

Il Modello Standard delle particelle elementari

Enrico Nardi(*)

INFN LNF

Master Classes

15 marzo 2016

(*) Un ringraziamento a Vittorio Del Duca per la maggior parte delle slides



The Hubble eXtreme Deep Field (NASA, released 25/09/2012)

Circa 15,500 galassie, le più distanti (in rosso) 13.2×10^9 anni (cioè $t_{BB} + 5 \times 10^8$ anni). Sono "giovani" ed ancora "piccole"



Tutti i “costituenti fondamentali della materia” presenti nel Hubble eXtreme Deep Field sono egualmente presenti qui

Elementi

La materia è fatta di elementi con definite proprietà chimiche

Gruppo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
Periodo																			
1	1 H																	2 He	
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
4	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	
5	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	
6	55 Cs	56 Ba	57 La	*	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
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo

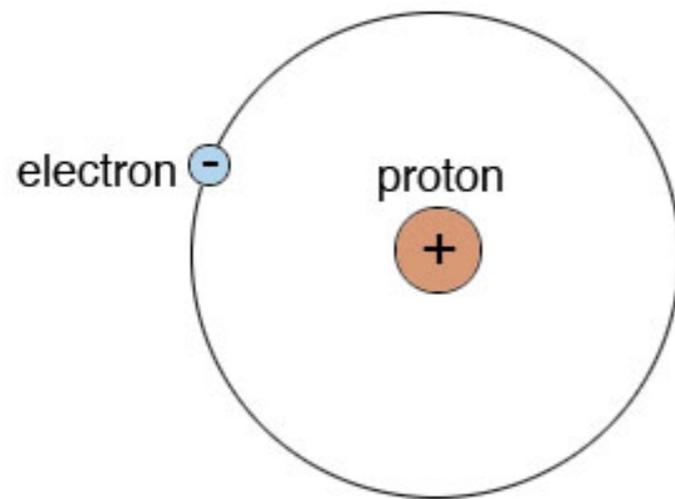
* Lantanoidi	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
** Attinoidi	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Serie chimiche della tavola periodica

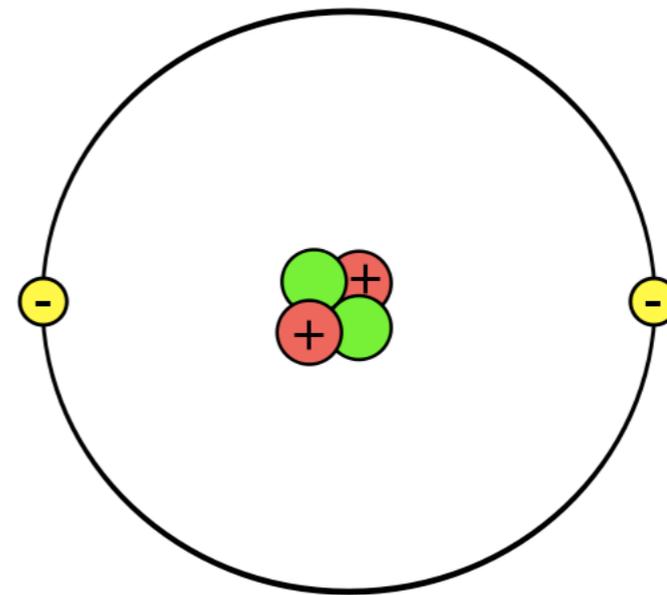
Metalli alcalini	Metalli alcalino terrosi	Lantanoidi	Attinoidi	Metalli del blocco d
Metalli del blocco p	Semimetalli	Nonmetalli	Alogeni	Gas nobili

Atomi

- Ciascun elemento ha come mattone fondamentale un atomo
- L'atomo contiene elettroni (particelle elementari, il tipo più leggero di leptoni carichi), che "ruotano" intorno a un nucleo



idrogeno



elio

... che è formato da protoni e neutroni, che sono il tipo più comune di materia adronica (da cui il nome **LHC** = Large Hadron Collider)

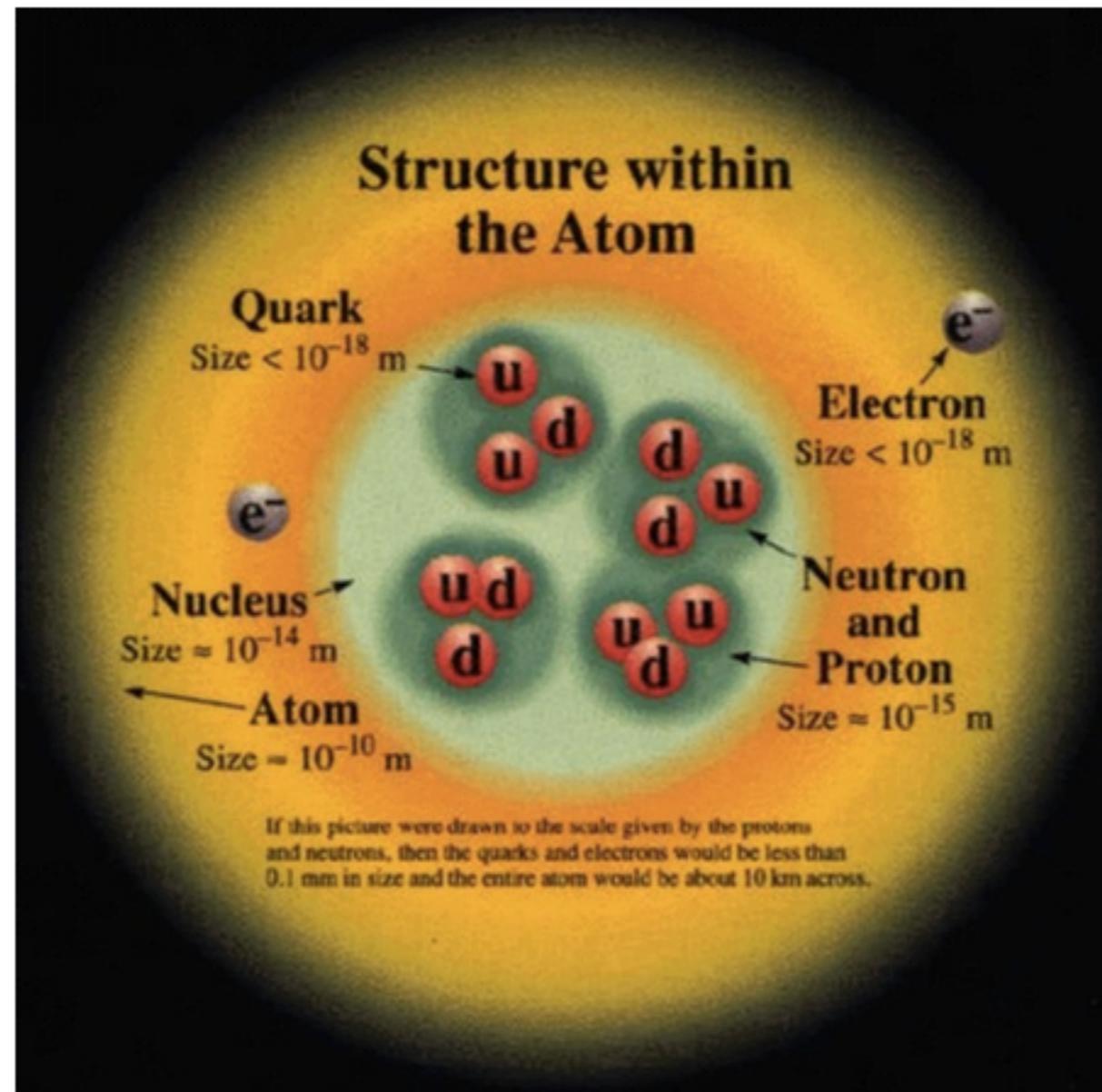
La massa di un protone è $m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg} = 0,938 \text{ GeV}/c^2$

$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ $1 \text{ eV}/c^2 = 1,783 \times 10^{-36} \text{ kg}$

La massa di un elettrone è $m_e = 0,911 \times 10^{-30} \text{ kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2 = 1/1836 m_p \dots$ Perché ?

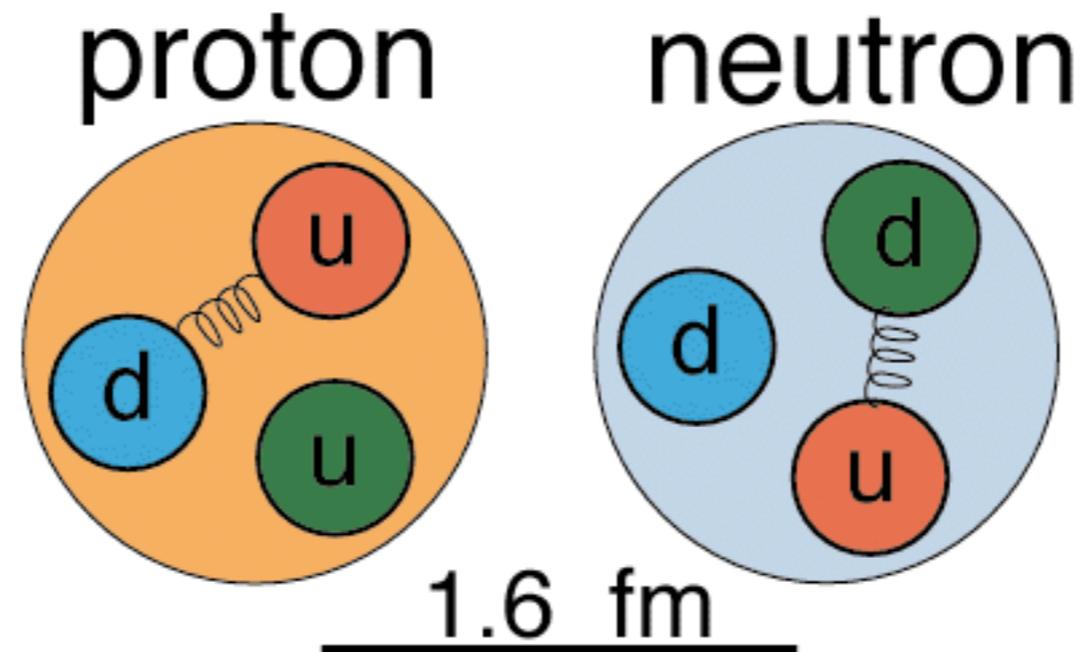
Struttura dell'atomo

- L'atomo contiene un nucleo circondato da una nuvola di elettroni, carichi negativamente. Il nucleo è composto da protoni, carichi positivamente e neutroni (neutri). La carica opposta di elettroni e protoni tiene insieme l'atomo mediante la forza elettromagnetica



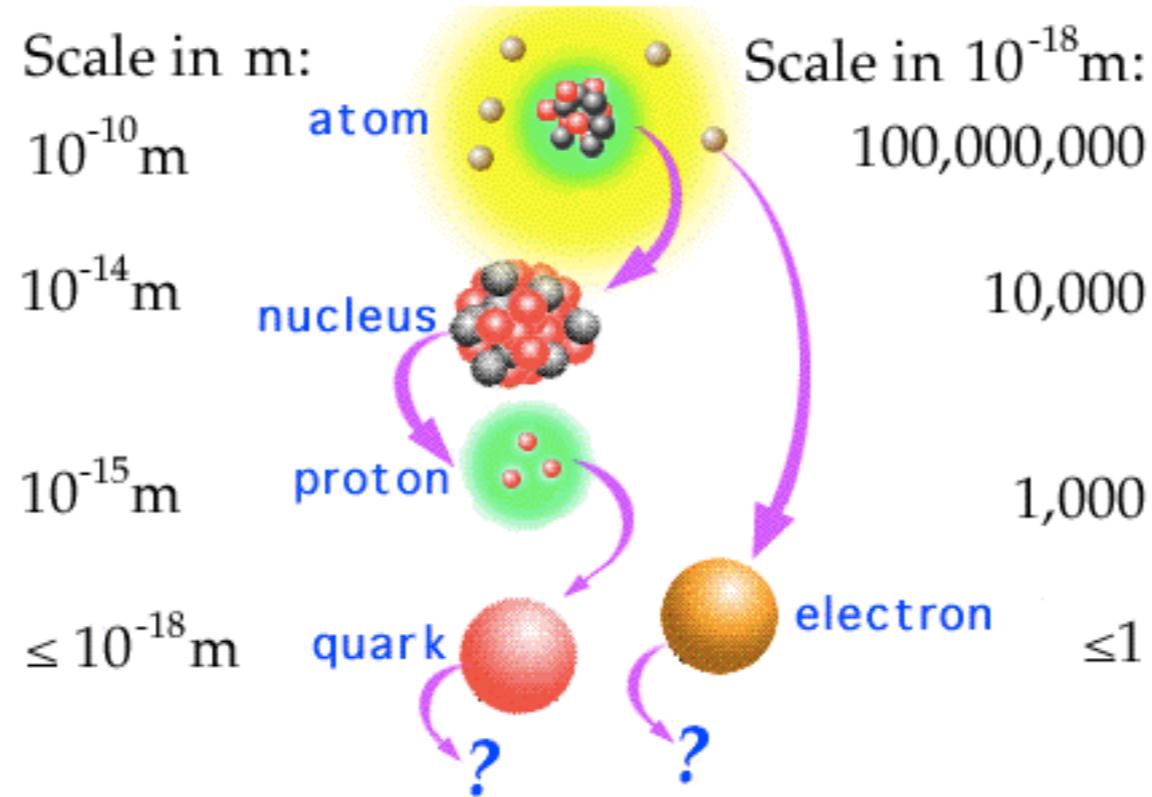
Protoni e neutroni

- I protoni e neutroni sono composti da quark e gluoni



1 fm = 10^{-15} m

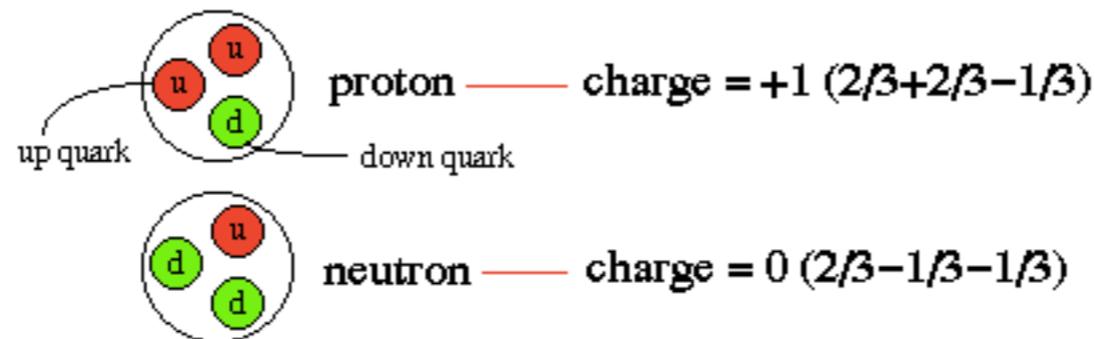
si va a distanze sempre più piccole



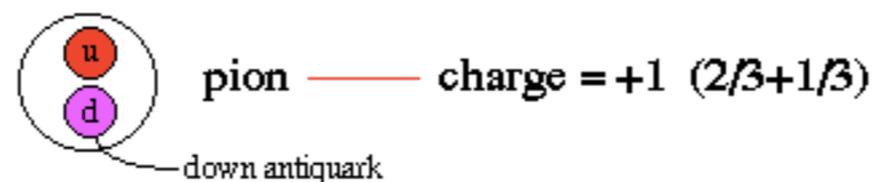
Materia

- Quarks e gluoni formano i costituenti della materia adronica, barioni e mesoni. I barioni (protoni, neutroni) sono composti da 3 quarks, i mesoni da una coppia quark-antiquark. I mesoni vengono prodotti nell'urto dei raggi cosmici con l'atmosfera

Baryons = particles made of 3 quarks



Mesons = particles made of 2 quarks



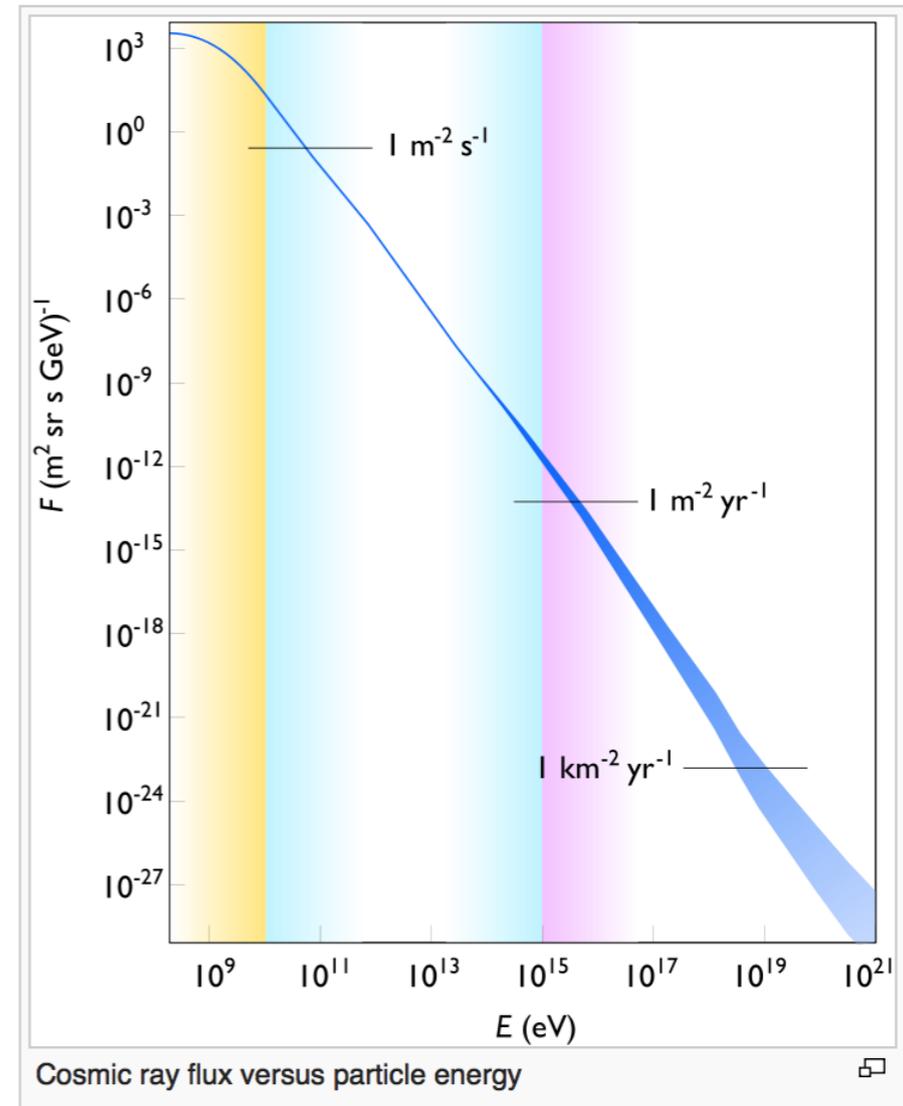
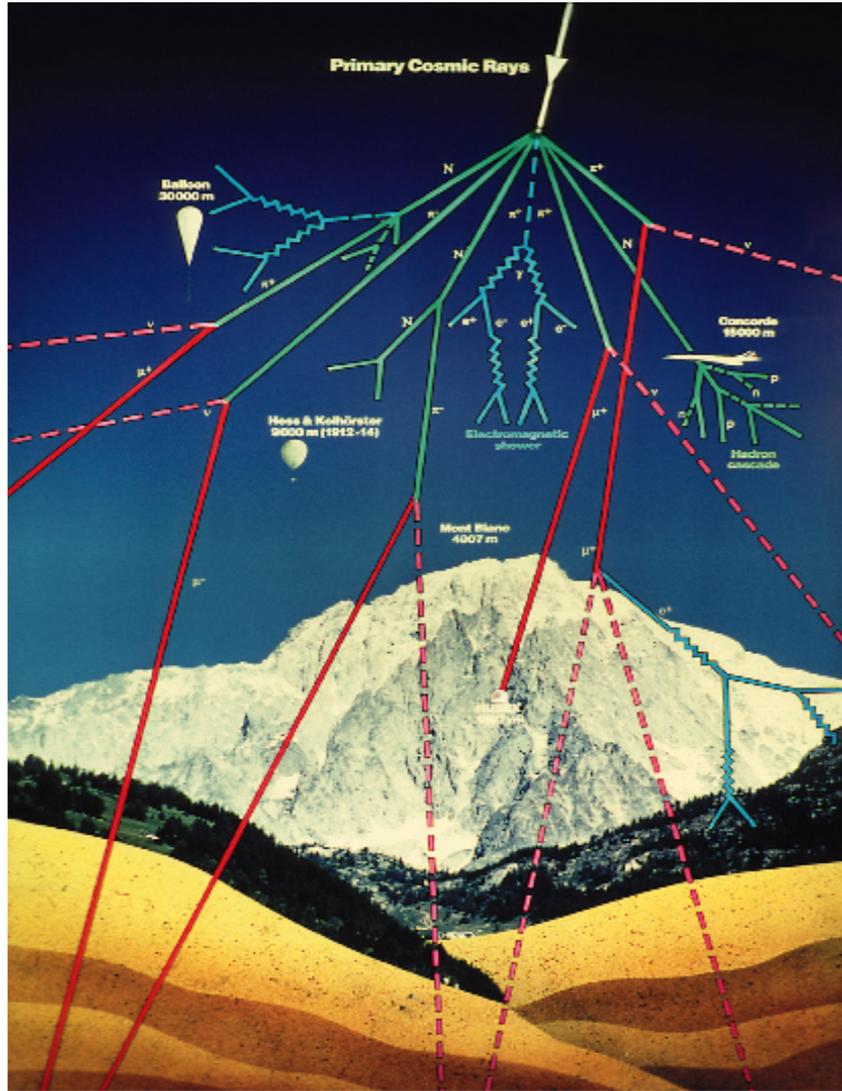
- Tra gli anni '60 e '90 si è classificata tutta la materia nota mediante 6 tipi di quark, raggruppati in 3 famiglie, l'elettrone e altri due leptoni più pesanti, il muone e il tau, ciascuno col suo neutrino, anch'essi raggruppati in 3 famiglie

La materia secondo il Modello Standard delle particelle

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

- Le 3 famiglie sono identiche, eccetto che per le masse
- * L'ordinamento in massa dei neutrini tuttora non é noto
- Il *flavor* identifica quark e leptoni, ma le interazioni deboli possono cambiare il *flavor*

La materia dell'esperienza quotidiana è descrivibile con la prima famiglia di quark e leptoni, ma ...



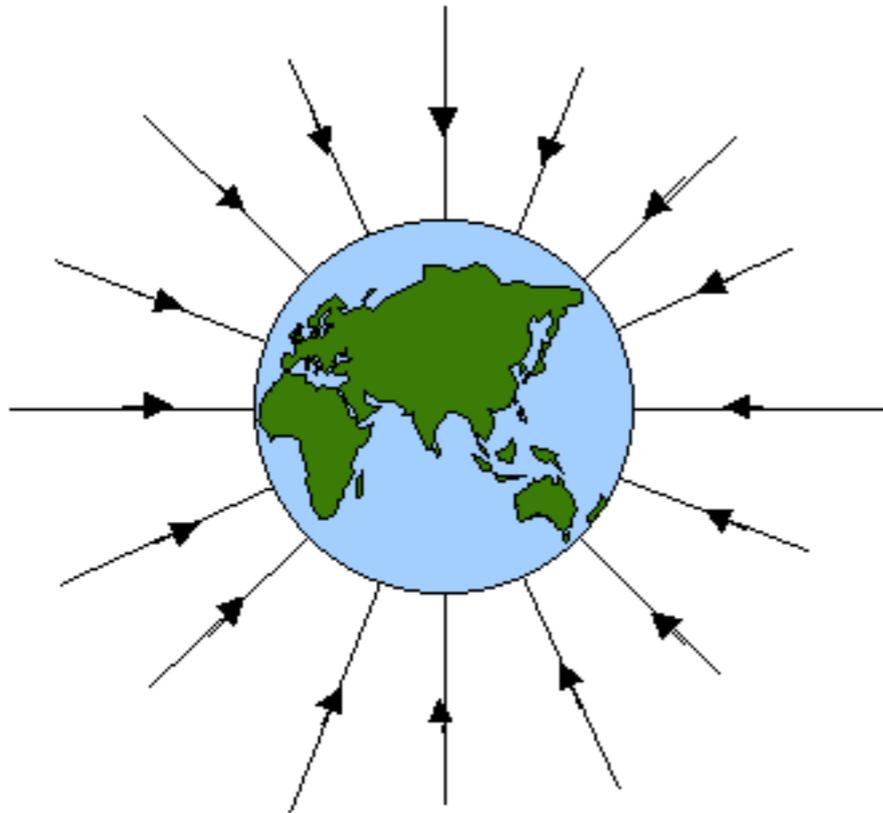
... già nei raggi cosmici, scoperti un secolo fa, si osservavano mesoni, muoni, antimateria (positroni, anti-muoni, anti-protoni)...

Forze

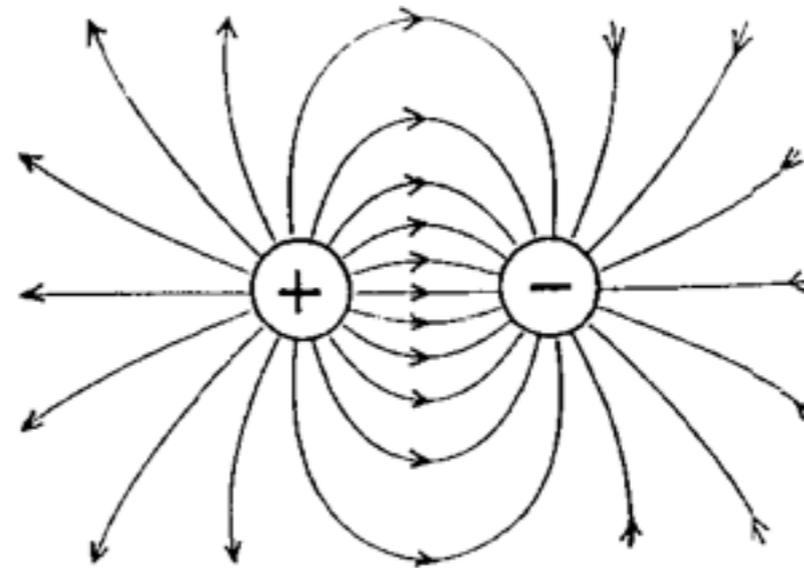
- Le particelle interagiscono mediante 4 forze fondamentali
 - gravitazionale** (importante per grandi aggregati di particelle
Con grandi masse: stelle, pianeti, cosmologia ...)
 - elettromagnetica** (forza tra atomi e molecole, luce, onde em)
 - debole** (radioattività, interazioni dei neutrini, ...)
 - forte** (legame tra protoni e neutroni nel nucleo, forze tra quark e gluoni ...)
- La **gravitazione** è la più debole: $F_{grav} \sim 10^{-40} F_{em}$
è trascurabile in fisica delle particelle (levitazione magnetica)
- su scala microscopica, il **Modello Standard** descrive le interazioni tra particelle mediante le forze **Elettromagnetica + debole (elettrodebole)** e **forte**

Campi

Nelle teorie di campo, un campo di forze è *ad esempio* un campo vettoriale che descrive una forza (non di contatto) agente su una particella in un qualsiasi punto del campo



campo gravitazionale



campo elettromagnetico

Campi sono generati *ad esempio* da cariche elettriche (campo elettromagnetico) o da masse (campo gravitazionale). Eccitazioni dei campi si propagano come onde (es. le onde radio o la luce per il campo elettromagnetico; onde gravitazionali -14/09/2015) e trasportano energia

Campi quantistici

- Nelle teorie di campo quantistico, l'energia di un'onda nel campo è quantizzata, e le eccitazioni del campo si possono considerare come particelle che trasportano l'energia tra le sorgenti del campo
- onde elettromagnetiche = **fotoni** scambiati tra cariche elettriche
onde della forza forte = **gluoni** scambiati tra quarks (e tra gluoni)
onde della forza debole = **bosoni W, Z** scambiati tra quarks e leptoni
onde gravitazionali = **gravitoni** scambiati tra masse di qualsiasi tipo
- fotoni, gluoni, bosoni W, Z hanno una natura sia corpuscolare che ondulatoria

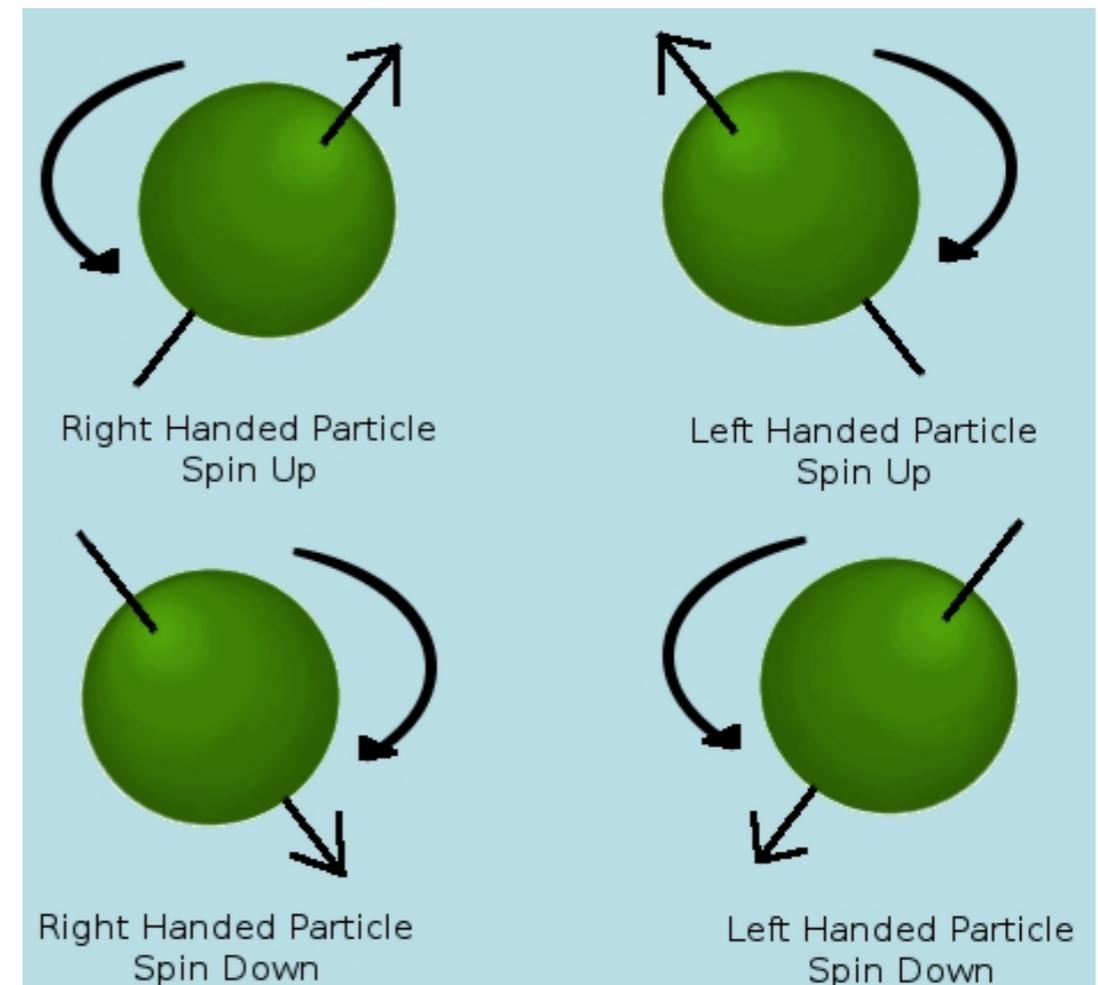


Spin

- le particelle hanno 2 tipi di momento angolare:
 - momento angolare orbitale $L = I \omega$
 I = momento d'inerzia ω = velocità angolare
 - momento angolare intrinseco: spin S

$$S = \hbar \sqrt{s(s+1)} \quad \hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ J s} \text{ costante di Planck}$$

$$E = \hbar \omega \quad E = \text{energia di un fotone}$$



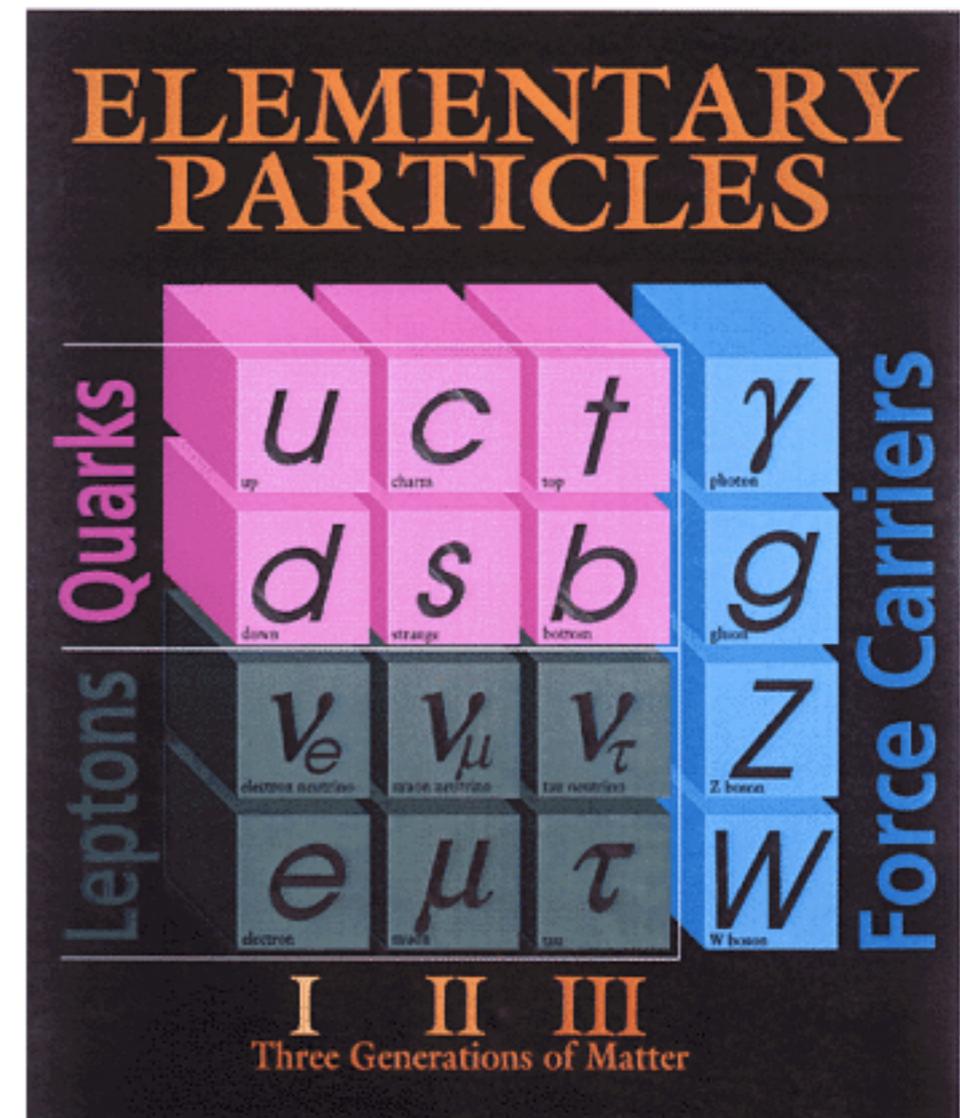
Spin e statistica

- quark e leptoni (= materia) hanno spin $s = 1/2$ e si chiamano fermioni
fotoni, gluoni, e W, Z (= forze) hanno spin $s = 1$ e si chiamano bosoni
- Solo due particelle **conosciute** hanno spin diverso:
 - il bosone di Higgs ($s = 0$) (04/07/2012)
 - il gravitone ($s = 2$) (14/09/2015)

[15/12/2015 (CERN)]: a new spin 0 or 2 particle ?

Se il bosone di Higgs è una particella elementare, è il primo esempio di particella **elementare** di spin zero

Il 14 settembre 2015 alle 9:51 UT sono state rivelate per la prima volta dall'esperimento LIGO (USA) le onde gravitazionali ["gravitoni classici"]



Simmetria

- Il **Modello Standard** delle particelle si basa sul concetto di simmetria (concetto fondamentale in tutte le QFT).
- Ci sono delle trasformazioni che cambiano le funzioni d'onda che descrivono le particelle, ma non le equazioni del **Modello**, che descrivono come le particelle interagiscono mediante le forze **elettromagnetica, debole e forte**
- Queste trasformazioni sono dette **Simmetrie della Teoria**
- Ce n'è un tipo per ciascuna delle tre forze **elettromagnetica, debole e forte**

L'equazione del Modello Standard



Unificazione

- Nel 1861-2, Maxwell unificò in un gruppo di equazioni le forze **elettrica** e **magnetica**: l'**elettromagnetismo**
- Nel 1967, Glashow, Salam e Weinberg mostrarono che a un'energia sufficientemente alta (dell'ordine di **200 GeV**), le forze **elettromagnetica** e **debole** si unificano nella forza **elettrodebole**
- Questo processo d'unificazione continua a energie più alte ?
Si possono unificare le forze **elettrodebole** e **forte** ?
Alcune teorie, dette di **gran unificazione**, propongono questa possibilità. Al momento non c'è prova sperimentale a favore [una prova sperimentale sarebbe l'osservazione del decadimento del protone]
- Si possono unificare la forza **elettrodebole** e/o **forte** e la **gravitazione** ? Goal finale delle "theories of everything"

Electroweak Symmetry Breaking

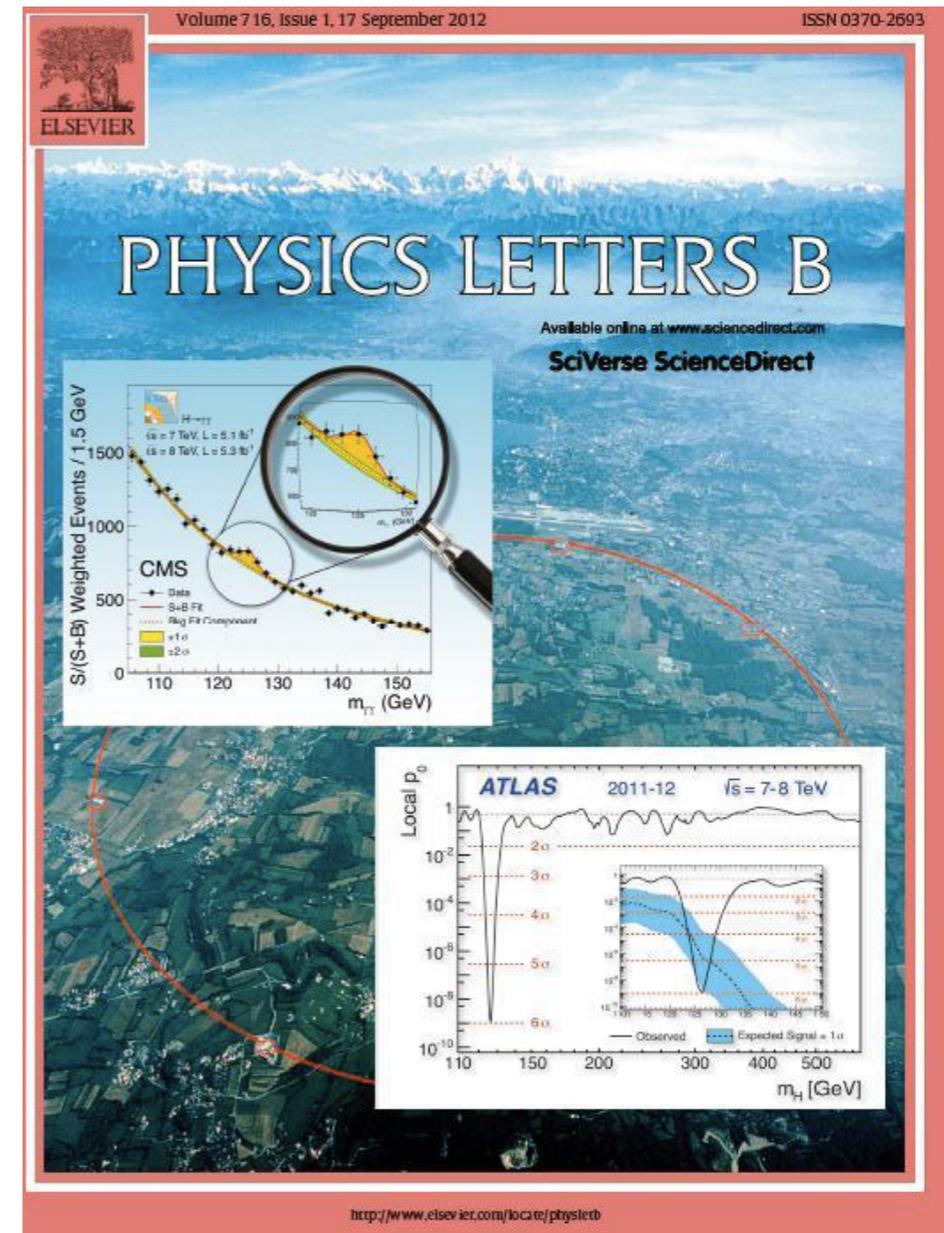
- Il **Modello Standard** delle particelle ha avuto e ha un enorme successo sperimentale, ma lascia aperte molte questioni
- La simmetria tra le forze **elettromagnetica** e **debole**, che soggiace alla loro unificazione si rompe a un'energia di circa **200 GeV**. Quindi a energie più basse le due forze sono distinte
- Il meccanismo che regola la rottura della simmetria **elettrodebole** (**EWWSB = Electroweak Symmetry Breaking**) non è ancora stato testato nei dettagli
- Il modello di rottura più verosimile è il meccanismo di **Higgs**, realizzato da un campo a spin 0, la cui particella, prende il nome da **Peter Higgs**, che ideò il meccanismo nel 1964:
Il bosone di Higgs

Peter Higgs
Edinburgh, dicembre 2008



Bosone di Higgs

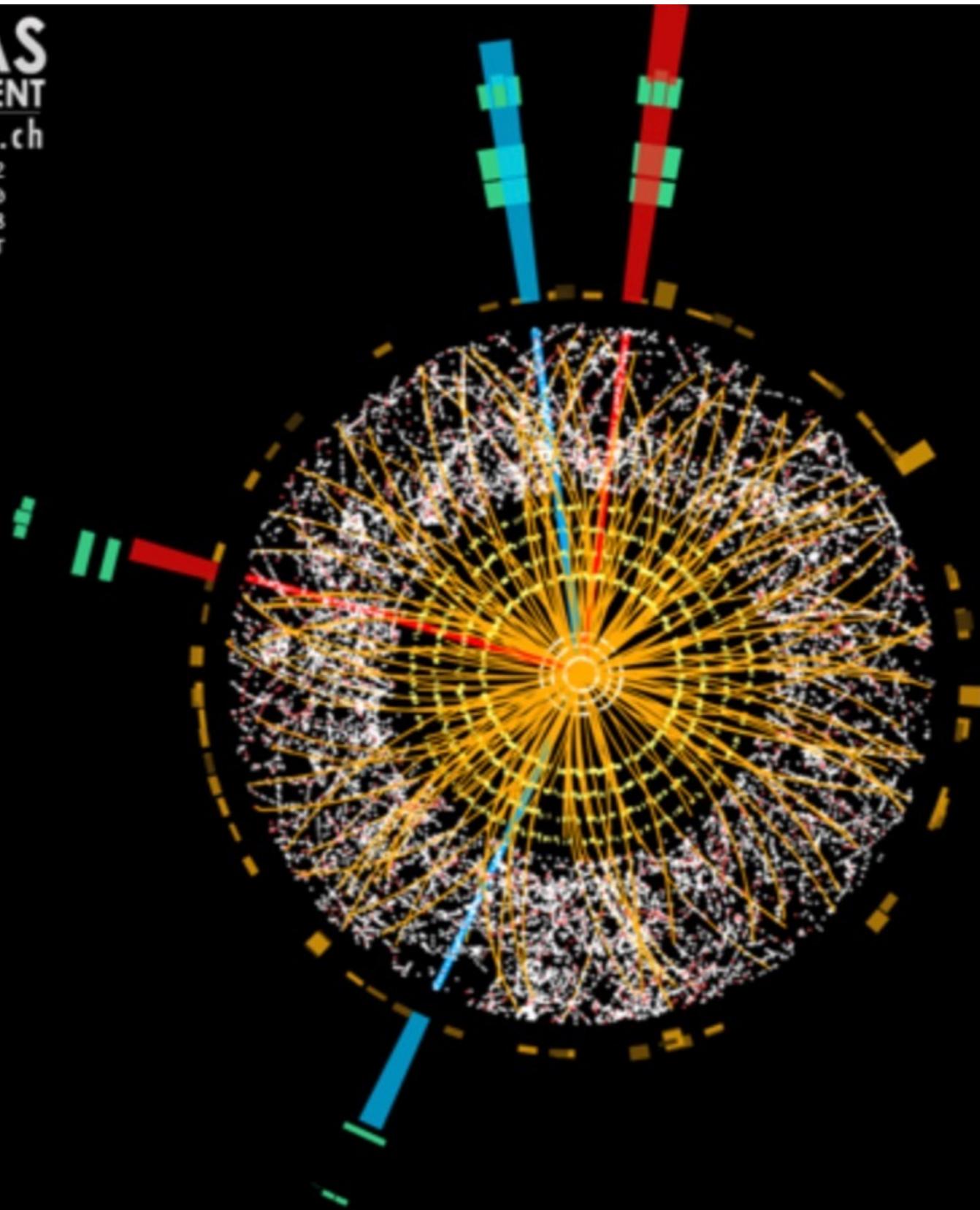
4 luglio 2012,
ATLAS e **CMS** annunciano
la scoperta del bosone di Higgs



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012), 1-29

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, CMS Collaboration, Phys. Lett. B 716 (2012), 30-61

© CERN
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>
Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST



bosone di **Higgs** che decade in 2 coppie di leptoni

Meccanismo di Higgs

- Il meccanismo di Higgs non è una vera teoria dell'EWSB ma un meccanismo ad hoc, che fornisce la rottura senza un particolare e profondo motivo
- Ci sono delle correzioni quantistiche alla massa del bosone di Higgs dipendenti dall'energia, grandi e di segno opposto
- Perché la massa del bosone di Higgs rimanga stabile su un ampio intervallo di energie, le cancellazioni tra quelle correzioni devono essere molto precise
- Ciò è considerato innaturale (problema della *naturalness*, o del *fine tuning*)
- Le simmetrie del Modello Standard impediscono che le correzioni quantistiche alle masse dell'elettrone, del fotone, del quark, diventino molto grandi
- Il bosone di Higgs non ha simili simmetrie che lo proteggano

EWWSB e Nuova Fisica

- Ci sono altri modelli che evitano le cancellazioni innaturali e in cui l'**EWWSB** non è un meccanismo ad hoc, ma una conseguenza dinamica della teoria
- modelli di **technicolor** prevedono che il bosone di **Higgs** sia una particella composta, uno stato legato di nuove interazioni **forti**
- modelli extra-dimensionali prevedono che il mondo abbia più di 4 dimensioni e che il bosone di **Higgs** sia la componente extra-dimensionale di un nuovo bosone. Quindi la simmetria che protegge **Higgs** è quella del nuovo bosone, simile a quella che nel **Modello Standard** protegge il fotone o i bosoni **W, Z**
- modelli supersimmetrici ipotizzano che ci sia una simmetria tra bosoni e fermioni. Quindi la simmetria che protegge **Higgs** è quella del fermione associato, analoga a quella che nel **Modello Standard** protegge l'elettrone o i quark
- **LHC** continua a studiare la questione dell'**EWWSB**

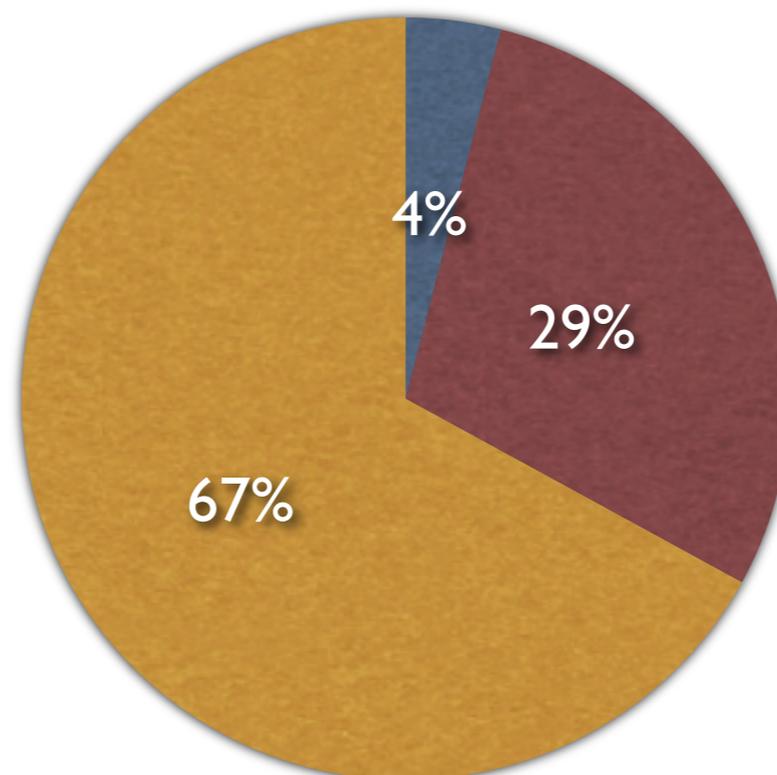
Altre forme di materia/energia

- Da osservazioni astronomiche/cosmologiche sappiamo che la materia a noi nota può rendere conto solo di circa il 4% della "materia" (energia totale) dell'Universo
- Circa il 29% è costituito da "materia oscura"
- Circa il 67% è costituito da "energia oscura"

■ materia ordinaria

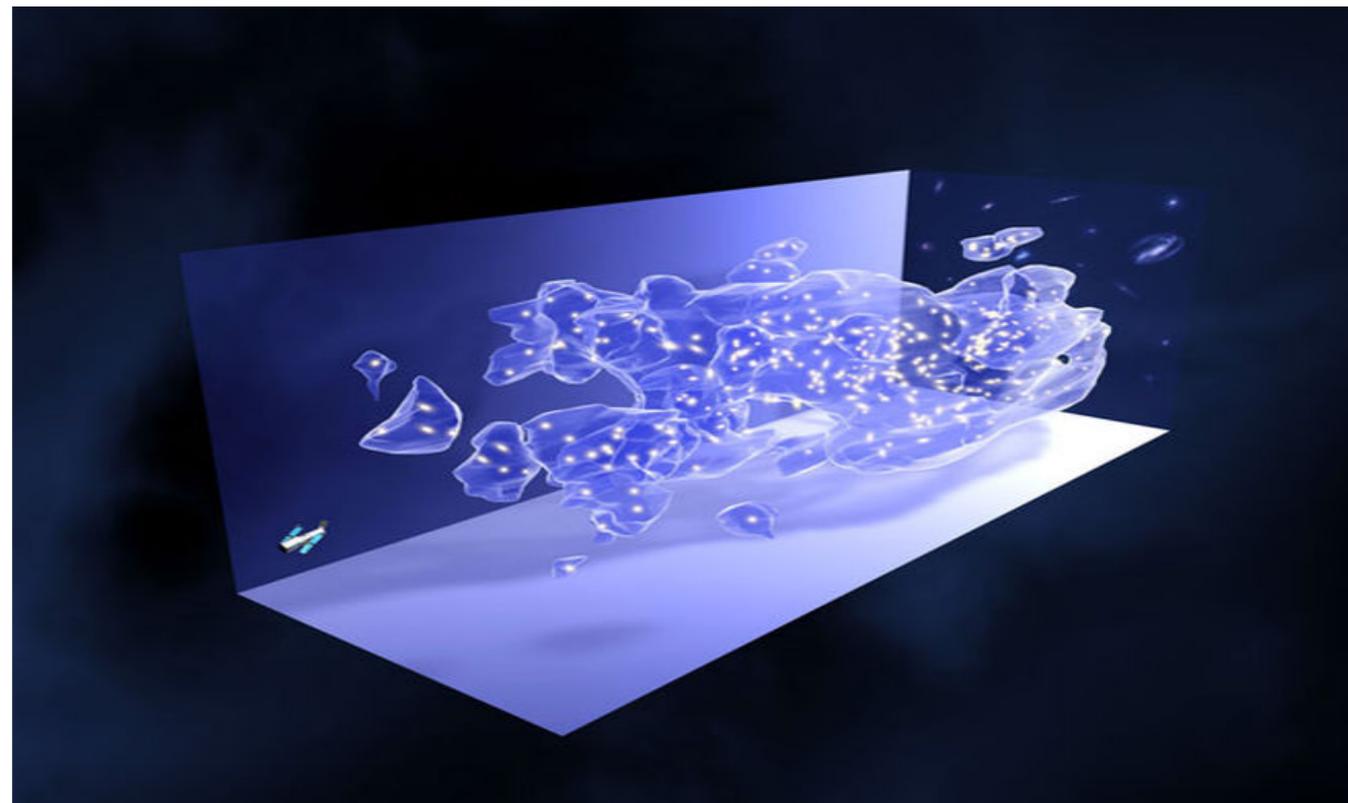
■ materia oscura

■ energia oscura



Materia Oscura

La distribuzione di materia oscura nell'Universo da una mappatura del Hubble Space Telescope fatta con gravitational lensing



la dimensione sul lato lungo è il tempo:
a destra tempi più remoti, a sinistra tempi più recenti

Energia Oscura

- L'Universo si espande, ma la velocità dell'espansione aumenta o decresce nel tempo ?
- Dipende dalle componenti densità d'energia dell'Universo
- La gravità della materia e della materia oscura rallentano l'espansione. Si pensava quindi che l'espansione rallentasse.
- Osservando delle supernovae (tipo IA), nel 1998 Perlmutter, Riess e Schmidt (Premio Nobel per la Fisica 2011) hanno scoperto che l'espansione dell'Universo **accelera!**
- Questo si può interpretare come l'effetto di una "costante cosmologica" Λ , cripticamente battezzata "energia oscura"
- Il Λ CDM model spiega tutti i dati cosmologici ed astrofisici, senza però dirci cosa sono **materia oscura** ed **energia oscura**

Molto abbiamo imparato, ma molte sfide rimangono aperte

- Il valore delle masse dei neutrini (conosciamo solo differenze di massa)
- L'origine dell'asimmetria materia/antimateria nell'Universo
- Perché il troppo semplice modello di Higgs descrive così bene la rottura della simmetria elettrodebole? Qual'è la vera teoria?
- Perché i fermioni del modello standard (leptoni, quarks) vengono replicati in tre famiglie con uguali numeri quantici?
- Qual'è la natura della materia oscura (Dark Matter)?
- Qual'è l'origine dell'accelerazione dell'espansione (Dark Energy)?
- Quale campo è responsabile del periodo di "inflazione cosmica" che ha dato origine all'Universo così come lo conosciamo?