togliendo l'entanglement sulla superficie di contorno il mondo all'interno si disfa ..."*

Quando i singoli qubit interagiscono i loro possibili stati entrano in entanglement, e quanti più qubit risultano correlati tanto maggiore (una crescita esponenziale) sarà l'incremento del numero totale di possibilità simultanee, un fatto che abbiamo capito costruendo computer quantistici.

Ho già trattato - nella 5<sup>a</sup> ed ultima parte del post "*Leonard Susskind e la sua guerra per la salvezza della Meccanica Quantistica*", il capitolo "*Il codice sorgente dello spaziotempo*" - dei problemi riscontrati nella progettazione dei computer quantistici e della fragilità dei Qubit.

Descrivendo i codici di correzione degli errori (ad esempio il codice olografico pentagonale HaPPY in nota 29 e 30 del post menzionato) ho accennato al fatto che il modo in cui vengono interconnessi i qubit per preservarne l'integrità dia origine ad una geometria iperbolica emergente simile al disco di Poincaré, all'interno della quale la nozione di distanza viene ad emergere come numero dei legami che si attraversano nella rete (*"... la distanza è definita dal conteggio del numero di legami che vengono intersecati ..."*).

Non crea dunque sorpresa il fatto che ultimamente alcuni teorici delle stringhe abbiano iniziato a sviluppare codici quantistici di correzione degli errori con l'obiettivo di costruire lo spaziotempo: il modo in cui nelle dualità olografiche emerge uno spaziotempo interno ricorda infatti la struttura di un codice quantistico di correzione degli errori molto efficiente, spiegando così come facciamo elementi quantistici fragili come i qubit a tessere uno spaziotempo robusto.

Negli ultimi tempi, scrivevo riportando le parole di Brian Cox alla conferenza di Genova dello scorso autunno:

*"... si stanno accumulando prove del fatto che potremmo star vivendo all'interno di ciò che appare un gigantesco computer quantistico ..."*

Alcuni teorici si sono infatti spinti ad ipotizzare che **lo stesso spaziotempo possa essere un codice quantistico**: l'ologramma svolgerebbe la funzione di codice sorgente operante su un'enorme rete di particelle quantistiche interconnesse - in grado di processare le informazioni, così da generare la gravità e tutti gli altri fenomeni fisici.

L'universo intero sarebbe, in questa visione, un tipo di processore informatico quantistico. **(103)**

*"... l'olografia dipinge un universo che viene continuamente creato" - scrive Hertog - "... al pari di un codice operante su un immenso gruppo di qubit legati in entanglement in grado di determinare la realtà fisica; ... e questo progressivo svelamento viene da noi percepito come flusso del tempo ..."*

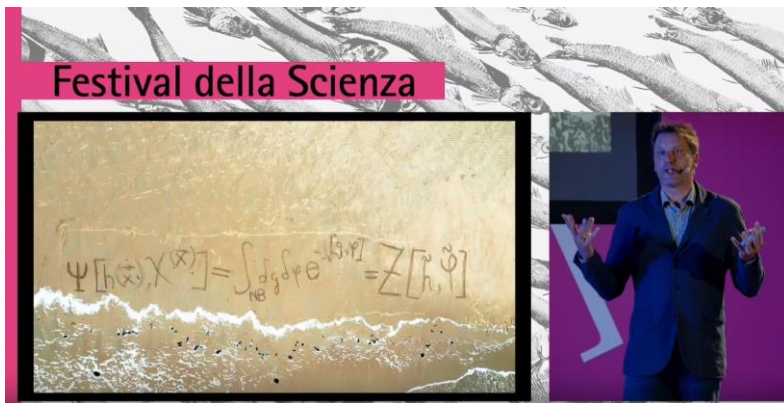
*"... in questo senso l'olografia pone la vera origine dell'universo nel lontano futuro, in quanto solo quest'ultimo rivelerebbe l'ologramma in tutta la sua gloria ..."* - conclude Hertog. **(104)**

Relativamente al passato remoto dell'universo, la cosmologia olografica ci riserva una sorpresa: avventurarsi nel passato equivale a zoomare all'indietro, adottare una prospettiva sfumata.

Nella dualità AdS-CFT abbiamo infatti visto come, per muoversi in profondità all'interno dello spazio curvo AdS, sia necessario considerare scale sempre più larghe sulla superficie olografica: oggetti vicini al centro vengono codificati come correlazioni a lunghissimo raggio che attraversano l'intero ologramma.

In quella relativa ad un universo in espansione (dS-CFT) il passato remoto è iscritto in qubit che si estendono su grandi distanze sulla superficie di contorno:

*"... per muoversi verso il centro del disco, il passato più distante, è necessario togliere nell'ologramma uno strato di informazione alla volta fino a che non si rimane con pochi qubit correlati, situati a grandissima distanza gli uni dagli altri: quando i qubit finiscono allora troviamo l'origine del tempo ..."*



La conferenza di Hertog termina con la funzione d'onda dell'universo, da lui ricavata insieme con Hawking, scritta sulla sabbia del bagnasciuga; l'arrivo di un'onda la sfuma piano piano rendendola illeggibile. **(105)**

*"... invece di spiegare la creazione dell'universo dal nulla - come cercò di fare Stephen con l'ipotesi assenza di confini - la cosmologia olografica*

*ci mostra come la trasformazione del tempo in spazio nei pressi del Big Bang significhi che, qualora ci si spinga indietro sino all'inizio, la fisica stessa sia destinata a scomparire: ... l'assenza di confini deve dunque esser interpretata non come la legge dell'inizio ma come l'inizio della legge ..."*

In tale contesto diventa essenziale la capacità delle leggi di cambiare e trasformarsi, più che spiegare la causa dell'inizio.

**E riguardo alla teoria concorrente, quella del Multiverso, cosa dice l'olografia?**

La cosmogenesi legata alla cosmologia olografica non lascia spazio al multiverso: nessun tipo di ologramma sinora ideato prevede un mosaico di universi-isola.

*"... le funzioni d'onda interne codificate negli ologrammi sembrano abbracciare solo una minuscola parte del paesaggio delle stringhe: per la cosmologia olografica il paesaggio delle stringhe è da considerarsi alla stregua di un regno matematico che può informare la fisica, ma non necessariamente esistere come tale ..."*

*"... il multiverso" - asserisce Hertog - "... è sotto molti aspetti l'analogo cosmologico della teoria (semi) classica dei buchi neri: quest'ultima infatti non riesce a riconoscere che esista un limite superiore alla quantità di informazioni che i buchi neri possano immagazzinare. Analogamente, la cosmologia del multiverso assume che le nostre teorie cosmologiche possano contenere una quantità arbitrariamente grande di informazioni, senza influire sul cosmo da esse descritto ..."*

Andrej Linde, da lui interrogato qualche anno fa in merito, oggi sostiene che *"... per comprendere il multiverso sia necessario adottare una visione propriamente quantistica del ruolo degli osservatori in cosmologia ..."*: opinione non diversa da quella pronunciata da Gian Francesco Giudice cui ho accennato in precedenza.

Nel 2016 così si espresse Hawking in occasione di una commemorazione di LeMaitre tenuta presso la sede della Pontificia Accademia delle Scienze in vaticano:

*"... esiste una descrizione duale del cosmo, un modo del tutto diverso e profondamente controintuitivo di guardare la realtà, nel quale l'espansione dello spazio - e, di fatto, il tempo stesso - è un fenomeno chiaramente emergente, cucito da una miriade di fili quantistici che formano un mondo senza tempo situato in una superficie con meno dimensioni: in fin dei conti, l'universo potrebbe avere un confine ..."*

*"... più che 'noi siamo il modo che l'universo ha di conoscersi' - come scrisse Carl Sagan - forse è più corretto affermare che noi stiamo imparando a conoscere noi stessi ..."* (Hertog)

*"Some people will be very disappointed if in the end there is no ultimate theory."*

*I used to belong to that camp.*

*I'm now glad that our search for understanding will never come to an end, and that we will always have the challenge of new discovery.*

*Without it, we would stagnate."*

S.W. Hawking

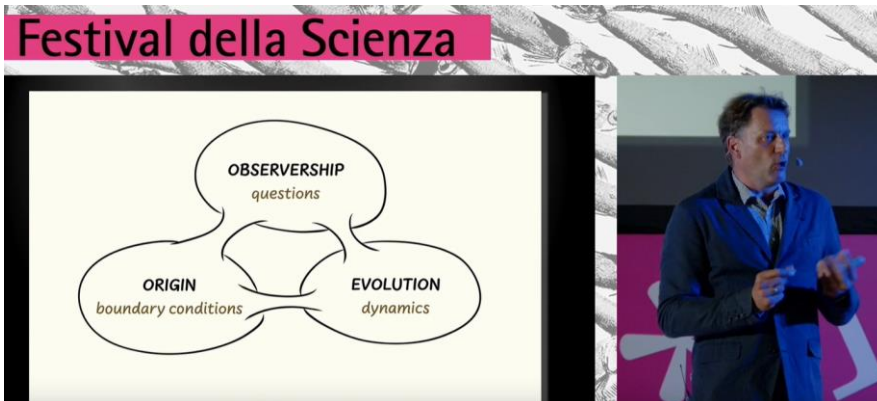


## Conclusioni.

"... in un universo quantistico, un passato ed un futuro tangibili emergono da un labirinto di

possibilità attraverso un processo continuo di

domande e osservazioni ..." - scrive ancora Hertog.



"... Tramite l'atto di osservazione - il processo interattivo al cuore della teoria quantistica che trasforma ciò che potrebbe essere in ciò che di fatto accade - l'universo è

condotto sempre più saldamente nell'esistenza, e gli osservatori - in questo senso quantistico - acquisiscono una sorta di ruolo creativo nelle vicende cosmiche, cosa che permea la cosmologia di un delicato tocco soggettivo.

L'atto di osservazione, inoltre, introduce nella teoria cosmologica un sottile elemento di azione all'indietro nel tempo, in quanto è **come se l'atto di osservazione di oggi fissasse retroattivamente l'esito del Big Bang di allora** ... ed è questo il motivo per cui tale teoria è stata battezzata da Hawking **Cosmologia Top-Down**: gli elementi fondamentali della storia dell'universo vengono letti all'indietro, dall'alto verso il basso ..."

Una tale cosmologia capovolge l'enigma dell'apparente **disegno dell'universo** in quanto, a livello quantistico, l'universo viene descritto come se esso stesso producesse la propria biofilia:

"... la vita e l'universo sono fatti l'uno per l'altra, poiché, in un senso più profondo, vengono all'esistenza assieme ..."

Il progetto di Hawking che ha portato alla formulazione della Top Down Cosmology era nato dal suo desiderio di risolvere i paradossi cui conduce la teoria del multiverso.

La scoperta - inaspettata - di un secolo fa del fatto che l'universo **possiede una storia evolutiva**, ha indotto a credere all'esistenza di leggi naturali ed immutabili che dirigessero quest'ultima, svelate le quali saremmo stati in grado di descrivere in modo deterministico l'evoluzione dal Big Bang sino ad oggi (e contestualmente scoprire quale sarà il nostro futuro), oltre che ad individuare una causa prima al Big Bang stesso.

L'approccio della cosmologia top down - cui merito indiscutibile è fare a meno di ipotizzare l'esistenza di uno sfondo immutabile ed eterno - comporta la descrizione della storia evolutiva dell'universo che include, nei suoi primissimi istanti, la genealogia delle stesse leggi fisiche: pertanto, se le leggi di natura risultano esser nate dopo il Big Bang, questo significa che **ad esser fondamentale non sono più le leggi stesse, ma la loro capacità di mutare**:

"... per scoprire l'essenza di ciò che si trova nascosto nei primissimi stadi quantistici, occorre togliere uno dopo l'altro i molteplici strati di complessità che ci separano dall'origine dell'universo, cosa che può essere fatta ripercorrendo la storia di quest'ultimo a ritroso nel tempo; quando infine giungiamo al Big Bang, si apre un livello più profondo di evoluzione nel quale sono le stesse leggi della fisica a cambiare ..."

*"... una sorta di metaevoluzione, uno stadio dove le regole ed i principi dell'evoluzione fisica coevolvono assieme all'universo da loro governato ..."*

Si tratta di qualcosa di simile al processo darwiniano che ritroviamo in biologia, una interazione tra variazione e selezione sullo sfondo dell'ambiente primordiale dell'universo neonato:

- **variazione:** sono i salti quantistici casuali che provocano deviazioni dal comportamento deterministico;
- **selezione:** alcune di queste deviazioni vengono amplificate e congelate nella forma di nuove regole che contribuiscono a plasmare l'evoluzione successiva.

*"... l'interazione tra queste due forze in competizione nei primissimi istanti dopo il Big Bang produce un processo di ramificazione - qualcosa di analogo al modo in cui le specie biologiche sarebbero emerse miliardi di anni dopo - nel quale dimensioni, forze e specie di particelle prima si diversificano e quindi - quando l'universo si espande e si raffredda scendendo a una temperatura di circa dieci miliardi di gradi - acquistano la loro forma effettiva ..."*

*"... la casualità coinvolta in tale processo comporta - proprio come nel caso dell'albero della vita di Darwin - il fatto che il risultato di questo antichissimo strato di evoluzione cosmica possa essere compreso soltanto ex post ..."*

Ad oggi siamo ben lontani dall'aver ricostruito - anche solo sommariamente - l'albero che rappresenta l'evoluzione delle leggi fisiche e che ci consentirebbe di indagare le sue radici; tuttavia recenti progressi nella tecnologia dei nostri strumenti, lo sviluppo dell'astronomia multimessaggero ed il moltiplicarsi delle direzioni verso cui si muove la ricerca, ci avvicinano alla comprensione, seppur parziale, di una tale epoca remotissima.

Affrontando tale indagine dobbiamo sempre tenere ben presente che quanto definiamo **leggi di natura** sono in realtà mere regolarità riscontrate durante le nostre osservazioni:

*"... l'universo non è una macchina governata da leggi incondizionate, dotate di un'esistenza precedente; ... piuttosto assomiglia ad una sorta di entità che si auto-organizza, dove appaiono schemi emergenti di tutti i tipi i più generali dei quali costituiscono ciò che chiamiamo le leggi della fisica (... 'le leggi servono l'universo, e non l'universo le leggi') ..."*

L'idea alla base di tale visione è che le leggi della fisica siano proprietà dell'universo che noi induciamo dai nostri dati collettivi, compressi in algoritmi di calcolo, e non manifestazioni di una qualche verità eterna.

Ne consegue che, ogni volta una nuova teoria arrivi a migliorare la precedente (come la Relatività di Einstein ha migliorato la legge di gravitazione universale di Newton) ci troveremo di fronte ad una identificazione di schemi via via più generali, che abbracciano un numero sempre più grande di fenomeni empirici interconnessi.

Questa progressione incrementa il potere predittivo e l'utilità delle teorie fisiche, ma assolutamente non ci mette su una strada che porti ad identificare una "teoria ultima", indipendente dal suo processo di costruzione e dai nostri dati.

*"... ci sono sempre moltissime teorie in accordo con un insieme finito di dati, proprio come ci sono molte curve che passano per un insieme finito di punti; analogamente, l'approccio top-down alla*

*cosmologia dovrebbe indurci a sospettare che in futuro troveremo una successione di teorie via via più raffinate, ma senza mai arrivare ad un punto finale: ... in un certo senso, **la teoria finale di Stephen afferma non esista una teoria finale** ..." - sancisce Hertog.*

### **E che dire riguardo al tempo?**

Abbiamo visto come l'**ipotesi dell'assenza di confini**, sviluppata da Hawking insieme ad Hartle, predica che **tracciando lo sviluppo dell'universo primordiale** e procedendo a ritroso nel tempo fin dove sia possibile, **vedremo le sue proprietà strutturali continuare ad evaporare, a cambiare, e che questo succeda anche al tempo stesso.**

All'inizio, il tempo dovrebbe essere stato fuso assieme allo spazio in qualcosa di simile ad una sfera iperdimensionale, chiudendo così l'universo nel non-essere: questa prospettiva portò negli anni 70 Hawking a proclamare che l'universo sia stato creato dal nulla.

Il nuovo pensiero top down sostiene invece che questo non-essere all'inizio dell'universo "*... non sia nulla di simile ad un vuoto dal quale gli universi potrebbero nascere oppure no, ma sia piuttosto un **orizzonte epistemico** molto più profondo dove non ci sono né spazio, né tempo, né - soprattutto - leggi fisiche ...*".

**«L'origine del tempo» non è dunque solo l'inizio di tutto ciò che esiste, ma rappresenta piuttosto il limite di ciò che possiamo dire riguardo al nostro passato.**

Trattando la versione olografica della cosmologia top down abbiamo visto come la dimensione del tempo - e quindi la nozione fondamentale di evoluzione - siano viste come qualità emergenti dell'universo:

*"... procedere a ritroso nel tempo è come guardare l'ologramma in una visione che si fa sempre più sfocata: è come se, letteralmente, lo spogliassimo di una quantità via via maggiore delle informazioni da esso codificate finché, alla fine, non ci rimangono più qubit ..."*

(nell'appendice a questo lungo post, che pubblicherò nei prossimi giorni, ci sono diversi video; tra questi, uno in cui - nel corso della sua conferenza tenuta a Genova - pongo ad Hertog una domanda relativa a questo punto).

**La cosmologia top-down pone dunque un limite a ciò che possiamo dire riguardo all'universo in cui viviamo:**

*"... la chiusura del nostro passato nell'ultima teoria di Hawking ed il fondamentale riconoscimento di una certa finitudine che tale chiusura comporta ci evita di finire impantanati nei paradossi del multiverso ..."*

La prospettiva top down contribuisce inoltre a **cancellare la separazione tra biologia e fisica**, rivelando come livelli di evoluzione tra loro diversissimi si fondano in un tutto interconnesso, con correlazioni che li collegano:

*"... la cosmologia quantistica ci insegna che **evoluzione biologica ed evoluzione cosmologica non sono fenomeni fundamentalmente separati, ma due livelli molto distanti di un unico gigantesco***

*albero evolutivo: quella biologica si occupa delle ramificazioni in un regno di elevata complessità, mentre quella cosmologia ha a che fare con strati dalla complessità inferiore.*

*Lo spazio tra questi due estremi è riempito dai livelli dell'astrofisica, della geologia e della chimica.*

*Anche se ogni livello ha una propria specificità, un proprio linguaggio, la funzione d'onda universale li intreccia tutti quanti assieme.*

*Il modo caotico in cui l'albero delle leggi fisiche è emerso nell'universo primordiale mostra che i principi generali del darwinismo - lo schema quintessenziale del mondo biologico - si spingono fino ai livelli di evoluzione più profondi che si possano immaginare ..."*

**La sorprendente biofilia che rileviamo nelle leggi effettive della fisica costituisce l'esempio preminente di una correlazione attraverso molteplici livelli di complessità.**

### **Il futuro della scienza e della nostra specie.**

Parlando della cosmologia quantistica, abbiamo accennato circa la limitatezza del numero di percorsi che dal Big Bang portino ad un universo come quello che oggi ci circonda (se invece diamo credito alla teoria del multiverso dobbiamo pensare esistano tutti quanti i possibili percorsi, anche quelli che non portano ad un universo come il nostro).

Se tutte le leggi scientifiche sono leggi emergenti, incluse le leggi «fondamentali» della fisica, siamo sul punto di scoprire una visione molto più ampia della natura: anziché limitarsi a **scoprire le leggi di natura studiando i fenomeni che esistono**, oggi molti scienziati stanno iniziando ad **immaginare leggi ipotetiche per poi creare dei sistemi nei quali tali leggi vengano a emergere**.

Basti pensare alla direzione presa dagli studi relativi:

- al Machine Learning ed alle Artificial Intelligences, tra i cui scopi troviamo la ricerca di nuove forme di calcolo computerizzato che portino allo sviluppo di intelligenze, diverse dalla nostra ma dotate di una capacità di evolversi e persino di acquisire un elemento di intuizione;
- alla Bioingegneria, che apre nuovi percorsi evolutivi basati su codici genetici e proteine differenti da quelli esistenti;
- all'Editing Genetico, come la CRISPR, che modificando il DNA permette la progettazione di forme di vita con fattezze o capacità che non esistono in natura (vedi i numerosi post che ho pubblicato in passato sul "post-umanesimo" e su "vita 3.0" di Max Tegmark).
- all'ingegneria quantistica che talvolta produce nuove forme di materia nella quale le stranezze dell'entanglement si manifestano anche su scala macroscopica:

*"... alcuni di questi materiali potrebbero codificare olograficamente nuove teorie della gravità e dei buchi neri, o magari modellini di universi in espansione con un'evoluzione codificata in operazioni algoritmiche su un gran numero di qubit interconnessi ..." - immagina Hertog.*

**Stiamo cioè passando dallo studio del «che cos'è» a quello del «che cosa potrebbe essere».**

Ha scritto su «*Quanta Magazine*» **Robbert Dijkgraaf**, ex direttore dell'Istituto per gli studi avanzati di Princeton:

«... *Quella che un tempo chiamavamo natura è soltanto una minuscola frazione di un paesaggio enormemente più grande che sta là fuori in attesa di essere scoperto ...*»

"... questi sviluppi" - afferma Hertog - "si rinforzano a vicenda, ed è alla loro intersezione che potremmo benissimo trovare le conseguenze più radicali ..."

"... qualche anno fa AlphaFold, un programma di deep learning sviluppato da DeepMind, si è auto addestrato a determinare la forma tridimensionale ripiegata delle proteine a partire dalla loro sequenza di aminoacidi, risolvendo una delle grandi sfide aperte nel campo della biologia molecolare; nei prossimi anni gli algoritmi di machine learning cercheranno nuove particelle nei petabyte di dati prodotti nel LHC del CERN e schemi riconducibili a onde gravitazionali nelle vibrazioni di fondo raccolte dal LIGO ..."

Qui la speranza di Hertog è che questi nuovi metodi di indagine arrivino ad identificare qualcuno tra quei **fossili** lasciati dall'evoluzione delle leggi di natura previsti dalla cosmologia top down, cosa che ne confermerebbero la validità.

"... nel XX secolo sono stati identificati i mattoni elementari della natura: particelle, atomi e molecole, che sono i componenti di tutte le cose materiali; geni, proteine e cellule, che sono i componenti della vita; bit, codici e sistemi collegati in rete, che stanno alla base dell'intelligenza e dell'informazione.

*Nel XXI inizieremo a creare nuove realtà con le loro leggi connettendo questi componenti in modi nuovi ...*"

Quello descritto da Hertog come modo di procedere che gli scienziati del XXI secolo stanno adottando non è niente più di quanto la natura ha fatto per oltre tredici miliardi di anni di espansione cosmica (e quattro miliardi di anni di evoluzione biologica sul nostro pianeta): **ma la natura**, come ha affermato Dijkgraaf, **ha nella sua storia esplorato solo una minuscola parte di tutti i disegni possibili.**

"... il numero di geni matematicamente concepibili è sbalorditivo, di gran lunga superiore persino al numero di microstati di un tipico buco nero, ma solo un piccolo frammento di queste possibilità ha trovato realizzazione nella vita sulla Terra; così come la gamma di particelle e forze fisiche che possono essere fabbricate nella teoria delle stringhe è enorme, ma l'espansione dell'universo primordiale ha prodotto solo questo specifico insieme ..." - conferma Hertog

"... in tutto lo spettro della complessità - dalla fisica fondamentale all'intelligenza - la varietà di realtà possibili è immensamente più grande di ciò che l'evoluzione naturale ha finora prodotto ..."

Siamo, come conferma **Max Tegmark** in **Vita 3.0**, all'alba di una nuova era, la prima del suo genere (almeno qui sul nostro pianeta), in cui **una specie cerca di riconfigurare e trascendere la biosfera in cui si è evoluta**: da "soggetti all'evoluzione" ne diveniamo "artefici", progettando con essa anche la nostra stessa umanità e così dando un'accelerata incredibile a processi che finora sono stati *terribilmente lenti*.

Questa nuova ed incredibile "capacità" della nostra specie ci carica di responsabilità enormi: la tecnologia del XX secolo ci ha regalato la possibilità di estinguerci grazie ad un olocausto nucleare, che solo per caso (e per l'intelligenza di alcuni) siamo stati in grado di evitare.

**Le tecnologie del XXI secolo ci forniranno nuovi e molteplici strumenti che, se usati contro noi stessi, vanno a sommarsi agli arsenali nucleari.**

*"... i rischi esistenziali creati dall'uomo, dalla proliferazione delle armi nucleari e dal riscaldamento globale fino agli sviluppi nel campo delle biotecnologie e dell'intelligenza artificiale, superano oggi di gran lunga quelli di origine naturale: l'astronomo reale britannico Sir Martin Rees ha stimato che, tenendo conto di tutti i rischi, abbiamo solo il cinquanta per cento di probabilità di arrivare al 2100 senza andare incontro a una qualche disastrosa battuta d'arresto, laddove il Future of Humanity Institute di Oxford pone il rischio esistenziale per l'umanità in questo secolo a circa uno su sei ..."*

Il fatto che tra i miliardi di stelle presenti nel nostro cono di luce passato locale, nessuna sembra essersi evoluta in un ecosistema di larga scala con il livello di tecnologia che noi potremmo raggiungere presto ("*... nessuna civiltà aliena sembra aver esplorato una parte sostanziale dei sistemi stellari nelle nostre vicinanze cosmiche ...*"), e che le leggi fisiche sembrano invece essere straordinariamente adatte alla vita, è fonte di serie preoccupazioni per più di uno scienziato.

Quello che intendeva Fermi, quando nell'estate del 1950 pose la famosa domanda «*Dove sono tutti quanti?*», è che tale "assenza", date le condizioni biofiliche dell'universo, suggerisce che sulla strada dell'evoluzione dalla materia inorganica "*a quel tecnosistema avanzato che potremmo raggiungere presto*", dev'esserci un serio ostacolo, un collo di bottiglia.

Si chiedeva se la nostra specie l'abbia già passato o se esso si pari minaccioso ancora davanti a noi (vedi quanto scrive in merito **Stephen Webb** in "**Se l'universo brulica di alieni dove sono tutti quanti ... 75 soluzioni al paradosso di Fermi**")

Guardando l'albero della vita da una prospettiva a partire dalle sue radici sembrerebbe, data l'incredibile improbabilità di ciascun passo evolutivo, che le forme di vita complesse siano rare nell'universo, e di conseguenza che il *collo di bottiglia principale* si trovi oramai alle nostre spalle.

*"... Fermi, però, aveva la fastidiosa sensazione che il posto di blocco potesse trovarsi nell'unica transizione che separa la nostra attuale civiltà dall'essere in grado di diffondersi nel cosmo: potremmo cioè non essere capaci di sopravvivere al mondo che abbiamo creato ..."*

L'invito di Hawking ed Hertog è ad impegnarsi per conoscere un po' meglio questo punto: "*... ci aiuterebbe a fare qualche previsione collettiva mentre ci costruiamo un futuro ...*"

Hawking condivide la sensazione di Fermi e le sue affermazioni sono pesanti come macigni:

*"... Dobbiamo solo guardare noi stessi per vedere come la vita intelligente potrebbe svilupparsi in qualcosa che non vorremmo incontrare ..."*

*"... Da una prospettiva quantistica" - prosegue Hertog - "le miriadi di percorsi che si biforcano nel futuro sono in un certo senso già lì, come un paesaggio di possibilità: alcuni futuri potrebbero anche apparire piuttosto plausibili, ma il passato dovrebbe insegnarci che tra le probabilità c'è una costante interferenza, cosa che porta la storia a prendere svolte inaspettate. Il comportamento accidentale di un pipistrello a Wuhan nel 2019 ne è un esempio ..."*

Hertog condivide con Tegmark - che ha creato a tal fine il Future of Life Institute alla cui pagina web invito alla lettura - l'idea che sia indispensabile ed urgente *acquisire una chiara visione globale del tipo di futuro a cui aspiriamo*, cercando di creare un modello, basato su qualche elemento quantitativo, di come potrebbe funzionare.

La comunità scientifica dovrà vigilare ed esser responsabile affinché le proprie ricerche *siano integrate e dirette al bene comune* (ancora una volta invito alla lettura di Vita 3.0 di Max Tegmark che, presa coscienza di quanto **Nick Bostrom** vuole dirci con il suo *paperclip maximizer*, ritiene indispensabile una supervisione ed una moratoria sullo sviluppo di AI ed armi autonome che garantisca la convergenza dei fini tra la nostra specie e le nuove intelligenze che verranno sviluppate).

*"... se l'umanità non scrive la propria sceneggiatura, nessuno lo farà per noi ... noi siamo evoluzione! ... e dobbiamo trovare una strada per sviluppare una coscienza planetaria: apprezzare il ruolo di custodi del pianeta Terra ... "* - prosegue Hertog.

Ecco infine quanto è stato trasmesso verso lo spazio durante una funzione commemorativa di Stephen Hawking tenutasi il 15 giugno 2018 nell'abbazia di Westminster:

*«Quando vediamo la Terra dallo spazio, e vediamo come un tutt'uno, vediamo l'unità e non le divisioni. È un'immagine così semplice, con un messaggio avvincente: un singolo pianeta, una singola razza umana. I nostri unici confini stanno nel modo in cui vediamo noi stessi. Dobbiamo diventare cittadini globali. Lavoriamo assieme per rendere quel futuro un posto che vorremmo visitare».*

### **Note:**

(98) Ad esempio alcuni universi in espansione sono ipersferici e privi di un confine (così come la superficie di una sfera non ha limiti).

(99) Hawking - l'abbiamo già scritto - era convinto del fatto che le geometrie con 4 dimensioni spaziali racchiudessero le proprietà quantistiche dell'universo.

Moltiplicando il valore assunto dalla dimensione temporale per la radice quadra di -1 la si trasforma in dimensione spaziale, come spiegato nell'*ultima sezione della terza parte "Ipotesi assenza di confini"*.

(100) Il confine del disco rappresentato in figura viene immaginato come un ologramma fatto di qbits legati in entanglement, dal quale viene proiettato lo spaziotempo interno (la nostra storia passata): in questo senso si può affermare come il passato dipenda dal presente.

(101) Vedi riferimento in nota 99 alla parte 3<sup>^</sup> del post.

(102) Qui non si può non ricordare quanto scrivesse Wheeler: *"it for bit ... ogni oggetto fisico - "it" - deriva il proprio significato dai "bit", le unità di informazione binarie"*.

L'idea che il mondo fisico derivi la propria esistenza da unità di informazione non è diversa da quanto racconta la cosmologia olografica, se non per il fatto che ai bit (che possono assumere solo due valori) essa sostituisca i qubit (particelle quantistiche che possono esser in sovrapposizione di stati).

**(103)** Entriamo qui in un terreno scivoloso: "potremmo noi star vivendo all'interno di un universo simulato?"

Ho trattato altrove - vedi un mio post del 2/3/2021 "il trilemma di Bostrom e la probabilità di vivere in una simulazione" - la verosimiglianza di tale ipotesi.

Vedi anche il saggio di David Chalmers "Più realtà" pubblicato nel settembre 2023.

**(104)** Proprio a questa affermazione fa riferimento la domanda che ho posto ad Hertog al termine del suo intervento a Genova (pubblicherò nei prossimi giorni un post Appendice a questa serie sulla Cosmologia Top down con i links:

- alle conferenze di Hertog e di Cox;
- alla la video intervista cui ho sottoposto Hertog;
- al PDF che raccoglie le 5 parti del post "Leonard Susskind e la battaglia per la salvezza della meccanica quantistica";

al PDF che raccoglie le 11 parti del post "la Top Down Cosmology".

**(105)** Una delle proprietà definitorie della teoria originale di Hartle ed Hawking era l'azzerarsi dell'onda dell'assenza di confini sul fondo delle geometrie a scodella.

L'olografia fornisce invece un'interpretazione di questa proprietà basata sulla teoria dell'informazione.

