

Materia e forze alla scala subatomica: il nucleo atomico, le particelle elementari

Andrea Bizzeti

Università di Modena e Reggio Emilia
Dipartimento di Scienze Fisiche, Informatiche e Matematiche

Modena, 14/09/2016

la Terra



← 10^7 m →

le galassie



← 10^{21} m →

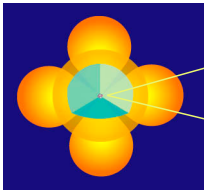
$\approx 10^{22}$ stelle



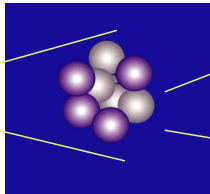
nell'Universo

sono fatte di **atomi**

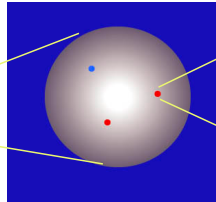
Da cosa è composto l'atomo?



atomo



nucleo (pesante)
+ **elettroni** (leggeri)



protoni/neutroni



quark

La Fisica delle Particelle studia i costituenti elementari della materia.

Filosofia antica



(c) Andy Brice 1998

Empedocle

492–432 a.C.

4 elementi
fondamentali

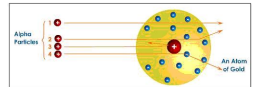
Scienza classica

Mendeleev

19° secolo

Tavola Periodica
~ 100 elementi: atomi

Meccanica Quantistica



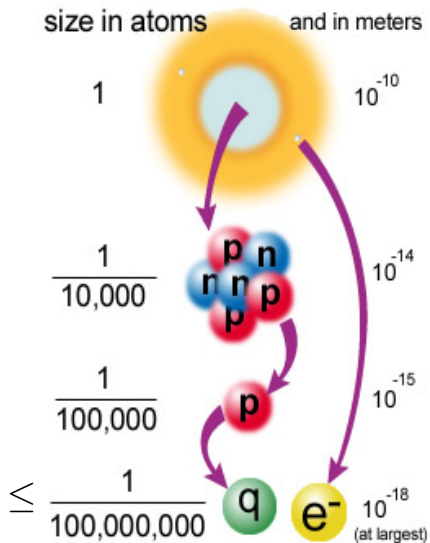
Rutherford, Bohr


inizio 20° secolo


3 particelle: elettrone,
protone, neutrone

Oggi: quark e leptoni

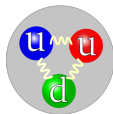
Quali forze tengono insieme la materia



atomo: interaz. **elettromagnetica**
tra nucleo(+) ed **elettroni**(-)
Per rimuovere un elettrone da un **atomo** occorrono ≈ 10 eV
 ~ 10 

nucleo: interazione **forte**
tra protoni e neutroni
Per rimuovere un protone da un **nucleo** occorrono ≈ 10 MeV
 $\sim 10.000.000$ 

protoni e neutroni: interaz. **forte**
tra i **quark**



Il nucleo atomico

- ▶ contiene circa il 99,98% della la massa dell'atomo ma è 10 000 volte più piccolo
- ▶ è composto da due tipi di **nucleoni**:
 - **Z protoni** (p) con carica elettrica positiva $+e$
 - **N neutroni** (n), privi di carica elettrica
- ▶ ha carica elettrica $+Ze$
 $Z =$ numero atomico \Leftrightarrow **elemento chimico**
- ▶ la sua massa è circa proporzionale al numero di nucleoni
 $A = Z + N =$ numero di **massa**

Per specificare il tipo di nucleo si indicano:

- ▶ il **simbolo** dell'elemento chimico
- ▶ il **numero** di massa

Esempi: ${}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}$, ${}^4\text{He}$, ${}^{235}\text{U}$

Il decadimento radioattivo

Alcuni nuclei sono instabili e possono **decadere**, cioè trasformarsi in **un altro nucleo** emettendo una o più **particelle**.

Un nucleo in uno “stato eccitato” (p.es. perché ruota o vibra) può diseccitarsi emettendo un fotone (onda elettromagnetica).

I decadimenti si classificano in base al **tipo di particella** emessa:

- ▶ α = nucleo di ${}^4\text{He}$
- ▶ β = elettrone (e^-) o positrone (e^+)
- ▶ γ = fotone

Queste particelle hanno energia sufficiente per **ionizzare** gli atomi, separando un elettrone ($-$) dall'atomo, che rimane ionizzato ($+$). Vengono perciò chiamate **radiazioni ionizzanti**.

Radioattività

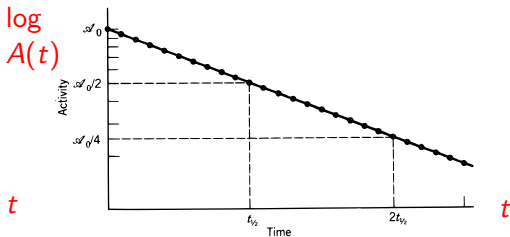
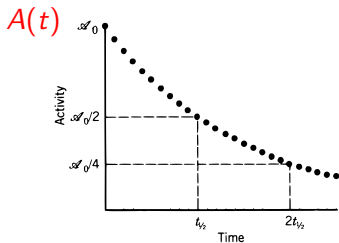
Radionuclide = nucleo radioattivo

Attività = numero di decadimenti per unità di tempo

u.d.m.: **1 Bq** = 1 decadimento al secondo

Se prendiamo un gran numero di radionuclidi dello stesso tipo osserviamo che **l'attività decresce** nel tempo in modo **esponenziale** (legge di Soddy):

$$A(t) = A_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}}$$



dimezzandosi ogni volta che trascorre un intervallo di tempo $T_{1/2}$
(tempo di dimezzamento)

Radionuclidi naturali e artificiali

- presenti in natura:

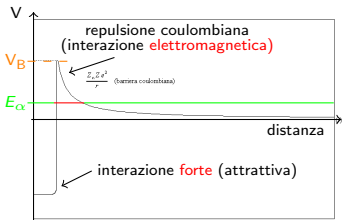
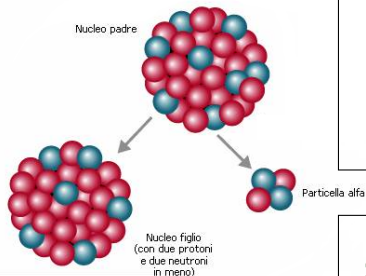
- primordiali (^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , ^{40}K , ...) $T_{1/2} \gtrsim 10^9$ anni
[età della Terra = 4.5×10^9 anni]
- i loro discendenti (es.: il ^{224}Ra prodotto nel decadimento
 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{224}\text{Ra} + \alpha$ è anch'esso radioattivo)
- cosmogenici, prodotti continuamente dai raggi cosmici
(es.: ^{14}C , $T_{1/2} = 5730$ anni)

- artificiali (prodotti dall'uomo):

- es.: $\alpha + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^{30}\text{P} + n$; $T_{1/2} (^{30}\text{P}) = 2.5$ min)

I decadimenti α e β

Decadimento Alfa



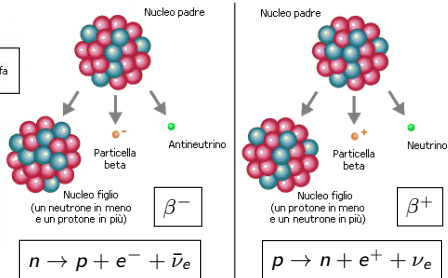
Per uscire dal nucleo la particella α

deve superare una **barriera di potenziale**

La Meccanica Quantistica glielo permette grazie all'**effetto tunnel**

- Neutrone
- Particella beta (elettrone o positrone)
- Protone
- Antineutrino, Neutrino

Decadimento beta



Per effetto della interazione **debole** una particella si trasforma in altre tre, che prima non esistevano!

Particelle più o meno penetranti

Che spessore di materia possono attraversare le particelle?

Le **particelle cariche** (α, β) perdono energia **un po' alla volta**.

Particelle α :

- ▶ carica $+2e$, massa $\simeq 4m_p$, energia = $(4 \div 10)$ MeV
- ▶ Massa grande \rightarrow velocità piccola \rightarrow si fermano presto
- ▶ Per fermarle è sufficiente un **foglio di carta**

Particelle β :

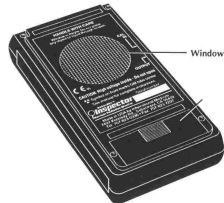
- ▶ carica $\pm e$, massa $m_e \simeq \frac{1}{2000} m_p$, energia $(0.03 \div 3)$ MeV
- ▶ Massa piccola \rightarrow velocità grande \rightarrow penetrano più delle α
- ▶ Per fermarle occorre **qualche mm di metallo**

Radiazioni γ :

- ▶ carica zero, massa zero, non perdono energia un po' alla volta
- ▶ Attraversano spessori maggiori rispetto alle particelle α e β
- ▶ Per ridurre il loro numero si utilizzano spessori di **piombo**

I rivelatori di radiazioni ionizzanti

Si accorgono della ionizzazione e producono un segnale elettrico.

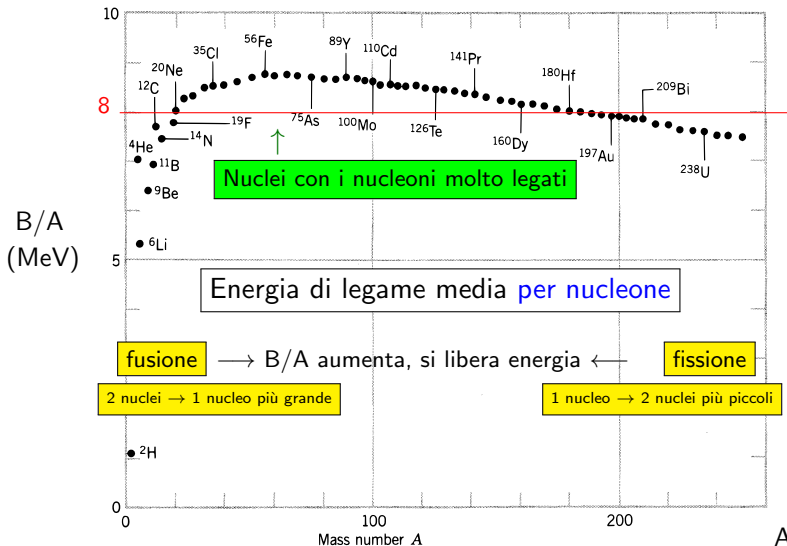


Esempio: il **contatore Geiger**

- ▶ Contiene due elettrodi separati da un volume riempito di **gas**
- ▶ La **ionizzazione** del gas innesca una piccola **scarica elettrica**, che produce il segnale
- ▶ Con un altoparlante è possibile ascoltare un **suono** (“tic”) ogni volta che il gas viene ionizzato
- ▶ Lo strumento visualizza su un display il **numero di conteggi** registrati in un determinato intervallo di tempo

L'energia di legame nucleare

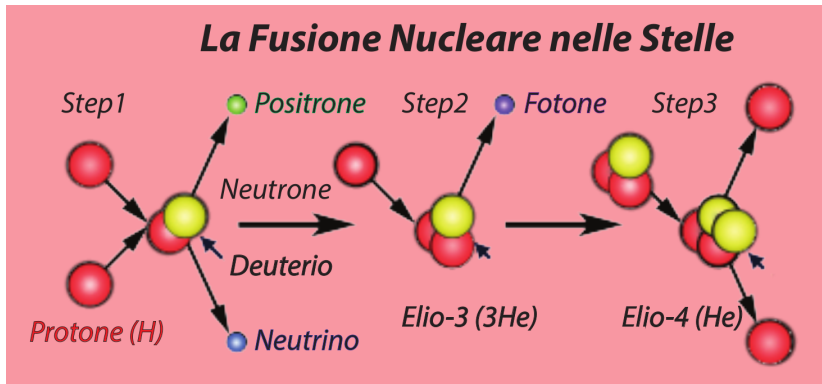
Energia di legame B = energia necessaria per separare tutti i nucleoni



La fusione nucleare

Può avvenire soltanto quando due **nuclei leggeri** vengono a contatto
Per arrivarci devono vincere la **repulsione coulombiana**
(entrambi hanno carica elettrica positiva)

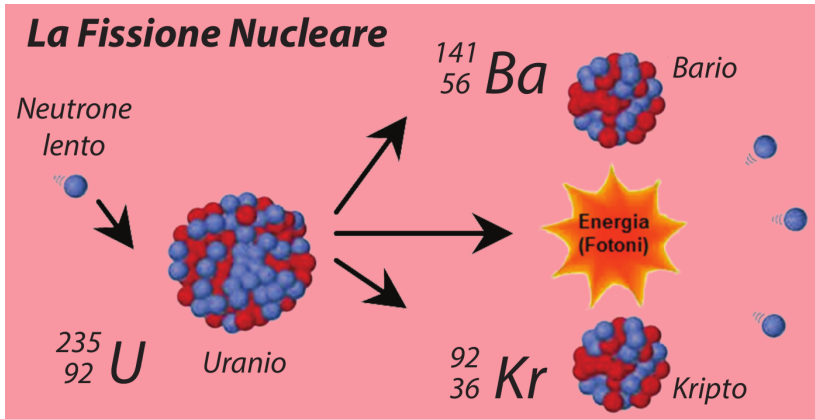
Esempi: ${}^1\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ (forte)
 ${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$ (debole)



La fissione nucleare

Fissione **spontanea**: tipica dei nuclei molto pesanti ($A > 250$)

Fissione **indotta**: avviene dopo l'assorbimento di un neutrone



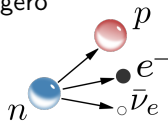
In entrambi i casi il nucleo si divide in **due nuclei più leggeri** (non sempre gli stessi) e libera alcuni **neutroni**, che a loro volta possono provocare altre fissioni → **reazione a catena**

Anche le particelle decadono

Nel decadimento una particella instabile **scompare** trasformandosi in **altre particelle** più leggere.

Ad esempio, per effetto della interazione **debole** :

- ▶ il **neutrone** libero (n) **decade** trasformandosi in un protone (p), un elettrone (e^-) ed un anti-neutrino ($\bar{\nu}_e$) neutro e leggero

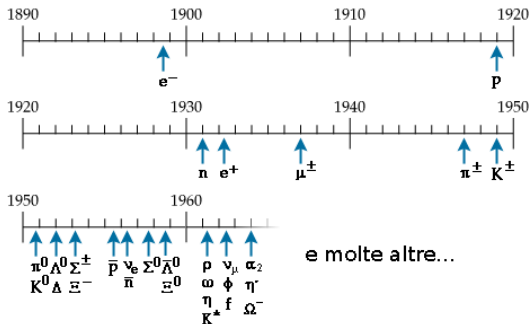


- ▶ il **muone** negativo (μ^-) **decade** trasformandosi in un neutrino (ν_μ), un elettrone (e^-) e un anti-neutrino ($\bar{\nu}_e$)

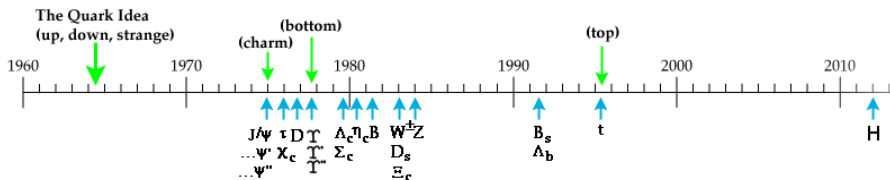


Le **particelle prodotte** non sono “pezzi” della particella iniziale. Sono particelle completamente nuove, che **prima non esistevano**.

Sono state scoperte molte particelle, quasi tutte **instabili**

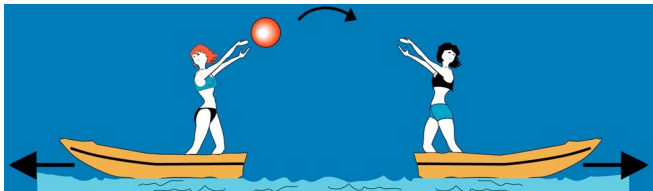


e quasi tutte composte da **quark**



Le quattro forze della Natura

- ▶ La Meccanica Quantistica descrive le interazioni come scambio di particelle “portatrici di forza”
- ▶ una analogia in fisica classica:

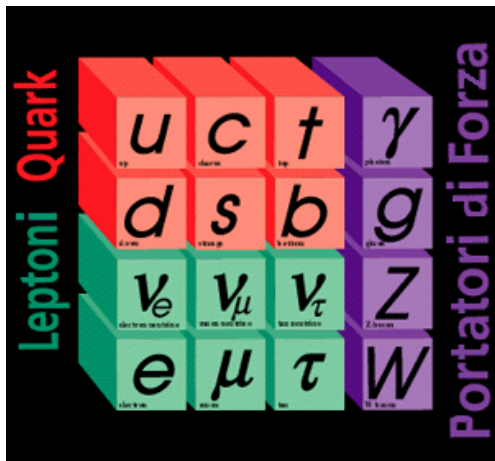


Lo scambio di particelle (pallone) è responsabile della forza

Tipo di forza	Particella scambiata	Dove si manifesta
forte	gluoni g	nuclei atomici
elettromagnetica	fotone γ	elettricità, luce, onde radio
debole	bosoni W, Z	Sole, decadimenti, neutrini
gravitazionale	gravitone (?)	peso, moto corpi celesti

Non si riesce (ancora) a trattare quantisticamente l'interazione gravitazionale.

I costituenti fondamentali della materia



Bosone
di Higgs

H

(spiega l'origine
della massa)

- ▶ 12 particelle di materia: 6 **quark** + 6 **leptoni**
- ▶ Inoltre: 4 portatori di **forza** + 1 bosone di **Higgs**

L'**interazione debole** provoca il **decadimento** dei quark e leptoni più pesanti in quark e leptoni più leggeri

⇒ Uniche particelle di materia **stabili**: neutrini, elettrone, protone

Materia e anti-materia

- ▶ Per ogni particella costituente della materia (quark o leptone) esiste una antiparticella, costituente dell'antimateria.
- ▶ Le antiparticelle hanno alcune proprietà **identiche** alle corrispondenti particelle (es.: massa, spin) ed altre **opposte** (es.: carica elettrica, momento magnetico).

Alcuni esempi:

Particella		carica elettrica	Antiparticella		carica elettrica
elettrone	e^-	$-e$	positrone	e^+	$+e$
quark	u	$+\frac{2}{3}e$	antiquark	\bar{u}	$-\frac{2}{3}e$
quark	d	$-\frac{1}{3}e$	antiquark	\bar{d}	$+\frac{1}{3}e$
protone	$p = uud$	$+e$	antiprotone	$\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$-e$
neutrone	$n = udd$	0	antineutrone	$\bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$	0
mesone π^+	$\pi^+ = u\bar{d}$	$+e$	mesone π^-	$\pi^- = d\bar{u}$	$-e$

Materia

e

anti-materia

Leptoni			carica elettrica	Anti-leptoni		
$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$	$0 \mid +1$ $-1 \mid 0$	$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$

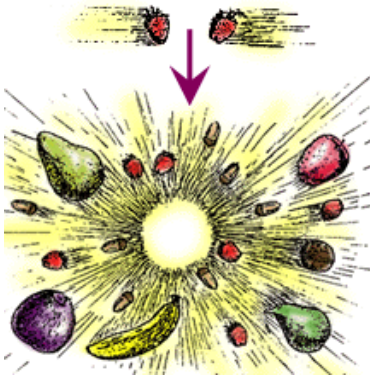
Quark			carica elettrica	Anti-quark		
$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$	$+\frac{2}{3} \mid +\frac{1}{3}$ $-\frac{1}{3} \mid -\frac{2}{3}$	$\begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{s} \\ \bar{c} \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \bar{b} \\ \bar{t} \end{pmatrix}$

↑
negli **atomi**

Coppie particella-antiparticella possono essere **create** ($E \geq 2mc^2$)
o **distrutte** (annichilazione). Esempio: $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

Come si producono le particelle?

- ▶ Si accelerano particelle stabili fino a energie molto grandi e si fanno scontrare tra loro
- ▶ una parte della loro energia viene utilizzata per creare nuove particelle ($E = mc^2$ per ogni particella di massa m)



Scontri tra 2 protoni a LHC: $E_{\text{tot}} = 13 \text{ TeV} > 13000 m_p c^2$

Come è fatto un acceleratore?



Bombola di idrogeno



Campo elettrico

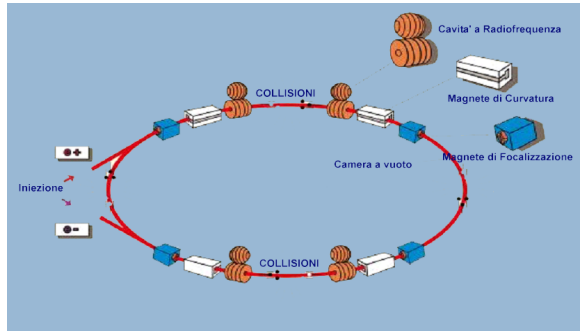
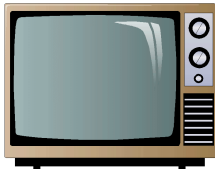


Campo magnetico

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$



Lorentz



Il Large Hadron Collider



- ▶ I protoni sono accelerati da potenti **campi elettrici** fino a velocità prossime a quella della luce
- ▶ Sono guidati lungo le loro traiettorie da potenti **magneti superconduttori**
- ▶ Il loro campo magnetico raggiunge **8.3 Tesla** (200 000 volte quello terrestre)
- ▶ I magneti lavorano a **1.9 K** (-271°C) in **elio superfluido**
- ▶ I protoni viaggiano in un tubo che è a **vuoto** spinto e a temperatura più bassa che lo spazio interplanetario

Il tunnel di LHC: 100 metri sotto terra, lungo 27 km

