

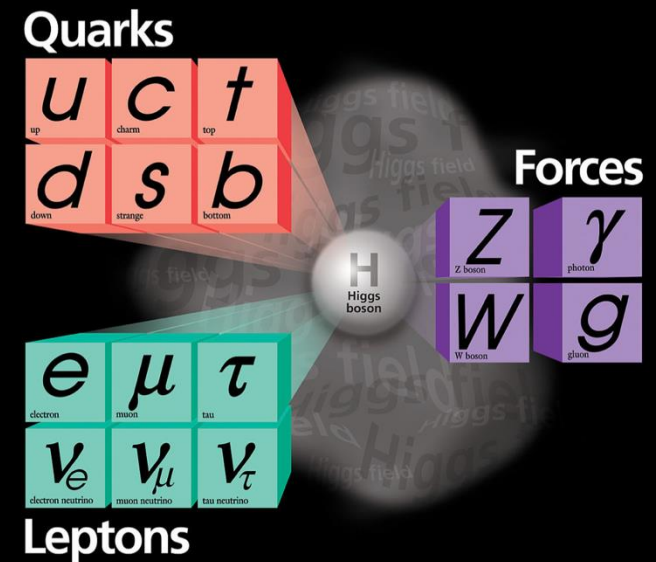
Il Modello Standard della Fisica delle Particelle Elementari

Mauro Iodice

INFN Roma Tre

International Physics Masterclass

12 Marzo 2026



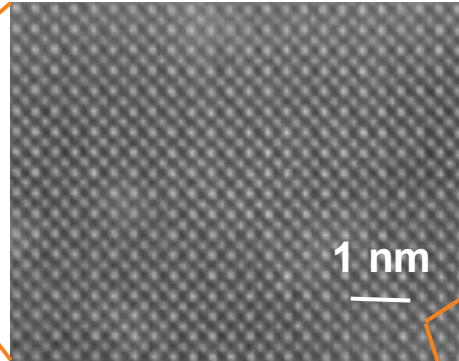
L'oggetto di studio

I costituenti fondamentali della materia e le loro interazioni

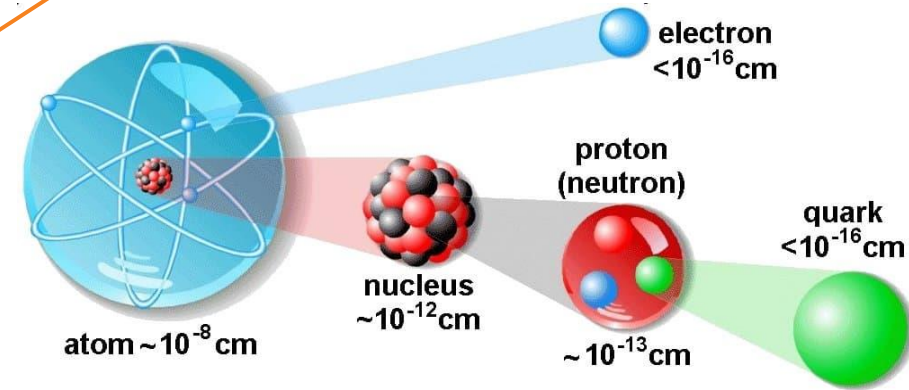
Materia macroscopica



Struttura Atomica



Scala 10^{-10} - 10^{-15} m

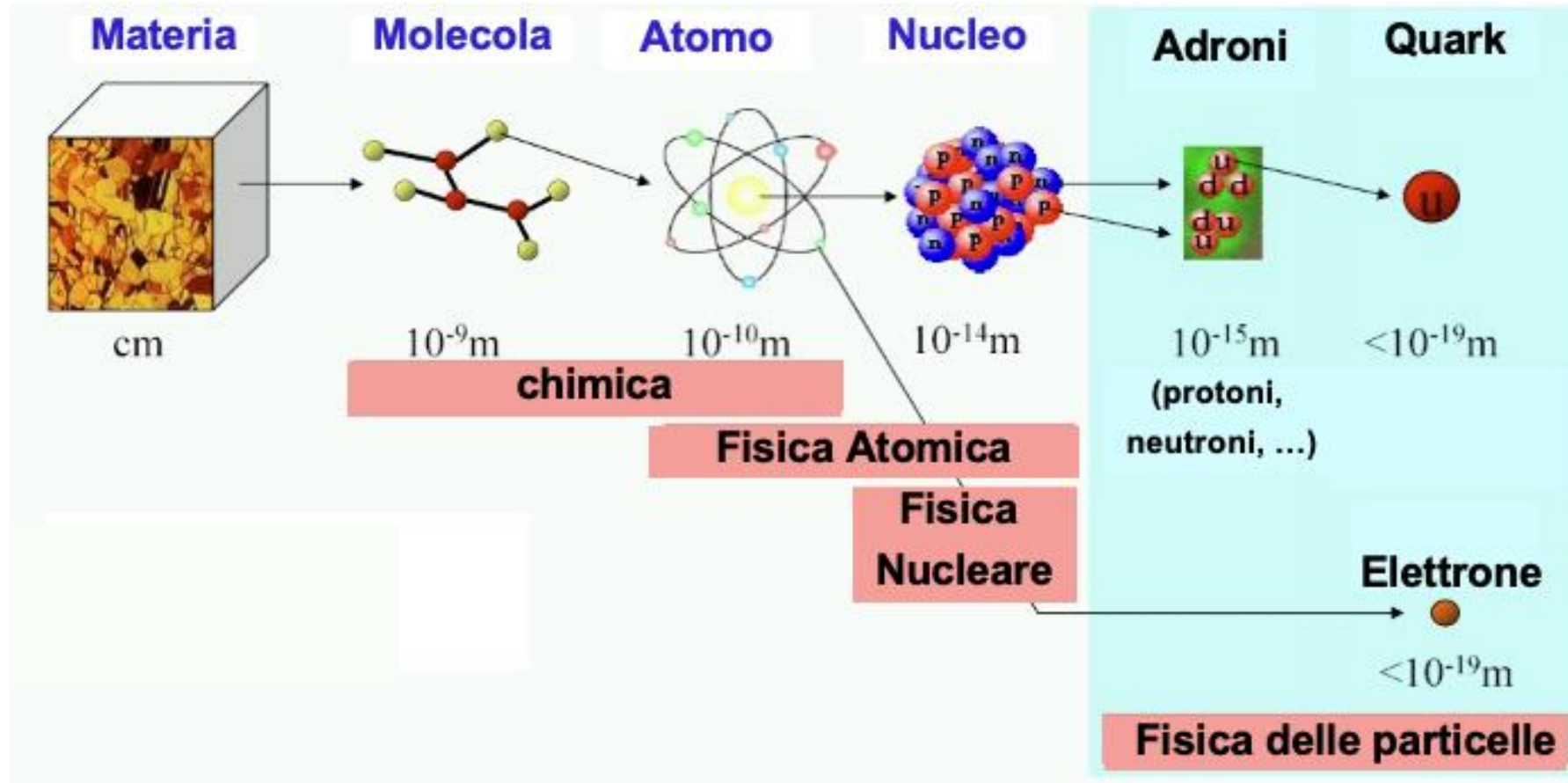


Fine XIX secolo

Inizio XX secolo

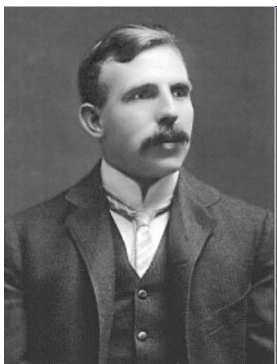
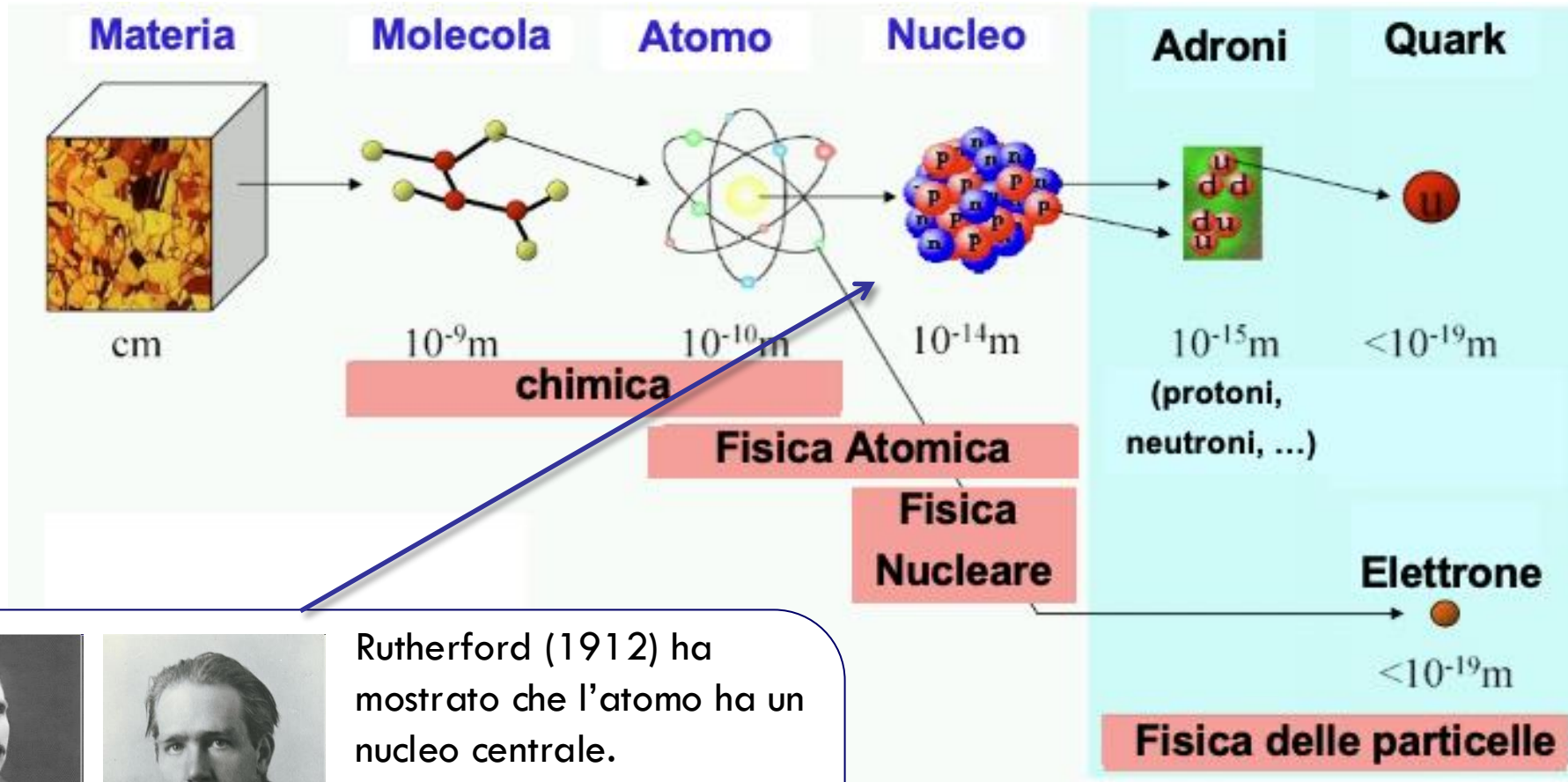
1960s

La Materia



Partiamo dalle basi!
(brevemente e in maniera molto schematica...)

La Materia



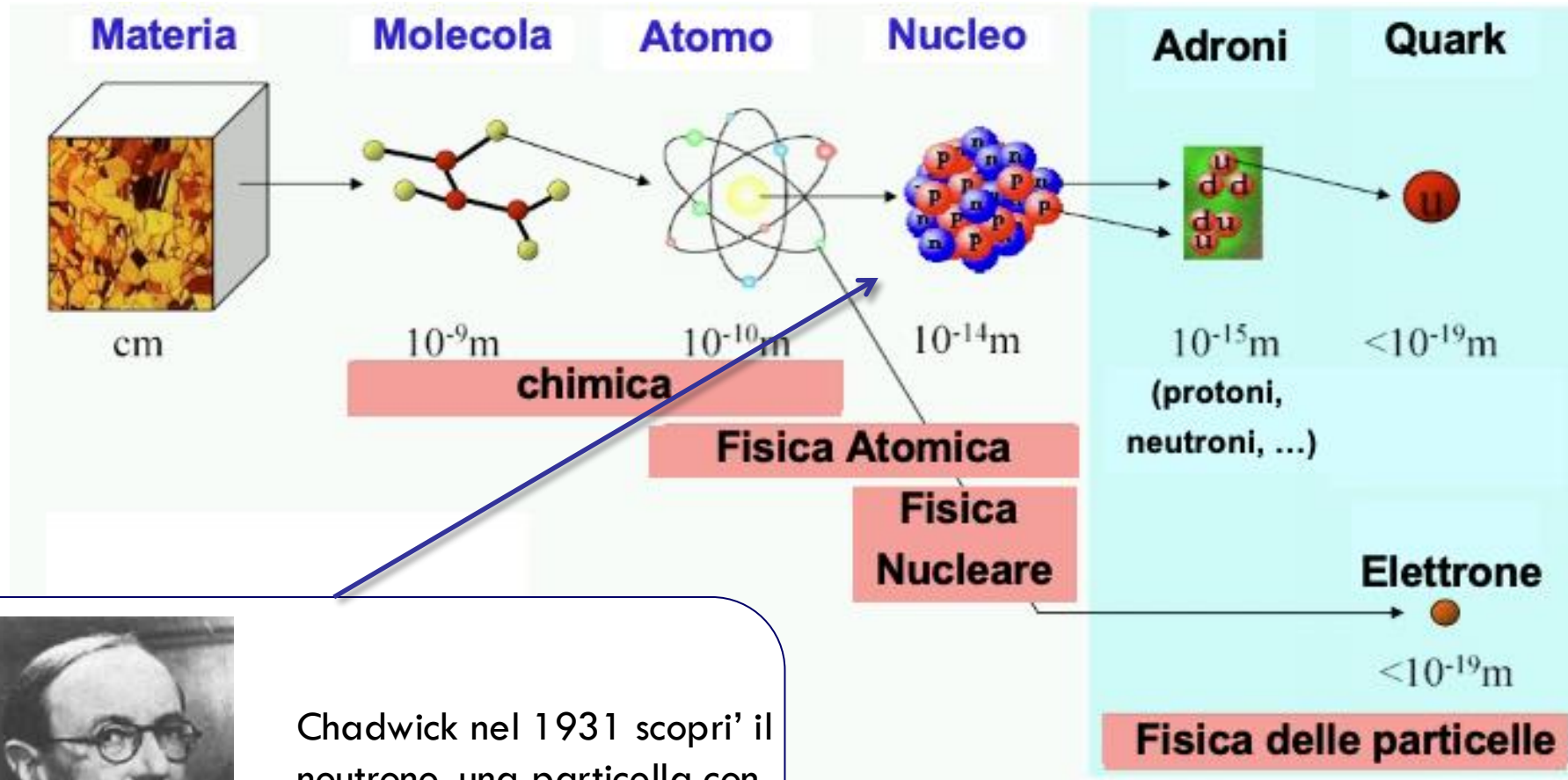
Rutherford



Bohr

Rutherford (1912) ha mostrato che l'atomo ha un nucleo centrale.
Bohr ha sviluppato un modello atomico in cui gli elettroni orbitano attorno al nucleo con una energia ben determinata.

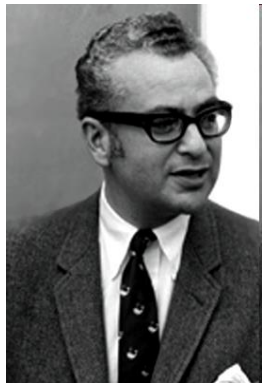
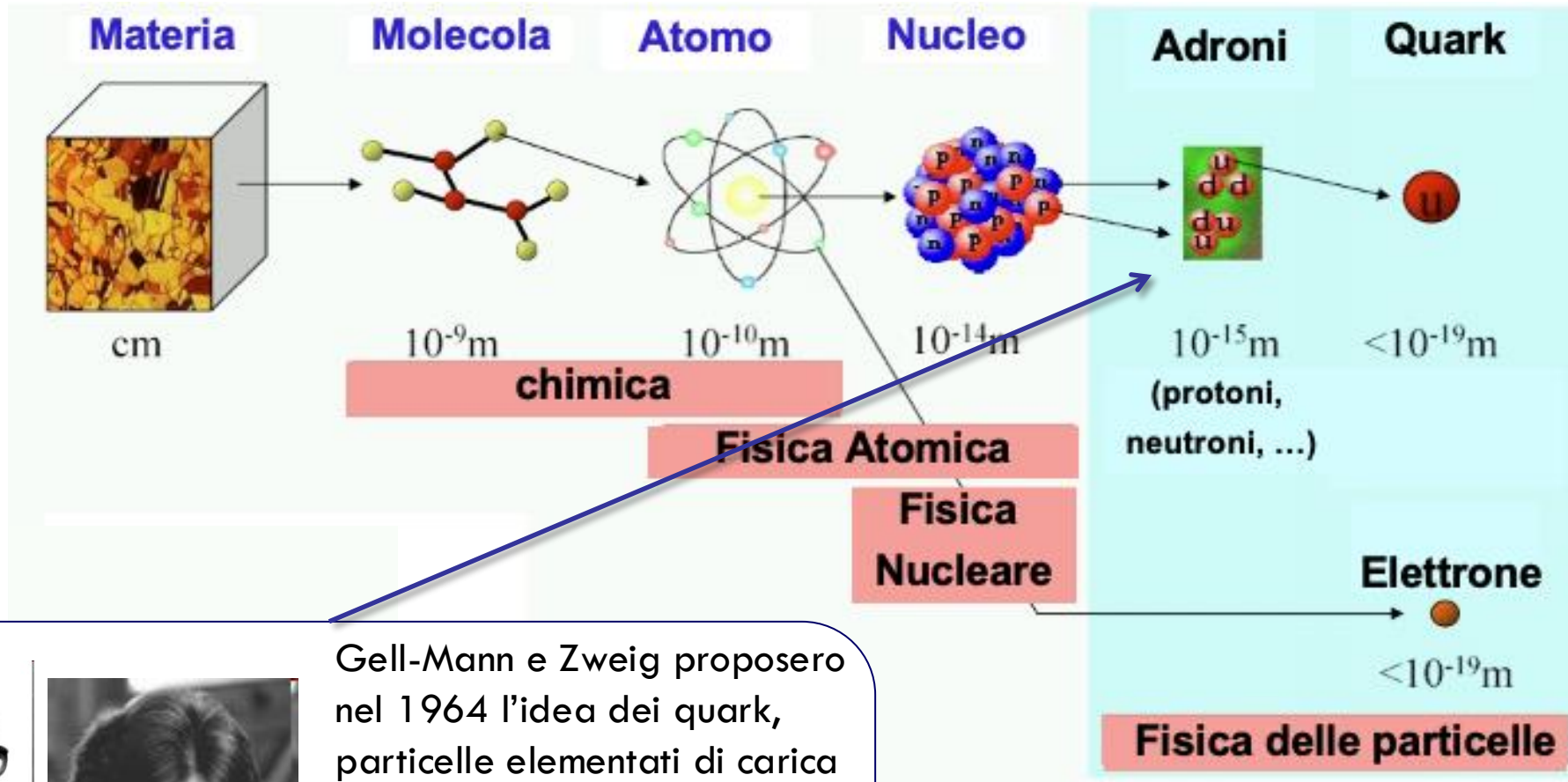
La Materia



Chadwick

Chadwick nel 1931 scoprì il neutrone, una particella con massa molto simile a quella del protone ma di carica nulla.

La Materia



Gell-Mann

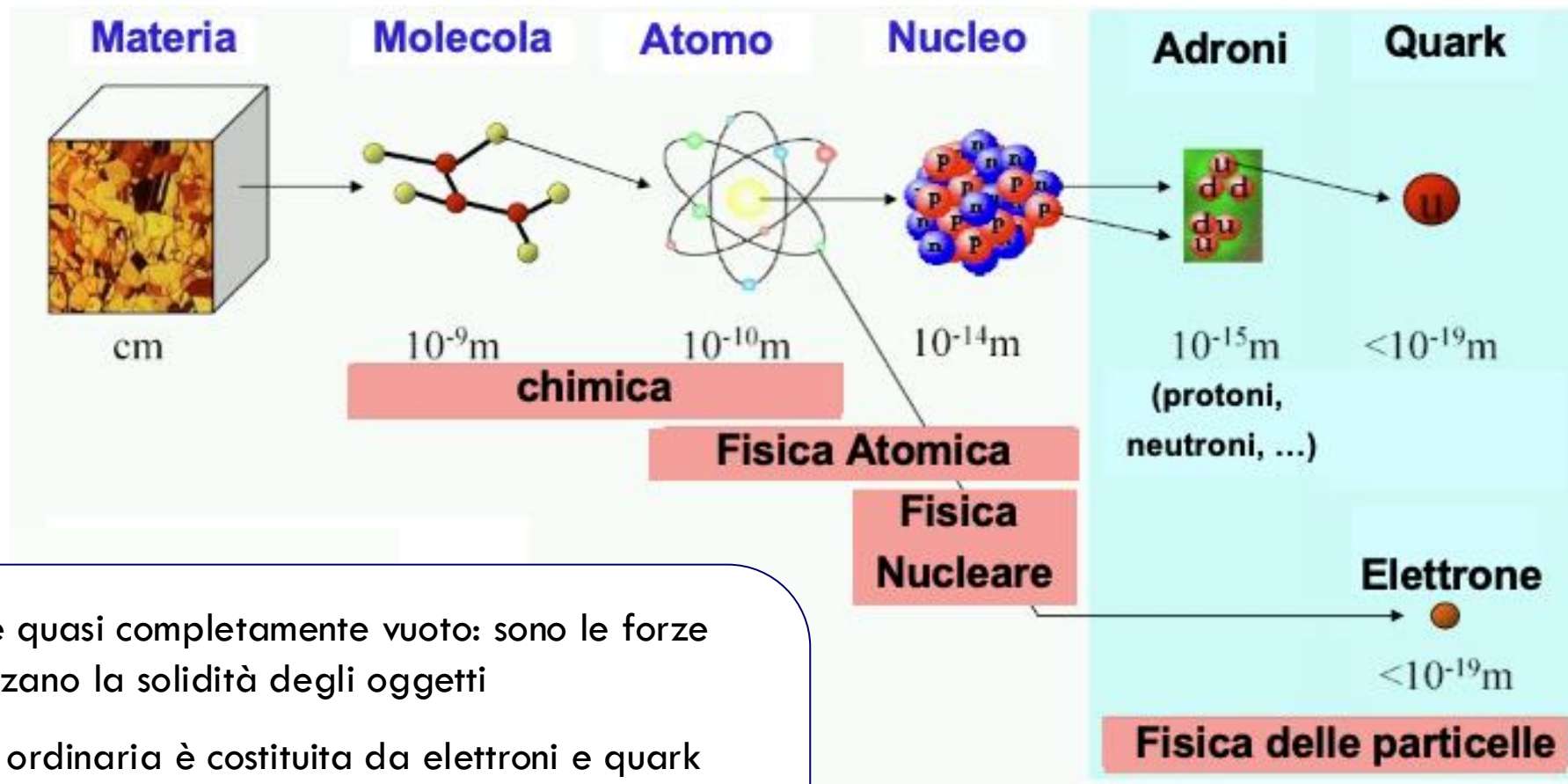


Zweig

Gell-Mann e Zweig proposero nel 1964 l'idea dei quark, particelle elementari di carica frazionaria con diversi "sapori" che si combinano a formare gli adroni (protone, neutrone, ...)

che quindi non sono elementari!

La Materia



Lo spazio è quasi completamente vuoto: sono le forze che realizzano la solidità degli oggetti

La materia ordinaria è costituita da elettroni e quark leggeri

Ad oggi non si ha evidenza di una struttura interna dell'elettrone e dei quark: **sembrano essere i mattoni fondamentali**

...ma è finita qui?

La scoperta dell' ANTIMATERIA

Paul Dirac predisse l'esistenza del **positrone** (antiparticella dell'elettrone) nel 1928.

L'equazione di Dirac implica che abbia stessa massa dell'elettrone ma carica opposta.

Il positrone e' stato scoperto da Anderson nel 1932.

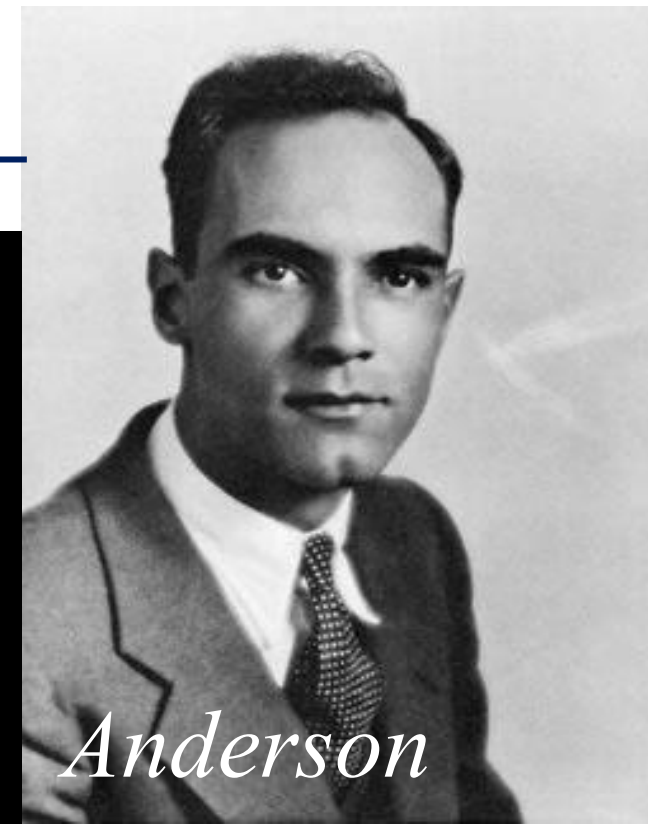


Dirac

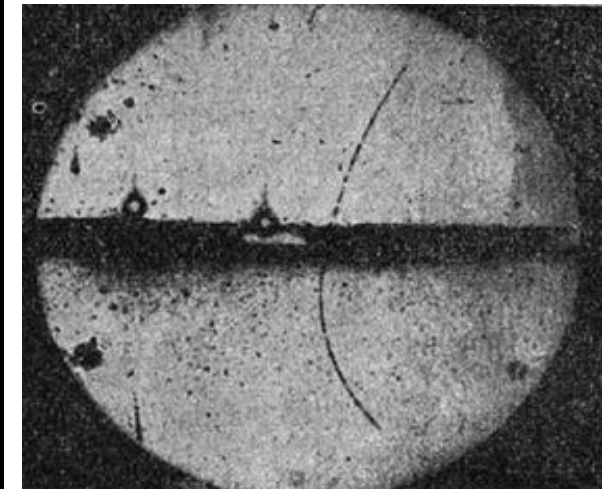
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$



$$x^2 = 4$$
$$x_1 = +2$$
$$x_2 = -2$$

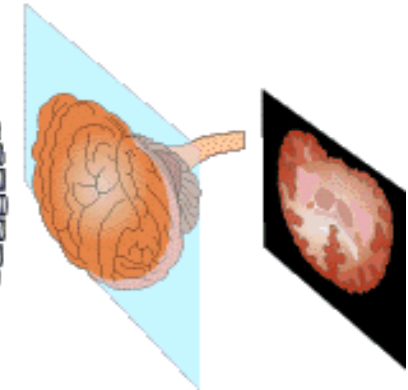
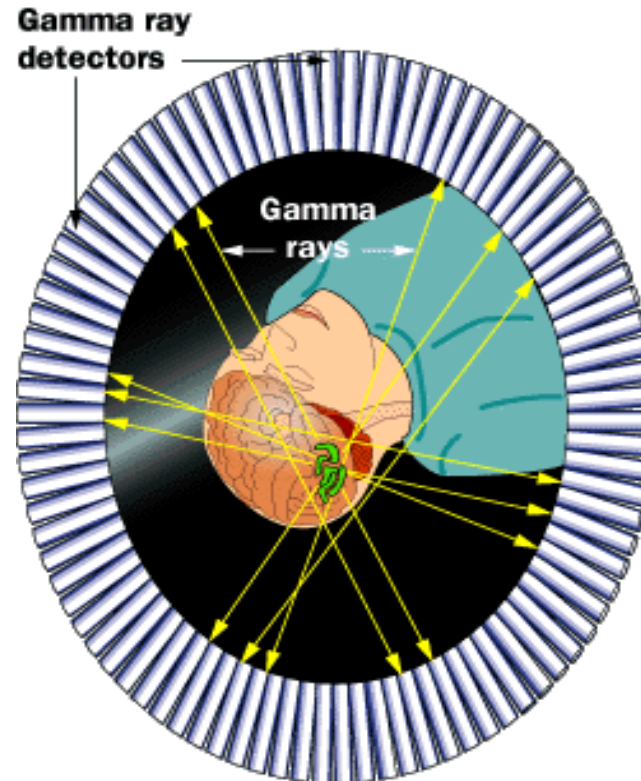
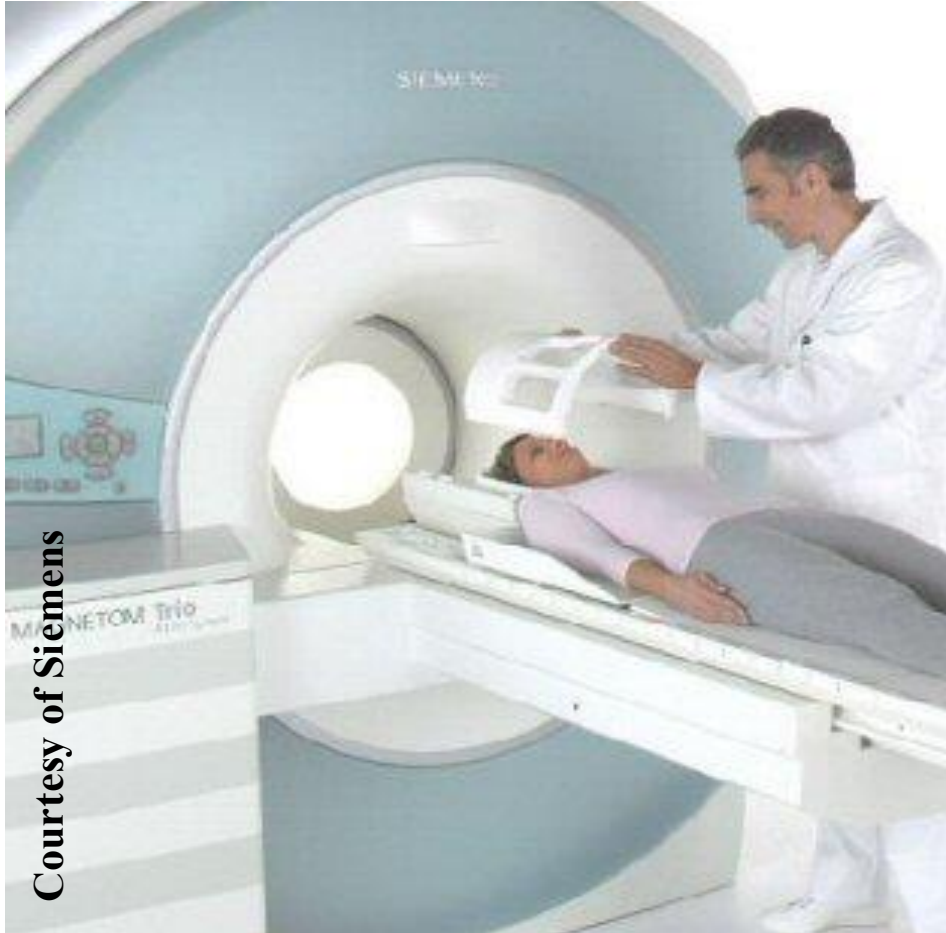


Anderson



L'antimateria e il servizio alla medicina

Una delle applicazioni piu' interessanti e' la Positron Emission Tomography (PET)



©2000 How Stuff Works



E ancora altre particelle!

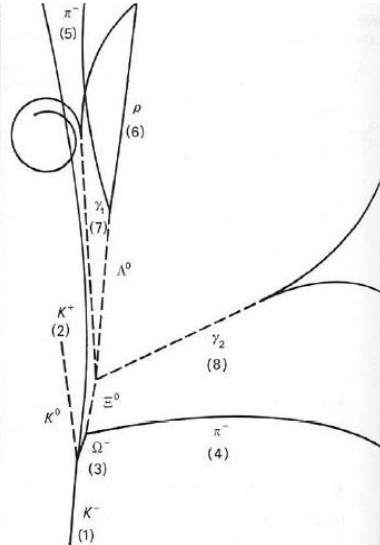
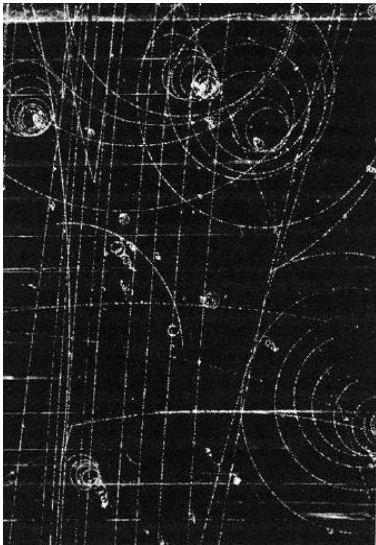
Il muone (μ)

Scoperto nella radiazione cosmica da Neddermeyer e Anderson (1936).

Sembra identico all'elettrone ma e' 200 volte piu' pesante.

Decade in 2.2 μ sec.

Le particelle "strane" -> nuovi quarks!



Il neutrino (ν)

Postulato da Pauli (1928).

Studiato da Fermi (1934).

Scoperto da Reines e Cowan solo nel 1956.

E' una particella neutra e debolmente interagente.



Cowan e Reines

...e molte, moltissime
altre scoperte...

E le forze ?

Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali

Responsabili:

- ✘ della coesione della materia
- ✘ del suo decadimento



CERN AC_Z04_V25/8/1992

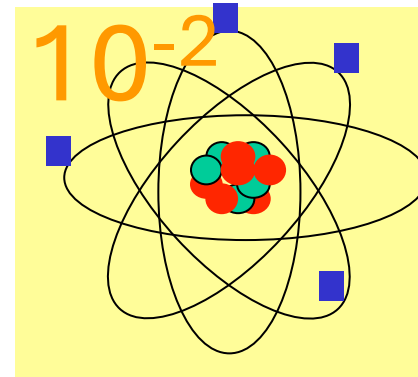
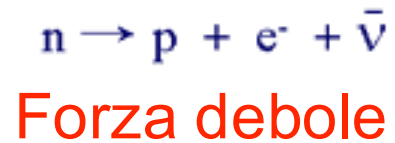
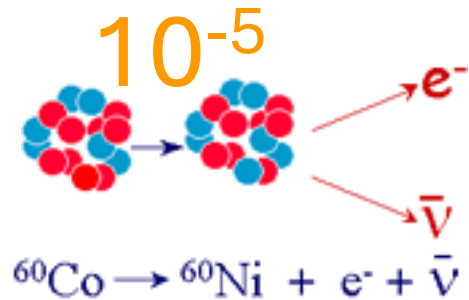


Le forze o interazioni

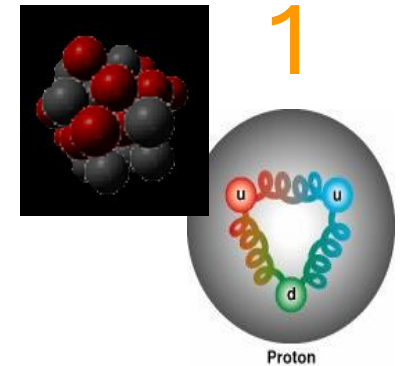
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali



Forza gravitazionale



Forza elettromagnetica



Forza forte (o di colore)



Sono i bosoni (spin intero), i “quanti” del campi di interazione.

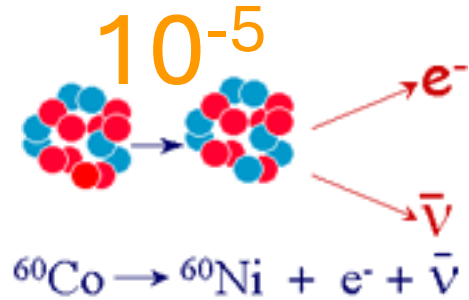
Es: Il fotone e' il quanto del campo di interazione elettromagnetica

Le forze o interazioni

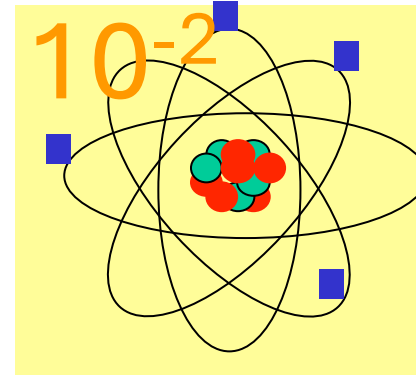
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali



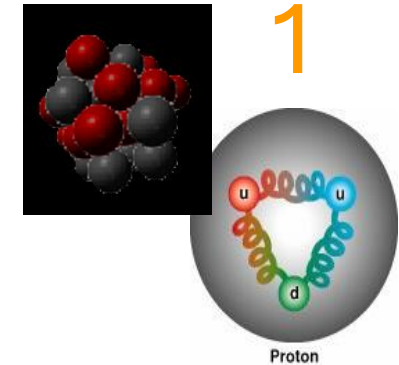
Forza gravitazionale



$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$
Forza debole



Forza elettromagnetica



Forza forte (o di colore)

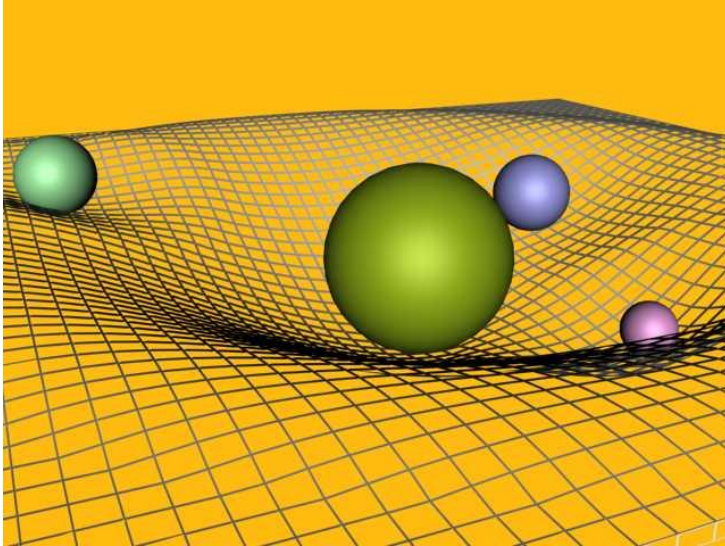
Mediatore	gravitone (G)	W⁻ W⁺ Z⁰	Fotone (γ)	Gluone (g)
Particelle coinvolte	tutte	Leptoni e quarks	Particelle cariche	Quark e gluoni

La Gravita'

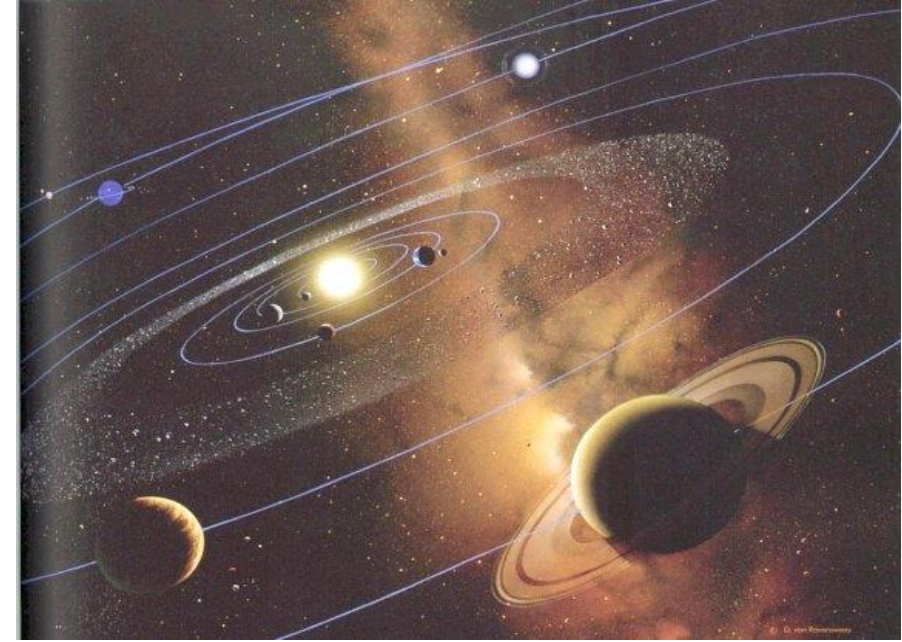
E' la forza che ci è più familiare

Completamente descritta dalla TEORIA
della RELATIVITA' GENERALE di Einstein

Descrive la gravità in termini di curvatura dello
spazio-tempo



Non è una teoria quantistica a DIFFERENZA delle
altre 3 interazioni fondamentali



... e inoltre
chi è il mediatore
della forza?

IL GRAVITONE

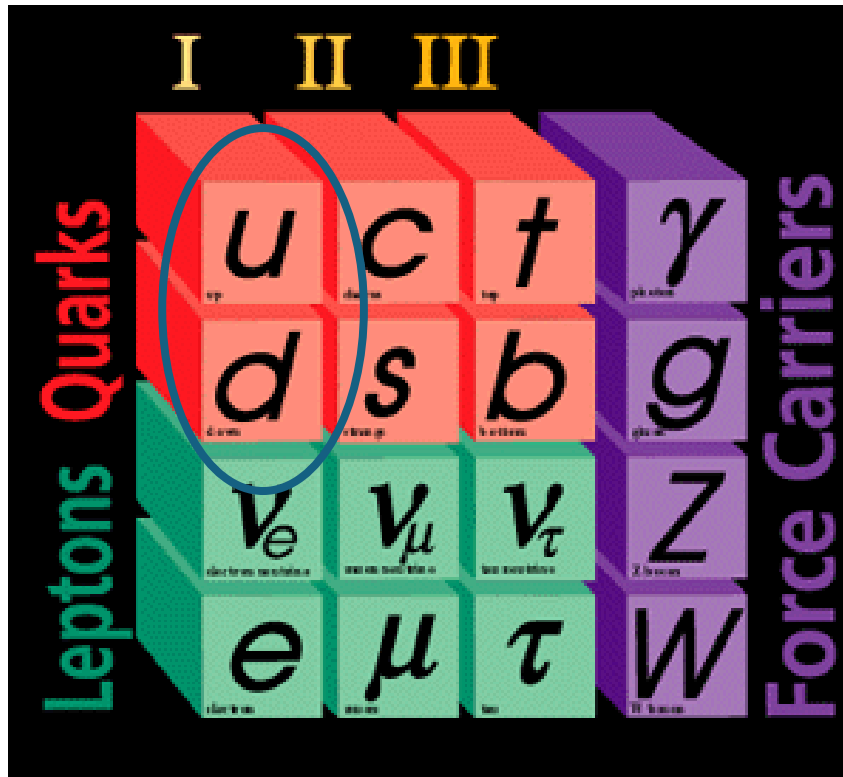


Il Modello Standard delle Particelle Elementari

Protoni e neutroni sono costituiti da 3 quark:

p: uud

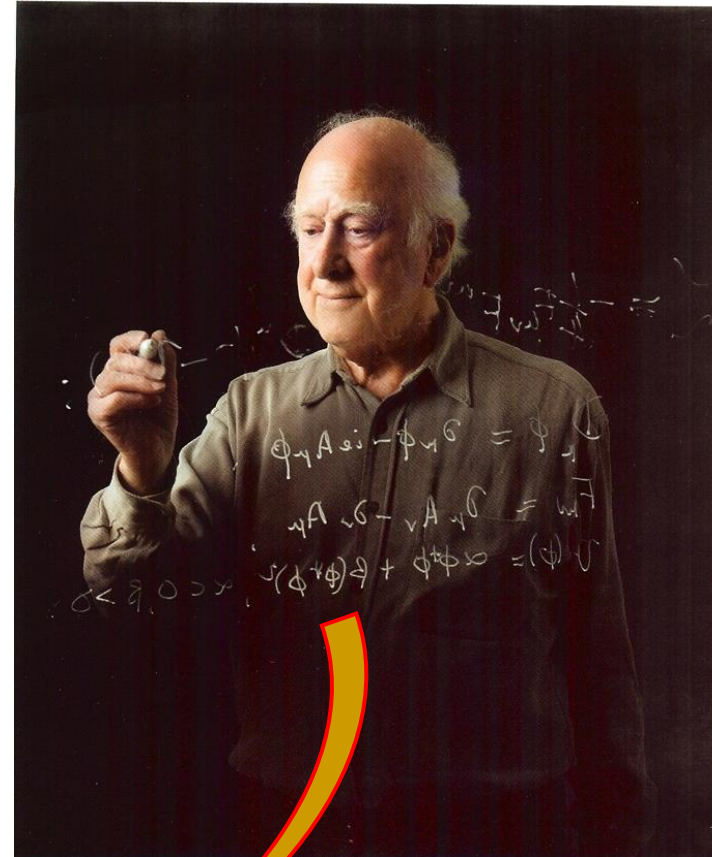
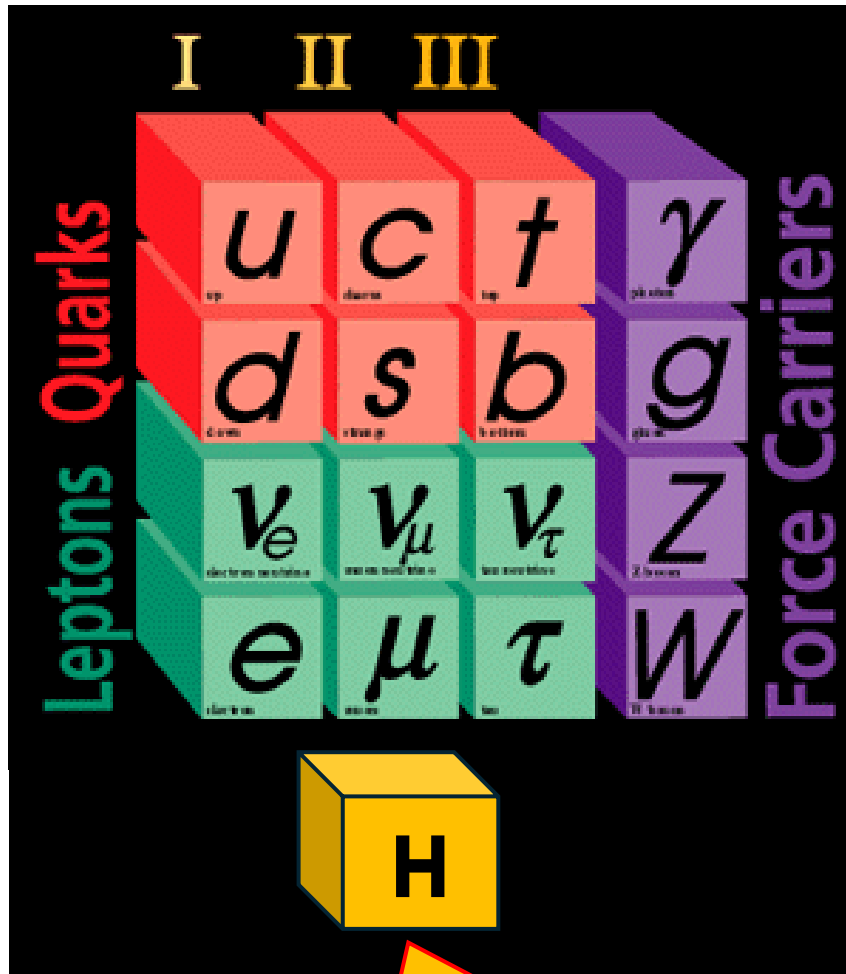
n: ddu



- ★ la materia ordinaria è costituita da quarks: nei nuclei, ed elettroni;
- ★ esistono però tre repliche delle particelle, di massa sempre più grande;
- ★ inoltre per ogni particella esiste una sua anti-particella di carica opposta.

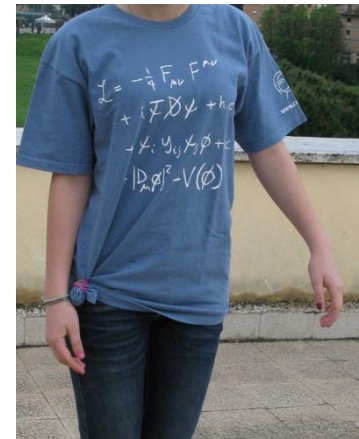
Il Modello Standard delle Particelle Elementari

Ancora un ultimo passo



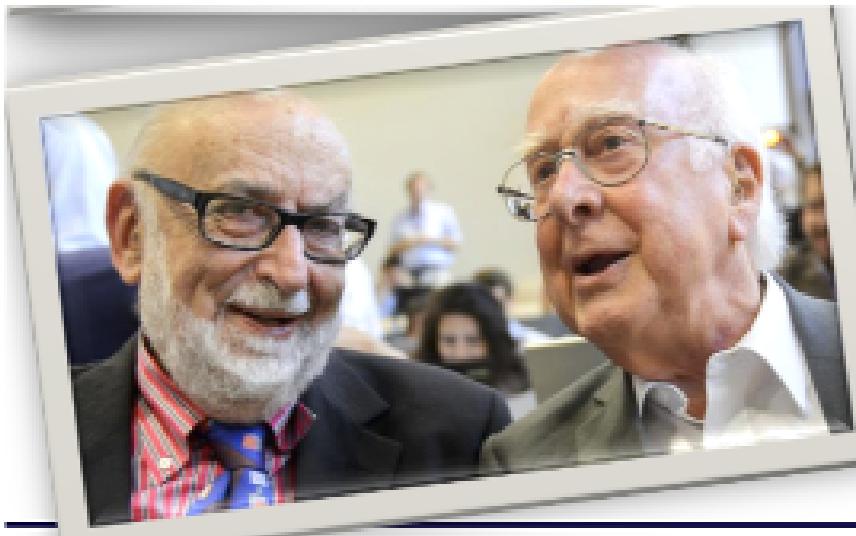
Il meccanismo di Higgs permette di attribuire una massa alle particelle elementari, tramite l'interazione con il campo generato da una nuova particella, il bosone di Higgs.

E' necessario introdurre un nuovo ingrediente: il Bosone di Higgs



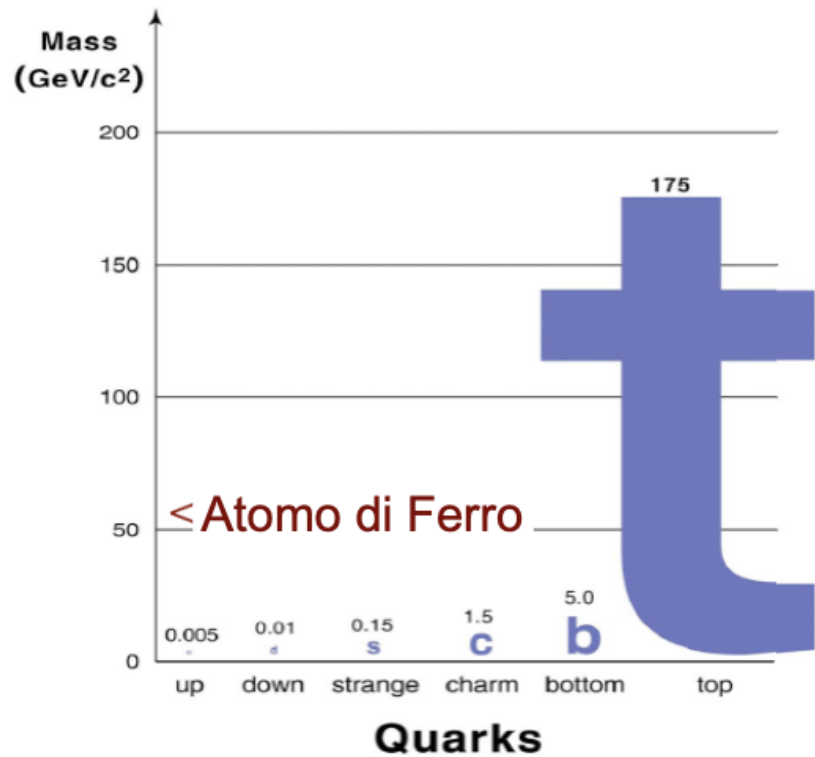
Il Bosone di Higgs

- ★ in una teoria senza bosone di Higgs alcuni processi non sono calcolabili: ad esempio $W^+W^- \rightarrow W^+W^-$ (si ottengono probabilità di interazione infinite) ;
- ★ altri processi possono essere calcolati, ma non con precisione arbitrariamente elevata. Effettuando calcoli più accurati, di nuovo compaiono degli infiniti che ne impediscono il calcolo.




- ★ se le masse delle particelle sono tutte messe a zero, i problemi non compaiono: la teoria si dice rinormalizzabile;
- ★ nel 1964 e negli anni successivi, Francois Englert, Peter Higgs e Robert Brout (e Gerard 't Hooft) mostrarono che con l'introduzione di una nuova particella, il bosone di Higgs, è possibile risolvere questo tipo di problemi
- ★ il bosone di Higgs deve interagire di più con le particelle più pesanti


L'interazione del bosone di Higgs



Il campo di Higgs permea lo spazio vuoto, le particelle che si propagano interagiscono continuamente con il campo di Higgs e questa interazione gli fornisce massa

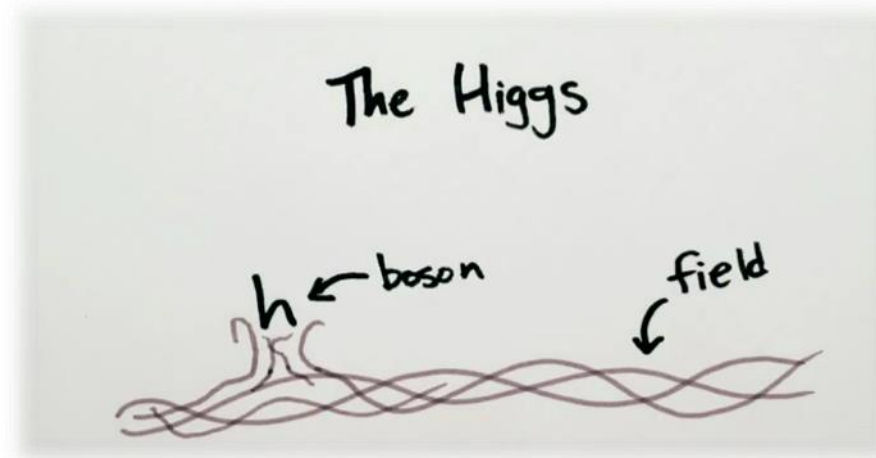
Il meccanismo dell'introduzione del campo funziona 
e mantiene tutte gli aspetti positivi del Modello Standard
precedenti.


E DA' MASSA ALLE PARTICELLE

Il meccanismo dell'introduzione del campo funziona  e mantiene tutti gli aspetti positivi del Modello Standard precedenti.

E DA' MASSA ALLE PARTICELLE

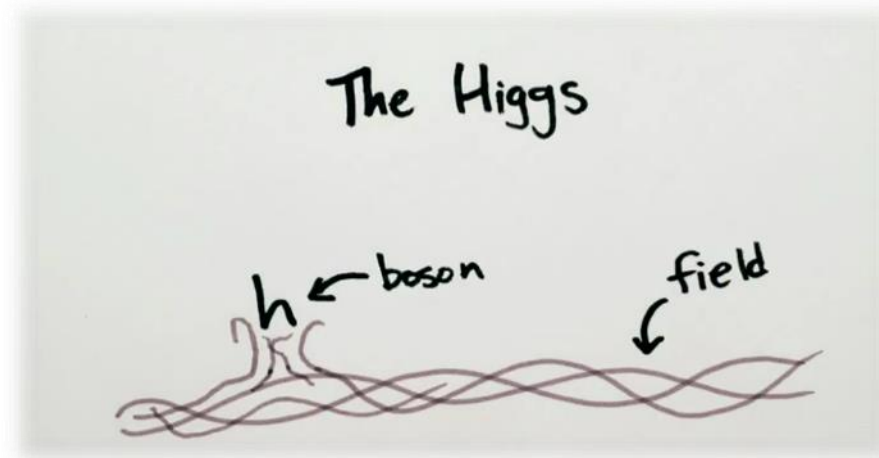
Pero': una eccitazione del campo di Higgs puo' generare una particella di Higgs



Il meccanismo dell'introduzione del campo funziona  e mantiene tutte gli aspetti positivi del Modello Standard precedenti.

E DA' MASSA ALLE PARTICELLE

Pero': una eccitazione del campo di Higgs puo' generare una **particella di Higgs**



Oltre al campo di Higgs il Modello Standard a questo punto prevede anche una particella di Higgs che doveva essere trovata

Altrimenti tutto il meccanismo non sta in piedi!

4 Luglio 2012

BBC News Sport

Top News story

Higgs-like particle 'discovered'

Scientists at the Large Hadron Collider claim the discovery of a particle believed to be the



la Repubblica.it

Scienze

Home Pubblico Economia&Finanza Sport Spettacoli&Cultura Motori Viaggi D-Repubb

ALTRI ARTICOLI DI Scienze



Quattromila km in un'ora sarà l'erede del Concorde



Un vaccino contro la nicotina "Non la fa arrivare al cervello"



Il multitasking e le donne "Più intelligenti dell'uomo"

SCIENZA

Scoperto il Bosone di Higgs la particella di Dio esiste davvero

Al Cern di Ginevra individuato il Bosone di Higgs, che spiega come mai tutte le cose nell'universo abbiano una massa. Era stato teorizzato ben 48 anni fa dallo scienziato inglese, oggi 84enne e ricomso fino al punto dalla standing ovation che gli hanno riservato (foto 1). Per lui si profila il riconoscimento scientifico più ambito dall'invitato ELENA DUSI

Lo leggo dopo

Discal Pro... the first amputee runner at the Olympics after being picked by South Africa for the 400m.

Nato sotto Afghanistan

Ukraine clash over language law



Top banker quizzed over rates scandal

Bob Diamond is questioned by MPs about Barclays' rigging of key London interest rates, a day after resigning as the bank's chief executive.

LE FIGARO.fr

ACTUALITÉ ÉCONOMIE CULTURE

INFO EN IMAGES BLOGS DÉBATS SANTÉ SUIVRE LE FIGARO EURO 2012

FIGARO.FR - HORS-SÉRIE: Secrète Andalousie

Un monde de couleurs et de passions, un terre de feu. L'art de vivre à Séville, Grenade et Cordoue...

ACTUALITÉ Sciences

Le Cern dévoile le boson de Higgs

Mots clés : Boson De Higgs, Physique Des Particules, Cern

Par Tristan Vey

Mis à jour le 06/07/2012 à 10:50 | publié le 03/07/2012 à 16:49 Réactions (217)



Corriere della Sera > Scienze > «Provata l'esistenza del bosone di Higgs» E' la particella all'origine dell'U

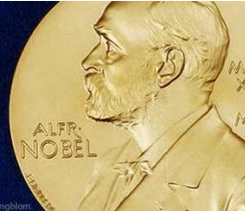
«Provata l'esistenza del bosone di Higgs» E' la particella all'origine dell'Universo

LA CONFERENZA STAMPA INTERNAZIONALE AL CERN DI GINEVRA



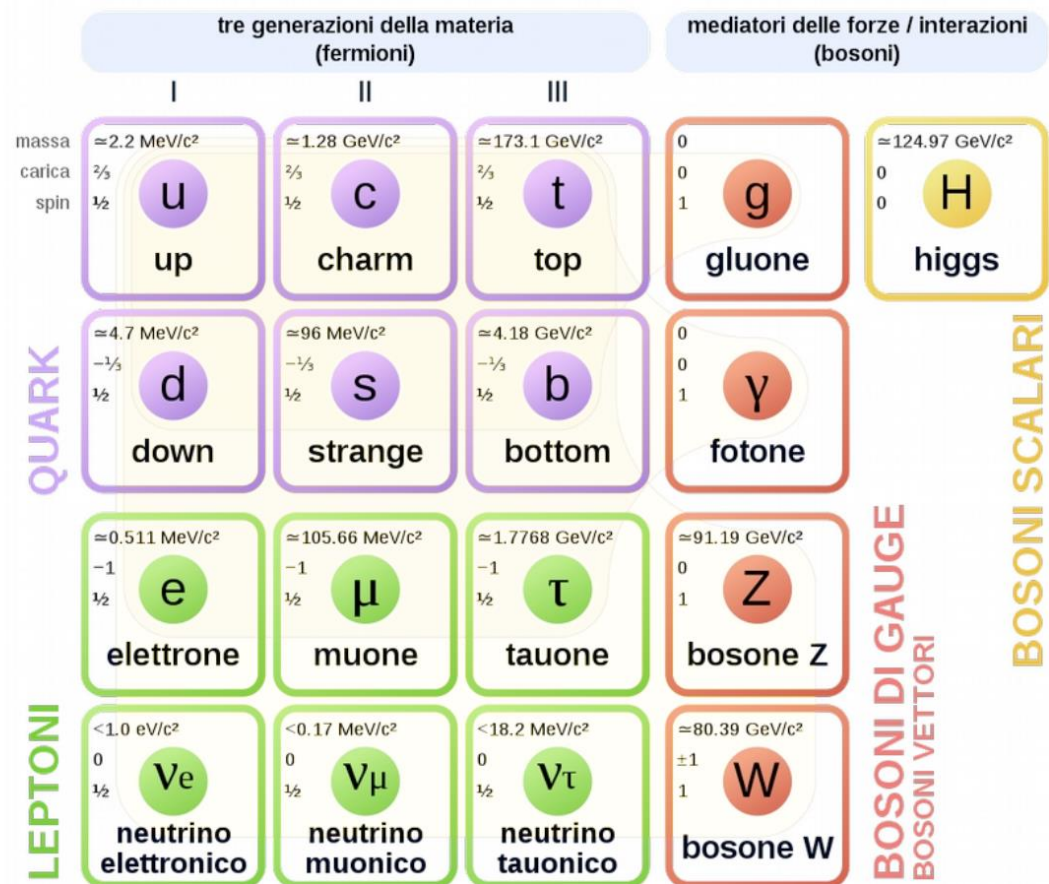
2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert Peter W. Higgs

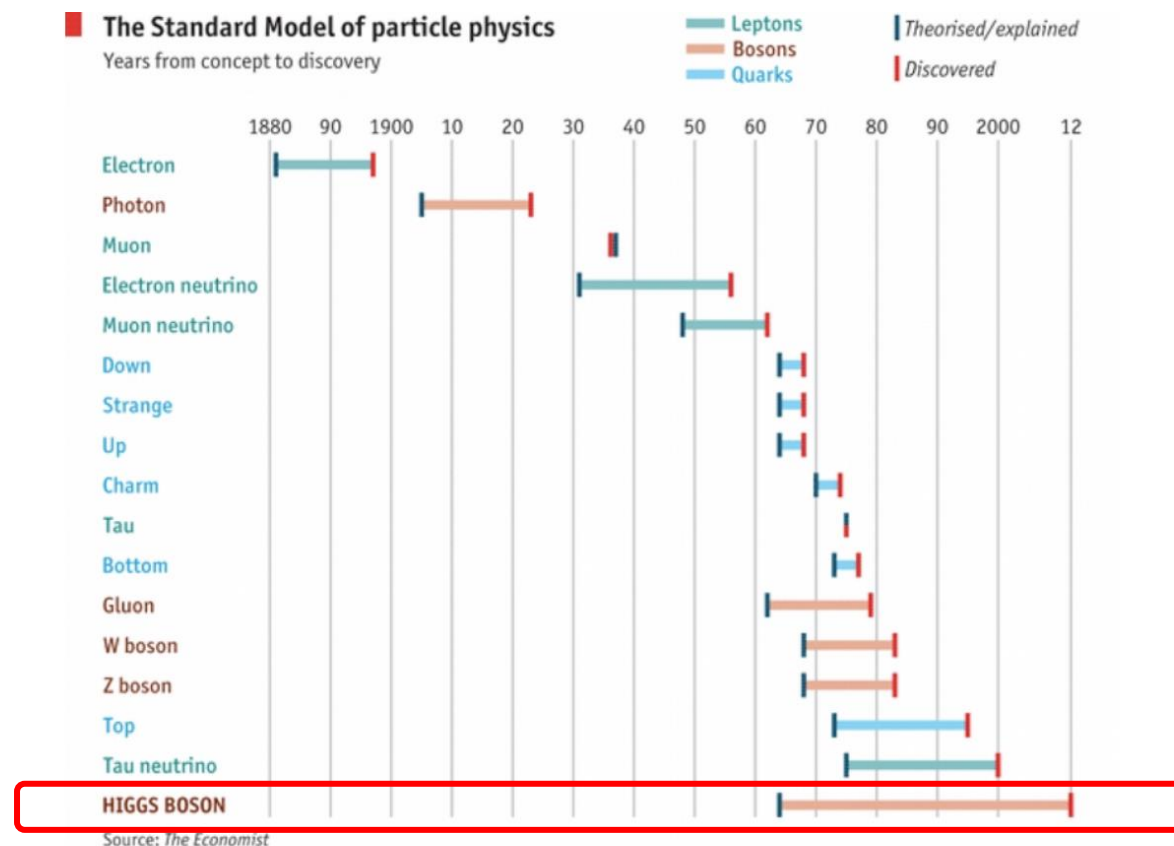


8 Ottobre 2013

Il Modello Standard delle Particelle Elementari



Il **Modello standard** della fisica delle particelle: è una teoria ben confermata da numerosi esperimenti.



Il bosone di Higgs: Teorizzato nel 1964 – ricercato per quasi 60 anni (in Europa, in USA)
Finalmente **scoperto nel 2012 al CERN ad LHC**

Riassumendo: dalla tavola periodica al Modello Standard

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

1 H Hydrogen 1.008
2 He Helium 4.0026

3 Li Lithium 6.94
4 Be Beryllium 9.0122

5 B Boron 10.81
6 C Carbon 12.011
7 N Nitrogen 14.007
8 O Oxygen 15.999
9 F Fluorine 18.998
10 Ne Neon 20.180

11 Na Sodium 22.990
12 Mg Magnesium 24.305

13 Al Aluminum 26.982
14 Si Silicon 28.085
15 P Phosphorus 30.974
16 S Sulfur 32.06
17 Cl Chlorine 35.45
18 Ar Argon 39.948

19 K Potassium 39.098
20 Ca Calcium 40.078
21 Sc Scandium 44.956
22 Ti Titanium 47.867
23 V Vanadium 50.942
24 Cr Chromium 51.996
25 Mn Manganese 54.938
26 Fe Iron 55.845
27 Co Cobalt 58.933
28 Ni Nickel 58.693
29 Cu Copper 63.546
30 Zn Zinc 65.38
31 Ga Gallium 69.723
32 Ge Germanium 72.630
33 As Arsenic 74.922
34 Se Selenium 78.971
35 Br Bromine 79.904
36 Kr Krypton 83.798

37 Rb Rubidium 85.468
38 Sr Strontium 87.62
39 Y Yttrium 88.906
40 Zr Zirconium 91.224
41 Nb Niobium 92.906
42 Mo Molybdenum 95.95
43 Tc Technetium (98)
44 Ru Ruthenium 101.07
45 Rh Rhodium 106.42
46 Pd Palladium 107.87
47 Ag Silver 107.87
48 Cd Cadmium 112.41
49 In Indium 114.82
50 Sn Tin 118.71
51 Sb Antimony 121.76
52 Te Tellurium 127.60
53 I Iodine 126.90
54 Xe Xenon 131.29

55 Cs Cesium 132.91
56 Ba Barium 137.33
57-71 Lanthanoids
72 Hf Hafnium 178.49
73 Ta Tantalum 180.95
74 W Tungsten 183.84
75 Re Rhenium 186.21
76 Os Osmium 190.23
77 Ir Iridium 192.22
78 Pt Platinum 195.08
79 Au Gold 196.97
80 Hg Mercury 200.59
81 Tl Thallium 204.38
82 Pb Lead 207.2
83 Bi Bismuth 208.98
84 Po Polonium (209)
85 At Astatine (210)
86 Rn Radon (222)

87 Fr Francium (223)
88 Ra Radium (226)
89-103 Actinoids
104 Rf Rutherfordium (261)
105 Db Dubnium (268)
106 Sg Seaborgium (269)
107 Bh Bohrium (270)
108 Hs Hassium (277)
109 Mt Meitnerium (278)
110 Ds Darmstadtium (281)
111 Rg Roentgenium (282)
112 Cn Copernicium (285)
113 Nh Nihonium (286)
114 Fl Flerovium (289)
115 Lv Livermorium (293)
116 Ts Tennessine (294)
117 Og Oganesson (294)

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

6 La Lanthanum 138.91
7 Ce Cerium 140.12
8 Pr Praseodymium 140.91
9 Nd Neodymium 144.24
10 Pm Promethium (145)
11 Sm Samarium 150.36
12 Eu Europium 151.96
13 Gd Gadolinium 157.25
14 Tb Terbium 158.93
15 Dy Dysprosium 162.50
16 Ho Holmium 164.93
17 Er Erbium 167.26
18 Tm Thulium 168.93
19 Yb Ytterbium 173.05
20 Lu Lutetium 174.97

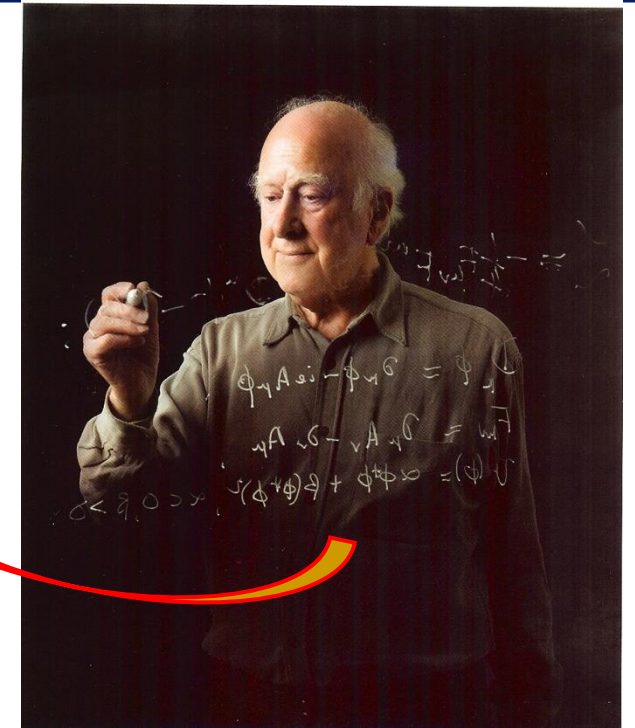
89 Ac Actinium (227)
90 Th Thorium 232.04
91 Pa Protactinium 231.04
92 U Uranium 238.03
93 Np Neptunium (237)
94 Pu Plutonium (244)
95 Am Americium (243)
96 Cm Curium (247)
97 Bk Berkelium (247)
98 Cf Californium (251)
99 Es Einsteinium (252)
100 Fm Fermium (257)
101 Md Mendelevium (258)
102 No Nobelium (259)
103 Lr Lawrencium (260)

Modello Standard delle Particelle Elementari

	tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)	
	I	II	III		
massa	≈ 2.2 MeV/c ²	≈ 1.28 GeV/c ²	≈ 173.1 GeV/c ²	0	≈ 124.97 GeV/c ²
carica	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
QUARK	u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
	≈ 4.7 MeV/c ²	≈ 96 MeV/c ²	≈ 4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	≈ 0.511 MeV/c ²	≈ 105.66 MeV/c ²	≈ 1.7768 GeV/c ²	≈ 91.19 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
LEPTONI	e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
	< 1.0 eV/c ²	< 0.17 MeV/c ²	< 18.2 MeV/c ²	≈ 80.39 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

BOSONI DI GAUGE
BOSONI VETTORI

BOSONI SCALARI



La materia ordinaria è formata essenzialmente da elettroni e quark up e down – Conosciamo bene anche il mediatore della forza elettromagnetica, il fotone. Ma esistono tante altre particelle

Questo è il quadro completo che conosciamo oggi. Ad ogni particella corrisponde una sua antiparticella

Il meccanismo di Higgs permette di attribuire una massa alle particelle elementari, tramite l'interazione con il campo generato da una nuova particella, il bosone di Higgs.

Tuttavia non puo' essere la «Teoria finale»

Modello Standard delle Particelle Elementari

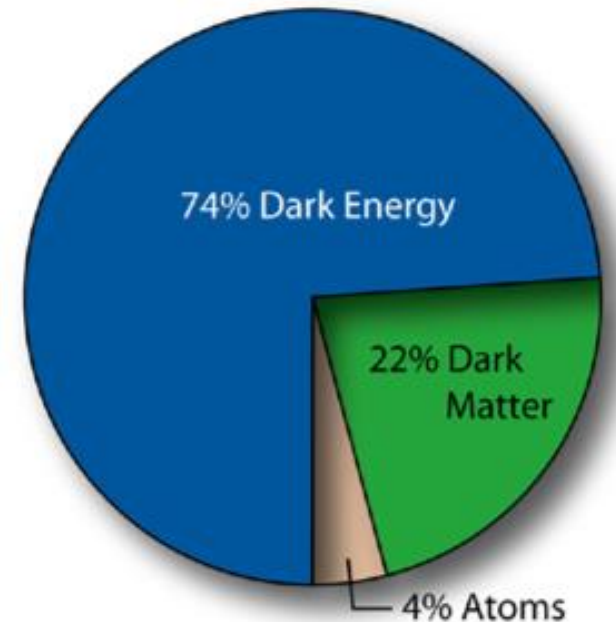
tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)	
I	II	III		
massa $\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ carica $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ u up	massa $\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ carica $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ c charm	massa $\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ carica $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 g gluone	massa $\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H higgs
Q U QUARK	massa $\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ carica $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ d down	massa $\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ carica $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ s strange	0 0 1 γ fotone	BOSONI SCALARI
massa $\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ carica -1 spin $\frac{1}{2}$ e elettrone	massa $\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ carica -1 spin $\frac{1}{2}$ μ muone	massa $\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ carica -1 spin $\frac{1}{2}$ τ tauone	0 0 1 Z bosone Z	
L e LEPTONI	massa $< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elettronico	massa $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonico	0 0 1 W bosone W	
massa $< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 spin $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauonico			0 0 1 W bosone W	

Il Modello Standard:

✘ Descrive con successo le nostre osservazioni

✘ Ma deve necessariamente essere esteso!

- Per spiegare l'eccesso di materia sull'antimateria
- Per spiegare da cosa sia fatta l'energia del nostro universo:
 - la materia nota ne rappresenta solo il 4%
 - cos'è il restante 96%?



Bosone di Higgs: la chiave per svelare i segreti dell'universo

Studiare il bosone di Higgs è importante perché:

1. Spiega l'**origine della massa delle particelle**
2. Può rivelare **nuova fisica oltre il Modello Standard**
3. Ci aiuta a capire **la storia e la struttura dell'universo**

In teoria dei campi:

vuoto \neq assenza di campi

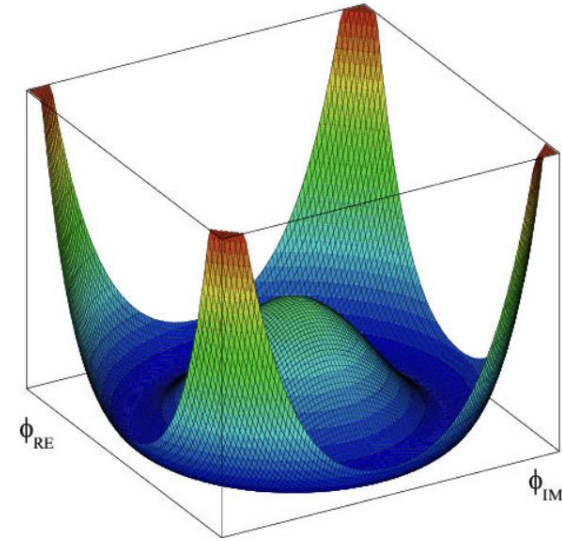
vuoto = stato di minima energia dei campi

Se definiamo il vuoto come uno stato al minimo di energia, questo sarà permeato dal campo di Higgs.

Il vero vuoto dell'universo non è il punto centrale, ma uno dei punti della valle del potenziale

Quindi il vuoto può contenere:

- valore medio del campo di Higgs
- fluttuazioni quantistiche (che si manifestano come particelle)
- energia del vuoto



Questo è il potenziale del campo di Higgs. Al centro il campo è nullo MA IL POTENZIALE NON È AL MINIMO

L'universo preferisce uno stato in cui il campo di Higgs ha un valore diverso da zero, perché questo stato **ha energia più bassa rispetto a uno stato in cui il campo è nullo.**

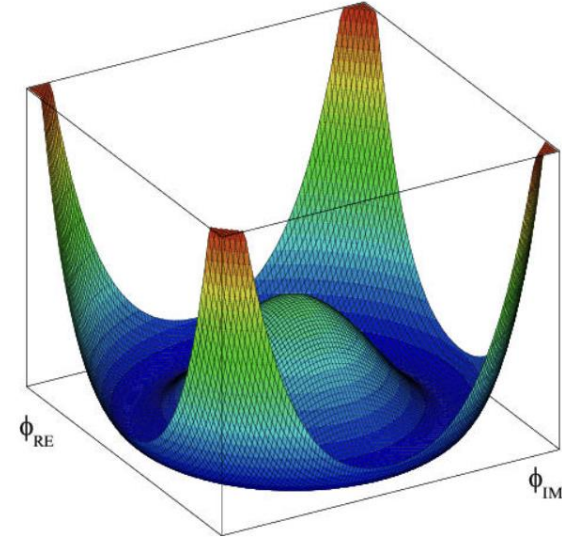
Bosone di Higgs: la chiave per svelare i segreti dell'universo

Studiare il bosone di Higgs è importante perché:

1. Spiega l'**origine della massa delle particelle**
2. Può rivelare **nuova fisica oltre il Modello Standard**
3. Ci aiuta a capire **la storia e la struttura dell'universo**

Capire se e come l'energia del campo di Higgs, sia collegata a fenomeni come l'espansione accelerata dell'universo è una delle grandi sfide della fisica moderna

→ Studiare il bosone di Higgs all'LHC non serve solo a capire come le particelle ottengono massa: è la chiave per esplorare i segreti nascosti dell'universo e per cercare segnali di nuova fisica oltre il Modello Standard.



Questo e' il potenziale del campo di Higgs. Al centro il campo e' nullo MA IL POTENZIALE NON E' AL MINIMO

L'universo preferisce uno stato in cui il campo di Higgs ha un valore diverso da zero, perché questo stato **ha energia più bassa rispetto a uno stato in cui il campo è nullo.**

A long, blue, cylindrical particle accelerator tunnel, likely part of the Large Hadron Collider (LHC), extending into the distance. The tunnel is surrounded by various pipes, cables, and equipment. The floor is marked with yellow and black diagonal stripes. The ceiling is supported by a complex network of beams and pipes. The overall scene is industrial and technical.

**Buon viaggio al
LARGE HADRON COLLIDER !**