28.9.2015

Introduzione

(Appunti per il corso di Fisica Nucleare e Subnucleare 2015/16)

Fiorenzo Bastianelli

Lo scopo del corso è dare una introduzione alla fisica nucleare e subnucleare. Per iniziare conviene ricordare alcune scale di lunghezza:

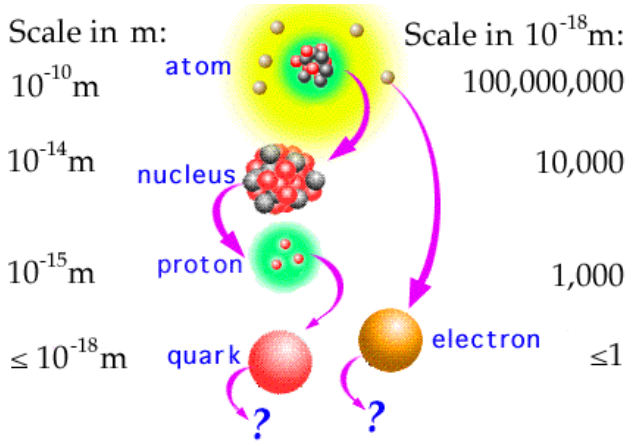
1 m (scala umana, ordine di grandezza dell'altezza di un essere umano)

$10^{-6}\,\mathrm{m} = 1\,\mu\mathrm{m}$ (micron, dimensioni delle cellule di organismi viventi: 1-10 μm)

$10^{-10}\,\mathrm{m} = 1\,\text{Å}$ (ordine di grandezza del raggio di Bohr, dimensioni degli atomi)

$10^{-15}\,\mathrm{m} = 1\,\mathrm{fm}$ (dimensioni dei nuclei atomici, $r = (1.2\ \mathrm{fm})A^{1/3}$ con A numero atomico)

$10^{-18}\,\mathrm{m}$ (scale investigabili attualmente ad LHC, le particelle elementari del modello standard sembrano puntiformi a questa scala)

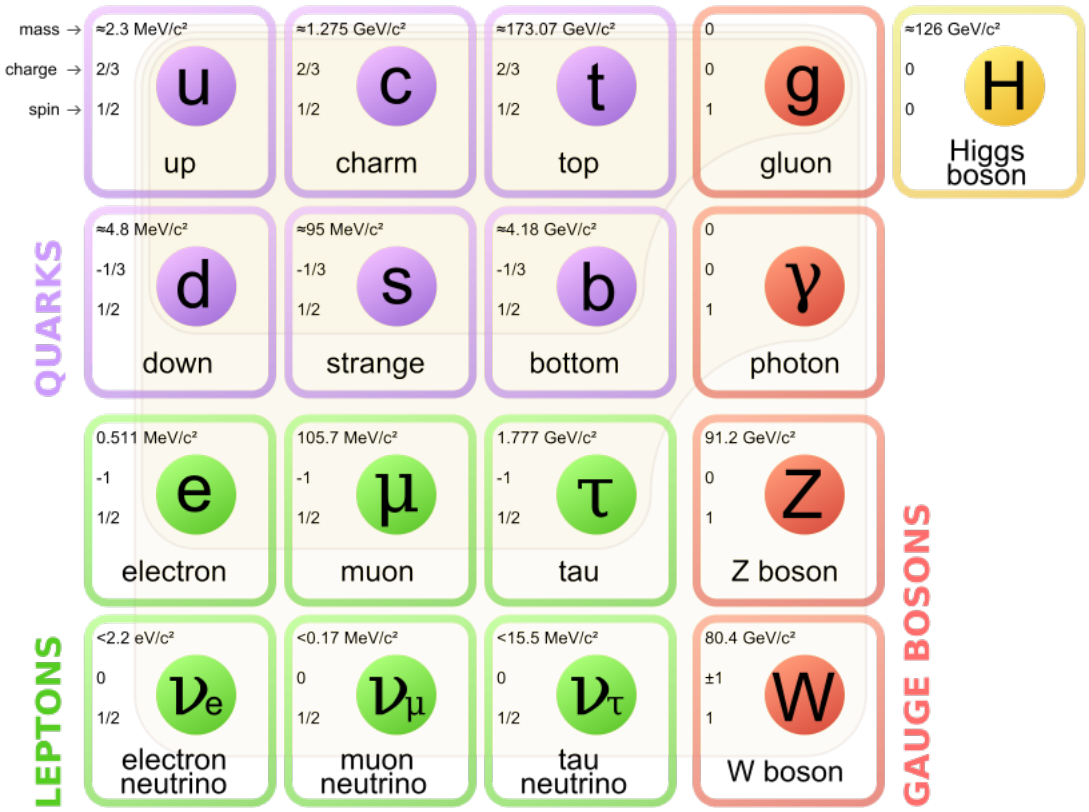


Possiamo quindi dire che la fisica nucleare e subnucleare si occupa delle strutture presenti a scale minori di 10 fm circa.

Nel processo di ridurre i vari fenomeni naturali a principi elementari universali si è arrivati a descrivere tutte le forze conosciute, che agiscono a livello subatomico tra le particelle di materia, nel cosiddetto Modello Standard. Tutti i costituenti possono essere presentati come particelle, tipicamente distinte in particelle di forza e particelle di materia, ma occorre ricordare che secondo la meccanica quantistica tutte le particelle hanno proprietà ondulatorie (e viceversa).

Modello Standard

Le particelle elementari del modello standard sono riassunte nella seguente figura



Per ogni particella esiste anche la relativa *antiparticella*, che può a volte coincidere con la particella stessa (come ad esempio per il fotone o il bosone di Higgs).

I leptoni ed i quarks sono *fermioni* (sono particelle di spin 1/2 che soddisfano al principio di Pauli, per cui sono spesso chiamate particelle di materia). Esistono tre famiglie di quark e leptoni, costituite della prime tre colonne del grafico qui sopra: queste famiglie hanno proprietà identiche riguardo alle loro cariche e spin, ma hanno masse diverse.

Le rimanenti particelle sono *bosoni* (hanno spin intero) e sono considerate particelle di forza. Hanno tutte spin 1, tranne il bosone di Higgs che ha spin 0 ed è responsabile della massa delle particelle elementari del modello standard (particelle composte devono la loro massa anche alle altre interazioni, ad esempio il protone deve la maggior parte della sua massa alle interazioni forti).

Le particelle del Modello Standard sono considerate elementari, ma sono quasi tutte instabili e decadono in particelle più leggere (secondo la legge del decadimento radioattivo $N(t) = N_0\, e^{-\frac{t}{\tau}}$, dove τ è la vita media, caratteristica di ogni particella). Solo l'elettrone, un neutrino (quello più leggero) ed il fotone sono stabili.

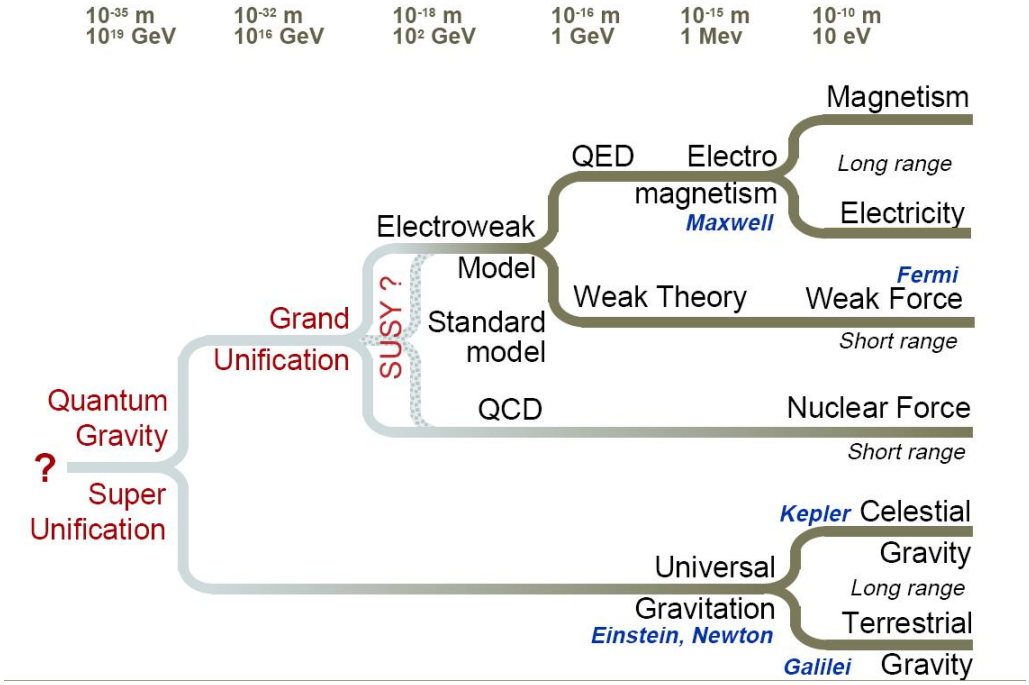
I quarks ed i gluoni non sono mai stati osservati come particelle libere. Esse sono confinate dalla forza forte all' interno degli *adroni*. Gli adroni (particelle composte che sentono la forza forte) sono classificabili in *barioni* (che hanno spin semintero e sono quindi fermioni, composti da tre quarks di valenza, ad esempio il protone p è composti dai quarks (u, u, d)) e *mesoni* (che

hanno spin intero, sono quindi bosoni, composti da coppia di quark/antiquark, ad esempio il pione π^- è composto da $(d, \bar{u})$). Il protone è un barione ed è stabile. Anche il neutrone è un barione, ma non è stabile: decade come $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$ con una vita media di circa 15 minuti (decadimento β). Naturalmente esistono altre particelle composte stabili, quali nuclei ed atomi stabili.

Nella figura qui sopra sono riportati anche i valori di massa, carica elettrica e spin delle particelle elementari. Il fotone ed i gluoni sono considerati avere massa nulla.

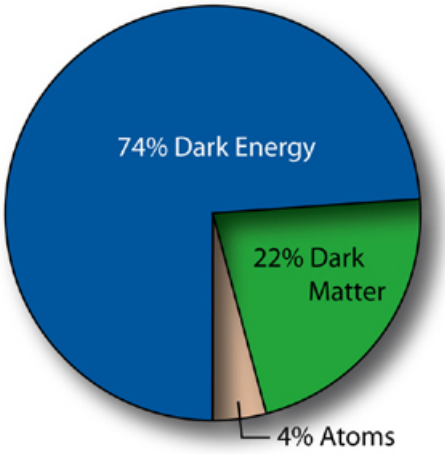
Oltre alle forze descritte nel Modello Standard (forza elettromagnetica, forza debole e forza forte), si conosce certamente anche la forza di gravità. Il quanto relativo alle onde gravitazionali è denominato gravitone, ed è stimato avere spin 2 e massa nulla. Tuttavia le interazioni gravitazionali possono essere trascurate nelle interazioni nucleari e subnucleari, almeno alle energie attualmente testabili.

Il processo di unificazione delle varie forze fondamentali viene spesso riassunto dallo schema seguente



Occorre anche tener presente che la composizione dell'universo, studiata attraverso lo

studio della radiazioni cosmica di fondo, sembra essere descritta dal seguente grafico

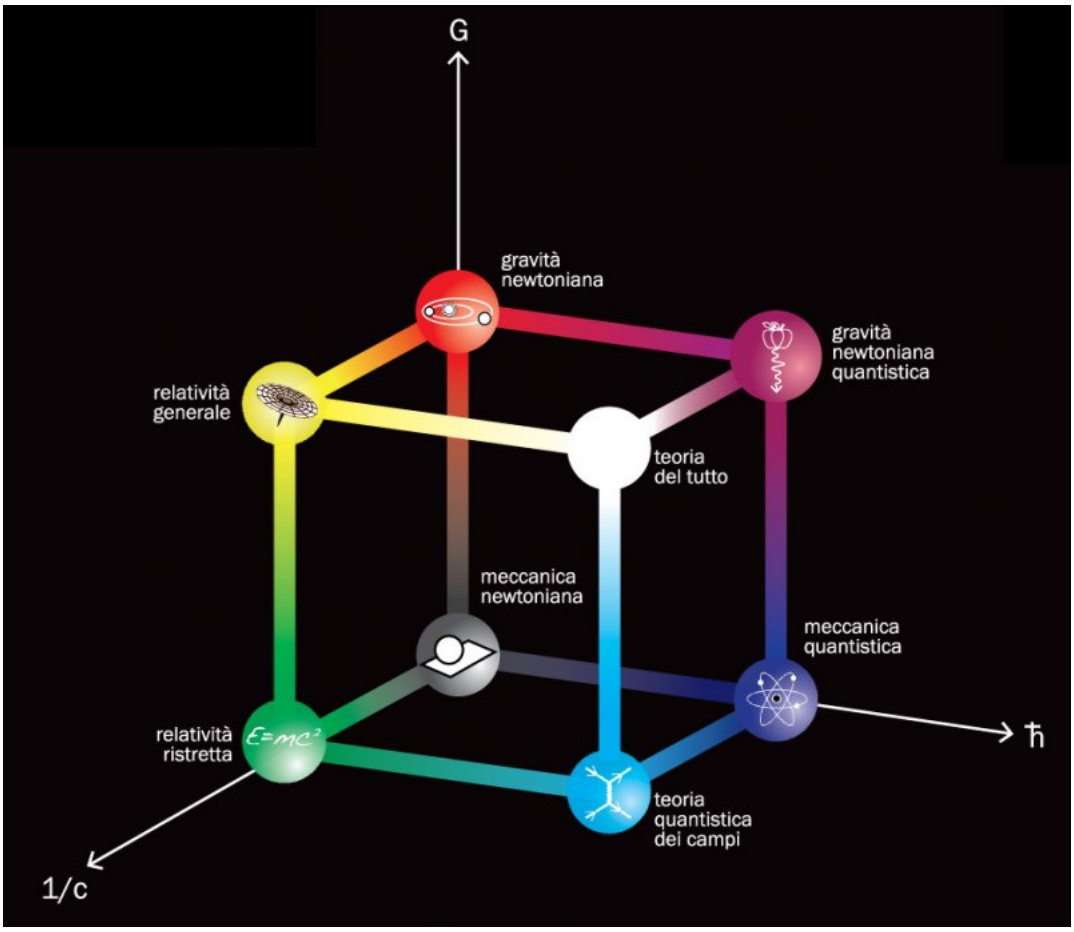


Il modello standard (seppure esteso con la forza di gravità) descrive la materia "visibile", che nel grafico sopra corrisponde al 4% del totale. Cosa determini il resto è attualmente oggetto di varie ipotesi.

Cubo di Okun e le costanti fondamentali

Nella descrizione dei fenomeni nucleari e subnucleari occorre tener conto della meccanica quantistica ($\hbar$ indica la costante di Planck razionalizzata) e della relatività speciale (c indica la velocità della luce), mentre la forza di gravità (G simboleggia la costante della gravitazione universale di Newton) è completamente trascurabile alle energie testate attualmente in laboratorio.

Il cubo di Okun delle teorie fisiche è descritto dalla seguente immagine



Usando le tre grandezze fondamentali $\hbar, c, G$ si possono introdurre delle grandezze che hanno dimensioni di massa, lunghezza e tempo, che Planck ha suggerito come base di un sistema di unità di misura

$$
\begin{aligned}
m_P &= \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} \sim 2.2\ 10^{-8}\text{Kg} \qquad \text{(massa di Planck)} \\
l_P &= \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \sim 1.6\ 10^{-35}\text{m} \qquad \text{(lunghezza di Planck)} \\
t_P &= \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \sim 5.4\ 10^{-44}\text{s} \qquad \text{(tempo di Planck)}
\end{aligned}
$$

Queste unità di misura non sono particolarmente utili nella fisica nucleare e subnucleare, mentre sono molto utili le cosiddette *unità di misura naturali*, che sono unità di misura tali che usandole si ha $c = 1$ ed $\hbar = 1$.

Nelle unità di misura naturali, è sufficiente fissare una sola grandezza con la sua unità di misura scelta arbitrariamente (ad esempio l'energia espressa in MeV o GeV) per misurare tutte le altre grandezze fisiche. Ad esempio, scegliendo il GeV come unità di misura dell' energia, si ha che le masse sono anche esse esprimibili in GeV (evidente dalla relazione

$E = mc^2$; GeV è circa la massa di un protone), lunghezze e tempi in $(\text{GeV})^{-1}$. In particolare si può verificare che in tali unità naturali

$$m_P = 1.22\ 10^{19}\text{GeV}, \qquad l_P = t_P = \frac{1}{1.22\ 10^{19}\text{GeV}} = 0.82\ 10^{-19}(\text{GeV})^{-1}\ .$$

Breve cronologia della FNS

Sebbene non si seguirà una presentazione storica della materia, è utile stilare una breve cronologia per apprezzare come si sia giunti storicamente alla identificazione e formulazione del Modello Standard delle particelle elementari.

1896 scoperta della radioattività (Becquerel): primi segnali dal mondo subatomico

1897 scoperta dell'elettrone (Thomson)

1900 introduzione del quanto d'azione $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ (Planck)

1905 Einstein: relatività speciale (velocità della luce c come velocità limite) e spiegazione dell' effetto fotoelettrico (fotone come quanto delle onde em con energia $E = h\nu = \hbar\omega$)

1911 esperimento di Rutherford: scoperta del nucleo atomico (particelle α su lamina d'oro, l'atomo è essenzialmente vuoto!), modello planetario dell'atomo

1913 teoria atomica di Bohr con livelli energetici quantizzati

1924 comportamento ondulatorio della materia postulato da de Broglie ($p = \frac{h}{\lambda}$)

1925 principio di esclusione di Pauli

1925-26 leggi della meccanica quantistica: eq. di Heisenberg ed eq. di Schroedinger

1925-30 quantizzazione del campo elettromagnetico (inizio della teoria quantistica dei campi: trattazione matematica del fotone come quanto del campo em)

1928 equazione d'onda relativistica di Dirac per l'elettrone e^-

1930 ipotesi di Pauli dell'esistenza del neutrino ν

1931 usando la sua equazione Dirac predice l'esistenza dell'antielettrone (il positrone e^+)

1932 scoperta del neutrone (Chadwick)(per cui nucleo ${}^{Z}_{N}X_A$) e del positrone (Anderson)

1933 teoria di Fermi delle interazioni deboli

1935 teoria di Yukawa delle interazioni forti: mesoni π (i pioni) come mediatori della forza forte

1936 scoperta del muone (sorta di elettrone molto massivo), originariamente scambiato come il pione predetto da Yukawa.

1947 scoperta del pione (Powell, Lattes, Occhialini)

1947-1960 scoperta di moltissimi adroni dallo studio dei raggi cosmici, in particolare scoperta di adroni strani ($K, \Lambda, \Sigma, ...$), interpretati poi come particelle composte dei quark up, down e strange (u, d, s)

1954 Yang-Mills: teorie di gauge non abeliane (base teorica per le interazioni deboli e forti)

1956 scoperta sperimentale del neutrino elettronico ν_e

1961-1968 formulazione del Modello Standard (Glashow, Weinberg, Salam) tramite le teorie di gauge con uso del meccanismo di Higgs

1971 prova della rinormalizzabilità delle teorie di gauge ('t Hooft and Veltman)

1973 scoperta delle interazioni deboli neutre, postulate dalla teoria del modello standard

1974 scoperta del mesone J/ψ, stato legato di quark charm/anticharm: prova dell'esistenza del quark c (postulato nel 1970 da Glashow, Iliopoulos, Maiani)

1974 scoperta del leptone τ, membro della terza famiglia di leptoni

1977 scoperta del mesone upsilon Υ, stato legato di un nuovo quark (bottom, b) con il suo antiquark (antibottom , $\bar{b}$), membro della terza famiglia dei quark

1983 Scoperta dei bosoni W^+, W^- e Z^0, mediatori delle interazioni deboli cariche e neutre (Carlo Rubbia)

1995 verifica sperimentale dell'esistenza del quark top, t, che completa la terza famiglia di quarks

2013 scoperta del bosone di Higgs ad LHC.

(NB: questa cronologia sarà molto meglio apprezzata a fine corso, quando molte delle particelle menzionate saranno più familiari!)