

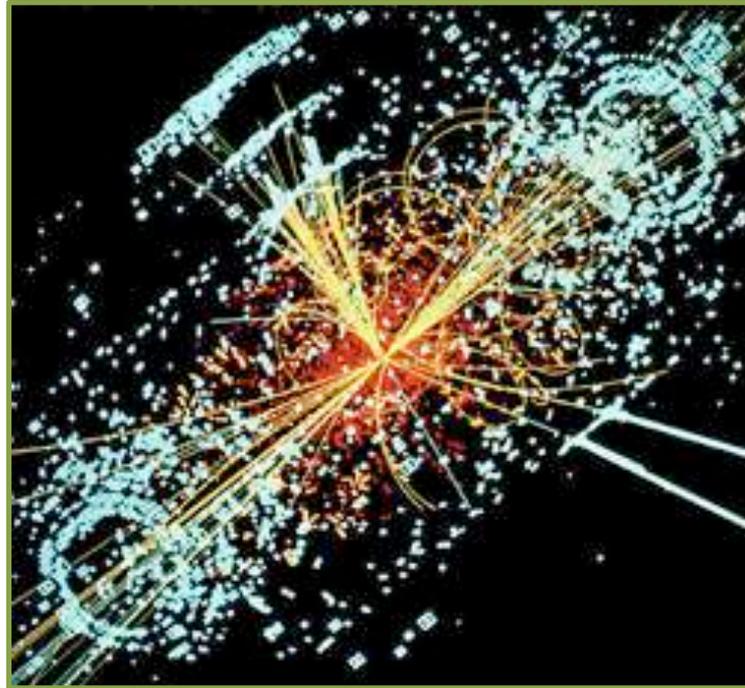
Introduzione al Modello Standard

Testo di riferimento:
Q. Ho-Kim, N. Kumar, C.S. Lam
Invitation to Contemporary Physics

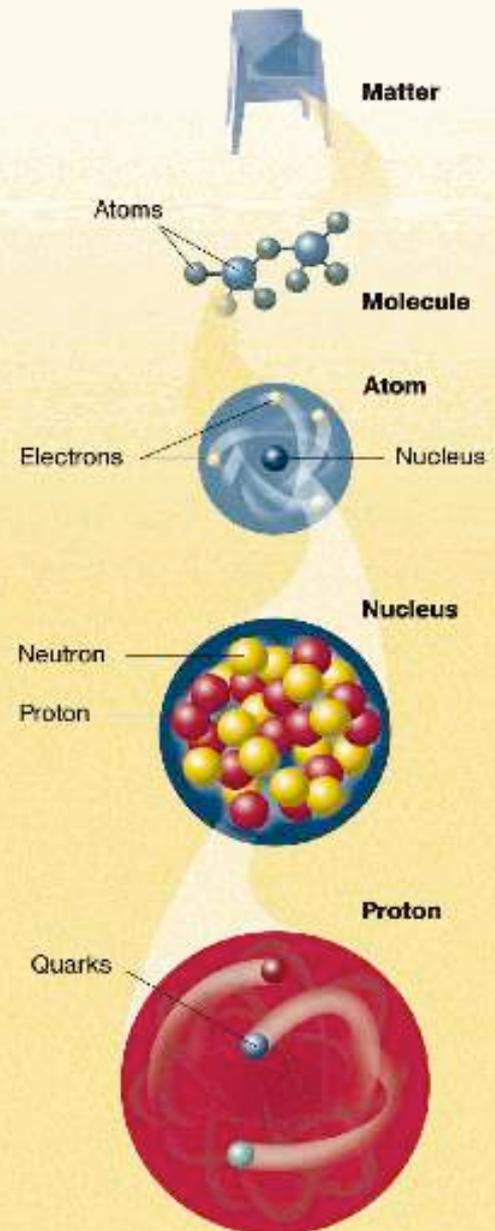
Masterclass – Frascati - 2018

Cecilia Tarantino
(Universita' Roma Tre)

Il Modello Standard e' la teoria che descrive le interazioni fondamentali tra particelle elementari



La ricerca dei costituenti ultimi della materia e delle interazioni fondamentali tra di essi ha accompagnato la storia dell'uomo



Costituenti elementari della materia

Ambizione dell'umanità':

Stabilire ordine e regolarità nella complessità di ciò che ci circonda

- **Antichi Greci:** 4 elementi (aria, fuoco, acqua, terra)
- **Antichi Cinesi:** 5 elementi (metallo, legno, acqua, fuoco, terra)
- ...
- ...
- **1808, John Dalton:** (inalterabile ed indistruttibile) **atomo**
- **Meta' del 19° secolo, Dmitry Mendeleev:** **tavola periodica** (osservando la (ancora incompresa) regolarità degli elementi chimici)

Periodic Table of the Elements

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1 H Hydrogen 1.008	2 He Helium 4.003																
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	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 28.086	15 P Phosphorus 30.974	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.453	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 72.631	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 76.611	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 84.796
37 Rb Rubidium 84.464	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.906	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.905	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.328	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.383	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium 209	85 At Astatine 209	86 Rn Radon 222
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium 261	105 Db Dubnium 262	106 Sg Seaborgium 266	107 Bh Bohrium 264	108 Hs Hassium 265	109 Mt Meitnerium 268	110 Ds Darmstadtium 271	111 Rg Roentgenium 272	112 Cn Copernicium 277	113 Nh Nihonium 284	114 Fl Flerovium 289	115 Uup Ununpentium 288	116 Lv Livermorium 293	117 Uus Ununseptium 289	118 Uuo Ununoctium 294

Legend:

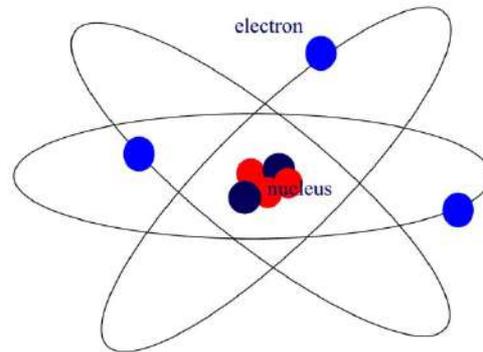
- Alkali Metal
- Alkaline Earth
- Transition Metal
- Basic Metal
- Semimetal
- Nonmetal
- Halogen
- Noble Gas
- Lanthanide
- Actinide

© 2018 Todd Helmenstein, jshelmen@cs.cmu.edu

- 1897, Joseph John Thomson: scoperta dell'**elettrone**
- 1911, Ernest Rutherford: scoperta del **nucleo atomico**



Superamento del concetto di atomo di Dalton
Modello planetario dell'atomo



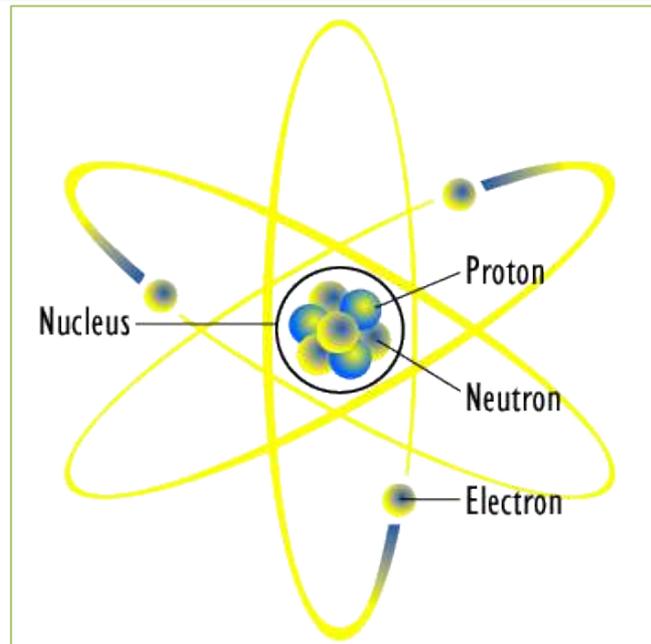
Atomic Planetary Model

- Gli elementi chimici sono diversi perche' hanno diverso numero di elettroni**
- Le proprieta' chimiche sono dovute all'arrangiamento elettronico (spiegato dalla Meccanica Quantistica)**
(Un elemento chimico puo' avere vari isotopi, caratterizzati dalle stesse proprieta' chimiche e da diversa massa nucleare)

•1932, James Chadwick: scoperta del **neutrone**

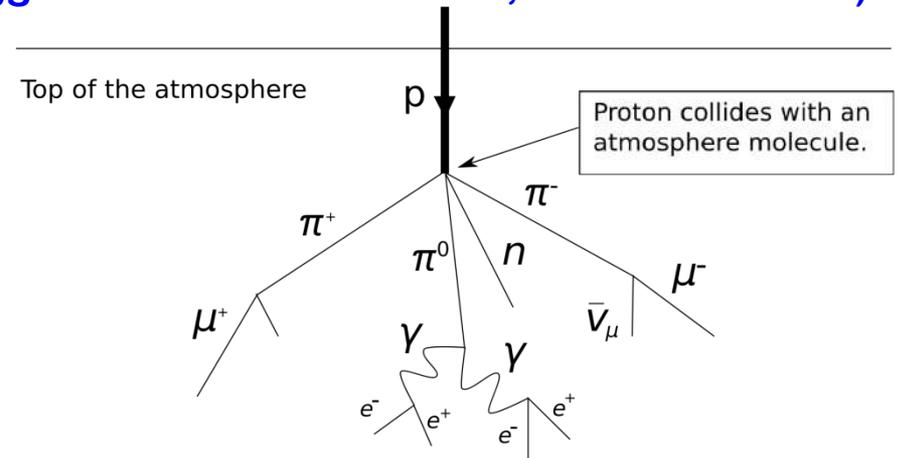
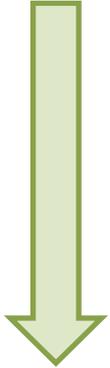


- I nuclei sono composti di **protoni e neutroni** (complessivamente chiamati nucleoni):
- I **protoni** (carichi) sono **tanti quanti gli elettroni** (gli atomi sono neutri)
- I **neutroni** (neutri) possono essere di **numero diverso in isotopi diversi** (un nucleo con **troppi neutroni** diventa instabile, decade tramite **decadimento- β**)



**Le particelle elementari sembravano essere (non piu' atomi ma):
protoni, neutroni ed elettroni**

- Anni '30 : **nuove particelle** scoperte nei raggi cosmici e negli acceleratori di alta energia (principalmente adroni, cioè particelle soggette alla forza nucleare, come i nucleoni)



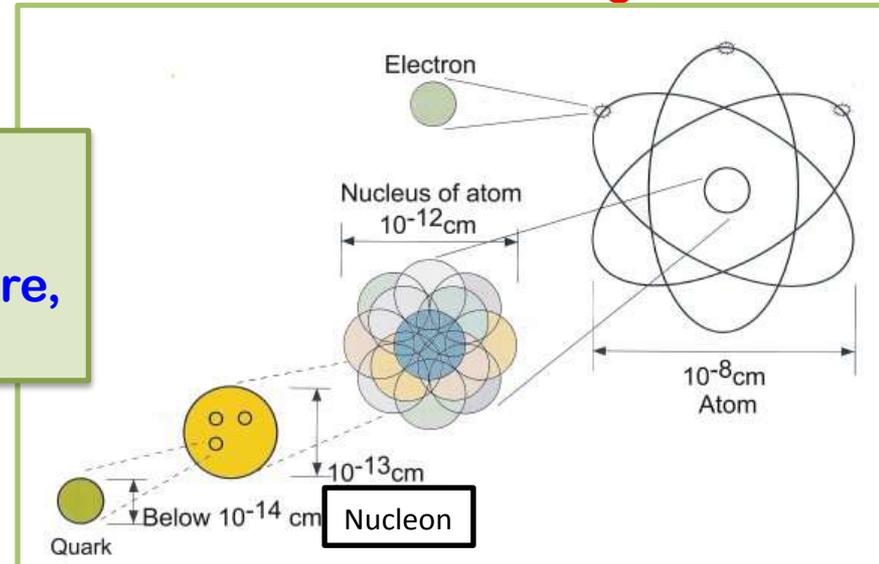
Si osservavano **molte adroni** e sembrava non esserci alcuna **relazione tra loro** (come tra gli elementi chimici prima di Mendeleev)

- Anni '60 : **Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman** trovarono alcune **regolarità** (simmetria-SU(3))
- 1964: **Murray Gell-Mann e George Zweig** scoprirono una **struttura interna agli adroni**



Le **particelle elementari divennero:**

- quark** (costituenti i nuclei e altri adroni)
- leptoni** (non soggetti all'interazione nucleare, come gli elettroni)



Il Modello Standard e' la teoria che descrive le interazioni fondamentali di quark e leptoni

Il Modello Standard e' una teoria quantistica e relativistica

Per introdurre il Modello Standard dobbiamo prima introdurre:

- **La Meccanica Quantistica**
- **La Teoria della Relativita'**



**Fisica
Moderna**

Fisica Classica (<1900)

MECCANICA

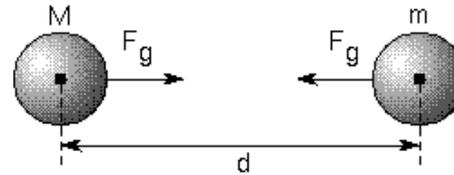


Newton 1686

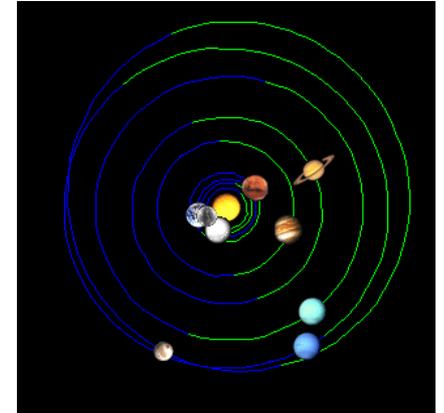
$$F = m \cdot a$$

Equazione
del moto

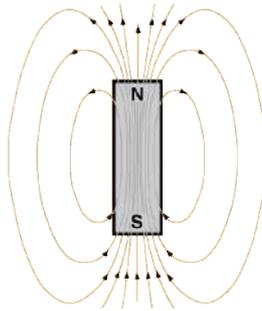
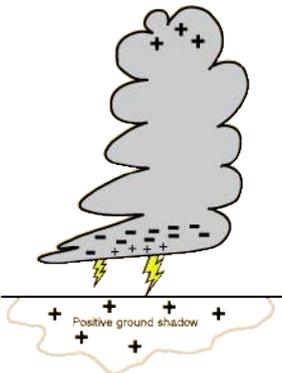
GRAVITAZIONE UNIVERSALE



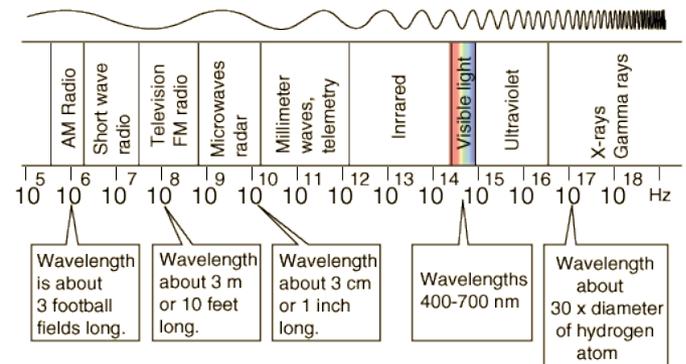
$$F_g = \frac{GMm}{d^2}$$



ELETTRO-MAGNETISMO



Maxwell 1865



Fine '800 – Inizio '900

Studio di Fenomeni su Scala Atomica:

AZIONE $\approx h=6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
(grandezza che caratterizza un sistema
(e le sue dimensioni)
e permette di studiarne il moto)

- Dualismo Onda-Particella
- Relazione di Indeterminazione
- Probabilismo
- ...
- ...

MECCANICA QUANTISTICA
[Schrödinger, Heisenberg, Born,...]

VELOCITA' $\approx c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

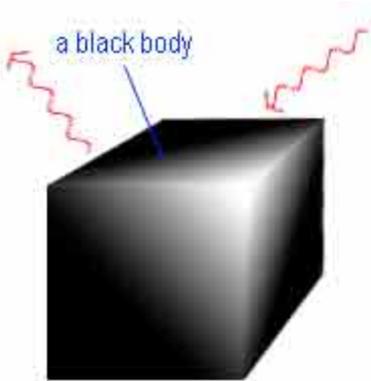
- c : velocità assoluta
- Dilatazione dei Tempi
- Non-conservazione della Massa
- ...
- ...

RELATIVITA'
[Einstein]

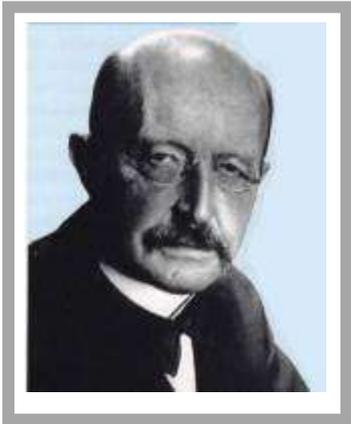
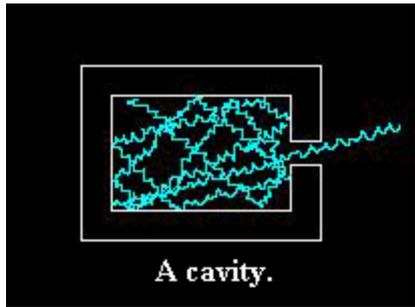
MECCANICA QUANTISTICA

Proprietà Corpuscolari della Radiazione elettromagnetica

SPETTRO DEL CORPO NERO

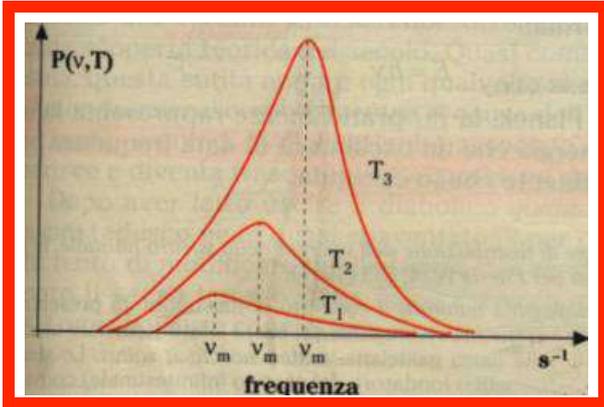
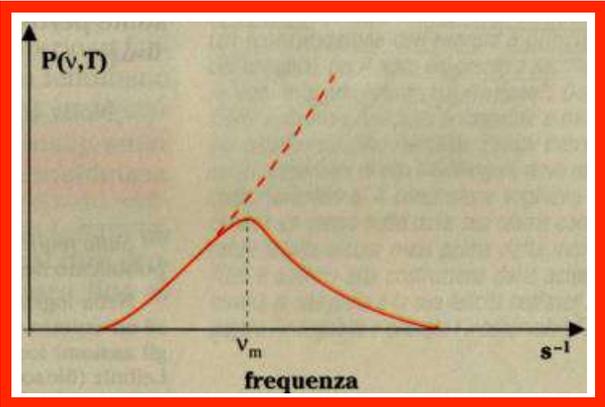


Created by team CC07571, ThinkQuest 2000



Planck 1900

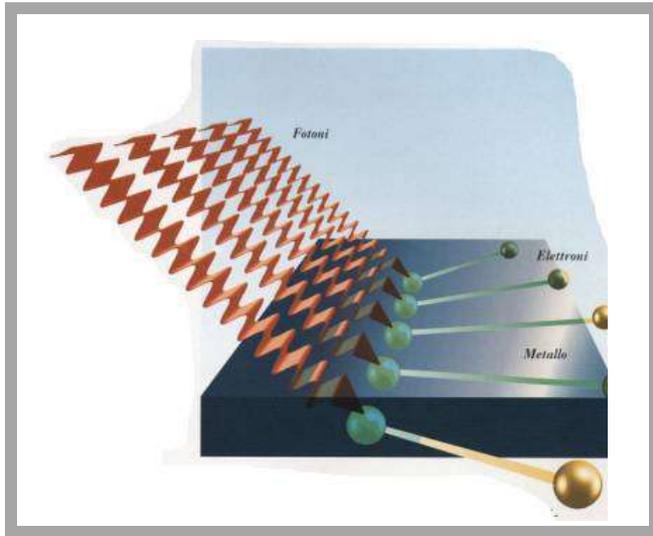
$$h = 6.6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$



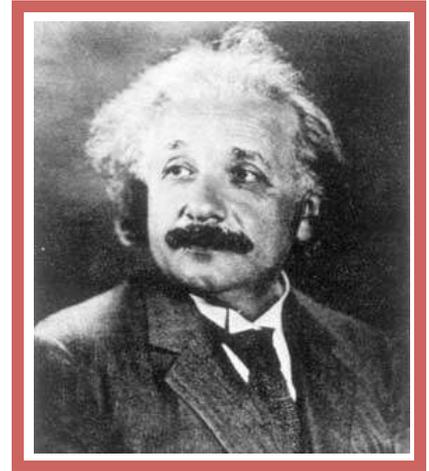
$$u_\nu(\Omega) = \frac{2h}{c^3} \frac{\nu^3}{e^{h\nu/(kT)} - 1}$$

$$\Delta E = h \cdot \nu$$

EFFETTO FOTOELETTRICO



Scoperta:
Hertz 1887



Teoria: Einstein 1905

Effetto a soglia: $\nu > \nu_s$

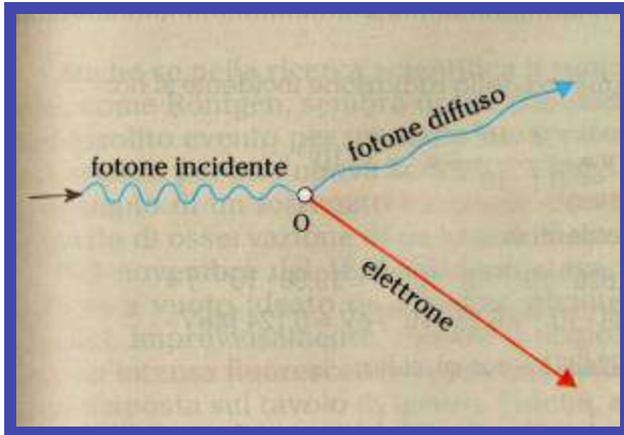
$E_{\text{elett.}} \sim$ frequenza ν dell'onda

$N_{\text{elett.}} \sim$ intensità dell'onda

FOTONI

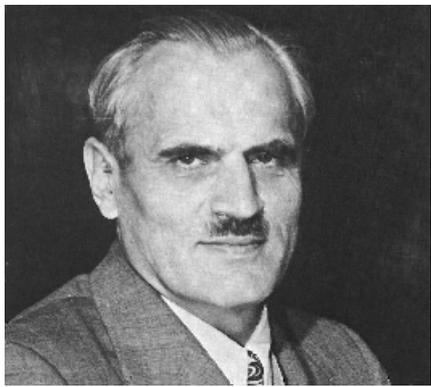
$$\frac{1}{2} m v^2 = h \nu - W$$

EFFETTO COMPTON



$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda \neq 0$$

Urto fotone-elettrone in cinematica relativistica:



Compton 1922

$$E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$$

$$p_\gamma = E_\gamma/c$$

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = (h/mc) (1 - \cos\theta)$$

Proprietà Ondulatorie delle Particelle

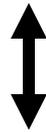
DIFFRAZIONE DI ELETTRONI

De Broglie 1923:

anche le "particelle"
sono "onde"

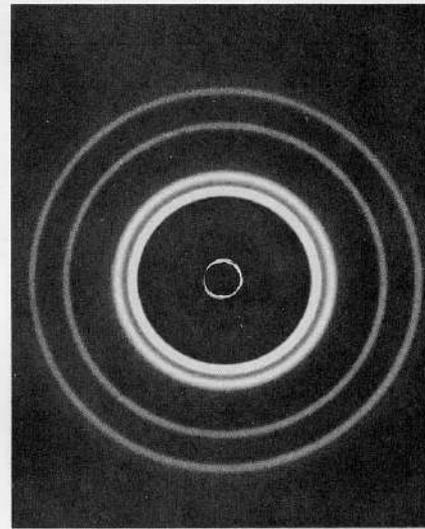


$$p = h/\lambda$$

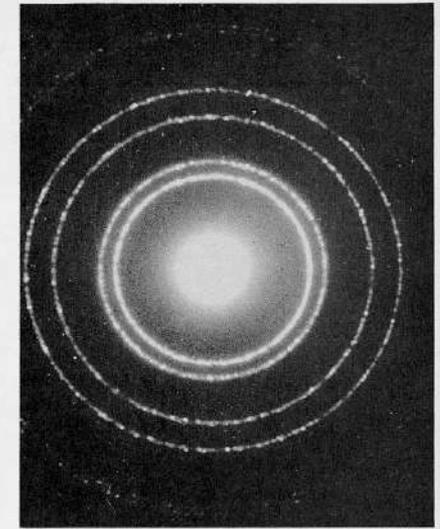


$$\lambda = h/p$$

Raggi X



Elettroni



Davisson e Germer 1927

1926-1927: Principi Fondamentali della Meccanica Quantistica

Su scala atomica:

• materia e radiazione \longleftrightarrow onde-particelle

• non è possibile definirne la traiettoria

[Heisenberg] relazione di indeterminazione

 $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$

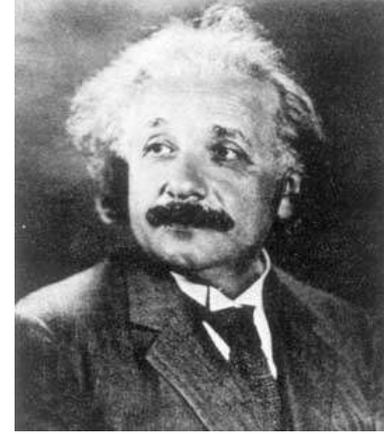
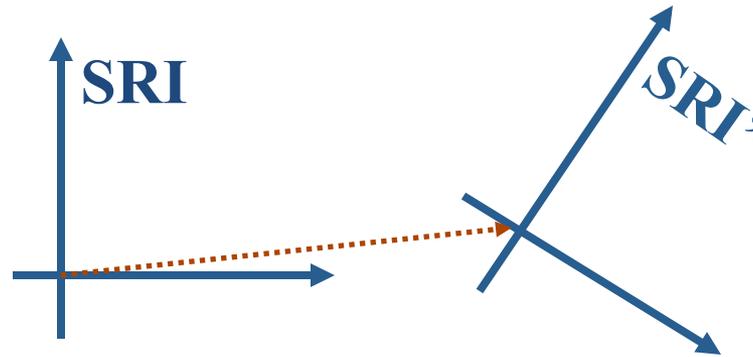
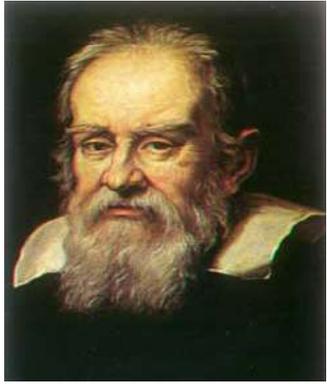


~~• determinismo~~



• probabilismo

RELATIVITA'



Galileo ('600):
Stesse leggi della MECCANICA
in ogni SRI

Einstein (1905):
Stesse leggi della FISICA
in ogni SRI

Trasformazioni di Galileo:

- Tempo assoluto
- Composizione lineare delle velocità

Trasformazioni di Lorentz:

- Tempo relativo
- c : velocità assoluta

PROBLEMI:

- Sperimentalmente " c " in ogni SRI (Michelson-Morley)
- Eq. di Maxwell non invarianti sotto trasformazioni di Galileo

CONSEGUENZE:

- Dilatazione dei tempi
- Non-conservazione della massa
- ...

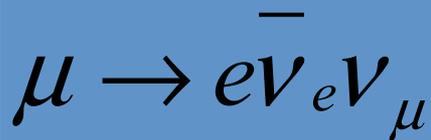
Dilatazione dei Tempi

Einstein:

il tempo dipende dal SRI in cui si osserva il fenomeno

Evidenza sperimentale:

i muoni prodotti nell'alta atmosfera arrivano sulla terra



$$N_\mu \xrightarrow{\tau} \frac{N_\mu}{2.718} \xrightarrow{\tau} \frac{N_\mu}{(2.718)^2} \xrightarrow{\tau} \dots$$

$$\tau = 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$$

Tempo proprio
(nel SR dei muoni)

Nel SR "terra" in cui i muoni sono in moto

$$t = \gamma\tau = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \tau \cong 20\tau$$

Arrivano sulla terra!

Conversione tra “massa” e “energia”

energia a riposo

energia cinetica

$$E = E_0 + E_k$$

$$E_0 = mc^2$$

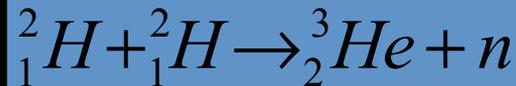
$$E_k = (\gamma - 1)mc^2$$

L'energia totale si conserva



La massa non si conserva

**Evidenza sperimentale:
reazioni nucleari**



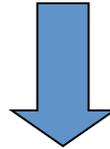
$$M_f < M_i$$

'900:

Limiti della Fisica Classica → Nascita della Fisica Moderna

Su scala macroscopica:

- velocità $\ll c$
- azione $\gg h$



La fisica classica continua a descrivere bene la realtà di tutti i giorni (che conosciamo e capiamo)

Niels Bohr, 1927:

“Chi non resta sbalordito dalla meccanica quantistica evidentemente non la capisce”

Richard Feynman, 1967:

“Nessuno capisce la meccanica quantistica”

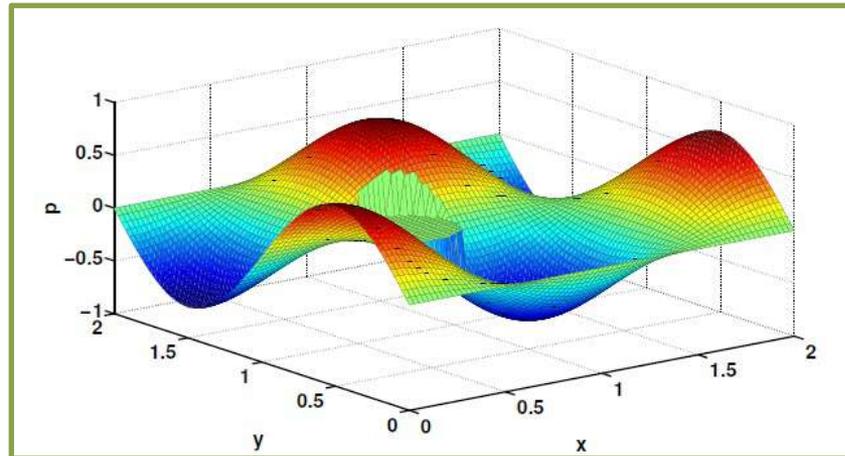
**Le particelle elementari sono
quantistiche (*piccole*) e relativistiche (*veloci*).**

**E' allora necessaria una teoria che metta
insieme Meccanica Quantistica e Relativita':**

La teoria dei campi

Teorie di campo

- Le teorie di campo si occupano di sistemi fisici descritti assegnando il valore di una o più quantità (campi) in ogni punto dello spazio
- Nella Fisica classica (non-quantistica) ci sono varie teorie di campo: in Acustica, Elasticità, Idrodinamica, Meteorologia, compaiono campi di pressione, densità, velocità, deformazione elastica, ... Questi campi corrispondono ad un'idealizzazione del sistema reale, non rappresentano proprietà fisiche dei punti dello spazio ma proprietà medie di atomi e molecole



•Nell'ambito della **Fisica classica**, campi che corrispondono a proprietà fisiche dello spazio sono i **campi elettromagnetico e gravitazionale**

•Il **ruolo dei campi** e' diventato **cruciale** per interpretare fenomeni fondamentali, nell'ambito della **Fisica quantistica relativistica** (con "c" velocità limite, l'interazione non può essere descritta come istantanea e una formulazione senza campi avrebbe la complicazione di dover introdurre il tempo di interazione)

•Il concetto di particella risulta riassorbito nel **concetto di campo** (**le particelle elementari sono** eccitazioni del campo, un po' come le onde sono eccitazioni della superficie del mare)

Teoria dei campi quantistici

- I **fondamenti della Teoria dei campi quantistici** furono formulati negli **anni '30** principalmente da **Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman e Freeman Dyson**
- Fu inizialmente **elaborata nell'ambito della Fisica delle Particelle** per risolvere i problemi che emergevano quando si tentava di **estendere la Meccanica Quantistica a sistemi relativistici**
- L'**equazione di Schrödinger della Meccanica Quantistica (non-relativistica)**

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi + V\Psi$$

energia cinetica non relativistica

e' scritta **in termini della funzione d'onda**, che descrive stati di singola particella ($|\Psi(\mathbf{x})|^2$ rappresenta la probabilita' di trovare la particella nella posizione \mathbf{x})

- Si provo' (Klein-Gordon, Dirac) ad estenderla a **sistemi relativistici**, incontrando il **problema delle soluzioni con energia negativa** (fino a $-\infty$, cioe' l'assenza di uno stato fondamentale)
- Il cuore del problema e' che **un'equazione in termini della funzione d'onda non puo' descrivere processi** (permessi dalla Relativita') di **annichilazione particella-antiparticella e piu' in generale di creazione ed annichilazione di particelle**
- Questo problema viene risolto nell'ambito della Teoria dei campi quantistici, descritta in termini di **campi** (quantita' esistenti in ogni punto dello spazio e che **definiscono la probabilita' di creazione ed annichilazione delle particelle**)

La teoria dei campi fornisce il formalismo che permette di conciliare Meccanica quantistica e Relativita'.

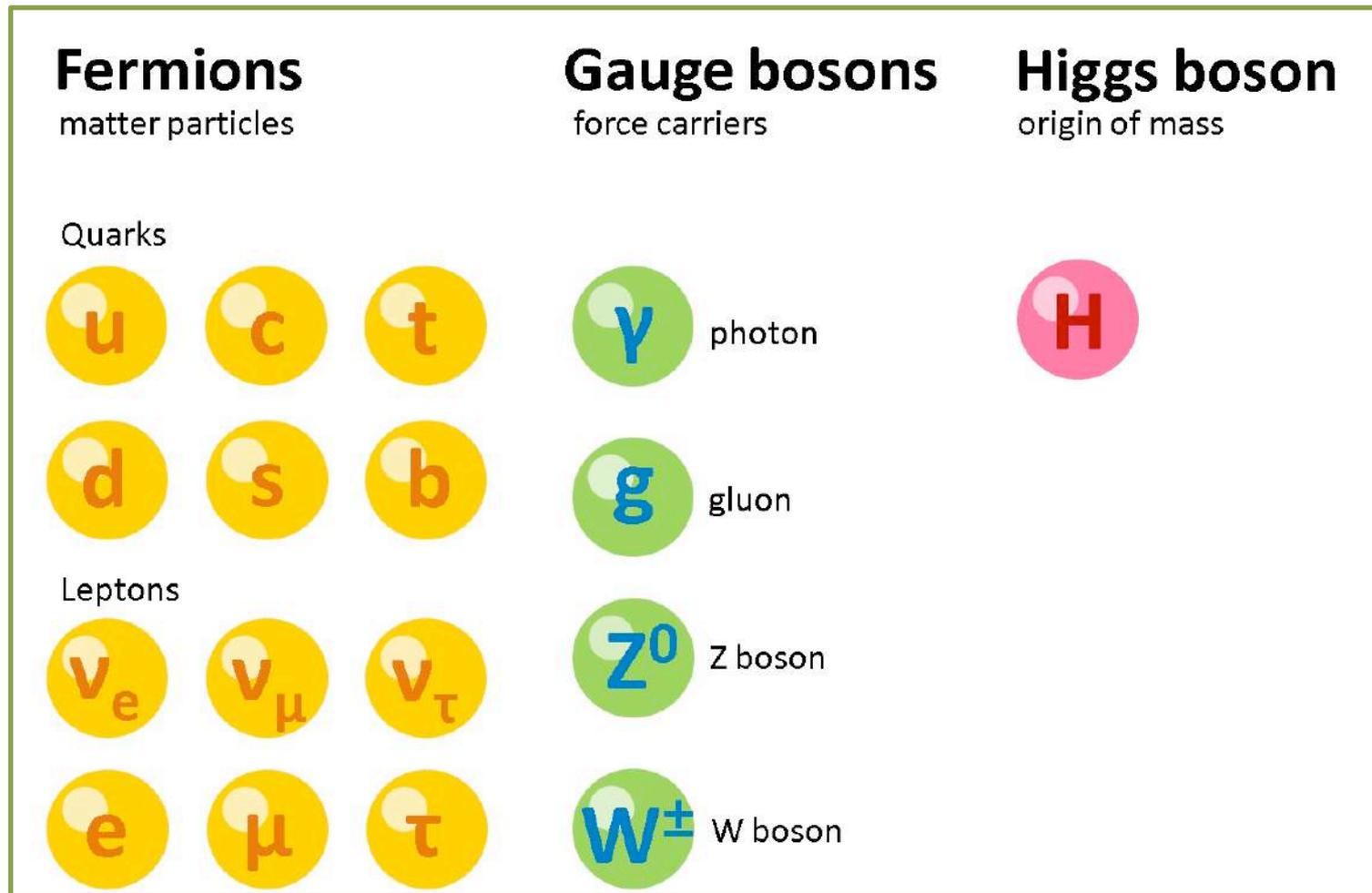
E permette di scrivere una teoria (Modello Standard) ben verificata sperimentalmente

Stretta interazione tra Teoria ed Esperimento
Osservazioni sperimentali portano a nuove idee,
confermate da nuovi esperimenti

- Per osservare **strutture sempre piu' piccole**, sono necessari **microscopi sempre piu' potenti**
- I **microscopi per la Fisica delle Particelle sono degli (enormi) acceleratori**
- Per la loro natura quantistica, le particelle si comportano come onde con lunghezza d'onda di De Broglie $\lambda = h/p$
(per osservare strutture piccole sono necessarie energie elevate, che si ottengono accelerando fasci di particelle in acceleratori grandi)
- Negli acceleratori si osservano le particelle facendole interagire (distruggendole)
(con l'aiuto della teoria le particelle iniziali possono essere **ricostruite**)



Il Modello Standard e' la teoria che descrive le interazioni fondamentali tra particelle elementari



Numeri Quantici

Cosa distingue le particelle elementari?

Distinguiamo le particelle elementari per le loro caratteristiche speciali, tipicamente espresse come numeri (*numeri quantici*)

A parte la massa, sono tipicamente numeri discreti (spesso interi ma non sempre). Spin, carica elettrica,...sono alcuni di questi

Se non specificato, si intende che il numero quantico e' conservato, cioe' la somma dei valori per un numero quantico in un sistema isolato rimane la stessa a tutti i tempi.

Se cambiasse non sarebbe una caratteristica permanente della particella e non sarebbe utile per caratterizzarla

Fermions	Name	Symbol	Spin	EM charge	Weak charge*		Mass (MeV/c ²)
Lepton	Electron	e^-	+1/2	-1	-1/2	0	0,51
	Muon	μ^-	+1/2	-1	-1/2	0	105,00
	Tau	τ^-	+1/2	-1	-1/2	0	1.777,00
	Electron Neutrino	ν_e	+1/2	0	+1/2	0	< 3 E-6
	Muon Neutrino	ν_μ	+1/2	0	+1/2	0	< 0,18
	Tau Neutrino	ν_τ	+1/2	0	+1/2	0	< 18,00
Quark !!	Color charge						
	up	u	+1/2	+2/3	+1/2	RGB	~2
	charm	c	+1/2	+2/3	+1/2	RGB	~1.200
	top	t	+1/2	+2/3	+1/2	RGB	>170.000
	down	d	+1/2	-1/3	-1/2	RGB	~5
	strange	s	+1/2	-1/3	-1/2	RGB	~92
	bottom	b	+1/2	-1/3	-1/2	RGB	~4.200

Spin (una caratteristica importante della particella)



- Lo **spin** e' un **momento angolare quantistico**, che non ha analogo classico. Coincide con il **momento angolare della particella a riposo**. E' una **caratteristica intrinseca ed imm modificabile** della particella
- Il momento angolare classicamente e' descritto da un vettore, cioe' da tre componenti.
Quantisticamente, per il principio di indeterminazione, le tre componenti non possono essere misurate simultaneamente. **Si puo' conoscere il modulo ed una delle tre componenti** (convenzionalmente la componente z)
- Il modulo del vettore di spin vale $\hbar\sqrt{s(s+1)}$ e la z-componente $m_s\hbar$, con s un numero non negativo **intero** ($s=1,2,..$) o **semi-intero** ($s=1/2, 3/2, ...$).
Per un dato s, m_s puo' assumere $2s+1$ valori discreti, da $-s, -s+1, ..., s-1, s$
- **Quark, elettroni, neutrini, nucleoni** sono particelle di spin $s=1/2$.
Fotoni, gluoni, W^\pm e Z^0 sono particelle di spin $s=1$, il **gravitone** e' una particella di spin $s=2$. Il **bosone di Higgs H^0** ha $s=0$

I costituenti elementari della materia come li conosciamo oggi

- **Quark** (formano i nucleoni ed altri adroni)
- **Leptoni** (non soggetti all'interazione nucleare, come gli elettroni)

- **Quark e leptoni** compaiono in **tre generazioni** (o *famiglie*)
- **Particelle in generazioni diverse** sono quasi cloni le une delle altre (ad eccezione della **massa che aumenta con la generazione**)
- **Particelle della 2° e 3° generazione** sono **instabili** (non si trovano nella materia ma possono essere prodotte in collisioni di alta energia)

Non sappiamo perché le generazioni siano 3!

Quando nel 1936 il muone (μ , leptone carico della 2° generazione) fu scoperto, Isidor Isaac Rabi espresse il suo stupore (“Chi l’ha ordinato?”)
80 anni dopo ancora non lo sappiamo!



Ci sono 2 quark e 2 leptoni in ognuna delle 3 generazioni

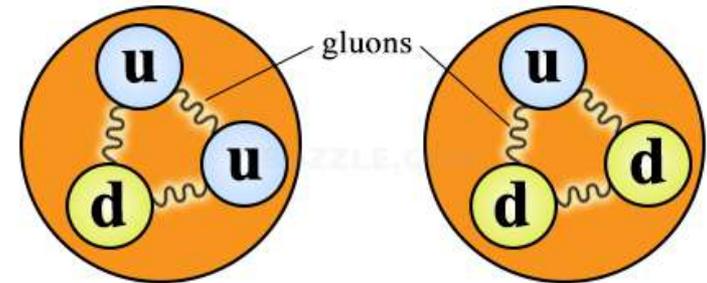
Leptons <i>spin = 1/2</i>			Quarks <i>spin = 1/2</i>		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.006	-1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	C charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	S strange	0.1	-1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	-1	b bottom	4.3	-1/3

I costituenti della materia sono fermioni. Obbediscono alla statistica di Fermi-Dirac ed al principio di esclusione di Pauli

- **Neutrino** (postulato da Wolfgang Pauli nel 1930) = *piccolo neutro* in Italiano

- I **leptoni** hanno **unita' intere di carica elettrica**, mentre i **quark** hanno **multipli di 1/3** (i quark esistono di 3 *colori*)

- Gli **adroni** composti di **3 quark** si chiamano **barioni**, quelli composti di **un quark ed un antiquark** si chiamano **mesoni**



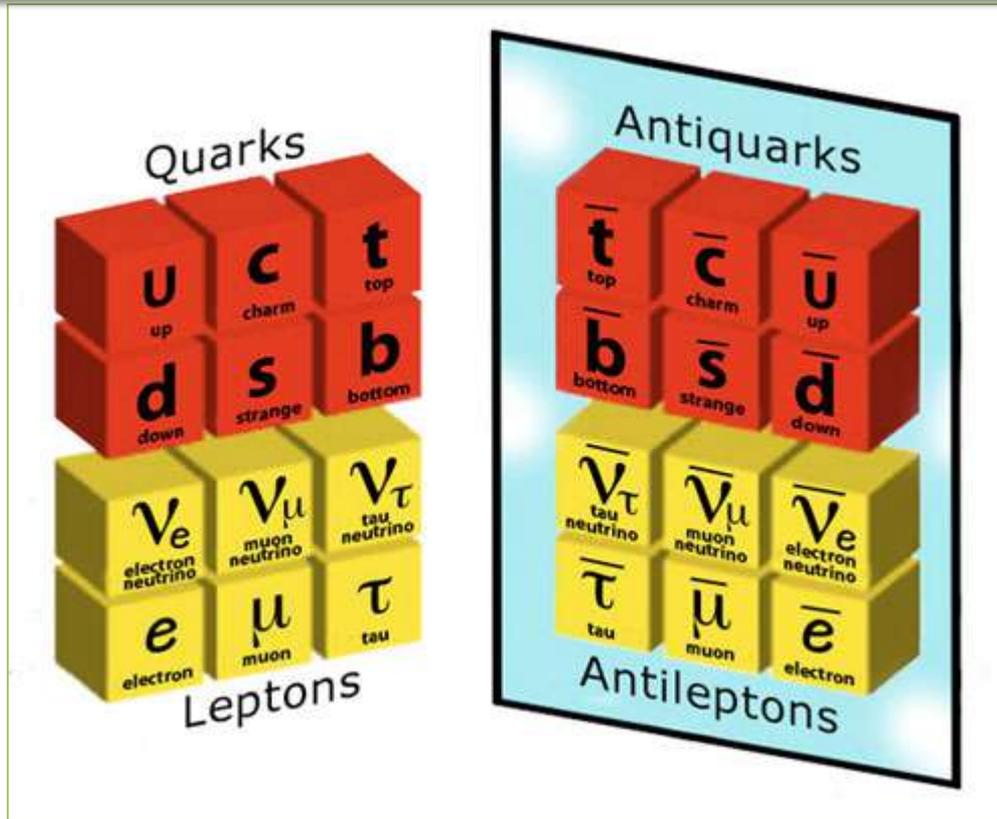
Proton

$$\begin{aligned} \text{Charge on the proton} &= 2(2/3) + (-1/3) \\ &= 1 \end{aligned}$$

Neutron

$$\begin{aligned} \text{Charge on a neutron} &= 2/3 + (-1/3 - 1/3) \\ &= 0 \end{aligned}$$

Per ogni particella di materia esiste un'antiparticella



•Le **antiparticelle** hanno la **stessa massa** ma **carica elettrica** opposta rispetto alle particelle (e tutti i numeri quantici *additivi* opposti)

•Quando incontrano le **particelle** del loro stesso tipo, **si annichilano** tra loro (poiche' la materia e' composta di particelle, le antiparticelle non possono vivere a lungo *accanto a noi*)

•L'esistenza delle antiparticelle fu **predetta teoricamente** nel 1929 da **Paul Dirac** (per spiegare le soluzioni di energia negativa della sua equazione quantistica-relativistica)

Il Modello Standard (SM, cioè la teoria attuale) richiede anche dei bosoni (caratterizzati da spin intero e che obbediscono alla statistica di Bose-Einstein):

- **Particelle di Gauge** ($s=1$) per trasmettere le forze
- **Bosone di Higgs** ($s=0$) per generare le masse



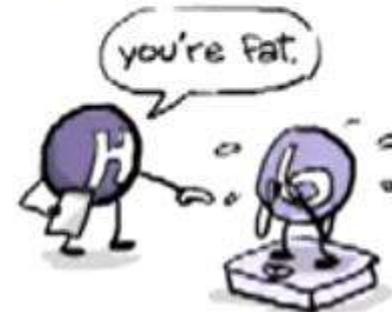
	Gravity	Weak (Electroweak)	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and $W^+ W^-$	Quarks and Gluons

~~ONE OF THE THINGS PEOPLE PREDICT WILL COME OUT IS~~

Discovered at the LHC (summer 2012)!

THE HIGGS IS THE PARTICLE RESPONSIBLE FOR GIVING MASS TO OTHER PARTICLES.

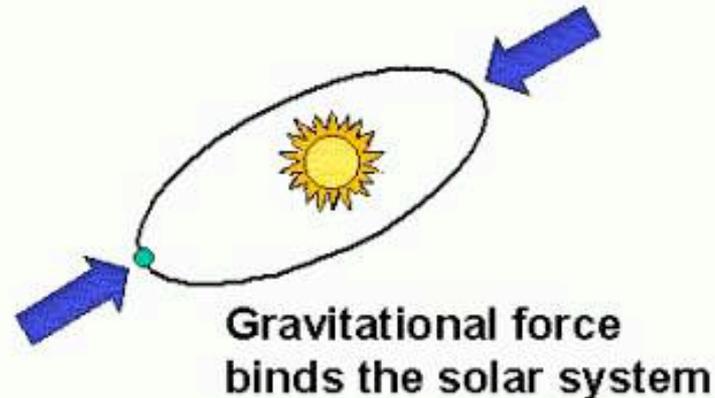
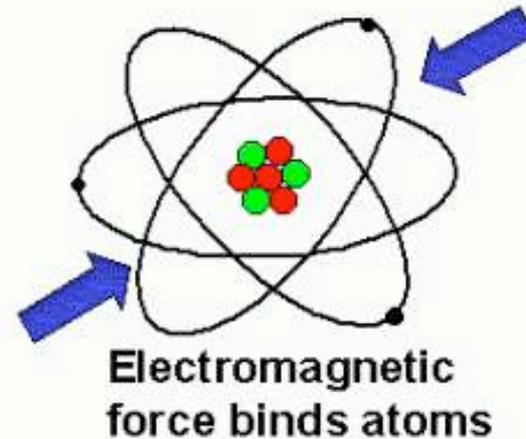
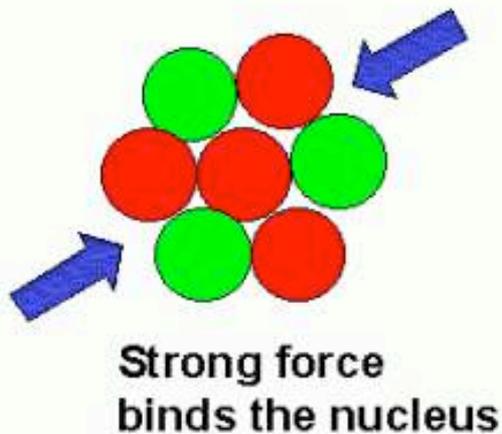
THE HIGGS BOSON



Lista completa delle particelle elementari del **Modello Standard (SM)**

	<p>Quarks</p>
	<p>Leptons</p>
	<p>Anti-Quarks</p>
	<p>Anti-Leptons</p>
	<p>Bosons</p>

Il Modello Standard e' la teoria che descrive le interazioni fondamentali tra particelle elementari



Forze fondamentali

Ambizione dell'umanità':

Stabilire ordine e regolarità nella complessità di ciò che ci circonda

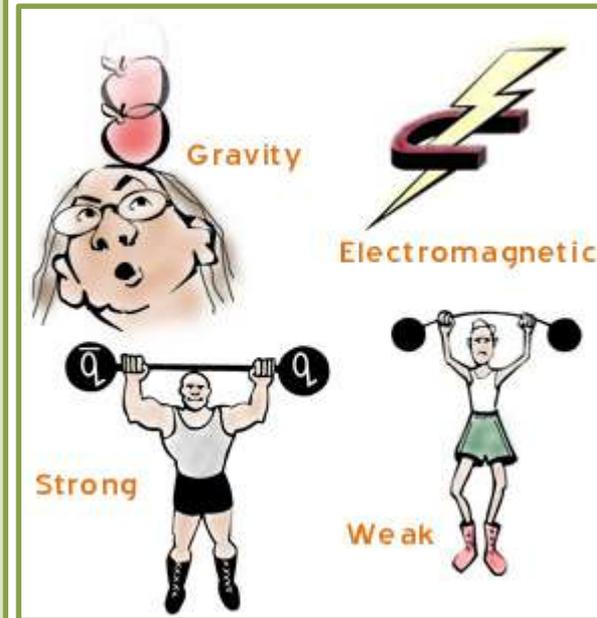
- Cosa tiene insieme protoni e neutroni nel nucleo?
- Ed elettroni e nucleo nell'atomo?
- E gli atomi nella molecola?
- E le molecole nella materia?
- E noi sulla superficie della terra?
- ...

Possiamo studiare le forze della natura e classificarle sistematicamente?

A prima vista sembra impossibile ma, come per le particelle, **NON LO E'!**

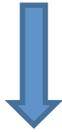
Si trova che tutte le forze che sperimentiamo sono la manifestazione complessa di **4 forze fondamentali** (in ordine di intensità decrescente):

- Forte
- Elettromagnetica
- Debole
- Gravitazionale



Un mondo diverso con forze diverse

Se la forza elettromagnetica avesse
corto raggio d'azione e fosse molto debole



- Gli elettroni non sarebbero legati ai nuclei
- Ci sarebbe un *plasma*
(zuppa di elettroni e nuclei liberi)

Se la forza elettromagnetica fosse
molto piu' intensa della forza nucleare



- La repulsione elettrostatica tra protoni
supererebbe la forza nucleare attrattiva
- Ci sarebbero solo atomi di idrogeno (1 protone)

In entrambi gli scenari sarebbe quasi impossibile vedere qualcosa

Con il plasma:

la luce non potrebbe viaggiare essendo continuamente
emessa e riassorbita dagli elettroni

Con una forza elettromagnetica molto intensa:
ci sarebbe un plasma virtuale dovuto alle coppie elettrone-
positrone prodotte dal vuoto
(in accordo con il principio di indeterminazione)



Se la forza nucleare fosse *troppo* debole
non avremmo nuclei pesanti

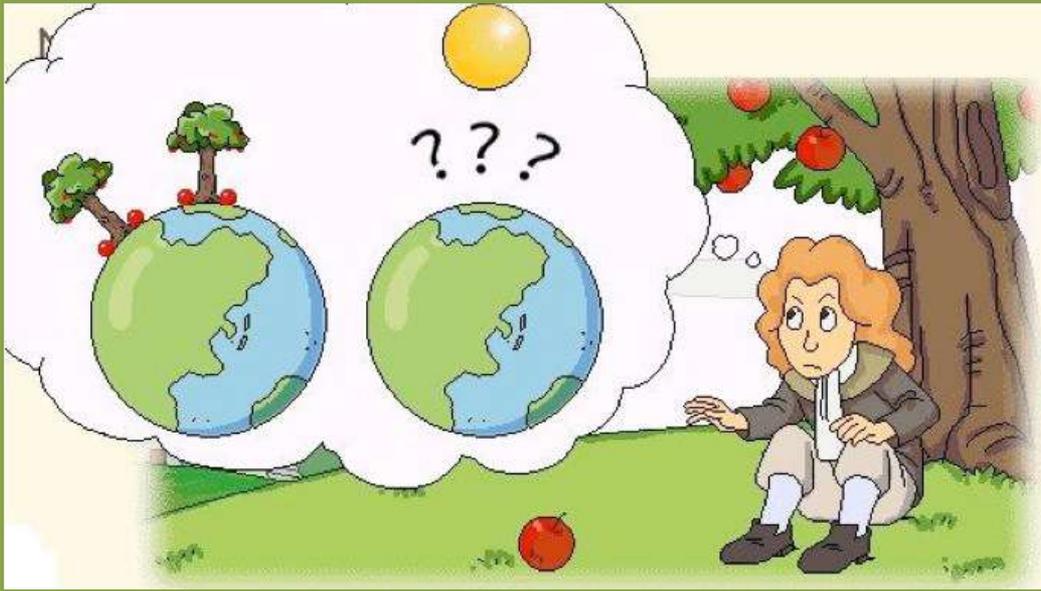
Se la forza nucleare fosse molto più intensa
si potrebbero formare elementi chimici
molto più pesanti

Se la gravità fosse *troppo* debole
galleggeremmo come un astronauta in orbita



Il mondo che ci circonda
dipende sensibilmente dal tipo di forze
che agiscono e da quanto sono intense!

Forza gravitazionale



$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

F = force of gravity
G = gravitational constant
(6.67×10^{-11}) N•m²/kg²
M = mass of one object
m = mass of other object
r = distance between the two objects

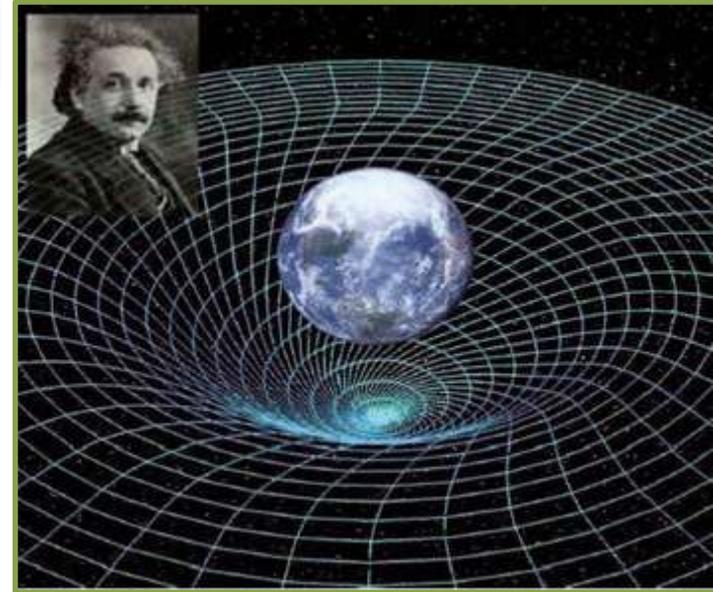
- La forza fondamentale piu' debole e la 1° ad essere scoperta
- Scoperta da Newton nel 17° secolo mentre cercava di spiegare le leggi di Keplero
- Universale, che pervade tutto e regolata da una legge dell'inverso del quadrato
- Fa girare i pianeti intorno al sole ed i satelliti intorno alla terra
- Ci tiene sulla superficie della terra essendo M_{terra} grande
- Tra due persone e' troppo debole per essere avvertita
- Tra particelle e' trascurabile rispetto alle altre forze fondamentali

Relativita' Generale

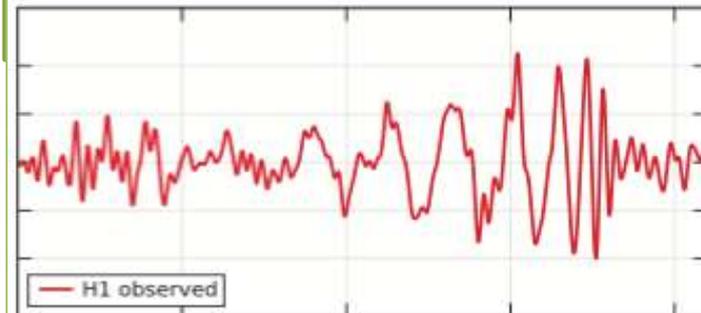
- 1915: Albert Einstein formulo' la Teoria della Relativita' Generale (probabilmente la teoria piu' profonda del 20° secolo)
- La Gravita' e' interpretata come una manifestazione della curvatura dello spazio-tempo
- La luce deve risentire della gravita' proprio come la materia (ci sono evidenze sperimentali che la luce curva passando vicino ad un corpo massivo)
- Nell'esperienza di tutti i giorni e per il moto dei pianeti gli effetti della Relativita' Generale non vengono distinti da quelli della legge di Newton
- La Relativita' Generale predice le onde gravitazionali emesse da masse accelerate cosi' come cariche accelerate emettono onde elettromagnetiche (osservate recentemente da LIGO, Febbraio 2016)

Gli effetti quantistici della gravita' non sono ancora compresi!

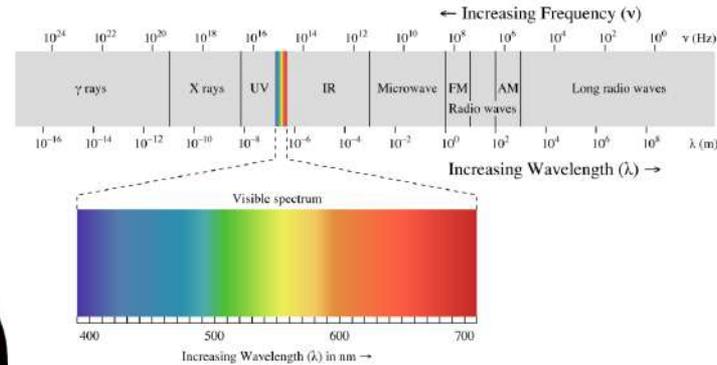
Diventano rilevanti a distanze molto piccole (energie molto elevate $\sim M_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$)



Hanford, Washington (H1)



Forza elettromagnetica



- **E'**, oltre alla forza gravitazionale, l'unica forza che sperimentiamo **nella vita di tutti i giorni**
- **E'** responsabile di: **onde elettromagnetiche** (luce visibile, radio, televisione,...), **elettronica**, legame degli **elettroni negli atomi**, legame degli **atomi nelle molecole**, legame delle **molecole nei liquidi e nei solidi**,...

• Inizialmente si pensava che elettricità e magnetismo fossero fenomeni indipendenti, prima della formulazione delle **equazioni di Maxwell** (Clerk Maxwell, 1873)

• La forza elettrica, come la gravità, segue una **legge del quadrato della distanza (legge di Coulomb)**. **E'** proporzionale al prodotto delle cariche elettriche (attrattiva tra cariche opposte, repulsiva tra cariche dello stesso segno)

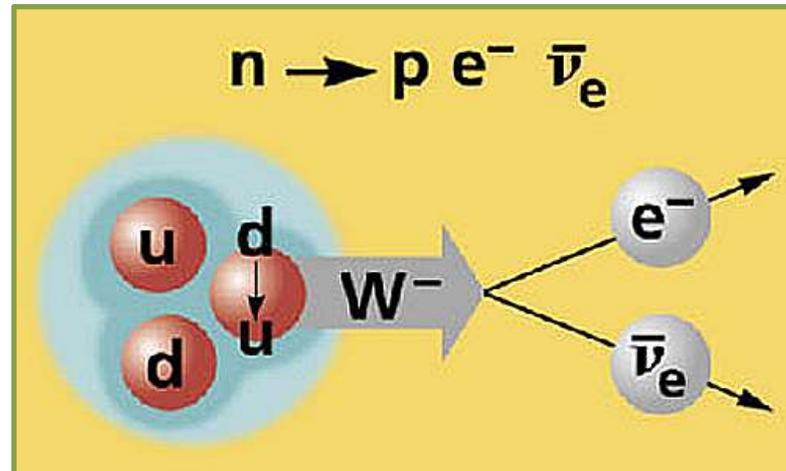
$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t} &= 0 \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= 4\pi\rho \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t} &= \frac{4\pi}{c} \vec{J}\end{aligned}$$

Forza debole e Forza forte (o nucleare)

- Scoperte nel 20° secolo
- Non sperimentate nella vita di tutti i giorni a causa del raggio di azione molto corto ($10^{-17} \div 10^{-18}$ m per la forza debole, 10^{-15} m per la forza nucleare tra nuclei)
- A distanze più piccole del raggio di azione, obbediscono alla legge dell'inverso del quadrato. Per distanze più grandi risultano molto poco intense

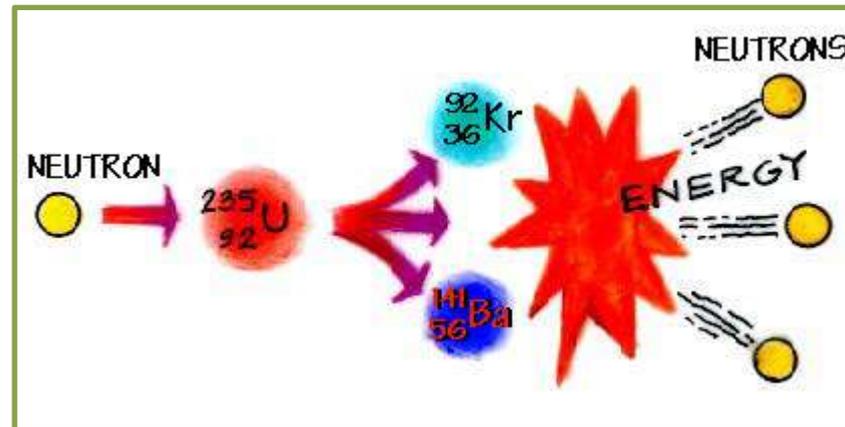
Forza debole

- La forza debole e' responsabile dell'instabilita' del neutrone, che decade- β in un tempo lungo (forza debole) di ~ 15 minuti
- I neutroni nei nuclei sono stabili, essendo protetti dalle interazioni nucleari ed elettromagnetiche, se non sono *troppi*
- Con tanti neutroni, non tutti risultano protetti ed un neutrone decade in un protone, se l'energia ($m_n - m_p - m_e \approx 0.8$ MeV) vince sulla repulsione elettrostatica aggiuntiva nel nucleo, in presenza di un protone in piu'



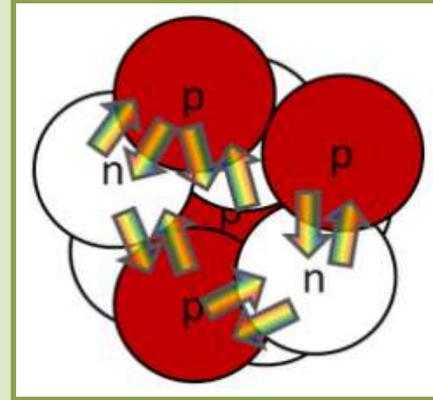
Forza forte

- L'interazione forte e' la piu' intensa delle quattro forze (nel suo raggio d'azione)
- Si puo' ricavare una quantita' enorme di energia da una piccola quantita' di materiale fissile, usato in una centrale nucleare o in una bomba atomica



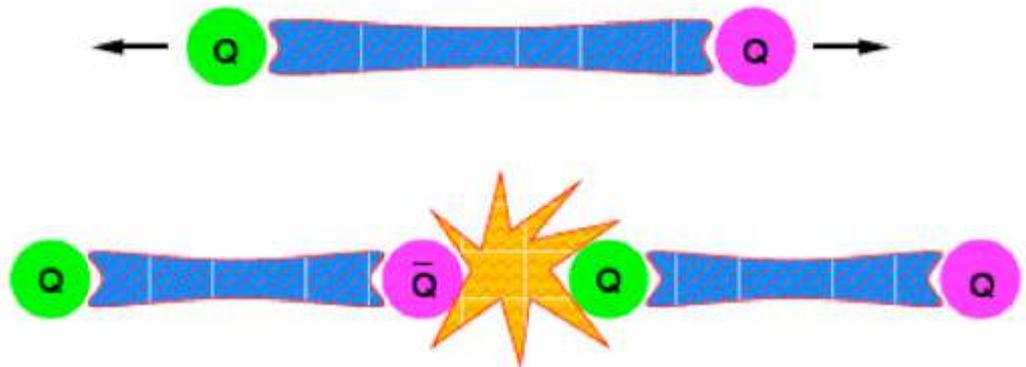
Forza forte

•Tra due adroni segue la legge dell'inverso del quadrato, con un raggio di azione di 10^{-15} m

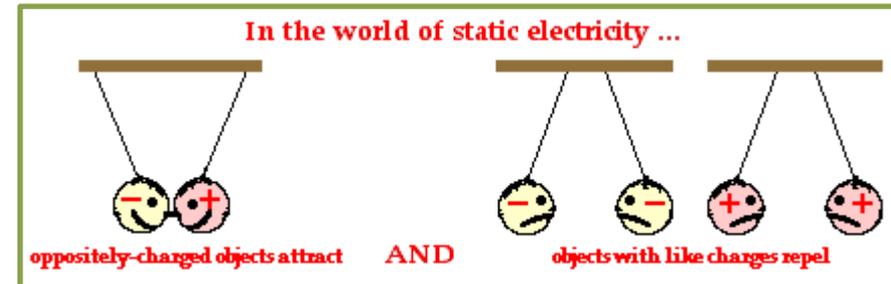
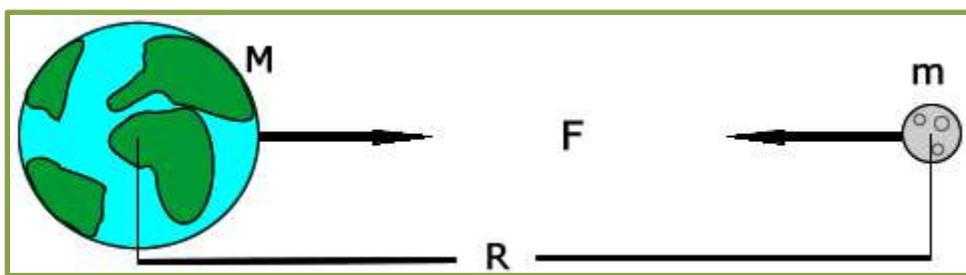


•Tra due quark appare molto peculiare

•Indipendentemente da quanto sono distanti i due quark, c'è sempre una forza costante che li riavvicina. L'energia necessaria per allontanare due quark è proporzionale alla loro distanza. È necessaria un'energia infinita per separarli ed isolarli. È più conveniente produrre coppie quark-antiquark che isolare i quark (**CONFINAMENTO**)



- Le forze elettromagnetica e gravitazionale hanno lungo raggio d'azione ed obbediscono alla legge dell'inverso del quadrato
- Le forze debole e forte hanno corto raggio d'azione
- Da cosa deriva questa differenza?
- Perche' alcune forze sono attrattive (ad esempio la gravita', tra masse dello stesso segno) ed altre repulsive (ad esempio la forze elettrica tra cariche dello stesso segno)?



•Non e' possibile rispondere a queste domande in Fisica Classica, ne' con la Meccanica Quantistica non-relativistica

•La risposta diventa possibile quando Meccanica Quantistica e Relativita' sono integrate, nella Teoria dei Campi Quantistici

Teoria delle forze

La Relativita' Speciale comporta che:

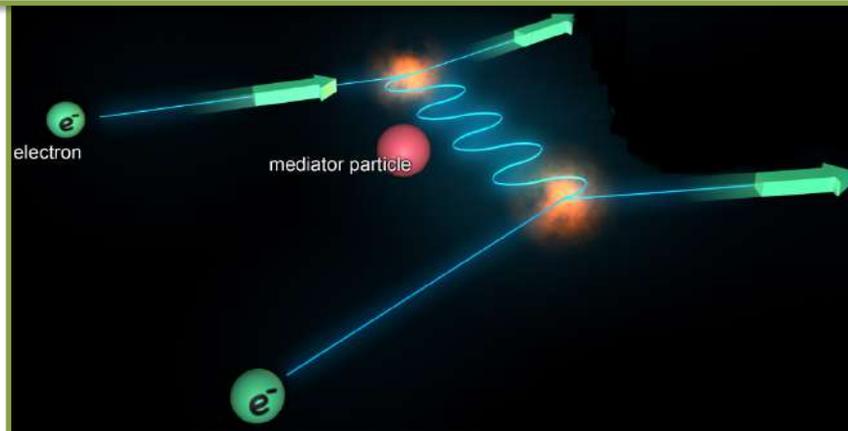
- l'energia totale $E = \sqrt{(m^2 \cdot c^4 + c^2 \cdot p^2)}$ e' conservata mentre la massa non lo e'
- Una particella di massa m ha energia a riposo $E = m \cdot c^2$
- Se e' disponibile questa quantita' di energia, una particella di quella massa puo' essere creata (fintanto che non sono violate leggi di conservazione)

La relazione di indeterminazione della Meccanica Quantistica comporta che:
l'energia di un sistema chiuso puo' fluttuare di $\Delta E \sim \hbar / \Delta t$ in un intervallo di tempo Δt , con $\hbar = 6.6 \times 10^{-25} \text{ GeV} \cdot \text{s}$ ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$)

- Quindi, per brevi intervalli di tempo, e' disponibile energia sufficiente a creare particelle
- Tali particelle vivono solo per un tempo piccolo $\Delta t \sim \hbar/mc^2$
- Sono note come **particelle virtuali** (o particelle mediatrici o di scambio)

E' cosi' che si trasmettono le forze nella
Teoria dei Campi Quantistici

Una particella virtuale creata da una
particella A in un punto ed annichilita da
una particella B in un altro punto trasmette
la forza tra A e B



Come puo' lo scambio di una particella virtuale produrre una forza attrattiva?

Lo scambio di una particella virtuale da A a B
intuitivamente sembra allontanare A da B,
con A che rincula e B che assorbe la particella virtuale
(ed il suo impulso)

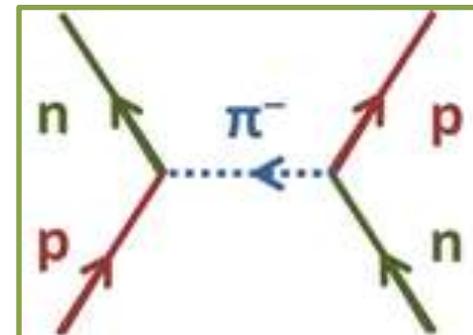


Questo argomento vale in Fisica Classica e fallisce in Meccanica Quantistica.
Con A e B a distanza fissata, l'impulso della particella scambiata e' completamente
indeterminato per il principio di indeterminazione. $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
Potrebbe avere segno opposto rispetto al valore in Fisica Classica.
spiegando cosi' la forza attrattiva invece di repulsiva.

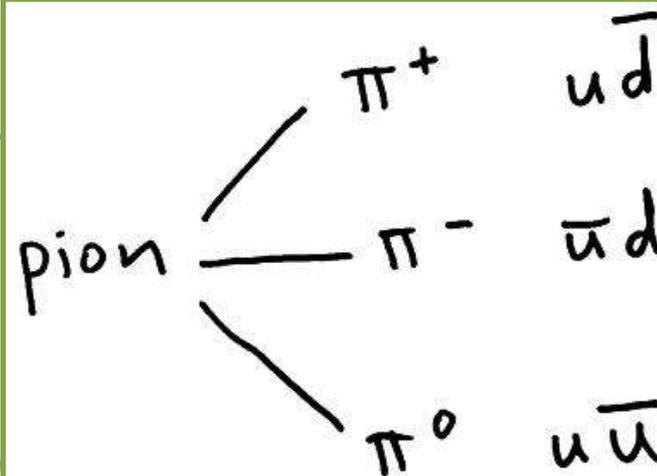
Raggio d'azione della forza e massa della particella mediatrice

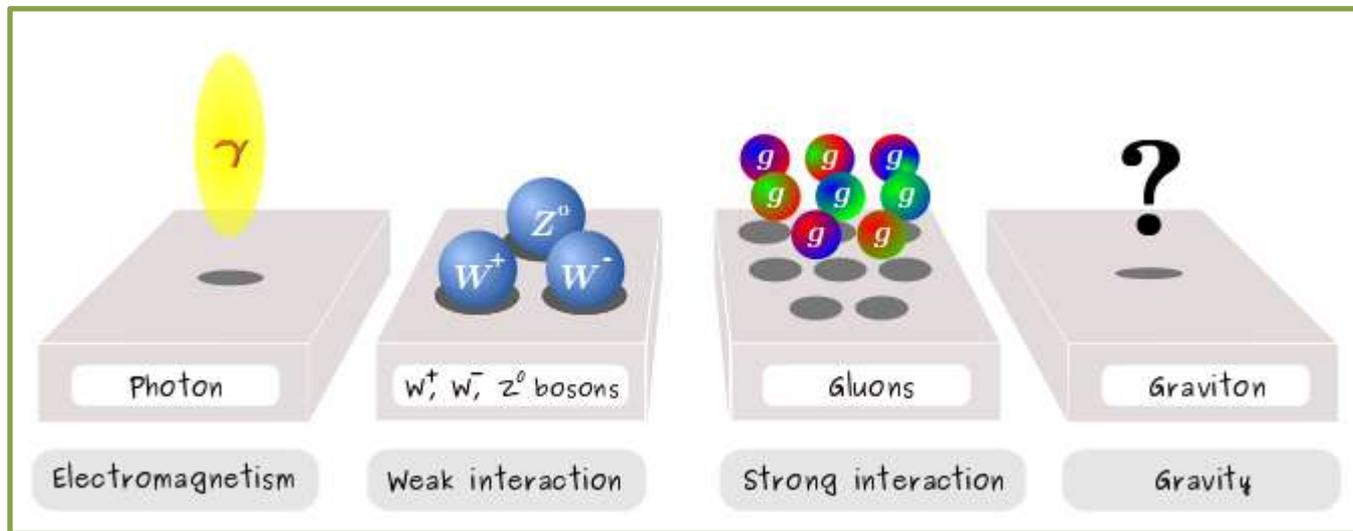
- Il raggio d'azione della forza dipende dalla massa della particella mediatrice
- Anche nel caso in cui si muova alla velocità della luce, la particella virtuale può viaggiare solo per una distanza $\Delta x \sim c \cdot \Delta t \sim \hbar/mc$ prima di essere riassorbita
- Quindi, il raggio d'azione della forza è di ordine $\hbar c/mc^2$

- Questo argomento, formulato da Hideki Yukawa nel 1935 lo portò a predire l'esistenza di una nuova particella, il pione (π)
- A quei tempi era noto il raggio d'azione della forza nucleare, circa $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- L'energia a riposo della particella virtuale associata è allora circa $\hbar c/1 \text{ fm} = 0.197 \text{ GeV}$



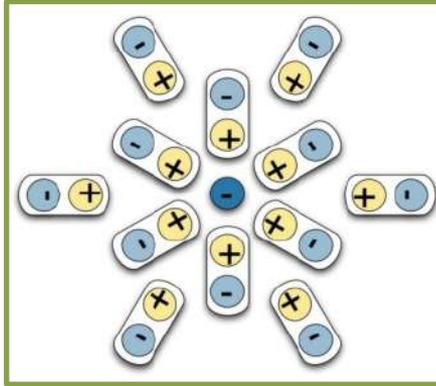
- Dopo la scoperta del pione ($m_\pi \approx 0.14 \text{ GeV}$) Yukawa vinse il premio Nobel
- Sappiamo che il pione non è una particella elementare, ma questo non influisce sulla sua proprietà di trasmettere la forza nucleare





- La particella virtuale che trasmette la forza elettromagnetica e' il fotone (γ), quella che trasmette la forza gravitazionale e' il gravitone (G). Hanno entrambi massa nulla cosi' che il raggio d'azione di queste forze e' infinito
- La forza debole e' trasmessa dai bosoni W^\pm e Z^0 (interazione carica e neutra). Le masse di questi bosoni sono $M_W=80 \text{ GeV}/c^2$, $M_Z=91 \text{ GeV}/c^2$. Quindi, il raggio d'azione della forza debole e' $2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$
- L'interazione forte tra quark e' trasmessa dai gluoni (di massa nulla). I gluoni sono confinati all'interno degli adroni e non possono propagarsi. L'argomento di Yukawa quindi non vale per i gluoni.

Nube virtuale



- Se non ci sono particelle intorno, la particella virtuale è riassorbita nello stesso punto in cui è stata emessa. Ne segue che ogni particella è circondata da una nube di Yukawa di particelle virtuali, di dimensione $\hbar c/mc^2$
- La densità della nube dipende da quanto spesso è creata una particella virtuale e cioè dall'intensità dell'interazione
- Per l'interazione nucleare la nube è densa e di dimensione 1 fm
- Per le altre interazioni la nube è rarefatta e la dimensione effettiva della particella non risulta molto aumentata per effetto della nube

Il Modello Standard e' la teoria che descrive le interazioni fondamentali tra particelle elementari

Requisito cruciale della Teoria e' che rispetti le leggi di conservazione/simmetrie osservate

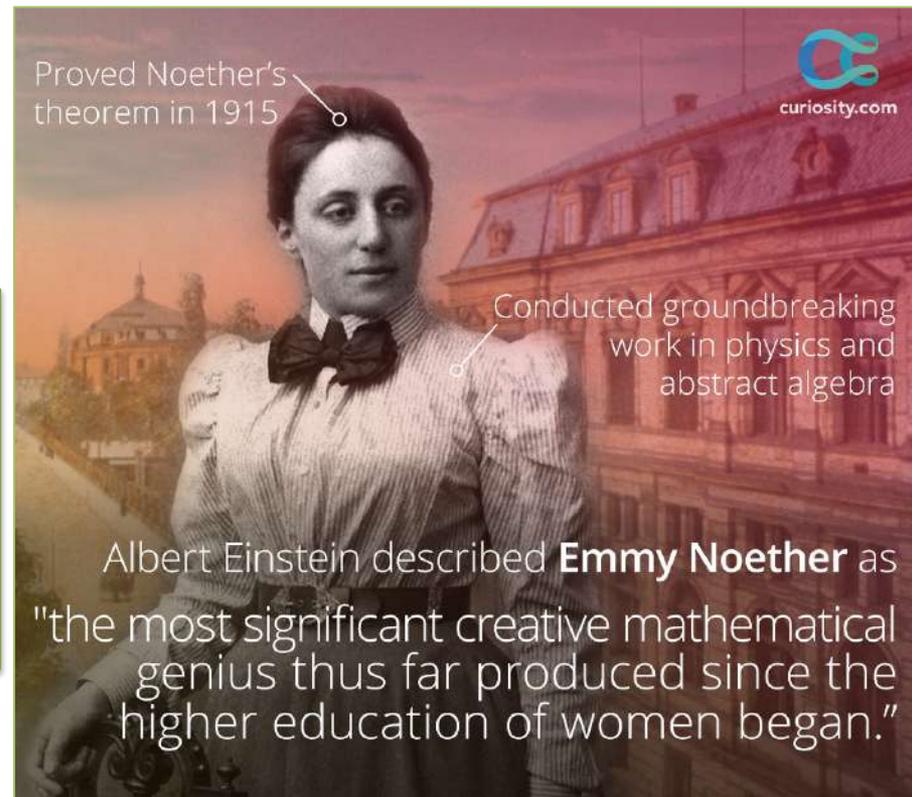
Simmetrie e Leggi di conservazione

- La Fisica e' la stessa oggi e un miliardo di anni fa. Si puo' vedere che **l'invarianza per traslazioni temporali implica la conservazione dell'energia** (costante nel tempo)
- La Fisica e' la stessa qui sulla terra e nelle altre parti dell'universo. Si puo' vedere che **l'invarianza per traslazioni spaziali implica la conservazione dell'impulso**
- La Fisica e' la stessa se il laboratorio e' rivolto a sud o ad est. **L'invarianza per rotazioni implica la conservazione del momento angolare**

C'e' una corrispondenza tra simmetrie e leggi di conservazione
(Teorema di Emma Noether)

•Le simmetrie sono studiate da una branca della Matematica chiamata **Teoria dei Gruppi**

•Una simmetria e' specificata da un gruppo di trasformazioni, che caratterizzano i numeri quantici conservati ed il modo in cui si compongono



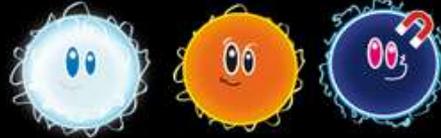
Modello Standard:

teoria basata sul gruppo di simmetria di gauge

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

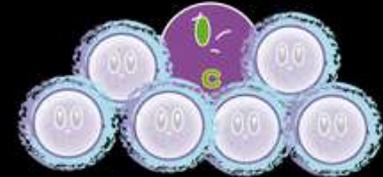
Trasformazioni con parametro continuo dipendente dal punto dello spazio-tempo

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$



$$+ i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c$$

$$+ \bar{\psi}_i \gamma_{ij} \psi_j \phi + h.c$$



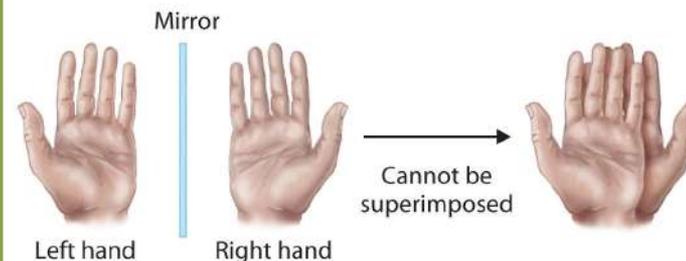
$$+ |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)$$



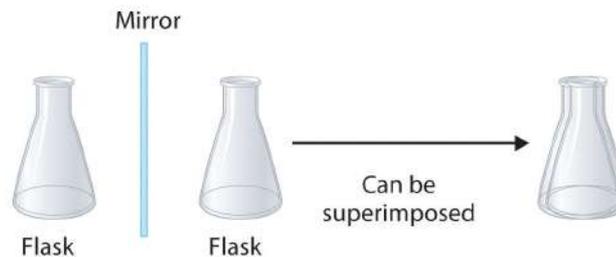
Oltre alle simmetrie (continue) di gauge le interazioni possono soddisfare simmetrie discrete

Parita' (o inversione spaziale)

- Fino alle meta' degli anni '50 si pensava che la Fisica fosse la stessa sotto inversione spaziale (parita'), cioe' che se un processo puo' avvenire anche il processo visto allo specchio puo' verificarsi, con la stessa probabilita'
- Il numero quantico conservato corrispondente e' detto parita'
- Nel 1957 Tsung Dao Lee e Chen Ning Yang scoprirono che la parita' e' conservata nelle interazioni forti ed elettromagnetiche ma **NON nell'interazione debole**



(a) Chiral objects

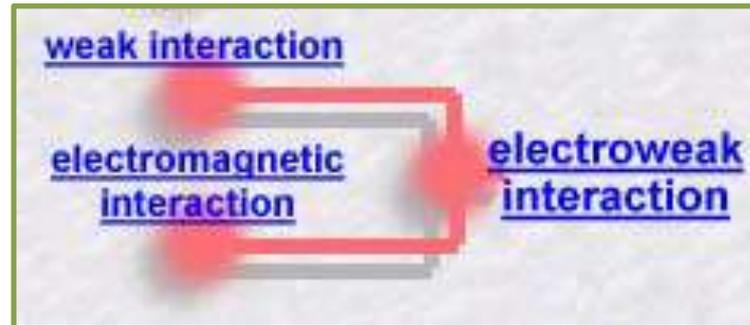


(b) Achiral objects

Coniugazione di carica

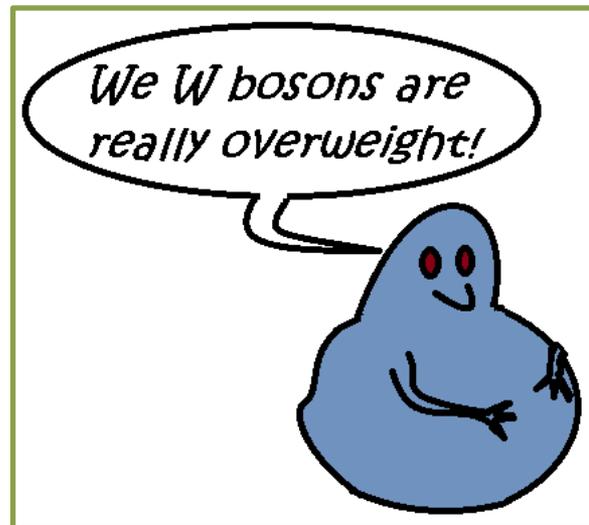
- La simmetria per coniugazione di carica vuol dire che cambiando tutte le particelle con le rispettive antiparticelle, senza modificare altri numeri quantici, il nuovo processo si verifica e con la stessa probabilità
- L'interazione debole viola la coniugazione di carica, oltre che la parità
- L'interazione debole è quasi invariante rispetto all'operazione combinata coniugazione di carica - parità (CP). In realtà anche la simmetria CP è violata, ma per una quantità *piccola*

Interazione elettrodebole

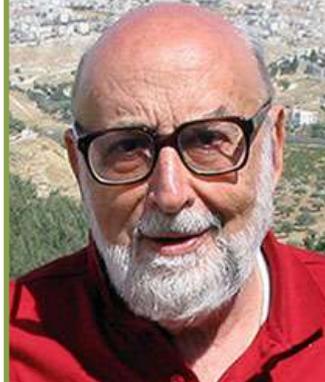


- Nel Modello Standard (SM) le interazioni elettromagnetica e debole sono combinate in un'unica interazione elettrodebole
- La teoria elettrodebole fu formulata negli anni '60 da Sheldon Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg

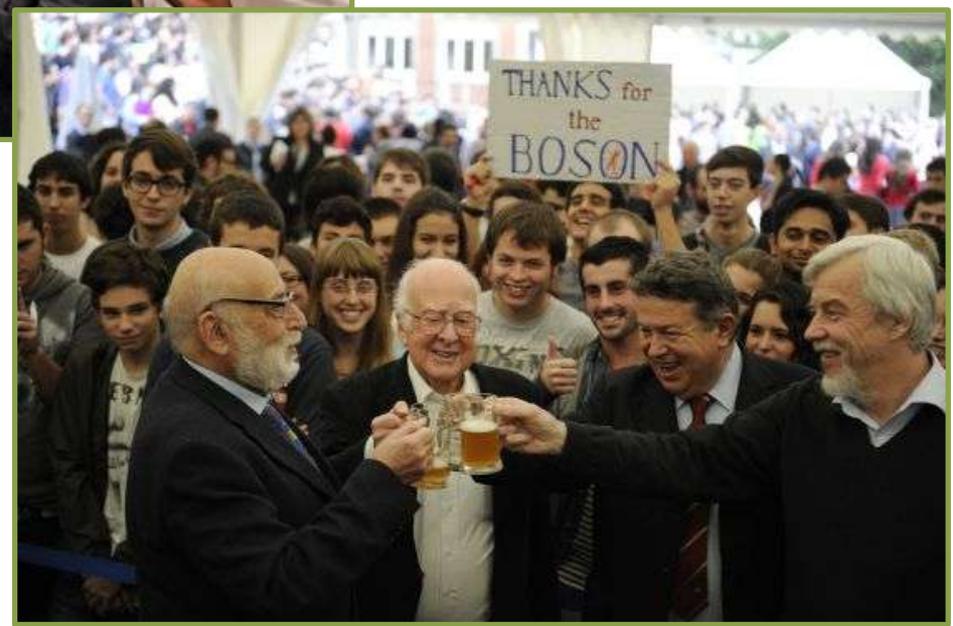
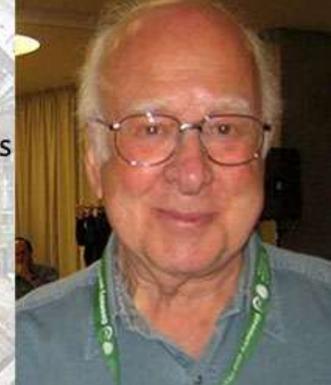
- La teoria elettrodebole ha una simmetria di gauge ($SU(2)_L \times U(1)_Y$) e cio' comporta che i bosoni mediatori dell'interazione sono di massa nulla. D'altra parte le forze deboli risultano avere raggio d'azione molto corto, il che implica masse grandi per i bosoni mediatori
- Sembra esserci un'inconsistenza. Il dilemma e' risolto dal meccanismo di Higgs, di generazione delle masse



Meccanismo di Higgs
(predetto negli anni '60 e
scoperto nel 2012 al CERN)



2013 Nobel Prize in Physics
François Englert
and
Peter W. Higgs



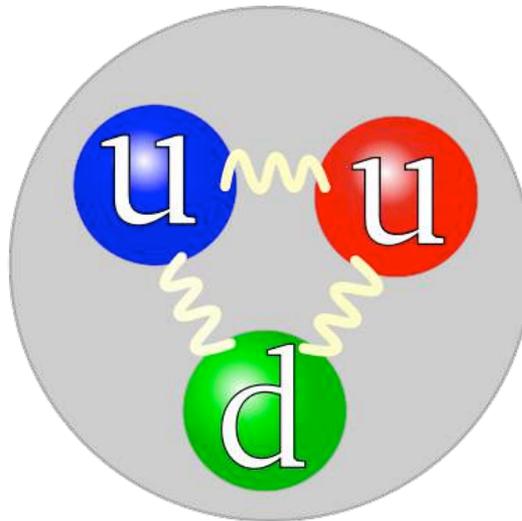


- Il meccanismo di Higgs permette ad un bosone mediatore di diventare massivo senza rovinare la simmetria di gauge
- Si basa sull'introduzione di un campo scalare, campo di Higgs, e quindi di una particella scalare, bosone di Higgs
- Come risultato dell'interazione con il campo di Higgs, i bosoni mediatori W e Z rallentano rispetto alla velocità della luce, in analogia a quanto fa la luce viaggiando in un mezzo
- Rallentare rispetto alla velocità della luce equivale ad acquisire una massa
 $E = \sqrt{(m^2 \cdot c^4 + c^2 \cdot p^2)}$

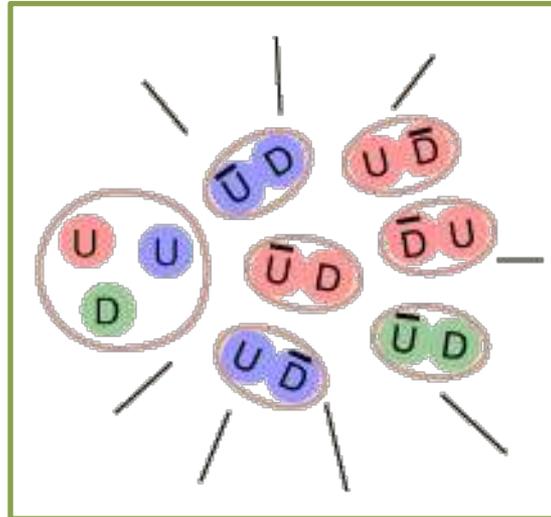
Interazione forte

In che modo interagiscono quark/antiquark all'interno dei nucleoni ed in generale negli adroni?

- L'interazione forte e' descritta da una teoria di gauge
- chiamata Cromodinamica quantistica (QCD)
 - basata sul gruppo di simmetria di gauge SU(3)
 - associato al numero quantico conservato detto colore



Confinamento della QCD



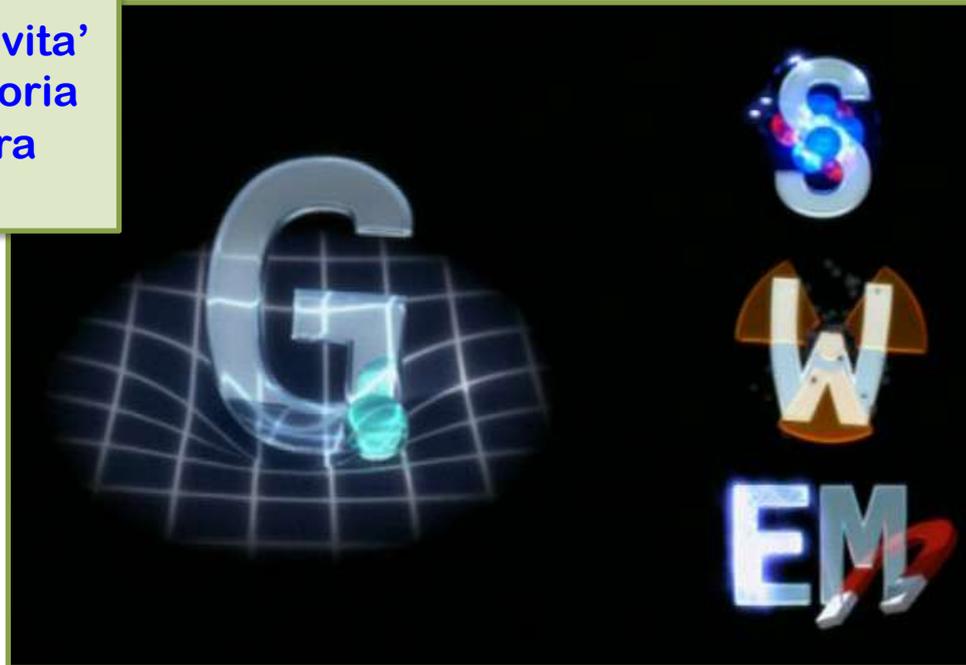
- **Quark isolati non sono mai stati osservati.** La QCD è caratterizzata dal confinamento (quark confinati all'interno di adroni)
- **Gli adroni** (nucleoni e mesoni), **esistono come stati isolati** essendo singoletti di colore (invarianti per trasformazioni di colore) perché **composti di 3 quark o di un quark ed un antiquark.** Interagiscono tramite lo scambio di pioni (neutri di colore) e non di gluoni (carichi di colore)
- **Il meccanismo alla base del confinamento non è ancora compreso fino in fondo,** a causa della complessità della QCD nel regime in cui l'interazione forte è molto intensa (a basse energie)

Modello Standard (SM)

- Lo SM è la teoria attuale per le interazioni forti, elettromagnetiche e deboli
- È in ottimo accordo sostanzialmente con tutte le misure sperimentali
- Tuttavia, non può essere la teoria ultima, quantomeno perché non include la Gravità Quantistica. La Relatività Generale funziona per corpi macroscopici. Gli effetti quantistici della gravità diventano importanti a distanze molto piccole (cioè energie molto grandi: $M_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GeV}$). Tali effetti non sono ancora compresi

• Le tre interazioni fondamentali dello SM sono descritte da teorie di gauge

• La teoria della gravità di Einstein (Relatività Generale) può essere formulata come teoria di gauge ma presenta problemi non ancora compresi



Ci sono anche **altri motivi per cui lo SM non puo' essere la teoria ultima:**

- Evidenza cosmologica di **Materia Oscura** (non formata dalle particelle dello SM) nell'Universo
- Per spiegare la **prevalenza di materia sull'antimateria nell'Universo** e' necessario che sia violata la simmetria CP. La quantita' di violazione di CP nello SM non e' sufficiente a spiegare tale prevalenza

...

Molti modelli di Nuova Fisica (oltre lo SM) sono stati formulati:

- Supersimmetria (tra bosoni e fermioni)
- Extra-dimensioni
- Higgs composto
- ...

Attualmente non si ha evidenza di effetti di Nuova Fisica

**Conclusioni:
Un messaggio per voi giovani**

**Molto si e' capito sulle interazioni fondamentali negli ultimi 60 anni.
Molto c'e' ancora da capire...**

HEY KIDS...
YOU CAN BE
SCIENTISTS!!!!

