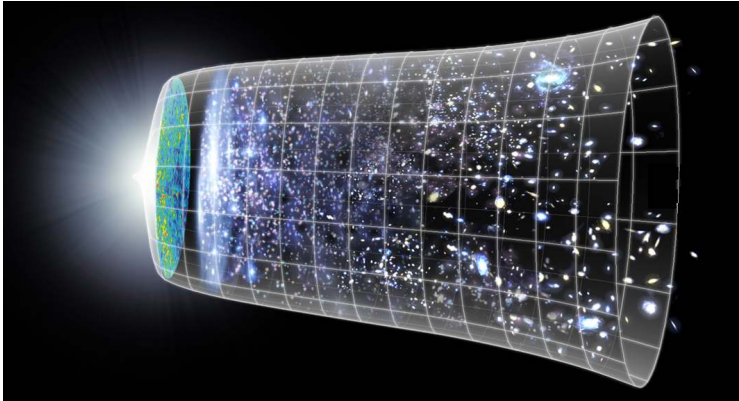


# Big Bang, materia e antimateria



Andrea Bizzeti

Università di Modena e Reggio Emilia  
Dipartimento di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche

Physics Class, Modena 23/09/2015

# Le domande fondamentali

per l'Uomo:

- ▶ chi siamo?
- ▶ da dove veniamo?
- ▶ dove stiamo andando?

per l'Universo:

- ▶ da cosa è composto?
- ▶ qual è stato il suo passato?
- ▶ quale sarà il suo futuro?

Da cosa è composto l'Universo?

- 1) **materia ordinaria** (atomi) nelle stelle, pianeti, gas interstellare
- 2) **materia oscura** (non assorbe né emette luce)
- 3) **energia oscura** (ha una azione repulsiva sulla materia)

Da cosa è composto l'Universo?

- 1) **materia ordinaria** (atomi): stelle, pianeti, gas interstellare
- 2) materia oscura (non assorbe né emette luce)
- 3) energia oscura (ha una azione repulsiva sulla materia)

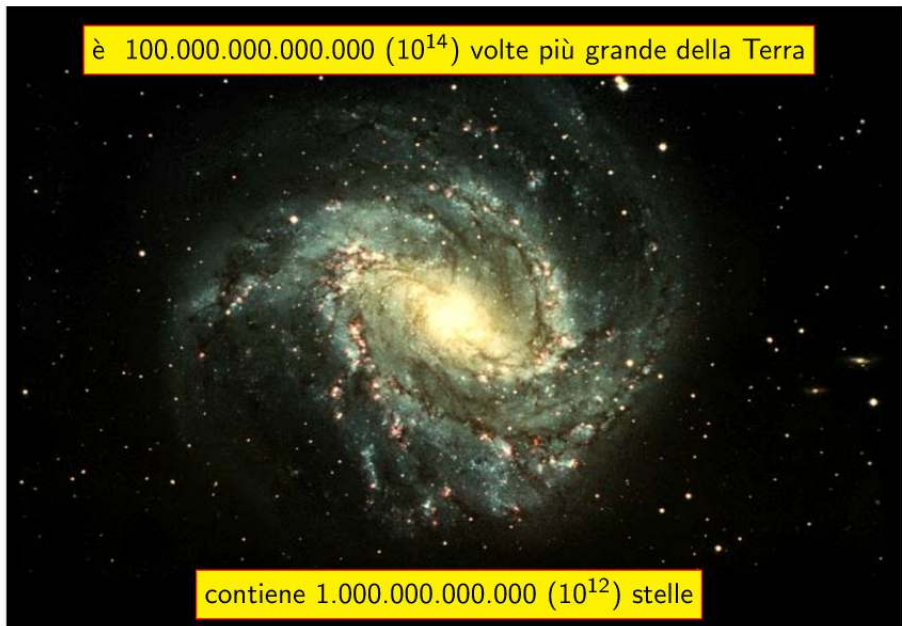
# La materia ordinaria nell'Universo: ordini di grandezza



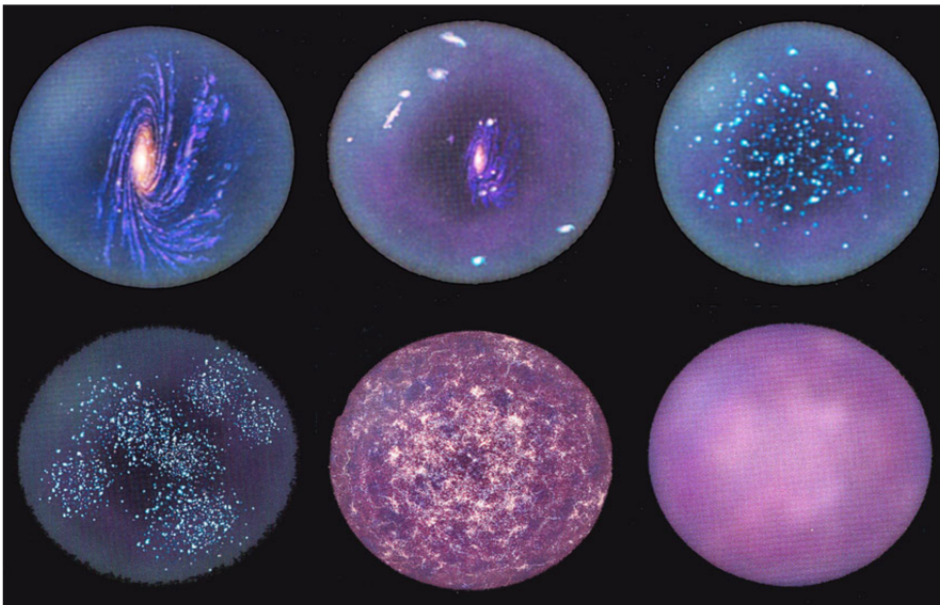
10<sup>7</sup> m

## Una galassia

è 100.000.000.000.000 ( $10^{14}$ ) volte più grande della Terra



contiene 1.000.000.000.000 ( $10^{12}$ ) stelle

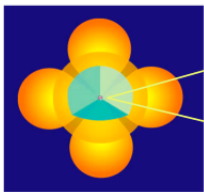


Nell'Universo ci sono 100.000.000.000 ( $10^{11}$ ) galassie ...

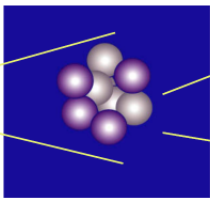
... per un totale di 10.000.000.000.000.000.000.000 ( $10^{22}$ ) stelle



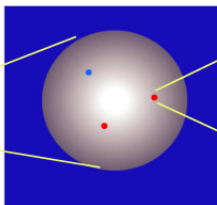
Tutte composte dagli **stessi** identici **elementi di materia**



atomo



nucleo (pesante)  
+ **elettroni** (leggeri)



protoni/neutroni



**quark**

Nell'Universo ci sono circa

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000  
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000  
000.000.000.000.000.000.000 (10<sup>80</sup>)

**elettroni** e **quark**, tutti identici tra loro, che  
si sono formati nei primissimi istanti dell'Universo

# La Fisica delle Particelle studia i costituenti elementari della materia.

Filosofia antica



(c) Andy Brice 1998

**Empedocle**  
492–432 a.C.

4 elementi  
fondamentali

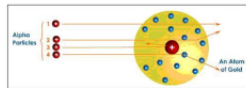
Scienza classica

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	4											5	6	7	8	9	10
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
11	12											13	14	15	16	17	18
K	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Cs	Ba	**	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
55	56	**	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uuq	Uub
87	88	**	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
**	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		
	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105

**Mendeleev**  
19° secolo

Tavola Periodica  
~ 100 elementi: atomi

Meccanica Quantistica

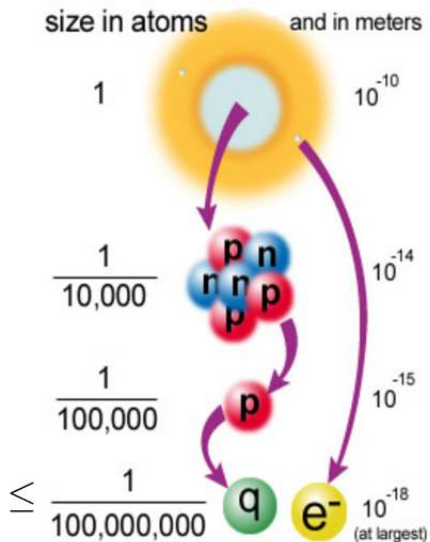


**Rutherford, Bohr**  
inizio 20° secolo

3 particelle: elettrone,  
protone, neutrone

Oggi: quark e leptoni

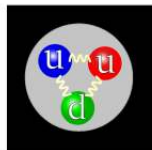
# Quali forze tengono insieme la materia



atomo: interazione elettromagnetica  
tra nucleo(+) ed **elettroni**(-)

nucleo: interazione forte  
tra protoni e neutroni

protoni e neutroni: interazione forte  
tra i **quark**



# Decadimento delle particelle

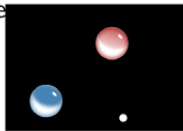
Nel decadimento una particella instabile **scompare** trasformandosi in **altre particelle** più leggere.

Ad esempio, per effetto della interazione debole:

- ▶ il **neutrone** libero ( $n$ ) **decade** trasformandosi in un protone ( $p$ ), un elettrone ( $e^-$ ) ed un anti-neutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) neutro e leggero

Conservazione energia:

$$m_n c^2 \rightarrow m_p c^2 + m_e c^2 + m_{\bar{\nu}_e} c^2 + E_c$$

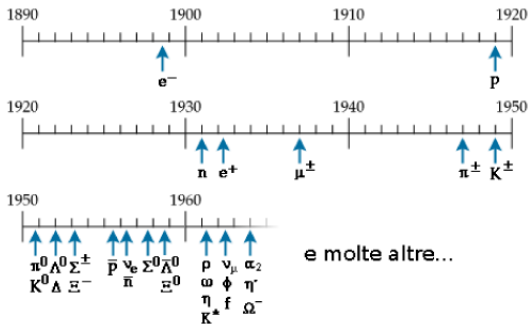


- ▶ il **muone** negativo ( $\mu^-$ ) **decade** trasformandosi in un neutrino ( $\nu_\mu$ ), un elettrone ( $e^-$ ) e un anti-neutrino ( $\bar{\nu}_e$ )

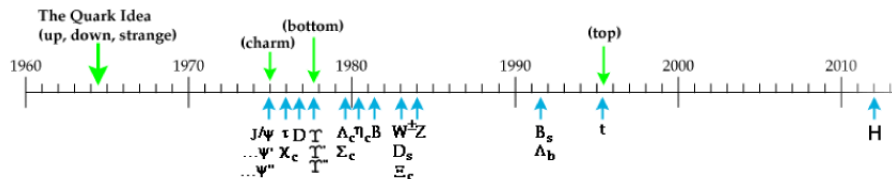


Le **particelle prodotte** non sono “pezzi” della particella iniziale. Sono particelle completamente nuove, che **prima non esistevano**.

Sono state scoperte molte particelle, quasi tutte **instabili**

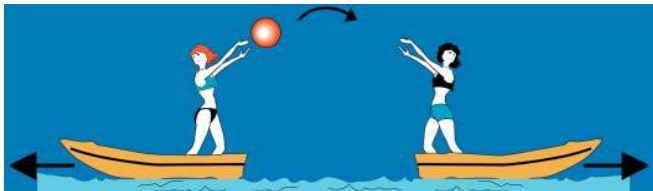


e quasi tutte composte da **quark**



# Le quattro forze della Natura

- ▶ La Meccanica Quantistica descrive le interazioni come scambio di particelle “portatori di forza”
- ▶ una analogia in fisica classica:

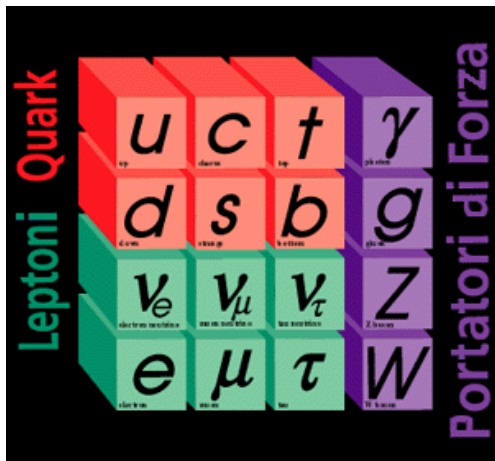


Lo scambio di particelle (pallone) è responsabile della forza

Tipo di forza	Particella scambiata	Dove si manifesta
forte	gluoni $g$	nuclei atomici
elettromagnetica	fotone $\gamma$	elettricità, luce, onde radio
debole	bosoni $W, Z$	Sole, decadimenti, neutrini
gravitazionale	gravitone (?)	peso, moto corpi celesti

Non si riesce (ancora) a trattare quantisticamente l'interazione gravitazionale.

# I costituenti fondamentali della materia



Bosone  
di Higgs

$H$

(spiega l'origine  
della massa)

- ▶ 12 particelle di materia: 6 **quark** + 6 **leptoni**
- ▶ Inoltre: 4 portatori di **forza** + 1 bosone di **Higgs**

L'**interazione debole** provoca il **decadimento** dei quark e leptoni più pesanti in quark e leptoni più leggeri

⇒ Uniche particelle di materia **stabili**: neutrini, elettrone, protone

# Materia e anti-materia

- ▶ Per ogni particella costituente della materia (quark o leptone) esiste una antiparticella, costituente dell'antimateria.
- ▶ Le antiparticelle hanno alcune proprietà **identiche** alle corrispondenti particelle (es.: massa, spin) ed altre **opposte** (es.: carica elettrica, momento magnetico).

Alcuni esempi:

Particella		carica elettrica	Antiparticella		carica elettrica
elettrone	$e^-$	$-e$	positrone	$e^+$	$+e$
quark	$u$	$+\frac{2}{3}e$	antiquark	$\bar{u}$	$-\frac{2}{3}e$
quark	$d$	$-\frac{1}{3}e$	antiquark	$\bar{d}$	$+\frac{1}{3}e$
protone	$p = uud$	$+e$	antiprotone	$\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$-e$
neutrone	$n = udd$	$0$	antineutrone	$\bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$	$0$
mesone $\pi^+$	$\pi^+ = u\bar{d}$	$+e$	mesone $\pi^-$	$\pi^- = d\bar{u}$	$-e$

## Materia

e

## anti-materia

Leptoni

carica  
elettrica

Anti-leptoni

$$\begin{array}{ccc|c} \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} & \begin{array}{c} 0 \\ -1 \end{array} \left| \begin{array}{c} +1 \\ 0 \end{array} \right. & \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix} \end{array}$$

Quark

carica  
elettrica

Anti-quark

$$\begin{array}{ccc|c} \begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} & \begin{array}{c} +\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{3} \end{array} \left| \begin{array}{c} +\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{array} \right. & \begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \bar{s} \\ \bar{c} \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \bar{b} \\ \bar{t} \end{pmatrix} \end{array}$$

↑

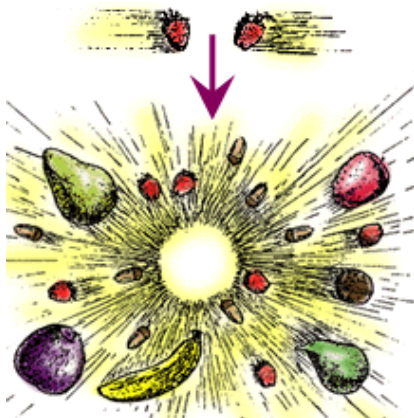
negli **atomi**

Coppie particella-antiparticella possono essere **create** ( $E \geq 2mc^2$ ) o **distrutte** (annichilazione). Esempio:  $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ ,  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

**Positrone** e **antiprotone** sono stabili finché non incontrano materia.

## Come si producono le particelle?

- ▶ Si accelerano particelle stabili fino a energie molto grandi e si fanno scontrare tra loro
- ▶ una parte della loro energia viene utilizzata per creare nuove particelle ( $E = mc^2$  per ogni particella di massa  $m$ )



Da cosa è composto l'Universo?

- 1) materia ordinaria (atomi) nelle stelle, pianeti, gas interstellare
- 2) **materia oscura** (non assorbe né emette luce)
- 3) energia oscura (ha una azione repulsiva sulla materia)

## Evidenze astronomiche di materia oscura

Dalla **luce** che una galassia emette è possibile stimare la massa totale delle stelle che contiene (“**massa visibile**“)

È anche possibile misurare la **massa totale** della galassia tramite gli **effetti gravitazionali** che produce:

- ▶ effetto di **lente gravitazionale**
- ▶ **velocità di rotazione** nel moto orbitale delle stelle

La massa totale risulta molto superiore a quella visibile!

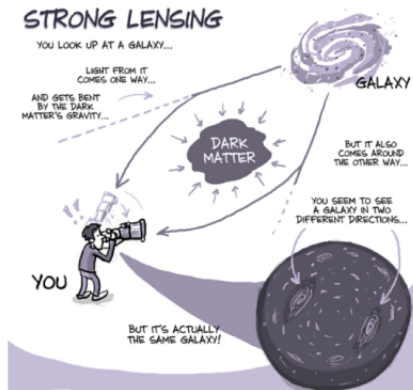
La massa non contenuta nelle stelle (“**materia oscura**“) occupa una regione più ampia di quella occupata dalle stelle

# Evidenze astronomiche di materia oscura

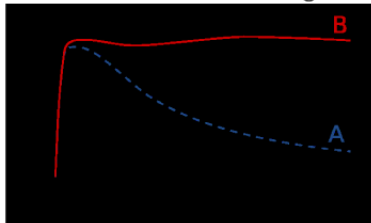
Lenti gravitazionali:



anello = immagini multiple di una galassia blu per effetto lente gravitazionale prodotto da una galassia gialla (al centro)



Velocità di rotazione nelle galassie



- ▶ A = velocità **calcolate** in base alla massa visibile
- ▶ B = velocità **misurate**

La “periferia” della galassia contiene prevalentemente materia oscura

# L'Universo in espansione

Sappiamo misurare **distanza** e **velocità** delle galassie:

- ▶ la distanza dalla luce che ci arriva da alcuni tipi di stelle (Cefeidi, SN Ia) di cui conosciamo la quantità di luce emessa
- ▶ la **velocità** dallo spostamento delle righe spettrali (lunghezze d'onda caratteristiche) per **effetto Doppler**

Le galassie lontane si allontanano con una velocità proporzionale alla distanza (legge di Hubble).  $\Rightarrow$  **L'Universo si sta espandendo.**

L'**espansione** dell'Universo è **isotropa** (uguale in tutte le direzioni).

Un osservatore in un'altra galassia misurerebbe la stessa espansione



# Come era l'Universo molto tempo fa?

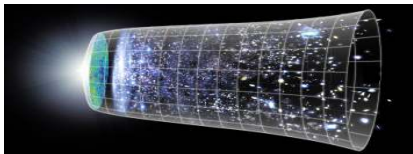
L'Universo si sta espandendo

- ▶ nell'espandersi si raffredda
- ▶ tornando indietro nel tempo aumentano **densità** e **temperatura**
- ▶ l'energia cinetica media delle particelle aumenta con la temperatura:  
 $E_c \approx k_B T$  (Boltzman)

**14 miliardi di anni fa l'Universo era molto più piccolo, denso e caldo**

- ▶ misuriamo il tempo a partire da quando l'Universo era piccolissimo, estremamente denso e caldissimo ( $t = 0$  alla "singolarità iniziale")
- ▶ le leggi della Fisica che conosciamo permettono di descrivere l'evoluzione dell'Universo per tempi  $t > 10^{-12}$  s ( $T \approx 10^{12}$  K)
- ▶ possiamo fare ipotesi per tempi un po' più brevi (e temperature un po' più alte)
- ▶ non conosciamo per niente le leggi della fisica che valgono a tempi molto più brevi (e temperature molto più alte)

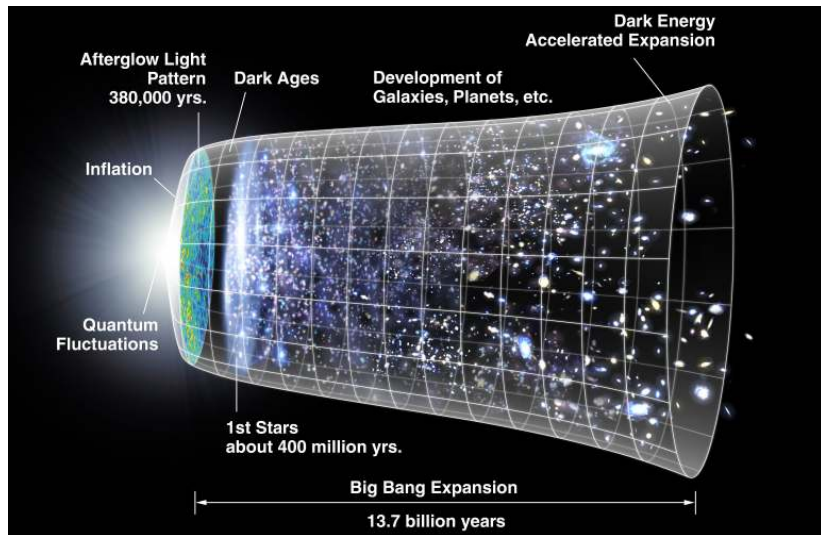
# Storia dell'Universo dal Big Bang in poi: eventi principali



→ t

- ▶ dall'istante iniziale ( $t = 0$ ) a  $t \approx 10^{-32}$  (?) s espansione molto rapida (periodo inflazionario), ne sappiamo poco
- ▶ dopo: è presente una grande quantità di **radiazione** elettromagnetica in **equilibrio** con particelle di **materia** e **antimateria** (es.:  $\gamma\gamma \leftrightarrow e^+e^-$ )
- ▶ per  $t \approx 1-10$  s: **annichilazione** materia-antimateria ( $k_B T \approx mc^2$ )
  - ▶  $k_B T \gg mc^2$ : equilibrio tra le reazioni di creazione e annichilazione
  - ▶  $k_B T \ll mc^2$ : materia e antimateria continuano ad annichilarsi ma non vengono più create (es.:  $\gamma\gamma \not\leftrightarrow e^+e^-$ )
- ▶ per  $t \approx 200$  s: **nucleosintesi** primordiale  $p, n \rightarrow {}^4\text{He}$  (,  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^7\text{Li}$ )  
i protoni rimasti formeranno atomi di  ${}^1\text{H}$
- ▶ per  $t \approx 380\,000$  anni ( $T \approx 3\,000$  K): **ricombinazione**  $e^-$ , nuclei  $\rightarrow$  **atomi**
- ▶ per  $t \approx 400\,000\,000$  anni: si formano le prime **stelle**

# Storia dell'Universo in espansione



## Da cosa è composto l'Universo?

- 1) materia ordinaria (atomi) nelle stelle, pianeti, gas interstellare
- 2) materia oscura (non assorbe né emette luce)
- 3) **energia oscura** (ha una azione repulsiva sulla materia)

# L'energia oscura

Le galassie **molto lontane** deviano dalla legge di Hubble

Misuriamo la velocità che avevano quando hanno emesso la luce che riceviamo, ovvero qualche miliardo di anni fa.

Risultato sorprendente: **l'espansione sta accelerando!**

Ci aspettavamo il contrario:

attrazione gravitazionale → rallentamento espansione

Per spiegare l'accelerazione dell'espansione si ipotizza l'esistenza di una **“energia oscura”** con effetto repulsivo

Un valore diverso da zero per la “costante cosmologica” nelle equazioni della Relatività Generale avrebbe questo effetto.

## Le tracce del Big Bang

Oggi ( $t = 13\,800\,000\,000$  anni)

riceviamo **segnali dal cosmo**

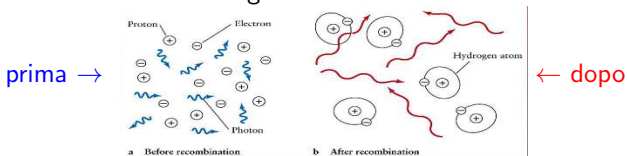
che provengono da un'epoca molto remota:

quella della **ricombinazione** atomica

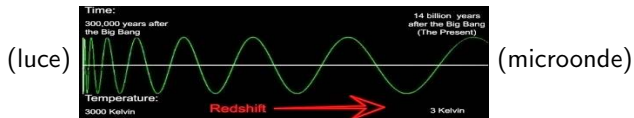
( $t = 380\,000$  anni)

# La ricombinazione degli atomi ( $t \approx 380\,000$ anni)

- ▶ Prima della ricombinazione:  $T > 3\,000\text{ K} \Rightarrow$  materia ionizzata, luce diffusa continuamente dagli elettroni liberi



- ▶ Dopo la ricombinazione:  $T < 3\,000\text{ K} \Rightarrow$  atomi neutri. Da allora l'Universo è **trasparente** alla radiazione elettromagnetica
- ▶ La **radiazione** liberata 380 000 anni fa viaggia ancora per l'Universo
- ▶ L'espansione dell'Universo ( $\times 1\,000$ ) ne ha aumentato la lunghezza d'onda



# Previsione e scoperta del fondo cosmico a microonde

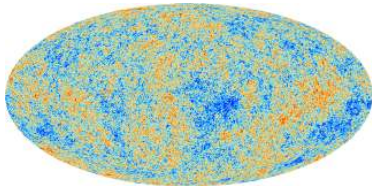
- ▶ Nel 1940 **George Gamow** predisse che la luce emessa nella Ricombinazione dovrebbe essere rivelabile ancora oggi
- ▶ predisse anche che la radiazione sarebbe stata **isotropa** e avrebbe avuto uno spettro di frequenze di **corpo nero** con una temperatura di **pochi Kelvin**
  
- ▶ Nel 1965 **Wilson e Penzias** lavoravano a un ricevitore a microonde molto sensibile per comunicazioni satellitari
- ▶ Trovarono un rumore inatteso da cui non riuscivano a liberarsi
- ▶ Si capì presto che per puro caso avevano fatto una scoperta epocale  
→ premio Nobel 1976



# Misure del fondo cosmico a microonde (CMB)

Guardando il cielo con rivelatori sensibili alle microonde si osserva una radiazione di **corpo nero** uniforme in tutte le direzioni con temperatura di **2.7255 K**.

Plank

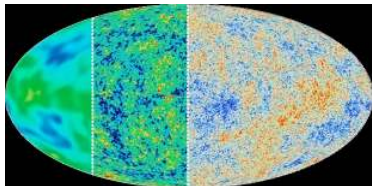


- ▶ Con strumenti molto sensibili (i satelliti **Plank** e, prima ancora, WMAP e COBE) si osservano **piccole fluttuazioni della temperatura** ( $\approx 10\mu\text{K}$ ) al variare della direzione
- ▶ Queste fluttuazioni riflettono le variazioni di densità del plasma prima della Ricombinazione
- ▶ Studiandone la decomposizione spettrale (correlazioni angolari) possiamo ottenere informazioni molto precise sulla composizione del plasma primordiale

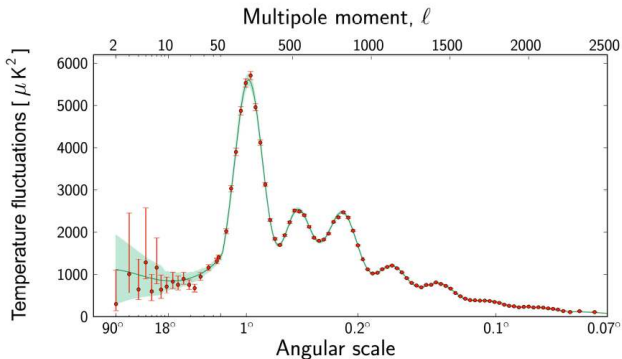
COBE

WMAP

Plank



# Misure del fondo cosmico a microonde (CMB)



- ▶ Lo spettro di potenza del CMB è descritto molto bene dal modello cosmologico standard
- ▶ È possibile determinare con grande precisione i parametri cosmologici, tra cui le quantità di: materia ordinaria, materia oscura, energia oscura.

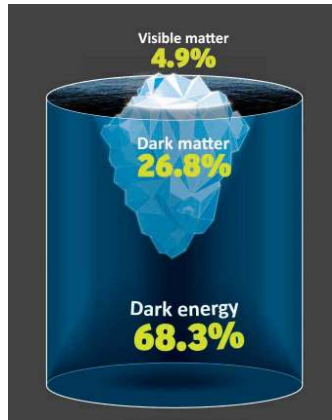
# Da cosa è composto l'Universo?

Dalle misure del fondo cosmico a microonde + altre misure

- |                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| 1) <b>materia ordinaria</b> (atomi) | 4.9 %  |
| di cui: H e He liberi               | 4.0 %  |
| stelle                              | 0.5 %  |
| atomi pesanti ( $\neq$ H, He)       | 0.03 % |
| 2) <b>materia oscura</b>            | 26.8 % |
| 3) <b>energia oscura</b>            | 68.3 % |

Le percentuali si riferiscono al contributo che ciascun componente fornisce all'energia dell'Universo

La materia ordinaria è solo la punta dell'iceberg  
( $\sim 5\%$  del totale di energia nell'Universo)



## Rimangono alcune domande:

- ▶ Cosa è successo all'**anti-materia** ?  
subito dopo il Big Bang ce ne era in abbondanza
- ▶ Da cosa è composta "**materia oscura**" ?
- ▶ Qual è la natura dell' "**energia oscura**" ?

Qual è la natura dell' “energia oscura” ?

Non lo sappiamo!

# Cosa sappiamo della “materia oscura” ?

- ▶ **Non** è composta da:
  - atomi (non assorbe né emette luce)
  - particelle cariche (non diffonde la luce)
  - neutrini (massa troppo piccola)
  - altre particelle note (instabili)
  - corpi celesti compatti (no lente gravitazionale)
- ▶ Interagisce gravitazionalmente
- ▶ Interagisce pochissimo (niente?) tramite le interazioni forte, elettromagnetica e debole  
⇒ difficile da produrre e da rivelare

## Come si studiano le particelle di materia oscura?

- ▶ cercando le interazioni di quelle già presenti in natura con grandi **rivelatori sotterranei**
- ▶ con esperimenti agli **acceleratori**, cercando di rivelare quelle prodotte in collisioni ad alta energia
- ▶ con misure di precisione di **decadimenti rari** di particelle note, la cui probabilità dipende dall'esistenza o meno di nuove particelle

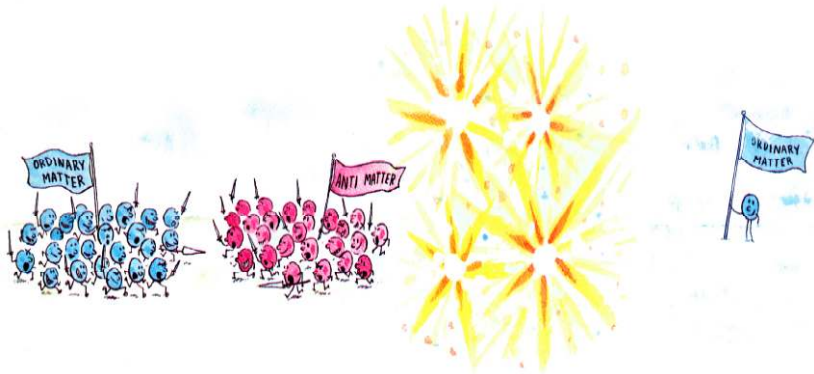
## Cosa è successo all'antimateria ?

- ▶ Si ritiene che materia e antimateria fossero presenti in **uguale quantità** all'epoca del Big Bang
- ▶ L'Universo attuale non sembra contenere antimateria:
  - ▶ **Sole** e sistema solare sono costituiti da materia
  - ▶ se alcune regioni dell'Universo fossero costituite da antimateria osserveremmo i raggi **gamma** prodotti nell'**annichilazione** al confine tra le regioni di materia e quelle di antimateria
  - ▶ i pochi positroni e pochissimi protoni che troviamo nei raggi cosmici sono compatibili con meccanismi di **produzione secondaria** (da collisioni tra particelle di materia)
  - ▶ esperimenti nello spazio alla ricerca di **anti-nuclei** hanno dato risultato negativo
- ▶ La materia e l'antimateria presenti inizialmente erano **un miliardo** di volte più abbondanti della materia attuale.

La materia è **quasi tutta**, ma **non tutta**, scomparsa per annichilazione con l'antimateria.

# Cosa è successo all'antimateria ?

Ogni particella di materia si annichila con una di antimateria



Alla fine rimane una piccola quantità di materia e niente antimateria  
⇒ all'inizio dell'annichilazione era presente più materia che antimateria

$$\frac{\text{materia}}{\text{antimateria}} (\text{inizio annichilazione}) = 1,000\,000\,001$$

Perché?

## Cosa è successo all'antimateria ?

$$\frac{\text{materia}}{\text{antimateria}}(\text{inizio annichilazione}) = 1,000\,000\,001 \quad \text{Perché?}$$

Possibili spiegazioni:

- ▶ Era così fin dall'inizio ("fine tuning"): ci credono in pochi
- ▶ All'inizio le quantità di materia e antimateria erano uguali, poi si è formata una piccola differenza (prima dell'annichilazione)

Con "inizio" intendiamo  $t \approx 10^{-32}$  s, subito dopo il periodo inflazionario dell'Universo

Condizioni per la formazione di questa differenza (Andrei Sacharov 1967):

1. violazione del numero barionico  $B = 3[n(q) - n(\bar{q})]$
2. violazione delle simmetrie C e CP, ovvero comportamento **diverso** (né uguale né opposto) di materia e antimateria
3. stato di **non equilibrio** (altrimenti qualunque reazione è bilanciata dalla reazione inversa)

La condizione (1) e l'equilibrio portano a uguali quantità di materia e antimateria

## Condizioni di Sacharov:

### 1. violazione del numero barionico:

**prevista** da teorie che estendono il “modello standard”  
(teoria attuale delle particelle elementari e delle loro interazioni)

### 2. violazione delle simmetrie C e CP:

- ▶ il “modello standard” la prevede, ma **non abbastanza**:

$$\frac{\text{materia}}{\text{antimateria}}(\text{annich.}) - 1 = 10^{-19}(\text{previsto}) \ll 10^{-9}(\text{osservato})$$

- ▶ è attivamente studiata con esperimenti agli acceleratori. Finora tutti i risultati sono in accordo con il “modello standard”

### 3. stato di **non equilibrio** :

**previsto** in alcune fasi dell'evoluzione dell'Universo  
(prima dell'annichilazione)

# Conclusioni

- ▶ Abbiamo parlato dell'evoluzione dell'Universo e di come è collegata alle proprietà delle particelle elementari
- ▶ L'attuale teoria delle particelle elementari ("modello standard") è certamente incompleta, perché non spiega (almeno):
  - ▶ da cosa è costituita la materia oscura
  - ▶ da dove proviene l'asimmetria materia-antimateria nell'Universo
- ▶ C'è certamente nuova fisica da scoprire!

