



Università "Cardinale Giovanni Colombo" - Milano

A.A. 2024 - 2025

Corso di Astrofisica

Docente: **Adriano Gaspani**

Lezione 14

Il fenomeno dell'*Entanglement*

Einstein e la legge dell'Informazione

- La «legge dell'informazione»:

«l'Informazione può essere trasformata, ma mai distrutta»

- L'informazione potrebbe quindi sopravvivere a ciò a cui nulla può sopravvivere: un buco nero

- Se si capisce l'informazione si potranno capire i buchi neri
- Se si capiscono i buchi neri si capiranno le leggi dell'Universo.
- L'Informazione può essere trasferita attraverso un wormhole da un Universo ad un altro o tra due punti dello stesso Universo.

L'Entanglement

- Il conflitto tra Relatività e Meccanica Quantistica continua a scuotere la Fisica dalle fondamenta e gli scienziati di tutto il mondo stanno cercando di capirne le conseguenze.
- L'idea di entanglement minaccia di scardinare il limite della velocità della luce sul trasferimento dell'informazione e cioè minaccia di scardinare il cuore della Relatività.

Conflitto tra TR e MQ

- TR (Teoria della Relatività) si basa sul continuo
- MQ (Meccanica Quantistica) si basa sul discreto
- Due regimi molto diversi tra di loro e che non si sovrappongono quasi mai
- L'*entanglement* ... però e anche i buchi neri creano grossi problemi

■ Gisin e colleghi ...

- Difficoltà di descrivere l'*entanglement* in termini di scambio di messaggi: non si sa chi lo spedisce e chi lo riceve, ma viene comunque recapitato. Viene a cadere la causalità, tra le due non c'è una relazione causale e non ha senso *il prima e il dopo*.
- Non si può utilizzare l'*entanglement* per trasferire informazione alla sua compagna a velocità superiore a quella della luce.
- Tutto ciò è conseguenza della struttura matematica della teoria quantistica.

le Leggi dell'Informazione

- Se usate coppie EPR (Einstein-Podolsky-Rosen) per trasmettere un bit quantistico di informazione, non state violando il divieto di trasferire informazione istantaneamente?
- No perché il teletrasporto ha bisogno di trasferire dal mittente al destinatario anche un'informazione classica, due bit classici che non possono viaggiare più veloci della luce.
- Senza i bit classici è impossibile sapere come fare a ricostruire il *qubit* sulla particella bersaglio.

- Anche se il meccanismo usato dal teletrasporto quantistico per trasferire lo stato quantico di un atomo a un altro atomo è la fantomatica azione a distanza, l'informazione effettiva sull'atomo, quella che arriva al ricercatore, non può spostarsi da un luogo all'altro a una velocità superiore a quella della luce.
- Nonostante la stranezza della misteriosa azione a distanza dell'*entanglement*, il divieto einsteiniano di trasmettere informazione a velocità maggiori di quella della luce resiste inviolato.

- Gli stati quantici collassano istantaneamente, ignorando il rilievo dato da Einstein ai concetti di causalità, di prima e dopo.
- La reale natura dell'*entanglement* resta oscura.
- Gli scienziati non hanno ancora capito l'*entanglement* ma le leggi dell'informazione sembrano immuni dal pericolo

I buchi neri e il conflitto tra MQ e TR

- La massa di decine o centinaia di soli, si ritrova impacchettata in una porzione di spazio di raggio R_s molto piccola:
- $$R_s(\text{km}) = 2.95 \times M(\text{masse solari})$$
- Il buco nero è un pozzo spazio-temporale senza fondo, in cui lo spazio il tempo, in realtà, non hanno più un significato reale.
- Ha massa molto grande e dimensioni molto piccole, coinvolge TR e MQ, che purtroppo non vanno d'accordo.

La soluzione di Schwarzschild

Nel 1916 l'astrofisico Karl Schwarzschild trova per primo una soluzione alle equazioni della relatività di Einstein per un oggetto sferico, statico e immerso in uno spazio vuoto. Se l'oggetto è concentrato entro un raggio critico, allora nulla, neanche la luce, può più uscirne.



Karl Schwarzschild (1873-1916)

Raggio di Schwarzschild

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

$$R_s (\text{km}) \approx 3 \times \frac{M_{\text{stella}}}{M_{\text{Sole}}}$$



Nel 1967, Wheeler li battezza buchi neri

costante di gravitazione universale $G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$

massa del Sole $m_S = 1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

massa della Terra $m_T = 5.9726 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

$$\text{Raggio Schw. Terra} = \frac{2 \cdot G \cdot m_T}{c^2} = 8.868 \cdot \text{mm}$$

$$\text{Raggio Schw. Sole} = \frac{2 \cdot G \cdot m_S}{c^2} = 2.953 \cdot \text{km}$$

L'Universo è un'ologramma?

- Un ologramma è un tipo di immagine particolare che sfrutta le proprietà ondulatorie della luce per realizzare un particolare tipo di fotografia, un'immagine tridimensionale di un oggetto.
- Pur essendo registrato su un substrato bidimensionale, come un pezzo di pellicola o una lamina (CCD), nell'ologramma è codificata tutta l'informazione tridimensionale.
- Supponiamo che sia fotografato un dado. Camminando intorno all'ologramma vedremo tutte le facce dei dadi, impossibile con una foto ordinaria.

L'Universo in un granello di sabbia?

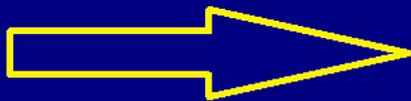
- La teoria definitiva non può riguardare i campi, e neppure lo spazio-tempo, ma lo scambio di informazione tra processi fisici
- Anche un briciolo di materia, teoricamente, può immagazzinare una quantità enorme di informazione.

Corrispondenza Massa-Informazione

I = informazione (bits)

E = Energia (Joules)

$$I = \log_2(E) \quad ; \quad E = m \cdot c^2$$



$$m = \frac{2^I}{c^2}$$

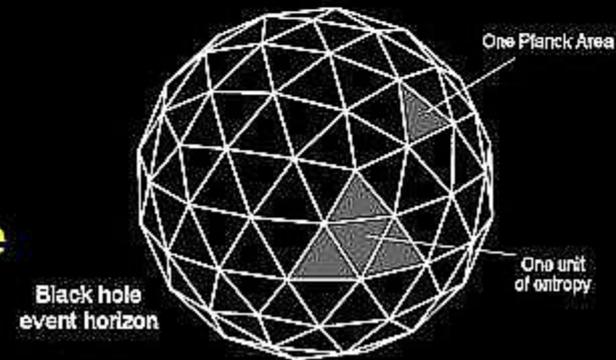
- Un buco nero, come un ologramma, sembra registrare tutte e tre le dimensioni delle informazioni delle cose che ha inghiottito, su un supporto bidimensionale, la superficie dell'orizzonte degli eventi del buco nero.
- Possibile estensione a tutto l'Universo nel suo insieme

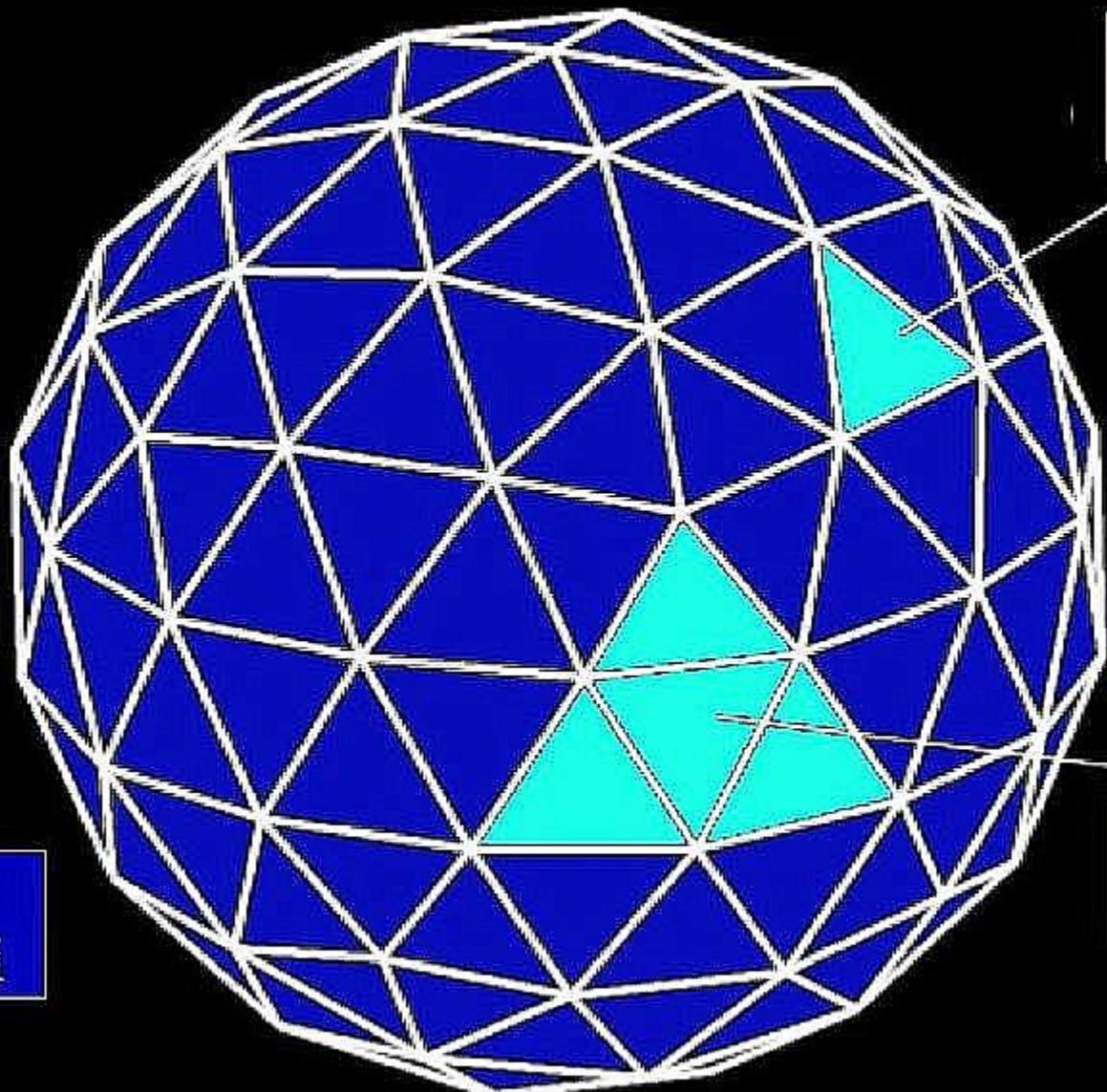
Entropia di Beckenstein - Hawking

$$S = \frac{\pi A k c^3}{2 h G}$$



A = area dell'orizzonte degli eventi
c = velocità della luce nel vuoto
h = costante di Planck (non ridotta)
G = costante di Gravitazione Universale
k = costante di Boltzmann





Una unità di Planck

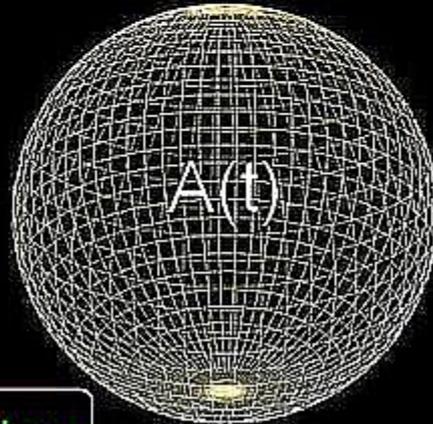
Una unità di entropia

Orizzonte degli eventi

Il Principio Olografico

"L'informazione totalmente contenuta nell'Universo osservabile è un numero finito ed è data dalla superficie cosmologica divisa per la costante di Planck"

$$A(t) = 4 \cdot \pi \cdot R(t)^2$$



$$I = 10^{122} \text{ bits}$$

valore massimo

$$\dot{R} \Rightarrow c$$

Universo \Rightarrow BH

$$R(t) = 13,7 \text{ Miliardi di anni luce}$$

L'interpretazione di Copenaghen

- L'atto dell'osservazione era mal definito.
- Uno strumento scientifico farebbe collassare la funzione d'onda, oppure è necessario un osservatore cosciente? Alla questione non si dava risposta.
- Non era neanche chiaro se *la funzione d'onda*, a qualche livello, fosse un oggetto fisico, o se si trattasse di un artefatto matematico che non ha un corrispettivo fisico vero e proprio.
- Anche se la funzione d'onda ci dice sì, l'elettrone si trova veramente in due posti oppure no? Non c'era una scelta obbligata da fare, ognuno poteva scegliere come voleva.

Interpretazioni alternative

- Ci sono molte interpretazioni alternative a quella di Copenaghen che sposano punti di vista molto diversi.
- Tutte queste creano tanti problemi quanti sono quelli risolti.
- Un'interpretazione però sta guadagnando terreno ... ma anche questa porta con sé un certo numero di problemi ...

Esistono universi paralleli ?

- Se accettate tale possibilità, allora la teoria dei quanti comincia ad avere anche un senso fisico, e l'informazione diventa parte integrante della struttura dello spazio-tempo
- Fu concepita da Everett nel 1957:
l'interpretazione a molti mondi
- Everett afferma che la funzione d'onda è un oggetto reale e quando essa afferma che l'elettrone è in due posti diversi, vuol dire che è veramente in due posti contemporaneamente.

- A differenza di tutte le altre varianti non c'è un vero e proprio collasso della funzione d'onda.
- Quando l'informazione sfugge dall'elettrone in sovrapposizione, quando qualcuno misura se l'elettrone è a destra o a sinistra, l'elettrone sceglie ... l'una o l'altra possibilità. Ci riesce alterando la struttura dell'universo con l'aiuto dell'informazione.
- Pensiamo al nostro universo come a un sottile foglio trasparente ...

- Su quel foglio se ne sta tranquillo un oggetto in sovrapposizione, esistendo simultaneamente in due posti diversi.
- Quando qualcuno acquisisce informazione sulla particella, ad esempio colpendola con un fotone, l'osservatore vedrà l'elettrone a sinistra o a destra, e non in entrambe le posizioni.

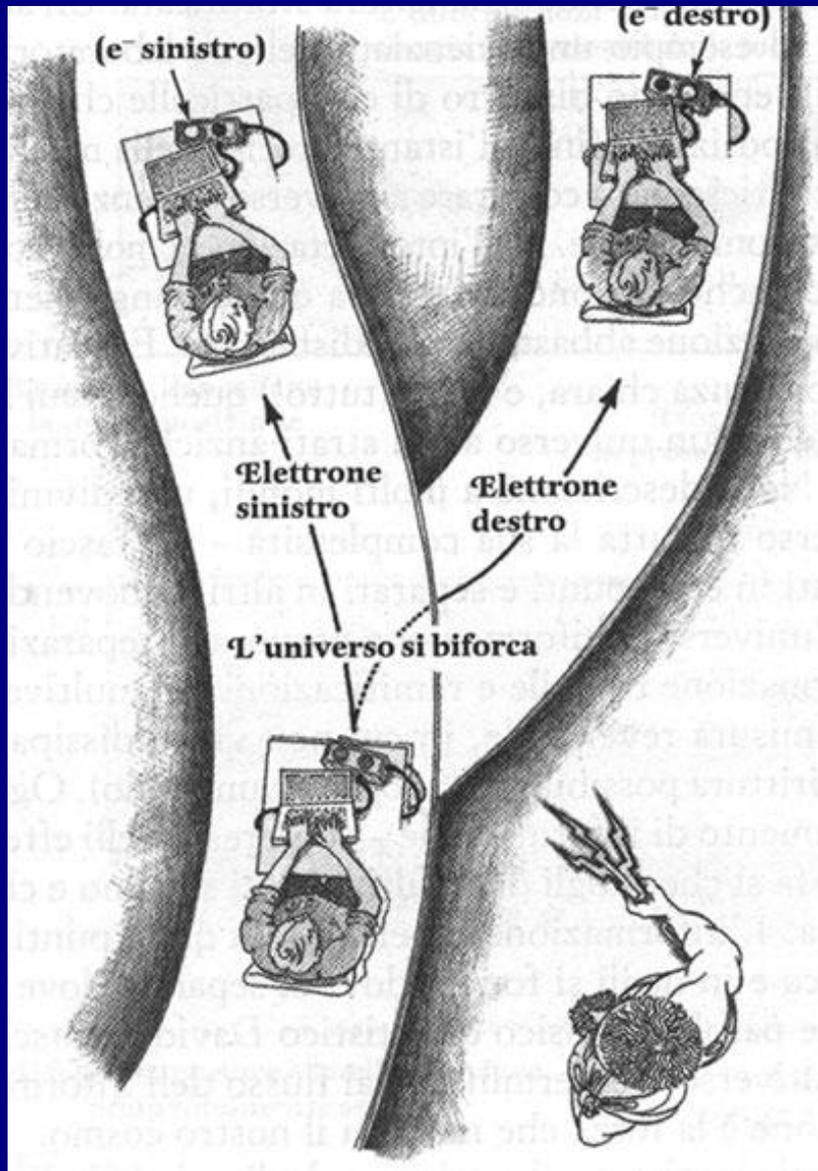
- Un seguace della Scuola di Copenaghen dirà che la funzione d'onda collassa in quel punto; quindi l'elettrone *sceglie* di stare a sinistra o a destra.

L'universo si biforca

- Un adepto della Teoria dei Molti Mondi direbbe che l'universo *si biforca*.
- L'universo ora è formato da due fogli incollati insieme.
- Quando l'informazione sulla posizione dell'elettrone si diffonde essa mostra che l'universo è duplice.
- In uno dei due universi l'elettrone si trova a destra, nell'altro a sinistra.
- In uno dei due universi un osservatore l'ha misurato a destra, nell'altro a sinistra.

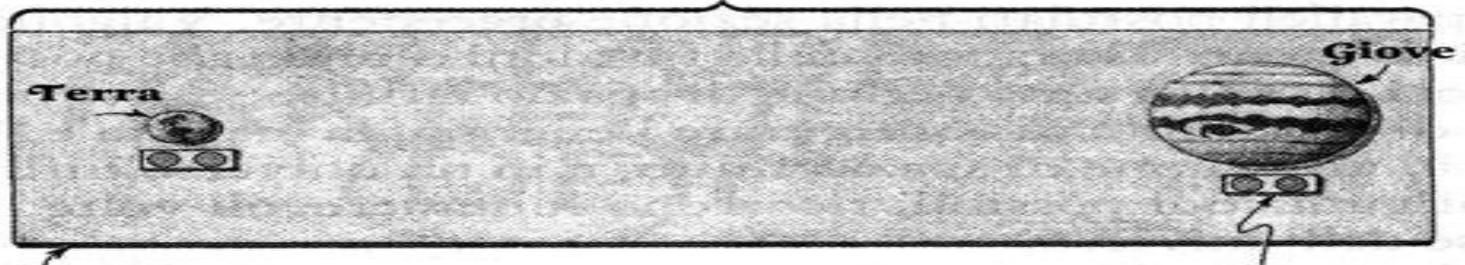
- Le due copie osservatore-particella ora abitano mondi diversi, non sanno l'uno dell'altro, e non possono più interagire, non possono più scambiare informazione.
- Il Multiverso permetterebbe di spiegare bene anche l'Entanglement

La sovrapposizione nel Multiverso



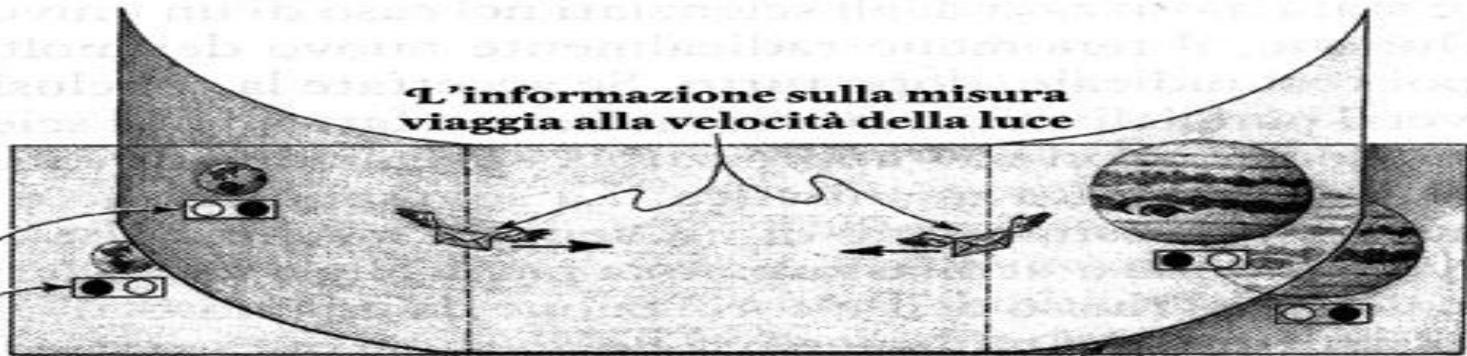
- Un Multiverso che si biforca a causa dello scambio di informazione, permette di spiegare anche la fantomatica azione a distanza delle particelle entangled

Una coppia EPR nel multiverso



Due fogli trasparenti incollati

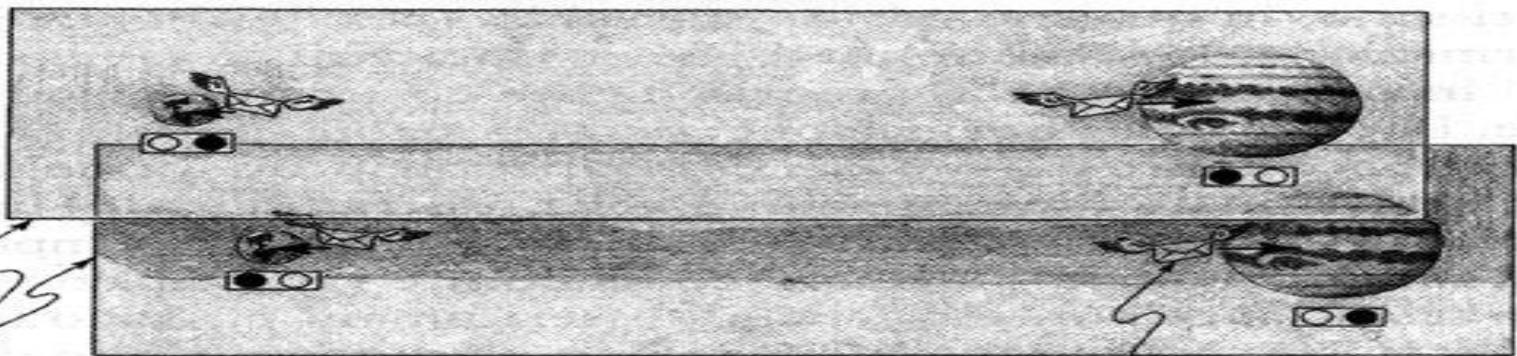
Sovrapposizione di stati quantici



L'informazione sulla misura viaggia alla velocità della luce

Le misure cancellano la sovrapposizione

I fogli si separano in prossimità della misura



Il foglio superiore e quello inferiore sono totalmente separati

L'informazione giunge a destinazione

L'universo è un computer?

- Nel 2001 , Seth Lloyd, il fisico che identificò nei buchi neri l'ultima frontiera dei computer, seguì una logica simile per dedurre quante operazioni potrebbe aver fatto l'Universo visibile: 10^{120} operazioni fino ad ora.
- Nel 2004 Krauss fece l'altra metà del calcolo trovando che all'Universo gliene restavano da fare più o meno altrettante.
- La Vita si basa sull'elaborazione della informazione e quindi non può che essere finita.

Tutto avrà termine...

- L'informazione immagazzinata e conservata verrà dispersa in maniera irreversibile , tutta la nostra civiltà (e le eventuali altre...) andranno perduta.
- Anche se non potrà mai essere veramente distrutta, l'informazione sarà dispersa e inutilizzabile nel cosmo buio e senza vita.
- Quest'informazione così preziosa, capace di illuminare i misteri più oscuri dell'universo, porta con sé i semi della propria distruzione.

Lloyd (2002) cercò di rispondere alla seguente domanda:

"Quanta informazione è stata elaborata dall'Universo dalla sua formazione (Big Bang) fino ad ora?"

Età attuale dell'Universo: 13,7 Miliardi di anni

Siccome l'età dell'Universo è finita (13,7 miliardi di anni), l'informazione elaborata fino ad ora non può essere infinita.

Questo è dovuto alle limitazioni imposte dalla Meccanica Quantistica, dalle leggi della Termodinamica e dal fatto che la velocità della luce è finita ($c=300000$ km/sec).

Il risultato è:

$$I \leq 10^{122} \text{ bits}$$

In passato, l'Informazione era minore in quanto l'Universo è in espansione.

In futuro sarà maggiore fino a raggiungere un valore limite massimo quando la velocità di espansione sarà uguale alla velocità della luce

Nell'Universo primordiale l'Informazione variava proporzionalmente a t^2

Conseguenze

- 1) L'energia oscura responsabile dell'espansione dell'Universo può essere trattata come energia ordinaria.
- 2) Se il contenuto di informazione $I(t)$ è finito e limitato allora le leggi fisiche che descrivono l'Universo non possono essere sempre le stesse, nel tempo.

Le costanti potrebbero variare lentamente nel tempo

3) L'Universo è sostanzialmente a 2 dimensioni le quali creano l'effetto tridimensionale a noi percepibile agendo sull'informazione localmente presente in ogni punto di esso.

4) Ogni punto locale dell'Universo contiene l'informazione completa relativa al tutto l'Universo nel suo insieme.

Questo spiega bene l'Entanglement

5) Ogni istante temporale nell'Universo contiene tutta l'informazione relativa agli altri istanti passati, presenti e futuri di esso, quindi l'informazione sul presente è una combinazione non lineare dell'informazione relativa al passato e di quella relativa al futuro.

Dove è il libero arbitrio?

...l'Universo sarà in equilibrio termodinamico.

...l'Entropia sarà massima.

...l'Informazione sarà massima.

...l'orizzonte cosmologico sarà un orizzonte degli eventi.

...l'energia oscura avrà vinto

Big Freeze

...tra 16,7 Miliardi di anni