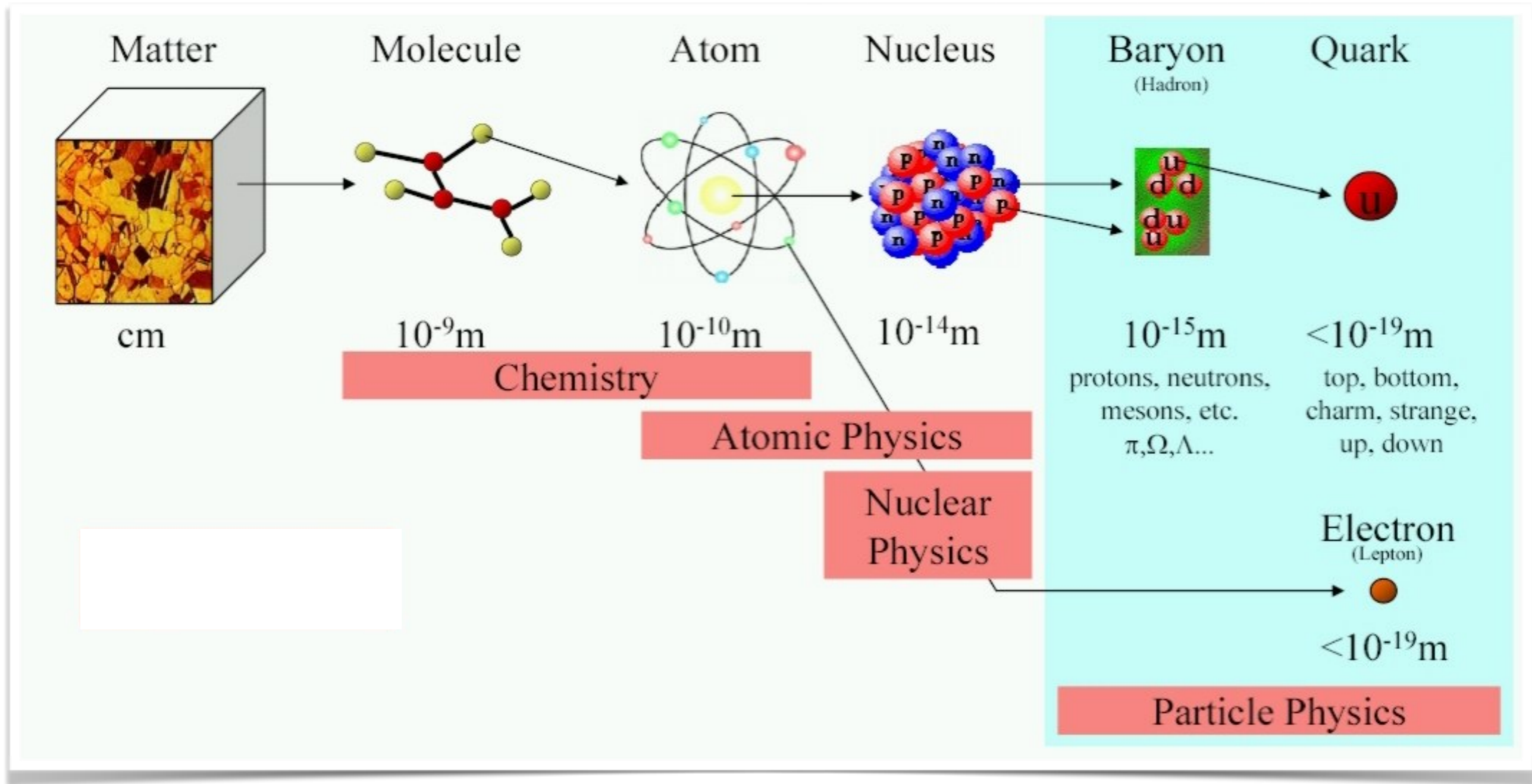

Il Modello Standard

Laura Salutari - INFN Roma Tre

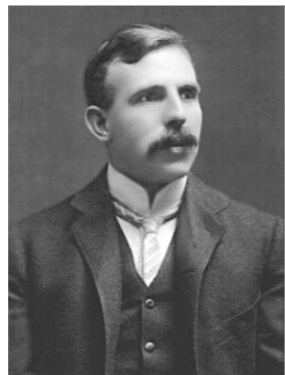
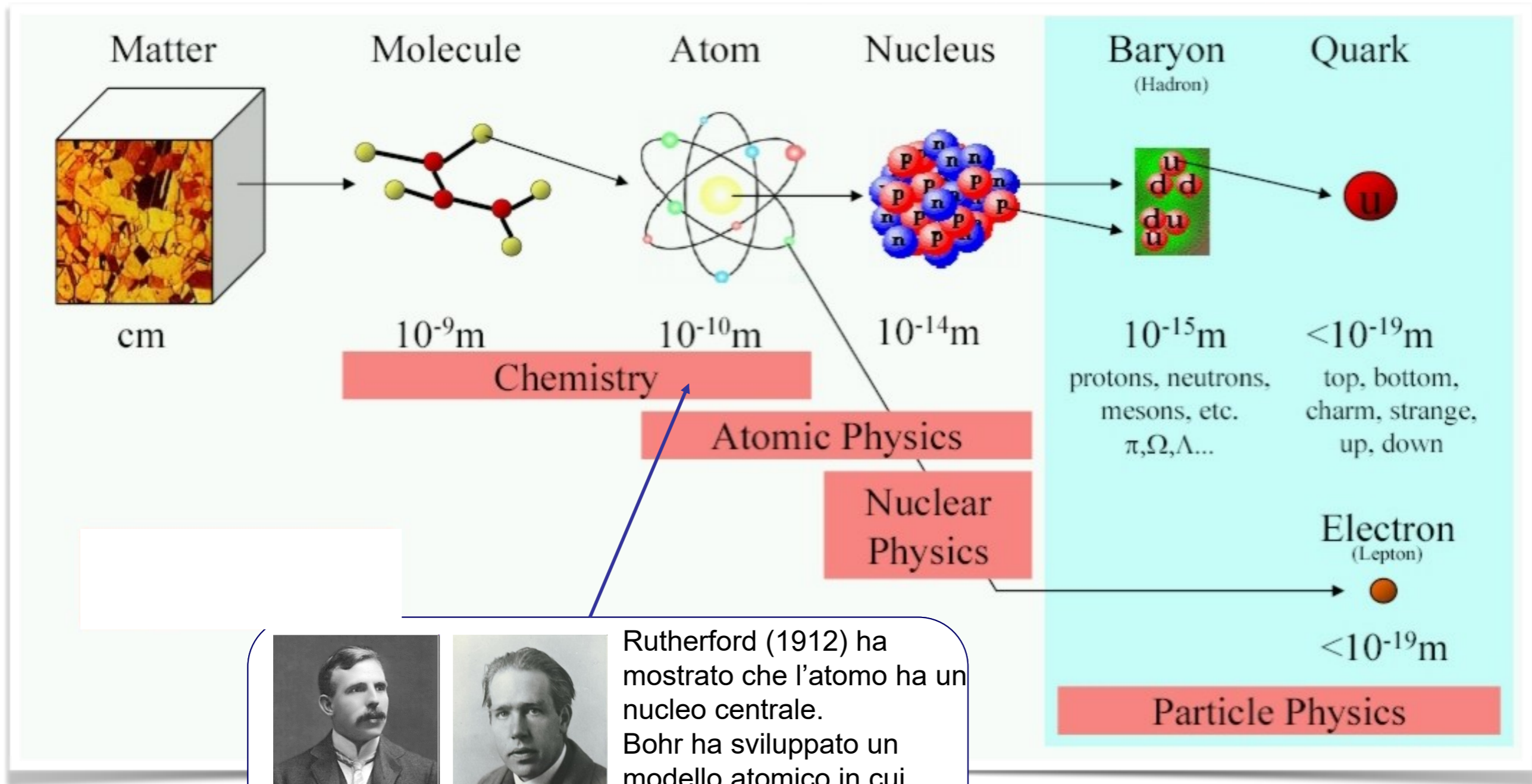
Masterclass in Fisica delle Particelle Elementari - 25 Marzo 2026

- × I costituenti elementari della materia
- × Tre famiglie di mattoni elementari
- × Quattro forze fondamentali: mediatori e cariche
- × Il bosone di Higgs e la massa delle particelle
- × Interazioni elettrone-positrone
- × Decadimenti
- × Le simmetrie

La materia



La materia



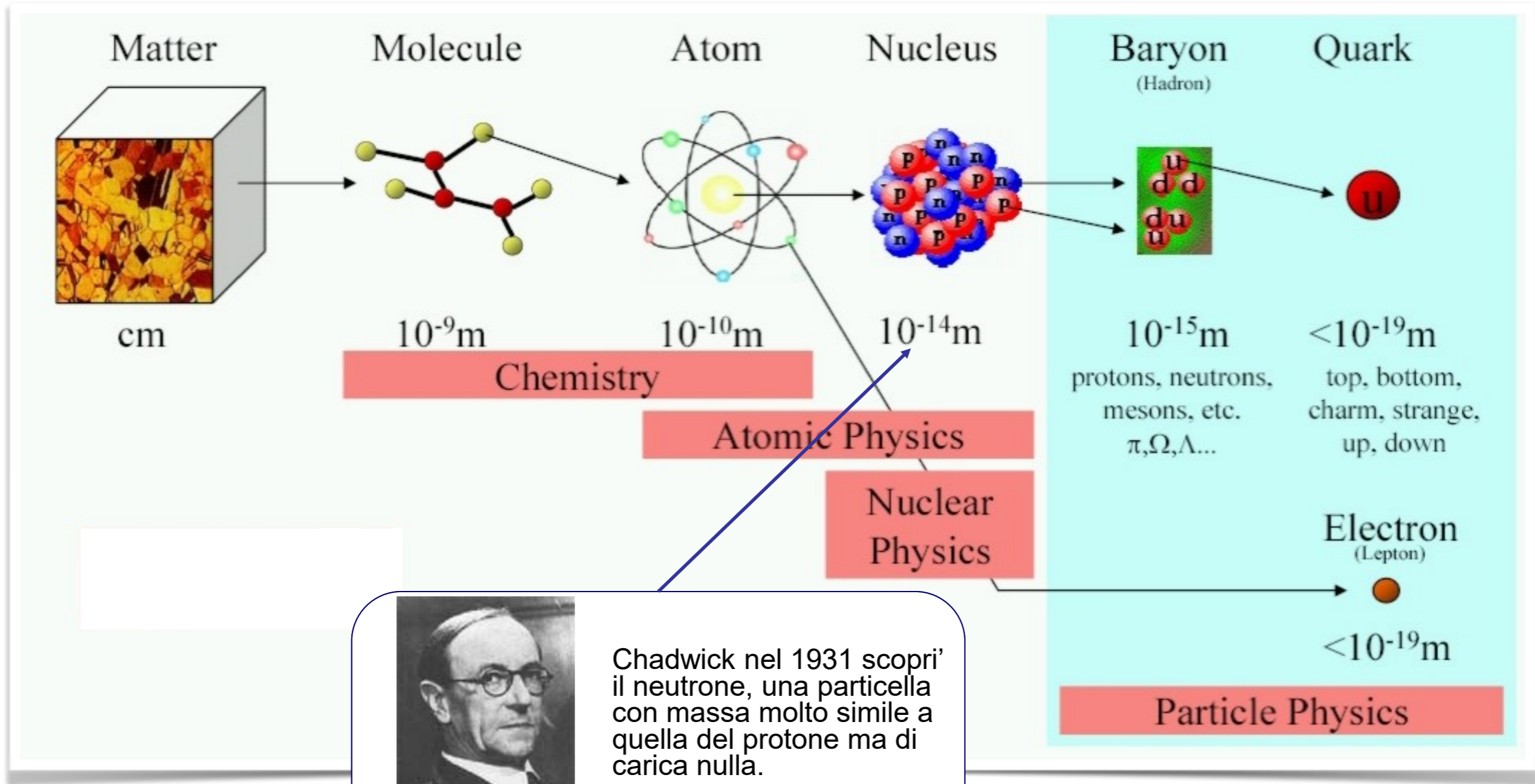
Rutherford



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.

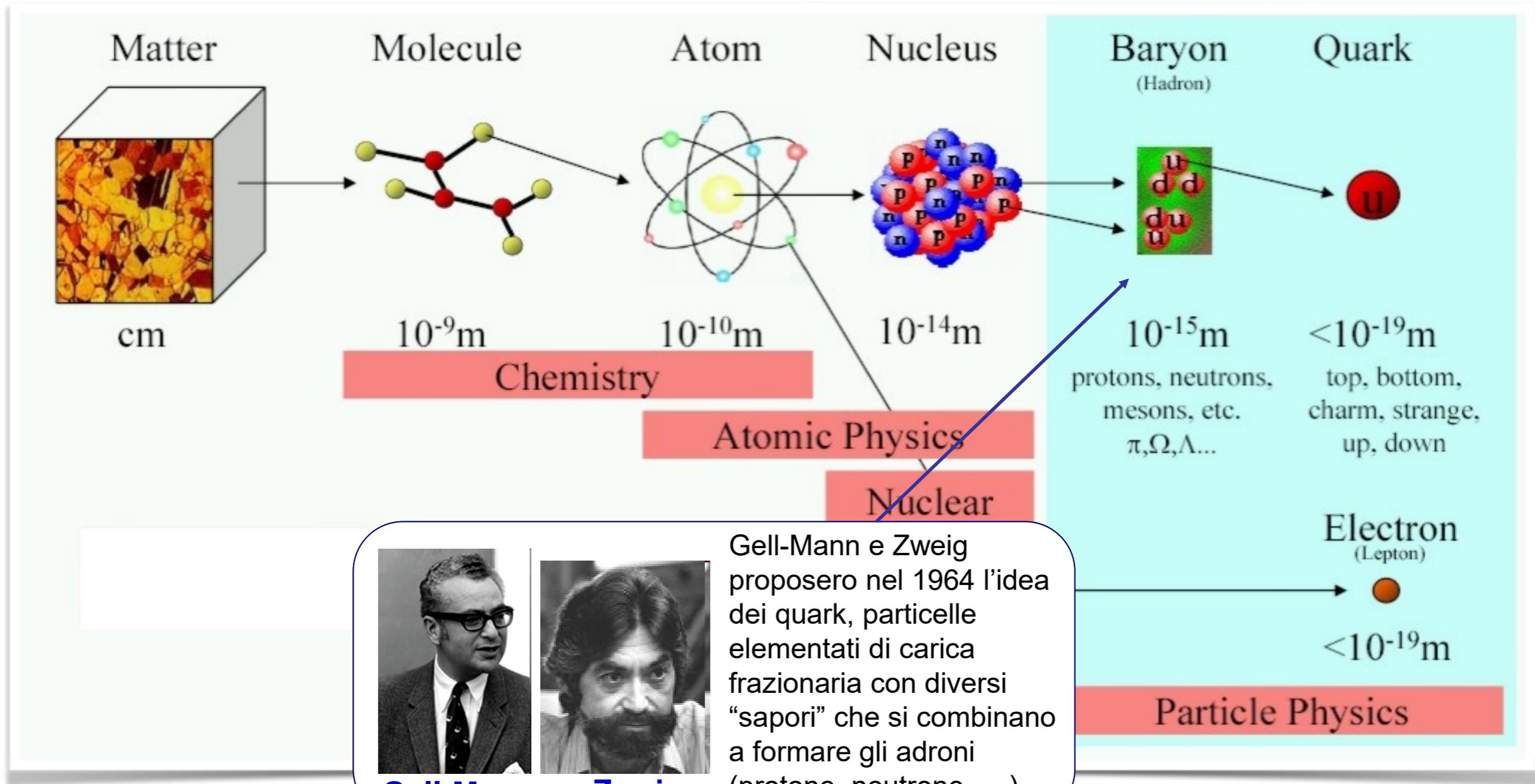
La materia



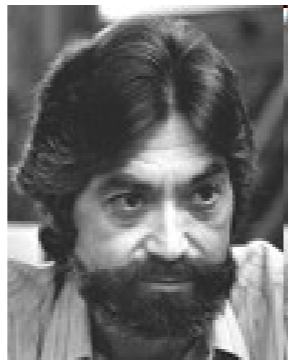
Chadwick

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

La materia



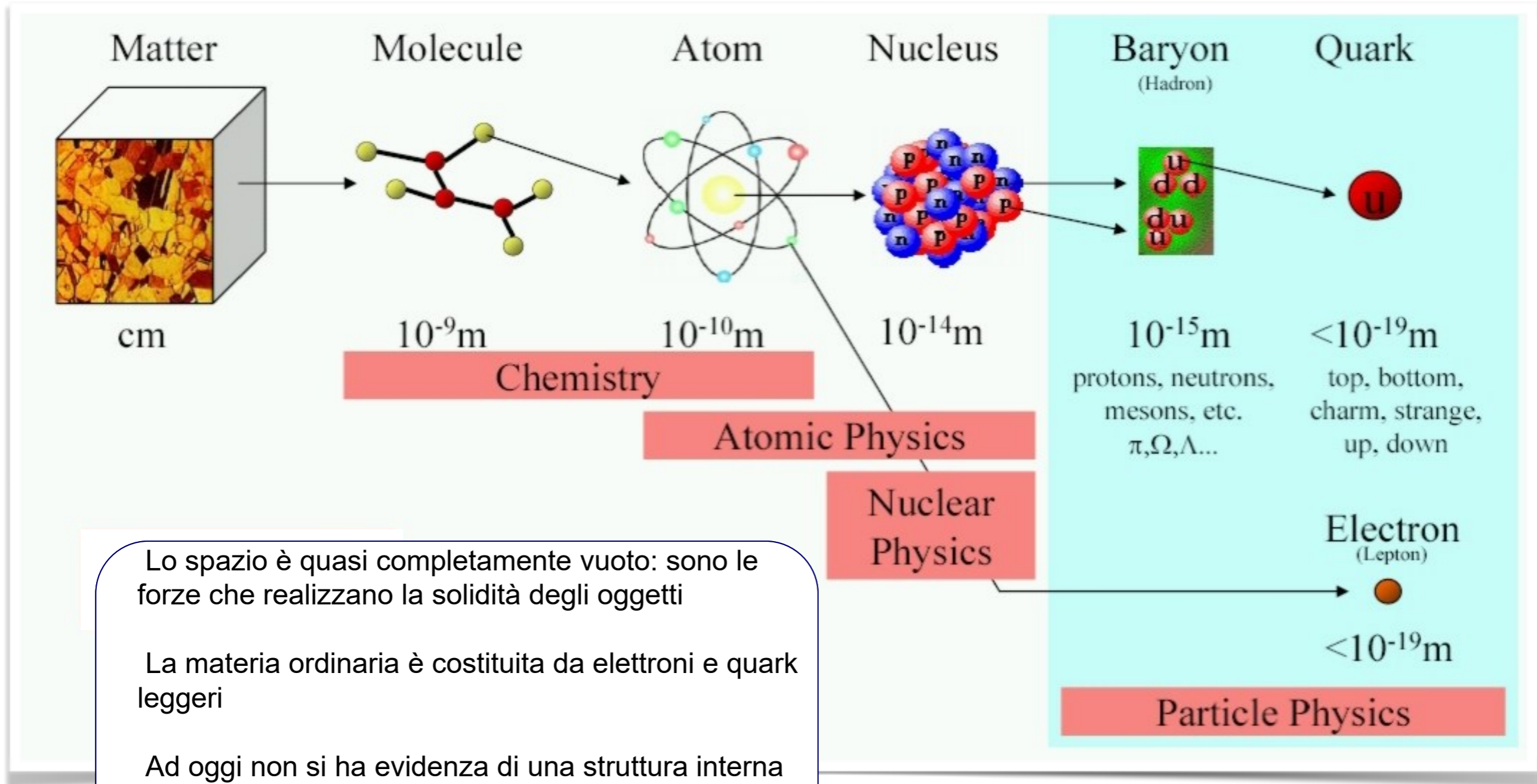
Gell-Mann



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, ...)

La materia



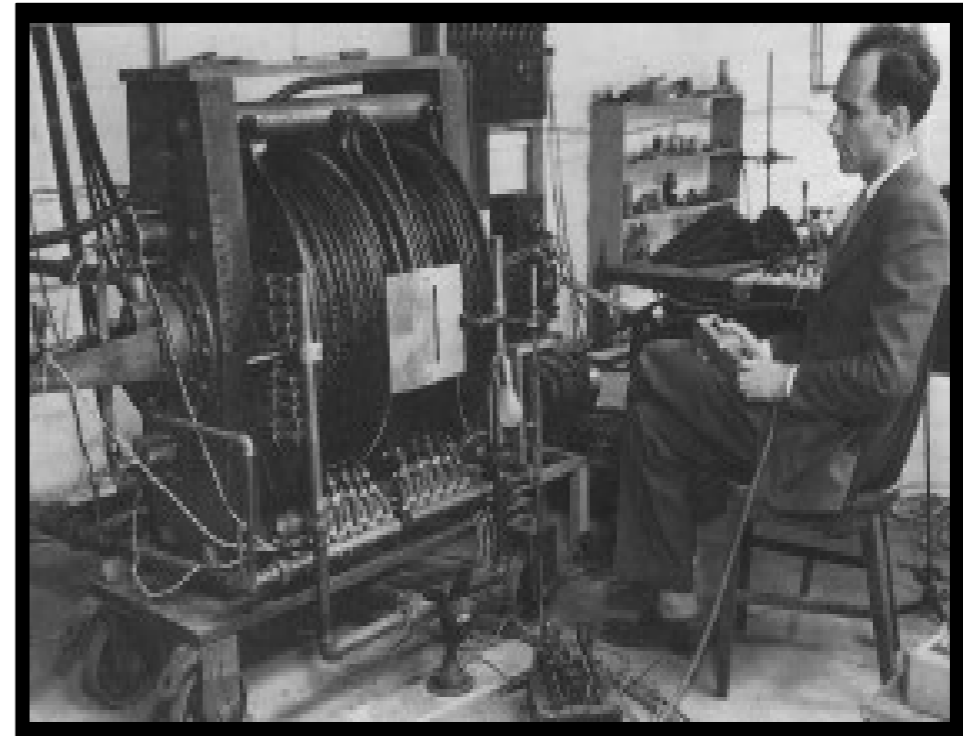
Lo spazio è quasi completamente vuoto: sono le forze che realizzano la solidità degli oggetti

La materia ordinaria è costituita da elettroni e quark leggeri

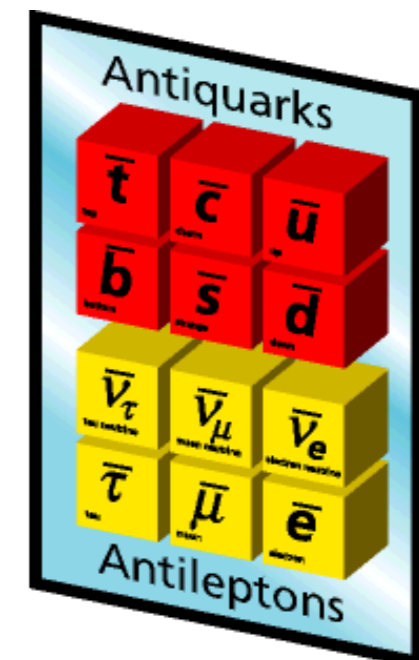
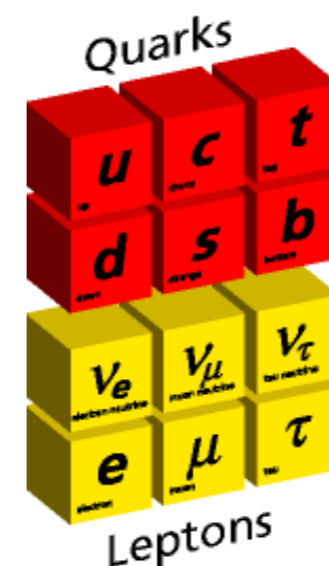
Ad oggi non si ha evidenza di una struttura interna dell'elettrone e dei quark: **sembrano essere i mattoni fondamentali**

L'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**.



Ogni particella ha un'antiparticella!
Questo e' il quadro completo:



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 $2.2 \mu\text{sec}$.

Il neutrino (ν)

Postulato da Pauli (**1928**).

Studiato da Fermi (**1934**).

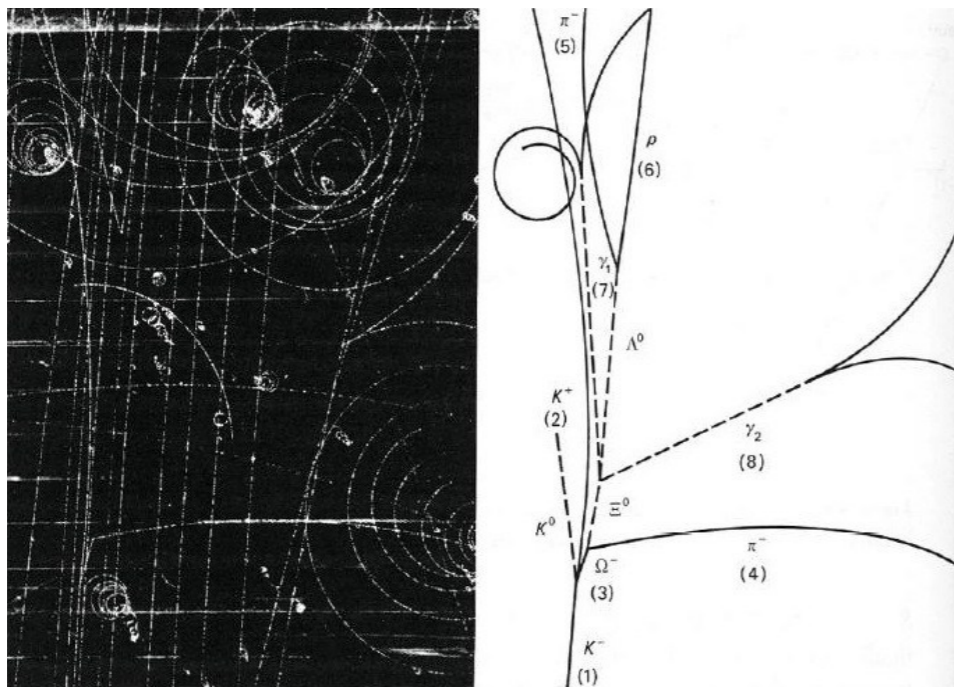
Scoperto da Reines e Cowan solo nel **1956**.

E' una particella neutra e debolmente interagente.



Cowan e Reines

Le particelle "strane"



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

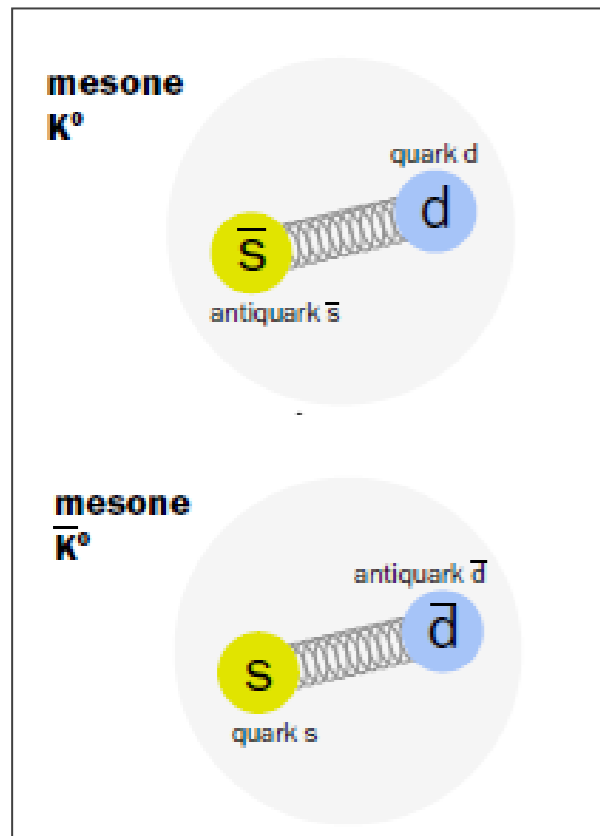
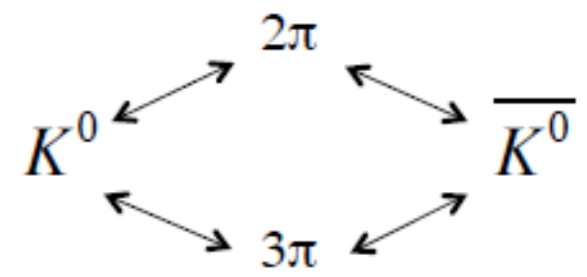
Perché «strani» ?

Il solito destino dei pionieri: quando furono scoperti violavano gli schemi della fisica nucleare dell'epoca. I quark scoperti dopo di loro facevano ben di peggio ma furono chiamati «fascino» e «bellezza» !!!.....

I mesoni strani carichi permisero di osservare la violazione dell'invarianza per riflessione nelle interazioni deboli (il θ - τ puzzle)

I mesoni strani neutri sono composti da un quark s ed un quark d.

Hanno la proprietà di «oscillare», ovvero si tramutano l'uno nell'altro :



Gli adroni

Le tre famiglie di quark:

Up u

Down d

Charm c

Strange s

Truth o Top t

Beauty o Bottom b

Meno massivi

Più massivi

I quark non sono osservabili singolarmente, ma solo attraverso le particelle in cui si combinano:

gli adroni

Mesoni:

combinazione di due quarks (K ..)

Barioni:

combinazione di tre quarks (p, n..)

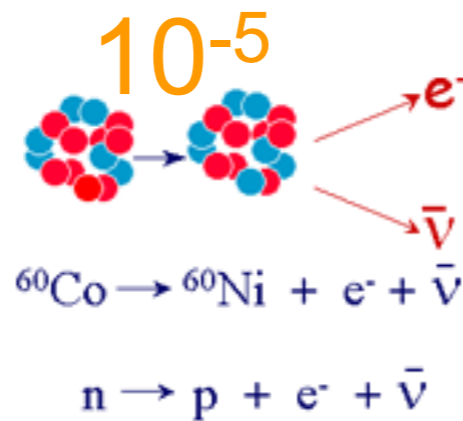
In generale gli adroni derivano le loro proprietà fisiche (carica elettrica, spin, massa, numeri quantici...) da quelle dei quark che li compongono.

Le forze

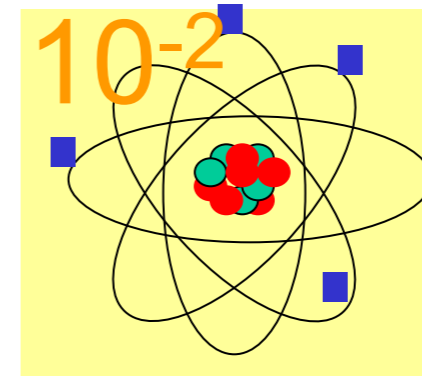
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a **4 interazioni fondamentali**
Responsabili della coesione della materia e del suo decadimento



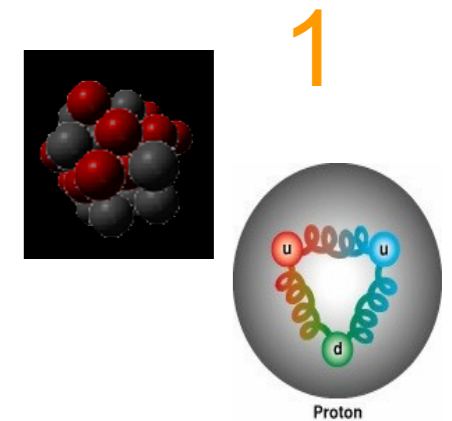
Forza gravitazionale



Forza debole



Forza elettromagnetica



Forza forte (o di colore)



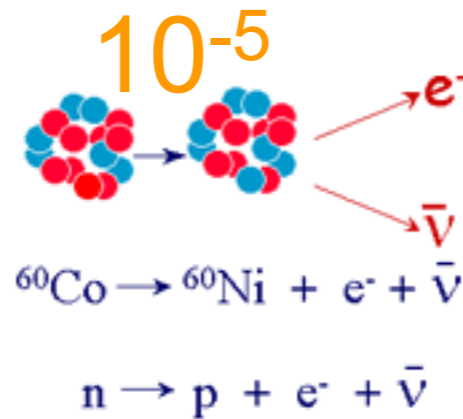
Sono i bosoni (spin intero), i "quanti" del campo di interazione.
Es: Il fotone e' il quanto del campo di interazione elettromagnetica

Le forze

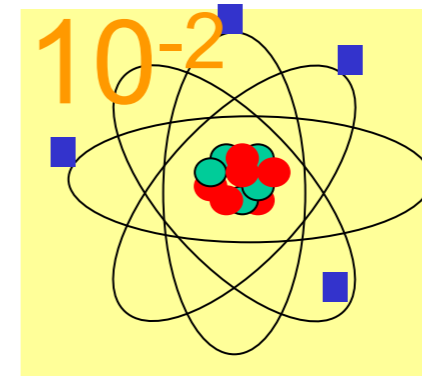
Tutte le forze osservate in natura sono riconducibili a **4 interazioni fondamentali**
 Responsabili della coesione della materia e del suo decadimento



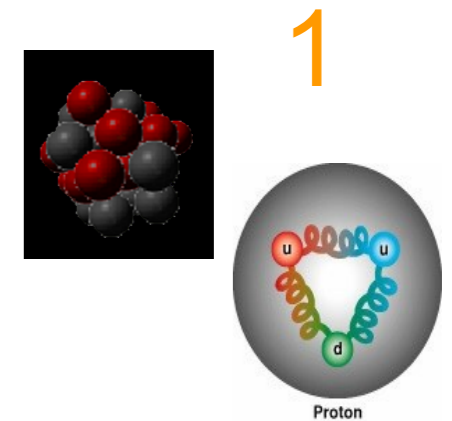
Forza gravitazionale



Forza debole



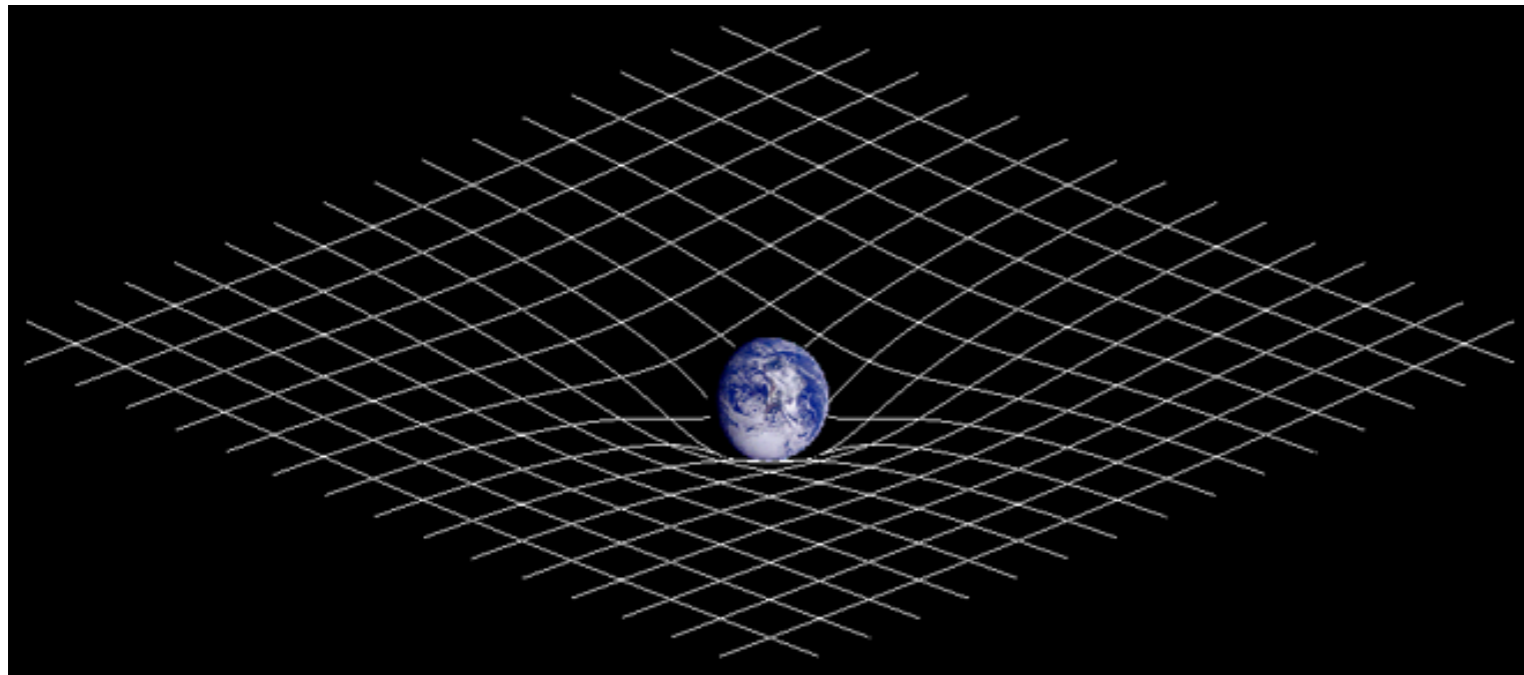
Forza elettromagnetica



Forza forte (o di colore)

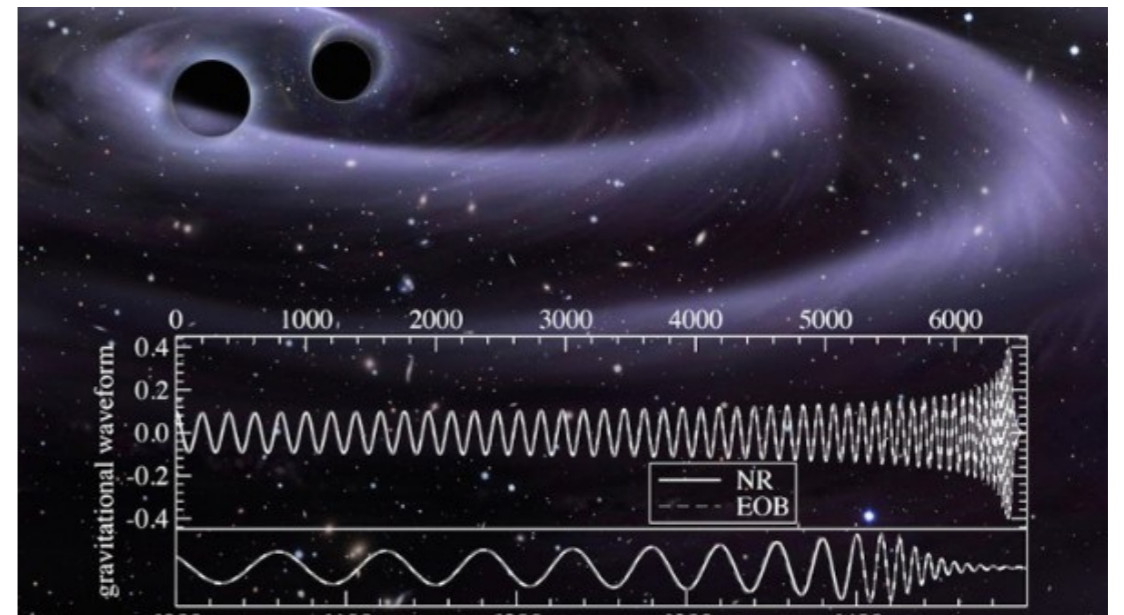
	↕	↕	↕	↕
Mediatore	gravitone (G) Solo ipotizzato	W⁻ W⁺ Z⁰ scoperti	Fotone (γ) scoperto	Gluone (g) scoperto
Particelle coinvolte	tutte	Leptoni e quarks	Particelle cariche	Quark e gluoni

Una parentesi: la Gravita'

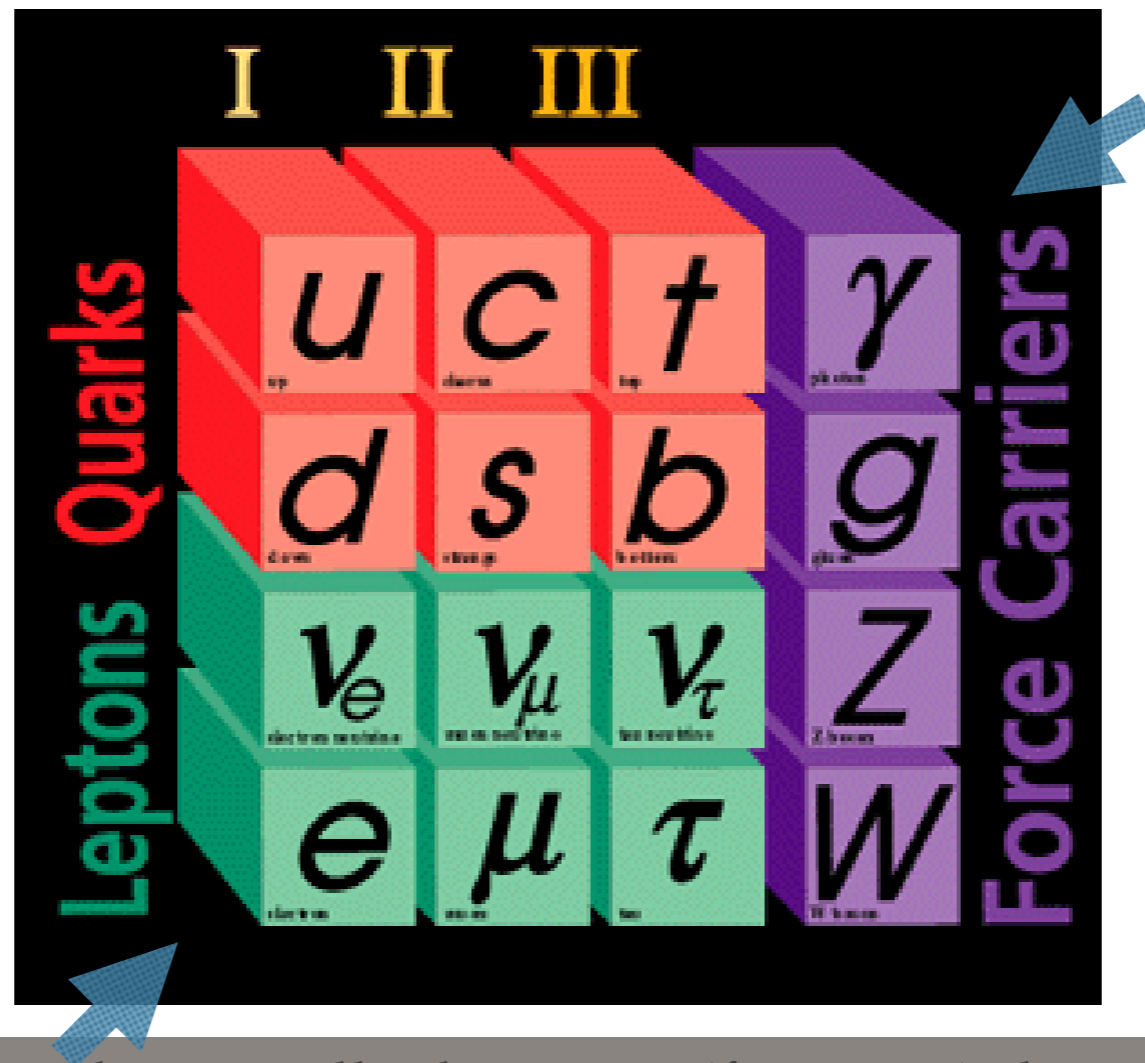


- Una (grande) massa in una regione dello spazio-tempo lo perturba come un sasso lanciato in uno stagno
- tale perturbazione si propaga come un'onda
- debole e difficile da rivelare

- L'onda si propaga anche nel vuoto (=Universo), perche' e' proprio lo spazio 4-D che oscilla!
 - Fenomeno predetto da Einstein nel **1916**, **dimostrato sperimentalmente** dopo 100 anni
- **Ma la questione se la gravita' e' quantistica (gravitone) rimane aperta**



Il Modello Standard



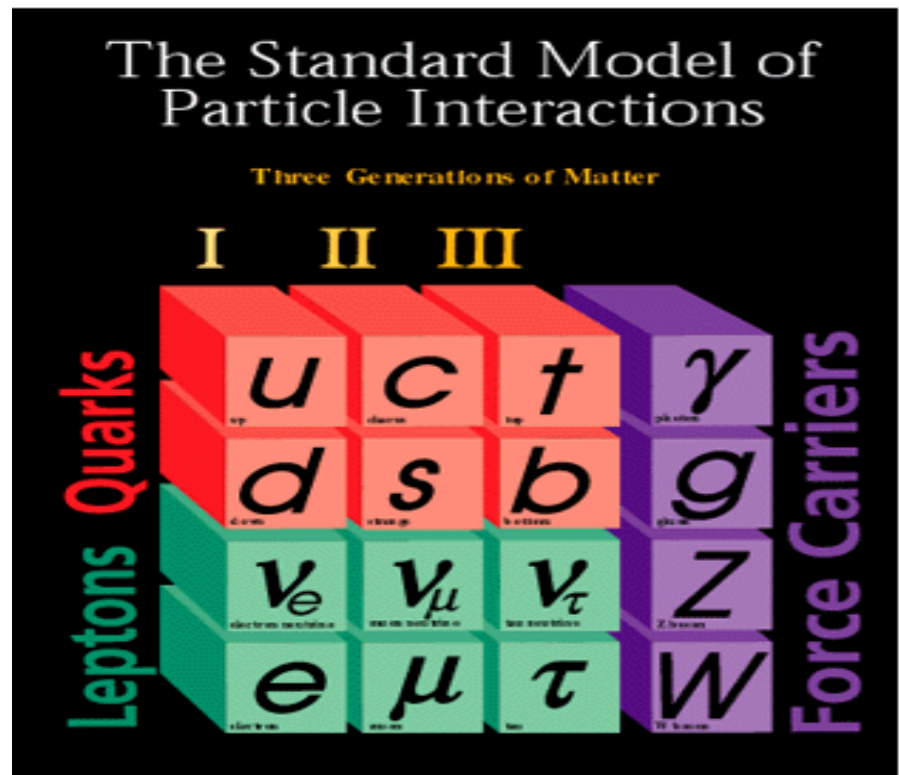
Le forze sono mediate dallo scambio di bosoni (spin 1)

La materia è composta da particelle di spin $\frac{1}{2}$ (fermioni) divise in **leptoni** e **quarks** a seconda delle forze cui sono soggette.

I quark non possono esistere come particelle libere ma possono solo formare particelle più pesanti (protone, neutrone, ...)

Leptoni e quark si dividono in 3 famiglie di massa crescente.

Problemi col modello standard...

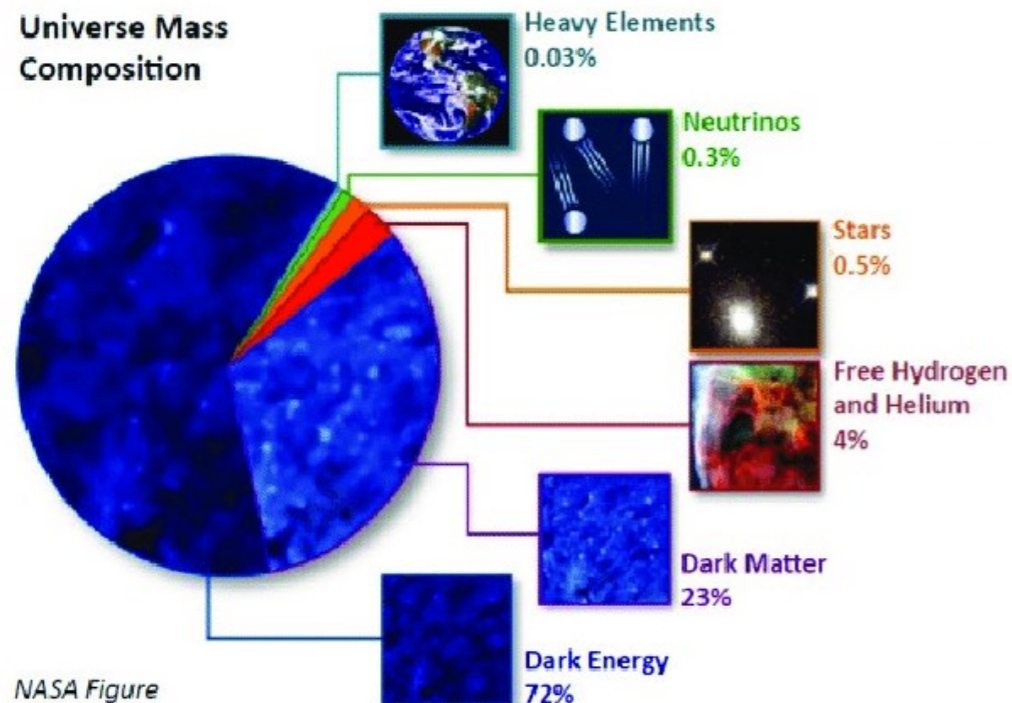


- × Descrive con precisione le nostre osservazioni. Ha previsto l'esistenza del **bosone di Higgs**, il cui campo genera la massa delle particelle.

Ultimo fondamentale mattone

Osservato nel 2012 al CERN.

Nobel 2013 a Higgs ed Engler



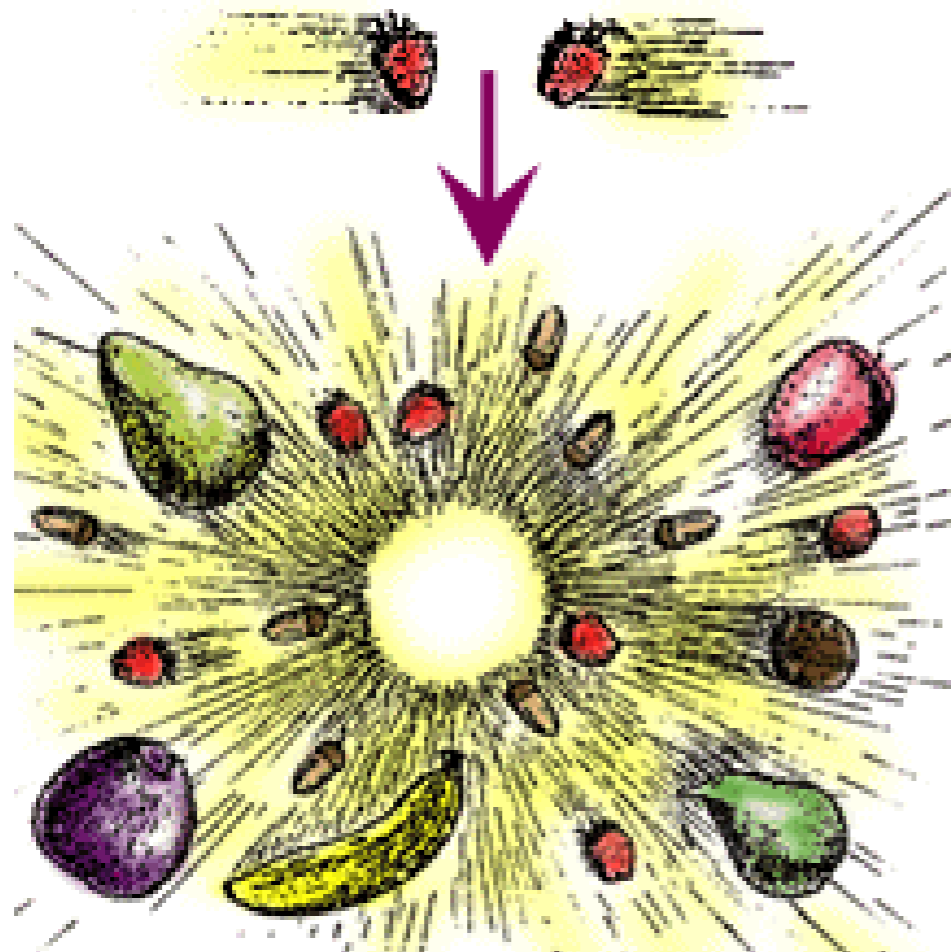
Eppure il MS è sicuramente incompleto e deve necessariamente essere esteso!

- 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 4.9%

cos'è il restante **95.1%**?

Interazioni elettrone-positrone



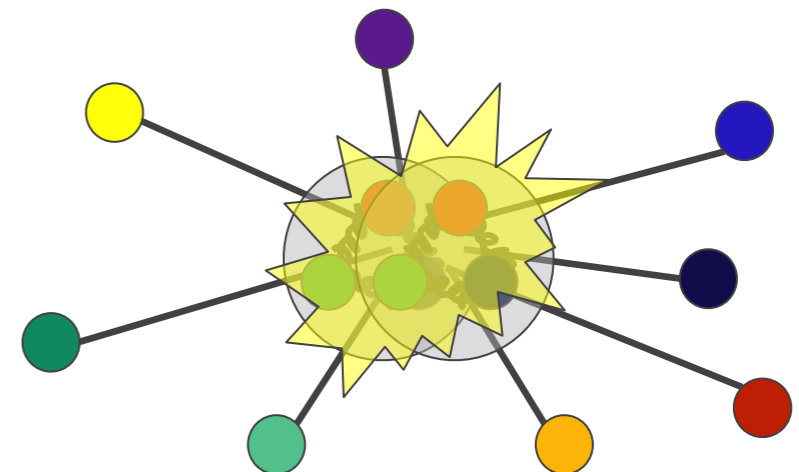
Particella e Anti-particella si annichilano

Grazie alla famosa legge di Einstein:

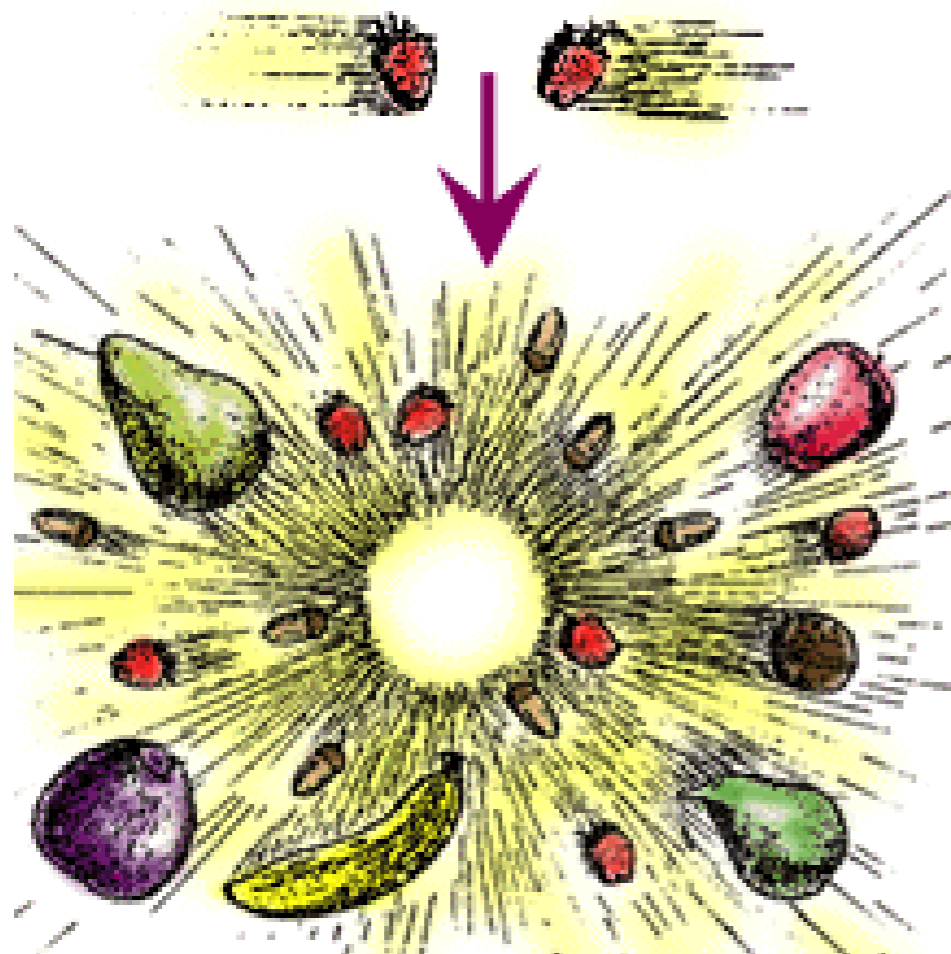
$$E=mc^2$$

con l'energia disponibile vengono create nuove coppie particella-antiparticella (note o sconosciute)

Nelle interazioni, si devono conservare **quantità di moto ed energia!**



Interazioni elettrone-positrone



Particella e Anti-particella si annichilano

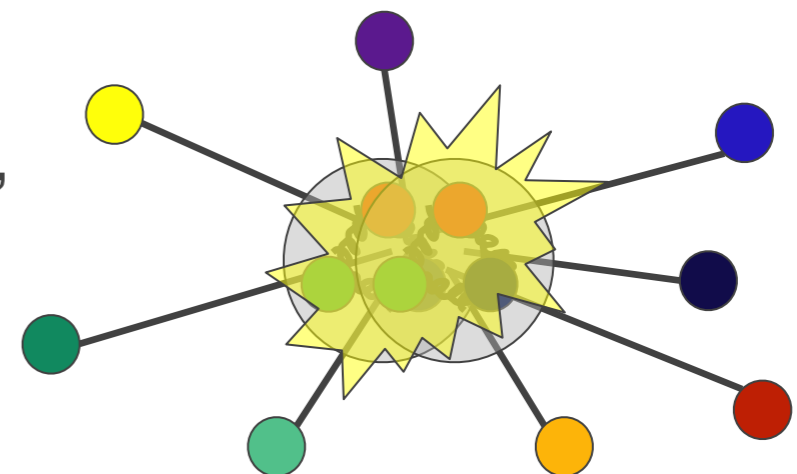
Grazie alla famosa legge di Einstein:

$$E=mc^2$$

con l'energia disponibile vengono create nuove coppie particella-antiparticella (note o sconosciute)

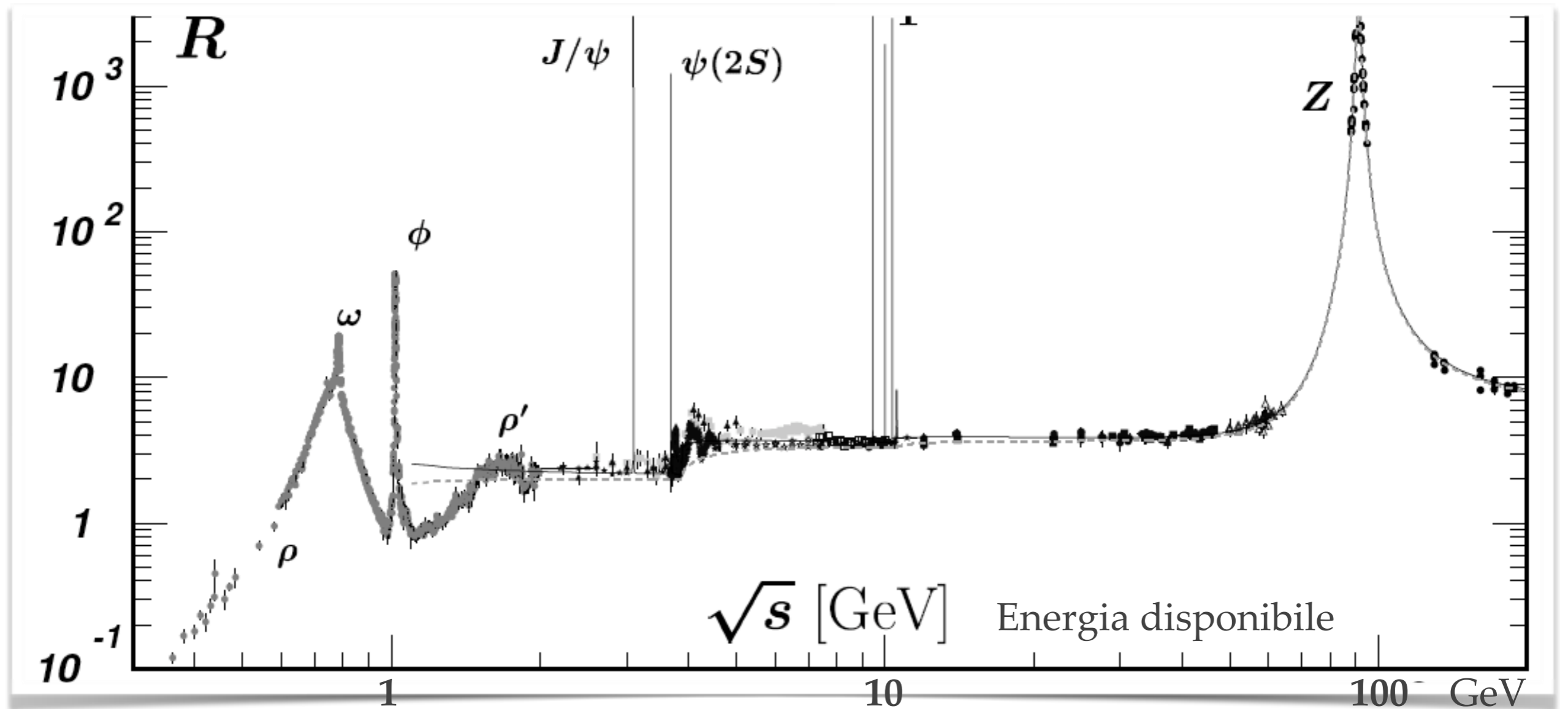
... maggiore e' l'energia, maggiore la probabilita' di produrre nuove particelle "pesanti"

Per questo sono stati sviluppati acceleratori detti «collisori», grazie a un'idea nata ai Laboratori Nazionali di Frascati negli anni '60.



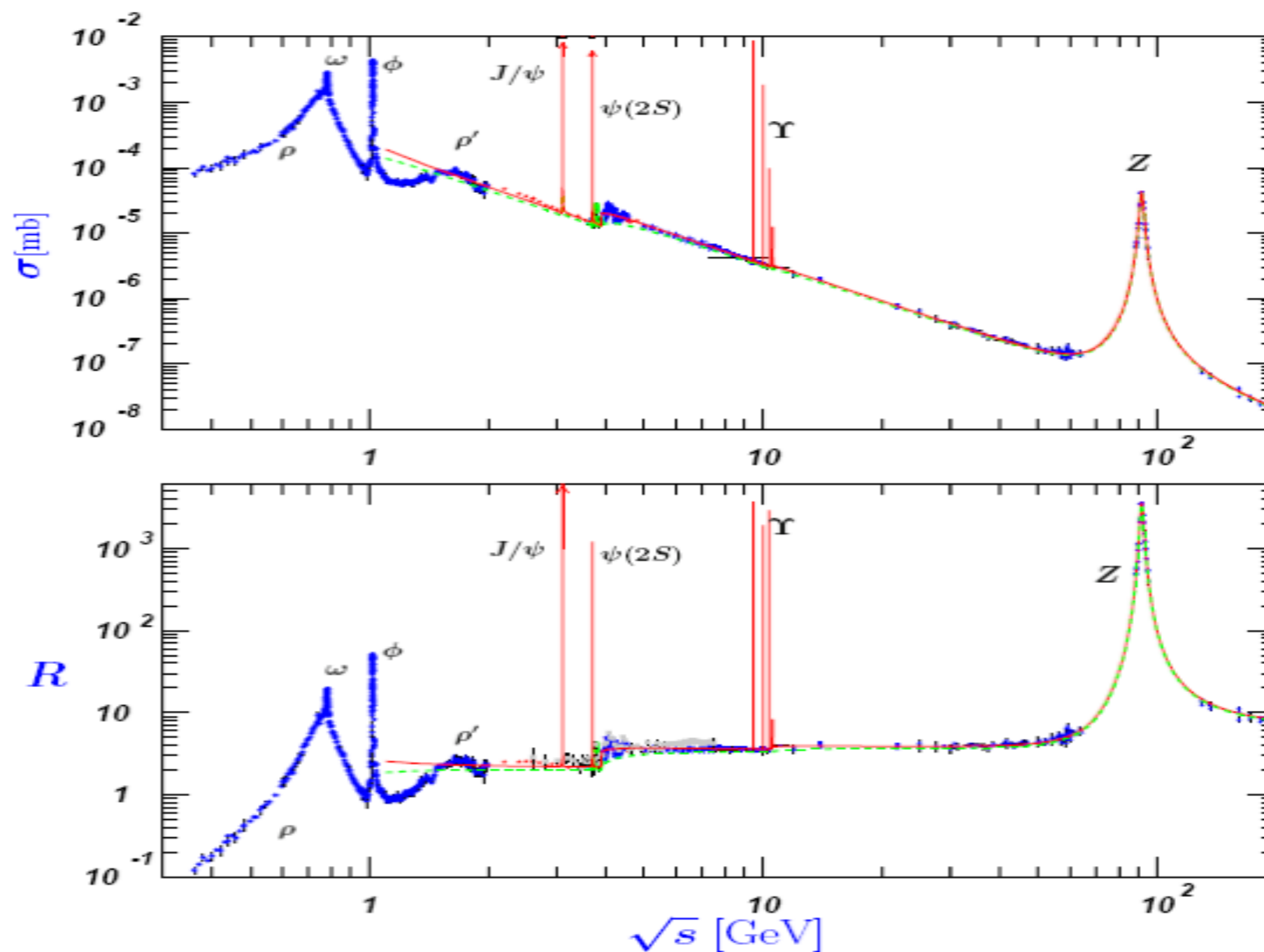
Rapporto R

Rapporto tra il numero di eventi con adroni (ottenuti da quark e anti-quark) e il numero di eventi muone anti-muone



=> Al crescere dell'energia si producono nuovi "sapori" di quark: il **charm (fascino)** e il **beauty (bellezza)** o bottom. Un sesto quark, top, è stato scoperto invece in collisioni protone-protone e ha una massa di $172 \text{ GeV}/c^2$ non ancora raggiunta da esperimenti elettrone-positrone

Nome	Simbolo	Antiparticella	Composizione	Massa (MeV/c ²)
Mesone Phi	ϕ	ϕ	$s \bar{s}$	1019.461±0.019
Mesone J/Psi	J/ψ	J/ψ	$c \bar{c}$	3096.916±0.011
Mesone Upsilon	Υ	Υ	$b \bar{b}$	9460.30±0.26



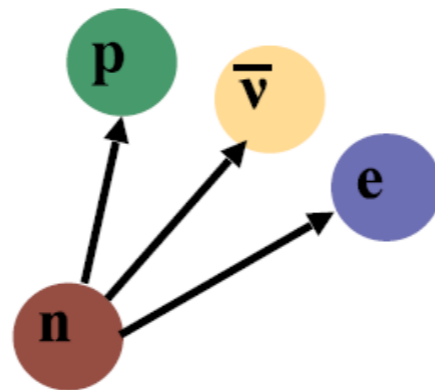
Mesoni

Nome	Simbolo	Antiparticella	Composizione	Massa (MeV/c ²)
Pione carico	π^+	π^-	$u \bar{d}$	139.57018±0.00035
Pione neutro	π^0	π^0	$\frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	134.9766±0.0006
Mesone Eta	η	η	$\frac{u\bar{u}+d\bar{d}-2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$	547.862±0.018
Mesone K carico	K^+	K^-	$u \bar{s}$	493.677±0.016
Mesone K neutro	K^0	\bar{K}^0	$d \bar{s}$	497.614±0.024
Mesone D carico	D^+	D^-	$c \bar{d}$	1869.61±0.10
Mesone D neutro	D^0	\bar{D}^0	$c \bar{u}$	1864.84±0.07
Mesone D strano	D_s^+	D_s^-	$c \bar{s}$	1968.30±0.11
Mesone B carico	B^+	B^-	$u \bar{b}$	5279.26±0.17
Mesone B neutro	B^0	\bar{B}^0	$d \bar{b}$	5279.58±0.17
Mesone B strano	B_s^0	\bar{B}_s^0	$s \bar{b}$	5366.77±0.24
Mesone B con charm	B_c^+	B_c^-	$c \bar{b}$	6275.6±1.1

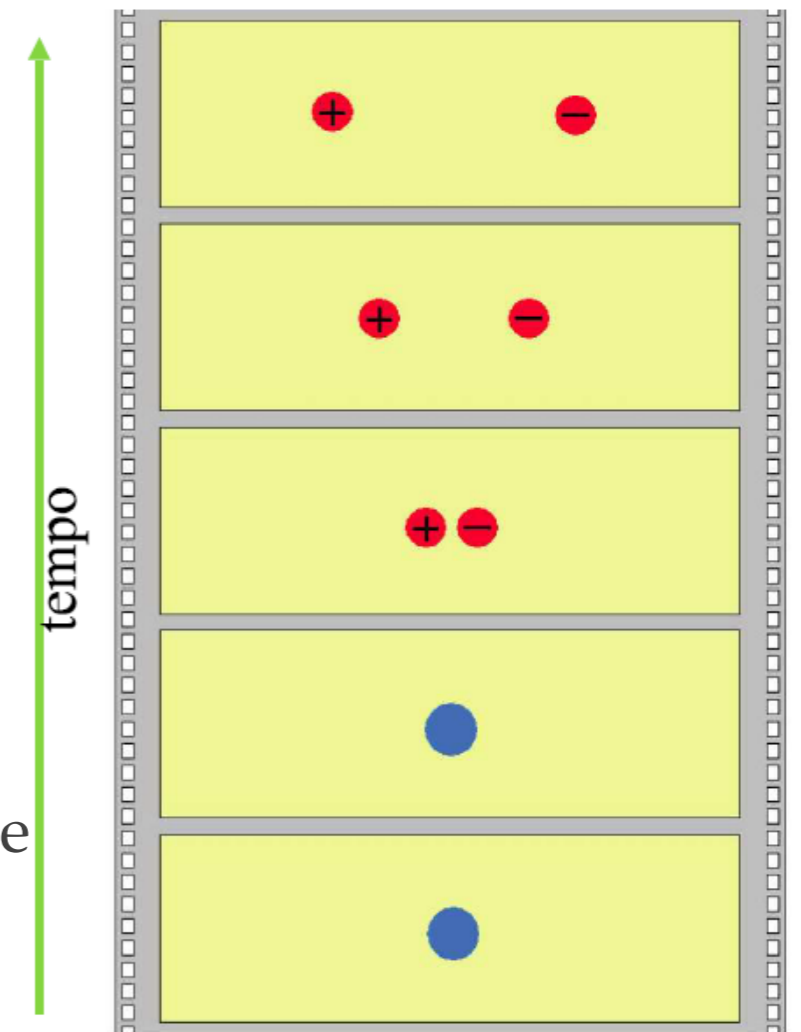
Decadimenti

- Quasi tutte le particelle elementari sono instabili
- Decadono in particelle di massa inferiore con tempi caratteristici (vite medie) che dipendono dall'interazione responsabile della disintegrazione
- Regola: tutte quelle che possono decadere senza violare una **legge di conservazione**, lo faranno!

Esempio: decadimento del neutrone

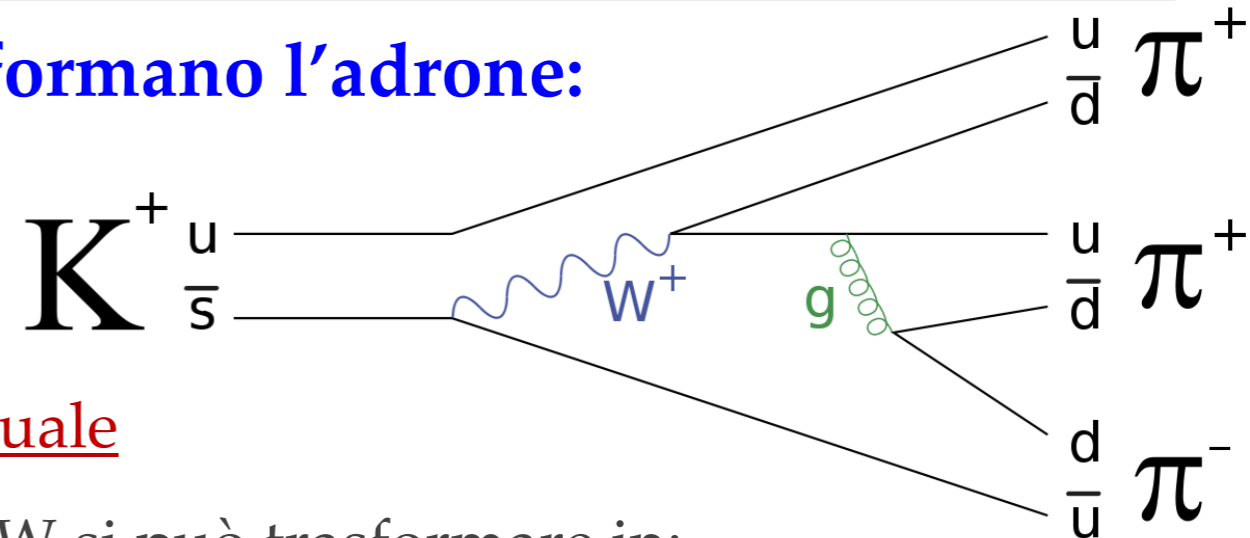


In questo caso l'interazione responsabile è la **forza debole**
La stessa che produce tutti i fenomeni di **radioattività** naturale



Decadimenti deboli

Interpretazione a livello dei quark che formano l'adrone:



- ❖ Un quark decade ed emette un bosone W virtuale
- ❖ Se l'energia disponibile lo consente il bosone W si può trasformare in:
 - ❖ Leptone carico (elettrone, muone o tauone) e leptone neutro (neutrino)
 - ❖ Un quark ed un anti-quark di diverso "sapore" (uno di tipo "up" e uno di tipo "down" che si combinino per dare carica totale 1 o -1)
- ❖ I quark dello stato finale si riorganizzano in adroni anche scambiandosi/emettendo dei gluoni

La prima legge di conservazione è quella della carica elettrica:
la somma delle cariche prima e dopo il decadimento deve restare la stessa !

$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$$

$$K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

~~$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^+$$~~

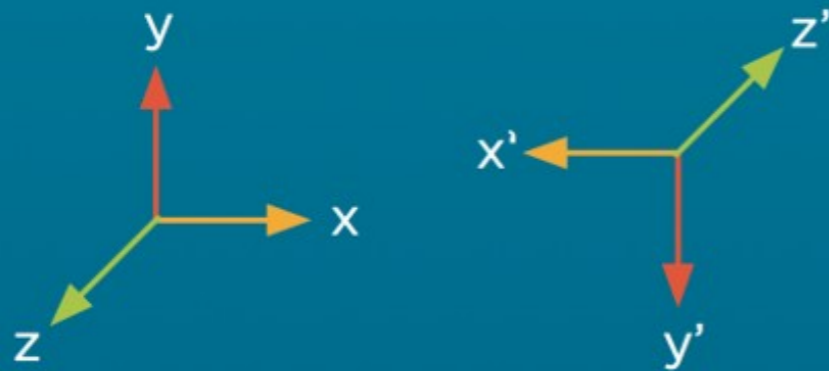
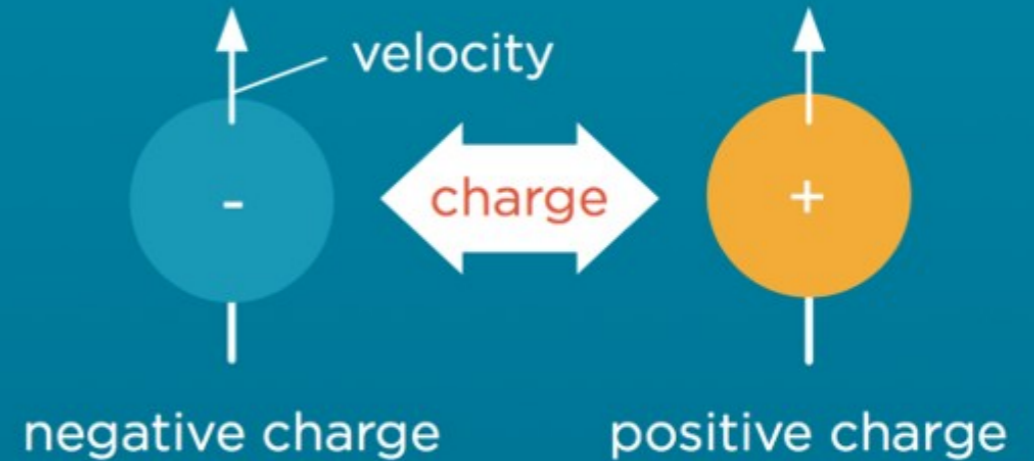
~~$$K_S \rightarrow \pi^- \pi^-$$~~

Le simmetrie

I decadimenti rispettano o meno alcune importanti **SIMMETRIE** a seconda dell'interazione che li produce

C
CHARGE

Charge conjugation swaps positive and negative charges



Parity reversal swaps up and down, left and right, forwards and backwards

P
PARITY

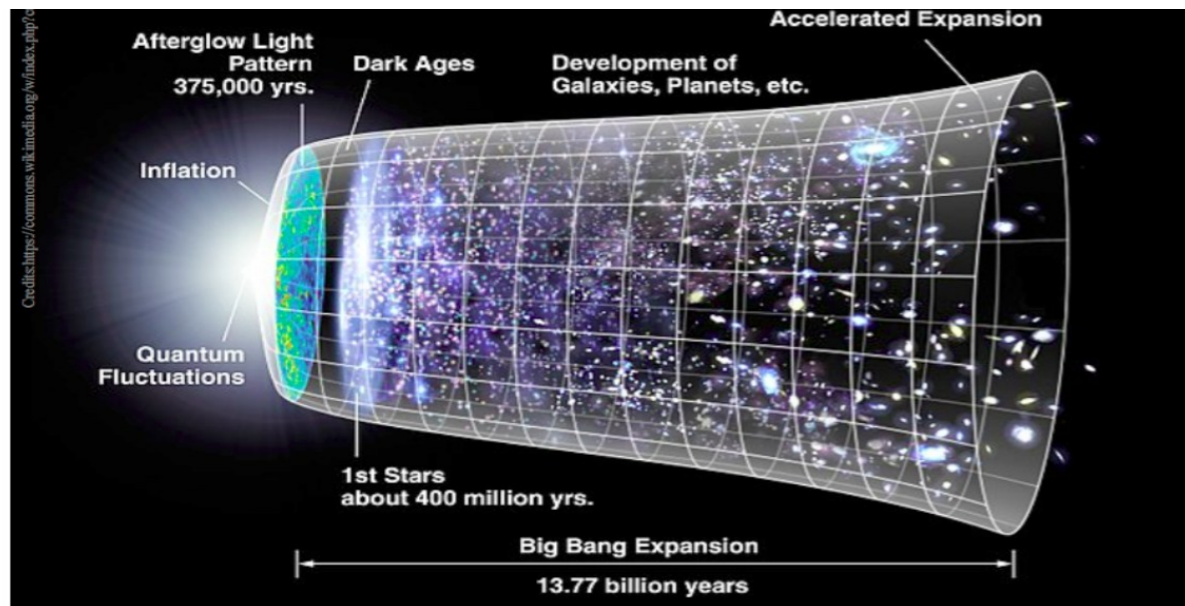
T
TIME

Time reversal swaps past and future



La simmetria CP

...o il mistero dell'antimateria scomparsa



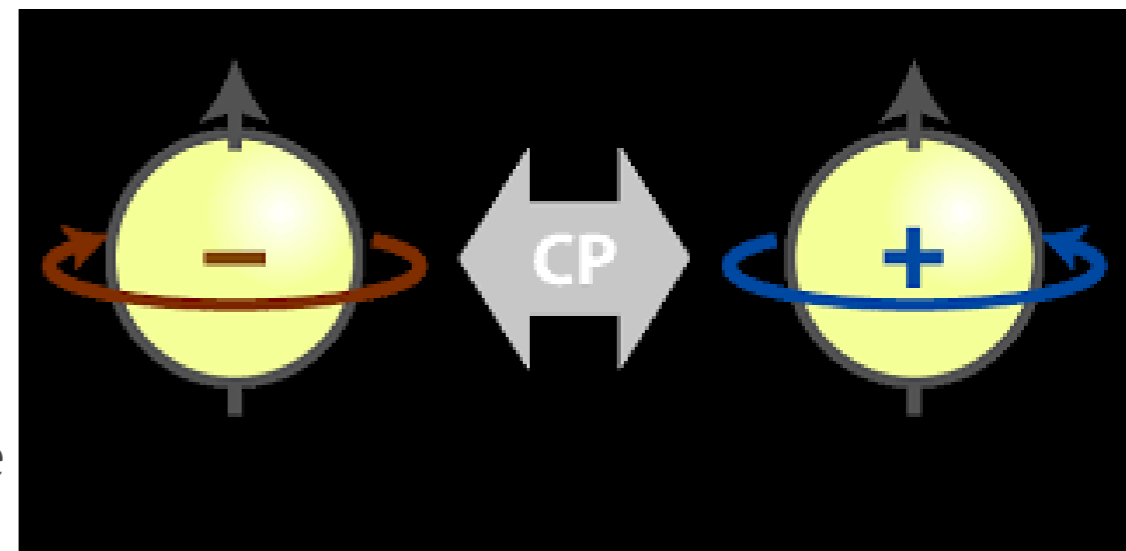
Materia e Antimateria dovrebbero essere state prodotte in egual misura dal Big Bang in poi.

Invece osserviamo solo materia nell'universo:

Dove è finita l'antimateria?

L'applicazione contemporanea delle trasformazioni C e P collega Materia e Antimateria.

Se viene violata, anche poco, da una interazione fondamentale, può spiegare l'assenza di una delle due



Le interazioni deboli violano CP

Una piccola violazione della simmetria CP è stata osservata per la prima volta nei decadimenti deboli dei mesoni «strani».

Successivamente è stata osservata in molti altri decadimenti di adroni composti da quark pesanti.

Il Modello standard prevede in maniera naturale questo fenomeno nelle interazioni deboli. Lo stesso fenomeno avviene nel settore dei neutrini. Purtroppo al momento l'entità della violazione di CP osservata non basta a spiegare l'assenza dell'antimateria nell'Universo.

I processi che violano CP sono ancora sotto studio dettagliato perché ci si aspetta che nuovi fenomeni, non previsti dal MS, possano produrre piccole deviazioni dalle previsioni teoriche attuali.



Take home message

La fisica delle particelle è descritta da un modello teorico detto «Modello standard» che predice con notevole accuratezza i processi che osserviamo.

Tuttavia non capiamo alcune cose molto importanti del nostro universo:

- Cosa è e dov'è la materia oscura?
- Cos'è l'energia oscura?
- Perché non osserviamo antimateria (per esempio galassie di antimateria)? Come è scomparsa l'antimateria che presumiamo si sia formata insieme alla materia?
- Perché le particelle hanno uno spettro di massa così esteso e irregolare?

Ci aspettiamo che esistano dei fenomeni di «nuova fisica» che si accoppiano debolmente alla materia ordinaria e che possono produrre delle piccole deviazioni dalle previsioni del MS: per questo studiamo con grande precisione decadimenti e interazioni delle particelle note agli acceleratori.