Quando il Passato Diventa Futuro: La Cosmologia Ciclica Conforme

Stefano Spagocci

GACB

Illustrazioni di

Sir Roger Penrose!

Cosmologia Moderna

- La cosmologia è divenuta scienza solo a partire dai tardi anni '10 del secolo scorso. Prima degli anni '80 del '900, però, era appannaggio di pochi isolati studiosi.
- Non sembrava avere grandi prospettive sperimentali, archiviate le fondamentali scoperte di Hubble (espansione dell'universo) e Penzias e Wilson (radiazione cosmica di fondo a microonde).

Cosmologia Moderna

- A partire dall'inizio degli anni '80 del '900, con gli esperimenti da pallone Boomerang e Maxima, con i satelliti COBE, WMAP e Planck, con gli studi sulle supernovae del gruppo di Perlmutter ed altri, e considerati anche gli sviluppi teorici, la cosmologia è divenuta una scienza di punta e di precisione.

Problemi Sotto il Tappeto

- Rimangono però numerosi problemi irrisolti (fortunatamente, o non ci sarebbe più lavoro per i futuri ricercatori!)
- Tali problemi, come forse è inevitabile che sia, sono spesso “nascosti sotto il tappeto” ma ciò non vuol dire che non ci siano. Uno di questi problemi ha a che fare con l'entropia dell'universo.

L'Entropia

- L'entropia è una grandezza fisica che ha a che fare con il calore e la temperatura e che quantifica il disordine di un sistema.
- Sostanzialmente, la variazione di entropia tra due stati (ad esempio in una reazione chimica, nella fusione di un solido, nell'evaporazione di un liquido, nel passaggio di calore tra due corpi) si calcola sommando le quantità di calore scambiate nel cambiamento di stato ad una data temperatura, divise per la temperatura stessa.

The 2nd law of thermodynamics

time

Entropy: $S = k \log V$ increases

V = vol. in phase space

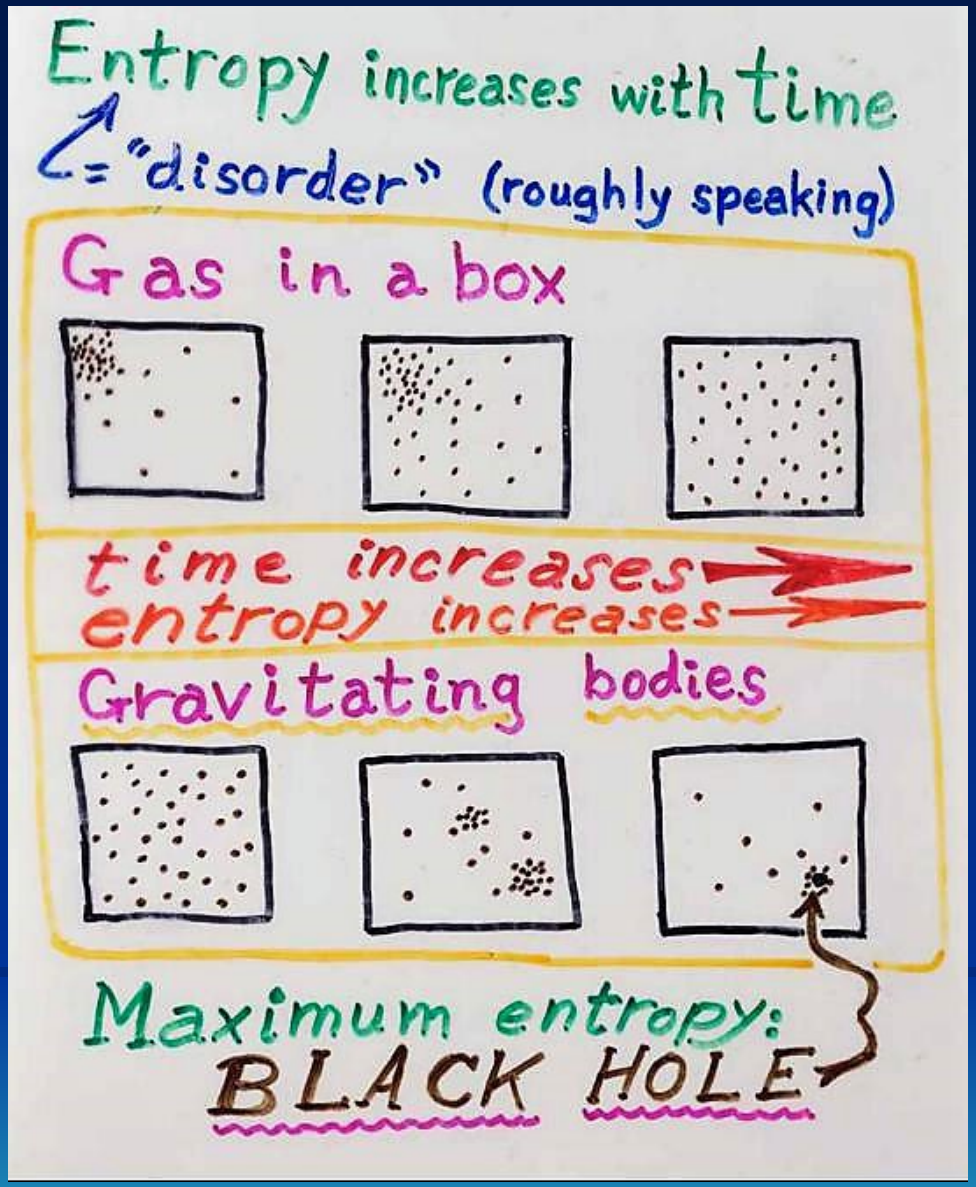
Boltzmann const.

L'Entropia

- Consideriamo il passaggio di calore tra due corpi a diversa temperatura. Quando non sono ancora a contatto, l'universo è più ordinato perchè tra i due corpi esiste una chiara distinzione.
- I due corpi si portano alla stessa temperatura e, nel processo, l'entropia del sistema aumenta. E' aumentato il disordine dell'universo, poichè dove in precedenza era distinzione, ora c'è omogeneità (una scrivania con diverse pile di carta è più ordinata di una in cui i fogli siano sparsi su tutto il piano).

Una Proprietà Fondamentale

- L'entropia dell'universo ha la proprietà fondamentale di poter solo aumentare col tempo.
- Seconda Legge della Termodinamica.
- Può esserci una trasformazione in cui l'entropia diminuisca ma ci sarà sempre un altro sistema la cui entropia aumenta, portando comunque ad un aumento globale dell'entropia dell'universo!


Entropy increases with time
= "disorder" (roughly speaking)
Gas in a box
time increases
entropy increases
Gravitating bodies
Maximum entropy:
BLACK HOLE

Entra in Scena la Gravità

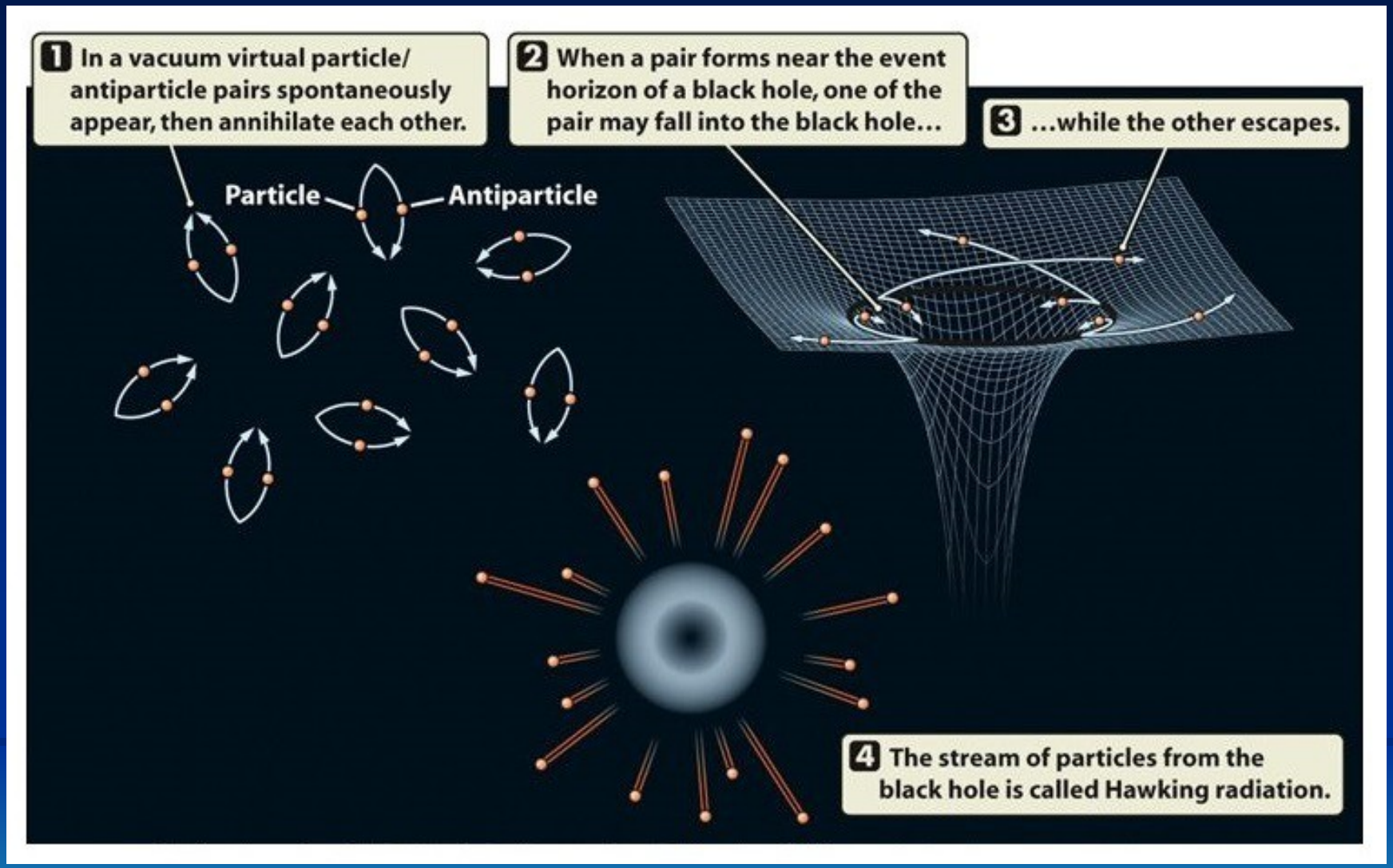
- Volendo applicare la termodinamica all'evoluzione dell'universo, dobbiamo trovare il modo di conciliarla con la gravità.
- L'universo evolve nel senso di un continuo aumento dell'entropia. D'altra parte, la gravità è una forza attrattiva e dunque, prima o poi, una struttura quale una galassia (o, idealmente, un insieme di corpi gravitanti posti in una scatola) vede la convergenza di tutti i componenti in un unico componente che alla fine diventa un buco nero.

Entra in Scena la Gravità

- Dunque uno stato gravitazionalmente più aggregato è uno stato avente maggior entropia.
- I buchi neri, come vedremo, sono portatori di entropia ed anzi, lo stato a più alta entropia di un aggregato di materia è quello in cui la materia in questione si sia aggregata in un unico buco nero!

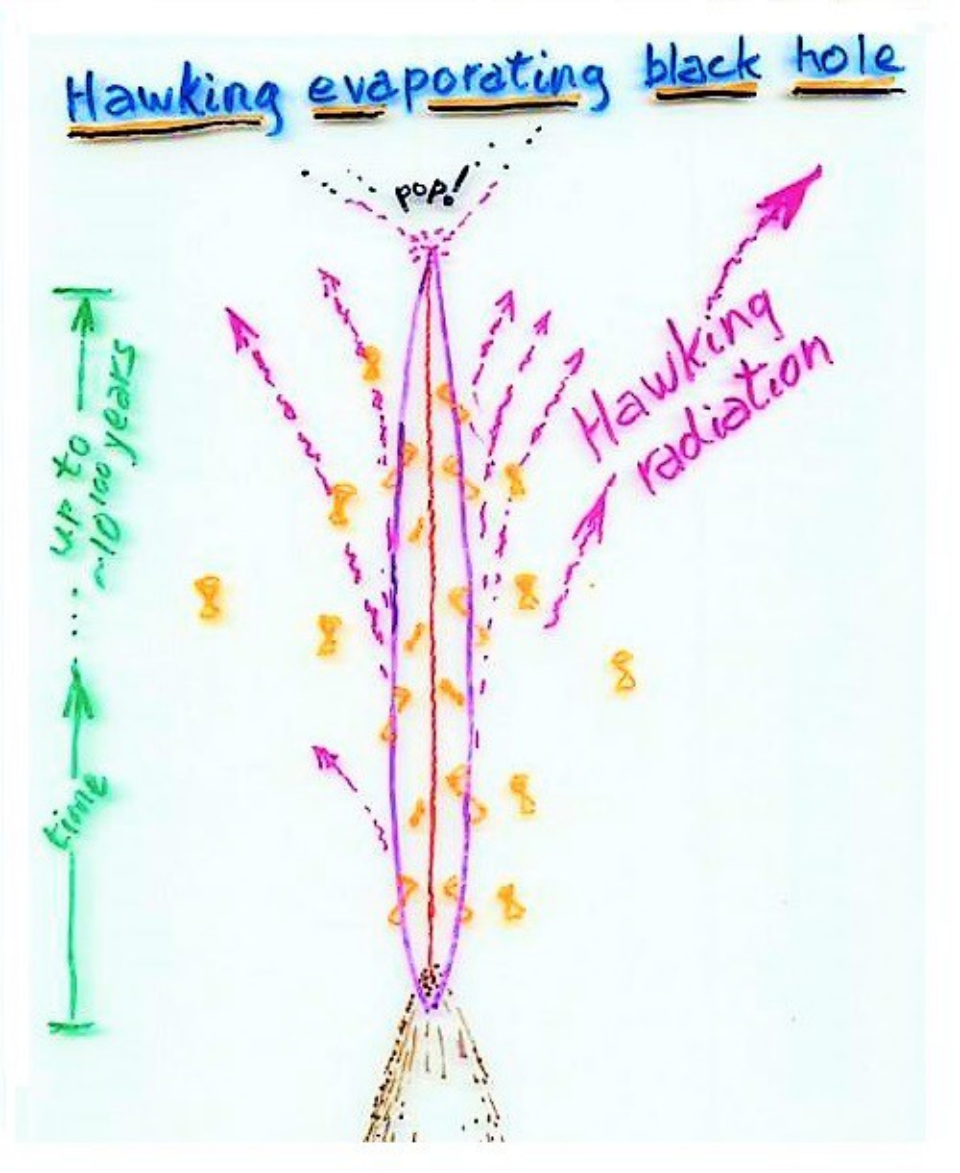
Buchi Neri ed Entropia

- Quando due buchi neri si fondono, l'area del buco nero risultante è maggiore della somma delle aree dei buchi neri di partenza.
- Quando un qualsiasi aggregato di materia cade in un buco nero, l'area del buco nero non può che aumentare.
- L'area di un buco nero non può quindi che aumentare col tempo, come l'entropia. Ciò spinse Bekenstein (primi anni '70) a definire l'entropia di un buco nero come la sua area!


1 In a vacuum virtual particle/ antiparticle pairs spontaneously appear, then annihilate each other.
Particle
Antiparticle
2 When a pair forms near the event horizon of a black hole, one of the pair may fall into the black hole…
3 …while the other escapes.
4 The stream of particles from the black hole is called Hawking radiation.

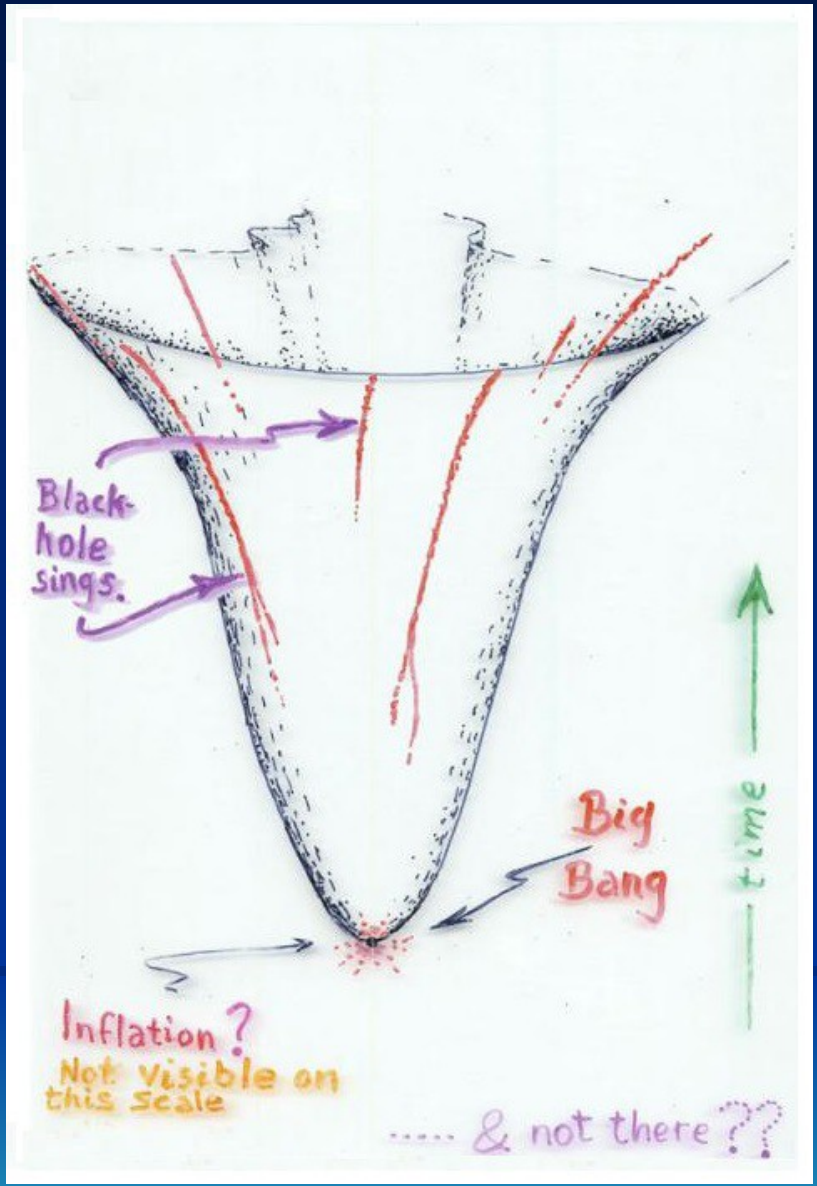
Evaporazione dei Buchi Neri

- Hawking, poco dopo Bekenstein, scoprì che i buchi neri a lungo andare evaporano, secondo il meccanismo spiegato nella precedente slide.
  Ma evaporazione implica temperatura e temperatura implica entropia.
- Quindi l'evaporazione dei buchi neri implica che un buco nero possieda entropia. Un calcolo (immediato, qualora si accetti la formula per la temperatura di un buco nero) porta a definire l'entropia di un buco nero come la sua area (espressa in lunghezze di Planck al quadrato e divisa per 4)!


Hawking evaporating black hole
pop!
Hawking radiation
time
up to ~10^100 years

Buchi Neri ed Entropia

- In definitiva, quindi, in un sistema in cui la gravità svolga un ruolo determinante, l'entropia (sulla scala dei tempi alla quale avvengono i processi gravitazionali) aumenta perchè la materia collassa progressivamente in aggregati che poi diventano buchi neri.
- L'entropia dell'universo (anche attuale, peggio ancora in futuro) è in larga parte data dall'entropia dei suoi buchi neri (oggi principalmente i buchi neri supermassicci al centro delle galassie).


Black-
hole
sings.
Big
Bang
time
Inflation?
Not visible on
this scale
..... & not there??

Lo Stato Iniziale

- Se vale quanto appena detto, allora lo stato iniziale dell'universo era uno stato ad entropia straordinariamente bassa!
- L'entropia di uno stato, tuttavia, è legata alla probabilità dello stato stesso (Boltzmann).

Lo Stato Iniziale

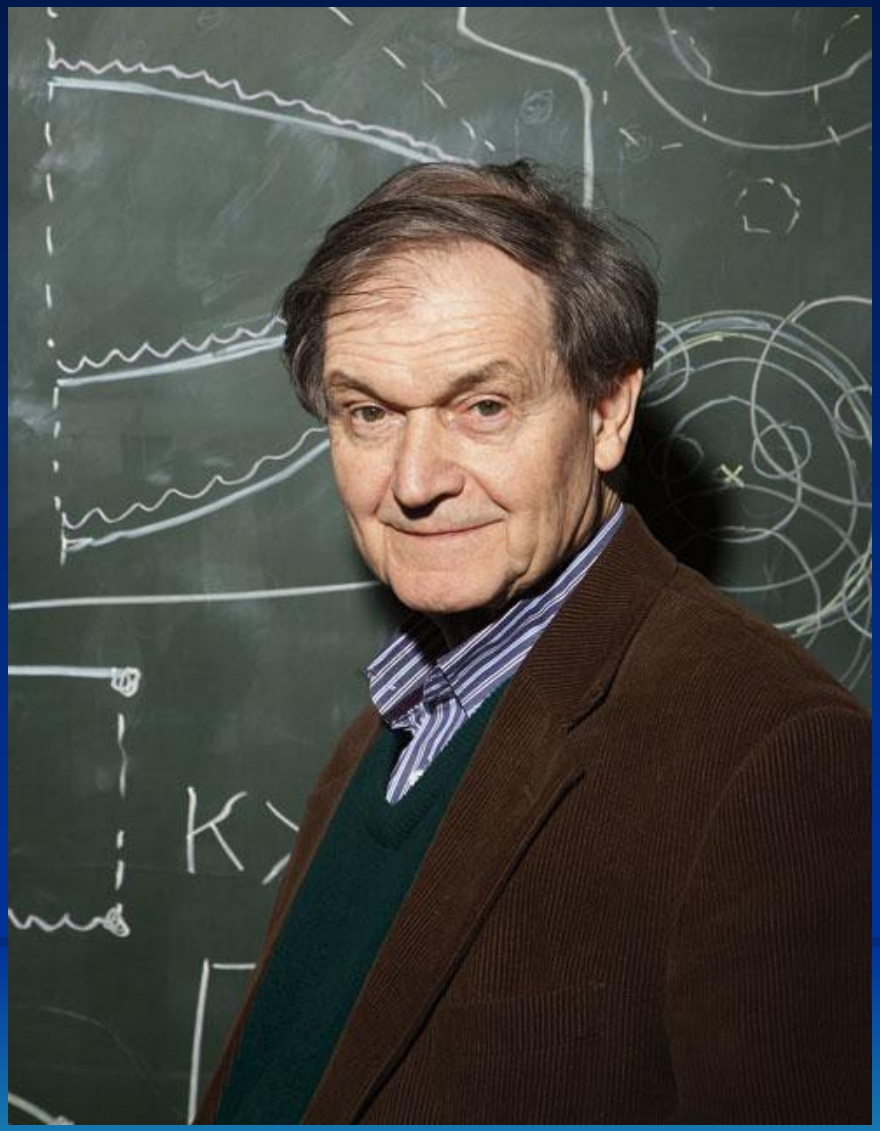
- In teoria, mettendo a contatto un recipiente con aria a pressione atmosferica ed uno con aria a pressione quasi zero, il recipiente a pressione minore potrebbe ridurre la propria pressione a zero, aumentando la pressione del recipiente a pressione atmosferica.
- Questo però comporterebbe che tutte le molecole nel recipiente a pressione minore si dirigano verso quello a pressione maggiore e tutte le molecole nel recipiente a pressione atmosferica, nonostante il continuo moto, rimangano confinate nel recipiente. Possibile ma molto improbabile per i moti casuali delle molecole in un gas!

Un Universo Bello e Pronto?

- Se dunque lo stato iniziale fu uno stato a bassissima entropia, e se entropia significa probabilità, allora un universo “bello e pronto” così come è sarebbe molto più probabile dello stato iniziale del Big Bang come lo concepiamo oggi!

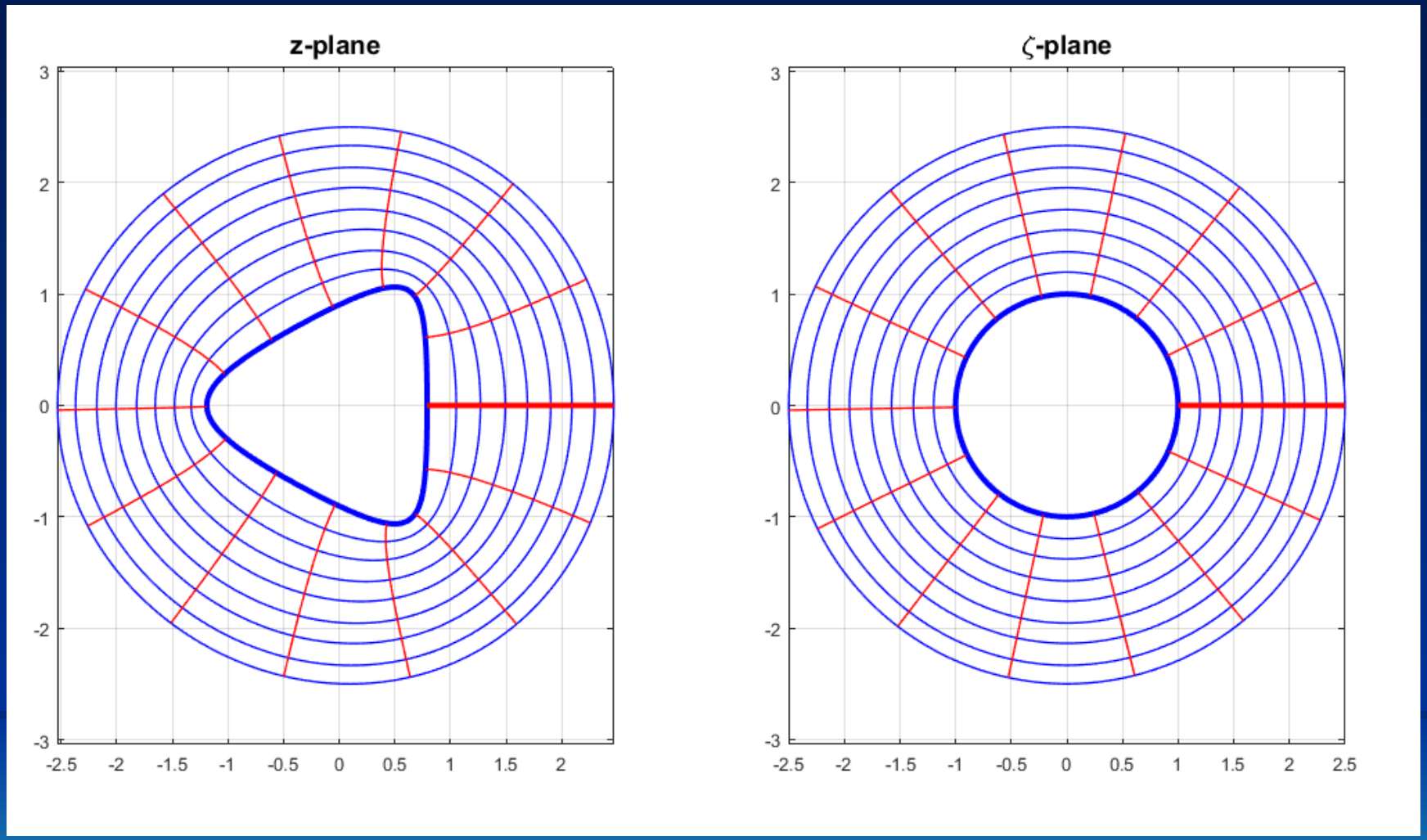
Un Universo Bello e Pronto?

- Questa interpretazione dell'entropia non è universalmente condivisa ma, condividendola, bisogna riconoscere che se lo stato iniziale dell'universo fu “scelto” casualmente (da qualcuno o qualcosa), fu “scelto” in uno stato estremamente improbabile!
- E' come se si tirasse un dado un miliardo di volte in sequenza: è possibile ma estremamente improbabile che ne risultino un miliardo di 3 (o qualsiasi altro numero da 1 a 6)!



Un Infinito Conforme?

- La Cosmologia Ciclica Conforme, parto della mente del grande fisico matematico inglese Sir Roger Penrose, intende appunto risolvere il problema dell'entropia dello stato iniziale.
- Una geometria conforme è una geometria nella quale contano solo gli angoli (quindi le forme) ma non le lunghezze. In altre parole (ad esempio ma è un esempio molto semplificato) se considero una figura e la stessa figura ingrandita o rimpicciolita di un qualunque fattore (lo stesso fattore in tutte le direzioni), per la geometria conforme le due figure sono considerate uguali!


z-plane
ζ-plane
3
2
1
0
-1
-2
-3
-2.5
-2
-1.5
-1
-0.5
0
0.5
1
1.5
2
2.5

Un Infinito Conforme?

- Consideriamo l'universo dopo un tempo molto lungo (maggiore di 10^{100} anni!): tutta la materia sarà ormai collassata in buchi neri sempre più massicci, i quali avranno però avuto tempo di evaporare, emettendo prevalentemente fotoni. L'universo, quindi, sarà composto da un mare di fotoni, di energia sempre più bassa man mano che procede l'espansione accelerata.

Un Infinito Conforme?

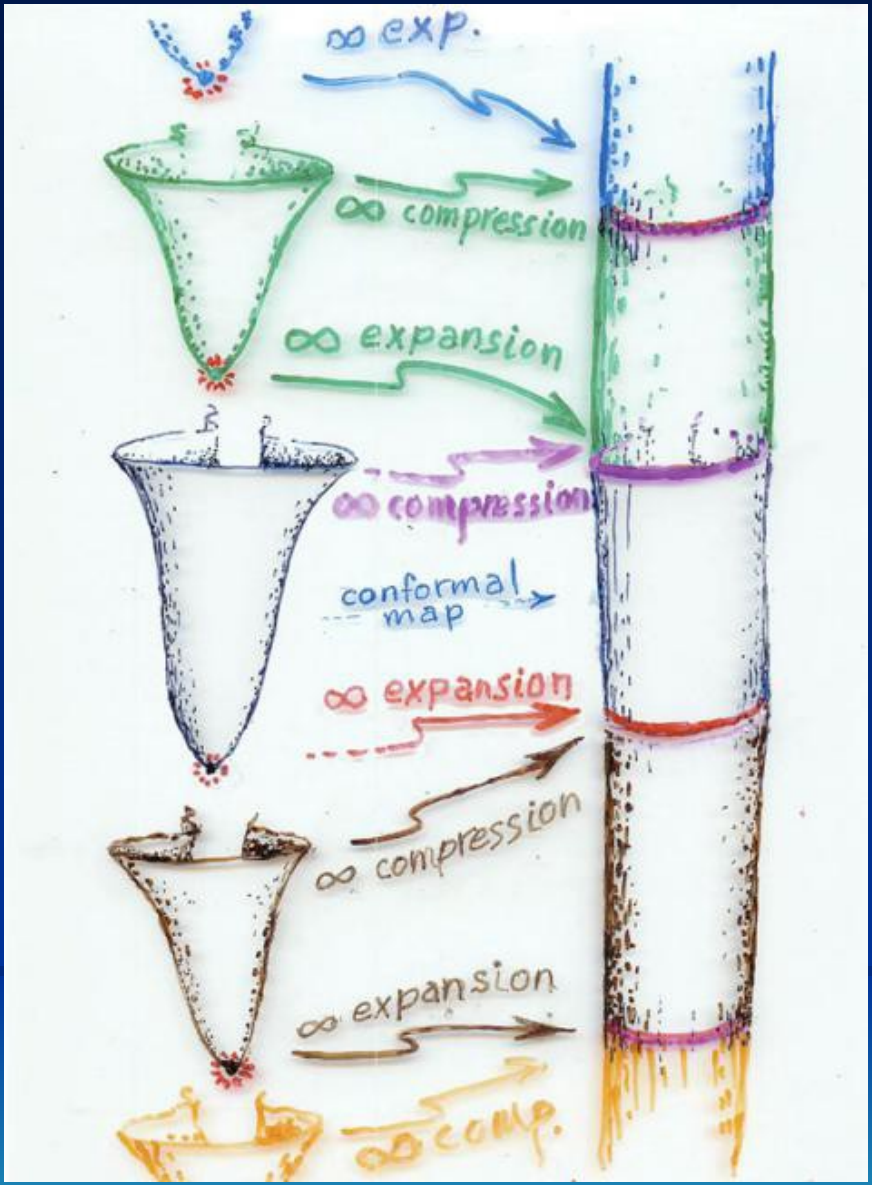
- Secondo la relatività ristretta di Einstein, lo scorrere del tempo dipende dalla velocità di un corpo. Per un corpo che viaggi alla velocità della luce, come un fotone nel vuoto, il tempo si ferma. Per un fotone il tempo, non trascorrendo, semplicemente non esiste!

Un Infinito Conforme?

- Ma velocità = spazio/tempo, quindi se per un fotone non esiste il tempo, non esistono nemmeno le lunghezze!
- L'universo, dopo un tempo “infinito”, sarà composto di soli fotoni.
- Quindi non avrà senso il concetto di lunghezza, dunque l'universo futuro sarà dominato dalla geometria conforme!

Un Infinito Conforme?

- Le stesse considerazioni si applicano all'universo al tempo “zero”. Infatti, man mano che ci si avvicina al Big Bang l'universo diventa sempre più caldo ed al tempo zero avrebbe temperatura infinita. A tale temperatura, l'energia connessa alla massa di una particella ($E=mc^2$) è del tutto trascurabile rispetto alla sua energia cinetica (di moto). E' come se tutte le particelle, al tempo “zero”, perdano la loro massa. Così facendo, diventano analoghe ai fotoni di cui è composto l'universo al tempo “infinito”, quindi per esse non esistono tempi e lunghezze!


∞ exp.
∞ compression
∞ expansion
∞ compression
conformal map
∞ expansion
∞ compression
∞ expansion
∞ comp.

Un Infinito Conforme?

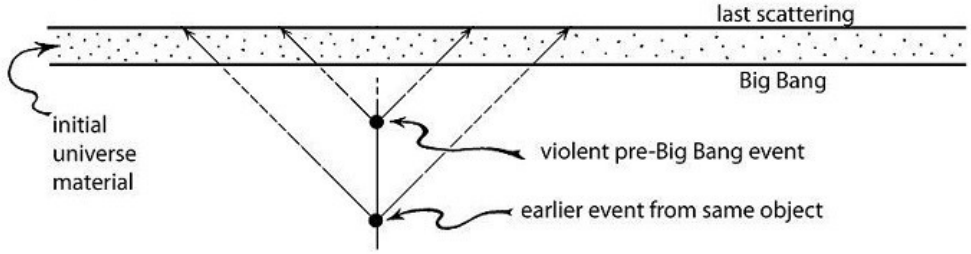
- Ma se al tempo zero (Big Bang) ed al tempo infinito (il futuro dell'universo) una lunghezza è equivalente all'altra, in particolare le dimensioni zero dell'universo al Big Bang equivalgono alle dimensioni infinite dell'universo nel futuro remoto, quando tutti i buchi neri saranno evaporati!

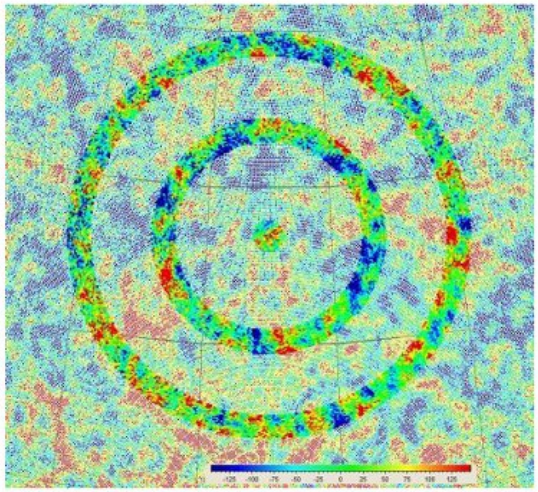
Un Infinito Conforme?

- Secondo la Cosmologia Ciclica Conforme, si avrebbe una successione temporale infinita di universi, tali per cui il futuro remoto di un universo si identificherebbe col passato remoto dell'universo successivo!

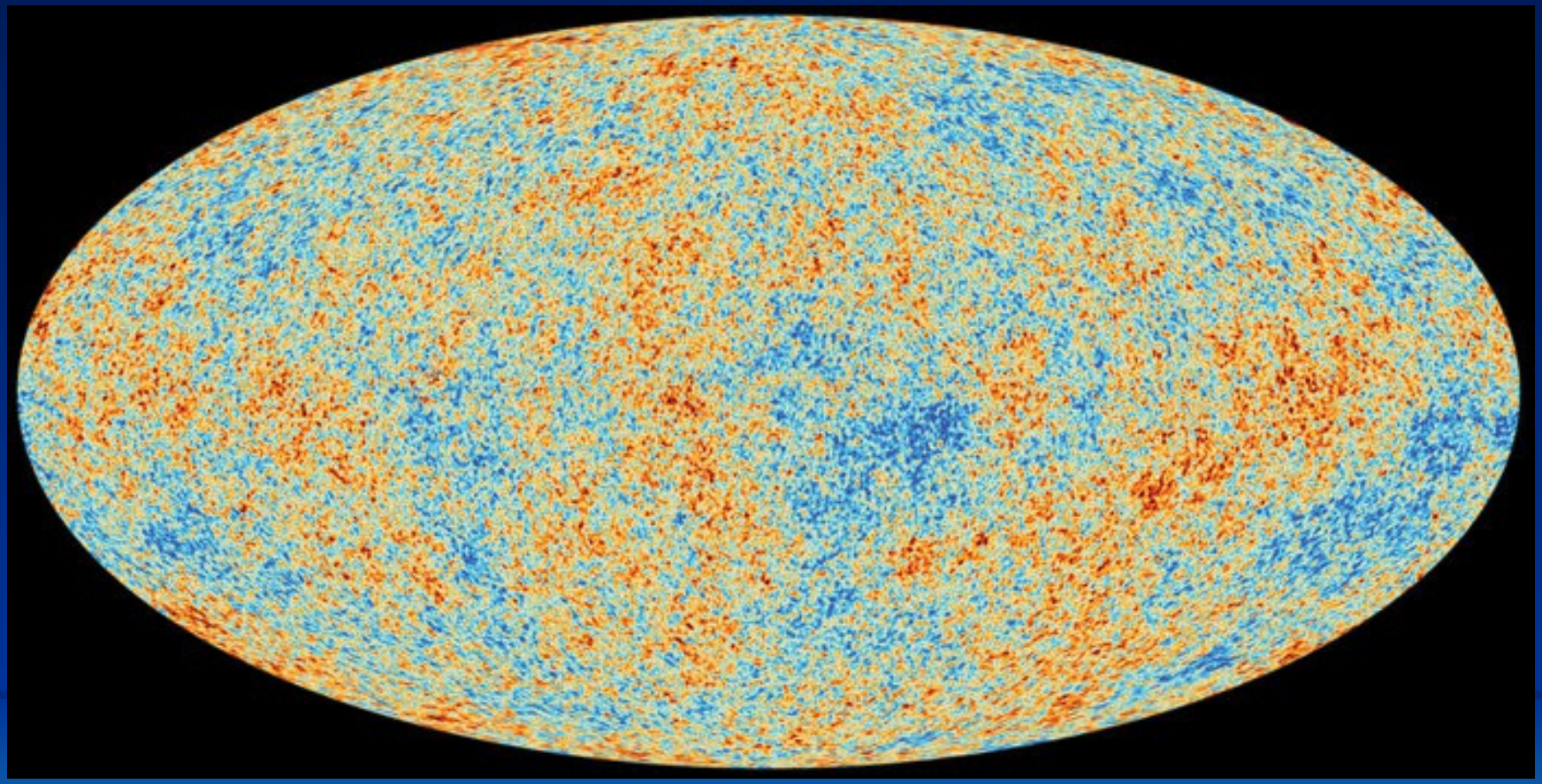
Risolto il Problema dell'Entropia?

- Si risolverebbe così il problema dell'entropia. Infatti il remoto futuro di un universo è uno stato ad altissima entropia ma tale entropia, per l'universo seguente, è una costante (chiamiamola s) che si applica a tutti i suoi sub-sistemi. L'entropia è definita a meno di una costante additiva arbitraria, cioè posso sottrarre o aggiungere all'entropia di ogni sistema una qualsiasi quantità, purchè sia la stessa per tutti i componenti del sistema. Posso quindi sottrarre la quantità s (per quanto grande sia) all'entropia di tutti i corpi dell'universo, il che è equivalente a considerare s=0, ovvero a considerare uno stato iniziale ad entropia nulla!





- Le evaporazioni di buchi neri in un universo dovrebbero propagare la loro traccia nell'universo successivo.
  La traccia consisterebbe in onde di densità a cerchi concentrici, rilevabili esamimando la radiazione cosmica di fondo, nella quale (con una sofisticata eleborazione dell'immagine) si dovrebbero rilevare appunto cerchi concentrici.



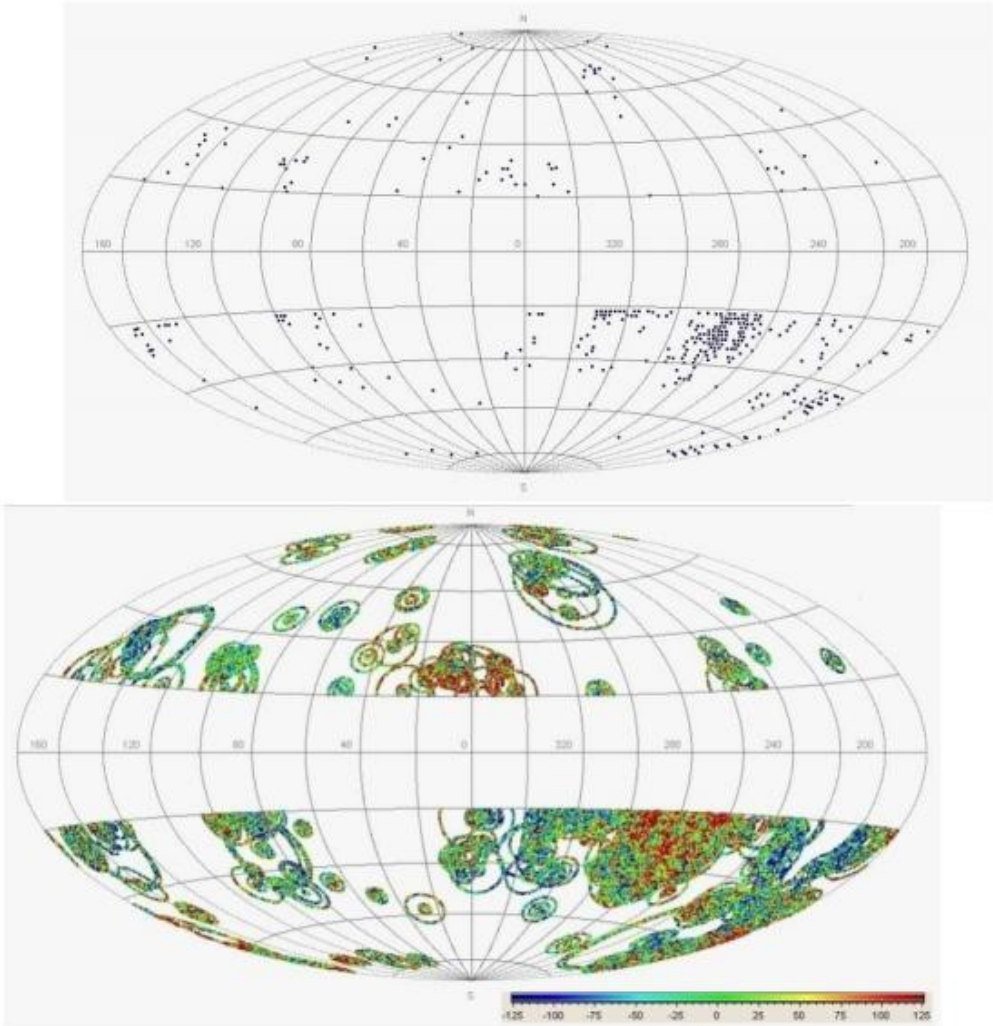


Figure 4. The sky distribution of concentric sets containing three and more circles of depth over15μK: the upper figure indicates the positions of the centres, the lower one exhibits the actual circles.

Conclusioni

- La figura precedente mostra il risultato dell'analisi delle immagini del fondo di radiazione cosmica a microonde (satellite WMAP). I cerchi concentrici in effetti appaiono chiaramente. Poichè però per rivelarli è necessaria una sofisticata analisi dell'immagine, e nell'image processing spinto all'estremo è alto il rischio di trovare ciò che si vuole trovare, “non tutti” i cosmologi concordano con Penrose. Sospendiamo dunque il giudizio.

Conclusioni

- La Cosmologia Ciclica Conforme, comunque, rimane una teoria molto interessante, in quanto non solo risolverebbe il problema del'entropia ma ci darebbe un modo per dare un'occhiata ad alcuni universi paralleli di cui l'ipotetico multiverso è composto.
- In teoria sarebbe anche possibile inviare messaggi all'universo che seguirebbe il nostro (o riceverne da quello precedente), sapendo controllare l'evaporazione dei buchi neri!