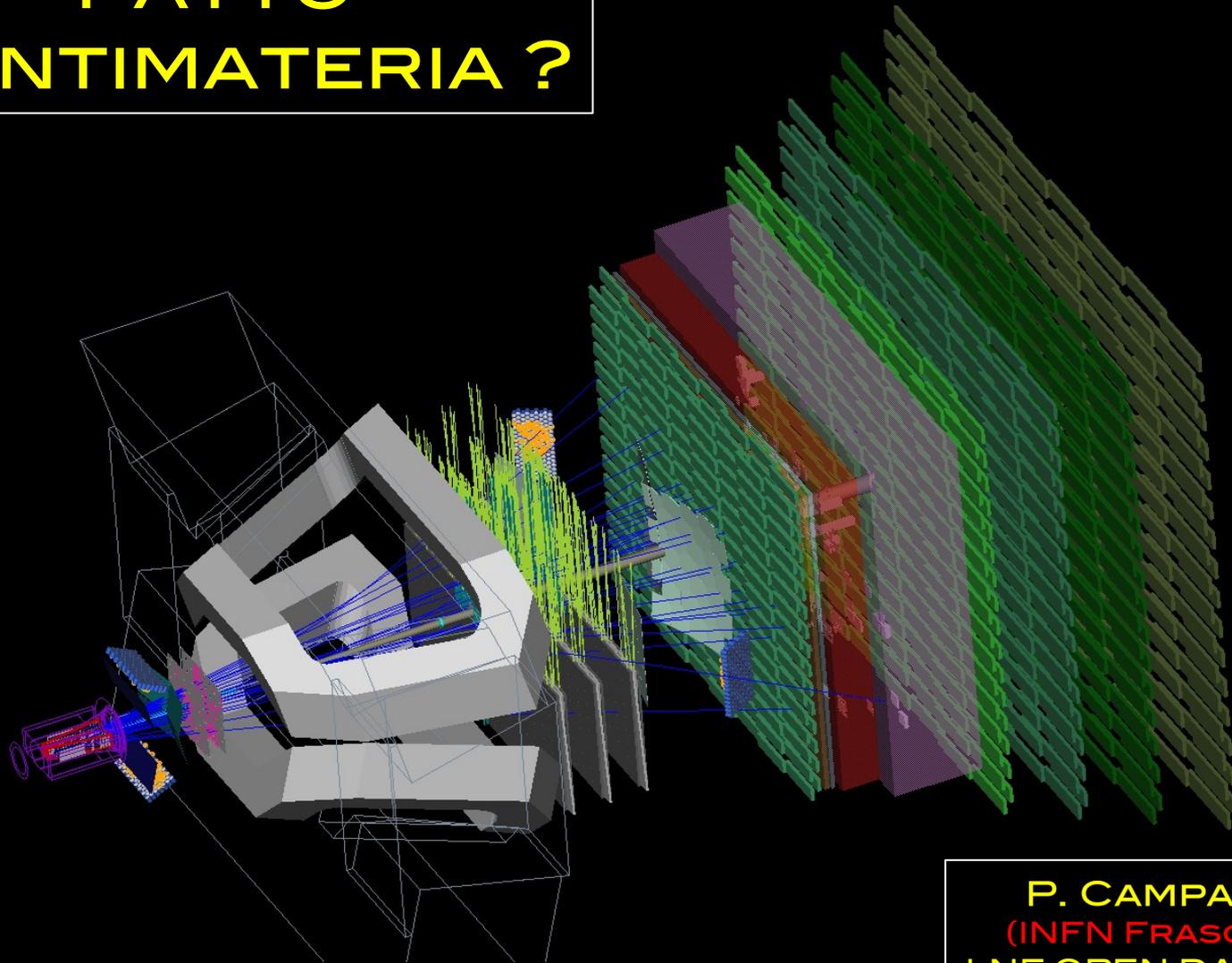


# CHE FINE HA FATTO L'ANTIMATERIA ?



**P. CAMPANA**  
(INFN FRASCATI)  
LNF OPEN DAY 2015  
23/05/2015



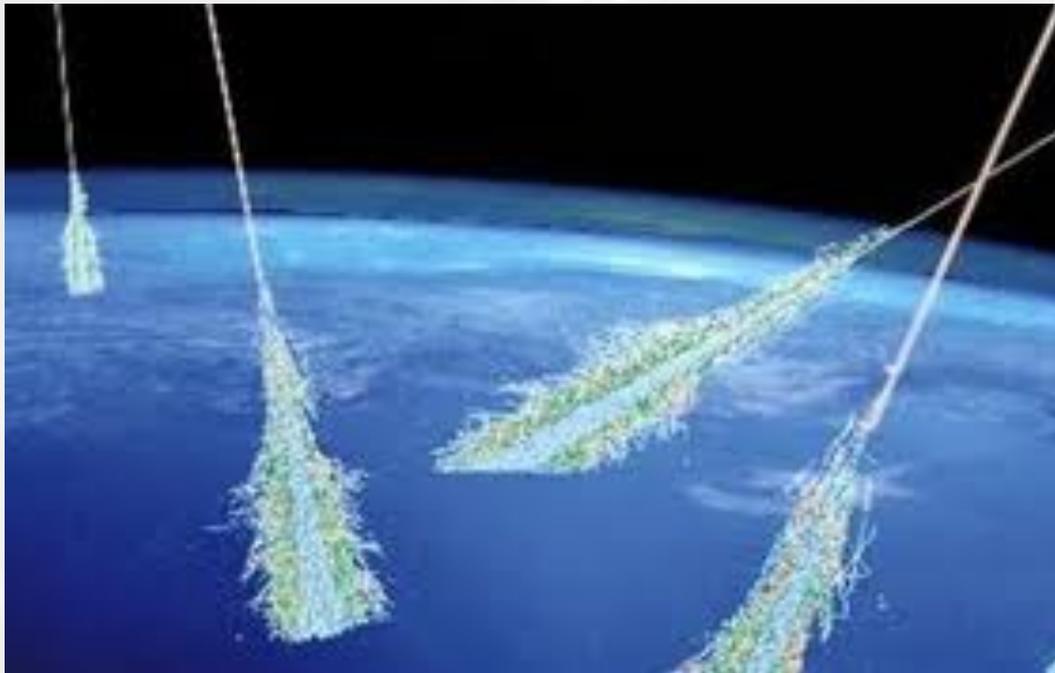
*“Dobbiamo considerare un caso il fatto che la Terra (e probabilmente il Sistema Solare) contenga una preponderante parte di **elettroni negativi e protoni positivi**.*

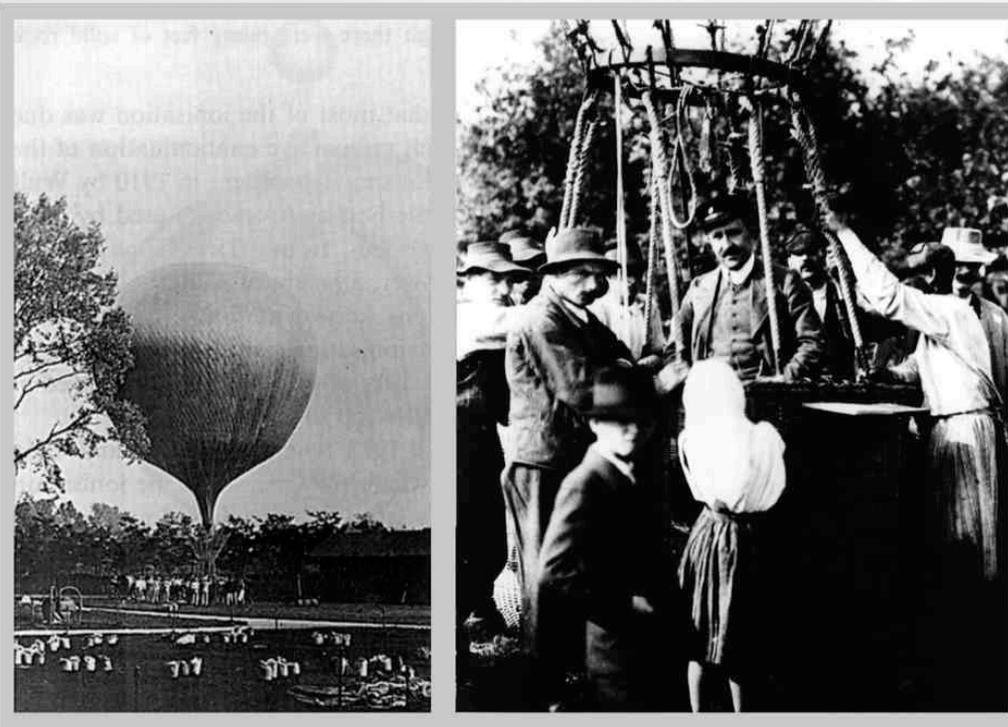
*E' possibile che per qualcuna delle stelle sia nel modo opposto, ossia che queste siano composte di **anti-elettroni e di anti-protoni**.*

*E' possibile che la meta' delle stelle siano fatte cosi' ... e non ci sarebbe modo di accorgersene.”*

*Paul Dirac (1933, Discorso per il ricevimento del premio Nobel)*

## 2. Le prime evidenze della radiazione cosmica e la ricerca dell'antimateria





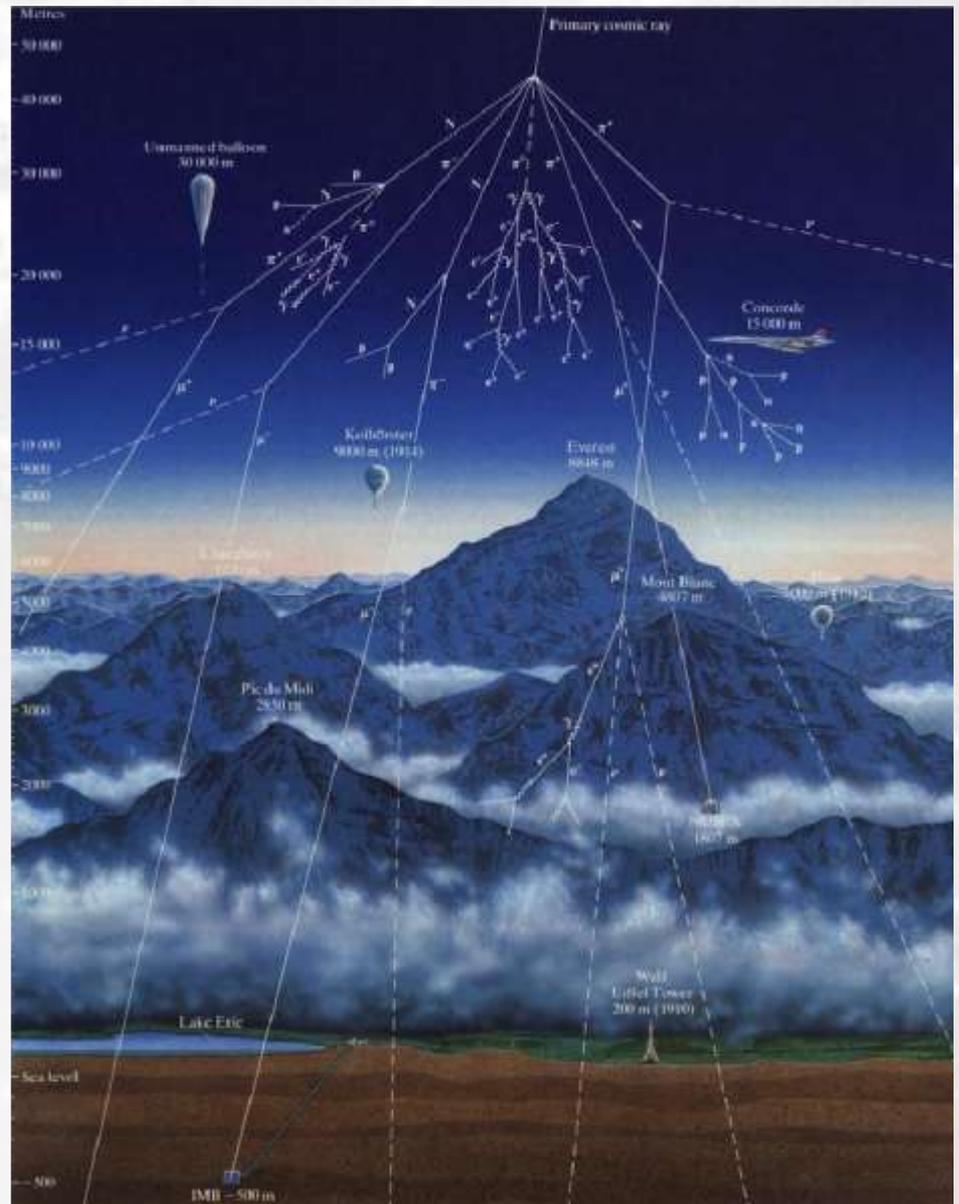
All'inizio del XX secolo gli scienziati cominciarono a pensare che la radiattività osservata nell'ambiente non venisse solo dai minerali terrestri

V. Hess nel 1912 - lanciando un pallone-sonda alla quota di 6000 m - scopre che la radiattività aumentava con l'altezza, dimostrandone l'origine extraterrestre

Vengono così scoperti i [Raggi Cosmici](#) !

In realta' il prete gesuita  
T. Wulf aveva  
notato 2 anni prima  
che la radioattivita'  
in cima alla Tour Eiffel era  
piu' alta che in basso ...

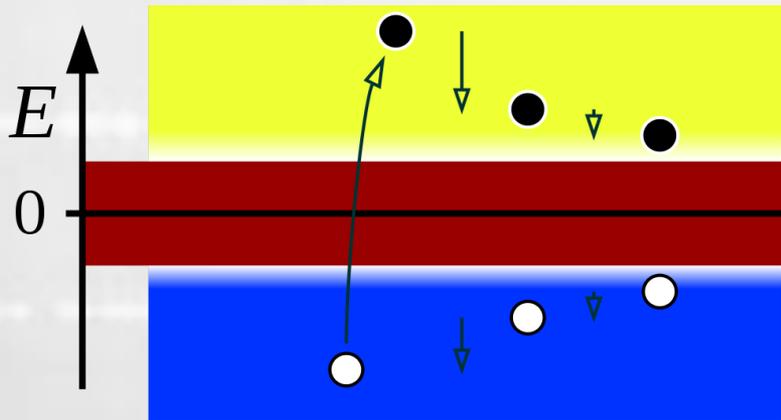
Ma il Nobel per la scoperta  
dei Raggi Cosmici ando'  
nel 1936 ad Hess !



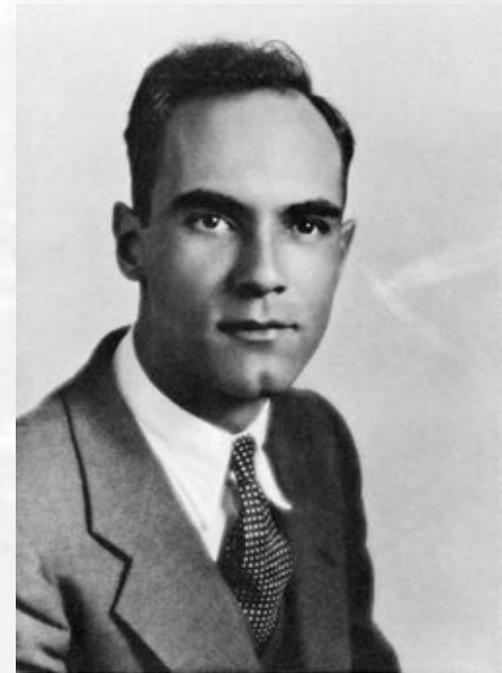
Nel 1929 P. Dirac cerca di combinare gli effetti delle recenti teorie della Relativita' e della Meccanica Quantistica per spiegare il comportamento degli elettroni

$$(i\gamma \cdot \partial - m)\psi = 0$$

Un'importante deduzione che derivava dai suoi calcoli era che per ogni elettrone doveva esistere un **anti-elettrone** (un elettrone con carica positiva)

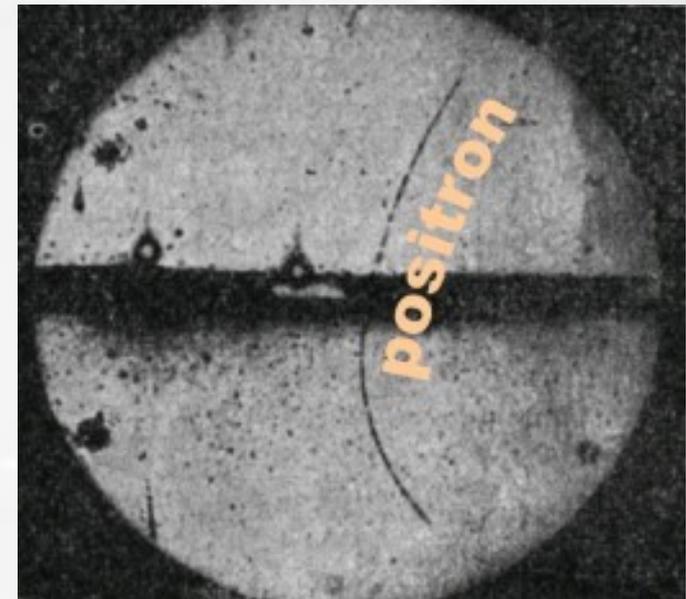


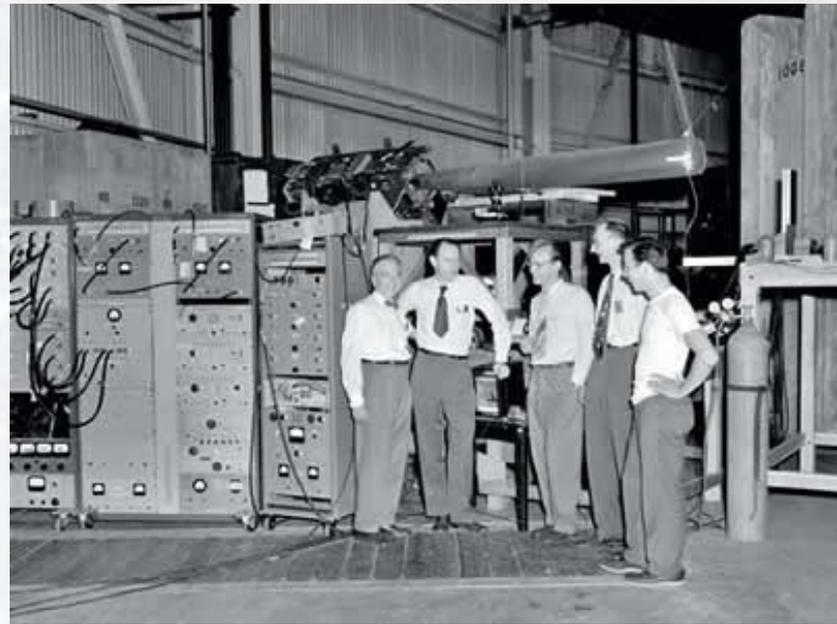
Nel 1932 C. Anderson studia i raggi cosmici e si accorge che alcune tracce nei suoi rivelatori (lastre fotografiche) - immersi in campo magnetico - sembrano comportarsi come “**elettroni con carica positiva**”



Era la scoperta dei positroni  
ossia delle prima traccia di anti-materia

Ad Anderson viene assegnato il  
Premio Nobel nel 1936



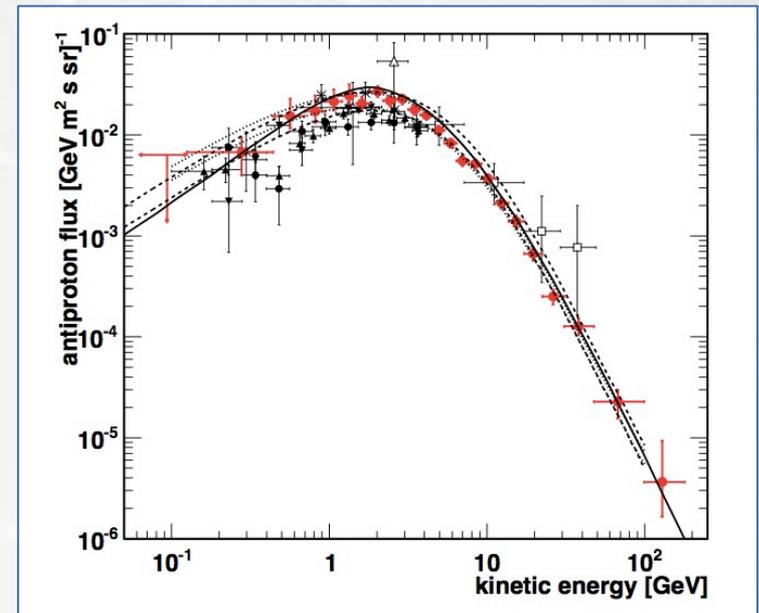


Negli anni '50 vengono costruiti i primi acceleratori di particelle di "alta energia", dove facendole scontrare tra di loro, si riescono ad ottenere i primi campioni "artificiali" di **antiprotoni** (1954) e di **anti-neutroni** (1960)

La strada dello studio dell'antimateria era ormai aperta

Contemporaneamente si intensifica la ricerca di antimateria nella radiazione cosmica

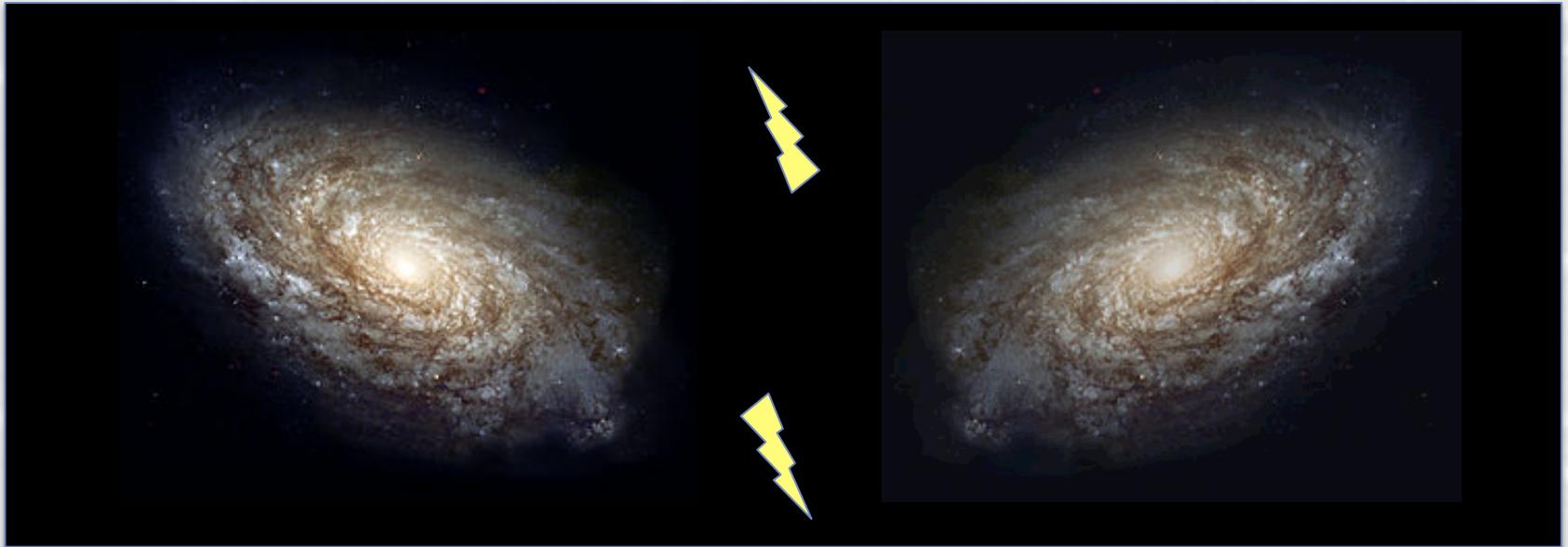
Le ricerche dell'antimateria primordiale dne cosmo condotte attraverso rivelatori montati su palloni e su satelliti (per oltrepassare lo schermo dovuto all'atmosfera terrestre) non hanno rivelato tracce di **anti-p (o anti-nuclei)** al di la' di quelle attese dai secondari prodotti dalla propagazione dei raggi cosmici (**p e altri nuclei**) nella nostra Galassia



Il rivelatore AMS montato sulla Stazione Spaziale Internazionale permettera' misure ancora piu' precise (in presa dati dal 2011)

Si e' ipotizzato che l'antimateria possa essere "immagazzinata" in grandi ammassi di (anti) galassie, molto distanti dalle convenzionali galassie di materia.

Se cosi' fosse, nelle regioni di confine ci sarebbero continuamente scontri tra materia e antimateria che darebbero origine ad un intenso flusso di fotoni.



Tali flussi anomali di fotoni non sono pero' stati osservati

A quel punto gli scienziati iniziarono  
a chiedersi perche' c'era cosi' poca antimateria in giro

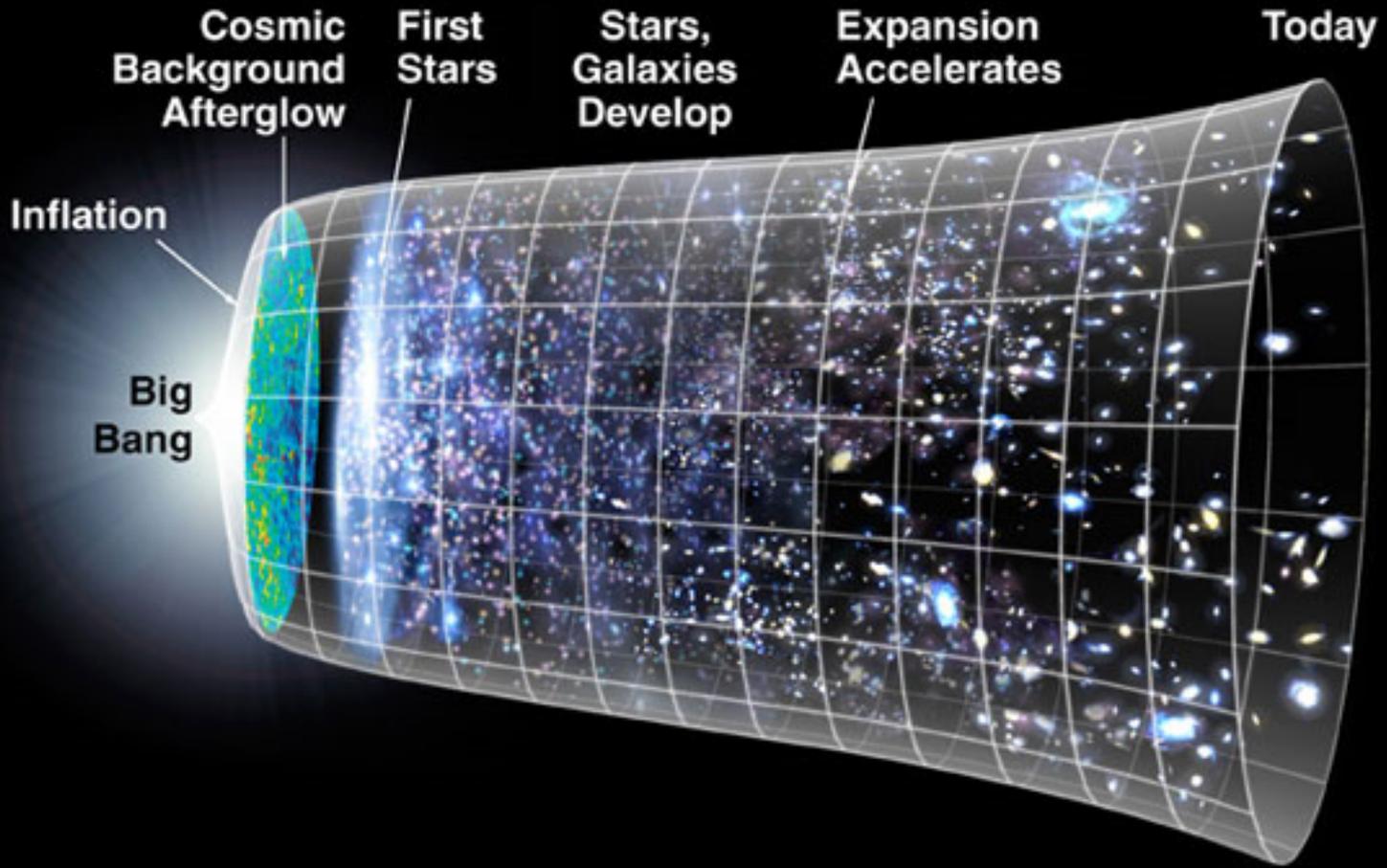
Per cercare di rispondere a questo quesito  
bisogna andare indietro piu' di **13 miliardi di anni**

Quando tutto ebbe inizio ...

## 2. Una brevissima storia del Big Bang



# THE EXPANDING UNIVERSE: A CAPSULE HISTORY



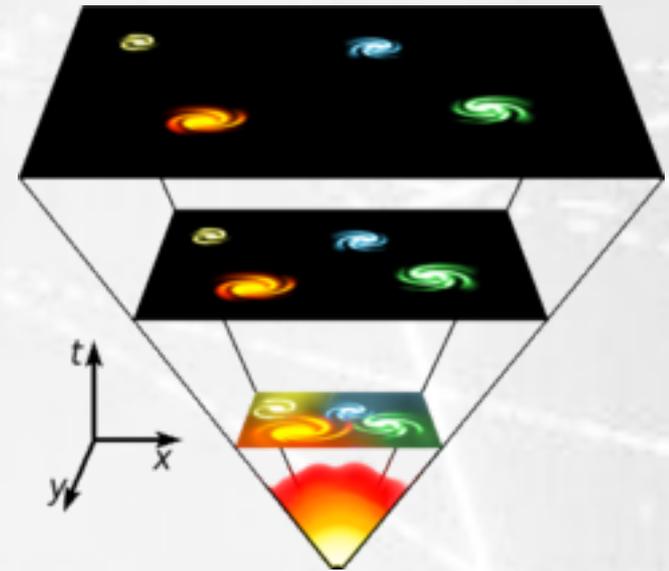
Le piu' precise misure ci dicono che l'Universo a noi noto ha **13.78 ± 0.06** miliardi di anni

Secondo la teoria del **Big Bang** circa 14 miliardi di anni fa l'Universo era in uno stato denso e caldissimo ed inizio' rapidamente ad espandersi.

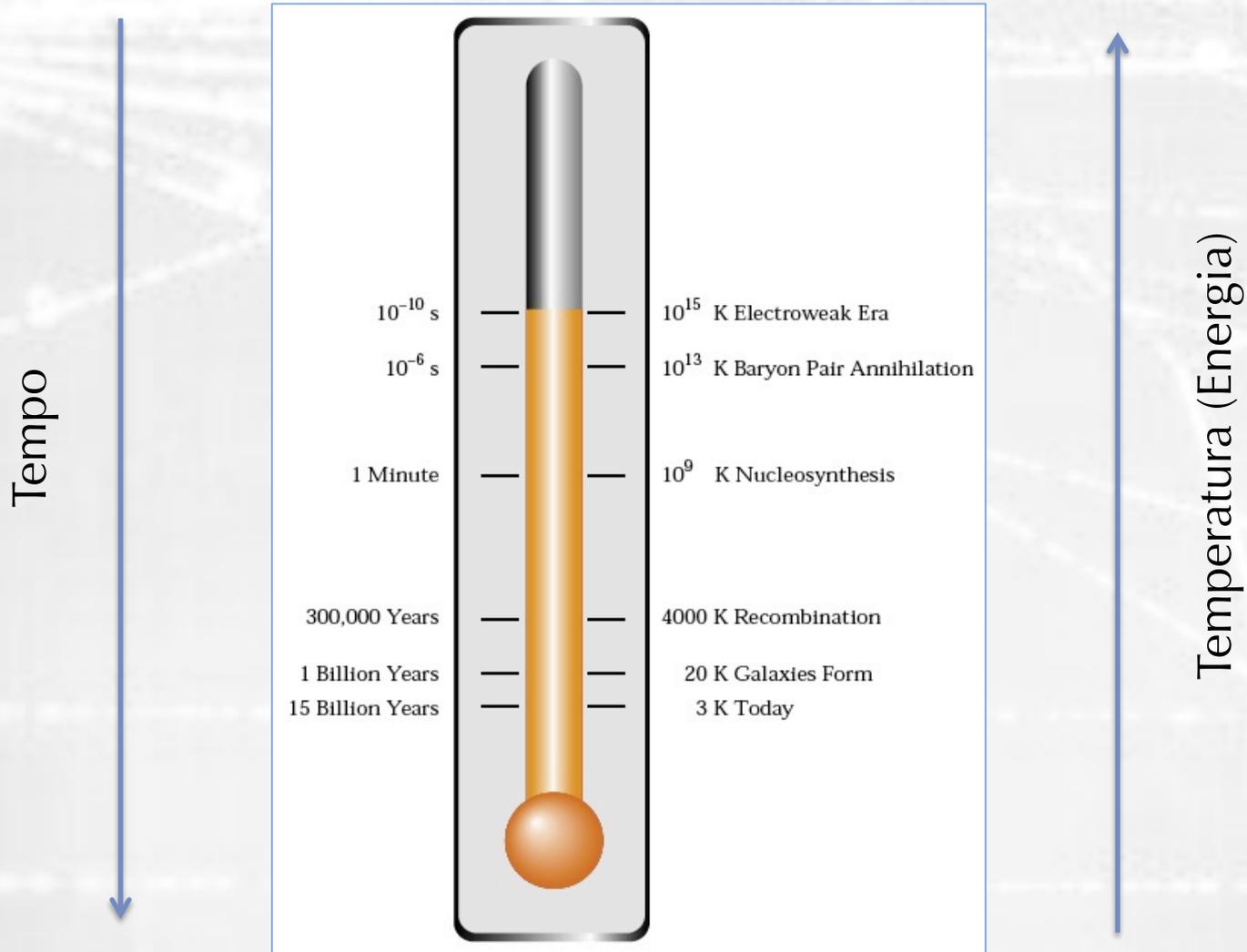
Dopo questa prima espansione si e' raffreddato in modo tale da convertire l'energia in protoni, neutroni ed elettroni, da formare nuclei leggeri e successivamente nuclei piu' pesanti ed atomi.

Il Modello Standard della Fisica delle Particelle ci permette di predire esattamente l'evoluzione

Da quel momento in poi la storia dell'Universo e' dominata dalla forza gravitazionale che ha permesso la formazione di galassie, stelle e sistemi planetari, incluso il nostro. E allora venne la vita ...



# Il "termometro" del tempo



$$t < 10^{-36} \text{ s}$$

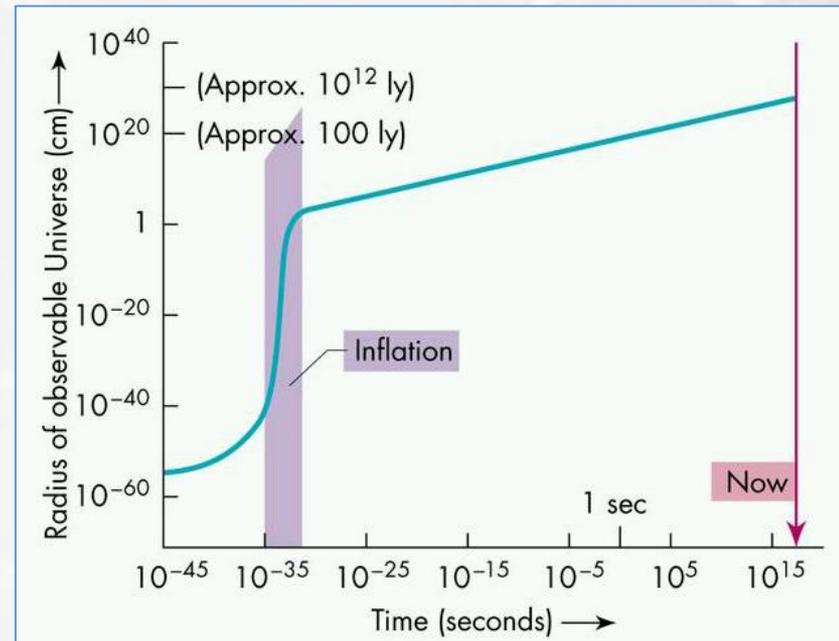
Ne sappiamo pochissimo: immaginiamo un punto (o quasi) ad una temperatura infinita (o quasi)

Sappiamo che le attuali leggi della fisica non funzionano in queste condizioni

$$10^{-36} \text{ s} < t < 10^{-32} \text{ s}$$

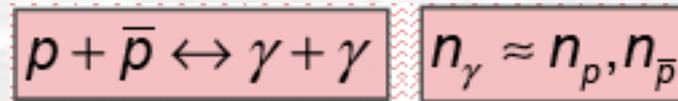
L'Universo si espande ( $10^{78}$  volte) rapidissimamente (meccanismo dell'“**inflazione**”) ed in maniera praticamente omogenea.

Anche qui non sappiamo i meccanismi con cui questa espansione si sia manifestata. Sappiamo però che tale ipotesi è confermata dai dati raccolti da satelliti e telescopi.



$10^{-32} \text{ s} < t < 1 \text{ s}$

La materia e' caldissima, ma si sta lentamente raffreddando  
**Quark e leptoni** sono liberi in una zuppa primordiale  
Materia, antimateria e radiazione (fotoni) sono in equilibrio



Al diminuire della temperatura i quark iniziano a combinarsi tra loro per dare origine a protoni (antiprotoni) e neutroni (antineutroni) che vengono continuamente creati e distrutti.

Un meccanismo ignoto fa si che il rapporto materia-antimateria si stabilizzi ad una **leggera asimmetria**

Antimateria (30,000,000)



Materia (30,000,001)

Questa piccolissima differenza ha un effetto catastrofico (“**bariogenesi**” – creazione dei barioni, ossia della materia, protoni e neutroni)

Infatti in questo periodo della vita dell’Universo, l’energia disponibile e’ cosi’ bassa che dopo le annichilazioni (ossia urti tra **p e anti-p** che si risolvono nella loro scomparsa e nella creazione di fotoni) non si generano piu’ **anti-p** e gli effetti sono:

- Una diminuzione della quantita’ di materia ed un enorme aumento del numero di **fotoni**

$$\frac{n_{\text{baryon}} - n_{\overline{\text{baryon}}}}{n_{\gamma}} \sim O(10^{-10})$$

- La scomparsa definitiva dell’antimateria

La stessa cosa accade anche per gli elettroni e i positroni (“**leptogenesi**”) durante la quale i positroni scompaiono

**1 s < t < 380,000 y**

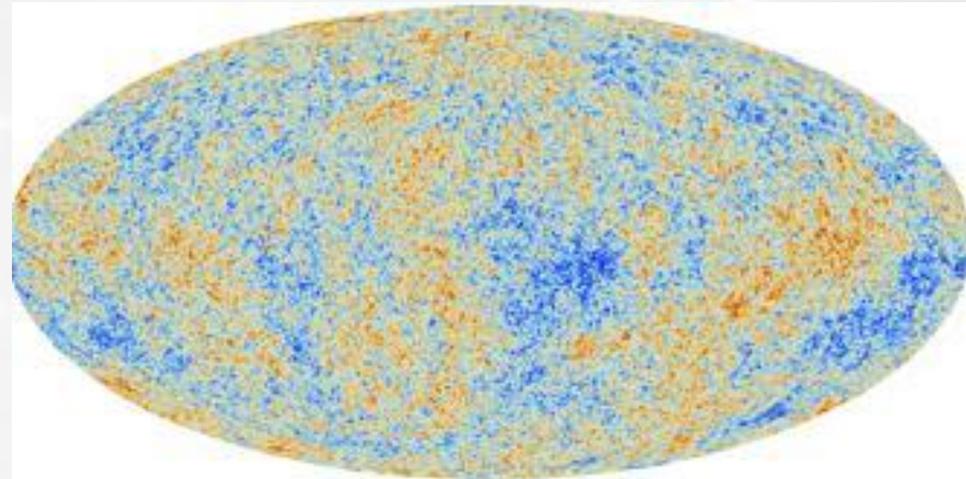
La materia continua a raffreddarsi

I nuclei cominciano a formare (“**nucleosintesi**”) i primi atomi leggeri di  $^4\text{He}$  e  $^2\text{D}$

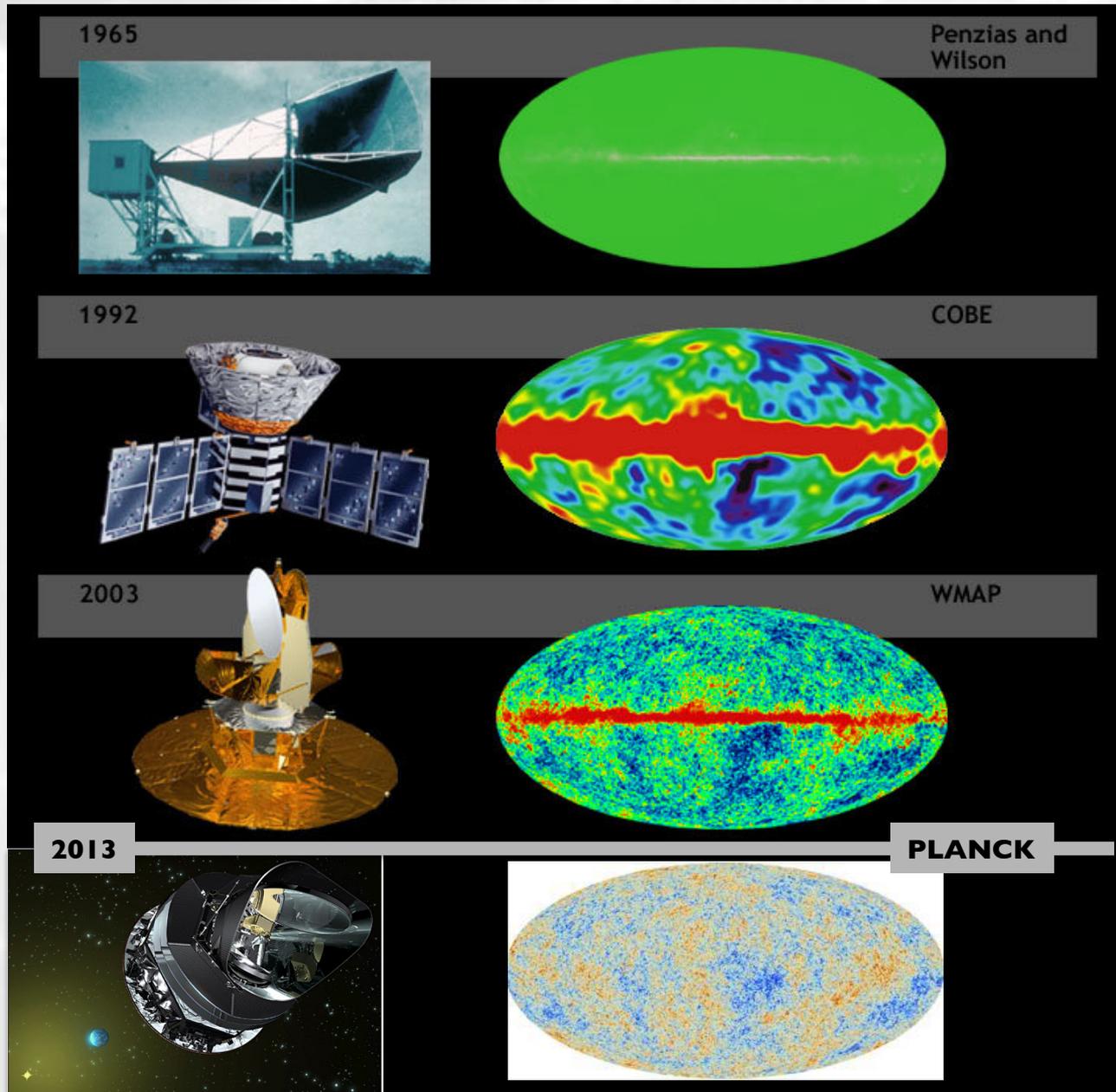
L’Universo che sino ad allora era così denso da essere opaco alla radiazione elettromagnetica (fotoni), inizia ad essere trasparente

I fotoni escono da questa “nebbia” creando una “radiografia” del Universo all’età di 380,000 anni: **l’eco del Big Bang** che permea ancora oggi tutto l’Universo ( $T=2.7\text{K}$ )

La **radiazione di fondo cosmico** scoperta nel 1964 da Penzias e Wilson (Nobel nel 1978)



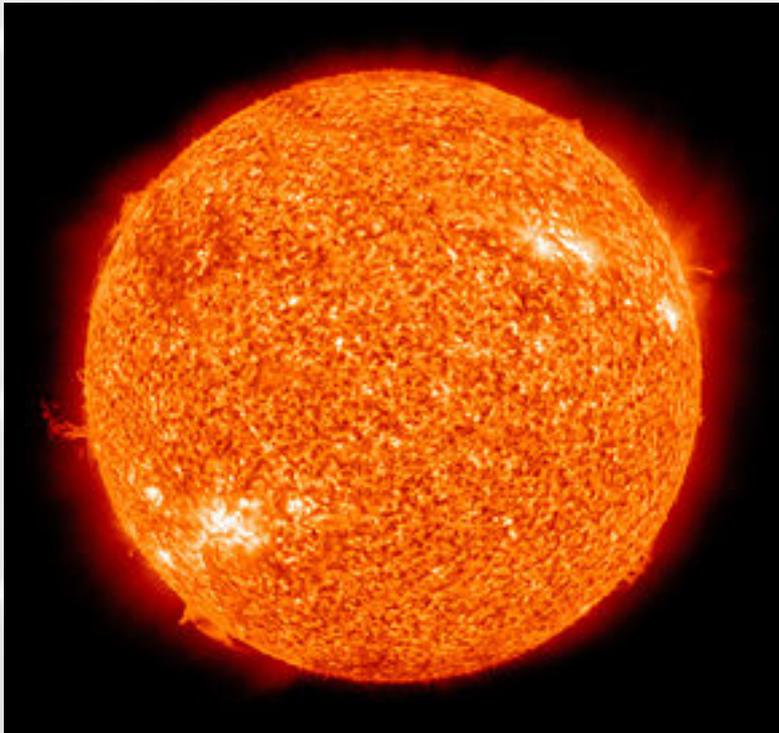
# L'evoluzione della conoscenza della mappa della radiazione di fondo 3K



**t > 380,000 y (e sino ad oggi)**

L'Universo (sempre in continua espansione) diventa dominato dagli effetti gravitazionali. Masse sempre maggiori si accumulano e si urtano, dando vita a Galassie, Stelle e sistemi solari

Sole e Terra si generano circa **5 miliardi** di anni fa



... e quindi, visto che nell'Universo  
l'anti-materia sembra davvero essere  
sparita, come facciamo a capire cosa e'  
successo in quei primi attimi dopo il Big Bang ? ...

TELL THE WORLD THE TRUTH

**3. Alla ricerca dell'antimateria mancante**

TOM HANKS  
IS ROBERT LANGDON

# ANGELS & DEMONS

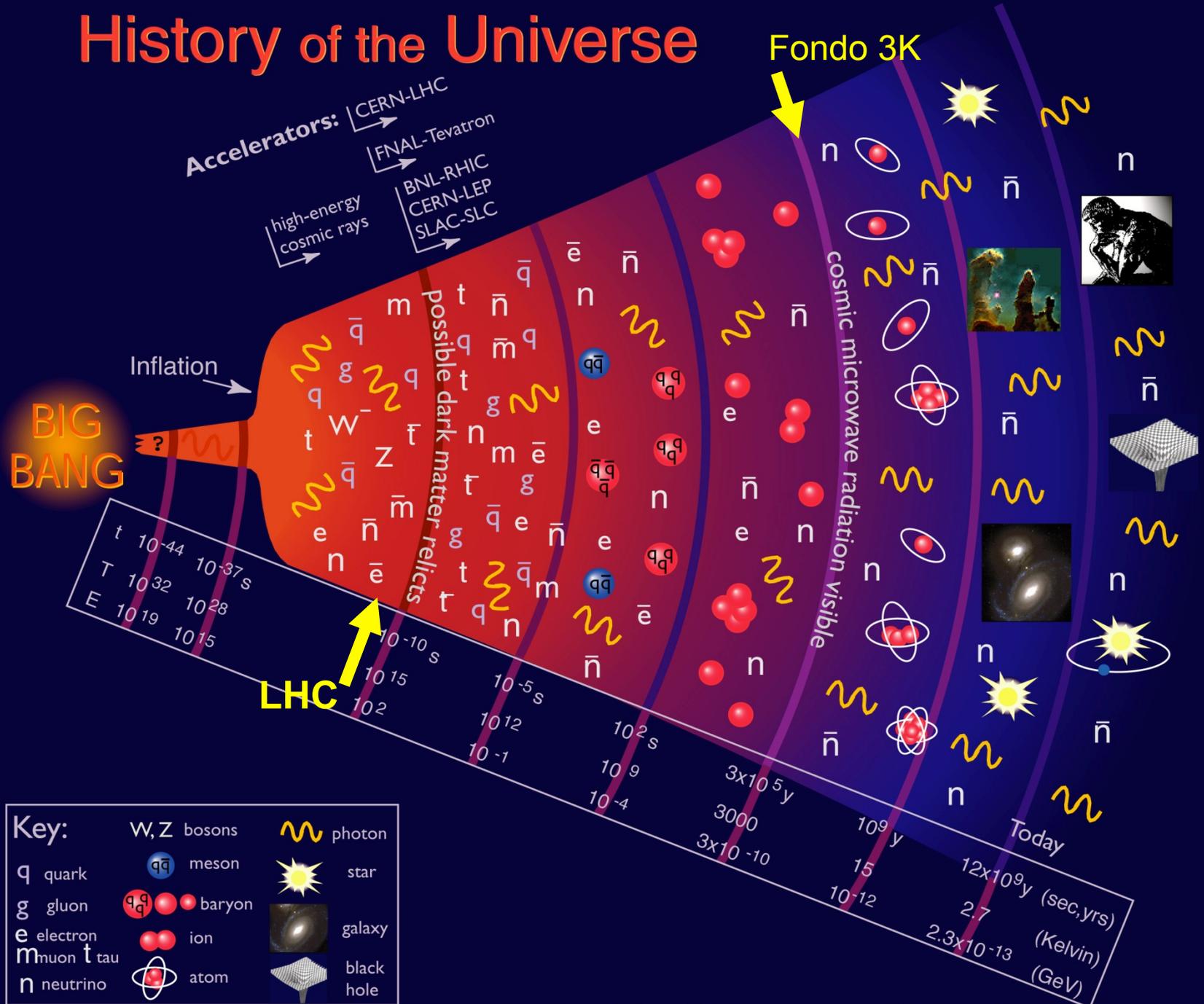
FROM THE AUTHOR OF THE DA VINCI CODE

MAY 15

AngelsAndDemons.com



# History of the Universe



**Key:**

W, Z bosons		photon	
quark		meson	
gluon		baryon	
electron		ion	
muon		atom	
neutrino		star	
		galaxy	
		black hole	

# **Il Large Hadron Collider del CERN**

una macchina per studiare cosa e' successo nel Big Bang



La **ricerca a LHC** si prefigge di dare una risposta alle domande piu' elementari :

- come si e' formato l'Universo ?
- di cosa e' fatta la materia che ci circonda ?
- quali sono le forze che agiscono sulla materia ?
- come la materia e le forze determinano le proprieta' dell'Universo ?

Il goal della Fisica delle Particelle, dell'Astrofisica e della Cosmologia e' di creare una teoria che possa spiegare i dati che osserviamo: agli acceleratori, ai telescopi, sui satelliti, nei laboratori sotterranei

Negli ultimi 50 anni, e' stato messo a punto uno schema teorico della Fisica delle Particelle, che riproduce in maniera **eccezionale** i dati sperimentali, e che permette anche di spiegare i meccanismi di evoluzione dell'Universo dopo il Big Bang: il **Modello Standard (SM)**

Lo **SM** e' ad es., in grado di spiegare i meccanismi di produzione delle abbondanze degli elementi nell'Universo, a partire dai modelli di evoluzione (nucleosintesi)



**L' LHC al CERN di Ginevra**  
**(inizio delle operazioni e' cominciato alla fine del 2009)**

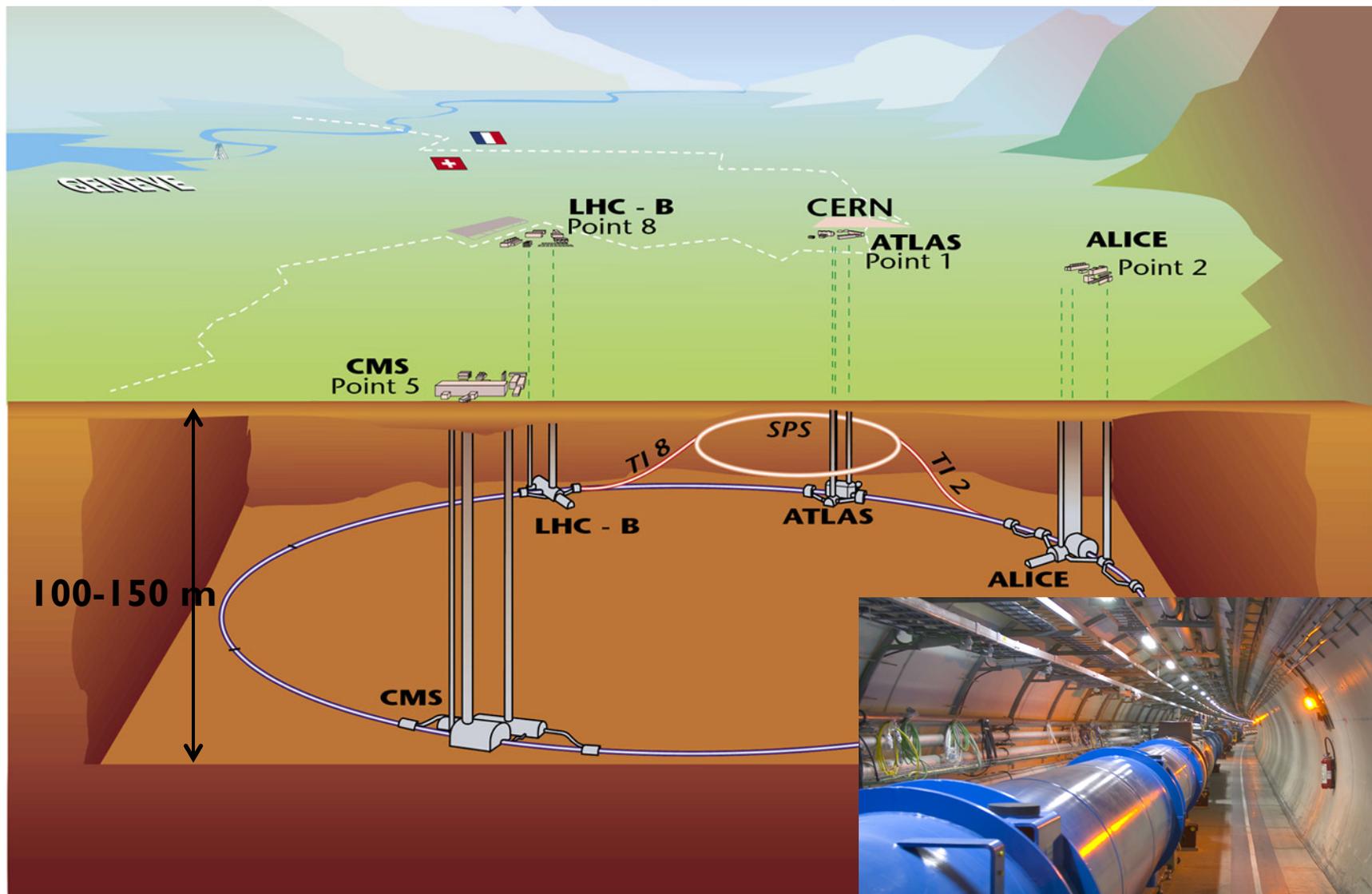
**27 km**

Run 1: 2011-13 collisioni tra protoni a **7 TeV e 8 TeV**  
e con circa 2/3 della luminosita' istantanea finale  
Nel 2015 l'energia arrivera' a **13 TeV**

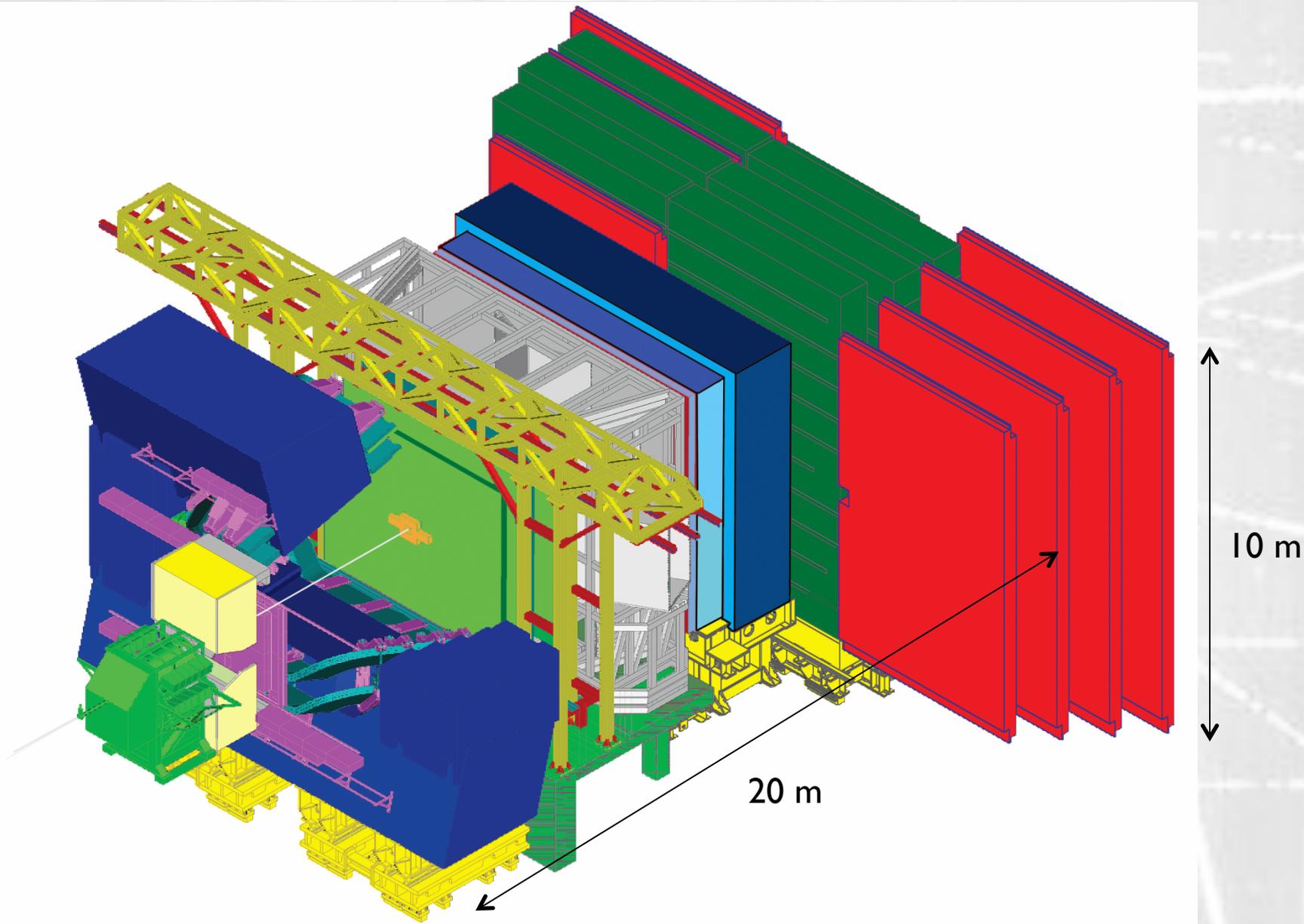
**ATLAS e CMS**, di grandi dimensioni (interesse generale)

**LHCb**, per la ricerca della violazione di CP (asimmetria materia/antimateria)

**ALICE**, per lo studio del quark-gluon plasma (primi istanti Big Bang)



LHCb – [lhcb.web.cern.ch](http://lhcb.web.cern.ch) 700 fisici – 70 istituti – 60 M€



Un esperimento dedicato allo studio della violazione di CP nel sistema del **quark b**, ma anche pensato per scoprire fenomeni inaspettati e dovuti a **Nuova Fisica**, nei decadimenti molto rari. Un approccio alternativo ad ATLAS e CMS



E' un apparato che ha la caratteristica di rivelare solo le particelle che vanno in avanti rispetto alla direzione dei protoni (**perche' li' sono prodotti piu' quark b**)

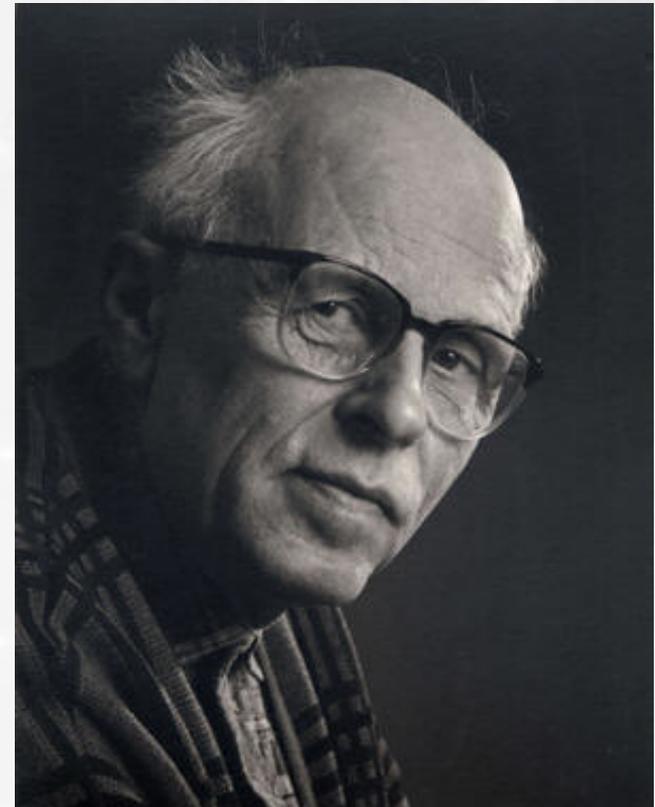
Ritorniamo al momento in cui l'Universo e' perfettamente simmetrico tra materia e antimateria ( $\# p = \# \text{anti-p}$ )

Si e' appena concluso il **processo inflattivo** che ha espanso l'Universo

A quel punto un meccanismo induce uno sbilanciamento tra materia ed antimateria. Si pensa che questo meccanismo sia il prodotto di una combinazione di vari fattori

Nel 1967 A. Sakharov (padre dell'atomica russa, dissidente politico, e Nobel per la Pace 1975), ipotizzò che 3 condizioni erano indispensabili per permettere la **bariogenesi**

- **un processo che violi CP**
- **un processo che alteri il numero di protoni** ("numero barionico")
- **un fenomeno di cambiamento di stato rapido nel plasma primordiale**



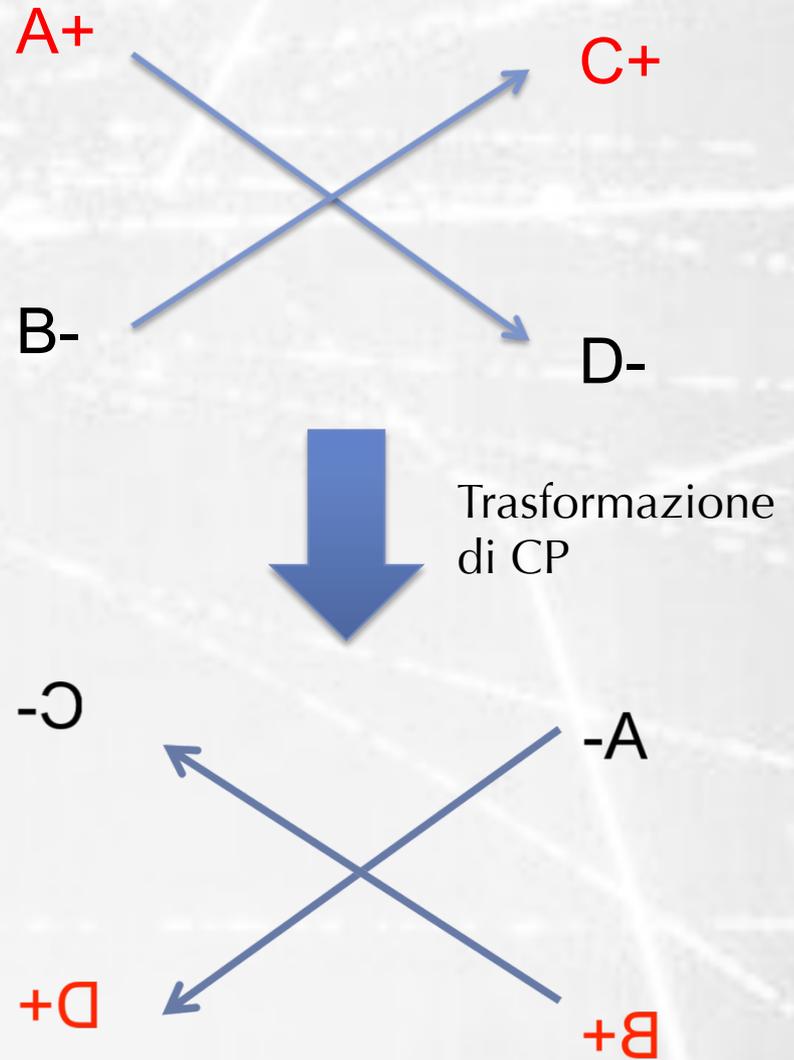
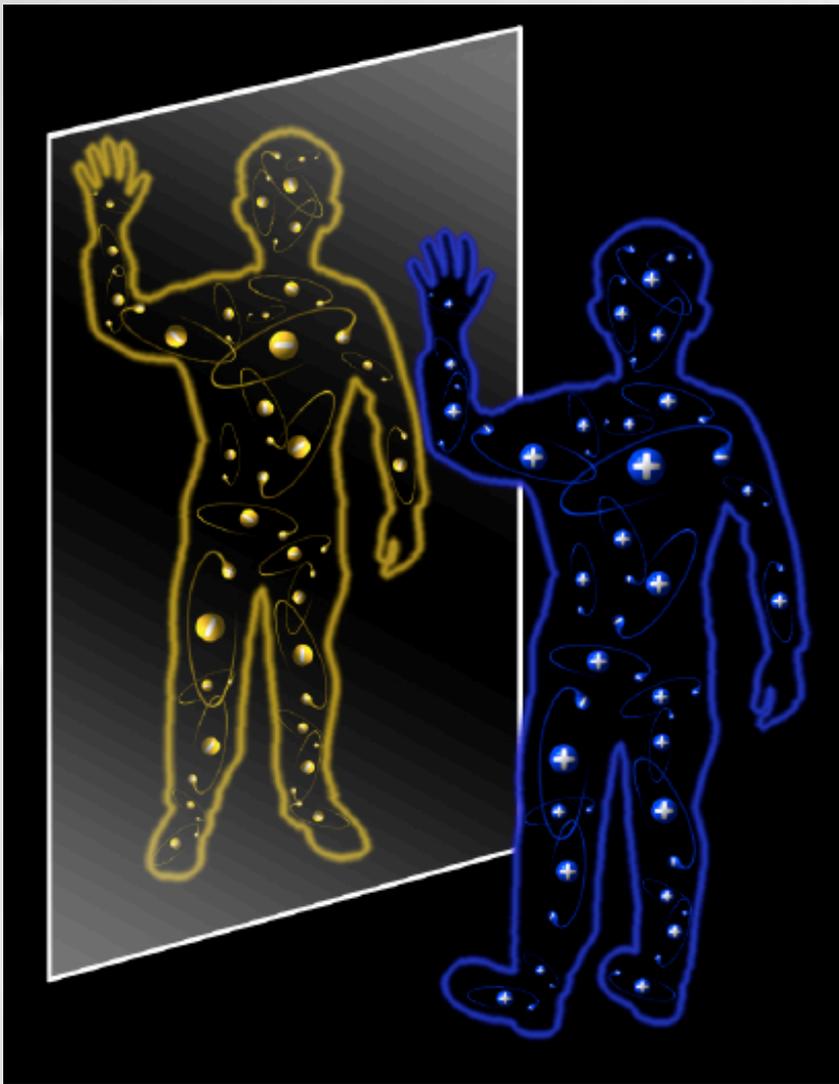
## La violazione di CP

In Fisica, le simmetrie rivestono un ruolo fondamentale, poiché determinano le regole dell'evoluzione dei sistemi. Tutte le volte che si osserva una violazione di una simmetria, la nostra conoscenza dei principi dell'Universo aumenta

In particolare, negli anni '60 si scoprì che i decadimenti del **mesone K** violavano (in misura minima, circa 1 volta su 1000) la **simmetria di CP**, che deriva dall'applicazione di 2 trasformazioni:

- **Parità [P]** - Trasformazione che ribalta gli assi  $(x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$  (come ad es. osservata ad uno specchio, ma con ribaltamento sopra/sotto)
- **Coniugazione di carica [C]** - Trasformazione che inverte la carica  $(q_1,q_2) \rightarrow (-q_1,-q_2)$  (trasforma una particella nella sua antiparticella)



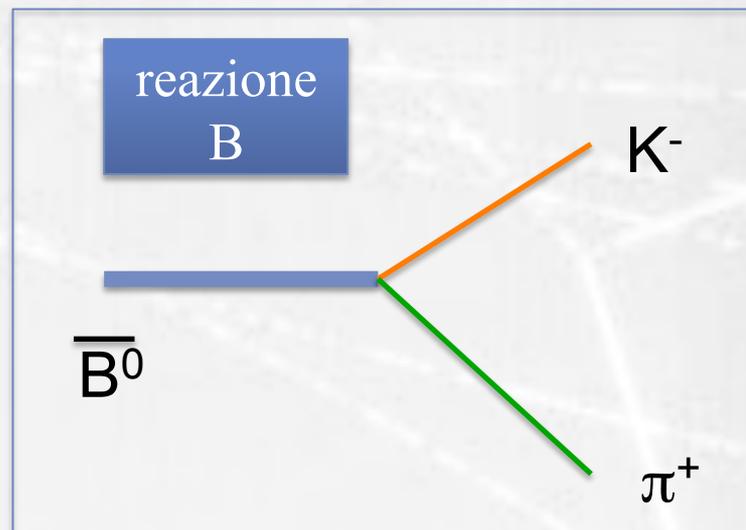
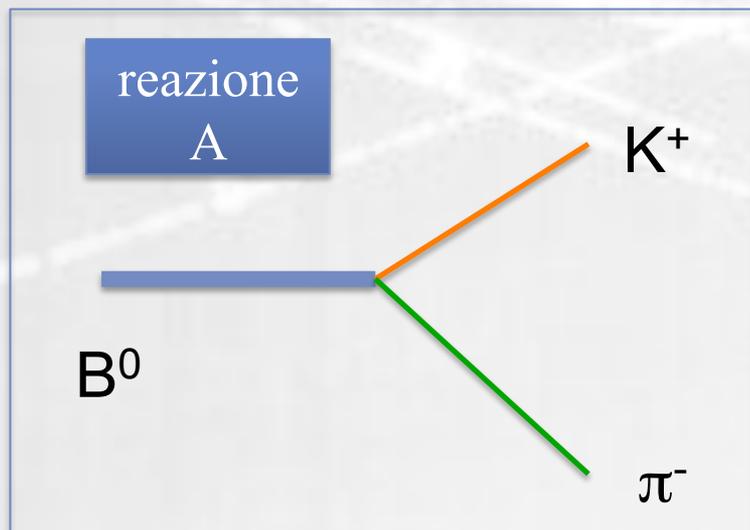


Fino agli anni 60 si e' pensato che le leggi della fisica fossero invarianti sotto questa trasformazione

Come si misura sperimentalmente la violazione di CP ?

Si isola il campione di particelle che si intende analizzare

Nel caso di LHCb i **mesoni B** (particelle con un quark “leggero” – **u, d, s** – e con un quark pesante **b**) e si guarda ad una reazione specifica ed a quella che ha per prodotti del decadimento le anti-particelle



Fino al 1964 si pensava che  $N(A)=N(B)$ , ma l'esperienza negli US scoprì che c'era una piccola differenza  $\sim 0.001$  in alcuni decadimenti del mesone  $K^0$  e negli anni 2000 questo effetto fu osservato anche in quelli dei mesoni B

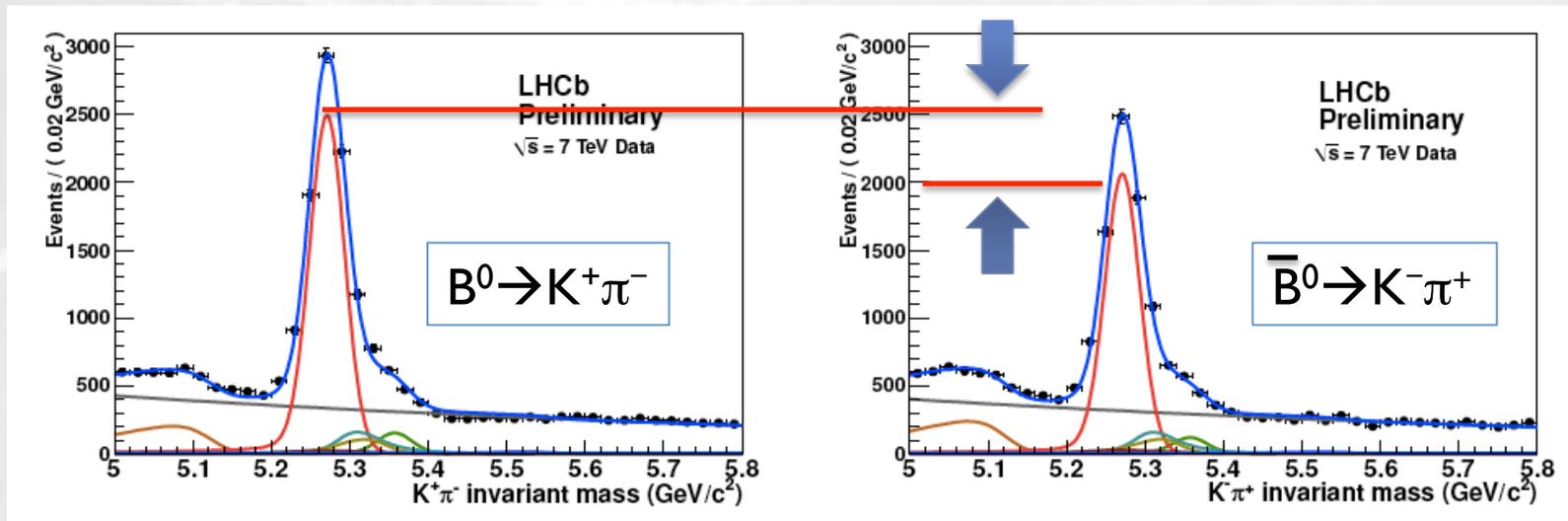
**Materia e anti-materia si comportano in maniera differente !**

Quindi studiare a LHC la violazione di CP significa cercare le tracce della sua scomparsa !

## La violazione di CP in azione nella fisica delle particelle

Si cercano quei decadimenti nei quali c'è ci sia spelta un che distingue **particelle** da **anti-particelle**

Ad es. (un tipico effetto che si studia a **LHCb** – **guardare le curve rosse**)



Il mesone B (con un **quark beauty**) decade piu' spesso in  **$K\pi$**  di quanto faccia l'anti-B, creando una asimmetria tra materia ed anti-materia: la differenza (~25%) e' apprezzabile ad occhio.

Questo e' il tipo di fenomeno che deve essere avvenuto durante la bariogenesi, ma **l'effetto e' troppo piccolo per spiegare l'asimmetria** !  
Serve qualcosa d'altro per capire cosa avvenne dopo il Big Bang !

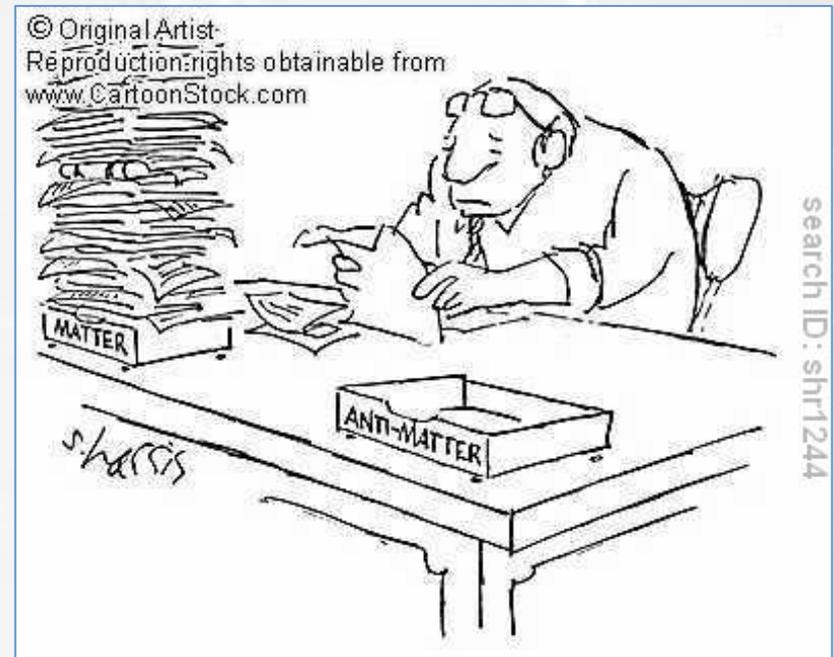
## ... ricapitolando ...

Si pensa che la **violazione di CP** abbia determinato il corso dell'evoluzione dell'Universo poiché il Big-Bang ha prodotto inizialmente un'eguale quantità di materia e antimateria. Ma oggi osserviamo una **asimmetria materia-antimateria**: l'Universo è dominato dalla materia

Il problema (irrisolto) è che la violazione di CP misurata sperimentalmente è troppo piccola da giustificare l'asimmetria osservata. Quindi si va a cercare qualche nuova possibile fonte di violazione di CP (e conseguentemente di **Nuova Fisica** che oggi ci è ignota).

La Nuova Fisica potrebbe fare luce anche su altre evidenze sperimentali che oggi non riusciamo a spiegare (**la massa dei neutrini, la materia oscura, la stabilità del bosone di Higgs, ecc ...**)

Questo, in estrema sintesi,  
La missione dell'esperimento **LHCb**  
(e anche di ATLAS e CMS, anche se con altri metodi)



## 5. Prospettive future e conclusioni



LHC ha davanti a se' ancora molti anni di presa dati: ripartenza per le collisioni del **Run 2** (2015-17) a 13 TeV e poi ancora, sino oltre il 2030  
Ancora molti dati da prendere e forse nuove cose da scoprire

Certamente l'illusione di un "**Nuovo Mondo dietro l'angolo**" e' tramontata con i primi dati. La realta' appare piu' complessa di come la si e' immaginata: non ci sono ancora segni di Nuova Fisica oltre il Modello Standard, ne' di altri fenomeni "strani"

Il **bosone di Higgs** e' stato scoperto: il valore della sua massa e' un importante elemento per capire come l'Universo si e' evoluto e i teorici stanno studiando nuovi modelli

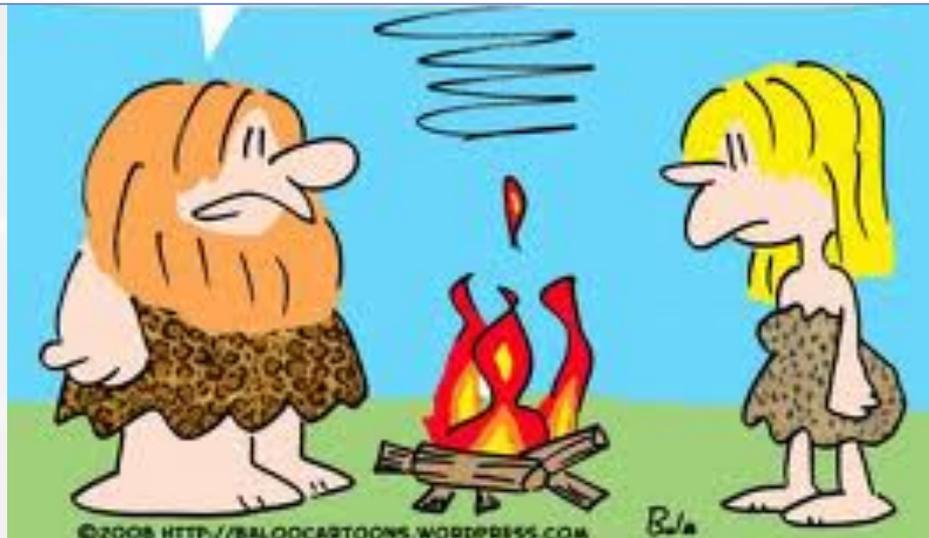
**L'asimmetria materia-antimateria** resta un mistero (per ora), perche' lo SM non e' in grado di spiegare come la bariogenesi si e' evoluta

Nuovi dati e nuovi studi sono necessari: per ora e' presto per tirare delle conclusioni ... nella ricerca bisogna essere pazienti e tenaci

## 6. Epilogo

(quanto costa e a cosa serve questo tipo di ricerca fondamentale ?)

... STAVO STROFINANDO DEI LEGNETTI ...  
NON PENSAVO DI FARE RICERCA DI BASE ...



La Fisica delle Particelle e' a partire dalla scuola di Fermi, **il fiore all'occhiello della Ricerca Italiana**, in particolare per la considerazione che ha all'estero; le ricerche sono condotte con uno sforzo internazionale. **L'INFN** e' l'ente che promuove tali ricerche

L'INFN ha un bilancio annuo di **250 M€ (~5 € per ogni italiano)**, 1800 dipendenti (e altrettanti Universitari) che vi lavorano, con un bilancio per la Ricerca di circa 100 M€  
Il totale delle risorse pubbliche per la ricerca in Italia e' circa **2 G€** per anno

Il CERN ha un bilancio annuo di **700 M€** (l'Italia contribuisce per il 12% : ~ 80 M€)  
**\*\*\* un caffe' e un cornetto all'anno per ogni italiano \*\***

LHC e i suoi 4 esperimenti sono costati circa **5 G€** (solo materiali, esclusa la manodopera) → funzioneranno almeno sino al 2030

- L'Hubble Space Telescope e' costato **6 G\$** (e' in funzione da 20 anni)
- La Stazione Spaziale Internazionale **150 G\$**
- ITER (progetto globale per la fusione) costera' **15 G€** (e durera' 30 anni)
- Il costo di una Centrale Nucleare e' **4 G€**
- La spesa in nuovi armamenti del Ministero della Difesa e' di **~4 G€** annui
- I treni ad Alta Velocita' in Italia **~80 G€** (ed e' in costruzione da 20 anni)
- il costo della politica in Italia e' stimato in **~23 G€** annui

...a voi la scelta di quale sia il modo piu' proficuo per spendere il denaro pubblico...<sup>40</sup>



... purtroppo l'Italia e' ultima in Europa per fondi alla ricerca ...

Spesso ci si chiede: a cosa serve la Ricerca Fondamentale?  
I costi sono giustificati dai benefici?

**Rispondere alle domande “primarie” dell’uomo e’ gia’ un obiettivo di grande significato**

Ma la Ricerca Fondamentale ha anche un altro risvolto : quello delle ricadute “tecnologiche” .

Quelle che entrano nella vita di tutti i giorni e la migliorano a distanza di decenni dalla prima scoperta:  
il radar, le applicazioni pacifiche dell’energia nucleare, il transistor, i raggi X, la medicina nucleare, la risonanza magnetica, il laser, la superconduttività, la criogenia, le telecomunicazioni, il WEB, ecc..., solo per considerare quelle guidate dalla Ricerca in Fisica

A volte, cercando di risolvere un problema, si scopre, involontariamente, qualcosa d’altro...

**in apparenza a nulla: in realta’, a vivere meglio domani**



Flauto, Homo sapiens, Germania, 35,000 anni fa



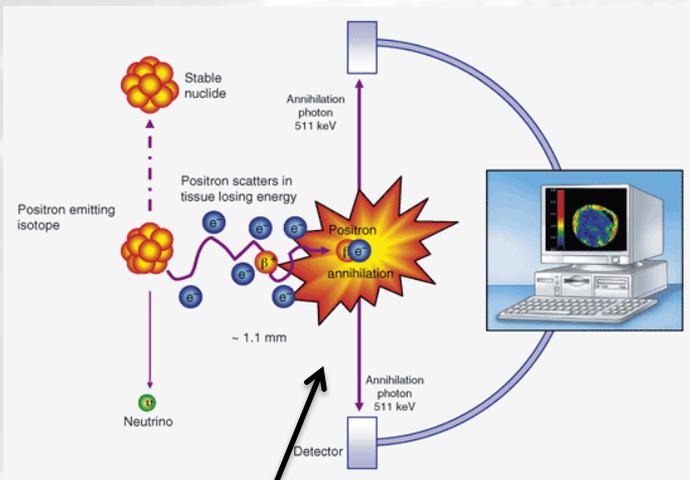
Arte rupestre, Homo sapiens, Francia, 25,000 anni fa



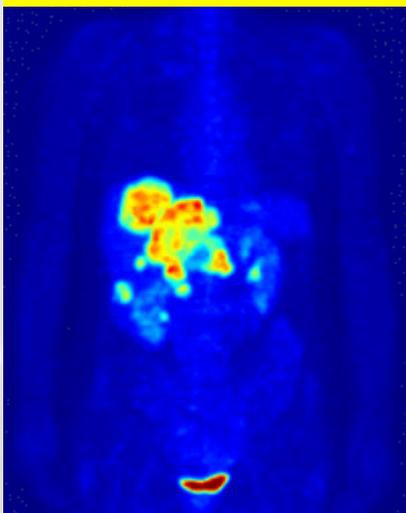
Ricercatrice (precaria), Homo sapiens, Italia, oggi

# Esempio no. 1

## PET: Tomografia ad emissione di positroni per la diagnostica dei tumori



L'antimateria (positroni) e' all'opera



Qui ci sono cristalli usati negli esperimenti di LHC

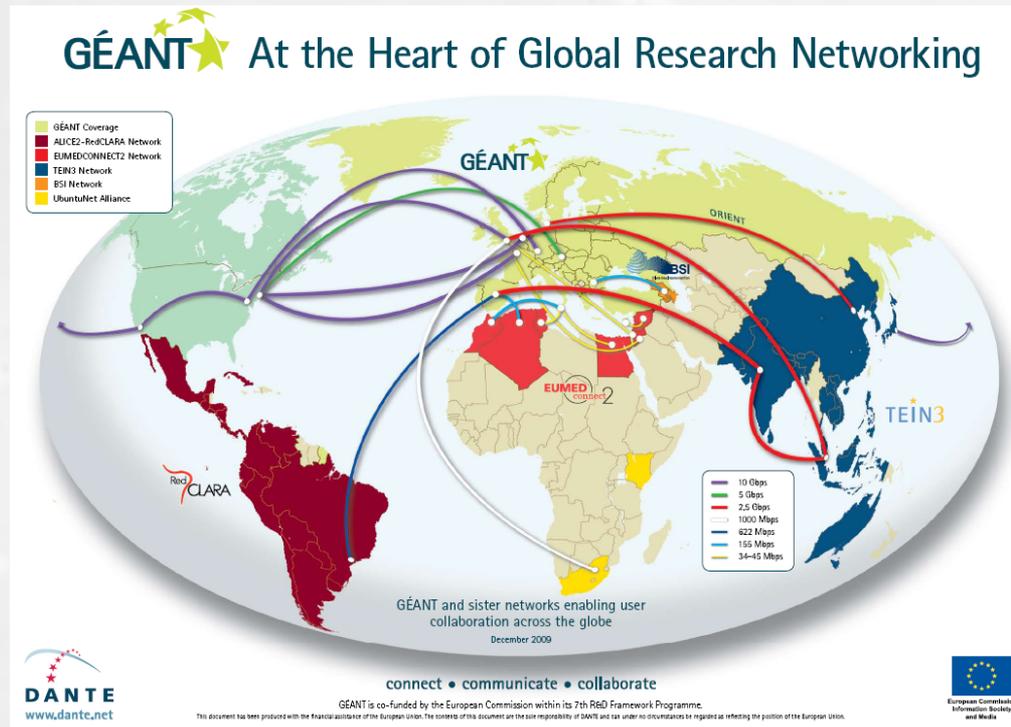


I fisici delle particelle partecipano allo sviluppo di sistemi per PET sempre piu' sofisticati

## Esempio n. 2 - Il World Wide Web

La nascita del Web risale al 6 agosto 1991 quando Tim Berners-Lee mise online la prima pagina Web al CERN. Inizialmente usato solo dai fisici delle particelle, il 30 aprile 1993 il CERN decide di rendere pubblica la tecnologia permettendo a chiunque di usarla e svilupparla **gratuitamente**. Il resto e' noto a tutti.

Potreste pensare oggi ad una mondo senza Internet ?

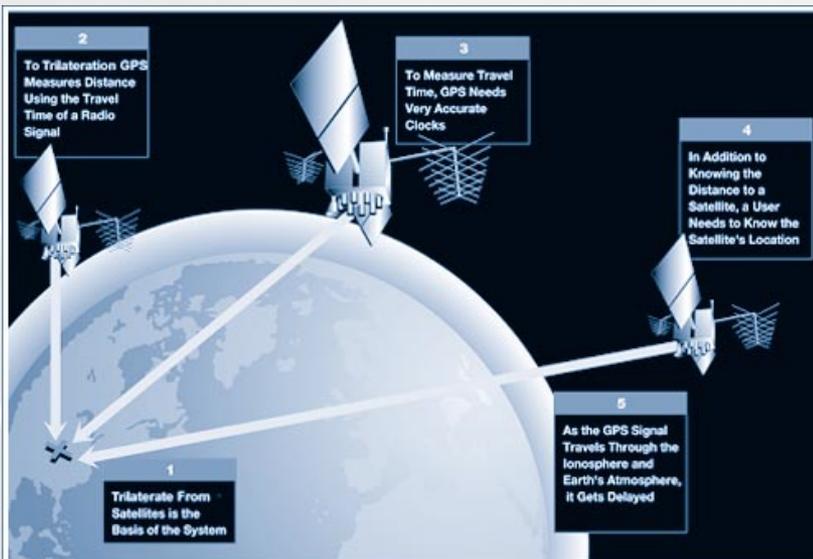


## Esempio n. 3 – Il GPS e la relativita' generale

I satelliti del sistema GPS ruotano a 14,000 km/h intorno alla Terra.  
La teoria di Einstein ci dice che gli orologi rallentano quando sono in movimento (“paradosso dei gemelli”): **- 7  $\mu$ s** per giorno

I satelliti del sistema GPS ruotano 20,000 km/h di distanza dalla Terra.  
La forza gravitazionale e' 4 volte meno forte che sulla Terra e gli orologi (per la teoria di Einstein) risentono di questo effetto e accelerano: **+ 48  $\mu$ s** per giorno

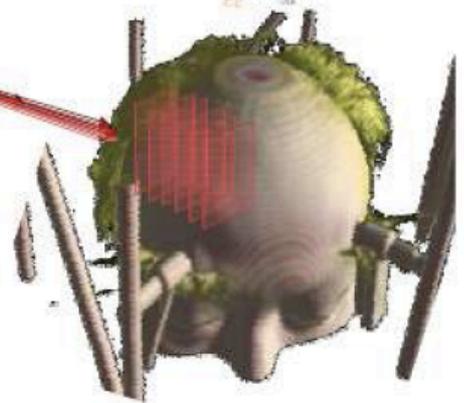
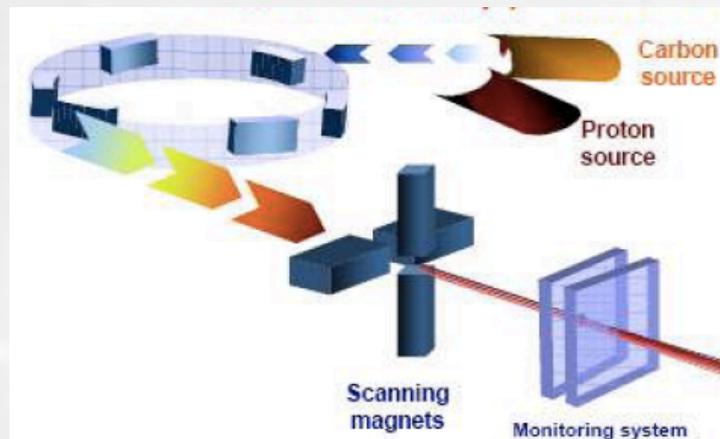
Totale **+35  $\mu$ s**  $\rightarrow$  **11 km di errore**. Senza la correzione gravitazionale il sistema GPS non potrebbe funzionare (**15 m di errore**)



## Esempio n. 4 – Gli acceleratori e la cura dei tumori

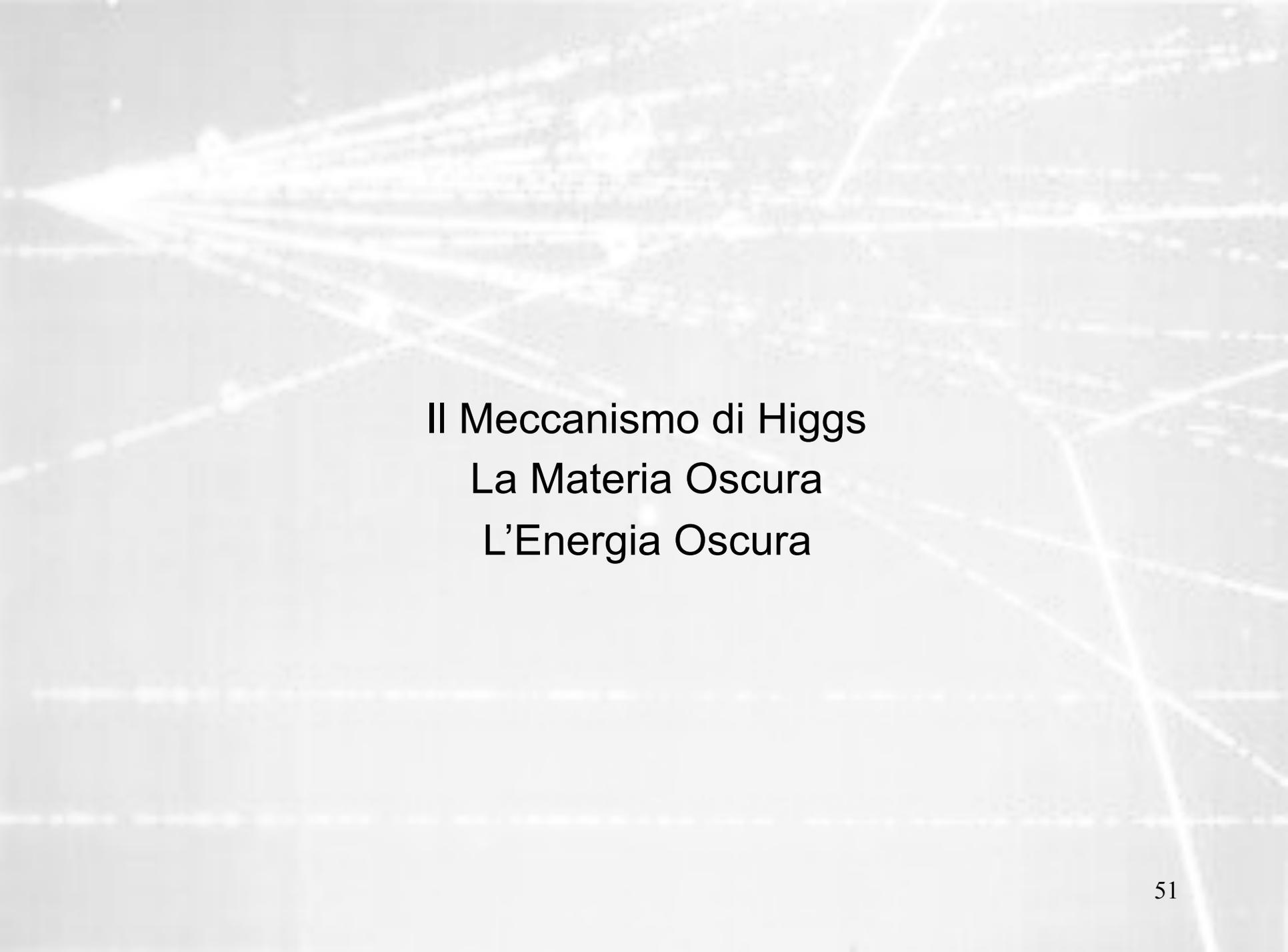
Nel mondo funzionano circa **26,000** acceleratori: **1% per la ricerca**, **44%** per la radioterapia, **55%** per applicazioni industriali

Una delle frontiere e' oggi rappresentato dall'**adroterapia**: curare i tumori colpendo solo la zona delle celle malate, evitando di danneggiare i tessuti sani – specialmente per tumori profondi (5% dei casi) con **protoni** (o meglio) **ioni**



L'INFN ha costruito un acceleratore per il Centro Nazionale di Pavia (CNAO) Il primo paziente e' stato trattato nel novembre 2012 con ioni Carbonio

Fare ricerca significa quindi avere ricadute applicative – anche a lungo e lunghissimo termine - nella vita di tutti i giorni, e quindi anche nello sviluppo dell'economia di una nazione, e le risorse investite nella conoscenza contribuiscono – alla lunga - al miglioramento della vita di tutti



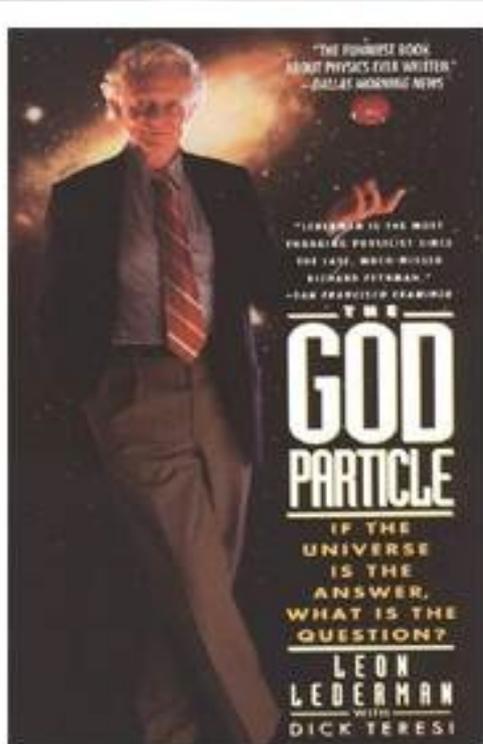
**Il Meccanismo di Higgs  
La Materia Oscura  
L'Energia Oscura**

## Il Meccanismo di Higgs

Esisteva però ancora un elemento da verificare nel Modello Standard: la scoperta della **particella di Higgs**

Il meccanismo di Higgs è un elemento cruciale della teoria. Ha la funzione di:

- **rompere la simmetria** (quella che unifica le interazioni fondamentali);
- **dare massa alle particelle**.



Si è osservato sperimentalmente che il meccanismo funziona, il **bosone di Higgs** è stato recentemente scoperto, ad una massa di circa 125 GeV

Nel 1993 il Ministro inglese della Scienza, *William Waldegrave*, mise in palio una bottiglia di champagne per il fisico che fosse stato capace di spiegargli su un solo foglio di carta, come funzionasse il meccanismo di Higgs (e a cosa servisse scoprirlo...)

Il prof. David Miller vinse con il seguente esempio...

...un gruppo di politici alla buvette del Parlamento...



...improvvisamente arriva il Primo Ministro...



...tutti si affollano intorno a lui...  
(questo spiega come le particelle acquistano la massa)



Un altro modo per immaginare il Meccanismo di Higgs: lo spazio e' permeato di acqua (= campo di Higgs) che determina le caratteristiche di mobilita' (= massa) degli elementi che vi transitano (pesci = particelle)



## Il Problema della Materia Oscura

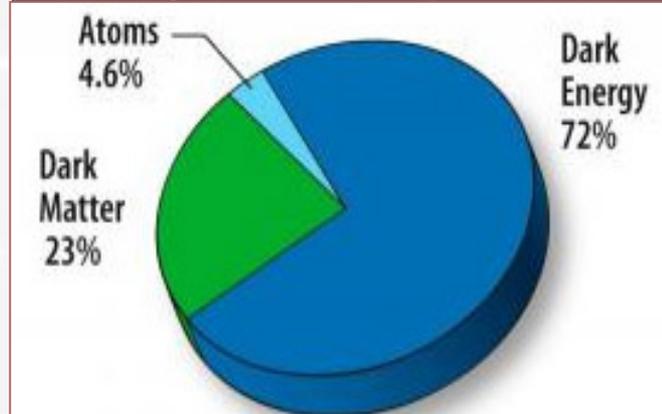
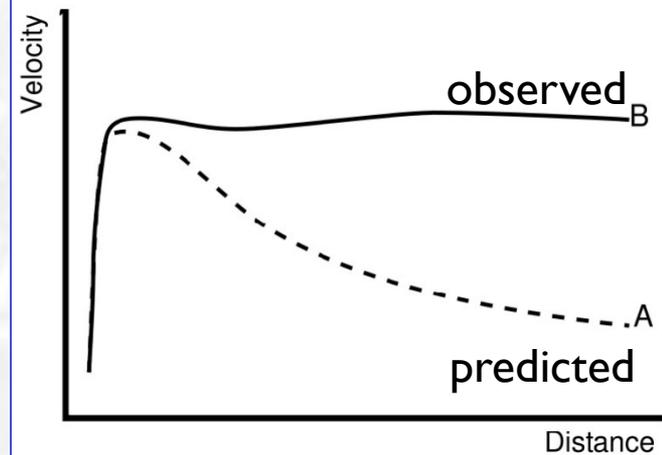
I cosmologi, che a partire dagli anni '60 hanno tentato di calcolare il contenuto di massa dell'Universo.

Dalle misure della velocità delle stelle periferiche delle Galassie a Spirale, si può determinarne – attraverso la meccanica classica – la massa.

Le osservazioni sperimentali ci dicono che c'è **molta più materia nell'Universo** di quanta se ne osservi (Galassie, gas intergalattico, raggi cosmici = **Materia Barionica**). Lo spazio è permeato di Materia Oscura (almeno 5 volte quella visibile).

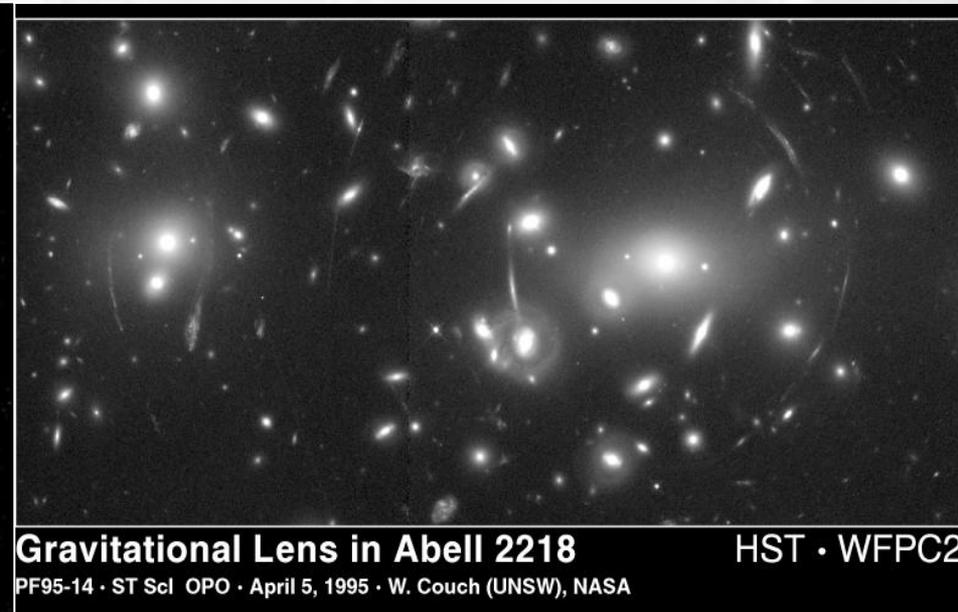
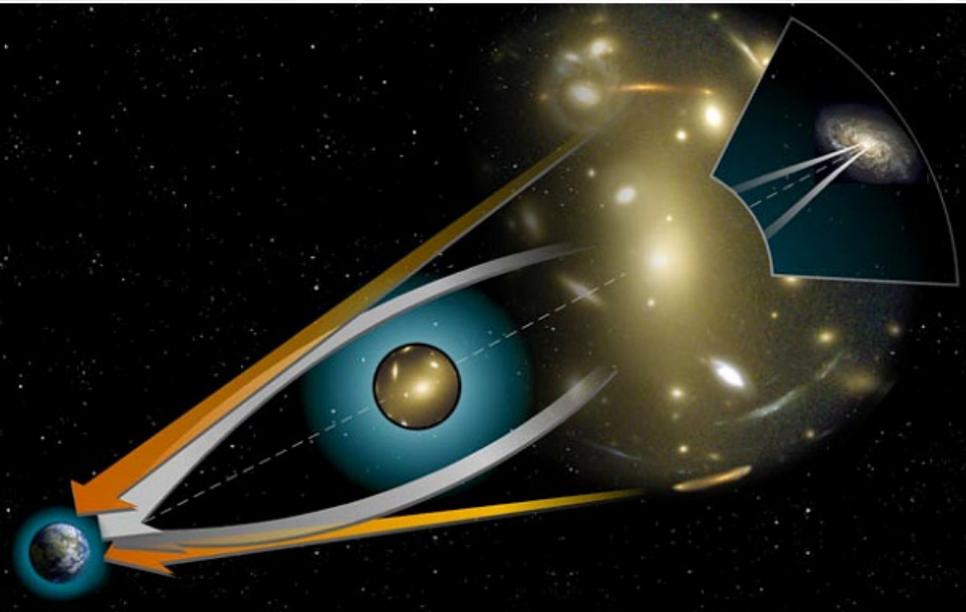
*Da cosa è costituita questa materia oscura ?*

Per molti anni si è pensato che fosse dovuta ad una massa – piccola – dei neutrini. Le misure sperimentali però rendono non percorribile questa ipotesi. Ora si ipotizza che sia formata da particelle di grande massa ( $\sim 1$  TeV), debolmente interagenti, generate nel Big Bang e da allora imprigionate nell'Universo.



## Una spettacolare indicazione sperimentale della Materia Oscura

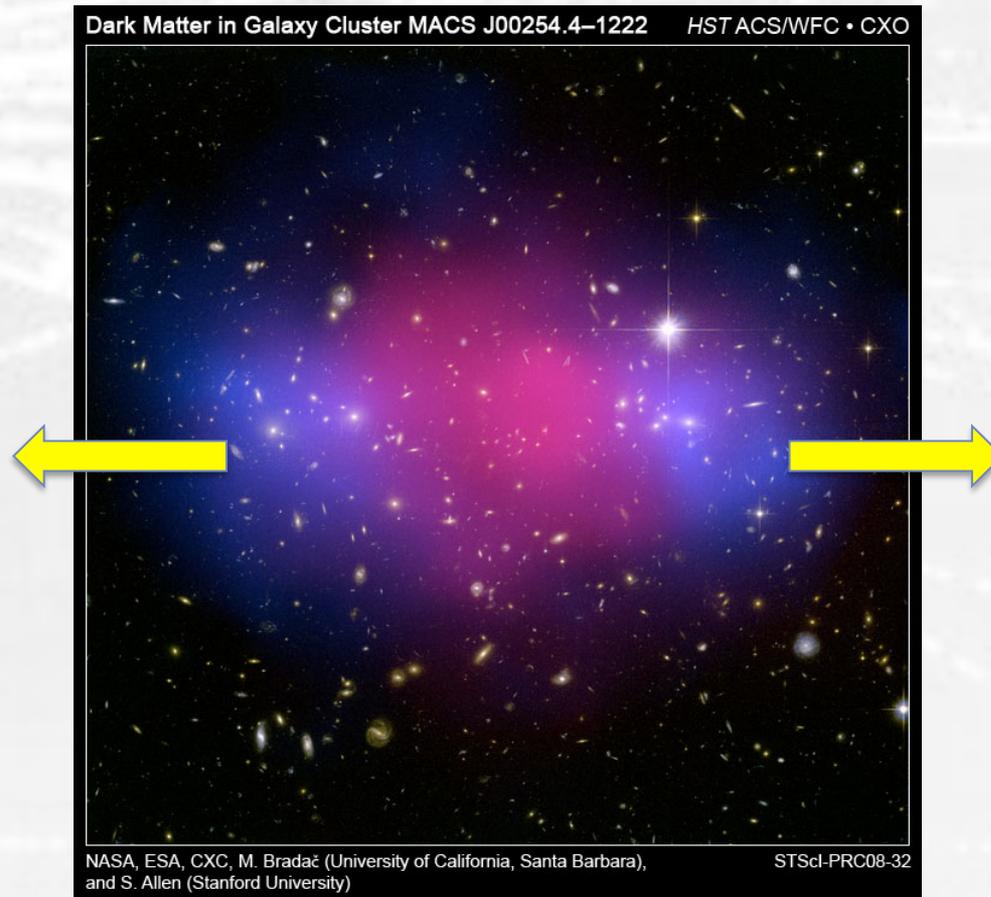
La teoria della Gravitazione di Einstein prevede che il campo di un oggetto molto massivo possa deviare significativamente la luce (Lenti Gravitazionali).



Ci sono ormai molte evidenze di oggetti celesti dei quali si osservano immagini speculari ed anelli di luce dovuti a questi effetti e causati da materia oscura che si frappone tra noi e l'oggetto osservato.

Il merito di molti dei progressi in Cosmologia va all'Hubble Space Telescope

## Un'altra spettacolare indicazione sperimentale della Materia Oscura

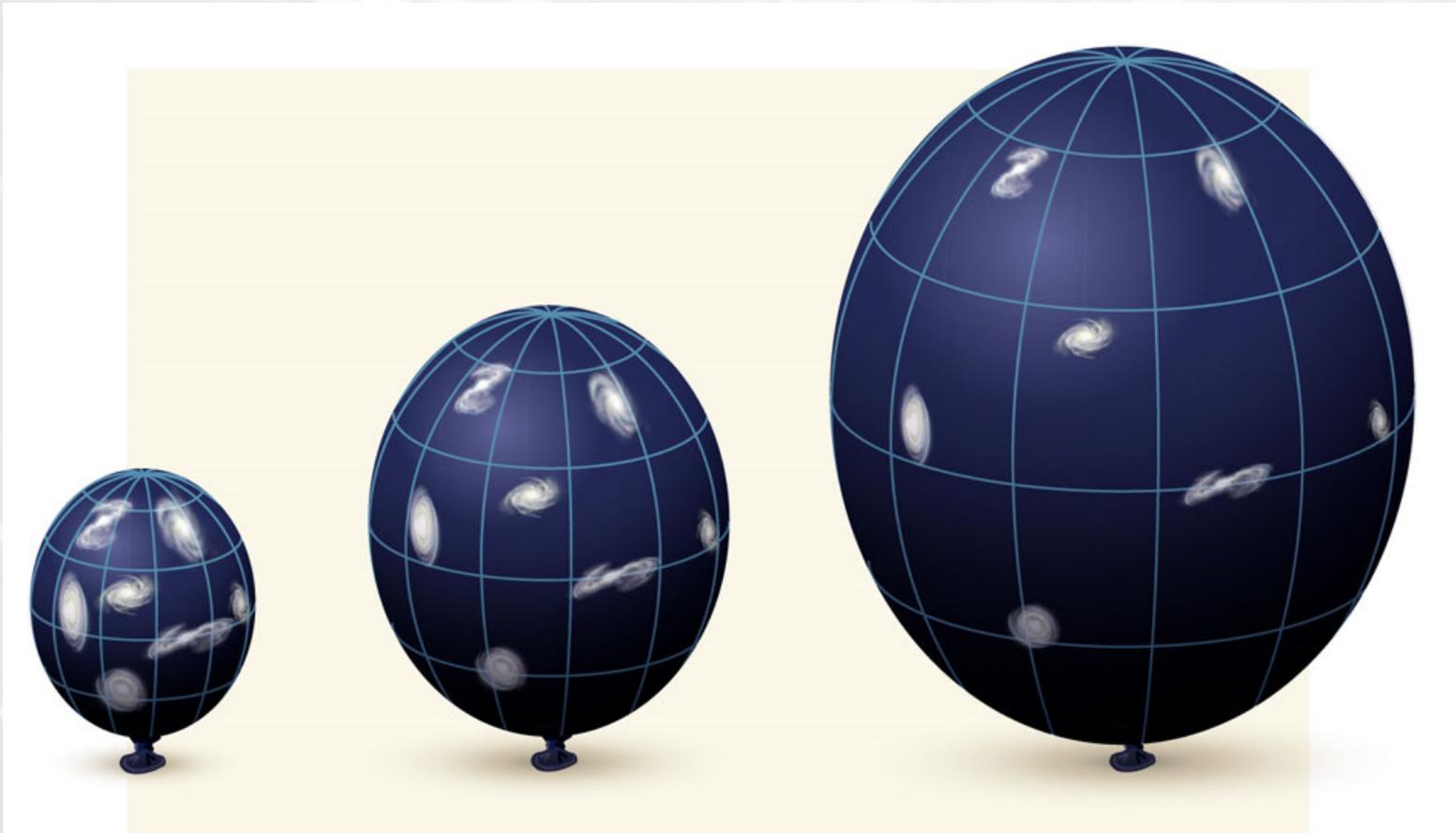


Due galassie si attraversano, ma nel passaggio, la materia “oscura” (IN BLU) sopravanza la materia “barionica” (IN ROSSO) che rimane “indietro” perche’ piu’ interagente e quindi piu’ lenta.

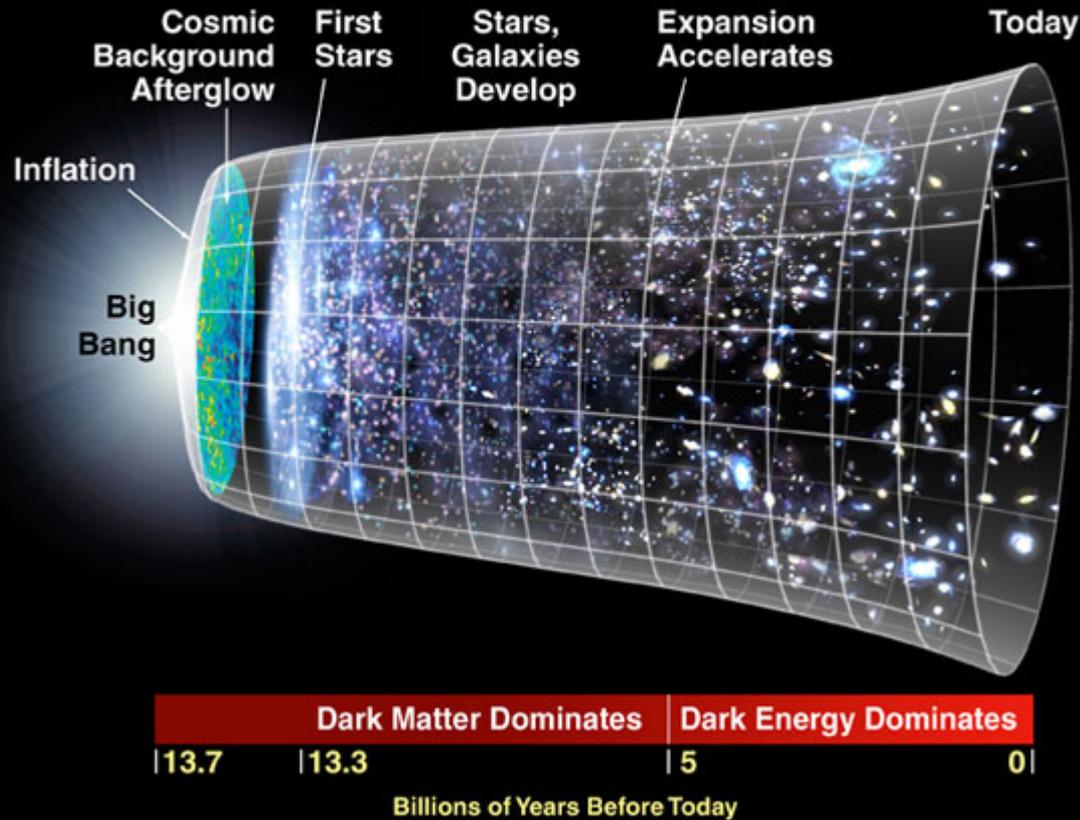
# Una questione piu “oscura” della Materia Oscura: l’Energia Oscura



Nel 1998 un gruppo di ricercatori americani, studiando le distanze tra le Supernovae molto lontane si e' accorto che – contrariamente a quanto si pensava dalla teoria di Einstein in poi – l'Universo e' in espansione e sta accelerando, sotto la spinta di una forza repulsiva ingente e sconosciuta (“Energia Oscura”).



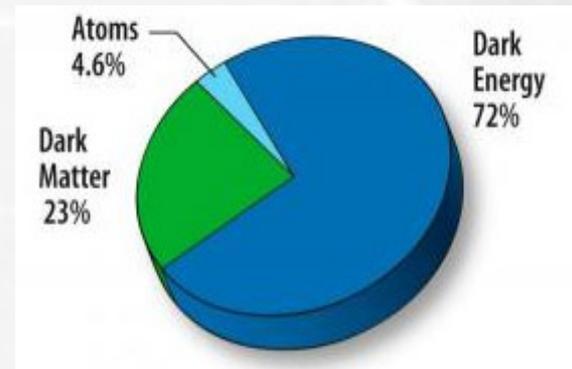
## THE EXPANDING UNIVERSE: A CAPSULE HISTORY



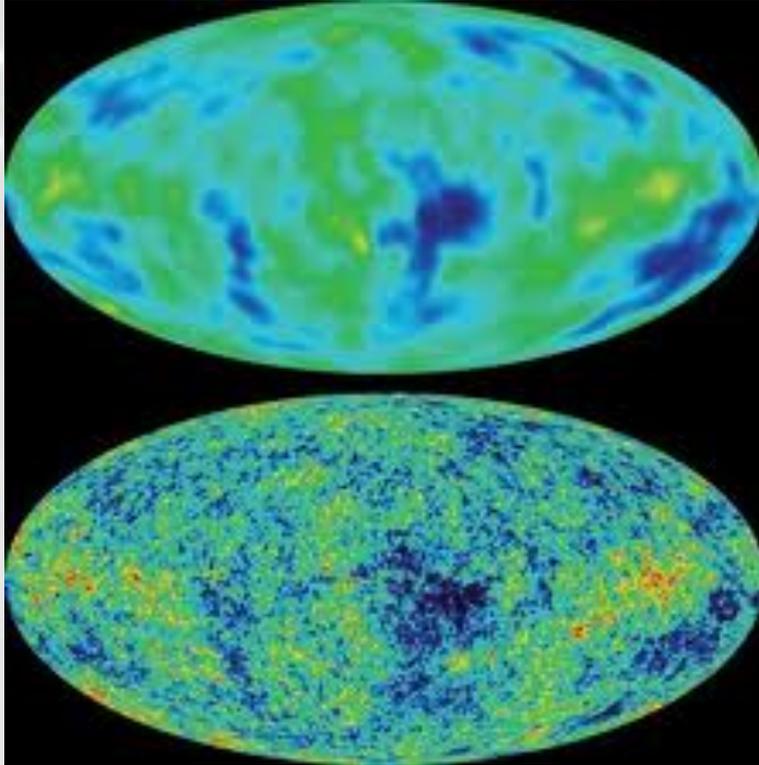
Dalle misure si deduce che:

- la materia oscura rappresenta circa il 20% della materia esistente
- l'energia oscura rappresenta oltre il 70% della materia dell'Universo

Sino ad oggi non si sa quale siano l'origine e le caratteristiche di questa forza misteriosa che si oppone alla gravitazione e allontana tra loro le Galassie



## Einstein e la Costante Cosmologica $\Lambda$



Anche altre misure, *quali quelle sulla distribuzione della radiazione di fondo a 2.7 K e lo studio dei Cluster a grande scala*, confermano che il nostro Universo sta accelerando nella sua espansione

Nel 1917, Einstein aveva predetto che, ipotizzando un Universo statico, era necessario introdurre “ad hoc” una forza repulsiva (Costante Cosmologica) che controbilanciasse l’attrazione gravitazionale

Nel 1929 Hubble scoprì che le Galassie si stanno allontanando (metodo del red shift) e quindi Einstein abbandonò l’ipotesi della costante cosmologica, definendola come “una delle sue peggiori sciocchezze” !

Oggi non si sa dare una spiegazione coerente. Vi sono molte ipotesi.

Una suggestiva è quella per la quale  $\Lambda$  potrebbe essere causata dalle fluttuazioni del vuoto (un fenomeno tipicamente quantistico) che potrebbero “generare” un’energia non nulla nello spazio. Il problema è che la stima differisce per 120 ordini di grandezza...<sup>63</sup>