

08/01/17

L'immagine dell'Universo nell'infinitamente piccolo

1

# L'IMMAGINE DELL'UNIVERSO NELL'INFINITAMENTE PICCOLO

Cesare Bini -- Sapienza Università e INFN, Roma  
Biblioteca Planettiana - Jesi – 13/01/2017

# Sommario

- **Introduzione:** l'infinitamente grande e l'infinitamente piccolo → le *frontiere* della *Fisica Fondamentale*.
- Un po' di **Storia:** la gravitazione, l'elettromagnetismo, la tavola periodica, la radioattività...
- La **Fisica delle Particelle Elementari** oggi
  - Il Metodo
  - Il *Modello Standard*
  - Il *bosone di Higgs*: l'architrave della teoria
- Alcuni (grandi) **problemi aperti** oggi
  - Ovvero: perché pensiamo che il Modello Standard non sia la "fine della storia".
- **Conclusione.**

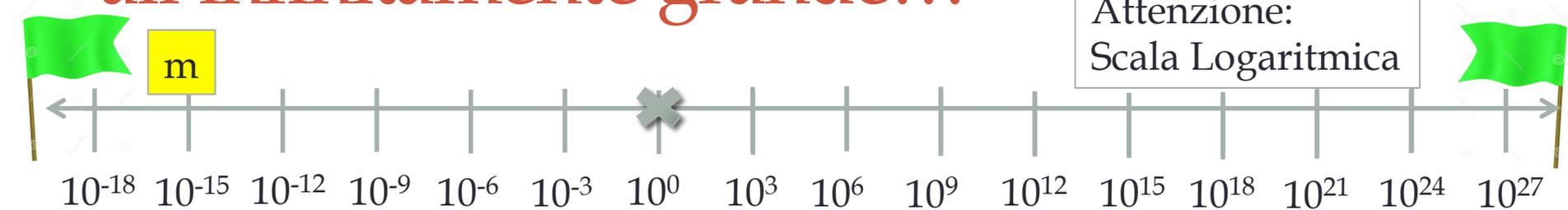
# INTRODUZIONE

---

L'infinitamente grande e l'infinitamente piccolo → le frontiere della Fisica Fondamentale.

# Dall'infinitamente piccolo... all'infinitamente grande...

Attenzione:  
Scala Logaritmica



A collage of images illustrating the range of scales from the infinitesimally small to the infinitely large. On the left, subatomic particles and a DNA double helix are shown. In the center, a human figure, Earth, and the Sun are depicted. On the right, a spiral galaxy is shown. At the bottom, various scientific instruments are displayed, including a particle accelerator tunnel, a laboratory apparatus, a microscope, a ruler, a radio telescope, and the International Space Station.

**ELETRONI**  
(carica negativa)

**NUCLEO**  
(carica positiva)

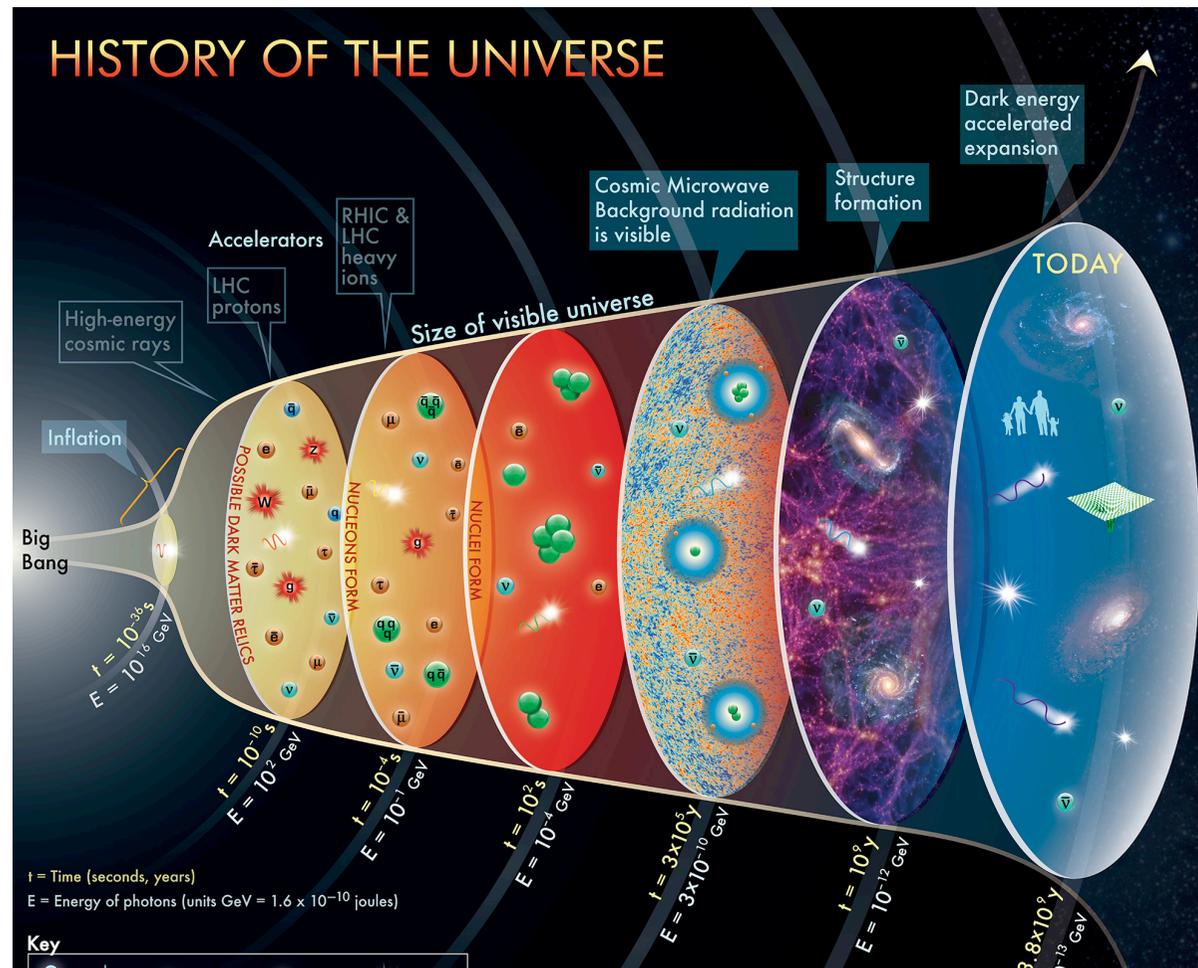
**Universo Osservabile**

## In che modo esploriamo le due “frontiere” ?



- Sono due frontiere molto esplorate.
- **Frontiera n.1:** l'  $\infty$ -mente piccolo: *pochi mattoni elementari e poche forze tra di essi*. L'idea di Democrito, presente in tutta la storia della filosofia, è ancora attuale.
- **Frontiera n.2:** l'  $\infty$ -mente grande: *l' Universo come un tutto, la sua struttura, la sua storia, il suo destino*. Il XX-mo secolo vede la nascita della prima cosmologia basata sull'osservazione !
- Nel seguito mi concentro sulla Frontiera n.1: da *Rutherford* a *Higgs*, un secolo intero di scoperte...

C'è una terza frontiera: quella dell'infinitamente vicino al Big Bang (infinitamente caldo..).



Quindi: l'infinitamente piccolo è uno strumento fondamentale per capire la storia dell'Universo

# La “Fisica Fondamentale”, ovvero la “Scienza delle Frontiere”

- E' il tentativo di dare risposta all'aspettativa che molti fisici hanno rispetto alla frontiera:
  - *POCHE leggi fondamentali per descrivere TUTTI i fenomeni naturali valide in ogni tempo in TUTTO l'Universo !*
- Per raggiungere questo obiettivo è naturale guardare alla frontiera dell'infinitamente piccolo.
- Le leggi che descrivono tutto questo devono essere:
  - **UNIVERSALI**
  - **UNITARIE**
  - **SEMPLICI, ELEGANTI**
- Secoli di esperienza di “sintesi” alle spalle creano queste aspettative.

# UN PO' DI STORIA

---

La gravitazione, l'elettromagnetismo, la tavola periodica, la radioattività...

# Prima “sintesi”: la Gravitazione

Una qualsiasi coppia di “corpi” di masse  $m_1$  ed  $m_2$  sperimentano una mutua forza data dalla legge:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$$

Dove:

$m_1$  ed  $m_2$  = masse dei corpi

$R$  = distanza tra i due corpi

$G$  = costante “universale”

Si tratta di una **LEGGE UNIVERSALE**

valida per **TUTTI** i corpi indipendentemente da come sono fatti e da cosa sono fatti: dipende da masse e distanza.

**UNIFICAZIONE di fenomeni apparentemente diversi:**  
pianeti, stelle, galassie, in nostri corpi sulla terra...

**In 1798 – esperimento di Cavendish:**

Misura diretta dell'attrazione tra 2 corpi → massa della Terra!



I.Newton (1642 -1727)



H.Cavendish (1731 -1810)

## Seconda "sintesi": l'elettromagnetismo

- Le equazioni di Maxwell

Una sintesi di:

- Elettrocità;
- Magnetismo;
- Ottica.

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$



J.C.Maxwell (1831 -1879)

Un'altra *proprietà UNIVERSALE della Natura*:

$\rho, \mathbf{J}$  (cariche e correnti)

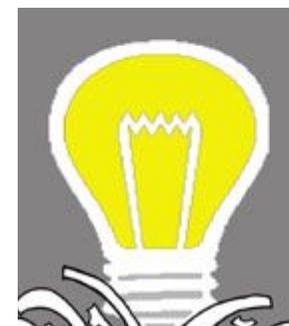
$\mathbf{E}, \mathbf{B}$  sono i campi  $\rightarrow$  le forze

Di nuovo, una straordinaria *UNIFICAZIONE*

Le equazioni di Maxwell  
in forma covariante:  
L'**eleganza** e la **bellezza**

$$\begin{aligned}\partial_\mu F^{\mu\nu} &= -\frac{4\pi}{c} j^\nu \\ \partial_\mu \hat{F}^{\mu\nu} &= 0\end{aligned}$$

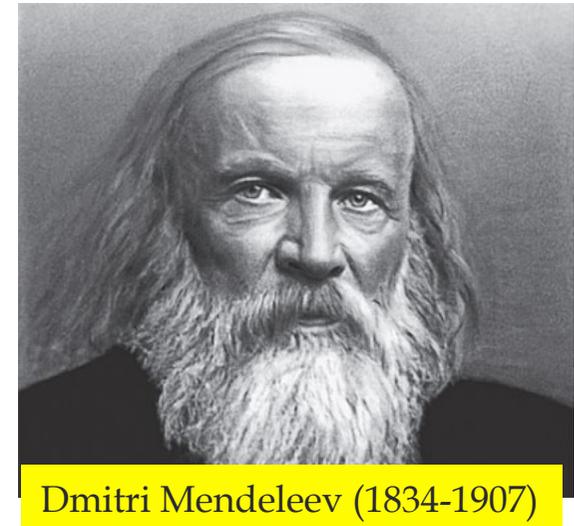
Maxwell comprende che:  
 $c = v$  (light)  $\sim 300,000$  km/s  
***Ecco che cos'è la luce !!!***



## (Commento: fisica e matematica)

- Quando le proprietà della Natura sono “raccontate” da formule matematiche, possono svelare caratteristiche nascoste.
- Esempio: la completa simmetria tra E e B (elettricità e magnetismo) non è evidente dalla semplice raccolta di fatti sperimentali.
- E.Wigner: “The Unreasonable Effectiveness of Mathematics” (1959)

# Terza "sintesi": La tavola periodica degli elementi



Dmitri Mendeleev (1834-1907)

1																		Nuovo Originale		18																													
IA																		IIA		VIIIA																													
1	H																	2	He																														
3	Li	4	Be																	10	Ne																												
11	Na	12	Mg																	18	Ar																												
19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr														
37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe														
55	Cs	56	Ba	57 to 71																72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra	89 to 103																104	Rf	105	Db	106	Sg	107	Bh	108	Hs	109	Mt	110	Ds	111	Rg	112	Uub	113	Uut	114	Uuq	115	Uup	116	Uuh	117	Uus	118	Uuo

Le masse atomiche tra sono quelle degli isotopi più stabili o più comuni.

Design Copyright © 1997 Michael Daysh (mdaysh@daysh.com) http://www.daysh.com/periodic

Nota: Il sotto gruppo dei numeri 1-18 è stato adottato nel 1984 dalla International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). I nomi degli elementi 112-118 sono gli equivalenti italiani di quei nomi.

57	La	58	Ce	59	Pr	60	Nd	61	Pm	62	Sm	63	Eu	64	Gd	65	Tb	66	Dy	67	Ho	68	Er	69	Tm	70	Yb
89	Ac	90	Th	91	Pa	92	U	93	Np	94	Pu	95	Am	96	Cm	97	Bk	98	Cf	99	Es	100	Fm	101	Md	102	No

Sintesi straordinaria: Tutte le sostanze che ci circondano sono riconducibili a un numero finito di elementi, la cui classificazione segue uno schema molto semplice..

## Ricapitolando:

Dunque: *le 2 forze finora scoperte si "dividono" i campi di azione:*

gravitazione

→ fenomeni astronomici e terrestri

elettromagnetismo

→ materia:

→ chimica

→ biologia

→ proprietà dei materiali

→ .....

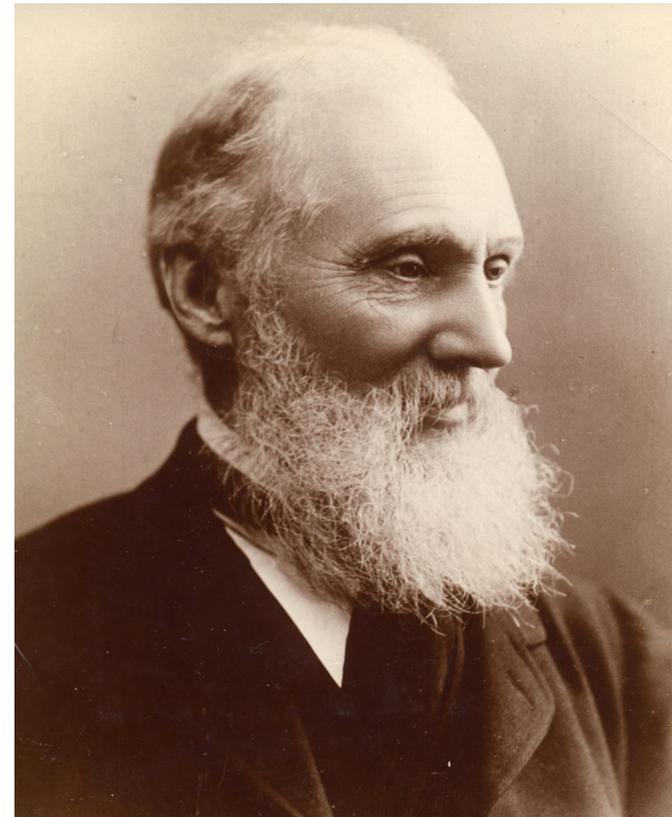
La materia è invece riconducibile agli elementi della Tavola Periodica

## La grande illusione- intorno al 1900...

“There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.”

Lord Kelvin: Discorso inaugurale al convegno della British Association for the Advancement of the Science (1900)

Ma di lì a poco fenomeni completamente nuovi furono scoperti e tutto il castello teorico dovette essere rivisto in profondità..



William Thomson (lord Kelvin)  
(1824-1907)

# Radioattività, atomi, nuclei: serve “qualcosa di nuovo”

Primi decenni del '900:  
scoperta della struttura atomica.

Come è possibile tenere insieme cariche elettriche positive a distanze così piccole ?

→ **Occorre introdurre una nuova forza:**

→ *Attrattiva;*

→ *Molto intensa a piccole distanze ma nulla a grandi distanze;*

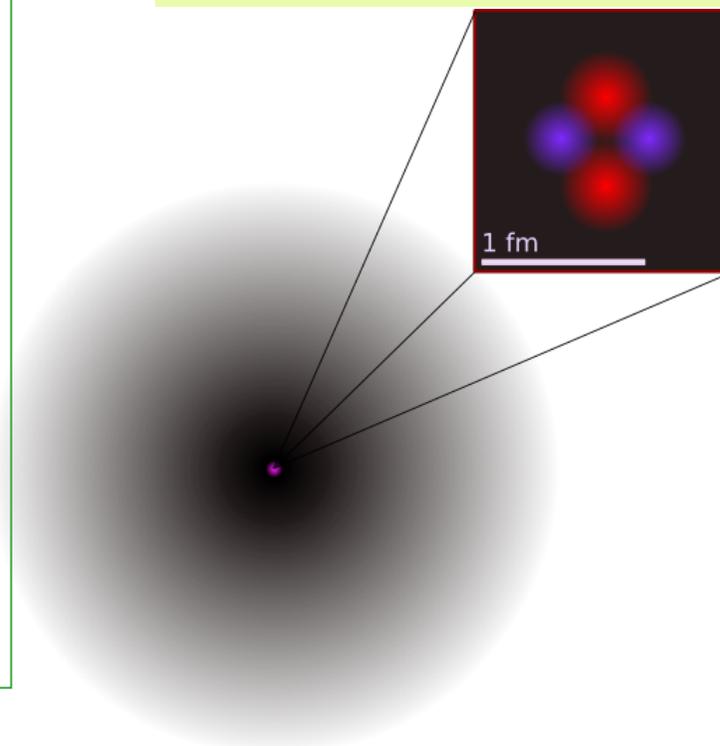
→ *Solo alcune particelle la “sentono” (carica nucleare).*

*“nuovo” tipo di forza*

→ **La FORZA NUCLEARE**



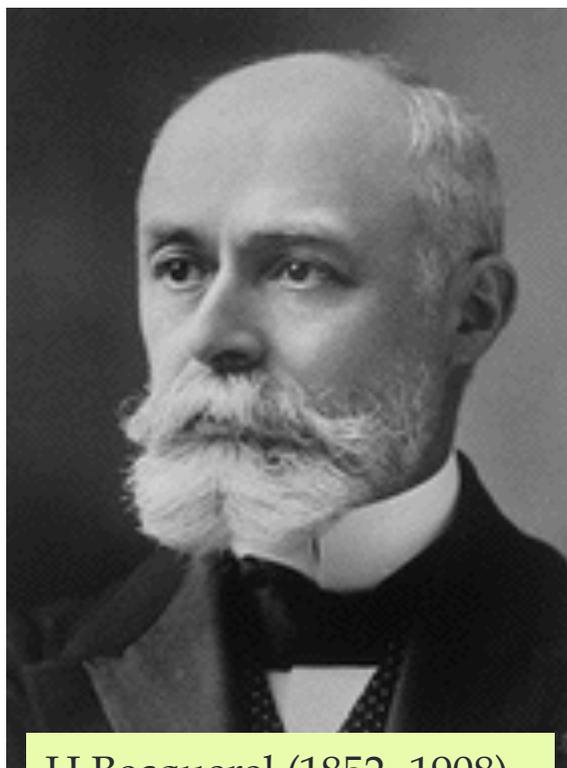
E. Rutherford (1871 - 1937)



1 Ångström (=100,000 fm)

# I decadimenti radioattivi: chi li fa avvenire ?

H.Becquerel scopre la radioattività (1896)



H.Becquerel (1852 -1908)

Cosa vuol dire che una particella decade ?

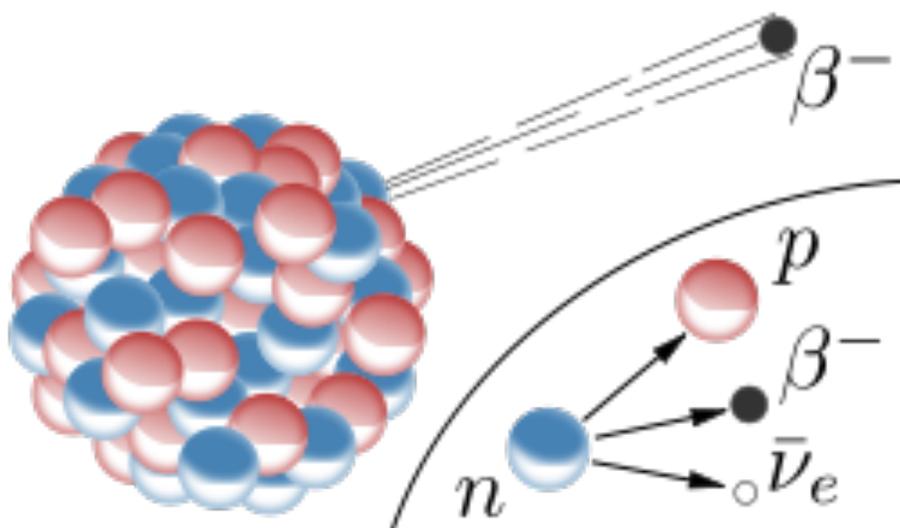
C'è una *forza* che la induce a decadere verso uno stato più favorevole energeticamente.

***Decadimento  $\alpha$***  : forza nucleare

***Decadimento  $\gamma$***  : forza elettromagnetica

***Decadimenti  $\beta$***  ?

# Il decadimento beta: c'è bisogno di qualcos'altro ancora



Fenomeno assolutamente nuovo:

“di punto in bianco”, *da un nucleo vedo uscir fuori un elettrone;*

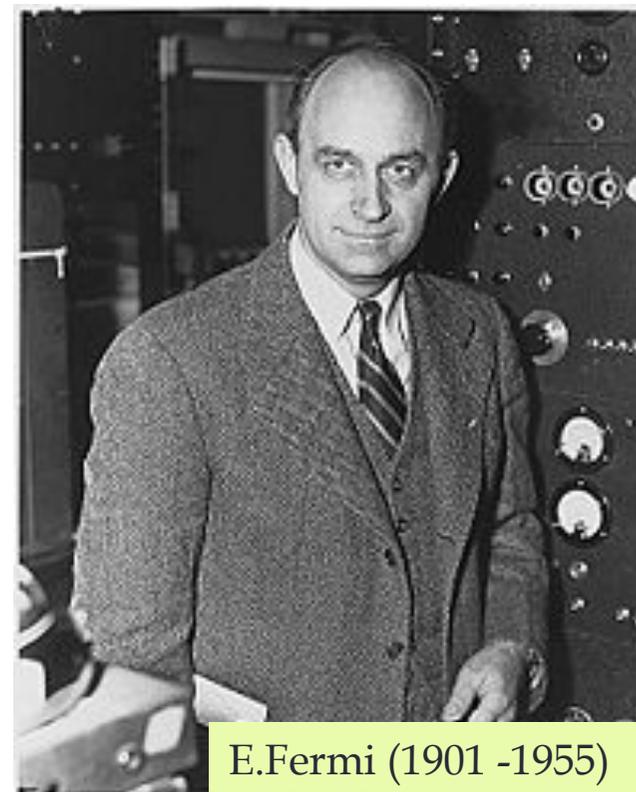
Oppure, (ancora piu' strano)

*neutrone → protone + elettrone*

“una particella si trasforma in un'altra”

E.Fermi formula la teoria del decadimento beta (1931):

→ *interazioni nucleari deboli*



E.Fermi (1901 -1955)

# Le forze deboli sono solo un “accidente” o servono a qualcosa ?

Sono un elemento cruciale del *ciclo solare*.  
(produzione di energia nelle stelle)

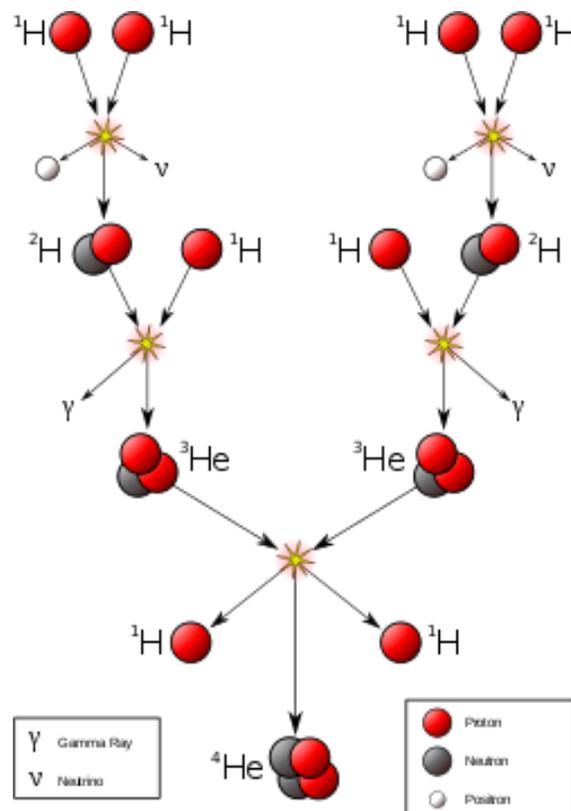
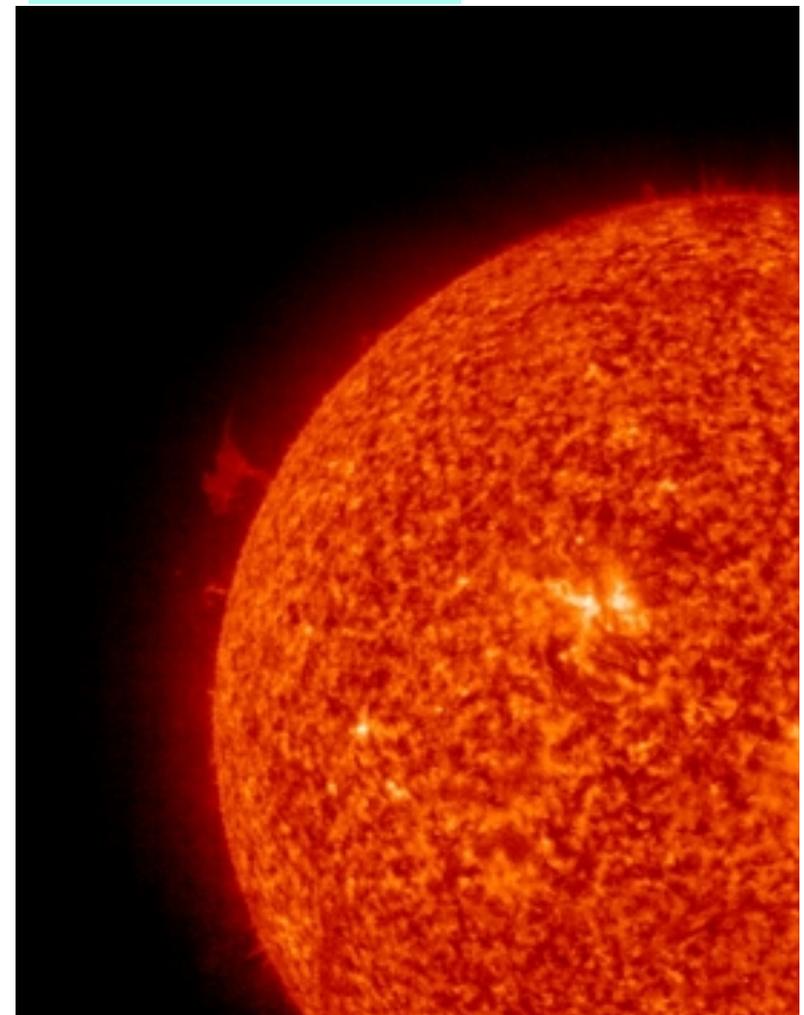


Immagine del sole



## Dunque (siamo a metà del XX-mo secolo): 4 Forze Fondamentali + molte particelle

- **Forza Gravitazionale:** domina i fenomeni astronomici;
- **Forza Elettromagnetica:** determina le proprietà importanti della materia;
- **Forza Nucleare Forte:** stabilità dei nuclei e produzione di energia nelle stelle;
- **Forza Nucleare Debole:** alcuni decadimenti radioattivi e trasformazione di protoni in neutroni fondamentali per il ciclo stellare.

# LA FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

---

Il Metodo

Il Modello Standard

Il bosone di Higgs: l'architrave della teoria

# La fisica delle particelle elementari: il metodo.

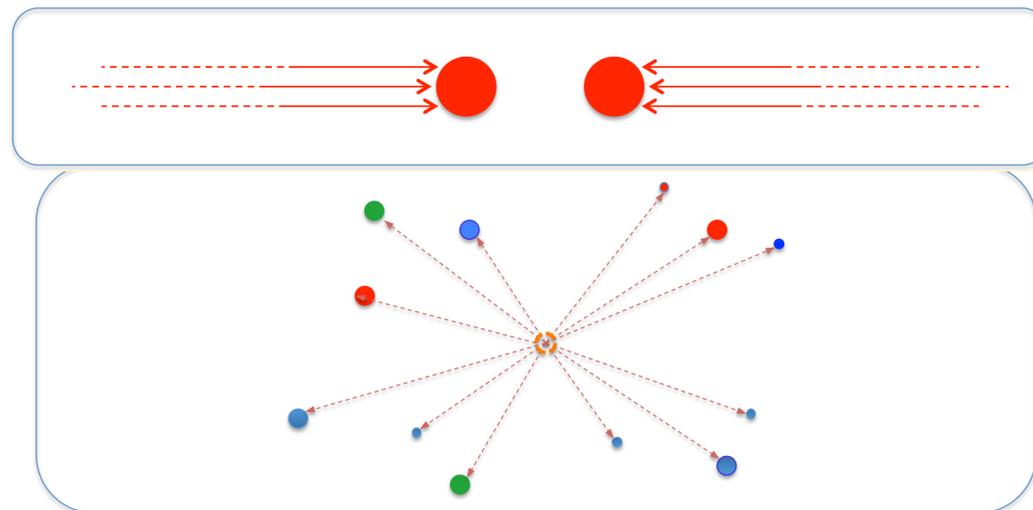
## Esperimenti:

- *far collidere cose* e vedere cosa succede.
- più alta è l'*energia dei proiettili*
  - più piccole le dimensioni che riesco a risolvere
  - più grande il numero di nuove particelle che riesco a "creare"
  - più vicino al BigBang

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx d$$

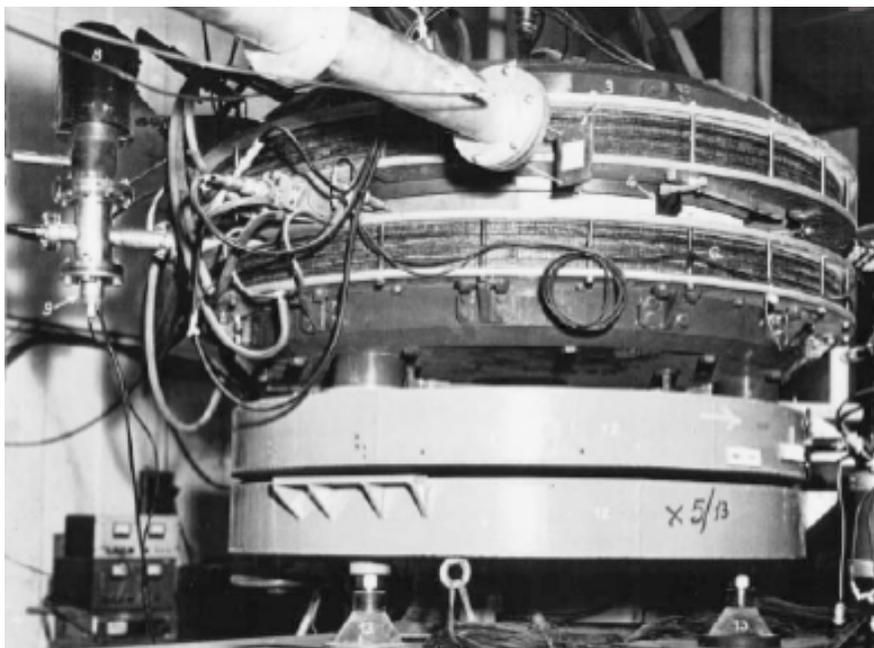
## Teoria:

- *Quantum Field Theory* è il linguaggio matematico che mette insieme *meccanica quantistica e relatività*.
- Nasce il Modello Standard delle particelle elementari.



# Da AdA ad LHC: gli acceleratori

Gli acceleratori diventano sempre più grandi per consentire alte energie.



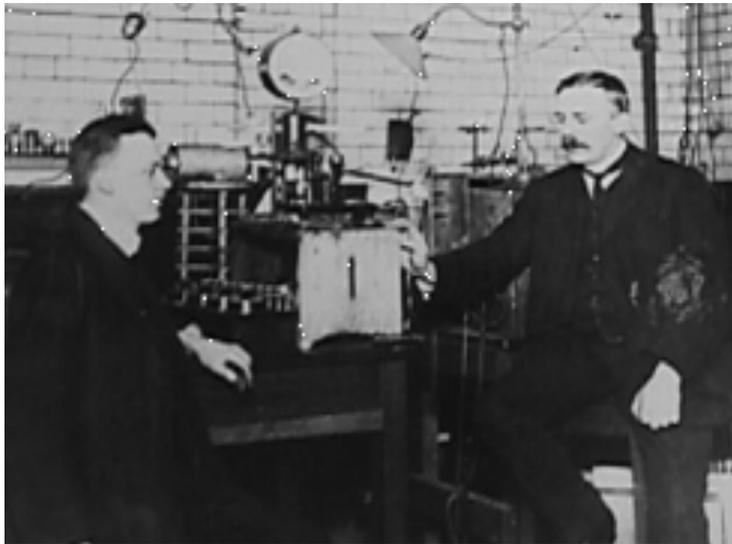
AdA: Frascati, anni '60

Tunnel di LEP-LHC costruito negli anni '80 ancora in funzione.



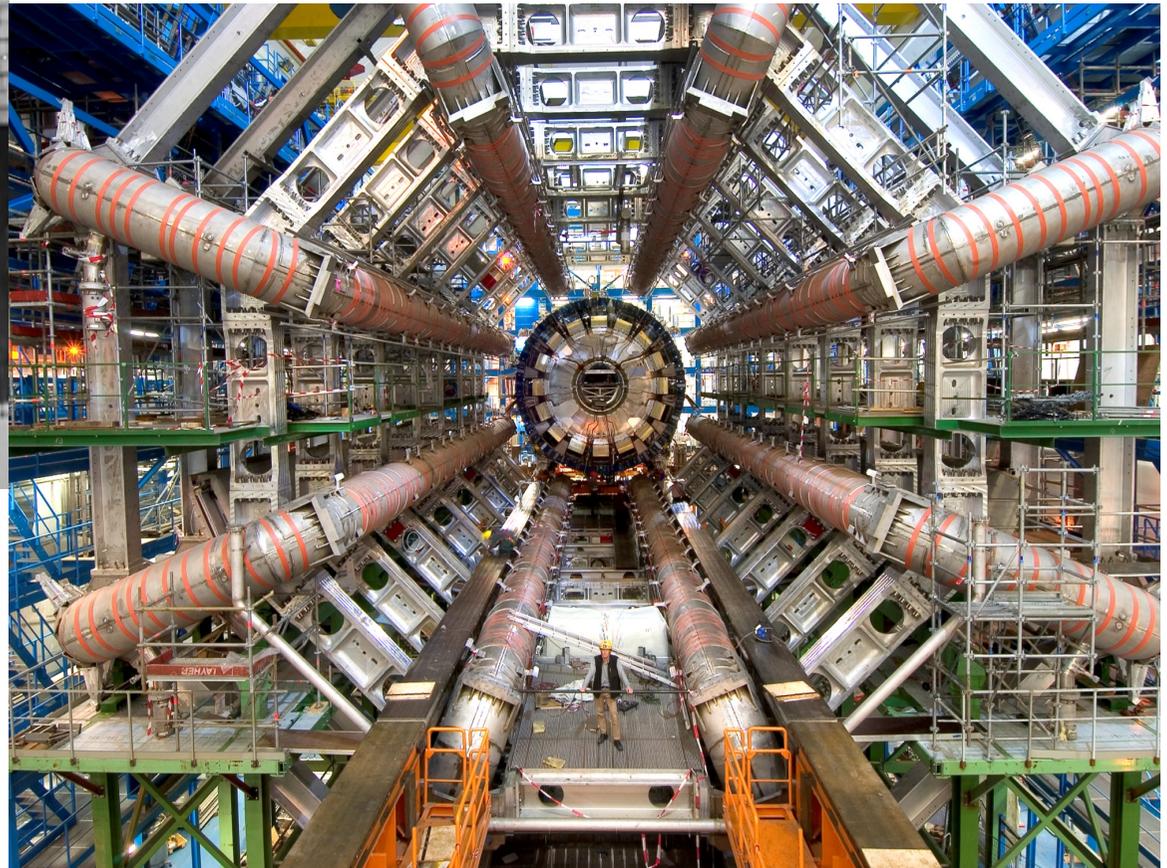
# Da Rutherford ad ATLAS: i rivelatori

Rivelatori: gli "occhi" per vedere  
I risultati delle collisioni

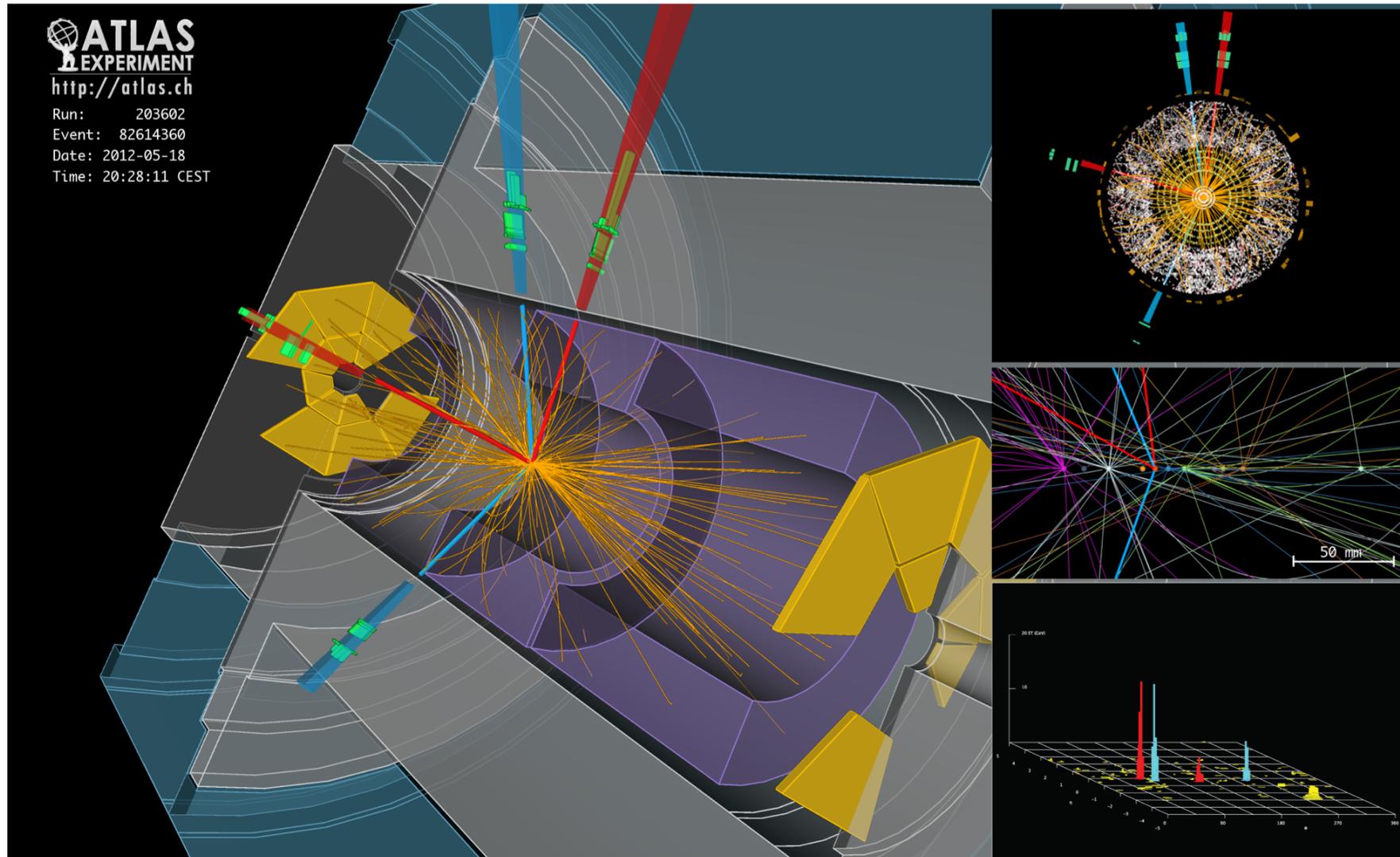


L'esperimento di Rutherford del  
1911: il rivelatore sulla scrivania.

L'esperimento ATLAS ad LHC



# Cosa succede in una collisione p-p ad altissima energia ?

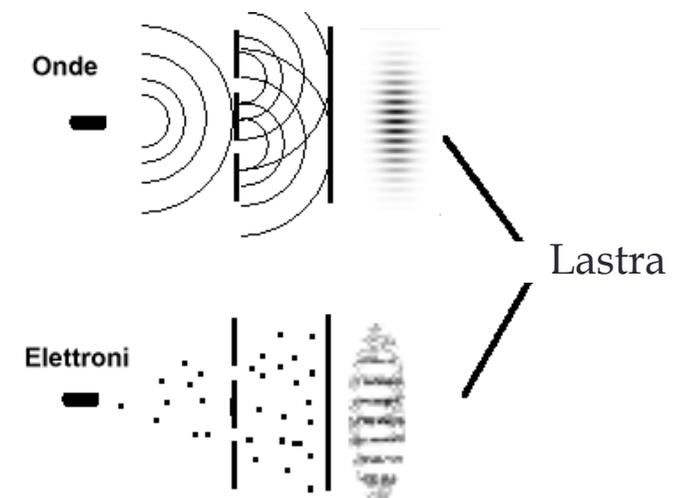
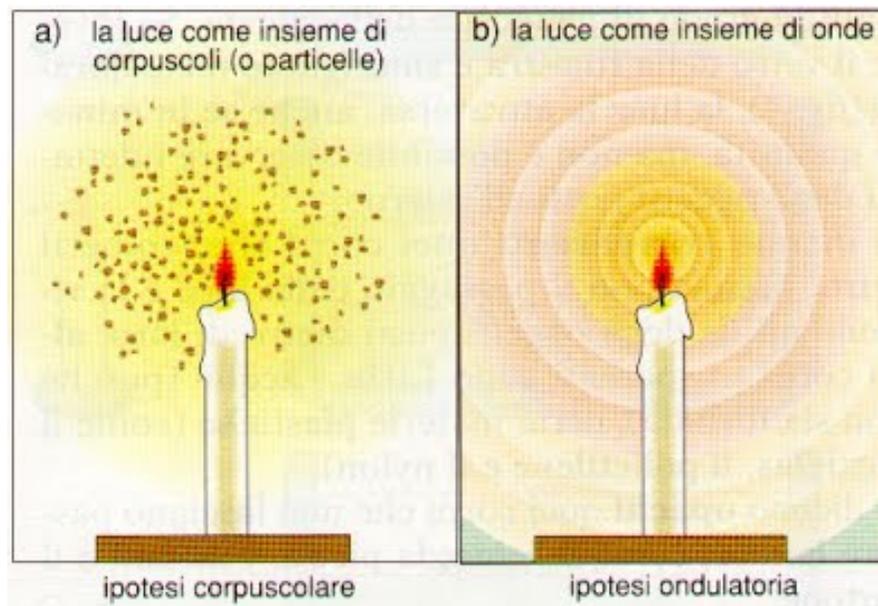


# La “Big Science”

- Che significa fare un esperimento di fisica delle particelle ?
  - Molti soldi
  - Molte persone (fisici, ingegneri, tecnici)
  - Molto tempo (20-30 anni tra progetto e realizzazione)
- Implicazioni “Sociologiche”
  - Specializzazione
  - Strutture di Management
  - “Democrazia” nelle scelte ?
  - ...

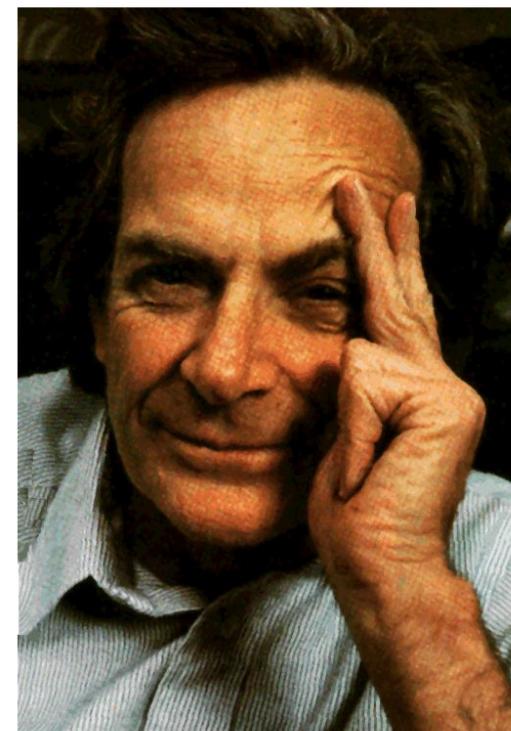
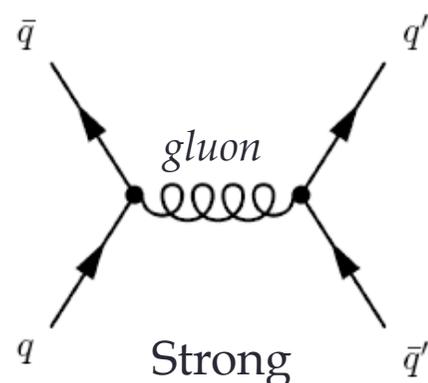
## Dove siamo arrivati ? Quale è oggi l'immagine della materia nell'infinitamente piccolo ? **Il Modello Standard**

- Il **Modello Standard** → Teoria che fa predizioni di grandezze misurabili: “testabile” e “falsificabile” (molti autori, Dirac, Schwinger, Feynman, Glashow, Weinberg, Salam, t'Hooft, Higgs,...)
- L'entità fondamentale è il **CAMPO** : funzione di spazio e tempo  $f(x,t)$ . Si manifesta in modo duplice:  
→ onda e particella



## Ma anche le forze sono campi, quindi sono delle "particelle" ...

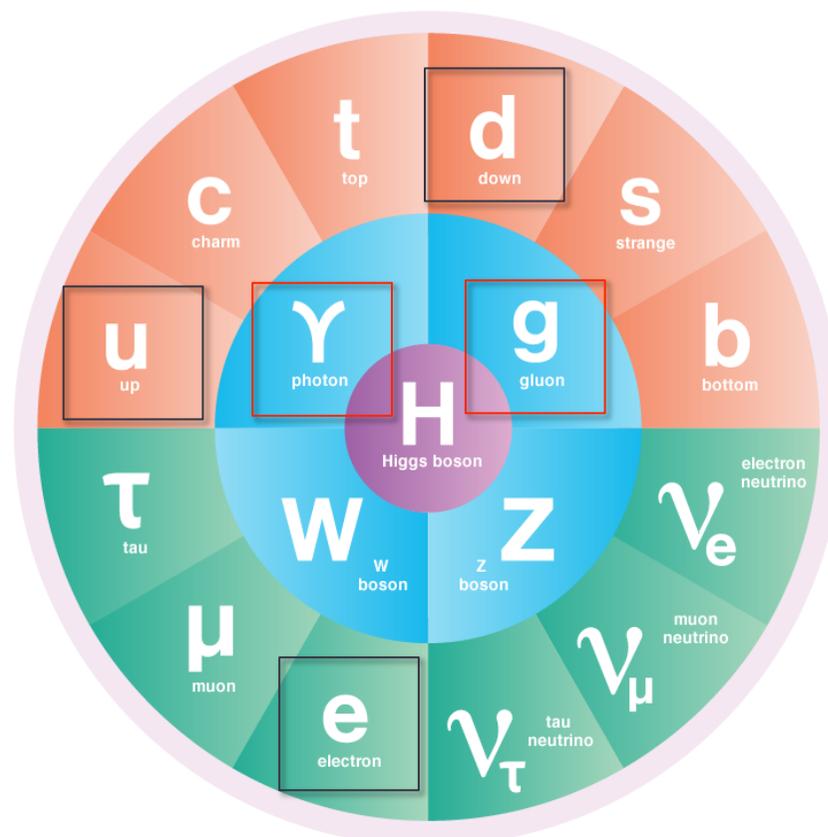
- *Si, infatti anche le **forze** sono descritte da campi !!*
- Interazione con scambio di un quanto "mediatore della forza" (i bosoni di gauge)



R.P.Feynman (1918 -1988)

## I campi elementari: la nuova “tavola periodica”

- Le particelle elementari (cerchio esterno):
  - **Quarks** (6 tipi - arancione)
  - **Leptoni** (6 tipi - verde)
- I mediatori delle forze (cerchio intermedio):
  - **Fotone** (elettromagnetismo)
  - **W/Z** (interazioni deboli)
  - **Gluon** (interazioni nucleari)
- Il **bosone di Higgs** (cerchio interno)
- Manca qualcosa ? Sì, la gravitazione..



Gli atomi: protoni, neutroni ed elettroni

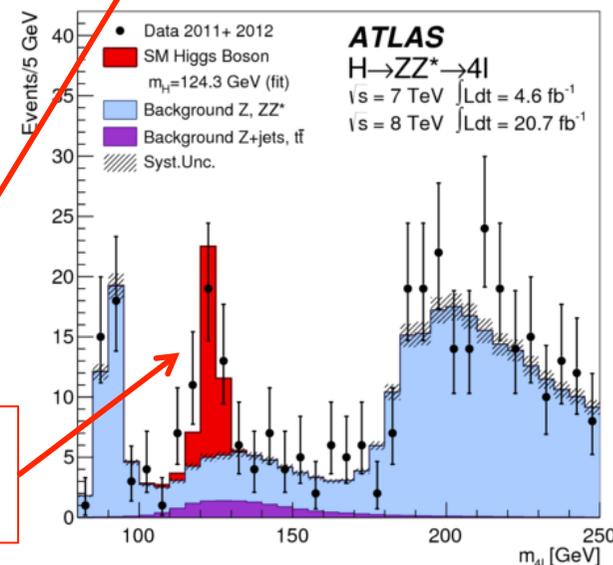
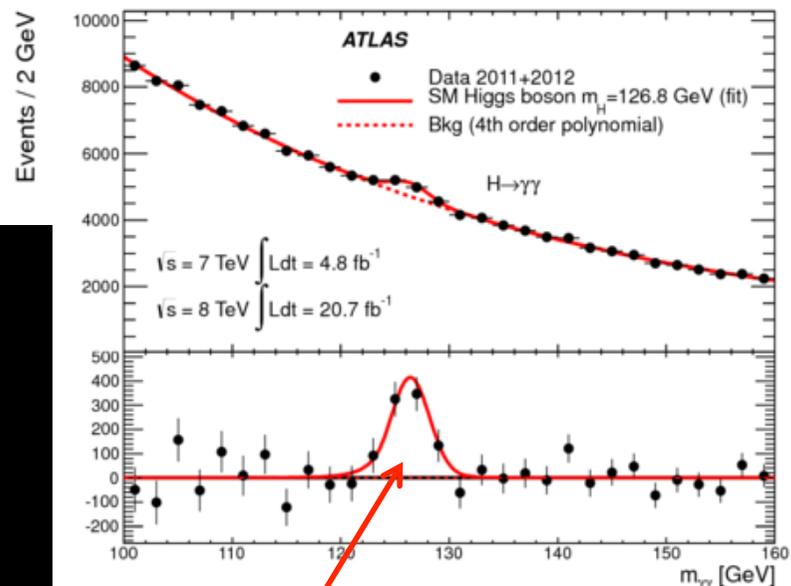
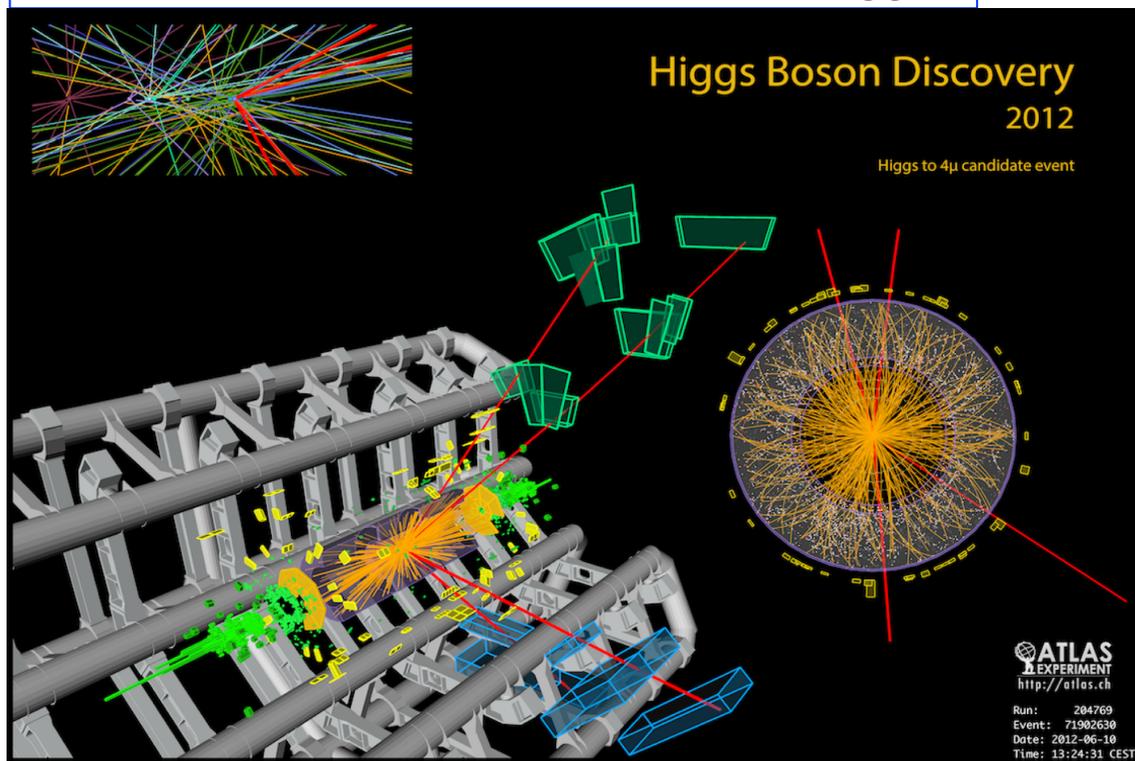
Le forze che li tengono insieme

## Il bosone di Higgs: una “crisi” e la sua soluzione..

- Crisi (anni '60): *i termini di massa* sono incompatibili con il modello Standard; ma noi osserviamo le masse.. Come è possibile ?
- → Idea di P.Higgs, R.Brout and F.Englert: un nuovo campo che interagisce direttamente con gli altri campi per dare loro la proprietà di avere massa. *In questo modo tutto rimane consistente.*
- Come può essere accettata un'idea ?  
Sono se fa previsioni che possono essere testate.  
La predizione di Higgs è: **il campo di Higgs da origine ad una particella nuova con determinate proprietà:**  
→ Gli esperimenti cominciamo a cercarla.

# Caccia al bosone di Higgs : 1964 - 2012...

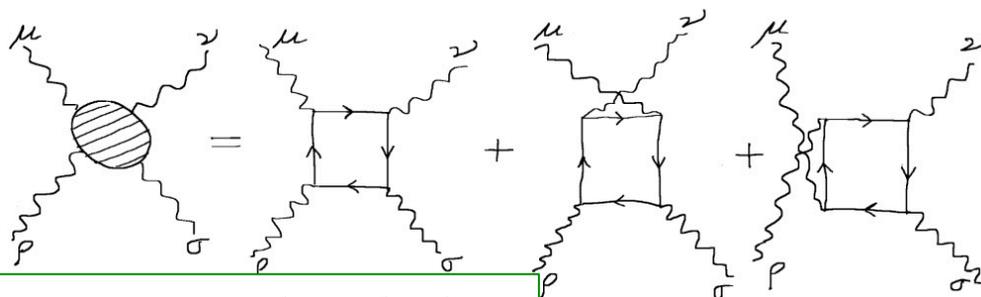
2012: ATLAS and CMS @ LHC  
 Osservano una nuova particella consistente con le proprietà attese del bosone di Higgs



"Picchi" in Istogrammi.

# Il Modello Standard gode di buona salute ?

- SI ! Tutte le predizioni sono in accordo con i risultati sperimentali
- In certi casi si ottengono grandi precisioni
- Esempio: il momento magnetico del muone

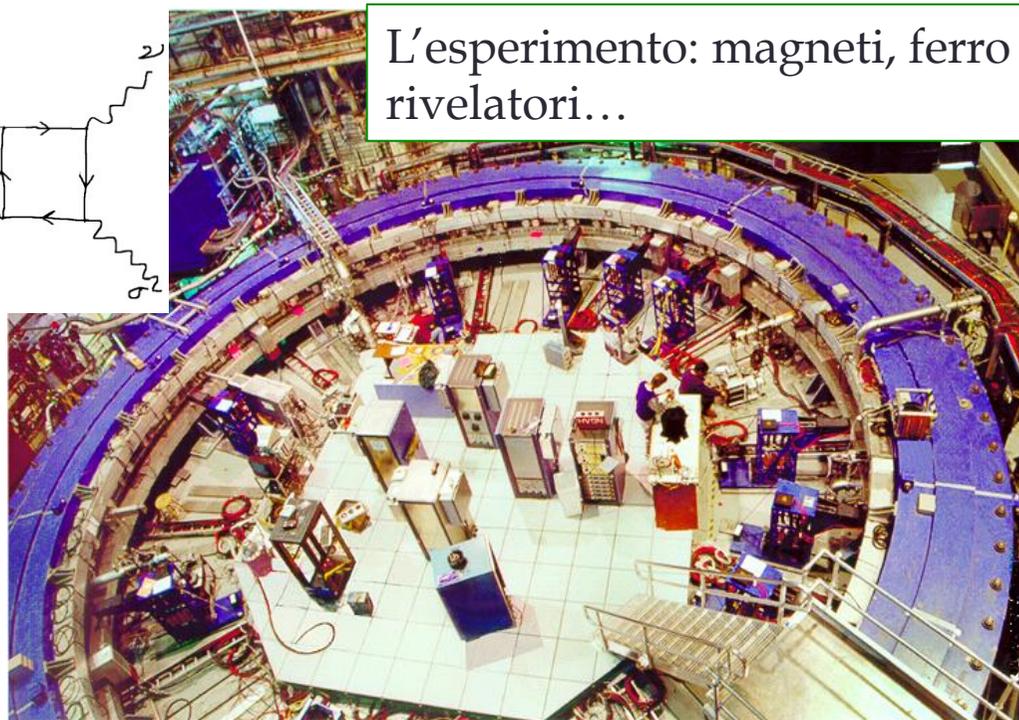


La teoria: molti calcoli...

Experiment :=  $(116591802 \pm 49) \times 10^{-11}$

Theory :=  $(116592089 \pm 63) \times 10^{-11}$

L'esperimento: magneti, ferro rivelatori...



# PROBLEMI APERTI

---

Ovvero: perché pensiamo che il Modello Standard non sia la “fine della storia” ..

## Siamo alla fine della storia ? Il Modello Standard è la “Teoria del Tutto” ?

- Possiamo dire nel 2017 quello che Lord Kelvin diceva nel 1900 ?
- NO: ci sono due categorie di problemi.

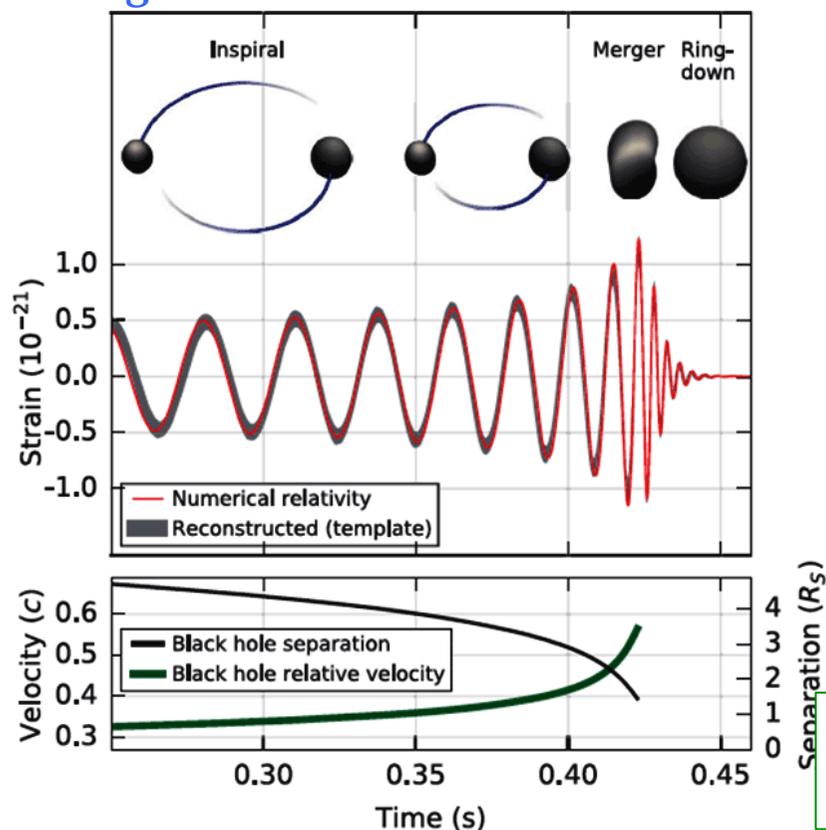
Il Modello Standard è *incompleto*

Il Modello Standard è *insoddisfacente sul piano logico*

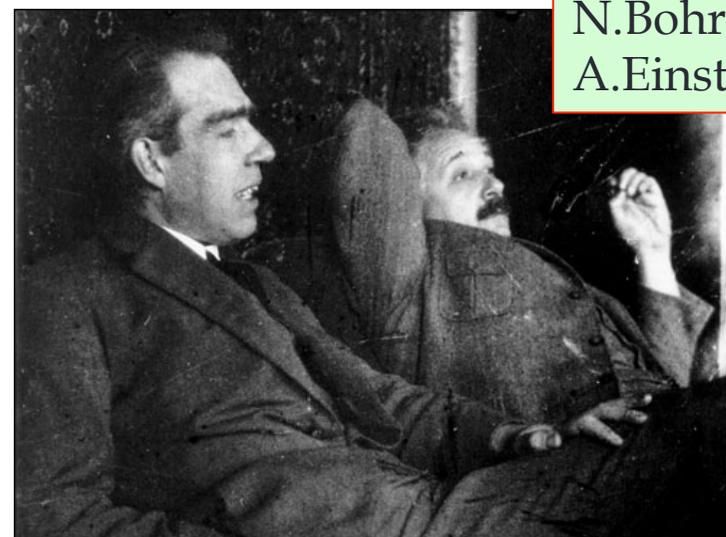
Nel seguito passo in rassegna una lista di 5 problemi aperti.

# 1) Dove mettiamo la gravitazione ?

Settembre 2015: primo segnale di **onda gravitazionale** (esperimento LIGO, USA). Effetto predetto dalla Relatività Generale, analogo delle onde e.m. (luce) *ma segnale debolissimo...*



- Il Modello Standard non include i processi gravitazionali.
- La Gravitazione è descritta dalla teoria della Relatività Generale, una teoria “classica”
- Gli effetti Quantistici sono incompatibili con l’esigenza della Relatività Generale di uno spazio “regolare”



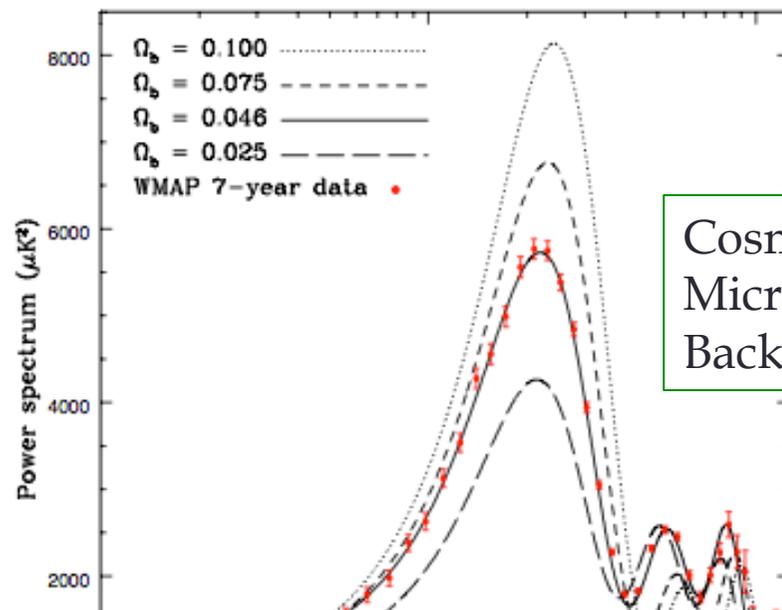
N.Bohr  
A.Einstein

La quantizzazione del campo gravitazionale è un “sogno” dei fisici teorici da svariati decenni...

## 2) La Materia Oscura

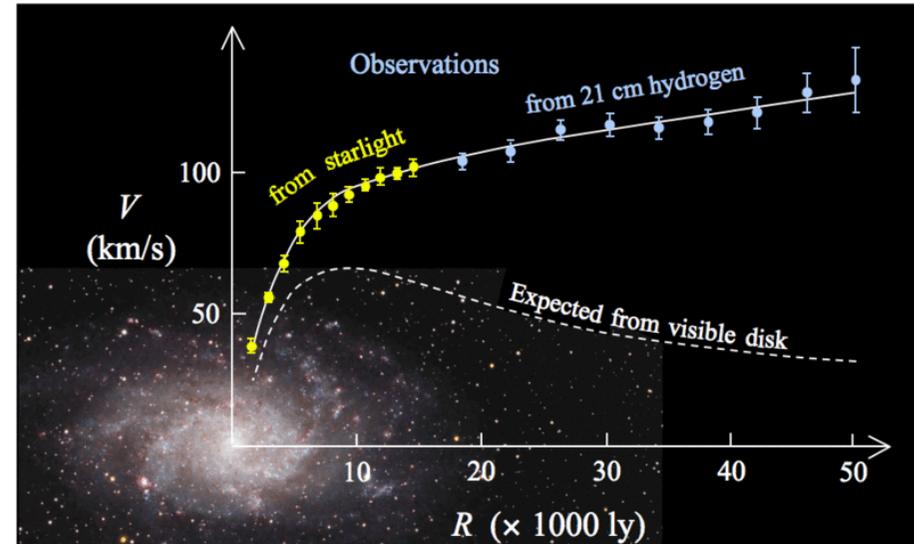
Molte indicazioni dell'esistenza della Materia Oscura

- Da osservazioni astronomiche
- Da dati cosmologici

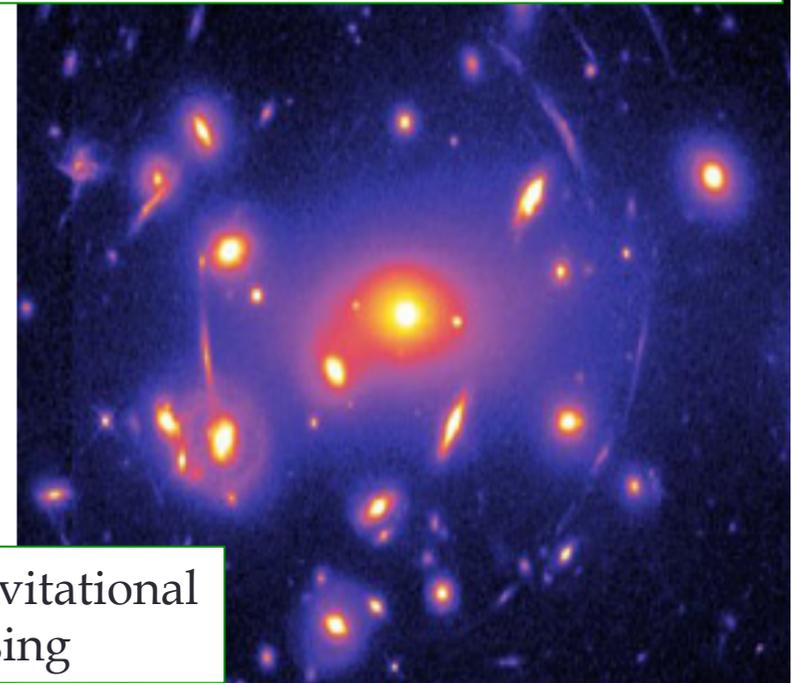


Cosmic  
Microwave  
Background

La ricerca di Materia Oscura è in corso da molto tempo (LHC, GranSasso...) ma ancora non ci sono risultati conclusivi..



Curve di rotazione della galassia a spirale M33 vs. predizioni basate sulla materia visibile



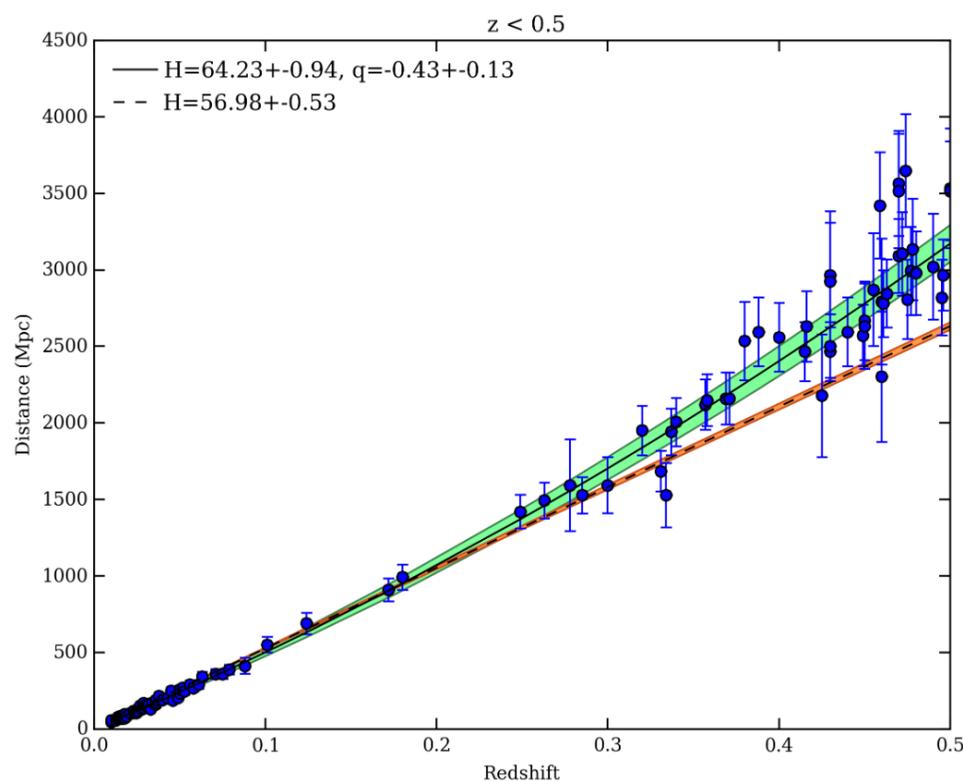
Gravitational  
lensing

### 3) L'Energia Oscura

Osservazione (negli anni '90) *espansione accelerata dell'universo*

→ Ci deve essere una "forza repulsiva" contro la gravitazione

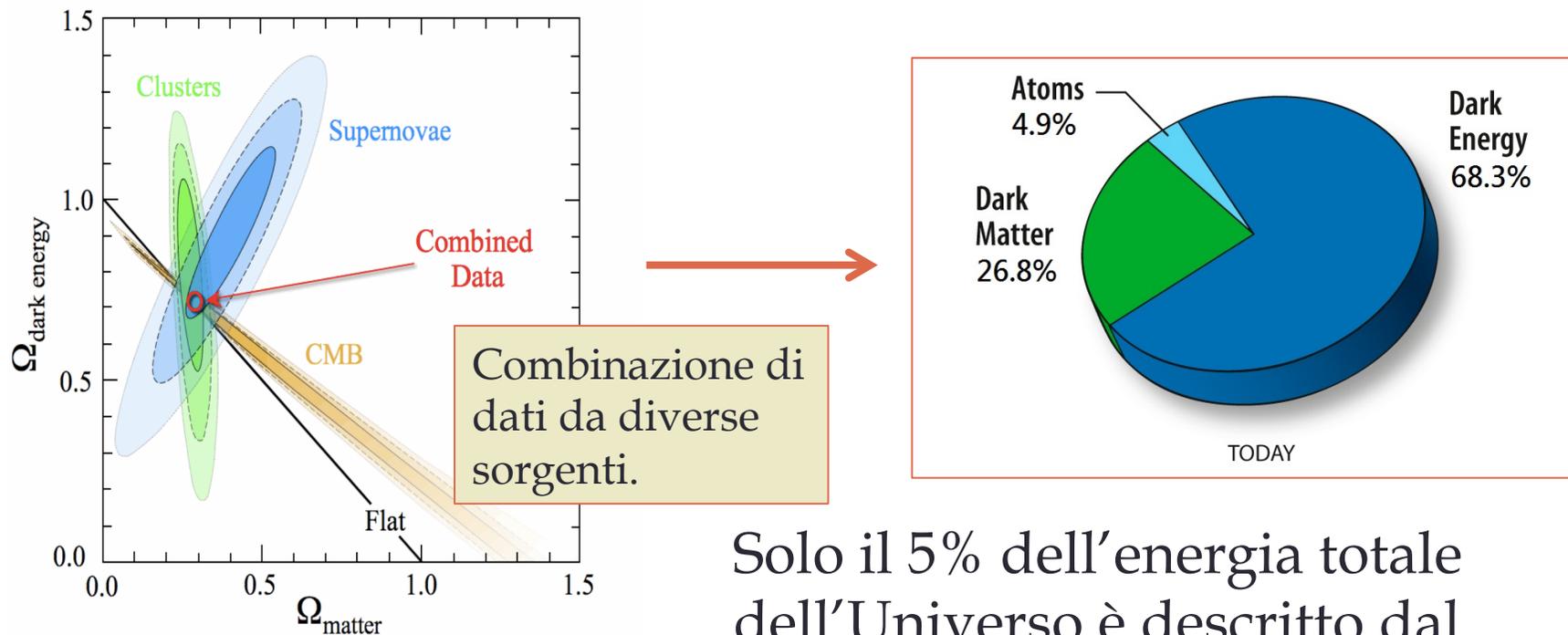
→ Si deve introdurre una "**costante cosmologica**"  $\Lambda$ ,  
un'energia che permea tutto l'Universo.



Il valore di  $\Lambda$  è per noi  
incomprensibile. Che cos'è ?  
Si tratta, apparentemente  
dell'ingrediente più  
importante del nostro Universo  
ma non sappiamo cosa sia !

# Ciò che emerge è un “Universo Oscuro”.

L'Universo è “piatto” ma dominato dall'Energia Oscura.



Solo il 5% dell'energia totale dell'Universo è descritto dal Modello Standard.

Molte ricerche dirette e indirette sono in corso per capire.

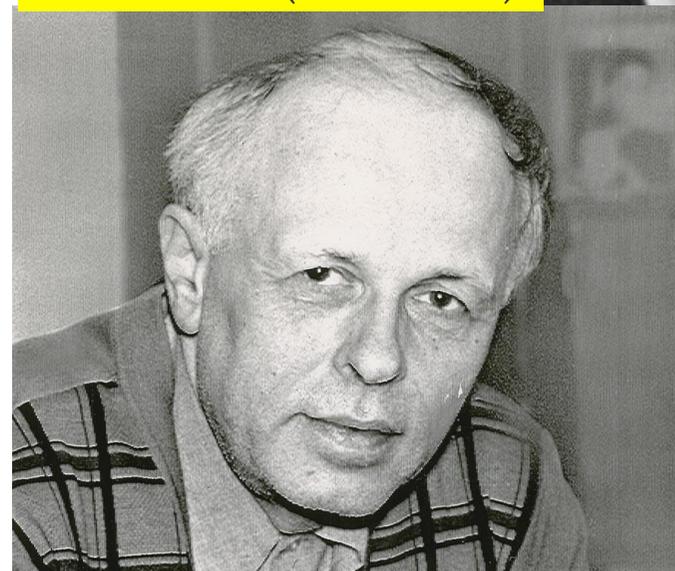
## 4) La asimmetria materia-antimateria

- **Anti-Materia:** postulata da **P.Dirac** nel 1928 subito scoperta (positrone) nel 1932, "simmetrica" rispetto alla materia. **MA:**
  - Perché il nostro Universo è fatto solo di Materia ??  $(n_B - n_{AntiB})/n_B \approx 10^{-9}$
- Problema della **Bariogenesi:** c'è bisogno di alcuni ingredienti (**A.Sacharov**):
  - **Violazione della conservazione del numero barionico**
  - **Violazione di C e CP**
- Il Modello Standard NON include in una quantità sufficiente questi ingredienti.
- → **Non c'è soluzione per il problema della bariogenesi.**

P.A.M. Dirac (1902-1984)



A.Sacharov(1921-1989)



## 5) Troppi parametri

Ci sono circa **20 parametri** nel SM:

- masse delle particelle elementari
- intensità delle interazioni

Numeri non predetti, ma da misurare.

*Questo non è accettabile.*

Perché questi valori ?

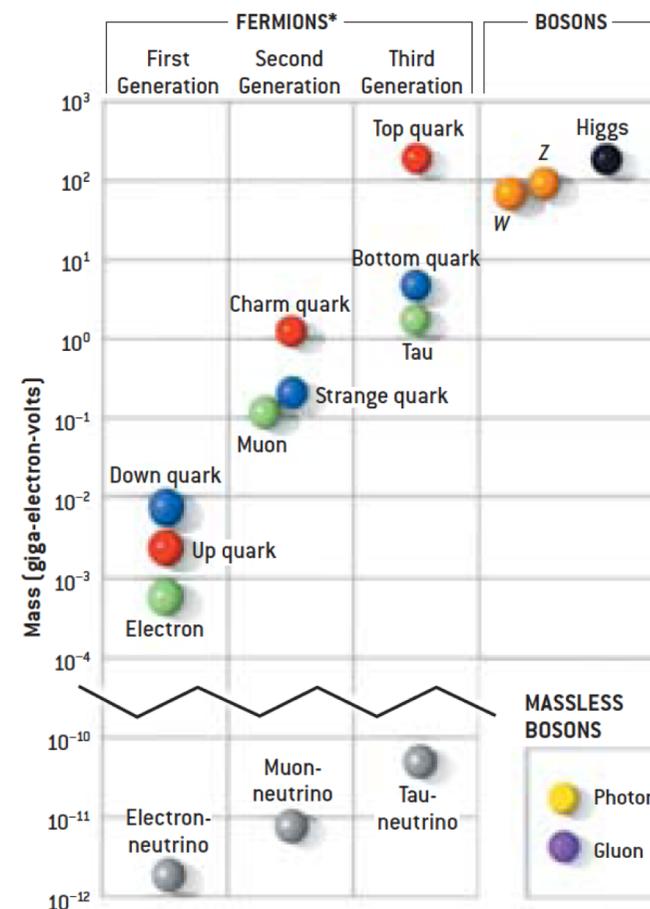
C'è una qualche teoria sottostante che li predice ?

Inoltre: perché le 4 forze fondamentali

Hanno intensità così differenti ?

Da questo seguono:

- **Principio Antropico**
- **Congettura dei Multiversi**



Forza	Intensità	Range (m)
Gravità	$10^{-35}$	$\infty$
Nucleare debole	$10^{-15}$	$10^{-15}$
Elettromagnetica	$10^{-2}$	$\infty$
Nucleare forte	1	$10^{-18}$

# CONCLUSIONE

---

## Soluzione ??

- **Tentativi e speculazioni teoriche**
  - GUT (Grand Unified Theories)
  - SuperSymmetry
  - Hidden Valley
  - String and Super-String theories
  - Extra-dimensions
  - ...
- **Nuovi esperimenti in progetto.**
- Ogni nuova teoria deve portare a **predizioni che possano essere falsificate o corroborate da esperimenti.**

L'impressione è che la "*fine della storia*" sia lontana dall'essere raggiunta: ogni volta che la frontiera si estende si trovano nuovi fenomeni, la Natura si presenta come un "*pozzo senza fondo*", c'è un *infinito in ogni direzione*..