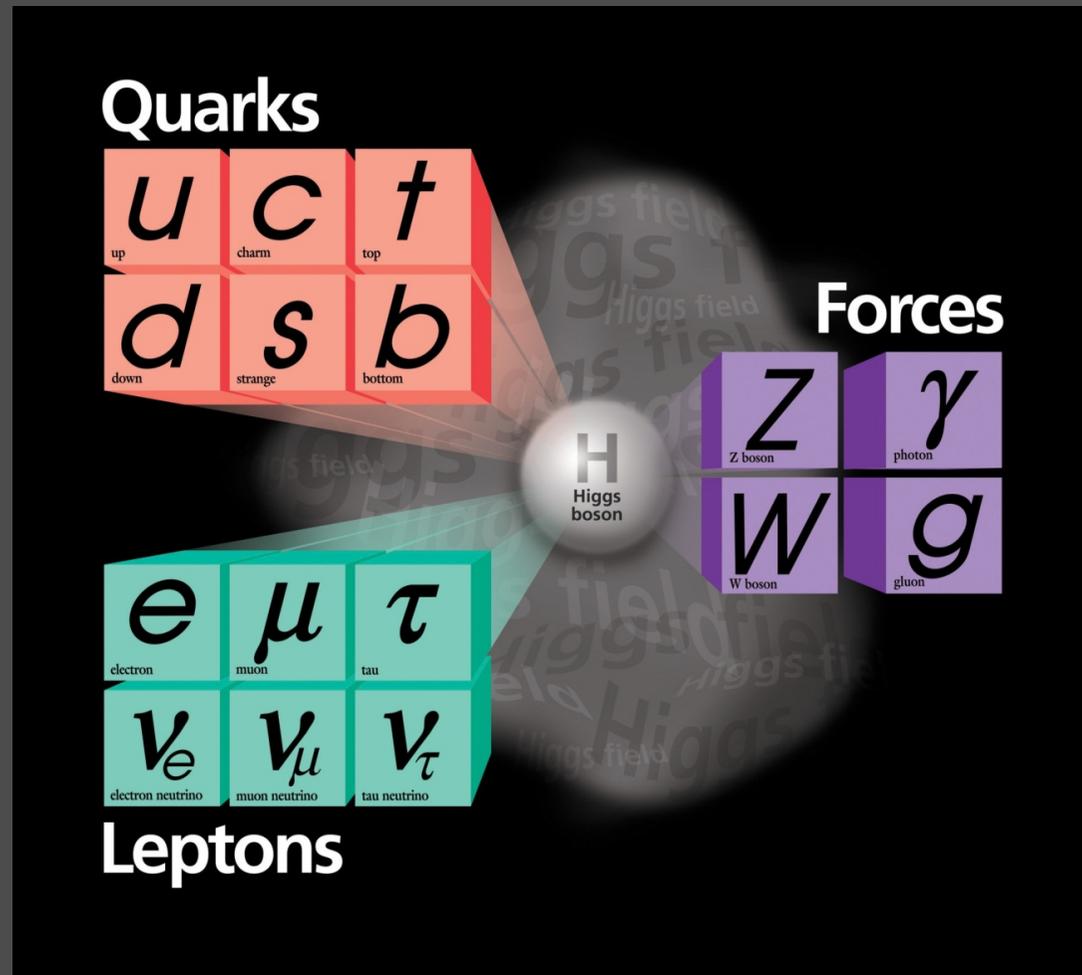


Le PARTICELLE e l'UNIVERSO

Danilo Babusci

Istituto Nazionale di Fisica di Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati

Modello Standard delle Particelle



la teoria finale? **NO**

Modello Standard delle Particelle

✓ limiti esplicativi

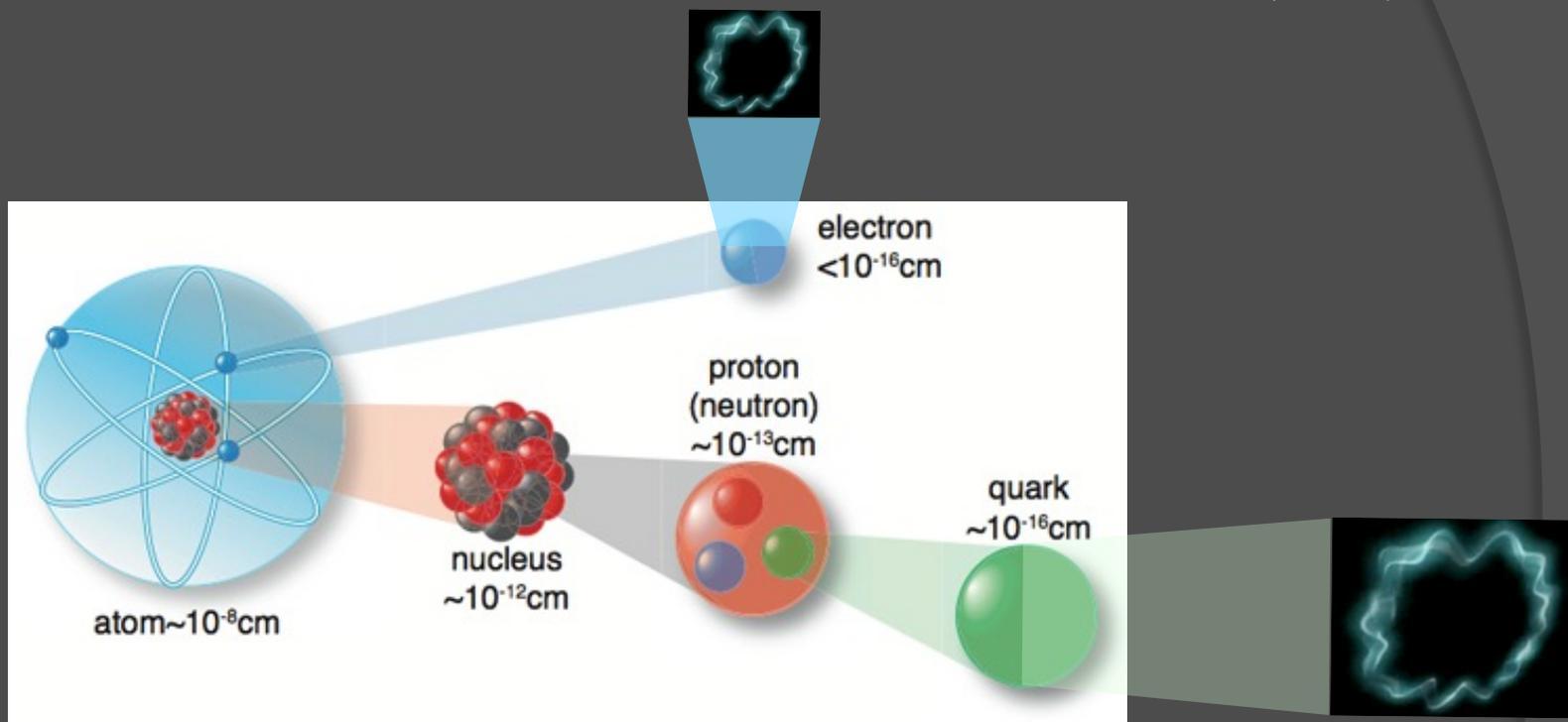
- nello SM i neutrini hanno massa = 0, mentre osserviamo che, seppur piccola, essa non è nulla
- nessuna traccia della gravità; questa forza è descritta da una teoria di campo che non può essere resa quantistica

✓ inestetismi

- perché così tanti parametri (19: masse dei quarks, dei leptoni, dell'Higgs, ...), di cui non sappiamo perché hanno il valore che osserviamo sperimentalmente
- perché 3 famiglie?
- perché materia e interazioni? → supersimmetria?
- ...

Teoria delle Stringhe

(1980)



ulteriore livello su scale di distanza dell'ordine di 10^{-33} cm →
modi di oscillazione della stringa corrispondono alle diverse
particelle elementari che osserviamo

Teoria delle Stringhe

un modo di oscillazione ha le caratteristiche del **gravitone**, il “quanto” del campo gravitazionale → **unificazione** di tutte le interazioni? → SM e Relatività Generale (**GR**) sono solo “teorie efficaci”, approssimazioni valide alle scale di energia/distanza finora esplorate

teoria attraente:

- incorpora la gravità
- non contiene infiniti
- strettamente vincolata da condizioni di coerenza matematica: esiste una sola teoria delle stringhe

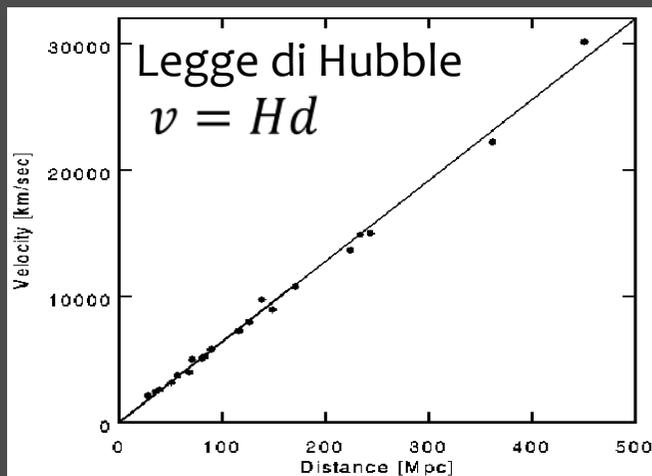
... ma:

- non esiste ancora la matematica → **equazioni della teoria ignote**
- esistono ragioni per credere che tali equazioni possiedano un numero incredibilmente enorme (10^{500}) di soluzioni → nessuno ha ancora trovato la soluzione che descrive il mondo osservato

Cosmologia

- modello geocentrico (Aristotele) 300 a.C.
- modello eliocentrico con orbite ellittiche (Copernico, Keplero) '500
- universo statico newtoniano (Newton, Cartesio, Kant) '600
- universo uniforme & statico della GR (Einstein) 1917

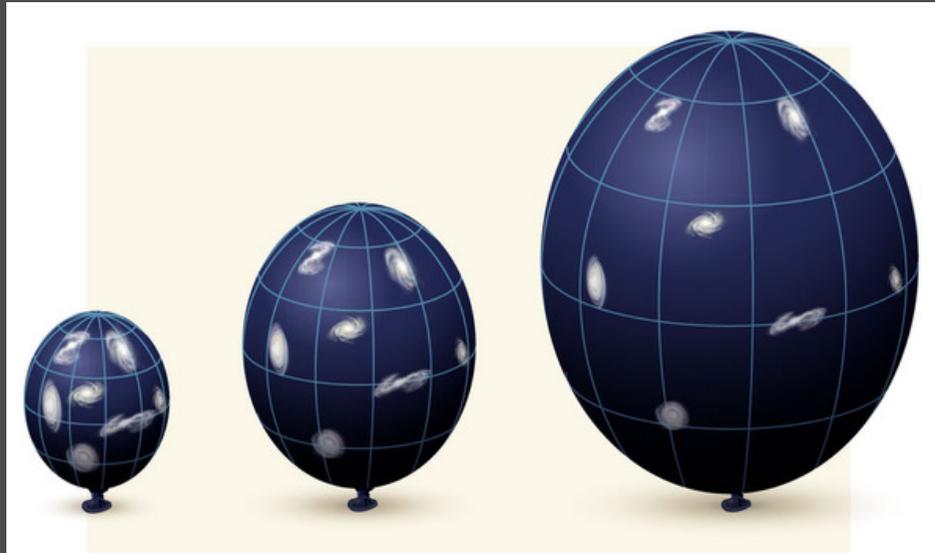
1929: scoperta dell'**espansione** dell'Universo



Einstein & Hubble

NB – (stranamente) nessuno trae la conclusione più semplice: se le galassie si stanno allontanando, in passato dovevano essere vicine

Cosmologia



1922: modello matematico dell'Universo in espansione basato sulla GR di Einstein



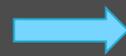
Fridman



Lemaître

Einstein resiste e introduce la **costante cosmologica** per rendere statico l'Universo: scoperta di Hubble pone fine al tentativo

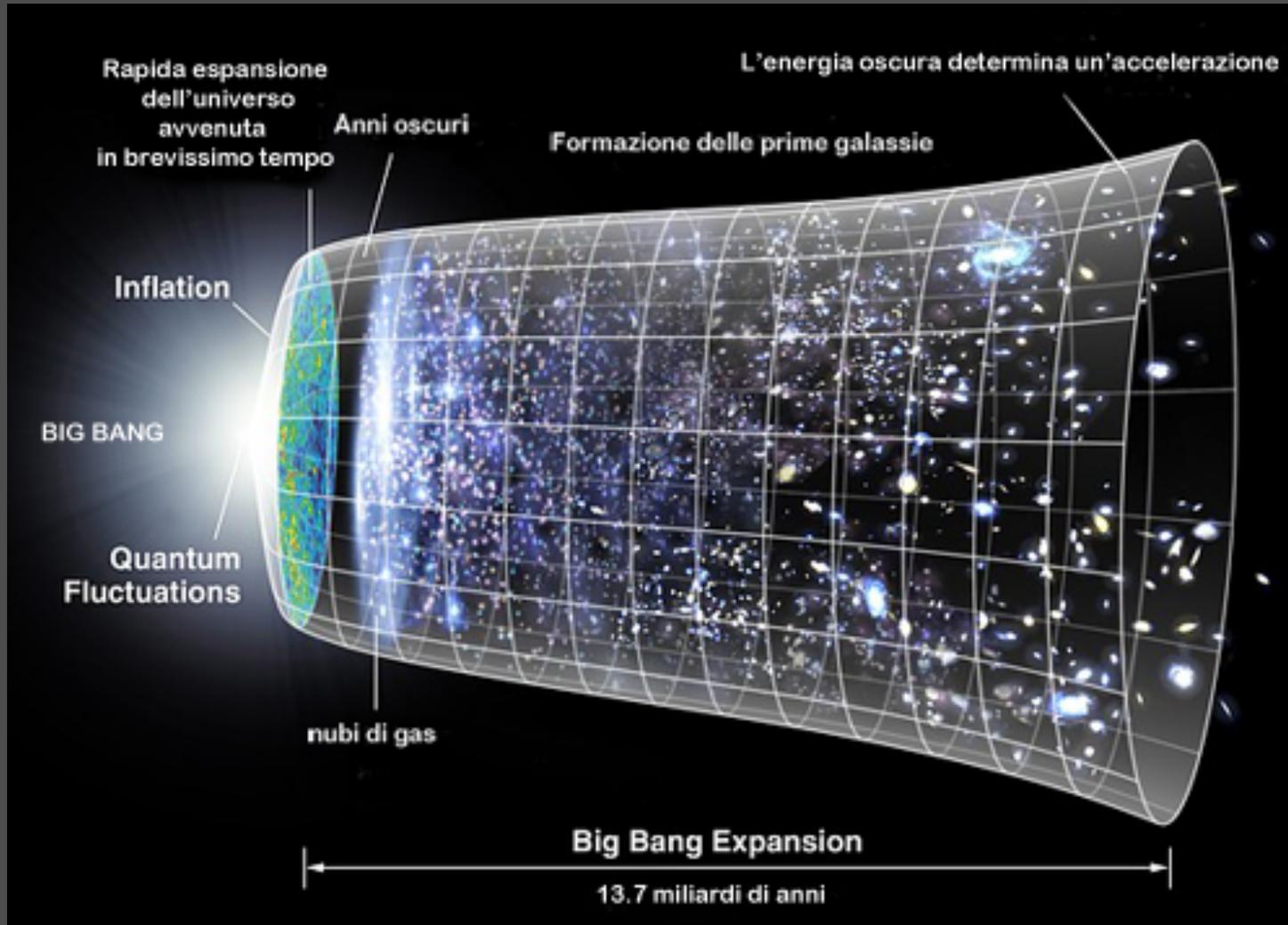
$$H = 67 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$



Età dell'Universo

$$t = 1/H = 13.7 \times 10^9 \text{ y}$$

Modello Standard della Cosmologia



Big Bang caldo

✓ fine anni '40

calcoli teorici dimostrano che l'**Universo primordiale** deve essere stato **molto caldo** → espansione: radiazione irraggiata dalla materia dovrebbe giungere a noi come **microonde**, raffreddata alla temperatura di qualche grado sopra lo zero assoluto ($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$)

✓ anni '50

Bondi, Gold e Hoyle avanzano l'ipotesi dello **stato stazionario**: l'Universo è eterno, con sempre lo stesso aspetto medio e con nuova materia continuamente creata per colmare il vuoto tra le galassie in allontanamento

✓ 1965

scoperta (accidentale) del **fondo cosmico a microonde (CMB)**

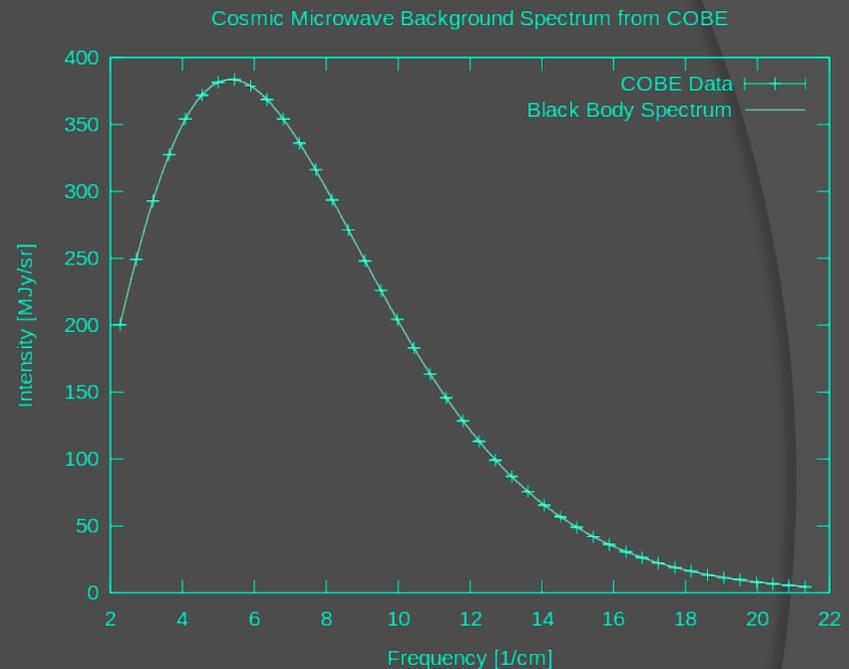
$$T = 2.725\text{ K}$$

Fondo Cosmico a Microonde



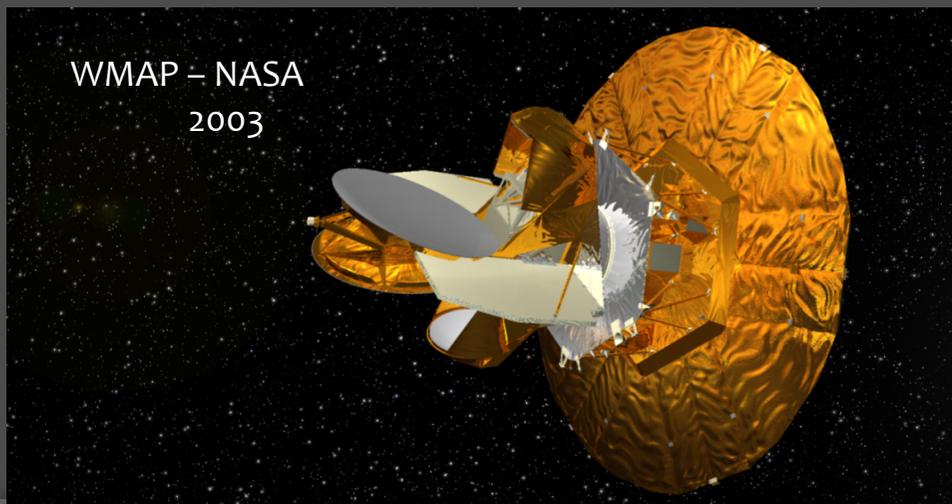
Wilson

Penzias



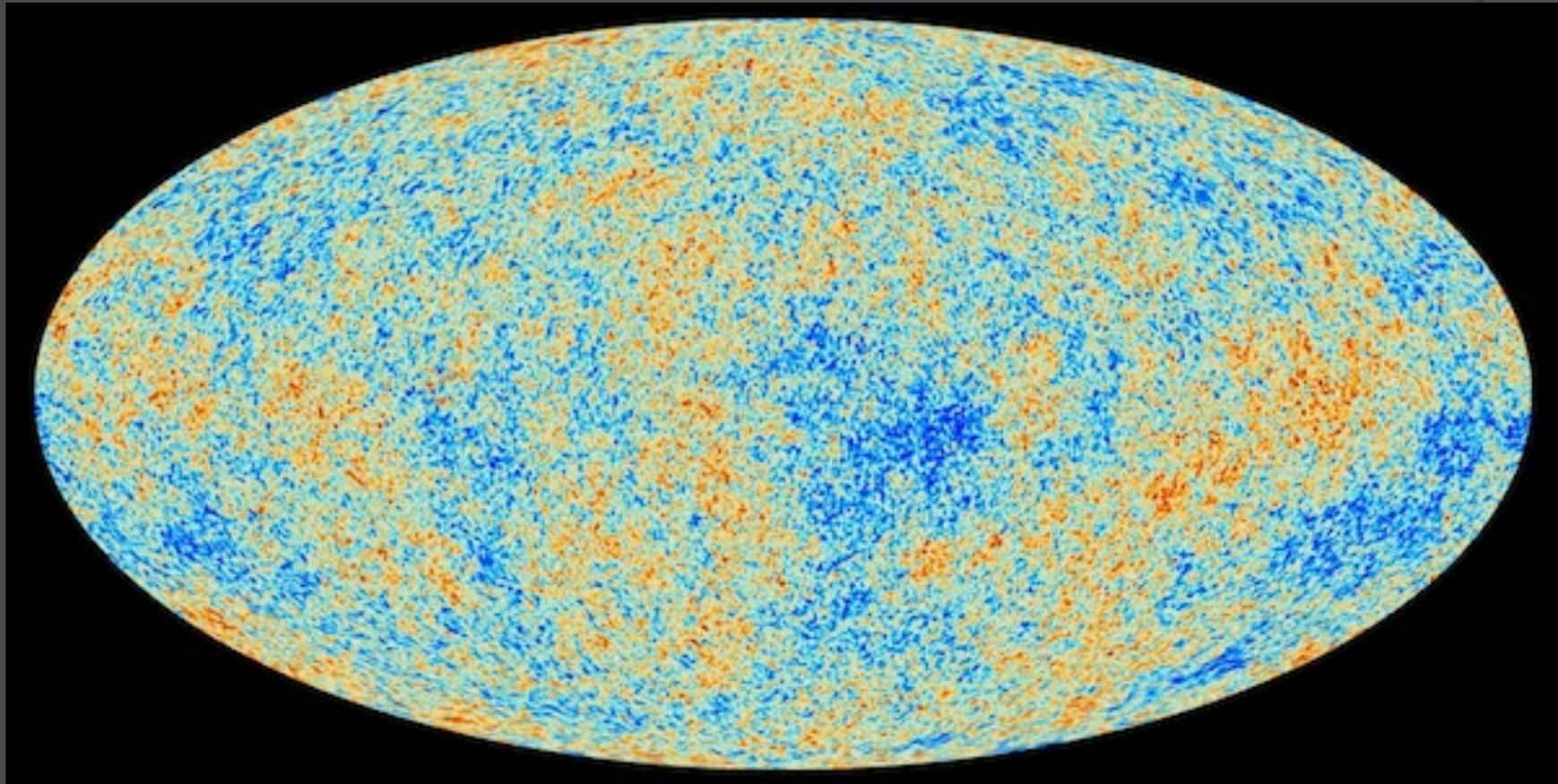
$T < 3,000 \text{ K}$ (380,000 anni dopo Big Bang): elettroni catturati dai protoni
→ formazione di atomi d'idrogeno → Universo diviene trasparente alla radiazione: quella che sopravvive non interagisce più con la materia (disaccoppiamento) e continua a raffreddarsi a causa dell'espansione

Fondo Cosmico a Microonde



Fondo Cosmico a Microonde

mappa di temperatura misurata da PLANCK (2013)



Fondo Cosmico a Microonde

la distribuzione di temperatura del CMB **non è uniforme** in tutto il cielo:
si osservano variazioni dell'ordine di **1/100,000**

risultato sorprendente? **NO**

le fluttuazioni **ci devono essere**: sono causate da piccoli grumi di materia presenti nell'Universo primordiale che agirono da semi per la successiva **condensazione delle galassie**

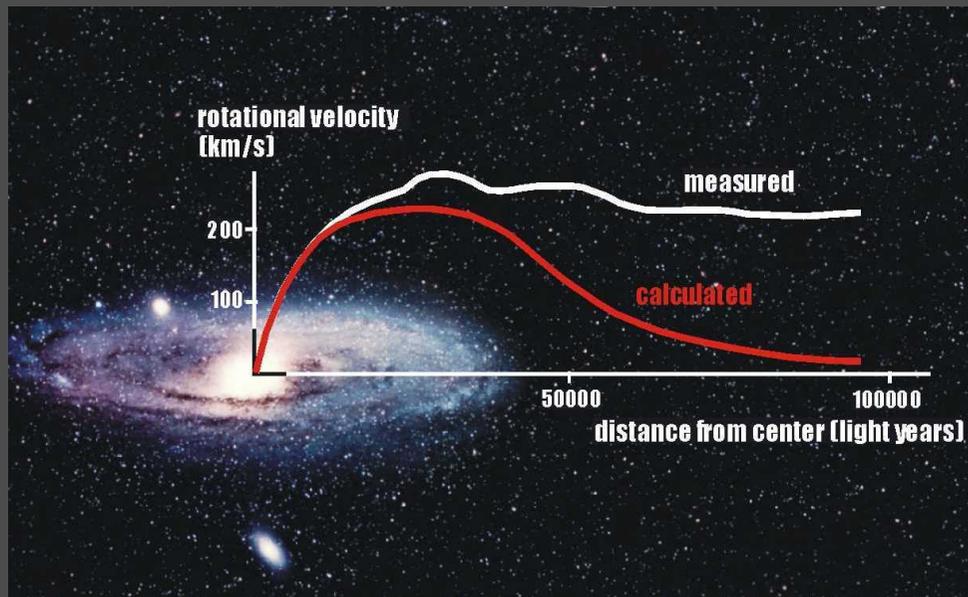
studio dettagli del CMB → abbondanza dei vari tipi di particelle presenti prima del disaccoppiamento → **risultato sorprendente**: le particelle note non bastano a spiegare la massa della materia calda

5/6 della materia dell'Universo deve essere stata **materia oscura** (non emette/assorbe luce)

Materia Oscura

altri indizi dell'esistenza della materia oscura:

- ✓ ammassi di galassie si tengono insieme gravitazionalmente malgrado le singole galassie componenti abbiano velocità molto alta
- ✓ curve di rotazione delle galassie



molte teorie ed esperimenti:
nessun riscontro

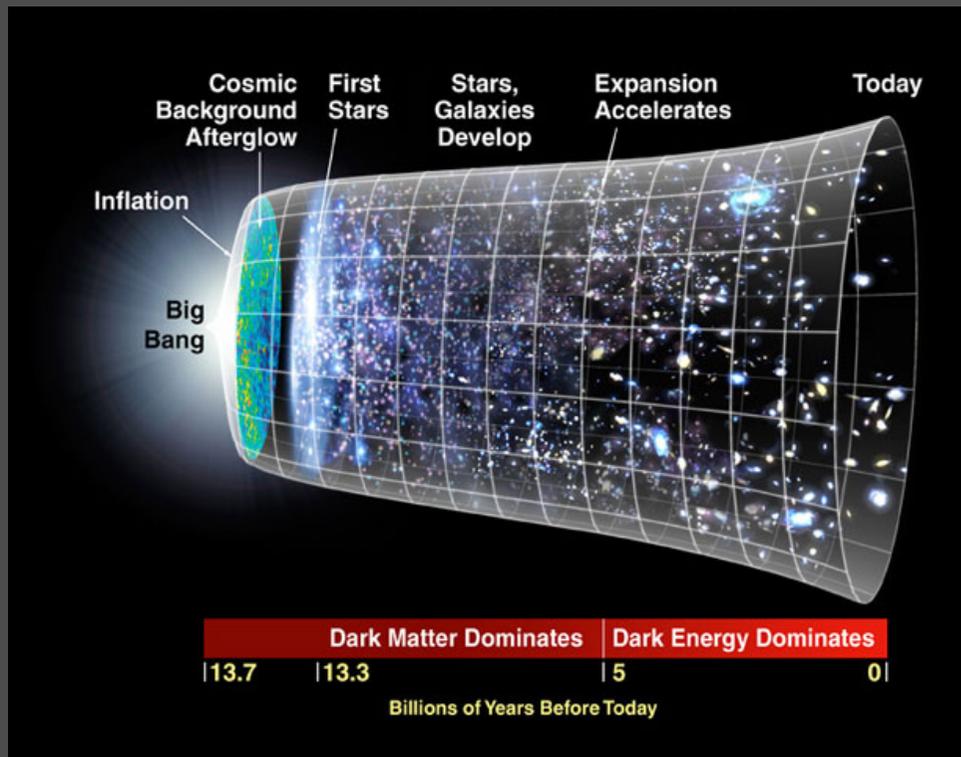


nessuno sa cosa sia la
materia oscura

Energia Oscura

1998

misura luminosità apparente delle supernovae Ia → a partire da 5 miliardi di anni fa, l'espansione dell'Universo ha preso ad **accelerare**



Riess



Perlmutter

Schmidt



Energia Oscura

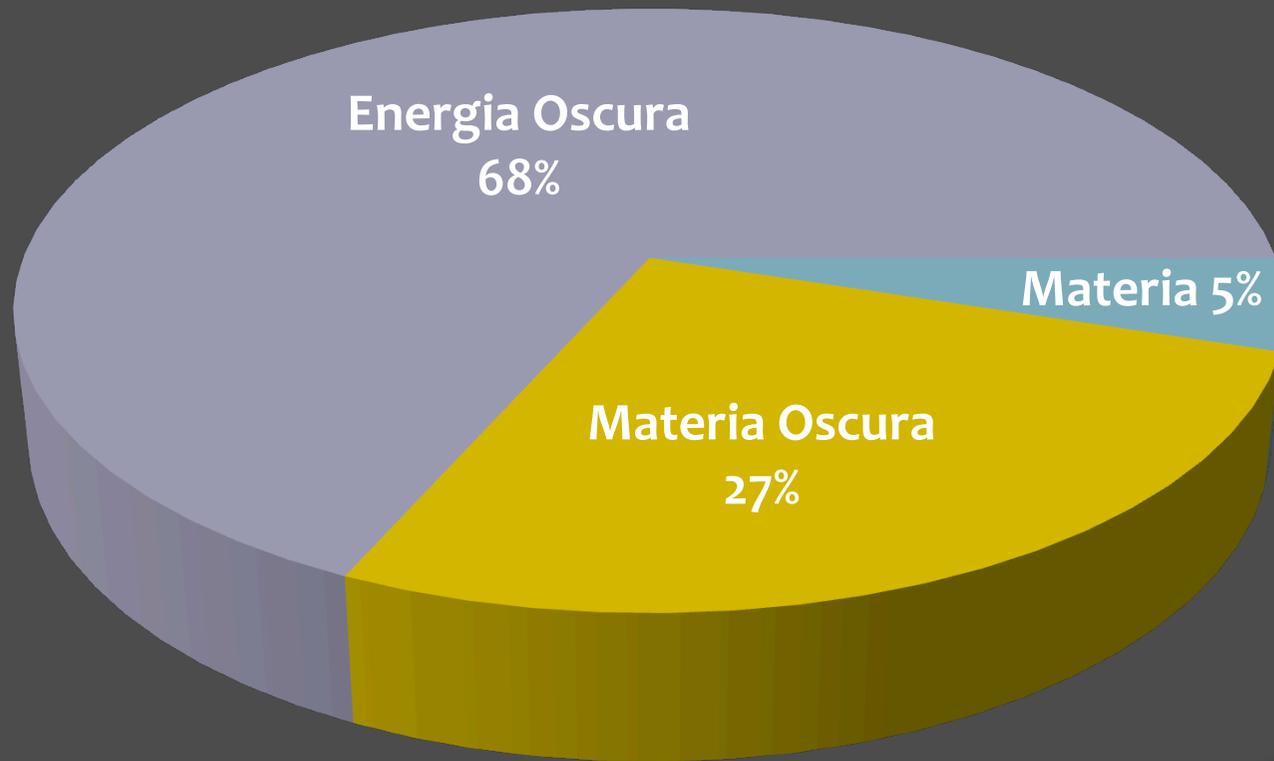
nell'ambito della GR l'osservazione può essere spiegata solo tramite una **energia oscura** che produce una **gravità repulsiva** tra le galassie

origine dell'energia oscura?

- **costante cosmologica à la Einstein?** curvatura senza materia-energia? dovuta a cosa? **vuoto quantistico?** calcoli teorici prevedono una costante cosmologica 10^{121} volte più grande di quella misurata
- **modifiche alla teoria della gravitazione?** devono essere su grande scala: sulle piccole scale (sistema solare) le predizioni della GR sono in accordo con l'esperimento
- **nuove forme di materia?** campi scalari → pressione negativa

(forse) il mistero più grande!

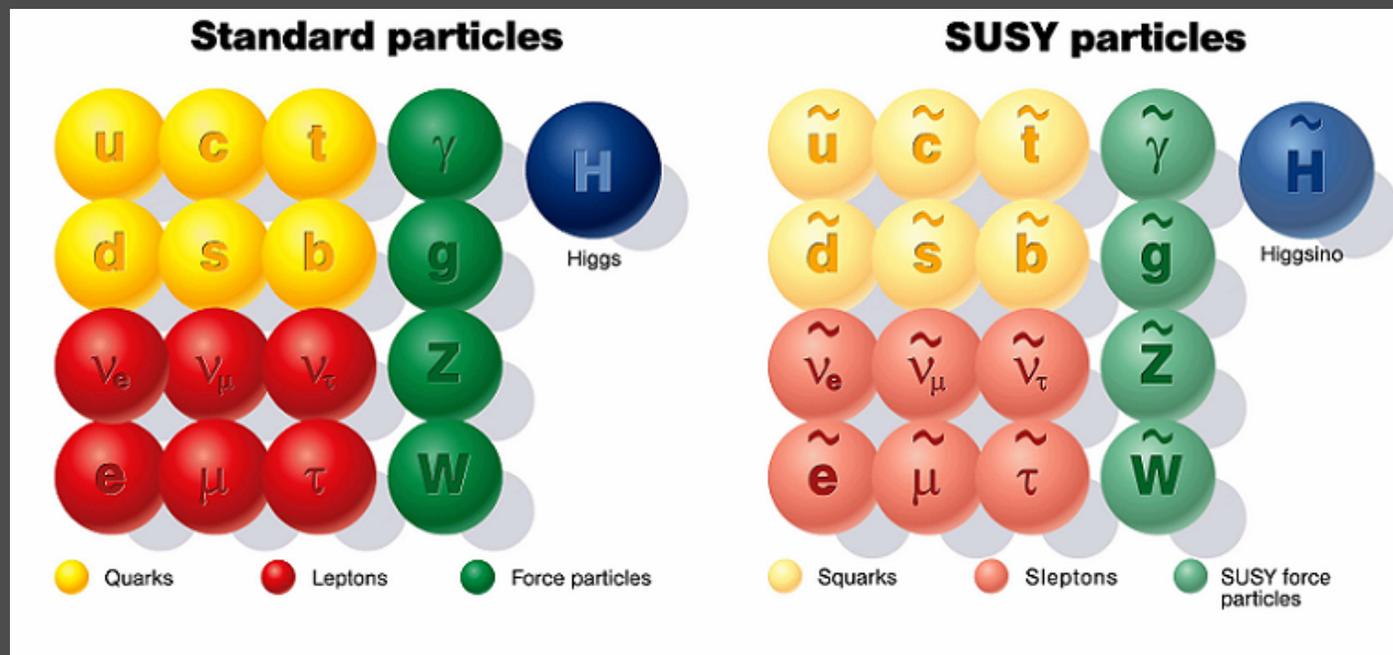
Ingredienti dell'Universo



non sappiamo nulla del 95% del contenuto dell'Universo!!

Particelle & Cosmologia

nuova simmetria bosoni \iff fermioni: **supersimmetria**

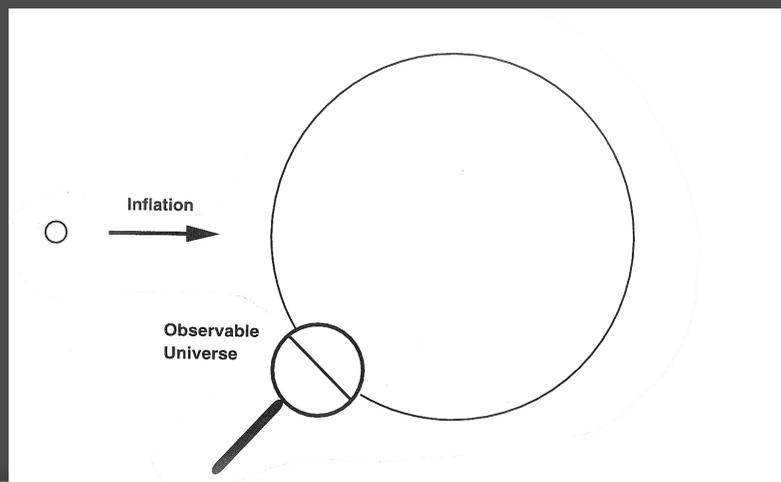


superparticella più leggera è il **neutralino** (stabile e molto pesante) \rightarrow principale candidato per la materia oscura: nessuna indicazione da **LHC**

Particelle & Cosmologia

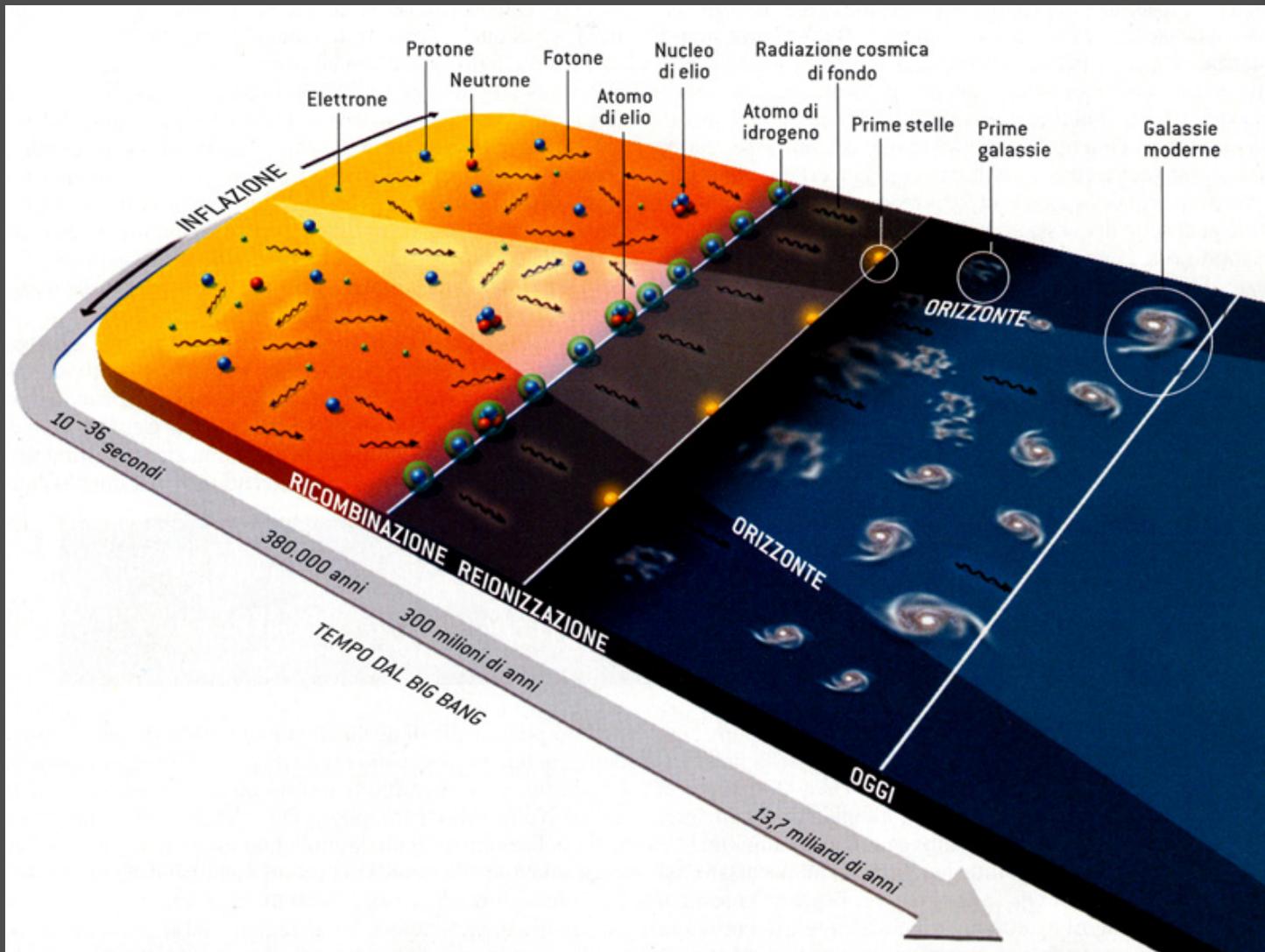
problema: perché l'Universo è così **uniforme**? come è possibile che i fotoni cosmici provenienti da direzioni opposte del cielo siano (entro 1/100,000) alla **stessa temperatura**?

soluzione: (**anni '80**) **campo scalare** → espansione esponenziale dell'Universo (**inflazione**) → regioni molto piccole e altamente uniformi si espandono divenendo in brevissimo tempo (10^{-36} s) più grandi dell'Universo attualmente osservato, rimanendo circa uniformi



Guth

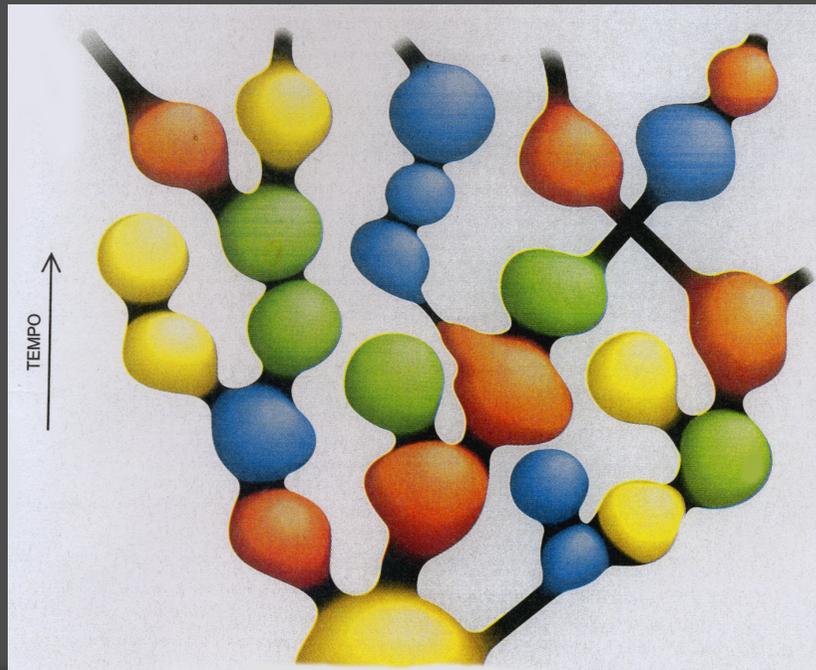
Inflazione



Inflazione

predizione importante: fluttuazioni quantistiche durante inflazione sono in grado di generare le variazioni di temperatura osservate nel CMB

meccanismo difficile da fermare → **inflazione eterna:** formazione di bolle in espansione in un Universo in inflazione



Linde

Multiverso

ciascuna bolla rappresenta un Universo, con il proprio (grande o piccolo) **Big Bang**, forse con valori diversi delle costanti di natura



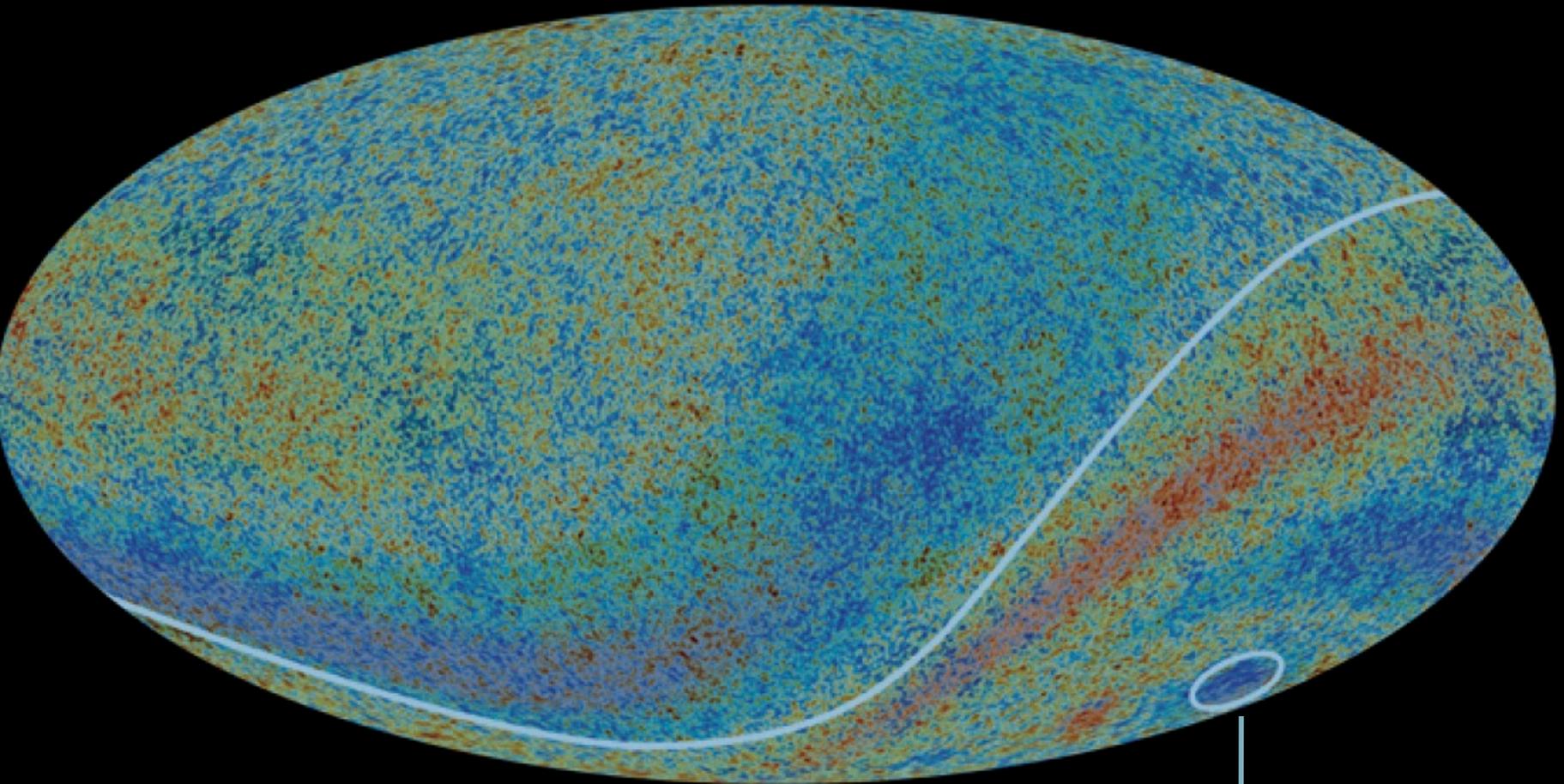
Multiverso

Ipotesi: le bolle realizzano tutte le diverse soluzioni delle equazioni della teoria delle stringhe → il valore dei parametri dello SM è **accidentale**, caratteristico della bolla in cui ci troviamo a vivere

ragionamento Antropico: osservatori devono essere in una parte del Multiverso in cui le costanti della natura consentono l'**evoluzione** di **vita** e **intelligenza**: anche se non come intendeva Protagora, l'uomo può essere la misura di tutte le cose

Multiverso

© ESA & THE PLANCK COLLABORATION



urto con un'altra bolla?

Ragionamento Antropico

speculazione antropica potrebbe essere l'unica spiegazione per il valore osservato dell'**energia oscura**

nello SM (e in tutte le altre teorie note) l'energia oscura è solo una costante della natura che potrebbe avere qualsiasi valore, ma Weinberg ha mostrato che se fosse molto diversa dal valore misurato non si formerebbero le galassie, le stelle, i pianeti, ovvero: la **vita**

spiegazione soddisfacente? dibattito molto acceso

Storicamente, le scienze fisiche hanno progredito non solo trovando precise spiegazioni dei fenomeni naturali, ma anche scoprendo quale sorta di cose possono essere spiegate con precisione. Queste possono essere meno di quello che pensavamo.

S. Weinberg

