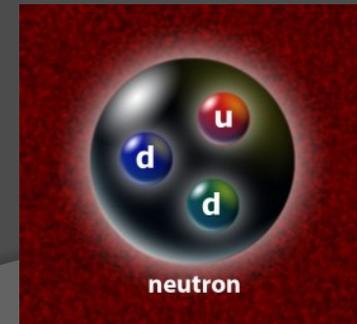
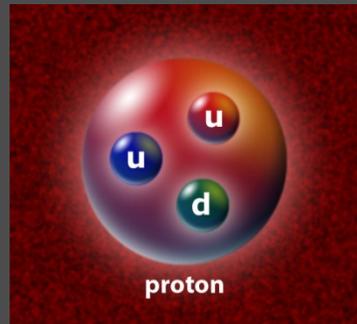
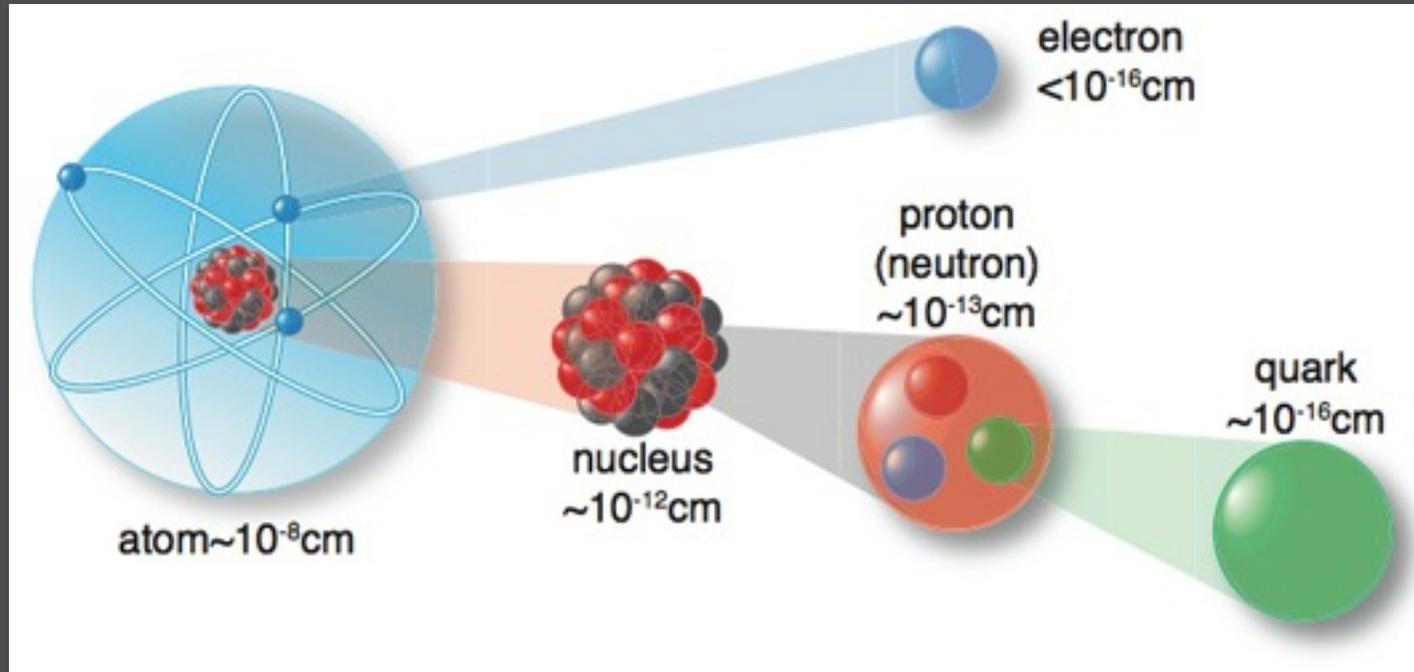


Le PARTICELLE e l'UNIVERSO

Danilo Babusci

Istituto Nazionale di Fisica di Nucleare
Laboratori Nazionali di Frascati

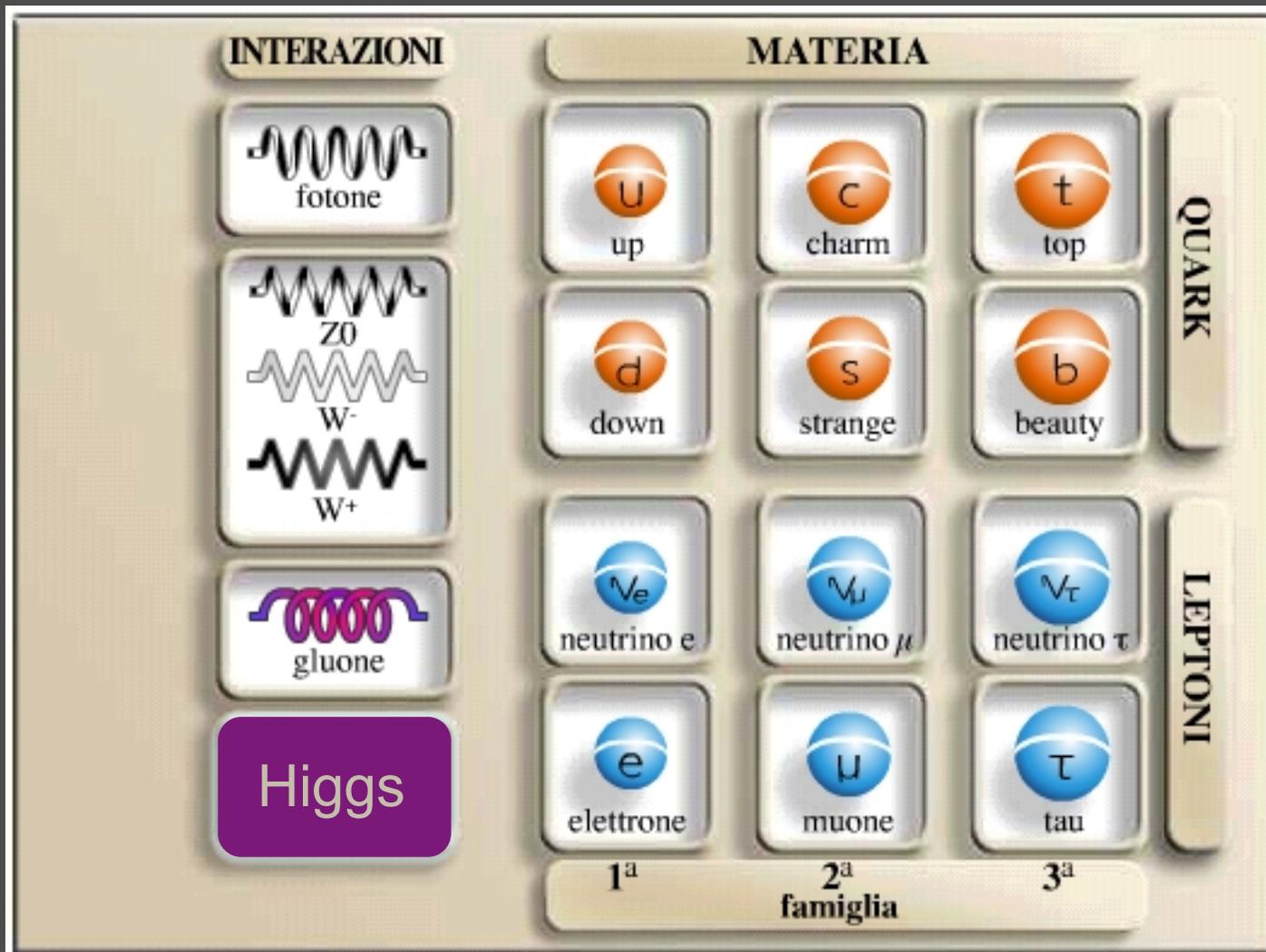
Particelle Elementari



Modello Standard delle Particelle

bosoni

fermioni



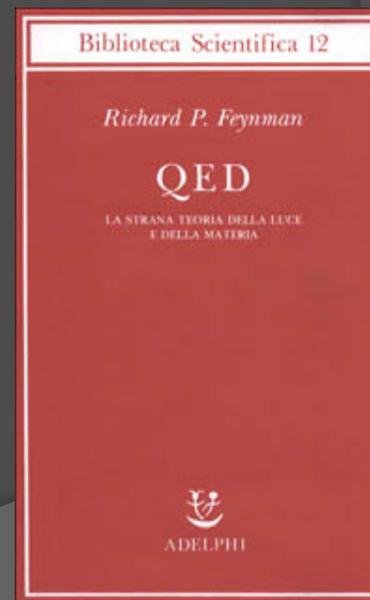
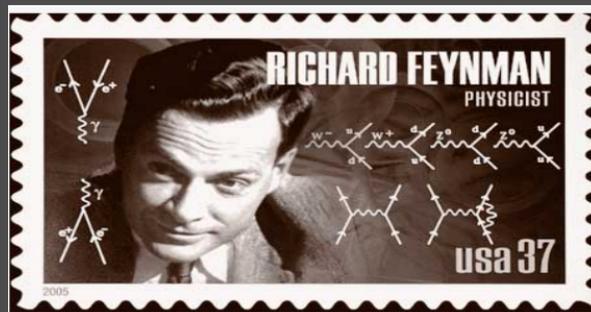
Interazione Elettromagnetica



→ Quark + Leptoni (con carica elettrica)

anni '40: primo esempio di teoria quantistica di campo (QFT): entità fondamentali sono i campi → particelle sono i “quanti” dei campi

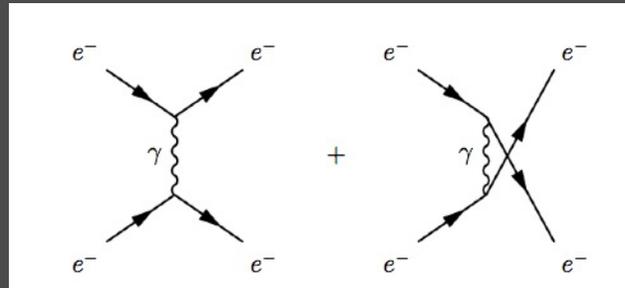
Calcoli teorici in QFT → diagrammi di Feynman
rateo di un processo = somma su tutte le (infinite)
possibili modalità di realizzazione del processo stesso



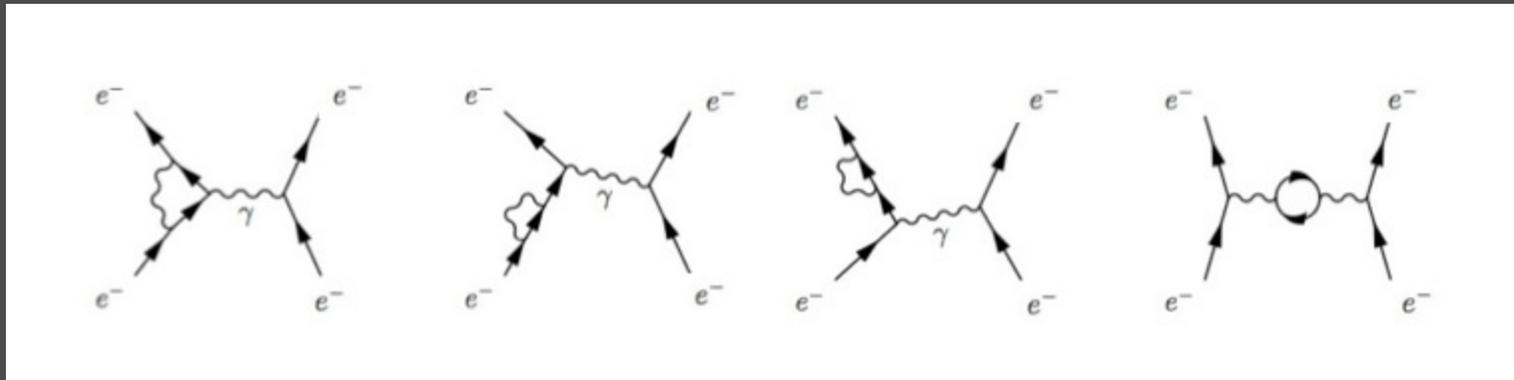
Interazione Elettromagnetica

Esempio - collisione tra elettroni

1. modalità più semplice: un elettrone emette un fotone (virtuale)



2. (alcune) modalità più complicate



Interazione Elettromagnetica

numero **infinito** di modalità distinte → impossibile fare calcoli esatti

QED: forza di debole intensità → contributi principali al calcolo del rateo provengono dai diagrammi più semplici → risultati in ottimo accordo con le osservazioni sperimentali

problema: calcolo diagrammi più complicati fornisce risultato infinito

soluzione (**fine anni '40**): purché si definiscano con cura la massa e la carica elettrica dell'elettrone (**rinormalizzazione**) si dimostra, matematicamente, che ogni diagramma infinito positivo è accompagnato da uno infinito negativo

→ **nella somma si cancellano**

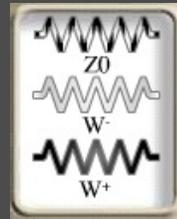


Schwinger



Tomonaga

Interazione Debole



→ Quark + Leptoni

Fermi



anni '50: QFT che spiegava i dati sulla radioattività β ($n \rightarrow p e \nu$) ma forniva risposte infinite nel calcolo di altri processi

anni '60: elaborazione di QFT sul modello della QED e che la incorpora come caso speciale (teoria elettrodebole) → forza debole trasmessa dallo scambio di W^+ , W^- , Z^0



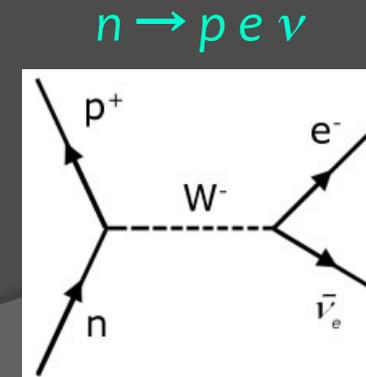
Glashow



Weinberg



Salam



Interazione Debole

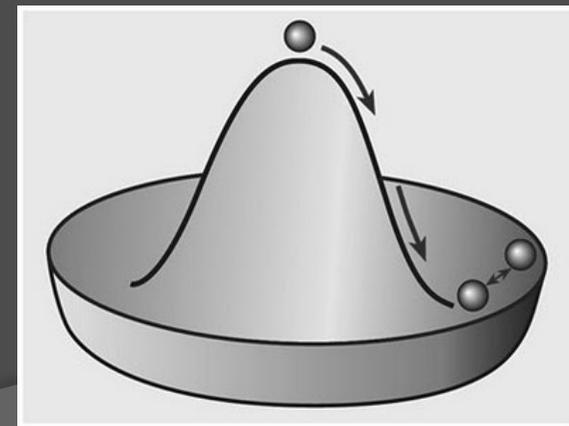
NB – fotone ha massa = 0 mentre massa di W e Z è circa 90 GeV → necessari acceleratori di alta energia (CERN - 1983)



van der Meer & Rubbia

problema: la cancellazione tra infiniti che si verifica in QED è qui impossibile

soluzione: idea della **rottura spontanea di simmetria**: le simmetrie delle equazioni della teoria non sono presenti nelle loro soluzioni (mutuata da altre aree della Fisica, es. **superconduttività**)



Interazione Debole

la simmetria esatta tra forza debole ed elettromagnetica – per la quale W e Z avrebbero massa = 0 - è rotta dalla presenza di **4 campi scalari** (**spin = 0**; privi di orientazione spaziale) da cui W^+ , W^- , Z^0 (ed elettrone) acquistano massa; fotone rimane con massa = 0

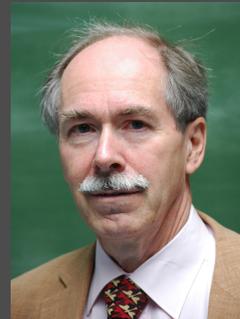
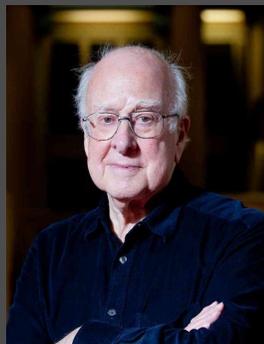


cancellazione di tutti gli infiniti

Englert



Higgs



't Hooft



Veltman

bosone di Higgs (CERN – 2012) è il quanto di uno di questi campi scalari

Interazione Forte



→ Quark

formazione dei nuclei atomici ($n + p$)

forza estremamente intensa → ogni modalità di realizzazione di un processo contribuisce in modo significativo → approccio “perturbativo” applicato in QED non è utilizzabile (nemmeno in modo approssimato) → sebbene disponibile una grande quantità di dati, impossibile scegliere la QFT che li descrive

problema: proliferazione del numero di particelle soggette alla interazione forte: possibile che fossero “quanti” di campi diversi?

soluzione: (anni '60) queste particelle risultano dalla composizione di pochi tipi di particelle veramente elementari → quarks

(carica elettrica = $1/3$, $2/3$)



Gell-Mann

Interazione Forte

problema 1: nessuna osservazione sperimentale diretta dei quarks

inizio anni '70: QFT tipo QED applicata ai quarks in cui l'analogo della carica elettrica è il **colore** → **cromodinamica quantistica (QCD)**: forza forte è trasmessa dallo scambio di **8 gluoni** "colorati"

NB – fotone non possiede carica elettrica

differenza fondamentale con la QED: interazioni forti divengono più deboli quando i quarks sono più vicini → possibile fare calcoli approssimati come nel caso della teoria elettrodebole

predizioni teoriche in accordo con le osservazioni sperimentali → validazione della QCD



Gross



Politzer



Wilczek

Interazione Forte

problema 2: perché nessuna osservazione sperimentale dei gluoni?

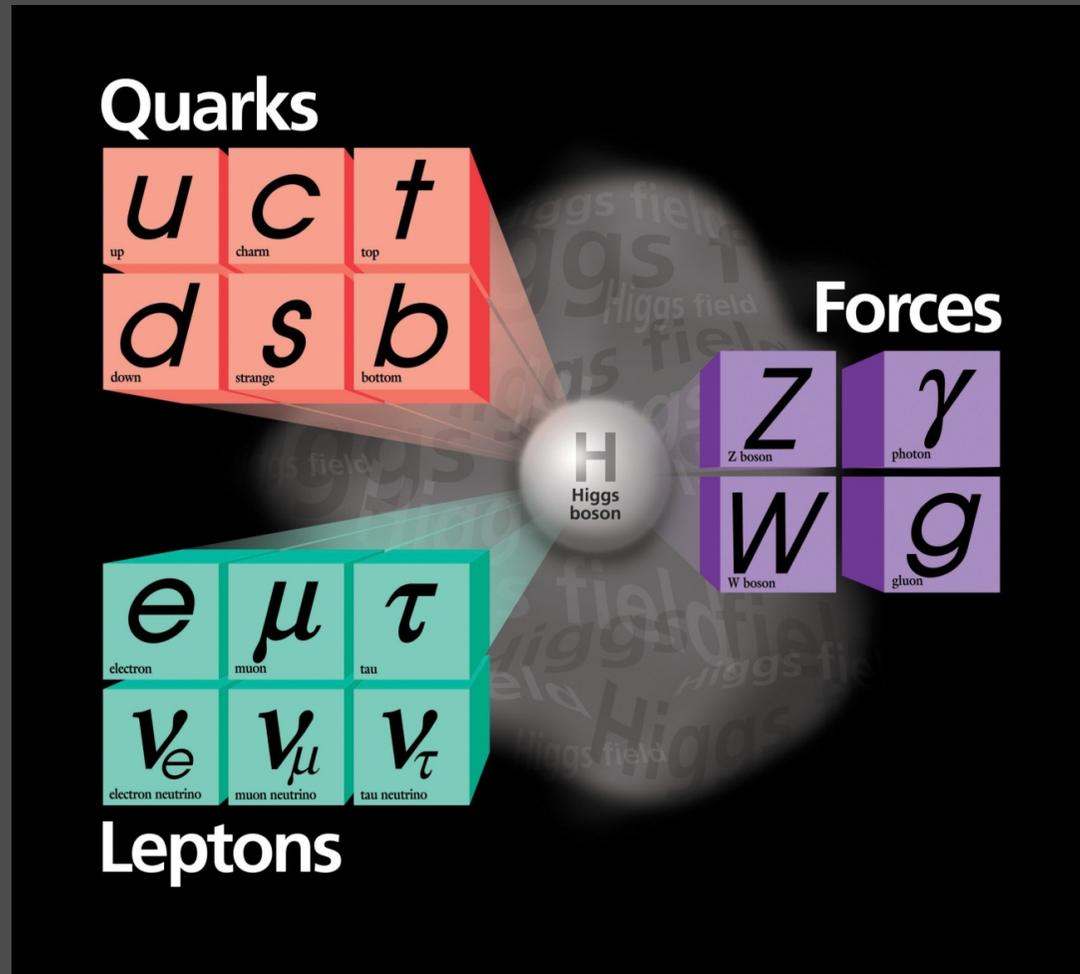
Forse, gluoni, tramite la rottura spontanea di una qualche simmetria, acquisiscono una massa molto grande? Lo stesso potrebbe essere per i quarks?

difficile da credere: come possono essere tanto più pesanti delle particelle (protoni e neutroni) che li contengono?

soluzione: la forza forte diviene **estremamente intensa** a **grandi distanze** → impossibile allontanare tra loro le particelle “colorate”
→ nessuna possibilità di rivelare quarks o gluoni isolati

NB – anche se largamente accettata, questa idea (**confinamento**) non è ancora stata dimostrata matematicamente

Modello Standard delle Particelle



la teoria finale? **NO**

Modello Standard delle Particelle

✓ limiti esplicativi

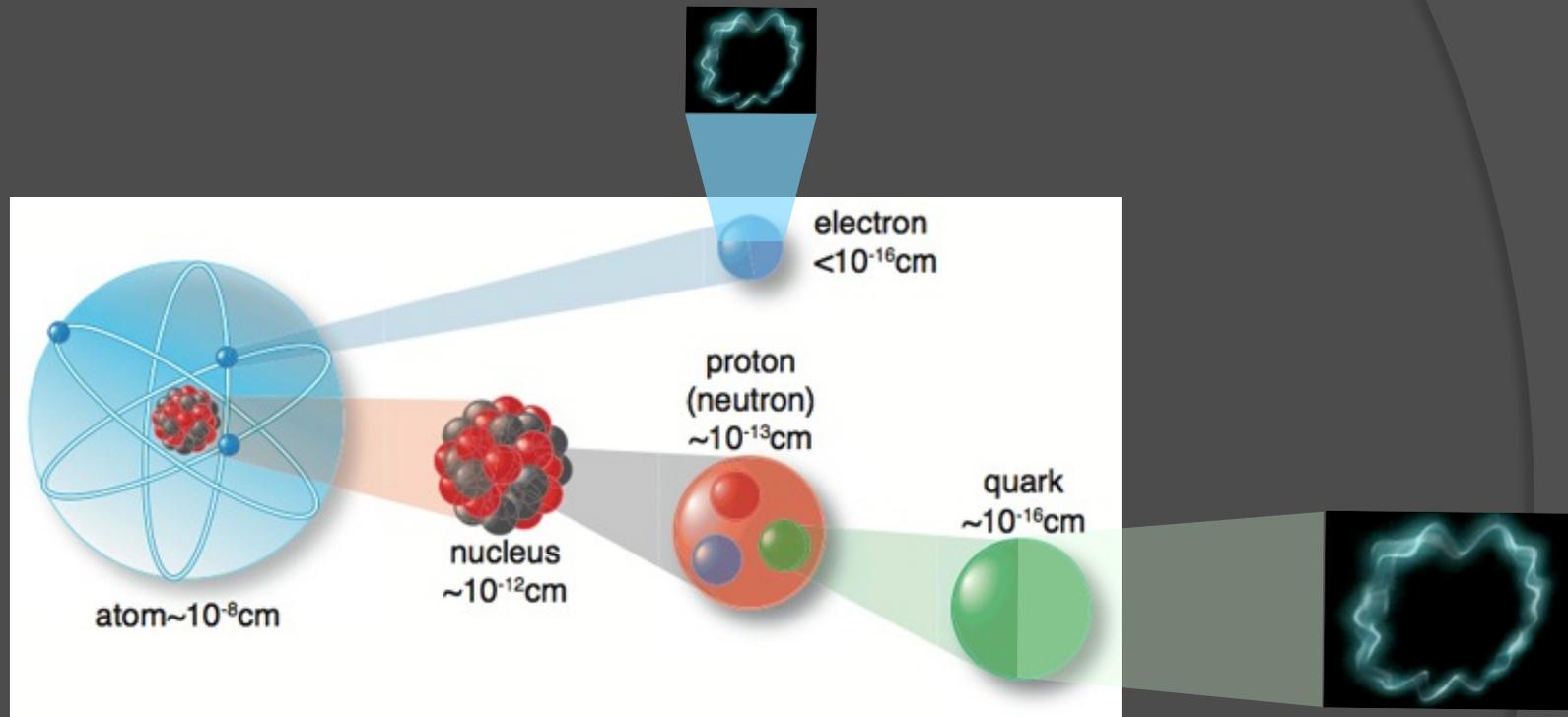
- nello SM i neutrini hanno massa = 0; dati sperimentali mostrano che, seppur piccola, la massa dei neutrini non è nulla
- nessuna traccia della gravità; questa forza è descritta da una teoria di campo che non può essere resa quantistica: non esiste alcuna ricetta per cancellare gli infiniti

✓ 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 \rightarrow
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 (**RG**) 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

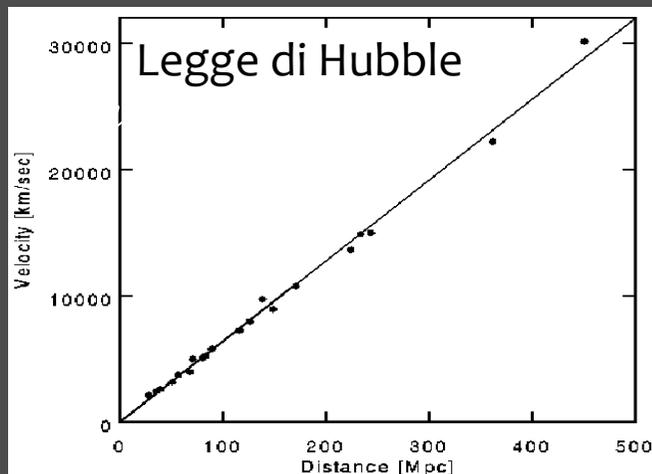
... ma:

- non esiste ancora la matematica → **equazioni della teoria ignote**
- esistono ragioni per credere che tali equazioni possiedano un numero incredibilmente grande (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 RG (Einstein) 1917

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

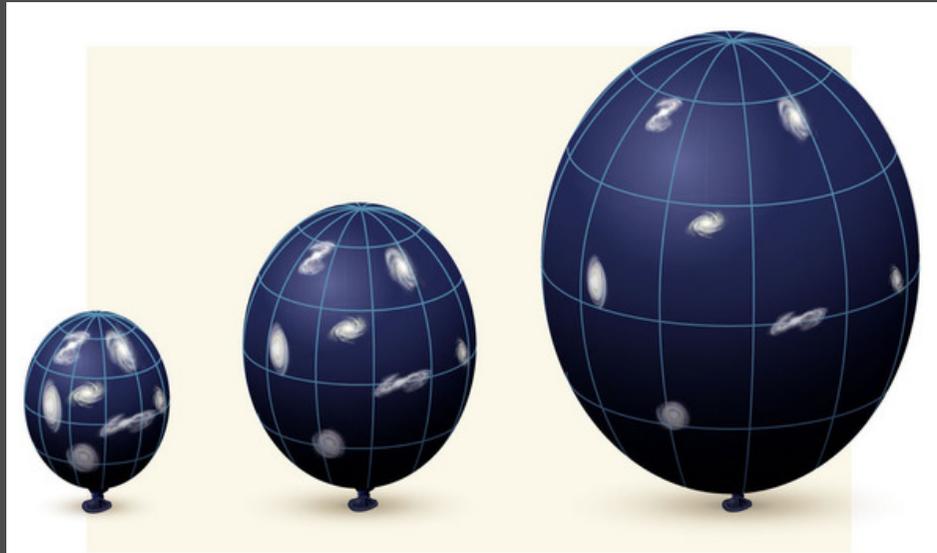


Einstein & Hubble

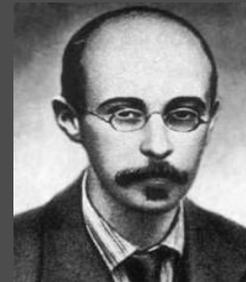


solo Lemaître, qualche anno dopo, trae conclusione più semplice: galassie in allontanamento → in passato dovevano essere ammassate

Cosmologia



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



Fridman



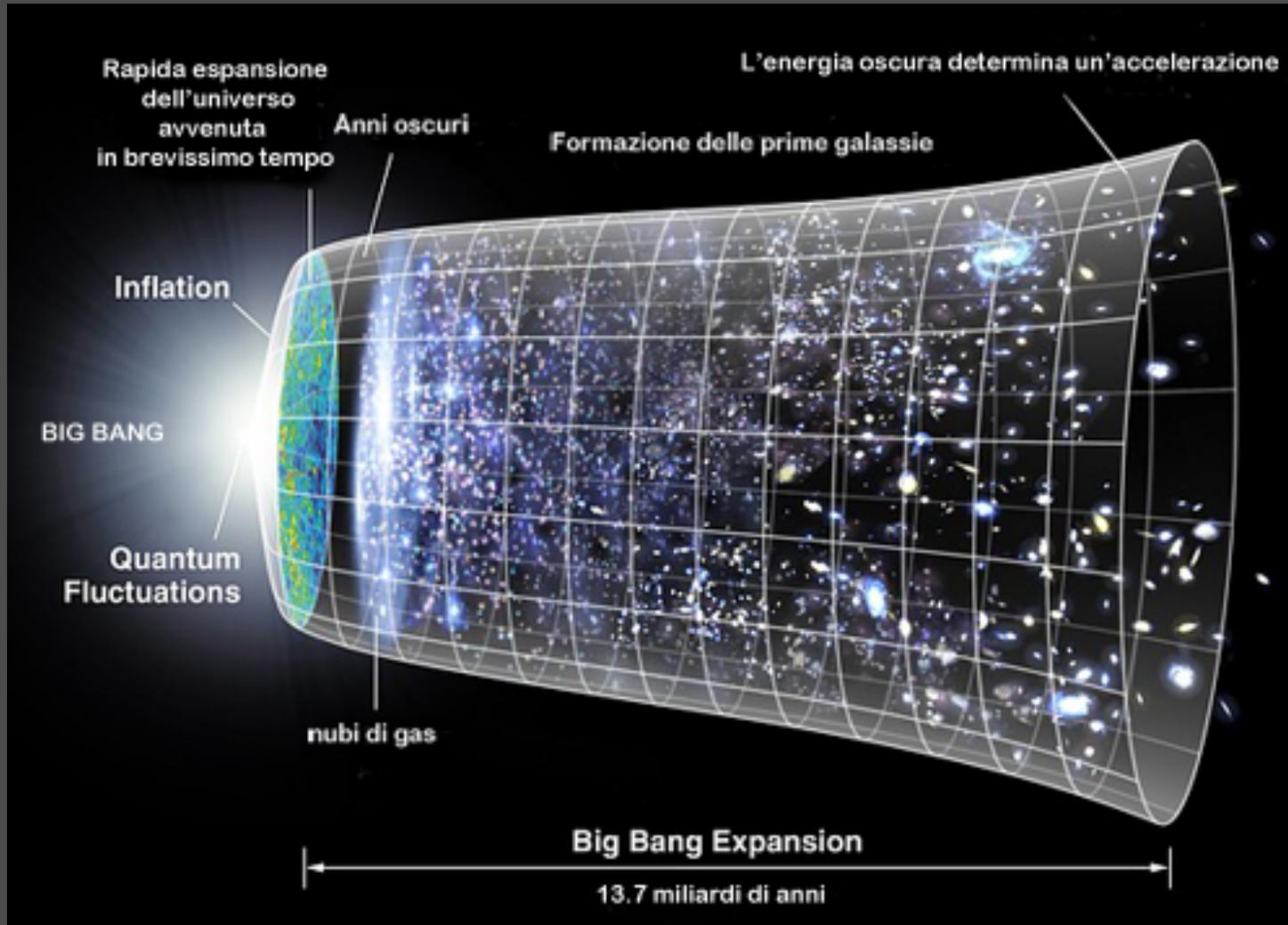
Lemaître

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

Età dell'Universo

$$H = 67 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}} \quad \longrightarrow \quad t = 1/H = 13.7 \times 10^9 \text{ y}$$

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)**

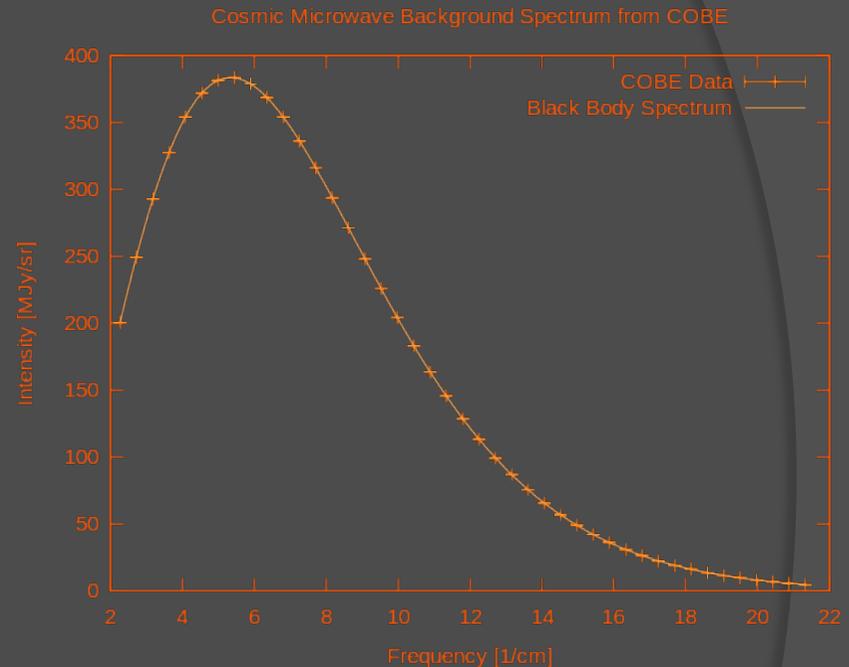
$$T = 2.725\text{ K}$$

Fondo Cosmico a Microonde



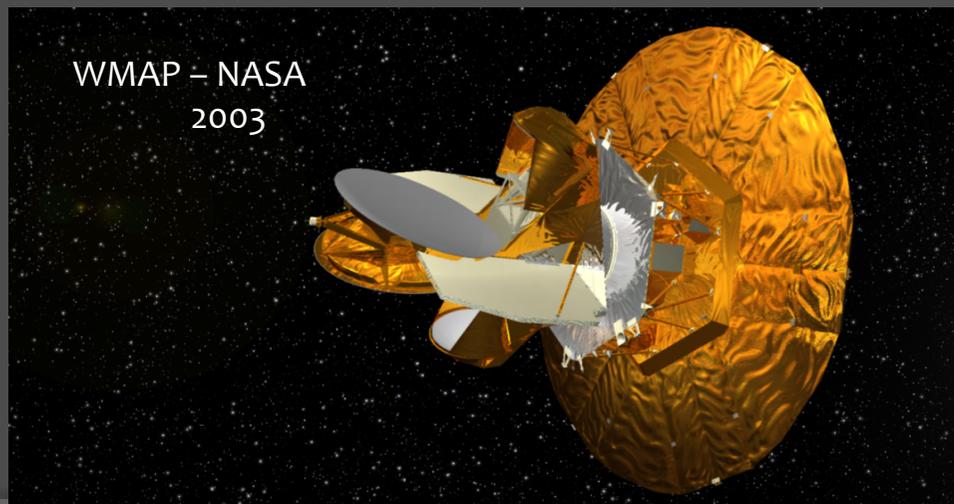
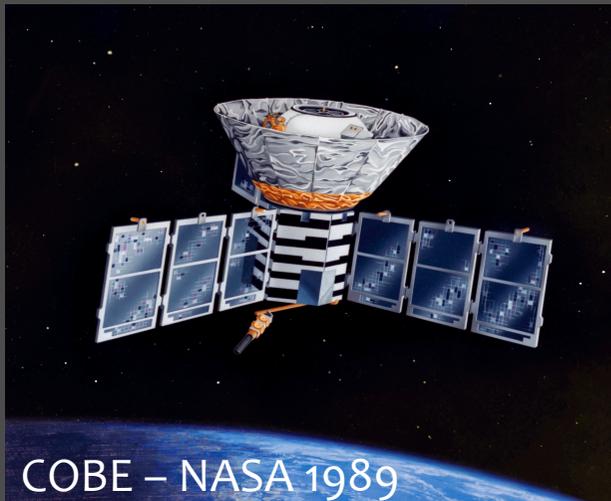
Wilson

Penzias



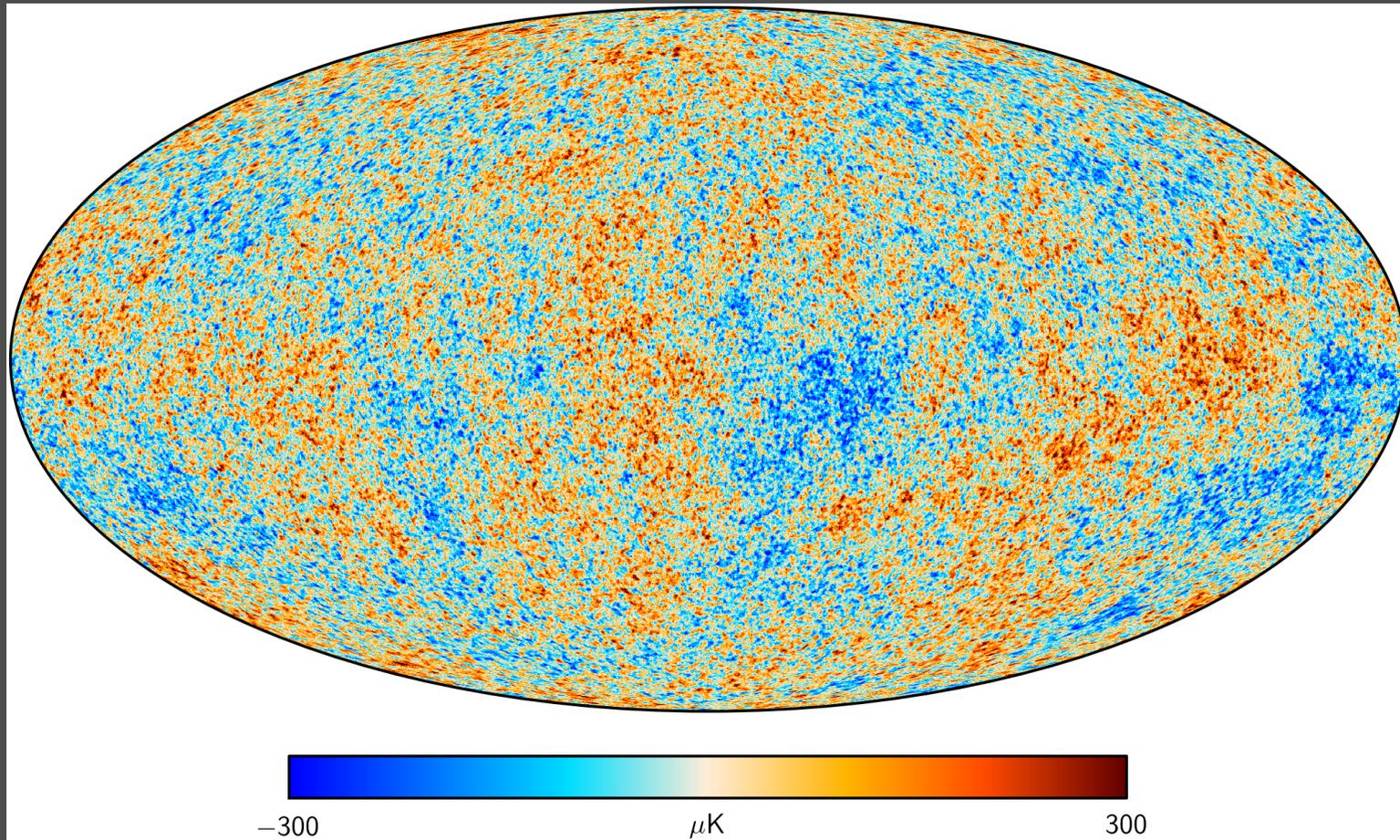
$T < 3,000 \text{ K}$ (380,000 anni dopo Big Bang): elettroni catturati dai protoni
→ formazione di atomi d'idrogeno → Universo diviene trasparente alla radiazione: quella che sopravvive non interagisce più con la materia (disaccoppiamento) e continua a raffreddarsi a causa dell'espansione

Fondo Cosmico a Microonde



Fondo Cosmico a Microonde

mappa di temperatura misurata da PLANCK (2015)



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

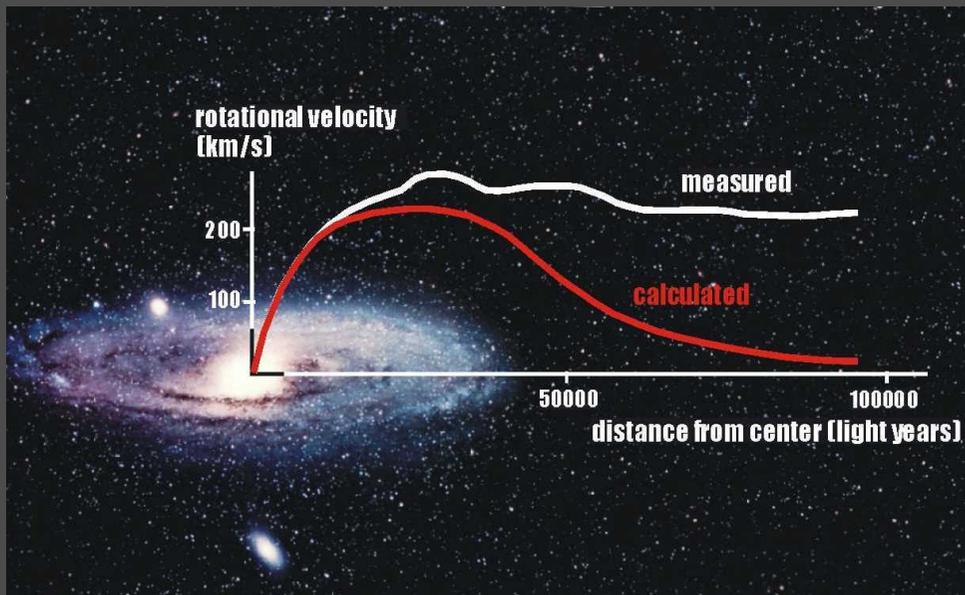
5/6 della materia dell'Universo deve essere stata **materia oscura** (non emette/assorbe luce)

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 (**dibattuto**)

<http://w3.lnf.infn.it/problema-della-materia-oscura/>



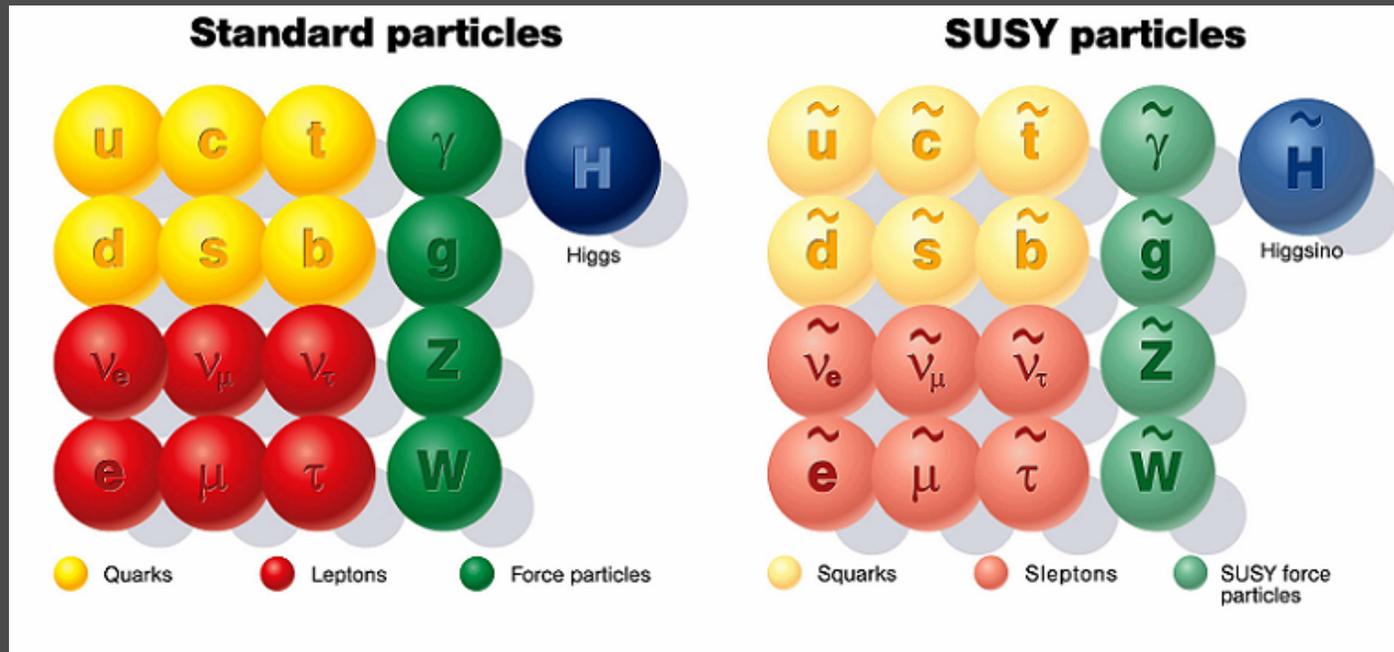
molte teorie ed esperimenti:
nessun riscontro



**nessuno sa cosa sia la
materia oscura**

Materia Oscura

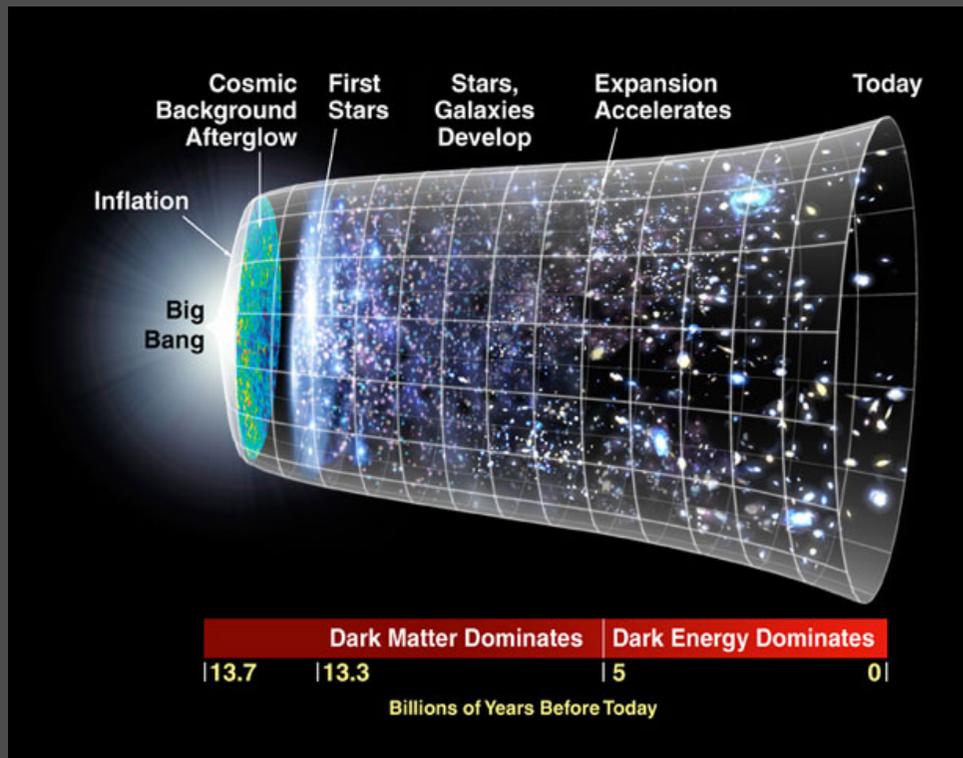
nuova simmetria **bosoni** \Leftrightarrow **fermioni**: **supersimmetria**



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

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

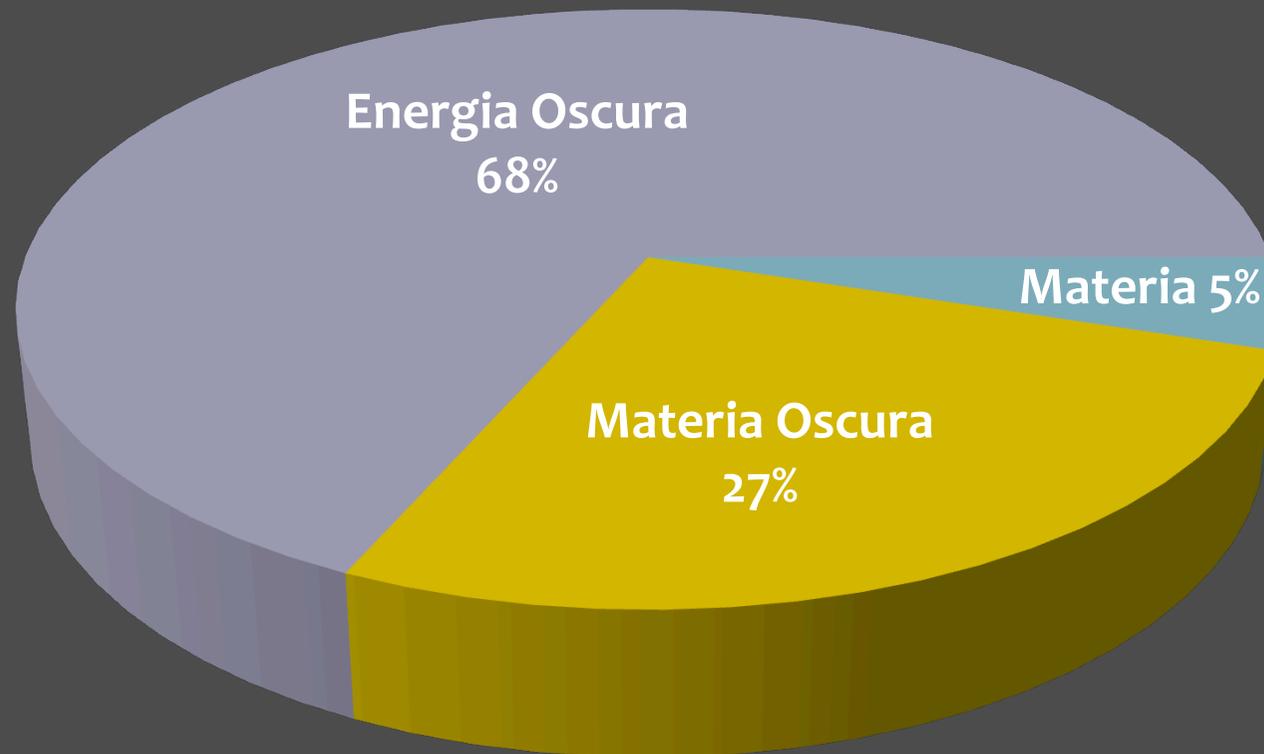
nell'ambito della **RG** l'osservazione può essere spiegata solo tramite una **energia oscura** che produce una **gravità repulsiva** tra le galassie

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 **RG** sono in accordo con l'esperimento
- **nuove forme di materia?** campi scalari → pressione negativa

(forse) il mistero più grande!

Ingredienti dell'Universo

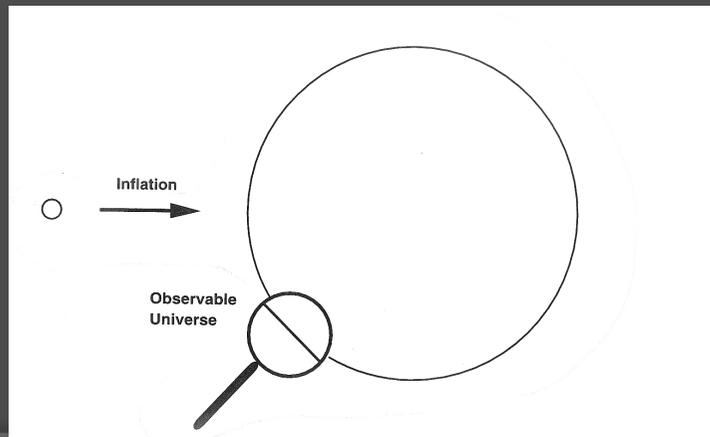


non sappiamo nulla del 95% del contenuto dell'Universo

Particelle & Cosmologia

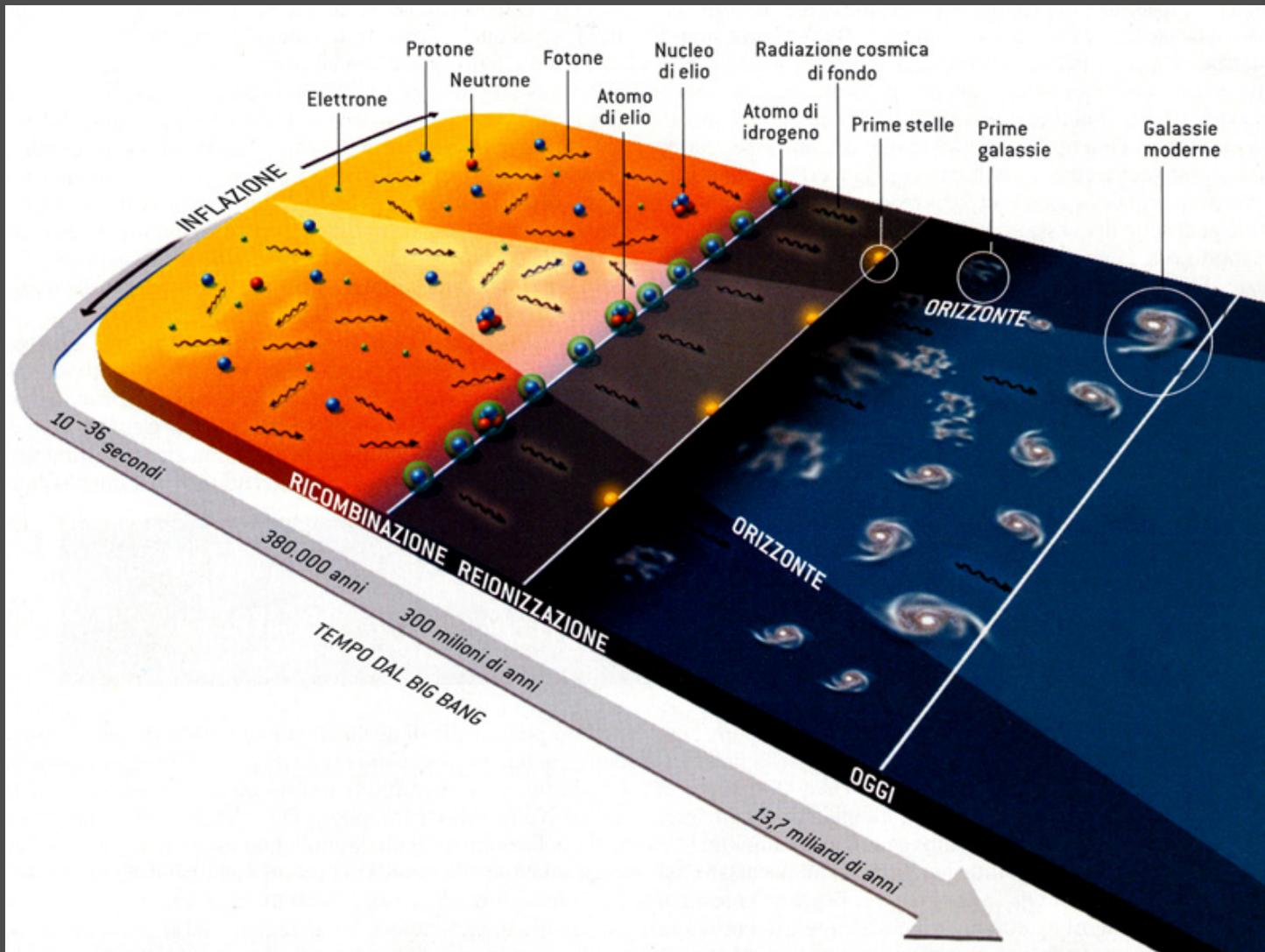
problema: perché l'Universo è così **uniforme**? come è possibile che i fotoni cosmici provenienti da direzioni opposte del cielo siano (entro 1/100,000) alla **stessa temperatura**?

soluzione: (**anni '80**) particolare **QFT** di **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 approssimativamente uniformi



Guth

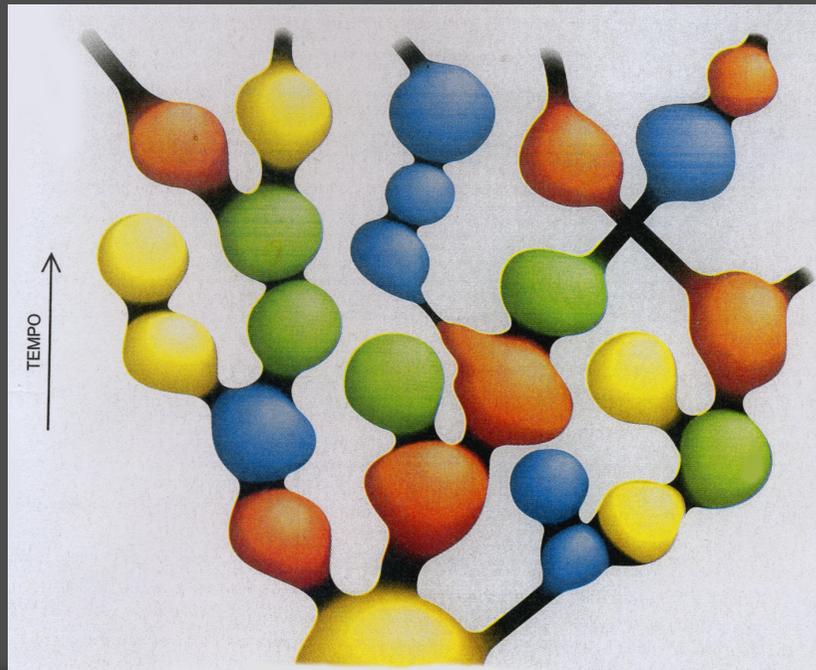
Inflazione



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: gli osservatori devono essere in una parte del Multiverso in cui le costanti della natura consentono l'**evoluzione** di **vita** e **intelligenza**

Ragionamento Antropico

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

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

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