

Lo Strano Connubio: Cosmologia e Teoria delle Stringhe

Stefano Spagocci
(stefanspag@gmail.com)

GACB



Introduzione

- I termini “cosmologia” e “teoria delle stringhe” evocano un senso di mistero. Cosa sarà mai la “cosmologia di stringa”? In questa conferenza lo scopriremo (niente paura, non ci sarà nessuna formula e nessuna spiegazione contorta).

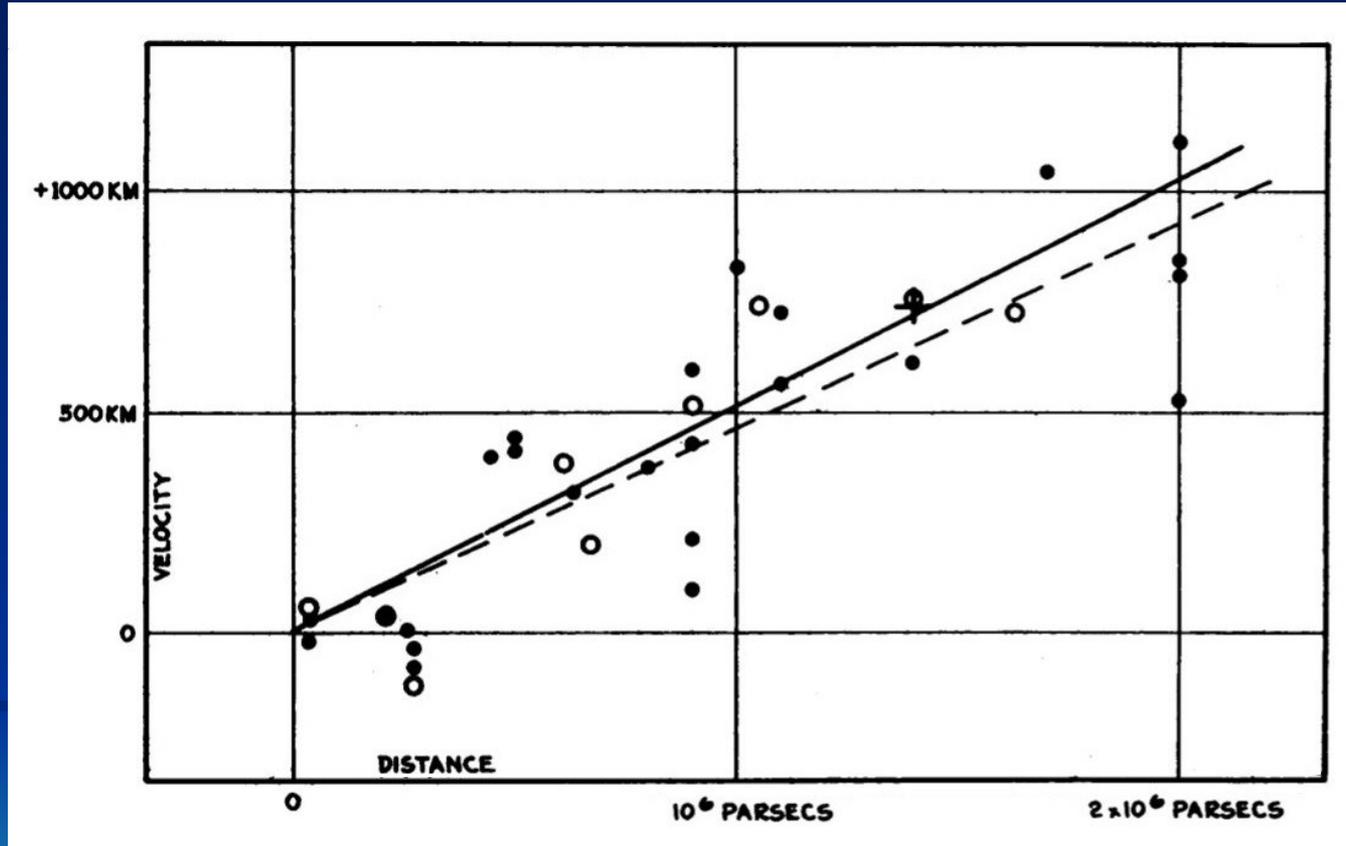


La Cosmologia

- Per “cosmologia” si intende lo studio scientifico della nascita, vita ed eventuale morte dell'Universo, inteso come un tutt'unico soggetto alle leggi della fisica (meccanica classica, meccanica quantistica, teoria della relatività speciale e generale).



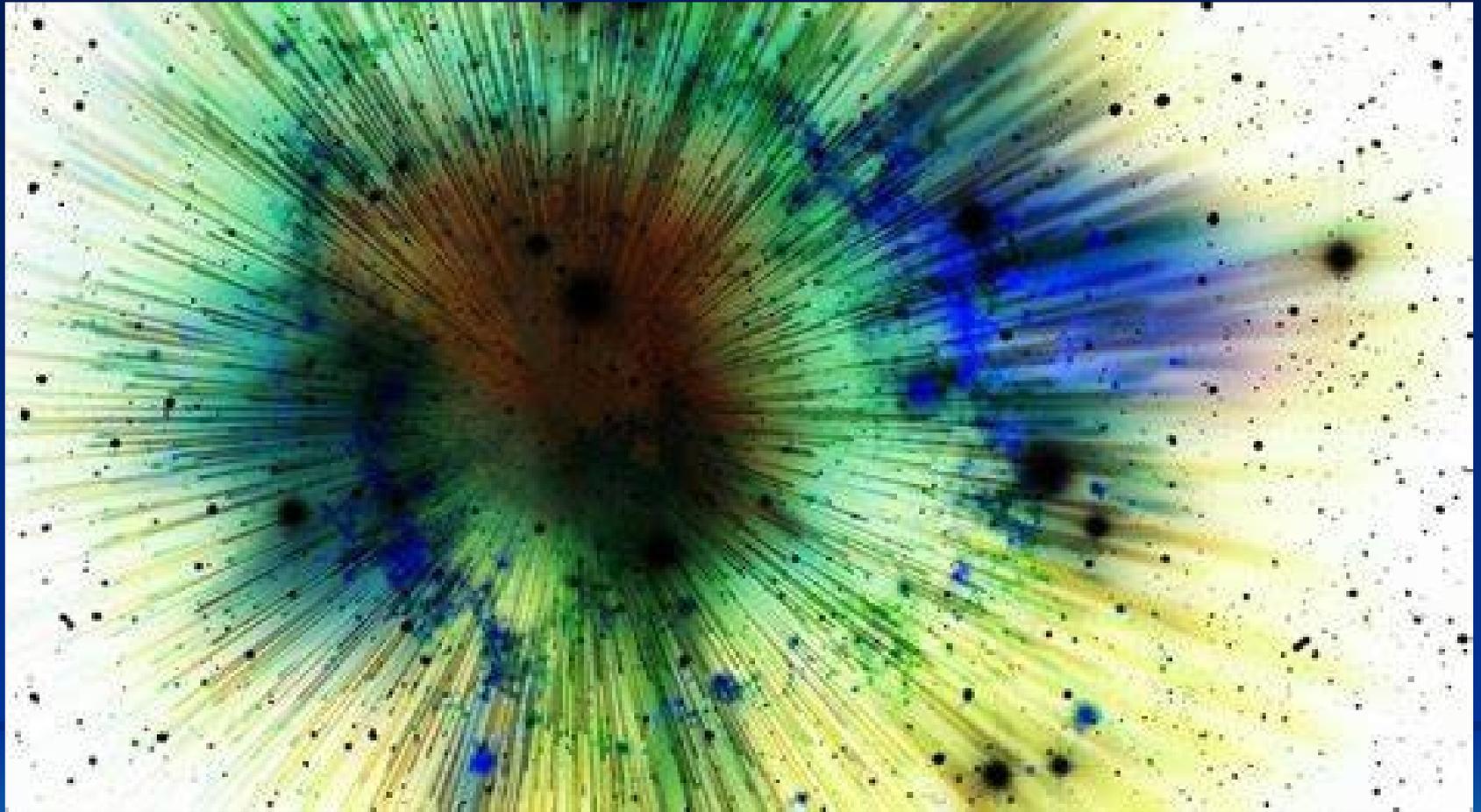
La Legge di Hubble



La Legge di Hubble

- E. Hubble (1929) determinò la distanza e velocità di diverse galassie a noi vicine.
- Egli scoprì la legge che oggi porta il suo nome: le galassie si allontanano con una velocità proporzionale alla loro distanza.
- Ma se tutte le galassie si allontanano, è logico pensare che, in un dato momento, la materia che le forma fosse concentrata in uno spazio molto ristretto (teoricamente, un punto).

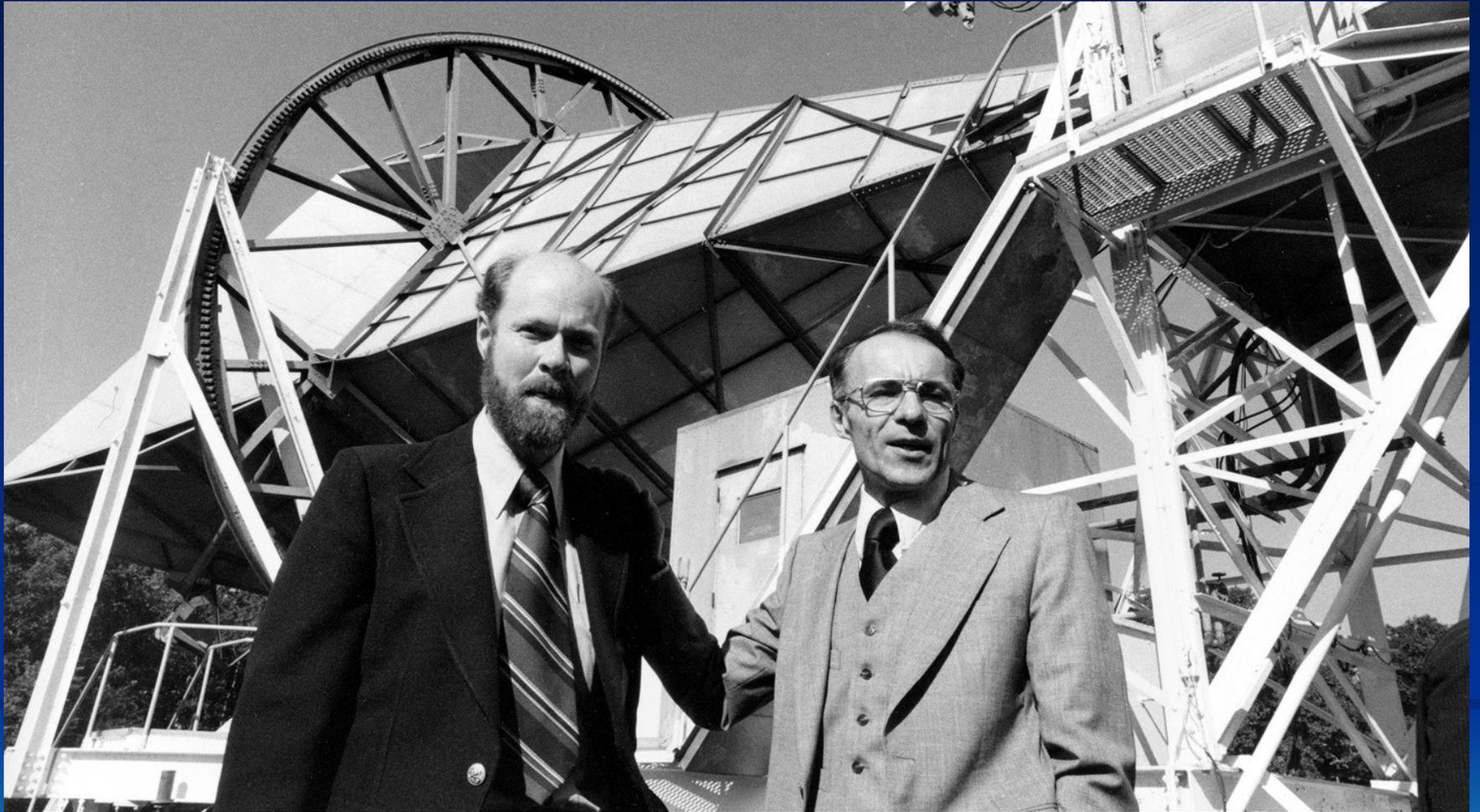




La Legge di Hubble

- Possiamo quindi supporre che l'Universo abbia avuto origine da una sorta di esplosione, il Big Bang, in conseguenza della quale tutte le galassie si allontanano tra di loro, secondo la legge di Hubble.
- Dal grafico di Hubble si può ricavare, “proiettando il film all'indietro”, l'epoca del Big Bang.
- Con i dati disponibili fino agli anni '90, si poteva solo affermare che l'età dell'Universo fosse compresa tra 10 e 20 miliardi di anni. Ora sappiamo che l'età dell'Universo è di 13.8 miliardi di anni!



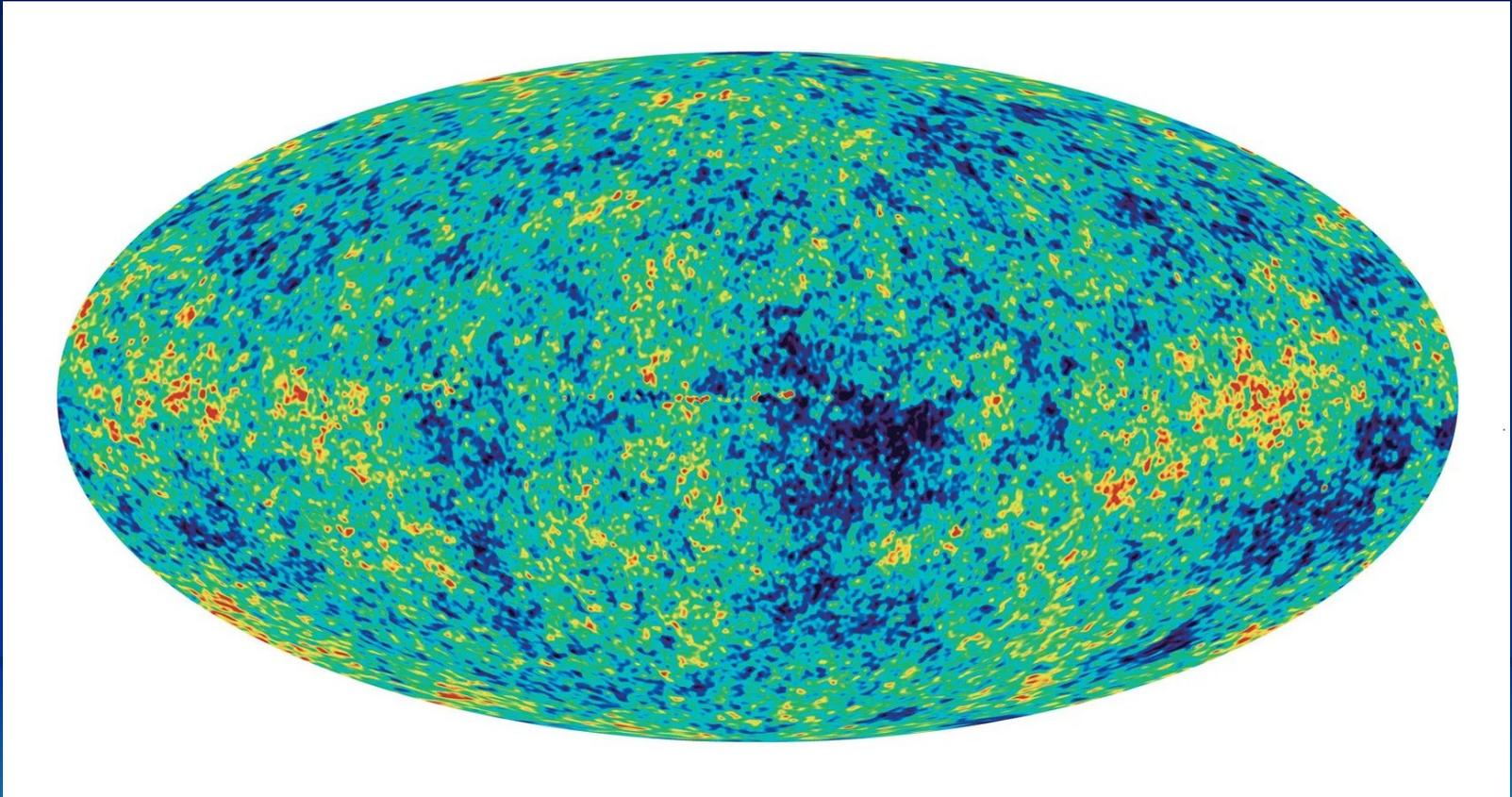


La Radiazione a 3 K

- Gli statunitensi A. Penzias e R. Wilson nel 1964 scoprirono per caso che l'Universo è permeato di radiazione a microonde che corrisponde all'emissione di un corpo alla temperatura di circa 3 gradi Kelvin (circa -270 gradi Celsius).
- Tale radiazione (il “bagliore del Big Bang”) è un residuo dell'epoca in cui, circa 380000 anni dopo il Big Bang, protoni, neutroni ed elettroni si riunirono in atomi e i fotoni furono liberi di diffondersi.



La Radiazione di Fondo



Energia Oscura

- Attorno alla fine del '900, la costruzione di diagrammi di Hubble più precisi (da parte dello statunitense S. Perlmutter e altri) portò alla determinazione della velocità di espansione dell'Universo dopo il Big Bang.
- Si scoprì che l'Universo non solo è piatto e si diluirà indefinitamente ma sta addirittura accelerando la propria espansione!



Energia Oscura

- Per spiegare l'accelerazione dell'Universo è stata riesumata la costante cosmologica di Einstein (una sorta di gravità repulsiva). In realtà non si sa da dove provenga tale energia.
- L'Universo consiste di: 5% materia ordinaria, 27% materia oscura (materia che non si vede ma di cui si sente la gravità), 68% energia oscura.



Composition of the Universe

Dark matter
27%

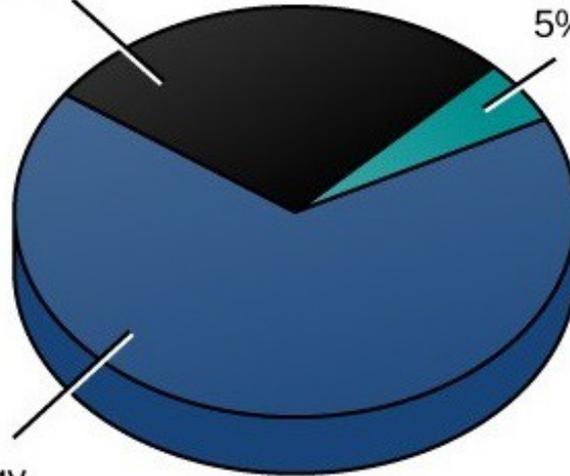


Dark energy
68%



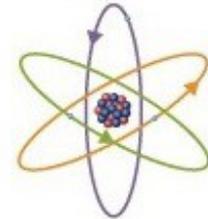
Dark matter
27%

Ordinary matter
5%



Dark energy
68%

Ordinary matter
4% H and He
<1% Stars
<1% Other



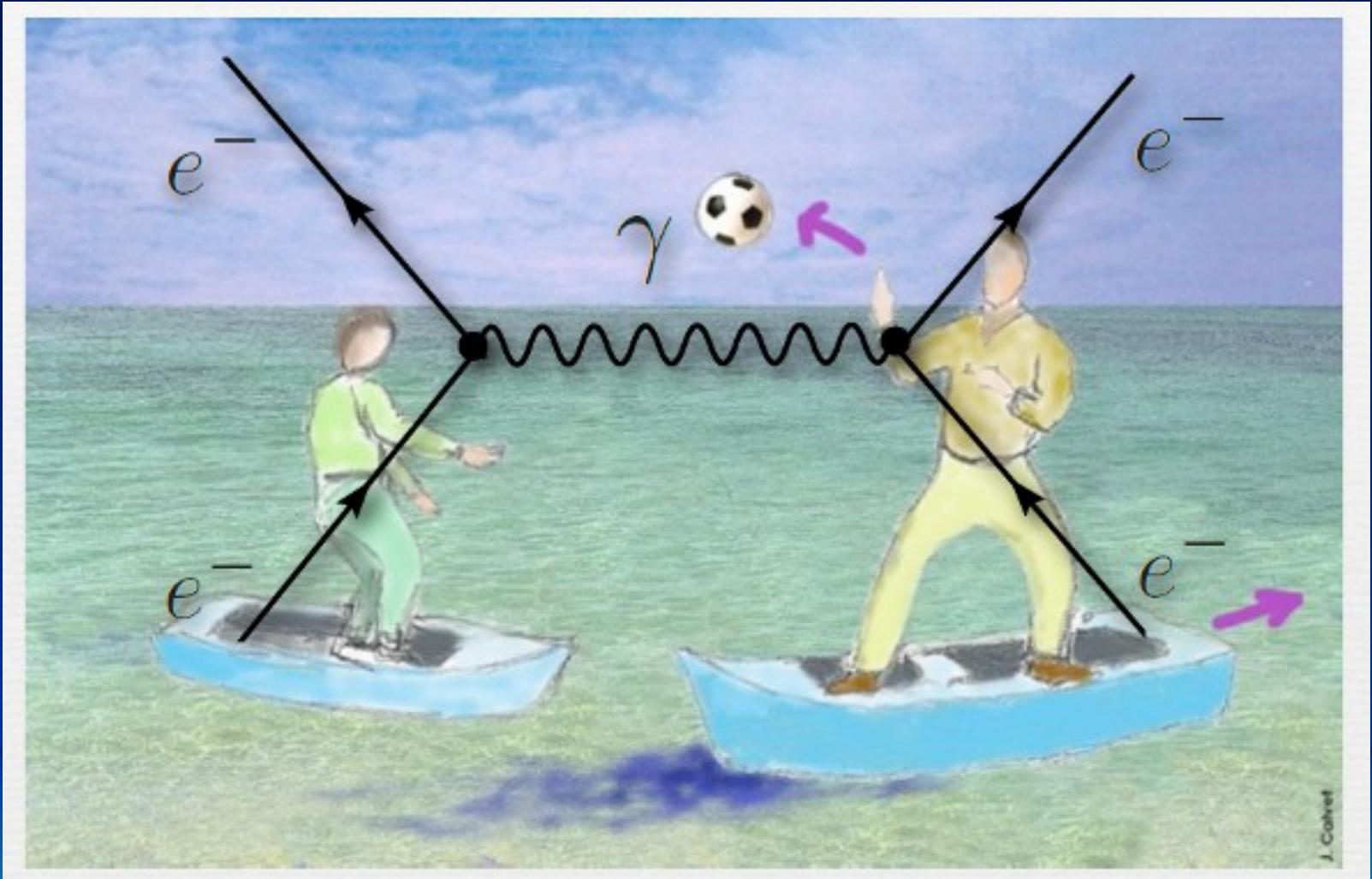
Campi

- L'universo è permeato da campi, tra cui il campo elettromagnetico, la “sostanza” di cui sono composte le onde elettromagnetiche (onde radio, microonde, infrarossi, luce, raggi x, raggi γ)
- Un campo può essere paragonato ad un fluido come l'acqua.
- Vista senza ingrandimenti, una distesa d'acqua sembra un fluido continuo. Ingrandendo una goccia d'acqua scopriremmo invece che si tratta di moltissime particelle (le molecole) di piccolissime dimensioni.



- Un campo è quindi composto da particelle dette “quanti del campo”, nel caso elettromagnetico i fotoni.
- Ci sono così il campo gravitazionale e i suoi quanti, i gravitoni ecc.





Particelle Elementari

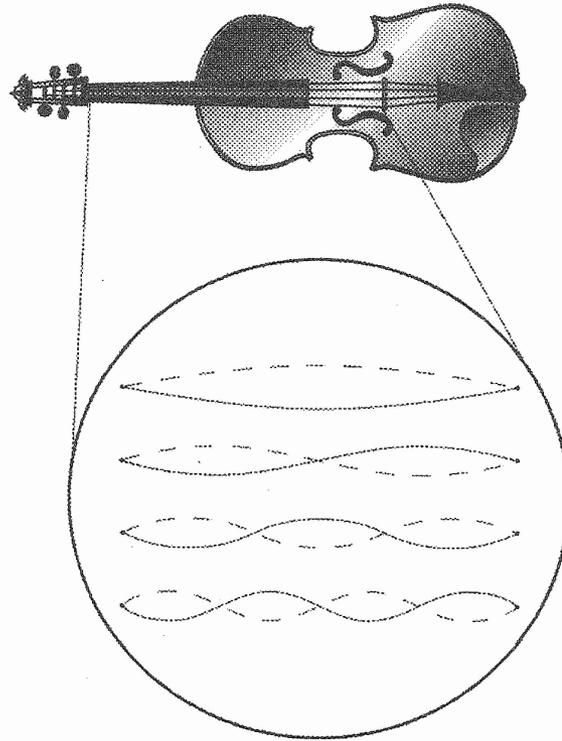
- Le particelle elementari sono i “mattoncini” con i quali è “costruito” l'Universo.
- Citiamo, ad esempio, i protoni (+) e i neutroni che formano il nucleo atomico e gli elettroni (-) che “orbitano” attorno al nucleo atomico.



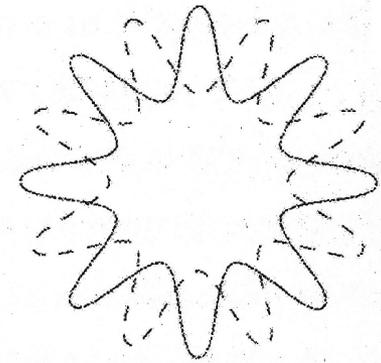
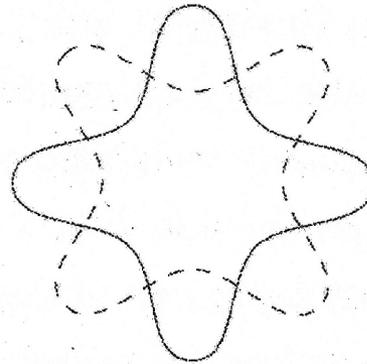
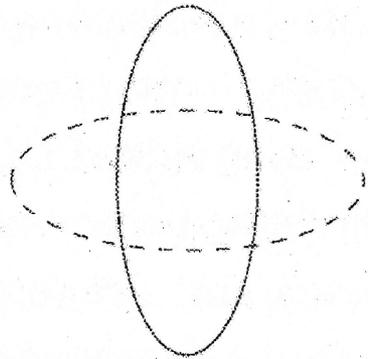
Teoria delle Stringhe

- Secondo la teoria delle stringhe, le particelle elementari, compresi i quanti di campo, sarebbero in realtà delle piccolissime corde vibranti (impropriamente dette “stringhe” in italiano).
- Come una corda di violino può vibrare a diverse frequenze, le stringhe possono vibrare a diverse frequenze e ogni frequenza corrisponde a un diverso tipo di particella elementare.

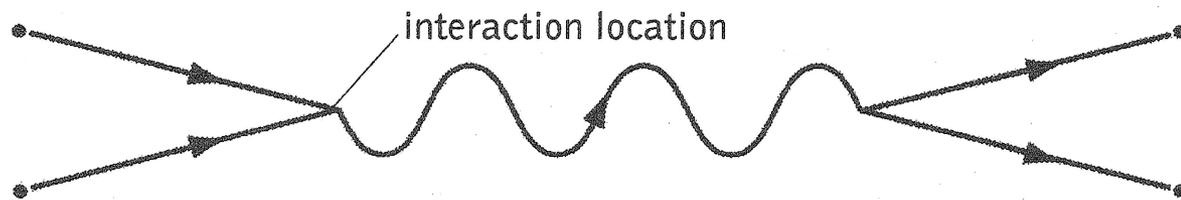




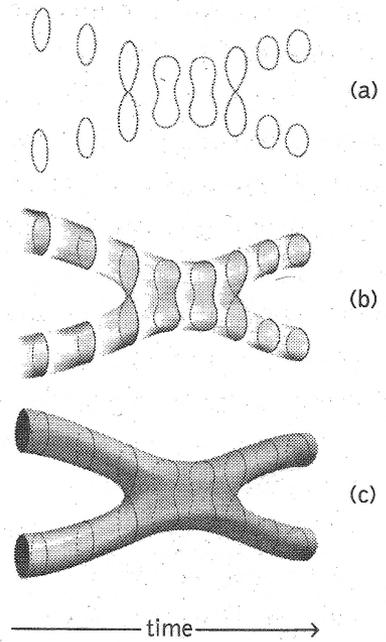
Strings on a violin can vibrate in resonant patterns in which a whole number of peaks and troughs exactly fit between the two ends.



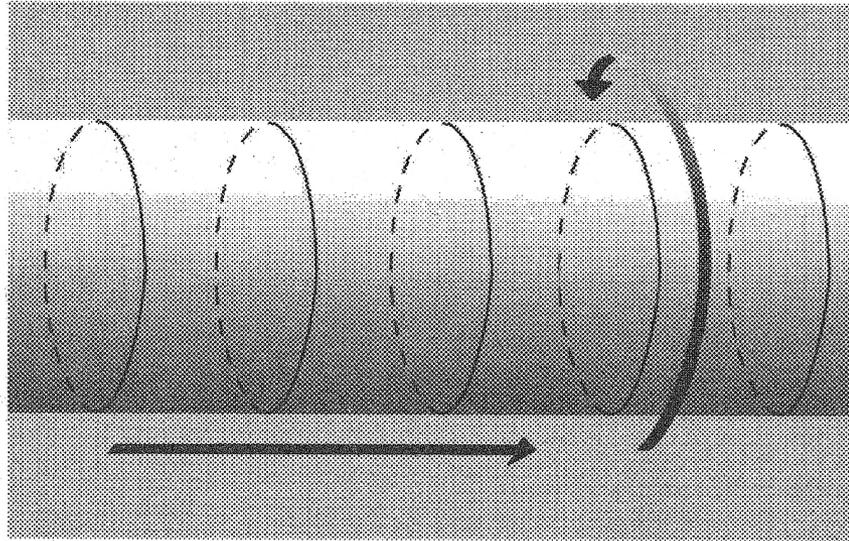
The loops in string theory can vibrate in resonance patterns similar to those of violin strings—in which a whole number of peaks and troughs fit along their spatial extent.



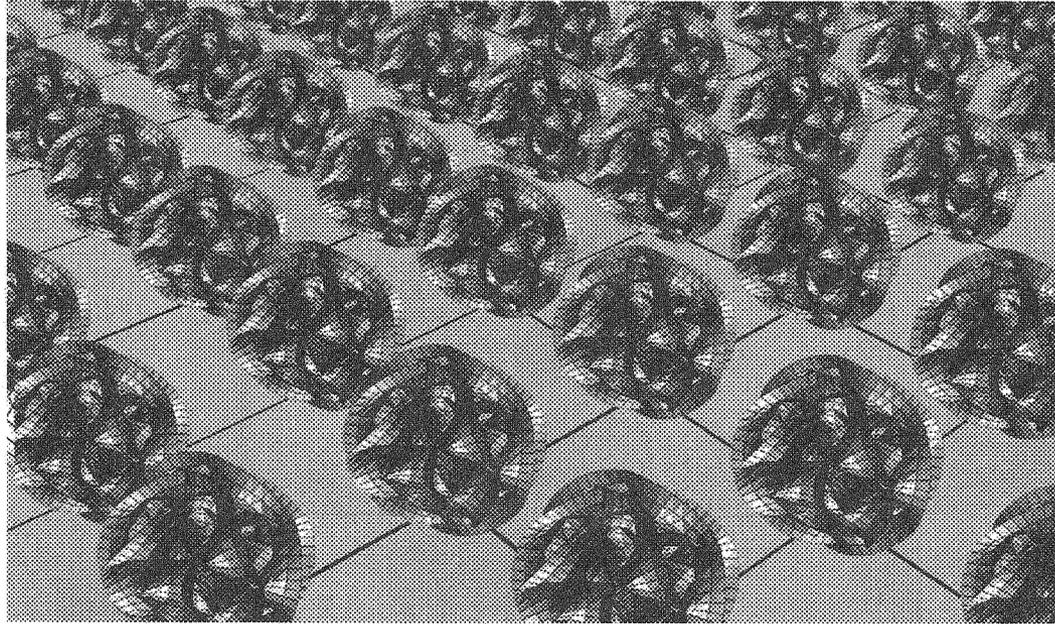
In quantum field theory, a particle and its antiparticle can momentarily annihilate one another, producing a photon. Subsequently, this photon can give rise to another particle and antiparticle traveling along different trajectories.



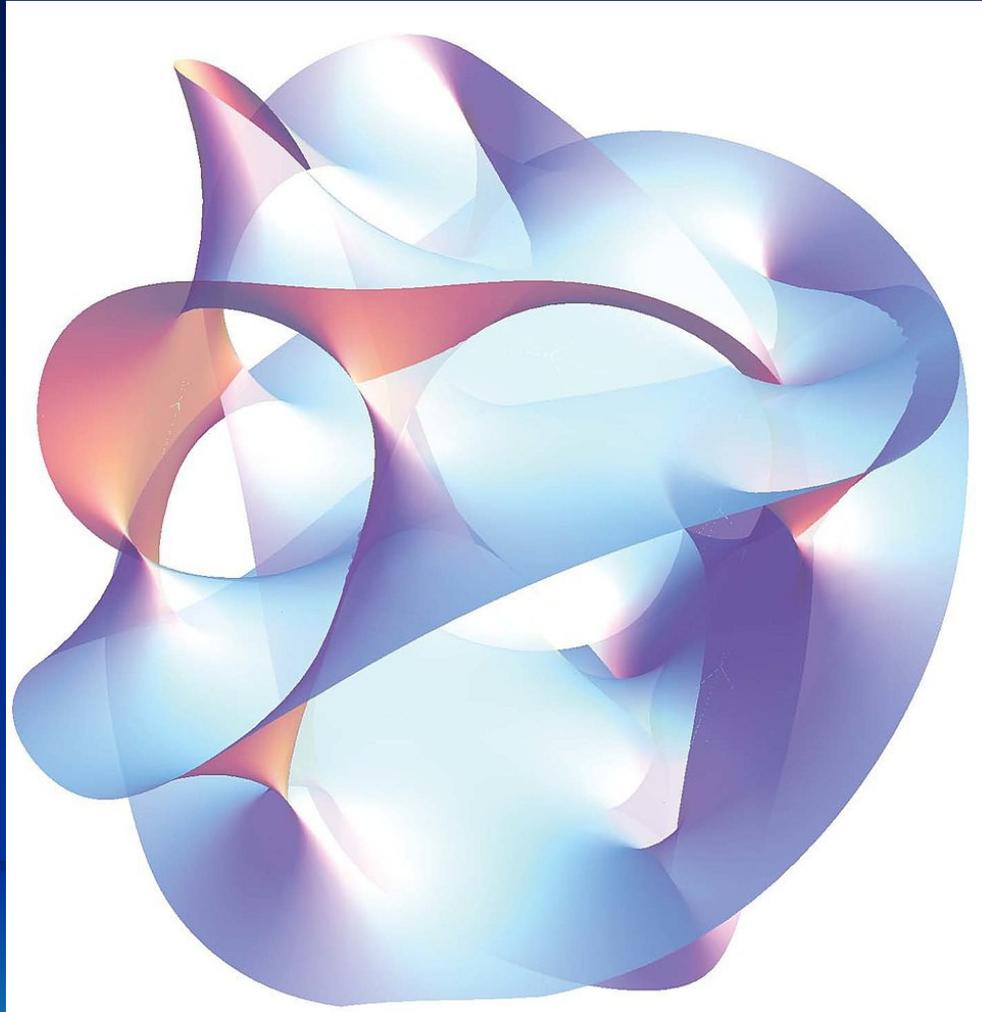
(a) Two strings on a collision course can merge into a third string, which subsequently can split apart into two strings travelling along deflected trajectories. (b) The same process as shown in (a), emphasizing string motion. (c) A “time-lapse photograph” of two interacting strings sweeping out a “world-sheet.”

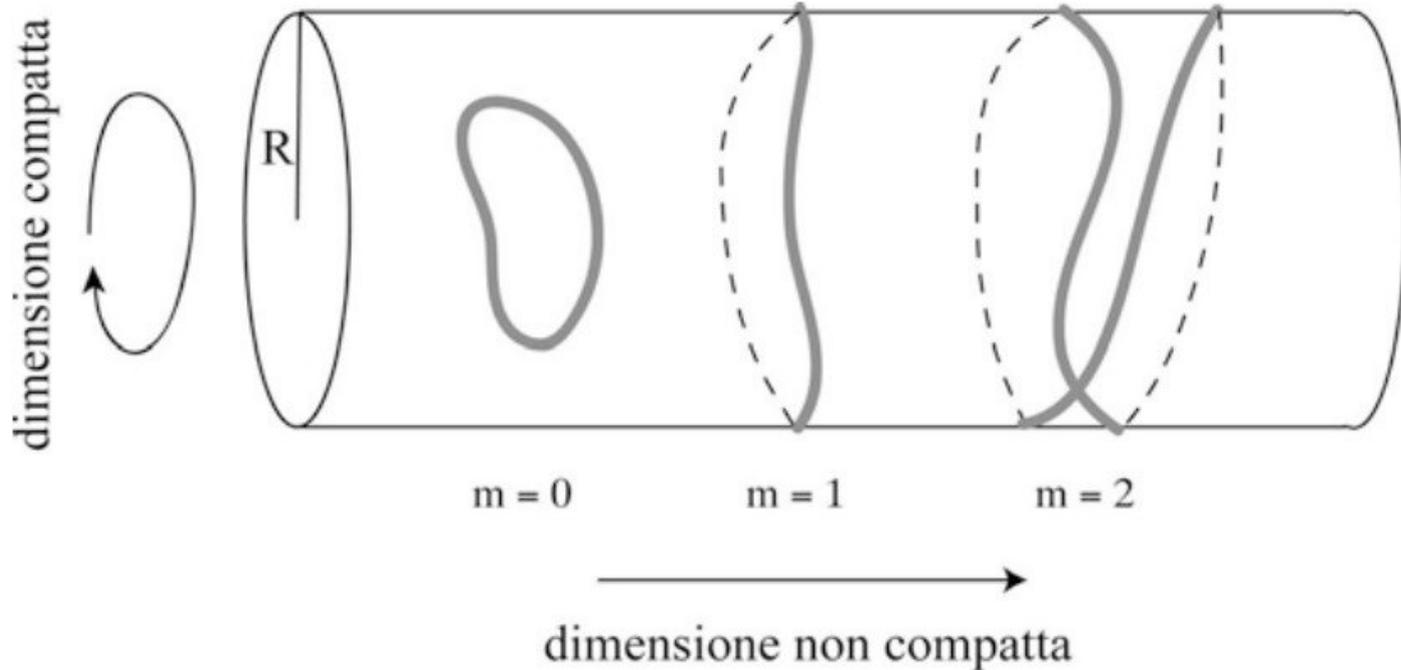


The surface of the garden hose is two-dimensional: one dimension (its horizontal extent), emphasized by the straight arrow, is long and extended; the other dimension (its circular girth), emphasized by the circular arrow, is short and curled up.



According to string theory, the universe has extra dimensions curled up into a Calabi-Yau shape.





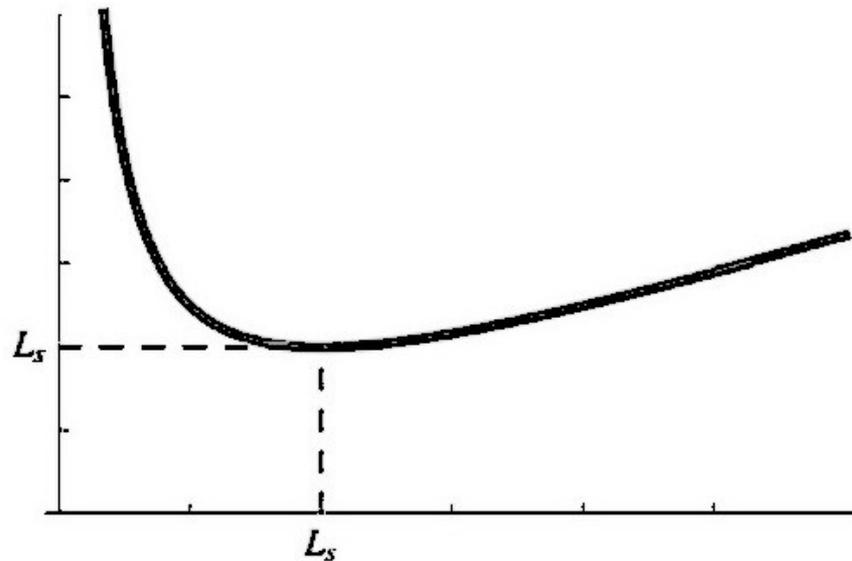
Un esempio di spazio bidimensionale con la dimensione orizzontale non compatta e quella verticale compattificata in modo da formare un cerchio di raggio R . Una stringa chiusa può avvolgersi una o più volte attorno alla dimensione compatta. La figura mostra (da sinistra verso destra) tre possibili stati di stringa con numero di avvolgimento m dato, rispettivamente, da $m = 0$, $m = 1$ e $m = 2$

Teoria delle Stringhe

- A causa del fatto che “dall'esterno” non è possibile distinguere una stringa “arrotolata” lungo la dimensione compatta da una stringa che senza arrotolarsi “giri attorno” a tale dimensione, per la teoria delle stringhe una lunghezza L è indistinguibile da una lunghezza $1/L$.
- Poichè l'inverso di un numero “grande” è “piccolo” e viceversa, in teoria delle stringhe grandi lunghezze sono indistinguibili da piccole lunghezze!



raggio effettivo



raggio di
compattificazione R

Spazi compatti di raggio R inferiore a L_S sono equivalenti, per lo spettro quantistico di una stringa, a spazi compatti di raggio effettivo L_S^2/R , maggiore di L_S . Il raggio effettivo “sentito” dalla stringa – illustrato in questa figura come media geometrica di R e L_S^2/R – risulta sempre non-inferiore al limite minimo L_S

Problemi col Big Bang

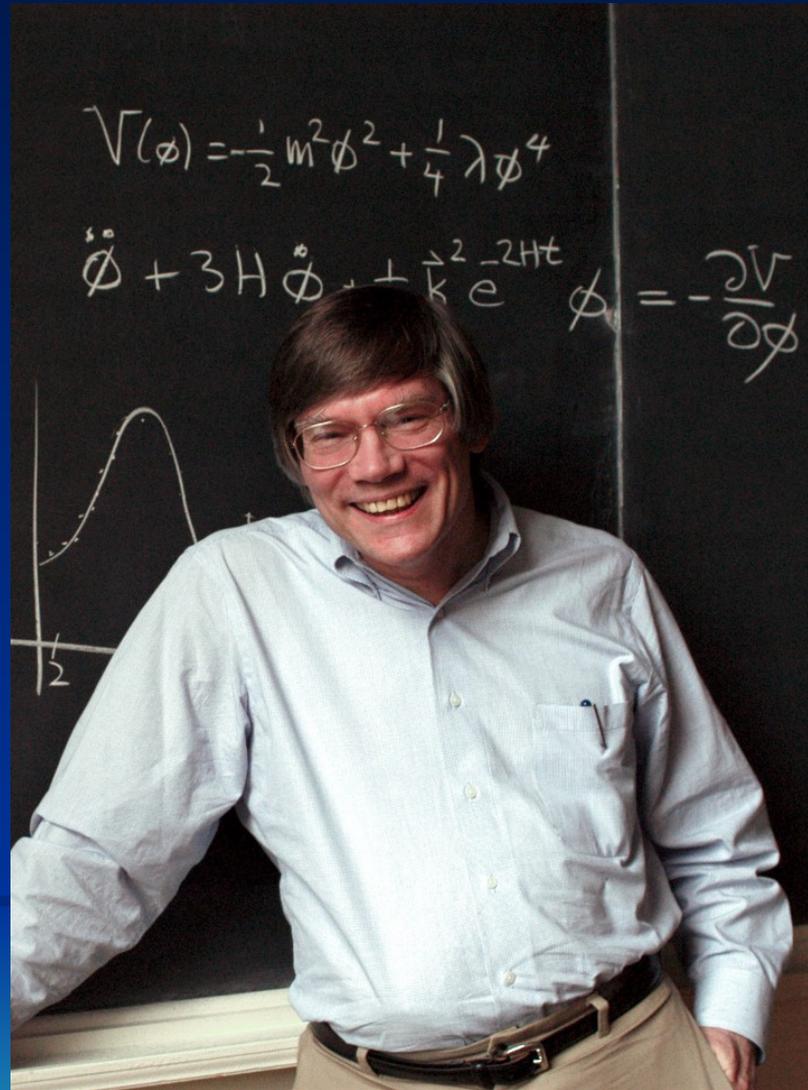
- La teoria del Big Bang presenta alcuni problemi cui la cosmologia di stringa può offrire soluzione.
- Cosa c'era prima del Big Bang?
- Il Big Bang, nella teoria classica, inizia con un Universo di dimensione zero e densità infinita ma la relatività generale (con la quale si descrive l'evoluzione dell'Universo) nulla ci sa dire riguardo ad un tale stato a dimensione nulla e densità e temperatura infinite!



Problemi col Big Bang

- L'Universo, in media, ha la stessa densità in ogni punto e direzione.
- Perciò il gas primordiale doveva essere altrettanto omogeneo ma le particelle elementari che lo componevano non avevano il tempo di scontrarsi e uniformare la densità, poichè l'espansione cosmica era troppo rapida.





Teoria dell'Inflazione

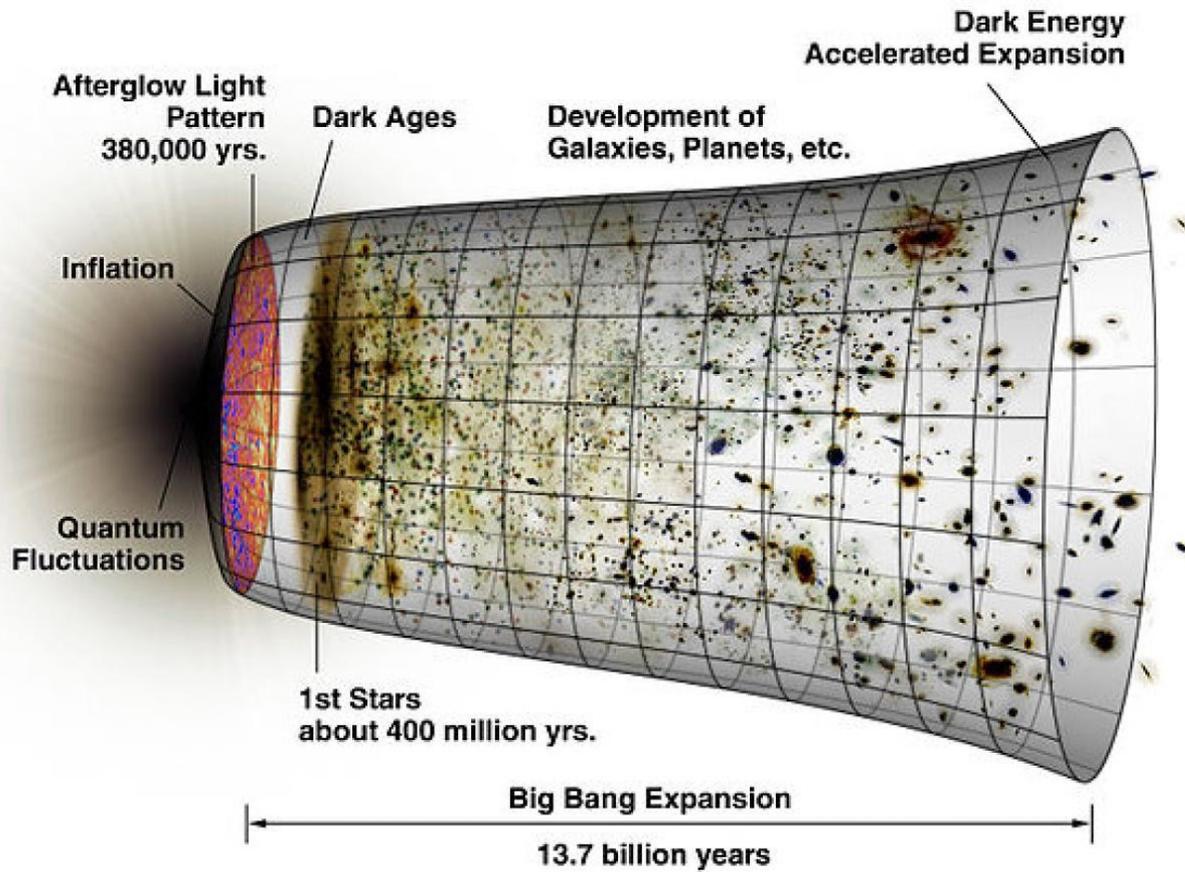
- Questo e altri problemi furono risolti dalla teoria dell'inflazione, sviluppata dal 1980 dallo statunitense A. Guth (e indipendentemente dal russo A. Linde).
- Secondo la teoria dell'inflazione, l'Universo nei suoi primi istanti passò da uno stato di vuoto quantistico a una certa energia a uno stato di vuoto quantistico a energia minore.



Teoria dell'Inflazione

- Il salto di energia si tradusse nell'energia di espansione dell'Universo e nella formazione di materia, con una dilatazione esponenziale delle dimensioni in un tempo infinitesimo.
- L'Universo, inizialmente, aveva così piccole dimensioni e bassa velocità di espansione da permettere l'uniformizzazione del gas primordiale.
- L'inflazione lo portò poi ad avere dimensioni compatibili con quelle previste dalla vecchia teoria del Big Bang e ad espandersi.





Cosmologia di Stringa

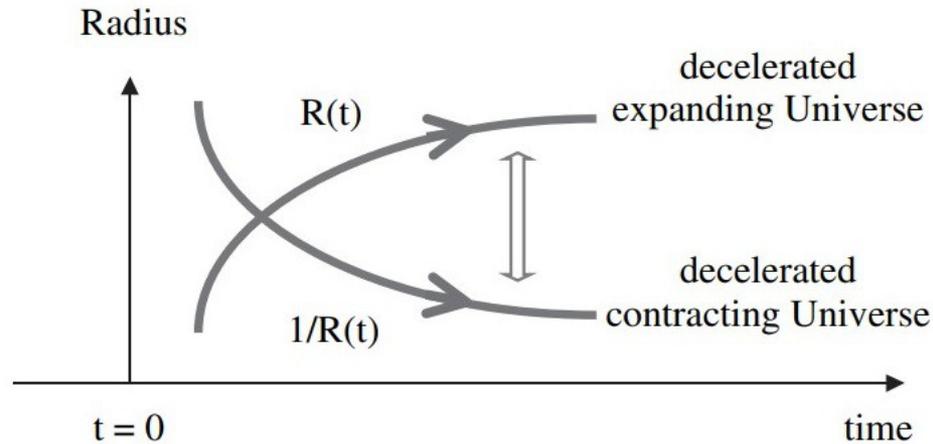
- Secondo la cosmologia di stringa l'Universo (ovviamente) in ultima analisi è composto di stringhe aperte (particelle) e chiuse (quanti).
- L'Universo al Big Bang può essere paragonato a un “gomitolo di stringhe”.
- Dato che le stringhe hanno una dimensione minima, pari a circa 10 volte la lunghezza di Planck (10^{-34} m), questa è la dimensione minima che può avere l'Universo. Si evita quindi il problema della singolarità (Universo di dimensione nulla)!



- Abbiamo detto che per le stringhe una grandezza R è indistinguibile da una grandezza $1/R$.
Ad esempio una dimensione di 10 lunghezze di stringa è indistinguibile da una dimensione di $1/10$ di lunghezze di stringa, ovvero “grande” è indistinguibile da “piccolo”!
- Al tempo zero dal Big Bang l'Universo aveva raggio pari alla lunghezza di stringa e se esiste la fase posteriore al Big Bang (raggio R) deve esistere anche una fase anteriore al Big Bang (raggio $1/R$)!



DUALITY SYMMETRY



A duality transformation that inverts the spatial radius, $R \rightarrow 1/R$, transforms decelerated expansion into decelerated contraction and vice versa. The time behavior of the curvature, as well as the acceleration/deceleration properties of the original solution, are left unchanged by a duality transformation

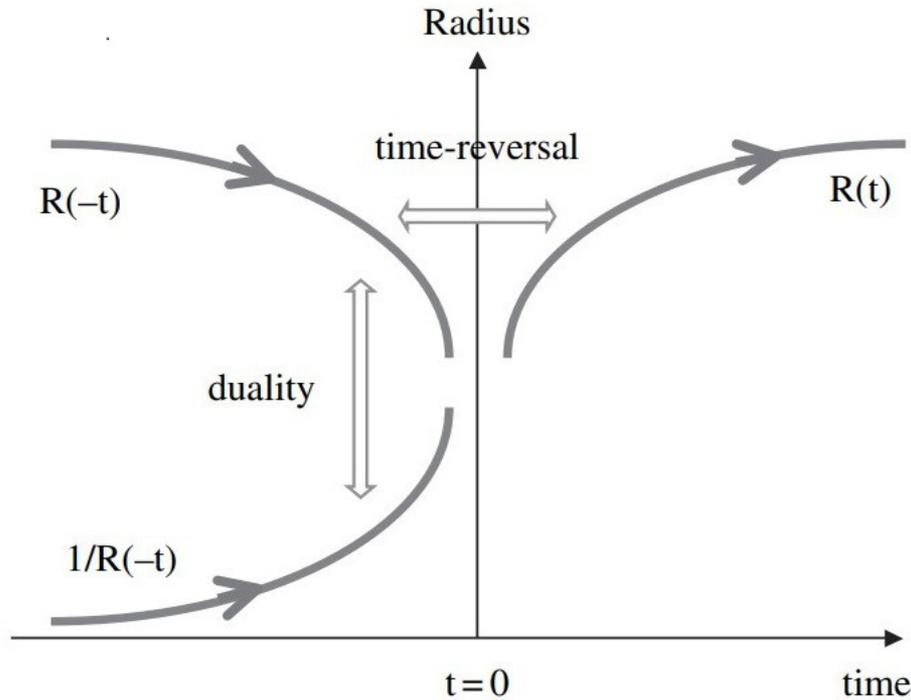
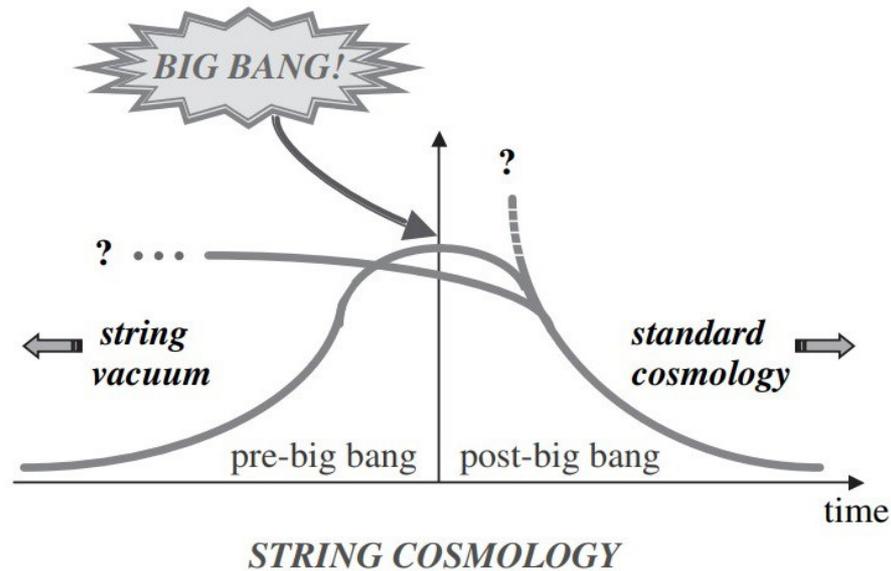


FIGURE 3.3 Pictorial representation of the combined action of a time reversal and duality transformation applied to a given initial solution $R(t)$ (*top right curve*), describing the decelerated expanding radius of a standard (decreasing-curvature) model of the Universe. The final result is the curve $1/R(-t)$, plotted in the *bottom left* of the figure, describing accelerated expansion and growing curvature

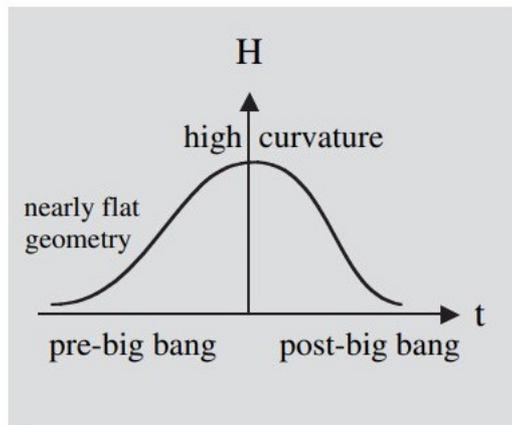


The *solid bell-shaped curve* describes the behavior of the curvature scale of our Universe as a function of time according to a typical string cosmology model. The phase of maximal, finite curvature at the top of the bell replaces the singularity of the standard scenario and describes the Big Bang as a moment of transition between growing and decreasing curvature. The curve interpolates between a pre-Big-Bang phase, describing the initial evolution from the vacuum state of string theory, and a post-Big-Bang phase, evolving according to standard cosmological predictions

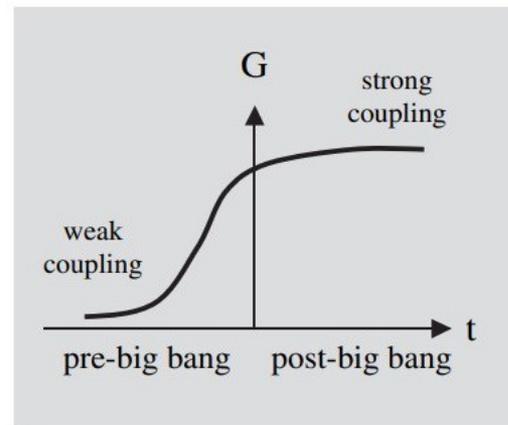
Ulteriori Ingredienti

- Se esistono stringhe, secondo la matematica della relativa teoria devono esistere anche due particelle di spin zero (cioè che non “ruotano su se stesse”): il dilatone (che fa sì che le quattro forze di natura abbiano l'intensità che hanno) e l'assione (la cui esistenza è prevista anche da altre teorie).





curvature scale H



Newton constant G

Time evolution of the curvature (represented by the Hubble parameter H) and the Newtonian constant G (determined by the dilaton), for a typical self-dual solution of the string cosmology equations. The initial cosmological configuration – approaching the so-called string perturbative vacuum at very large negative times – is characterized by a nearly flat space-time geometry and the vanishingly small intensity of all interactions

Problemi Risolti

- Come abbiamo visto, la cosmologia di stringa risolve il problema della singolarità (raggio nullo dell'Universo al Big Bang).
- Riguardo all'origine dell'Universo, lo stato iniziale (al tempo meno infinito) sarebbe “freddo, vuoto e buio”, ovvero il “vuoto di stringa”, uno stato in cui esistevano solo i campi nello stato di minima energia.



Cosmologia Quantistica

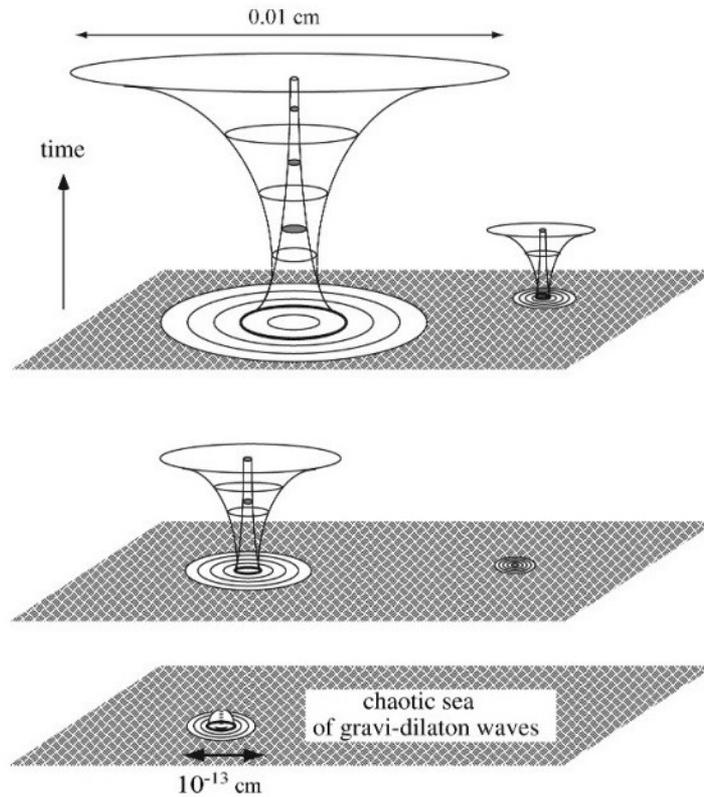
- Secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg (meccanica quantistica), nessuna quantità è costante, viceversa ogni quantità fluttua casualmente attorno ad un valore medio.
- Sappiamo dalla relatività che massa equivale ad energia e sappiamo anche che un campo è composto dai suoi quanti (che possono avere massa nulla o diversa da zero): per fluttuazioni casuali della massa/energia possono dunque comparire “dal nulla” varie particelle, tra cui particelle-universo!



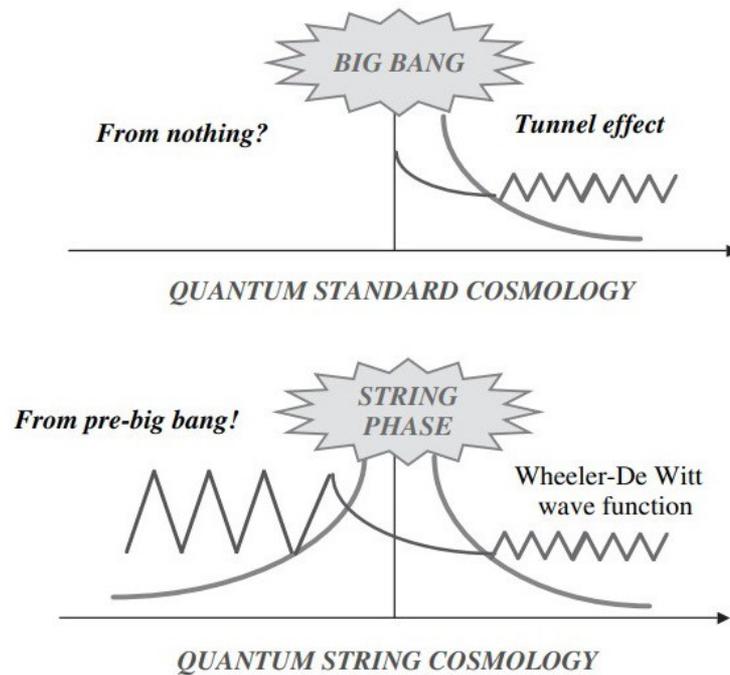
Cosmologia Quantistica

- Con la cosmologia di stringa abbiamo quindi un meccanismo per la “creazione” dell'Universo!
- L'Universo sarebbe sostanzialmente l'interno di un buco nero!
- Visto “dall'esterno” un tale “oggetto” avrebbe le dimensioni di un nucleo atomico (10^{-15} m), visto “dall'interno” sarebbe invece il nostro Universo che da dimensione quasi zero ai nostri giorni ha raggiunto dimensioni di circa 40 miliardi di anni luce!

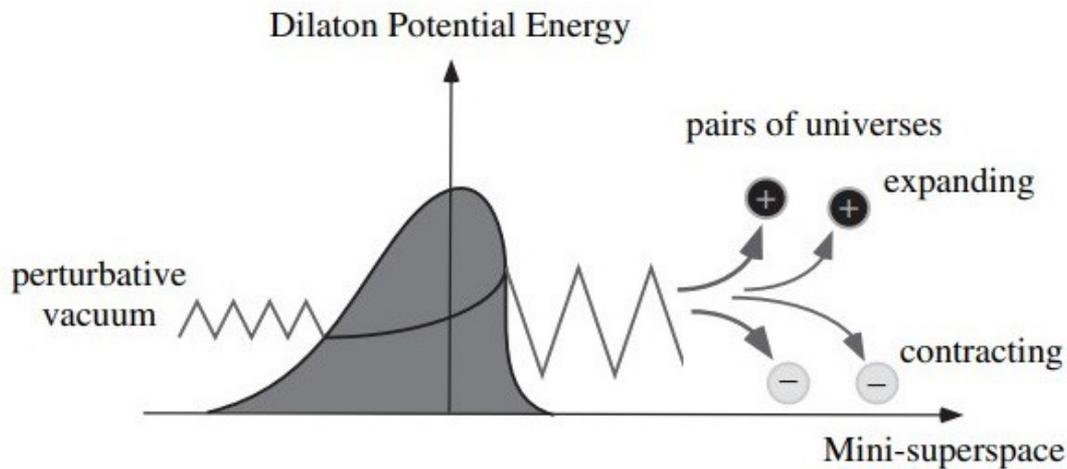




Inflation as collapse in pre-Big-Bang cosmology (the time coordinate increases up the axis). The various planes, from bottom to top, correspond to various sections of the space-time manifold filled with gravitational and dilaton fluctuations distorting the flat geometry of the perturbative vacuum. The space-time regions undergoing gravitational collapse are simultaneously represented using the string geometry (the outer expanding cones) and the Einstein geometry (the inner contracting cones)



From top to bottom, a qualitative comparison between classical standard cosmology (characterized by the singularity), quantum standard cosmology (with appropriate boundary condition for the tunnelling effect), and quantum string cosmology (according to the pre-Big-Bang scenario). The *zigzag curves* represent the Wheeler-DeWitt wave function, which is asymptotically oscillating before and after the transition, while it is exponentially decaying in the region of the tunnel effect. Note that both the classical and quantum standard scenario are characterized by the Big Bang singularity, and cannot be extended beyond it. In string cosmology the singularity is replaced by a high-curvature string phase



Schematic view of the quantum transition from pre-Big-Bang to post-Big-Bang represented as an anti-tunneling effect of the wave function, i.e., as a creation of pairs of universes from the string perturbative vacuum. The Wheeler–DeWitt wave function is amplified during this process. The opposite charges of the resulting universes are to be interpreted as opposite kinematic states, corresponding to either expansion or contraction in mini-superspace

Problemi Risolti

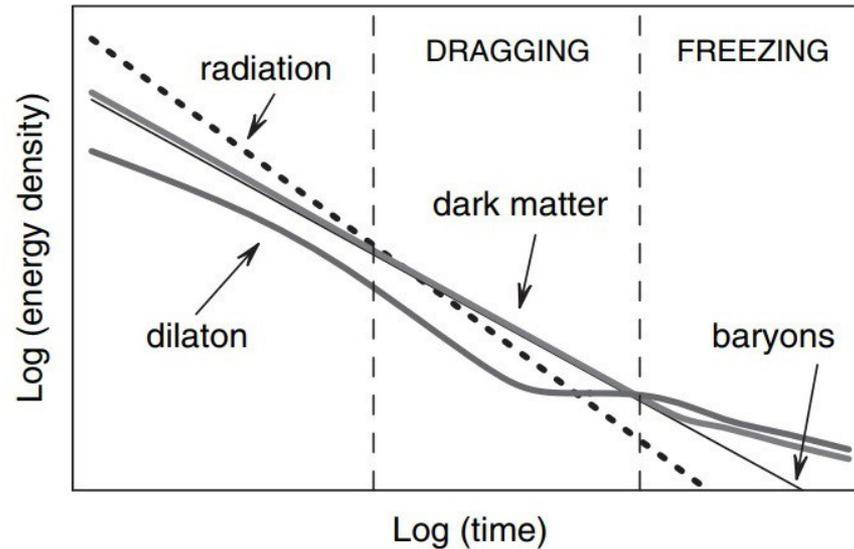
- Con la cosmologia di stringa non ci sarebbe bisogno di una fase inflattiva che, come abbiamo visto, nella teoria classica del Big Bang è necessario invocare.
- La fase pre-Big Bang prenderebbe il posto della fase inflattiva. Iniziando infatti l'Universo al tempo meno infinito, per il gas primordiale ci sarebbe un'infinità di tempo per omogeneizzarsi!



Problemi Risolti

- Nella fase di pre-Big Bang si produrrebbe una grande quantità di energia: tale energia provocherebbe la “grande esplosione” del Big Bang!
- Abbiamo visto che l'espansione accelerata dell'Universo richiederebbe una “spinta antigravitazionale” il dilatone potrebbe dare una tale “spinta” all'Universo!





The figure shows on a logarithmic scale the time dependence of the radiation energy density (*dotted curve*), baryon energy density (*thin solid line*), dark matter and dilaton energy density (*thick solid lines*). They are obtained in a model where the dilaton, at late enough times, becomes strongly coupled to dark matter (but not to ordinary baryonic matter) and where, after a “dragging” phase, the Universe reaches a final accelerated “freezing” phase, in which the dark matter and dilaton energy densities are of the same order of magnitude and evolve in time in the same way. Note that, in this final regime, the baryon matter density is diluted faster than the dark energy and dilaton energy densities

Problemi Risolti

- La radiazione di fondo a 3 K presenta una “asimmetria a grande scala”, nel senso che la temperatura misurata in una certa posizione in cielo è un po' diversa da quella misurata nella posizione opposta: il campo assionico sarebbe all'origine di una tale asimmetria!
- Gli assioni potrebbero essere la componente principale della materia oscura, considerato che la ricerca di altre particelle di materia oscura finora ha dato risultato nullo!



Problemi Risolti

- Tutto l'Universo è permeato da campi magnetici (anche le stelle, tra cui il nostro Sole). Probabilmente tali campi magnetici si generano per effetto dinamo dalle cariche elettriche in rotazione.
- L'effetto dinamo ha però bisogno di un seppur piccolo campo magnetico preesistente (infatti le dinamo che producono la luce dei fari delle nostre biciclette hanno al loro interno un magnete permanente).
- La cosmologia di stringa prevede la creazione di un gran numero di fotoni magnetici. Tali campi sarebbero all'origine dei campi magnetici che permeano l'Universo, attraverso l'effetto dinamo.



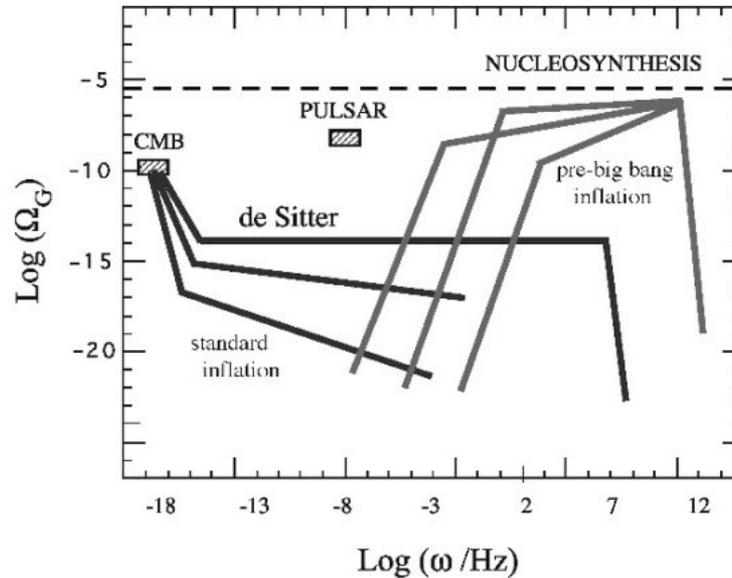
- Perché l'Universo ha tre dimensioni spaziali (macroscopiche) più una temporale e non nove più una?
- Perché, secondo la cosmologia di stringa, la tensione delle stringhe prima del Big Bang era tale da “serrare strettamente” le Calabi-Yau e costringere tutte le dimensioni ad avere dimensioni minuscole!
- In realtà esistevano stringhe e anti-stringhe e in una regione tridimensionale le stringhe e le anti-stringhe si annichilarono, scomparendo dall'Universo: il volume tridimensionale fu allora libero di espandersi, arrivando a dimensioni macroscopiche!



Ma Esistono le Stringhe?

- Naturalmente una teoria può essere elegante ed efficace quanto si voglia ma se non è confermata sperimentalmente rimane solo una teoria!
- Il problema principale della teoria delle stringhe è infatti la difficoltà (o virtuale impossibilità) di verifica sperimentale: per “accorgersi” che le particelle siano in realtà stringhe sarebbe necessario un acceleratore di particelle lungo quanto il diametro della Via Lattea (dell'ordine dei centomila anni luce)!





Possible spectra for a cosmic background of gravitons produced through the amplification of the vacuum fluctuations in the context of different inflationary scenarios. The plots show the logarithm of the energy density as a function of the logarithm of the frequency. The figure also shows the observational upper limits due to the CMB anisotropy, the pulsars, and nucleosynthesis. The spectrum labeled "de Sitter", and associated with a phase of constant-curvature inflation, marks the boundary between the decreasing spectra (standard inflation, *bottom left* part of the figure) and the growing spectra (pre-Big-Bang inflation, *top right* part of the figure). All spectra have been plotted at the maximum intensity compatible both with present experimental constraints and with theoretical predictions for string theoretical parameters

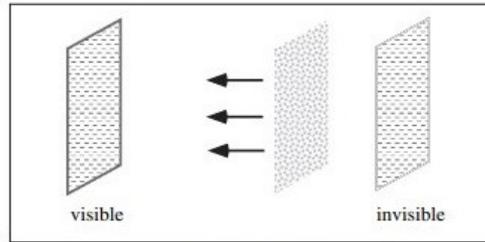
Ma Esistono le Stringhe?

- La cosmologia di stringa prevede un fondo di onde gravitazionali (ovvero di gravitoni, i quanti del campo gravitazionale) che i nostri apparati (i famosi Virgo, europeo e LIGO, statunitense) non sono in grado di rilevare.
- Futuri rivelatori di gravitoni, più sensibili di quelli che abbiamo citato, potrebbero rivelare un tale fondo di radiazione gravitazionale: in tal caso avremmo una conferma, seppur indiretta, della validità della teoria delle stringhe e della cosmologia di stringa!

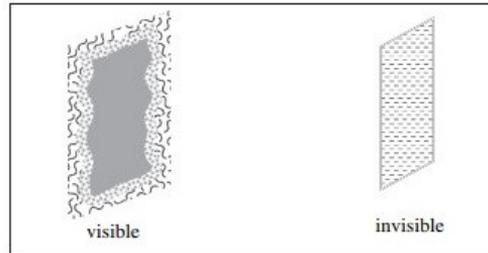


- Misurando l'attrazione gravitazionale tra due sfere di diversi materiali, i cui centri distino una frazione di millimetro (il che non sappiamo ancora fare) si potrebbe dimostrare l'esistenza del campo dilattonico.
- Infatti i corpi in un campo gravitazionale ordinario cadono con legge di moto indipendente dalla massa e composizione (principio di equivalenza).
- Interagendo invece i corpi col campo dilattonico, la forza gravitazionale, per distanze molto piccole, dipenderebbe dalla composizione dei corpi che si attraggono reciprocamente!

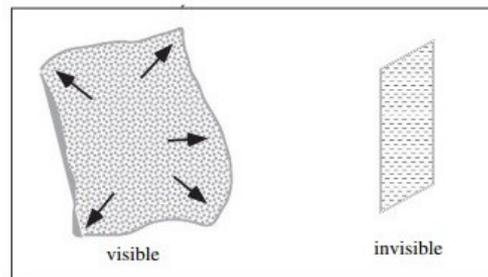




PRE-BIG BANG



BIG BANG



POST-BIG BANG

The two boundary branes are initially flat, cold, and empty. After the collision (simulating the Big Bang) our visible brane gets filled with radiation, gets hot, and starts expanding, giving rise to the phase of standard cosmological evolution

Conclusioni

- La cosmologia di stringa è una teoria affascinante e che potenzialmente permette di risolvere i problemi che la teoria classica del Big Bang presenta, evitando il meccanismo piuttosto artificioso dell'inflazione!



Conclusioni

- Siamo però ancora lontani dal poterne dimostrare o smentire la validità con opportuni esperimenti o misure.
- In ogni caso non possiamo che essere meravigliati dalle vette che può raggiungere il pensiero umano, se ben indirizzato!

