

Summer School: la matematica incontra il mondo
San Pellegrino Terme, 5 - 6 - 7 Settembre 2016

Simmetrie e asimmetrie dalla fisica delle particelle elementari alla cosmologia

Sabino Matarrese

***Dipartimento di Fisica e Astronomia Galileo Galilei
Universita' degli Studi di Padova
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) Sezione di Padova
Istituto Nazionale di Astrofisica (INAF) Osservatorio
Astronomico di Padova
Gran Sasso Science Institute (GSSI) L'Aquila***



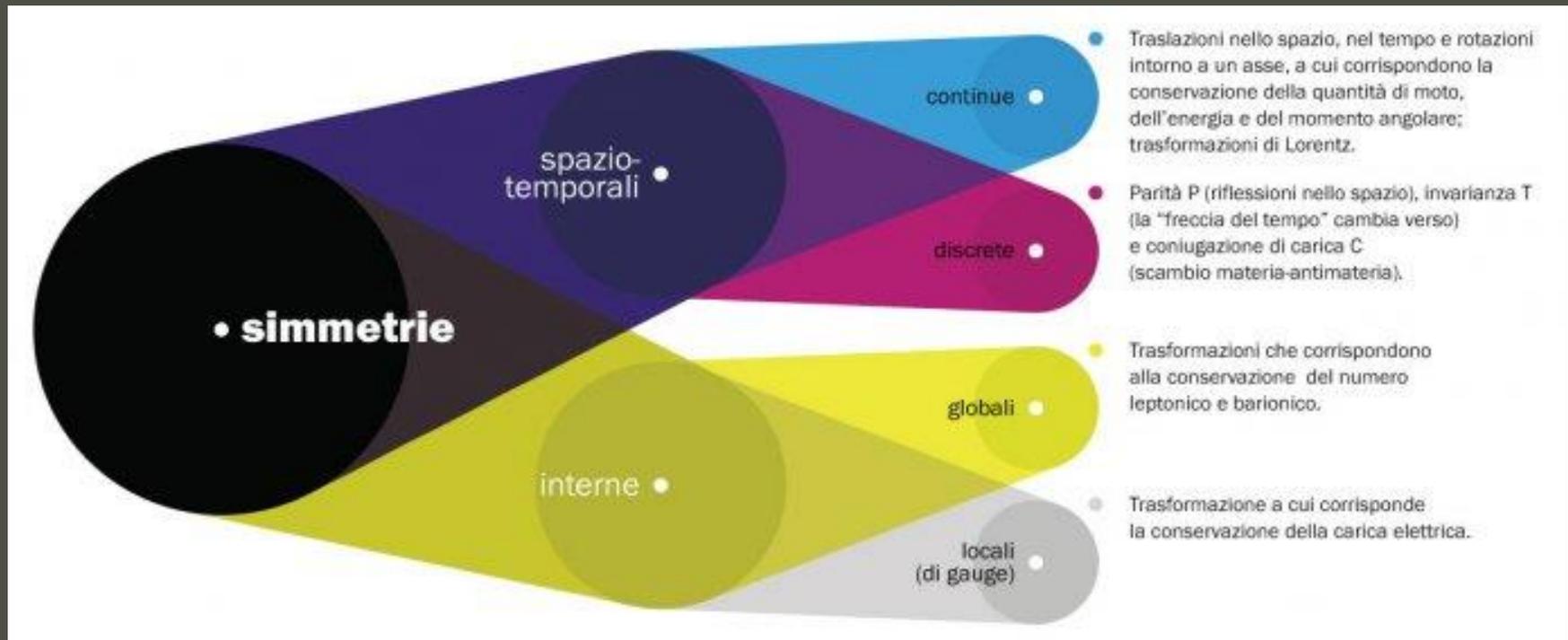
Il ruolo delle simmetrie in fisica

- La ricerca di simmetrie nei fenomeni naturali ha giocato un ruolo di primaria importanza nello sviluppo della scienza, dalla fisica delle interazioni fondamentali tra le particelle elementari fino alla disciplina che studia l'Universo nella sua globalità, la Cosmologia. La ricerca di simmetrie nei sistemi fisici e della loro eventuale “rottura” hanno portato nel secolo scorso ad indubbi progressi nella nostra capacità di comprendere i fenomeni naturali, conducendo verso uno schema unificato di interpretazione delle leggi fisiche.

Simmetria e invarianza

- “simmetria” è una trasformazione, e.g. dei punti dello spazio, definita in astratto
- “invarianza” è una proprietà (di un corpo, di una legge fisica, etc.) rispetto a quella trasformazione.
- In fisica facciamo riferimento a simmetrie nello spazio (e.g. rispetto a traslazioni e rotazioni) e anche a simmetrie interne, cioè rispetto a proprietà fisiche delle particelle considerate o delle forze che tra esse operano.

Simmetrie in fisica

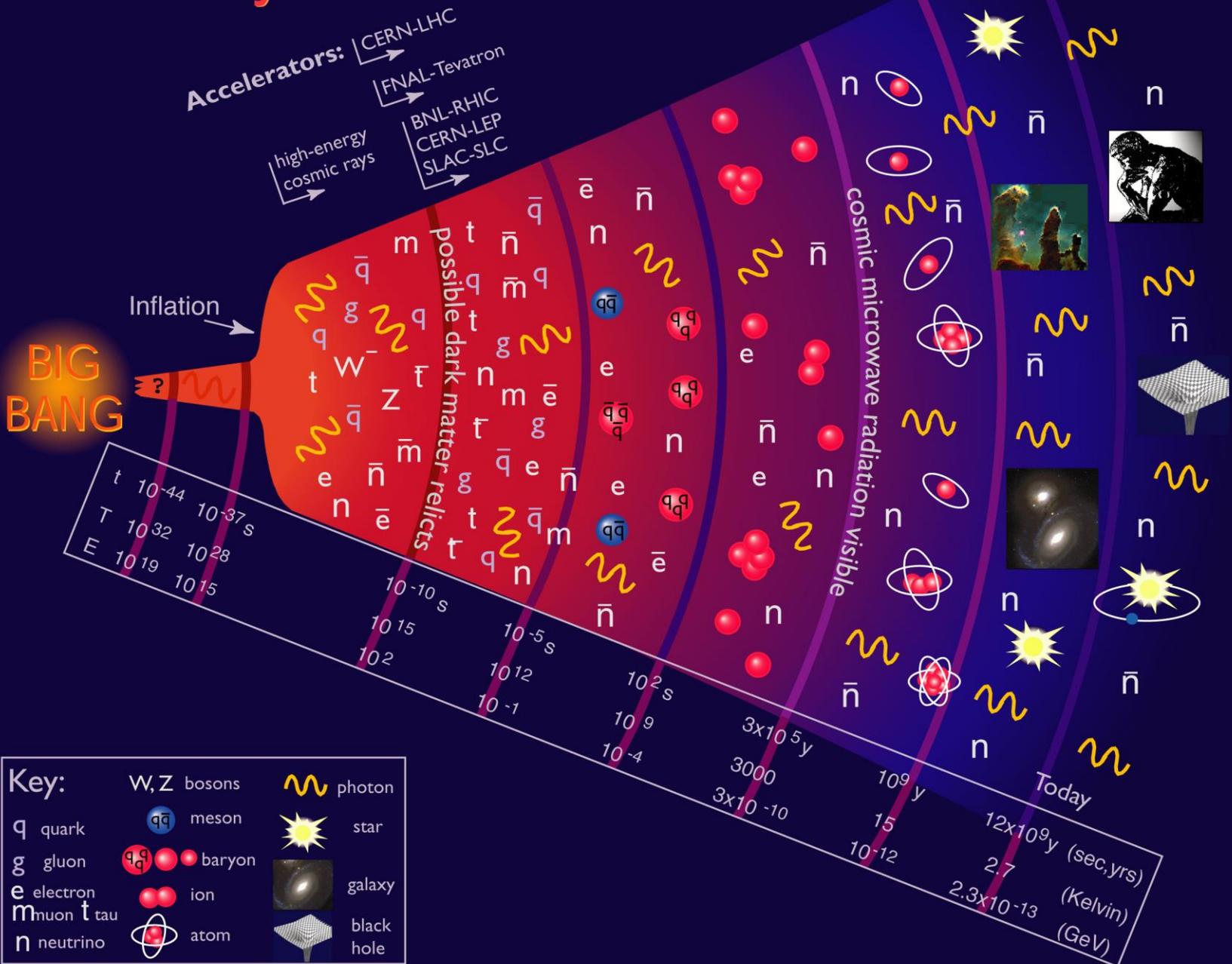


Credits: Asimmetrie (Masiero & Pietroni)

La storia termica dell'Universo

- Per un lungo periodo di tempo - fino alla “ricombinazione” dell'idrogeno - l'Universo è stato caratterizzato da una temperatura globale che decresce col passare del tempo.
- Successivamente alla formazione dei primi atomi di idrogeno neutro, materia (ordinaria) e radiazione si “disaccoppiano” e si raffreddano secondo leggi diverse. La materia si raffredda rapidamente e successivamente condensa in strutture da cui origineranno le stelle, etc. ...
- Nell'Universo di oggi non possiamo utilizzare una descrizione termica globale.

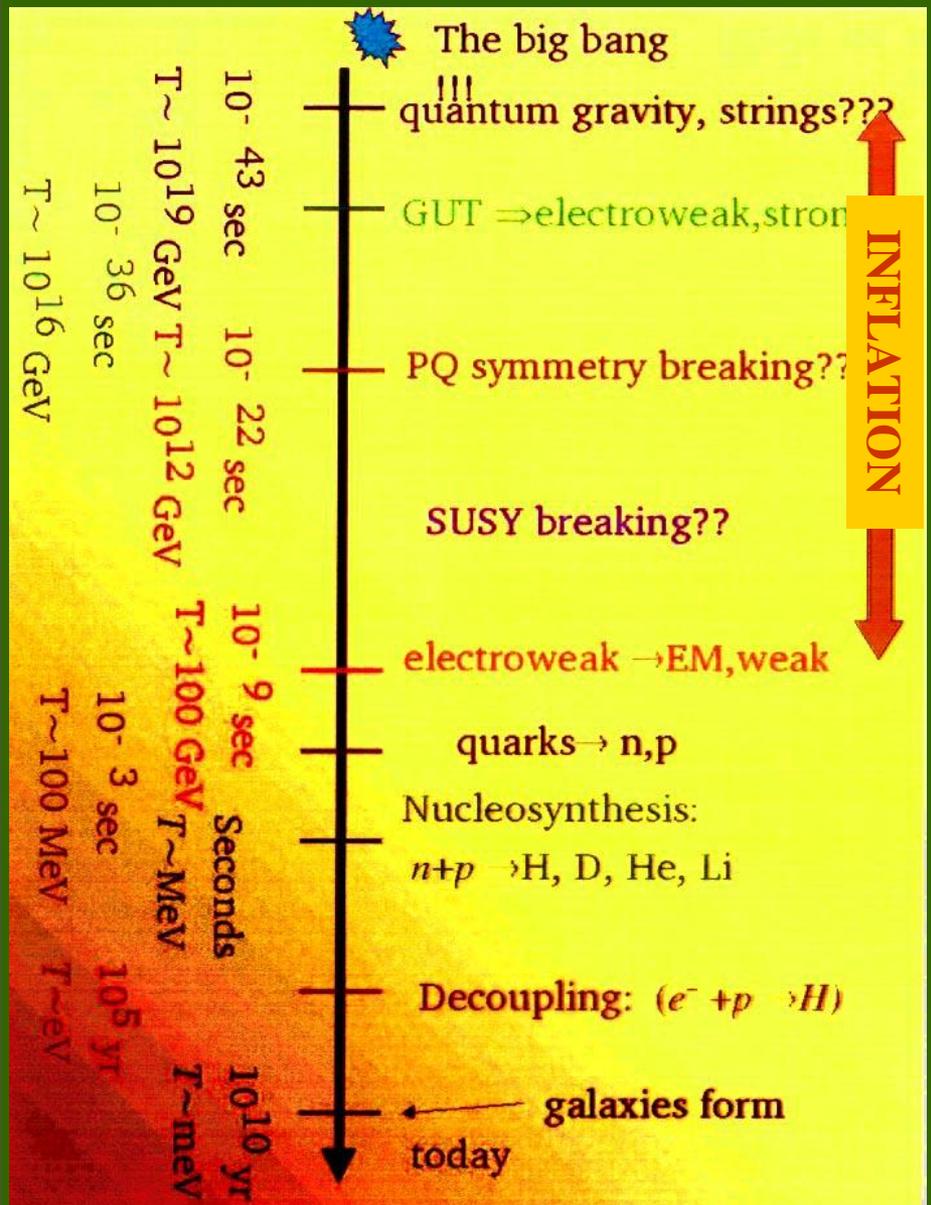
History of the Universe

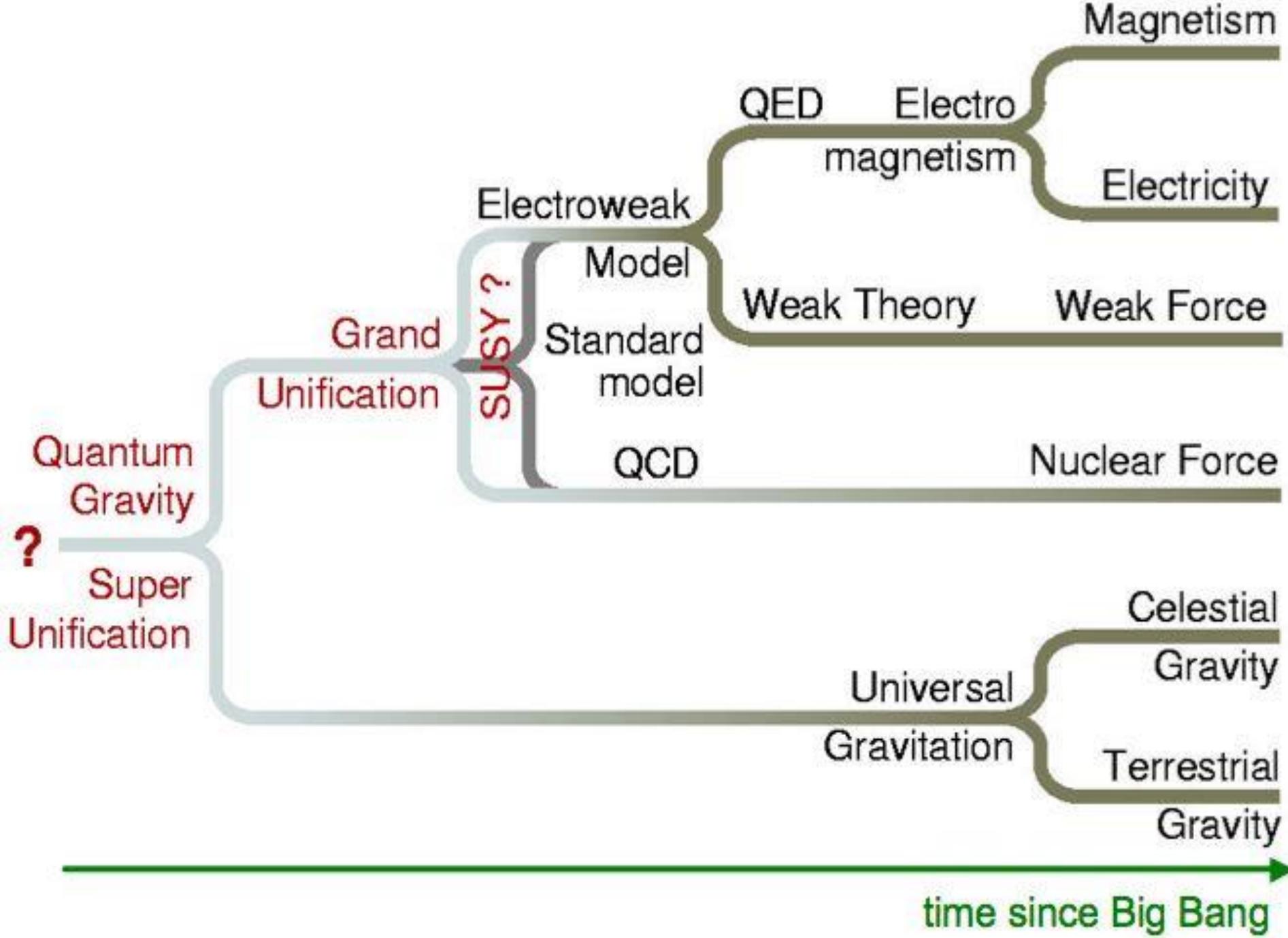


Trasformazioni di fase

- Col ridursi della temperatura cosmica il livello di simmetria (interna) presente nell'Universo si riduce, alcune simmetrie si rompono (grazie a opportune trasformazioni di fase) e le forze si differenziano via via tra di loro.
- Quindi, la descrizione dell'Universo diventa via via sempre piu' complessa.
- L'Universo attuale e' caratterizzato dalla presenza di strutture cosmiche, quali galassie, stelle, pianeti, etc...

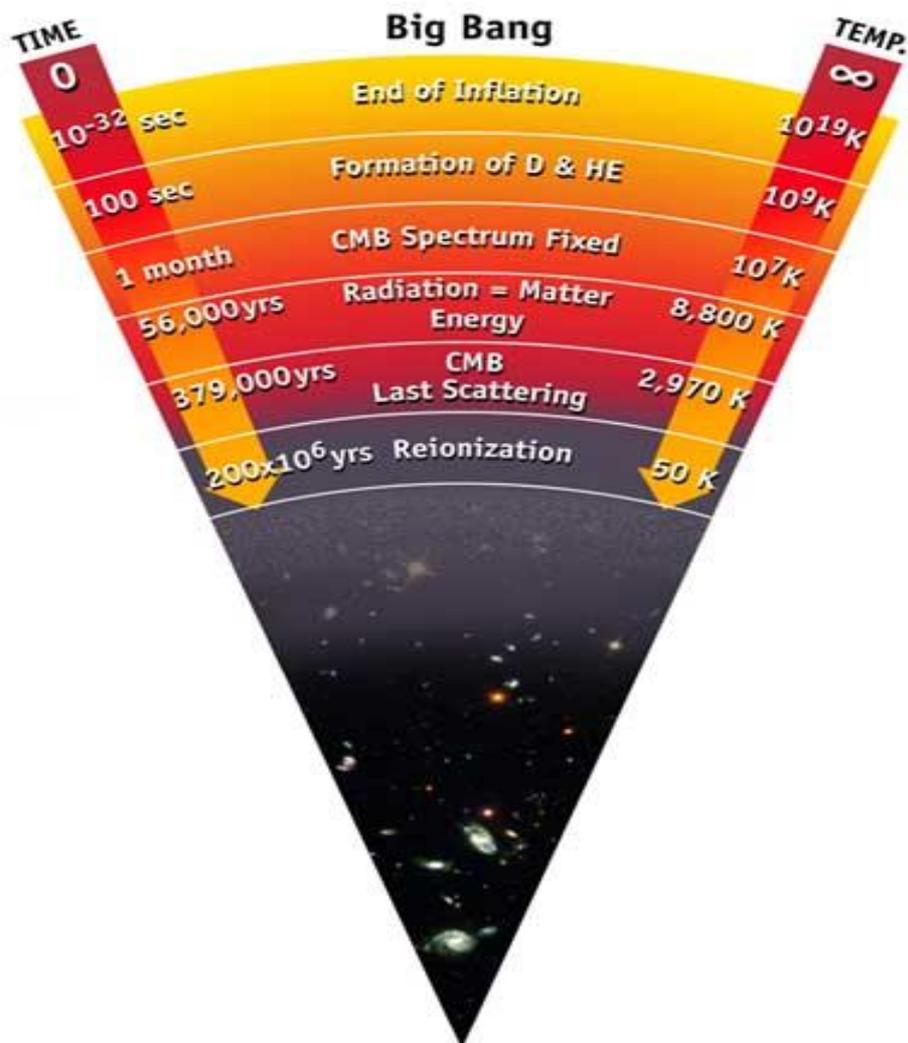
Storia termica dell' Universo





Il Principio Cosmologico (← *Principio Copernicano*)

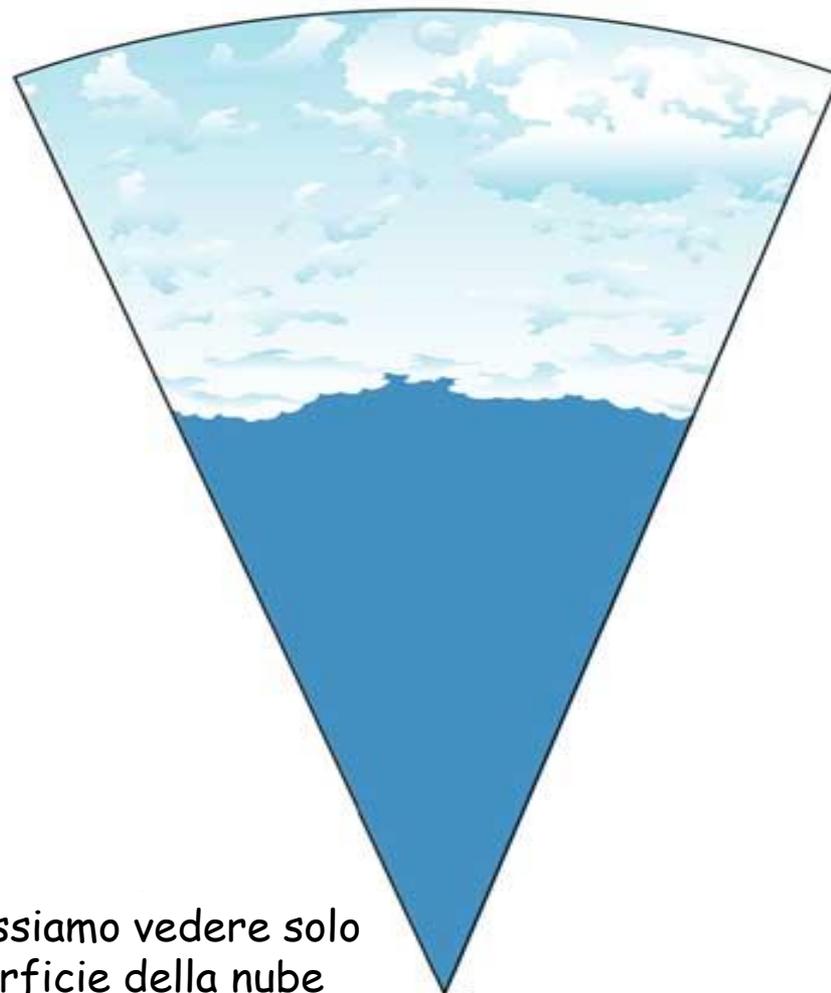
- Noi non occupiamo una posizione privilegiata nell' Universo.
- Tutti gli osservatori “co-moventi” – alla stessa epoca cosmica - troveranno la stessa legge di Hubble.
- Mediando sulla scala tipica delle piu' estese disomogeneita' cosmiche, l' Universo e' omogeneo ed isotropo.
- L' Universo e' ben descritto dalla geometria di Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker.



PRESENTE

13.7 miliardi di anni dopo il Big Bang

La superficie di "ultimo scattering" della radiazione cosmica di fondo alle microonde e' analoga alla luce che arriva ai nostri occhi, passando attraverso le nubi in una giornata nuvolosa.



Noi possiamo vedere solo la superficie della nube dove la luce ha subito l'ultimo "scattering".



Friedmann vs. Newton

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) dl^2$$

Metrica di Robertson-Walker

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

Fattore di scala

$$\left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{\kappa c^2}{a^2}$$

F = ma
E = const.
M = const.

$$\dot{\rho} = -3 \frac{\dot{a}}{a} \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right)$$

ρ = densita' di energia
 P = pressione

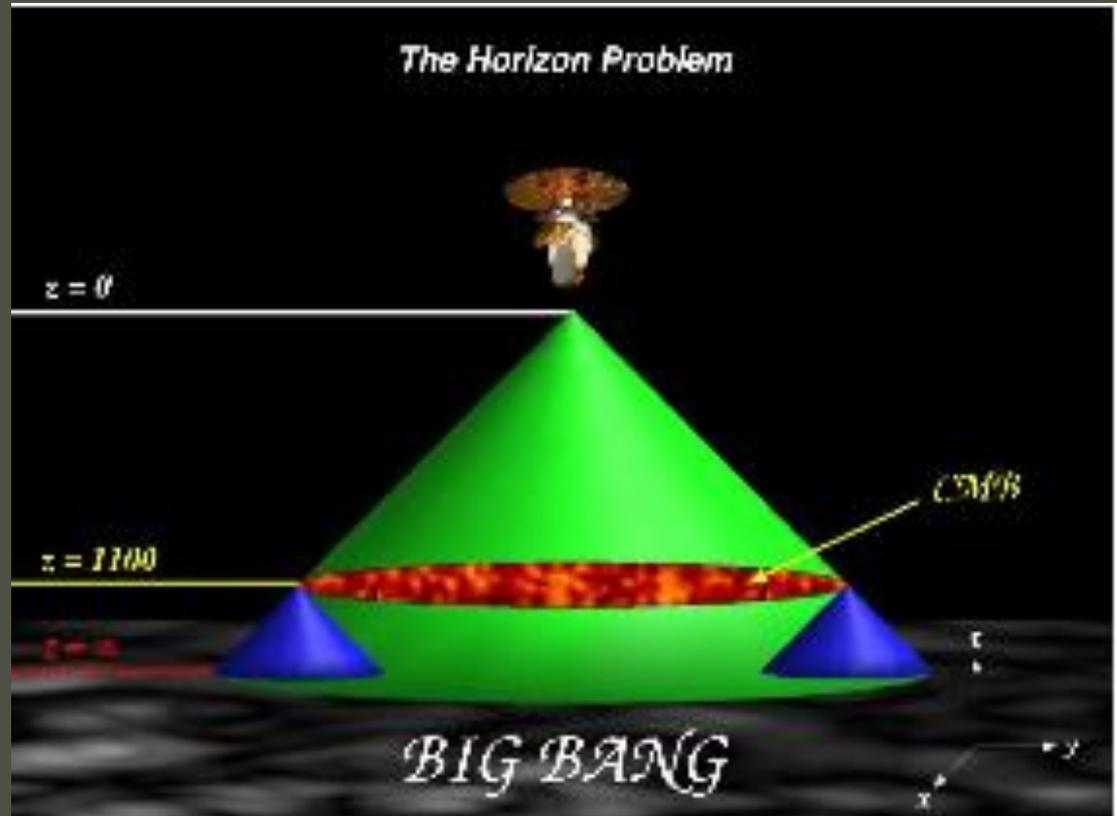
parametri cosmologici

La crisi del modello del Big Bang (circa 1980)

- Problema dell'orizzonte: il nostro universo appartiene ad un insieme di misura zero?
- Problema della piattezza: dobbiamo assumere un "fine-tuning" delle condizioni iniziali del nostro universo?
- Problema delle fluttuazioni cosmiche: come sono state generate le "irregolarità" nella distribuzione della materia nel cosmo?

Problema dell'orizzonte

La scala “comovente”
di correlazione causale
cresce con il tempo

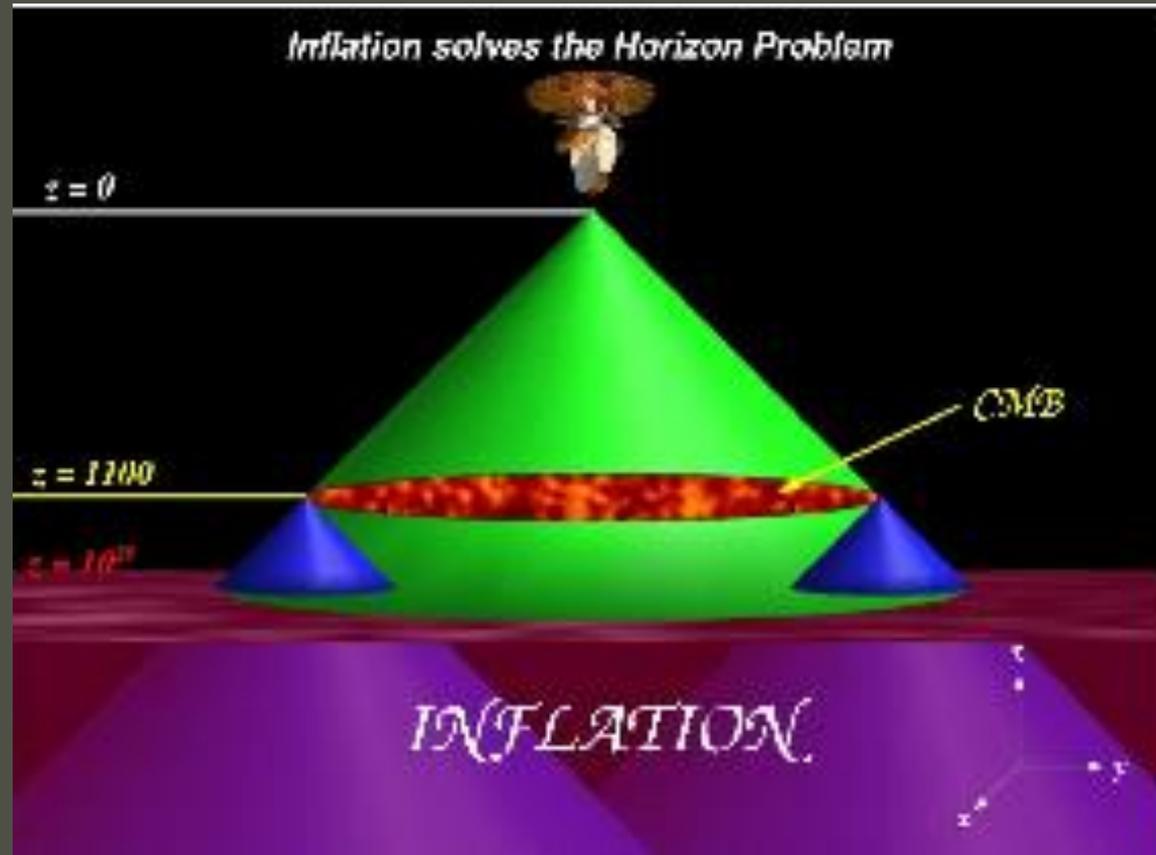


Soluzione: Inflazione nell' Universo primordiale! (circa 1981)

- Un periodo di espansione accelerata nell' Universo primordiale
- Da tale periodo hanno tratto origine tutte le proprietà cosmiche osservate.
- Materia e radiazione sono nate alla fine del periodo di inflazione, dal decadimento dell' energia del vuoto che guidava l' espansione accelerata.
- Tutte le strutture cosmiche (ovvero tutta la complessità del nostro universo) hanno avuto origine durante la fase inflazionaria da fluttuazioni quantistiche del vuoto (su scala microscopica), successivamente amplificate e dilatate su scale macroscopiche (classiche)

Soluzione inflazionaria del problema dell'orizzonte

Un periodo sufficientemente lungo di espansione accelerata nell'Universo primordiale permette di risolvere il problema dell'orizzonte.



Kinney 2003

Il ruolo dell'energia del vuoto

- L'espansione accelerata dell'Universo, soluzione inflazionaria dei problemi del (vecchio) modello standard, richiede l'azione di una forza cosmica repulsiva nelle equazioni di Einstein.

- Poiché la forza gravitazionale "Newtoniana" causata dalla massa-energia del "fluido" cosmico può solo essere attrattiva, è necessario sfruttare una proprietà dei fluidi relativistici: l'accelerazione/decelerazione è causata non solo dalla massa-energia, ma anche dalla pressione del fluido.

- Se la pressione è sufficientemente grande e negativa, si hanno le condizioni per l'accelerazione ("violazione della condizione di energia forte" → non inevitabilità della singolarità iniziale del Big Bang).

- Per realizzare un sistema fisico con pressione isotropa e negativa ("tensione") è necessario fare riferimento alle proprietà del vuoto quantistico. *Un esempio di queste proprietà è l'effetto Casimir in elettrodinamica quantistica. In ambito cosmologico si fa uso dell'energia del vuoto di un opportuno "campo scalare" detto "inflatone".*

Teorema cosmico di assenza di capelli (“no-hair”)

- La presenza nelle equazioni di Einstein di una sorgente capace di generare espansione accelerata (come l'energia del vuoto) conduce alla cancellazione asintotica di qualsiasi dettaglio (“hair”).
- L'inflazione tende a cancellare ogni memoria delle condizioni iniziali.
- Tutto ciò che osserviamo oggi deve essere stato (ri-)generato alla fine dell'epoca inflazionaria.

Il punto di vista attuale sull'Universo

✓ Universo osservabile

- Disomogeneo su piccola scala
- Quasi omogeneo ed isotropo sulla scala dell'orizzonte attuale

✓ Inflazione

- Fortemente disomogeneo su scale molto maggiori dell'orizzonte

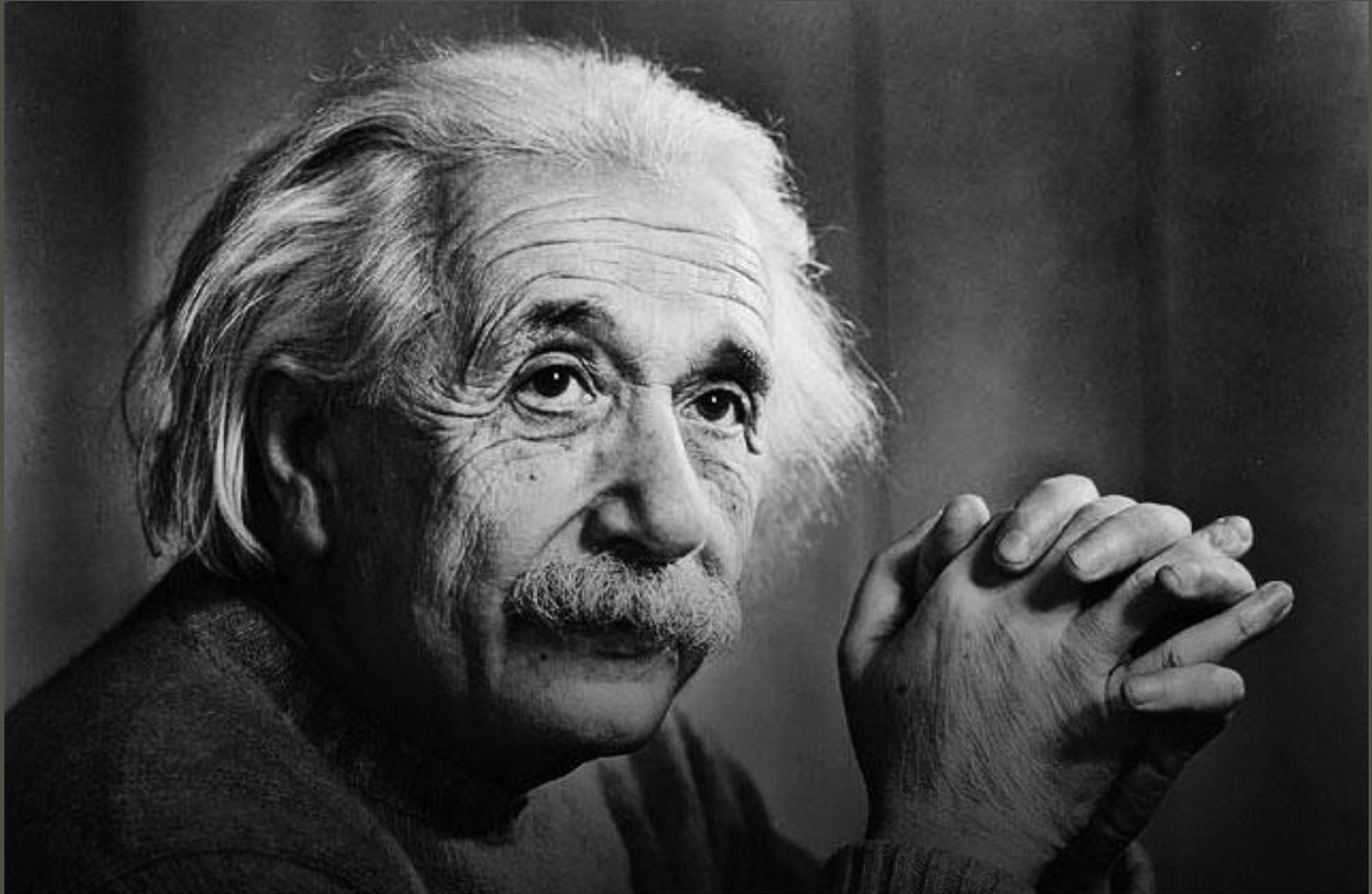
“... for the practical purposes of describing the observable part of our Universe one can still speak about the big bang, just as one can still use Newtonian gravity theory to describe the Solar system with very high precision.”

Andrei Linde 1995

Sono esistiti altri episodi di inflazione nella storia dell' Universo?

- La risposta delle osservazioni e' che ... proprio oggi l' Universo sta sperimentando una di espansione accelerata, ovvero una "seconda inflazione"
- Tale espansione accelerata viene attribuita all' azione di una componente oggi dominante, detta "energia oscura".

Albert Einstein (1879-1955)



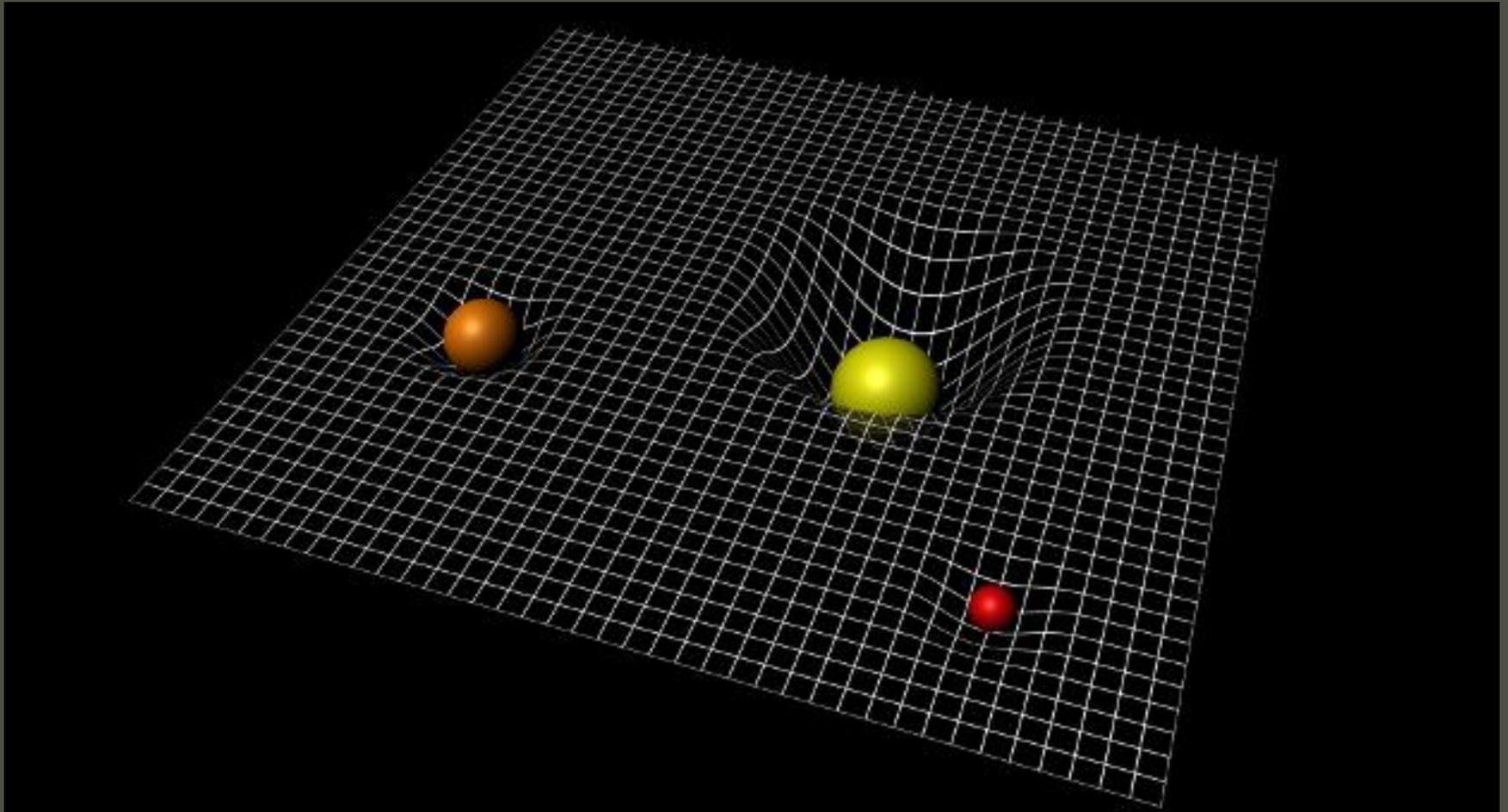
1915: “nascita” della Relatività Generale

Equazioni (“di Einstein”)

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

geometria \Leftrightarrow azione dei campi di materia

Curvatura dello spazio-tempo e materia



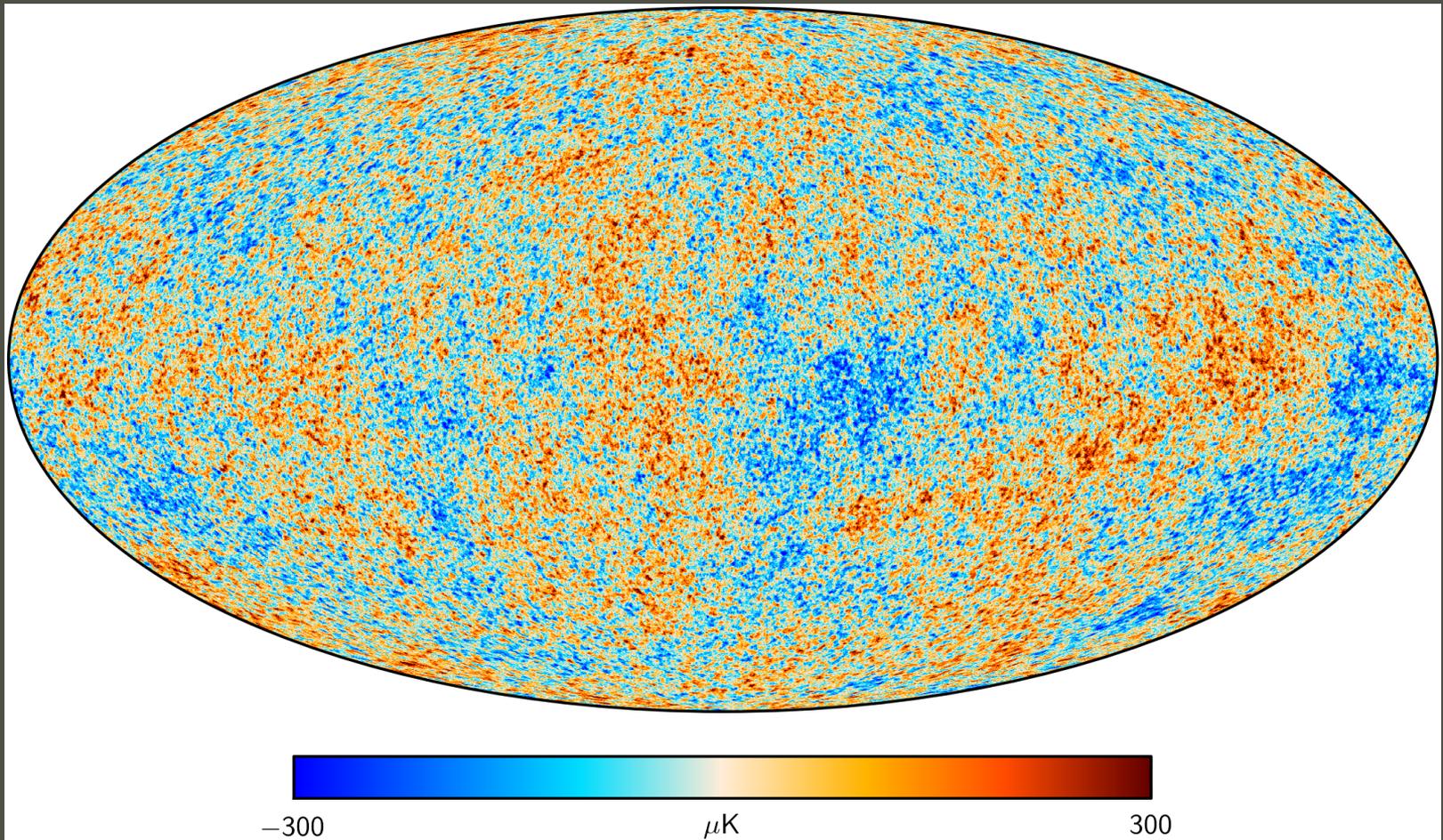
La Relatività Generale e il problema della quantizzazione

- Possiamo considerare la RG come la corretta teoria della gravità? Oggi la rivelazione delle onde gravitazionali ci dà una conferma clamorosa della sua validità nel descrivere tutti i fenomeni conosciuti.
- Tuttavia, la risposta corretta è certamente no!
- La teoria non è quantizzabile e richiede un'opportuna estensione ad energie elevate (energia di Planck, cento milioni di miliardi di volte quella di LHC ...).
- Inoltre la RG non contiene alcun meccanismo capace di spiegare l'energia oscura.
- Qual'è quindi la corretta teoria di gravità quantistica??

Entriamo nel regno della “Modified Gravity”

- Oggi molto del lavoro dei fisici teorici particellari e dei cosmologi si incentra sulla ricerca di una buona teoria per l'unificazione delle 4 interazioni fondamentali della natura, capace di contenere anche una teoria consistente per la quantizzazione della gravità e di spiegare la natura intima dell'energia oscura.
- Questo ci porta verso le teorie di “**modified gravity**”, teorie che sempre di più ci sforziamo di capire, classificare e testare sperimentalmente.
- Nell'affrontare questi problemi, emerge con forza l'uso di quella che viene chiamata “**Effective Field Theory**” che ambisce ad una descrizione valida solo fino ad una certa scala energetica massima, oltre alla quale sappiamo che la ns. teoria è destinata a fallire.

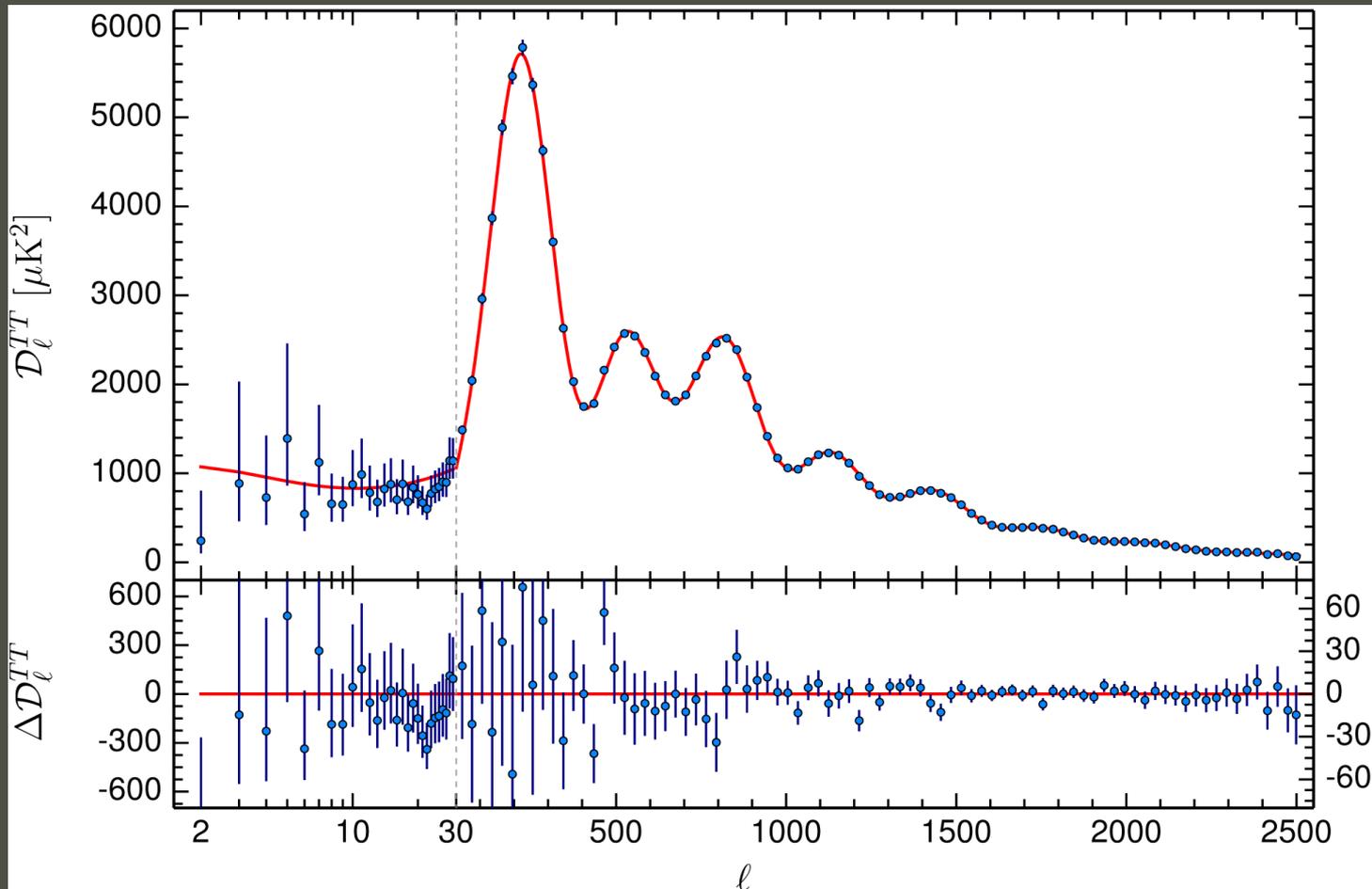
Il CMB alla risoluzione di *Planck*



The SMICA CMB map (with 3 % of the sky replaced by a constrained Gaussian realization).

Temperature

Il “suono” dell’Universo primordiale ... secondo Planck



7 acoustic peaks detected!

Planck collaboration 2015

Il "budget" cosmico

The image shows a standard periodic table of elements. The elements are color-coded into blocks: s-block (yellow), d-block (green), f-block (blue), and p-block (purple). The table includes atomic numbers, symbols, and names for various groups like Transition Metals, Non-Metals, and Rare Earth Elements. The table is organized into rows and columns, with the periodic table structure clearly visible.

- ✓ Solo circa il 4% del budget cosmico e' sotto forma di materia ordinaria ("barioni"), della quale solo una piccola frazione brilla nelle galassie (molto probabilmente la maggior parte della materia ordinaria e' localizzata in "filamenti" di gas ad alta temperatura nel mezzo intergalattico).
- ✓ Circa il 27% del budget cosmico e' fatto di Materia Oscura, una componente della quale percepiamo la presenza solo gravitazionalmente.
- ✓ Circa il 69% del contenuto energetico del nostro Universo e' sotto forma di una componente "esotica", chiamata Energia Oscura, o "Quintessenza" (quando e' causata dall'energia di un opportuno campo scalare), che causa una forma di repulsione cosmica su grande scala tra gli oggetti celesti, mimando una sorta di effetto di anti-gravita'.

Spiral galaxy



Spiral galaxy



Evidenza di materia oscura dalle curve di rotazione di galassie a spirale

Lo studio delle galassie a spirale mostra che la curva della velocità di rotazione rimane costante, o piatta, all'aumentare della distanza dal centro galattico. Sulla base della teoria Newtoniana la velocità di rotazione dovrebbe diminuire per le componenti più lontane dal centro galattico. La curva di rotazione piatta suggerisce che le galassie sono circondate da una significativa quantità di materia oscura, distribuita in massicci aloni oscuri di forma approssimativamente sferica. Nelle parti più esterne delle galassie la luminosità è trascurabile; nubi di gas che orbitano in tali regioni permettono di misurare come varia la velocità di rotazione con la distanza dal centro galattico, portando alla conclusione che essa tende a rimanere costante. La massa deve continuare a crescere poiché la velocità di rotazione deve soddisfare alla legge (di Keplero):

$$v^2 = GM/r$$

dove M è la massa entro il raggio r ; quindi $M \propto r$. Il rapporto massa/luminosità della galassia è molto maggiore di quello stimato dalla regione luminosa interna.

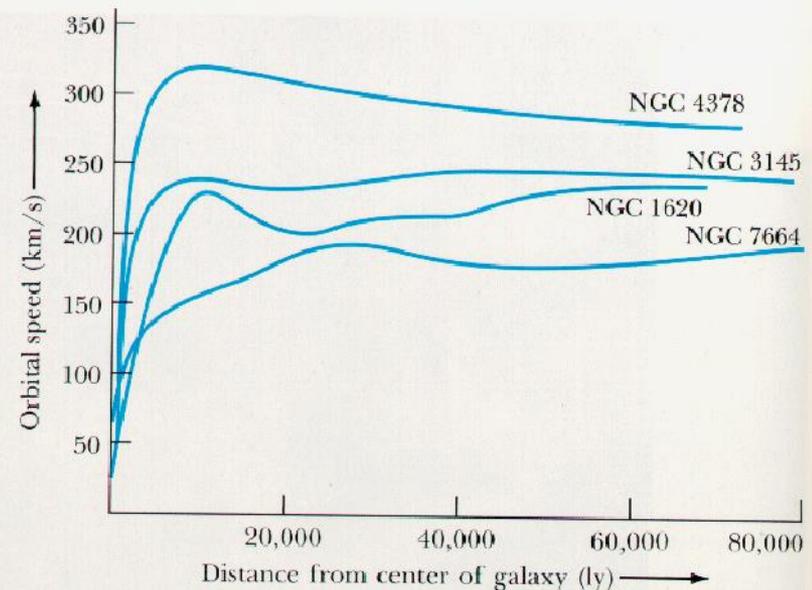
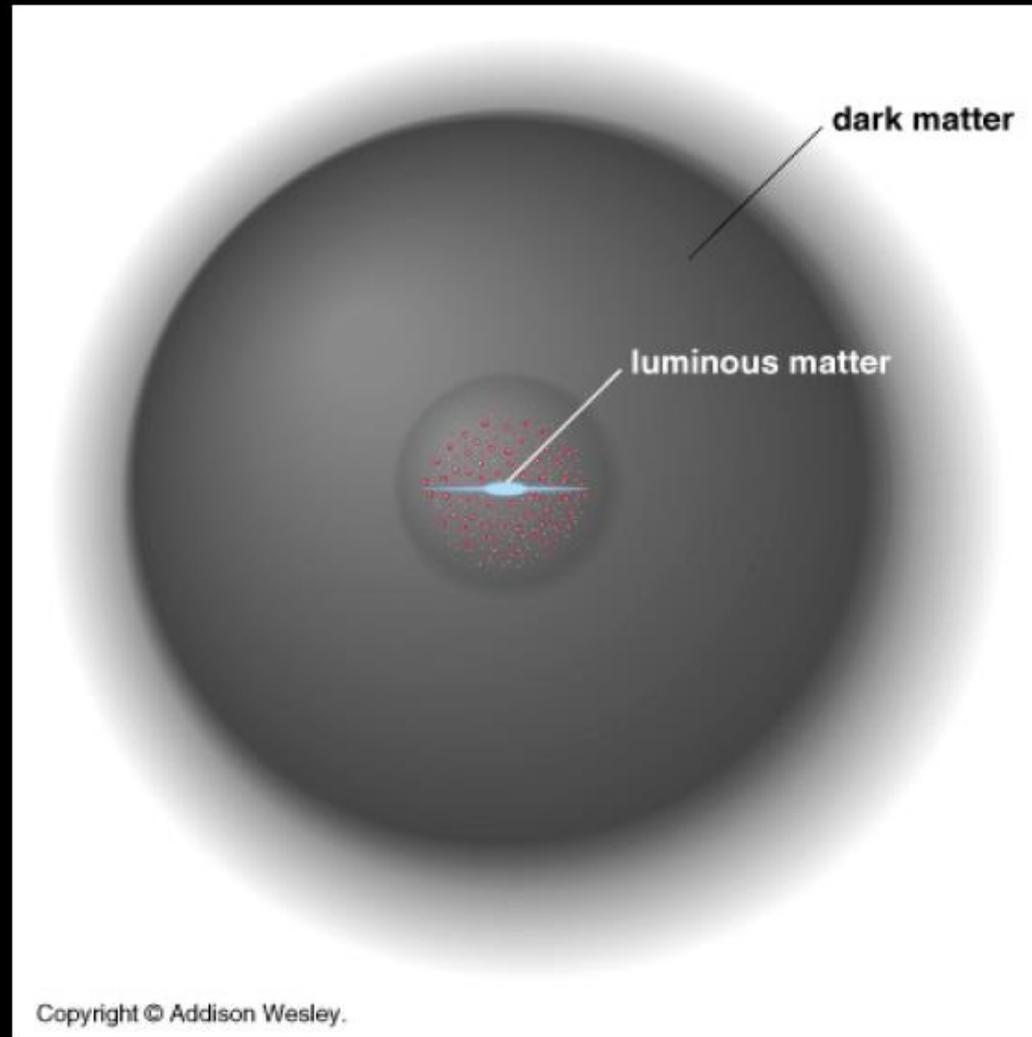
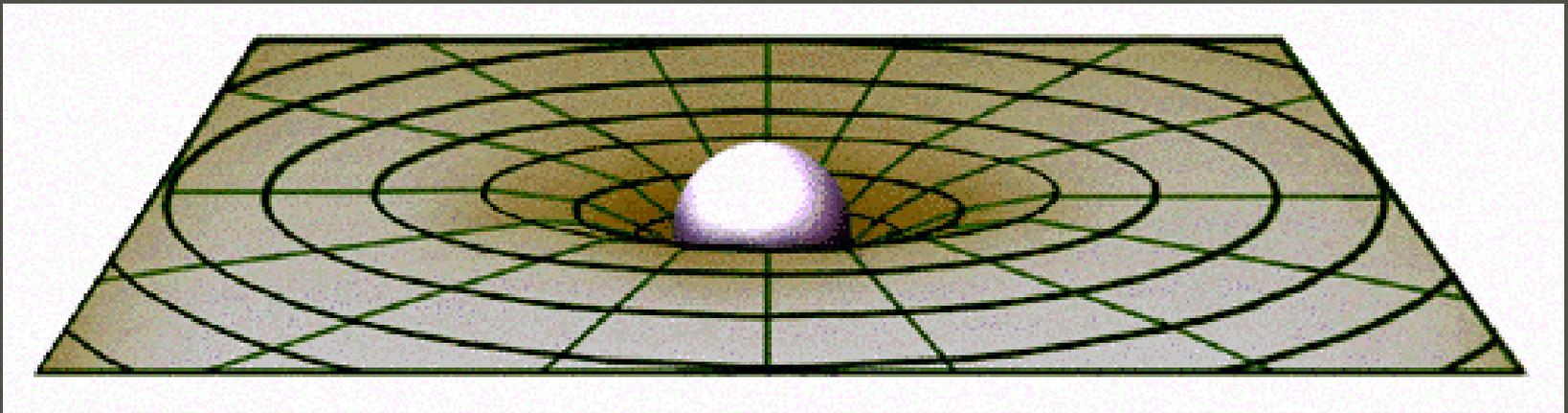


FIGURE 26-25 The Rotation Curves of Four Spiral Galaxies This graph shows the orbital speed of material in the disks of four spiral galaxies. Many galaxies have flat rotation curves, indicating the presence of extended halos of dark matter. (Adapted from V. Rubin and K. Ford)

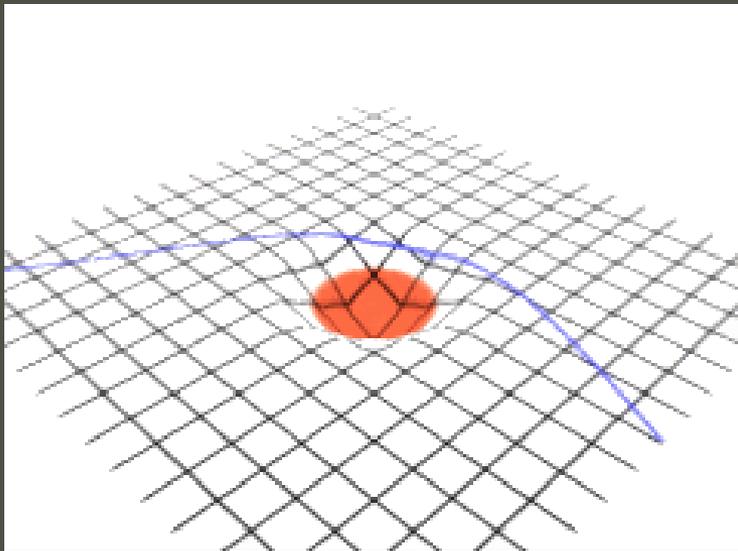
Aloni di materia oscura



non solo attorno alle galassie...



La geometria dello spazio (e del tempo) non è un dato fisso, come per Newton, ma dipende dalla materia in esso contenuta



Le traiettorie dei corpi celesti seguono le linee più brevi (geodetiche).

Vicino a una massa lo spazio è curvo e la linea più breve non è la linea retta!

Il Lensing Gravitazionale



Abell 2218: A Galaxy Cluster Lens, Andrew Fruchter et al. (HST)

- *Di che cosa e' fatta la materia (oscura) nell' Universo (neutralini, assioni, ...)?*
- *Quali sono le forze ("interazioni") che agiscono sulla materia?*
- *Esiste una Unificazione delle forze tale per cui la varieta' delle interazioni discende da un' unica interazione fondamentale?*

Energia oscura ed energia del vuoto

L'accelerazione sembra richiedere l'esistenza di un fluido capace di sviluppare una forza repulsiva, una sorta di antigravità'.

Tale forza repulsiva e' generata se l'universo e' permeato da un fluido con Pressione isotropa negativa, detto

Energia Oscura

Per ottenere un sistema con pressione negativa e' necessario ricorrere alle proprieta' dell'energia del vuoto nella Teoria Quantistica dei Campi.

Un esempio e' dato dall'effetto Casimir in elettrodinamica quantistica.

$$\ddot{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) a$$



$$\ddot{a} > 0 \Leftrightarrow p < -\frac{1}{3} \rho c^2$$

La Costante Cosmologica

geometria



materia

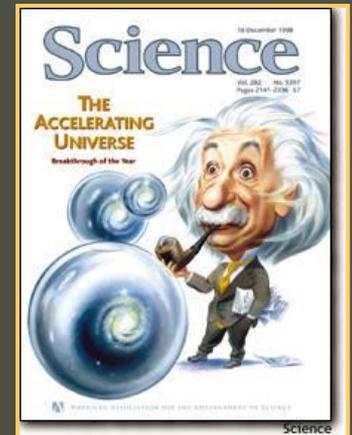


$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Quanto grande e' Λ ?

$$\rho_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda c^2}{8\pi G} \approx 0.7 \rho_{0c} \approx 10^{-124} m_{\text{Planck}}^4$$

$$m_{\text{Planck}} \equiv G^{-1/2} \approx 10^{19} \text{ GeV}$$



Albert Einstein

Modelli per l'Energia Oscura:

- ✓ Costante Cosmologica?
- ✓ “Quintessenza” ?
- ✓ Modifiche della legge di Gravitazione?
- ✓ “Backreaction” delle disomogeneità locali?

Conclusioni

- Sia nell'ambito della fisica delle particelle elementari che in ambito cosmologico, la pretesa di ricondurre la descrizione di tutti i fenomeni naturali ad un'unico schema unitario contenente, sotto l'egida di poche simmetrie, tutte le leggi della natura, sta gradualmente modificandosi per far posto anche allo studio della complessità e della deviazione dalle stesse leggi di simmetria come elementi di comprensione complementare alle leggi fisiche che regolano i fenomeni naturali. La stessa idea di particella elementare potrebbe venir messa in discussione e avere validità solo fino ad una scala di energia massima, oltre alla quale non pretendiamo di estrapolare le leggi fisiche a noi note. Similmente, in ambito cosmologico, stiamo abbandonando l'idea di un universo globalmente omogeneo ed isotropo fino a distanze infinite da noi.
- Questa attitudine ha portato la fisica ad inglobare nel suo campo di indagine molti settori precedentemente trascurati (sistemi biologici, problemi in ambito finanziario, analisi di "big data", etc...).