

Particles of the Standard Model

La Teoria del... quasi Tutto!

Un viaggio nel
Modello Standard

Introduzione alla fisica delle particelle elementari

- *Un po' di storia*
- *Le particelle elementari*
- *Le forze*
- *Il Modello Standard*
- *Bosone di Higgs, LHC ed oltre ...*



Tutto questo ci consente di affermare che le energie in gioco nel nucleo sono più alte di quelle in gioco nell'atomo.

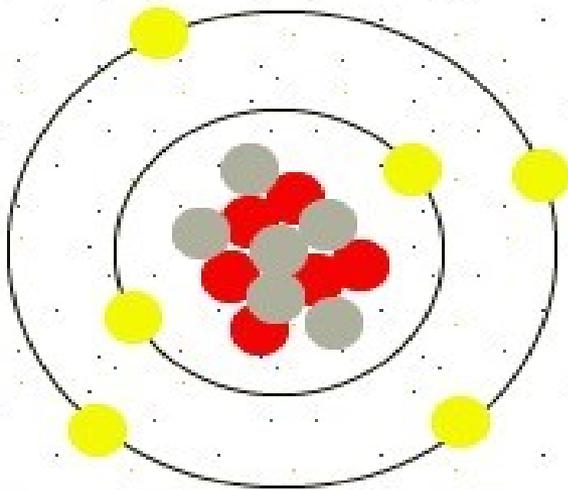
La radioattività però ha una importantissima conseguenza: essa è in grado di trasformare un elemento chimico in un altro.

È quella che si chiama **TRASMUTAZIONE** degli elementi chimici.

Come sognava Harry Potter, sarebbe possibile trasformare il piombo in oro, realizzando la mitica PIETRA FILOSOFALE!



Ricordiamo che il **numero atomico Z** è il numero dei protoni di un atomo, la sua **massa atomica A** è il numero complessivo dei suoi nucleoni, cioè protoni e neutroni. Il carbonio-12 ha massa atomica $A = 12$ e numero atomico $Z = 6$, perché ha 6 protoni e $12 - 6 = 6$ neutroni.



Atomo di carbonio C
6 protoni.
6 elettroni
6 neutroni
 $A = 12$

Se un elemento chimico subisce un decadimento di tipo Alfa, cioè se emette una particella Alfa, ovvero un atomo di elio che ha 2 protoni e 2 neutroni, esso si trasforma in un altro elemento con due protoni e due neutroni in meno. Per esempio, se il Radon-222 (che ha 86 protoni e 136 neutroni) subisce decadimento Alfa, si trasforma in un elemento che ha:

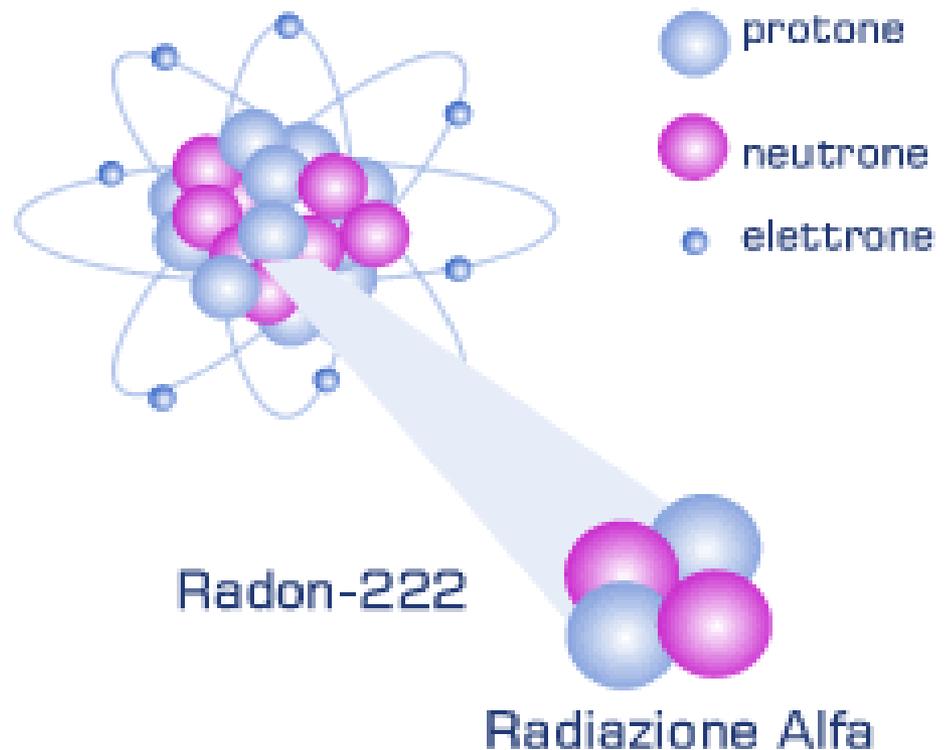
Numero atomico $Z = 86 - 2 = 84$

Massa atomica $A = 222 - 4 = 218$

L'elemento con 82 protoni non è più il Radon, ma il Polonio.
Ne consegue che, decadendo Alfa, un elemento trasmuta
in uno più leggero (in questo caso Polonio-218).

E il decadimento Beta?
Come fa un elettrone a
scaturire dal nucleo, se
esso contiene solo
protoni e neutroni?

La risposta fu fornita dal
fisico italiano **Enrico**
Fermi (1901-1954) presso
l'istituto di Fisica di
Roma in via Panisperna.





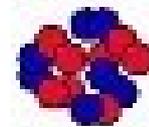
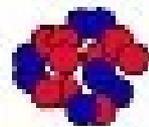
Fermi scoprì che un neutrone è stabile all'interno del suo nucleo ma, in condizioni particolari, può decadere in un protone, un elettrone e una particella leggerissima da lui chiamata **neutrino**, che fu osservata più tardi, nel 1956, da F. Reynes e C. Cowan. Se perciò un neutrone del nucleo diventa un protone, ciò significa che A resta lo stesso (le due particelle hanno circa la stessa massa), ma il numero atomico Z aumenta di uno!!

Si consideri un nucleo di Cobalto-60, che ha 27 protoni e 33 neutroni. Se esso subisce un decadimento Beta, si trasforma in un altro elemento che ha:

Numero atomico $Z = 27 + 1 = 28$ e Massa atomica $A = 60$

L'elemento con 28 protoni non è più il Cobalto ma il Nichel. Ne consegue che, decadendo Beta, un elemento trasmuta in uno con più protoni, in questo caso Nichel-60, emettendo proprio un elettrone (e^-) e un antineutrino (simbolo $\bar{\nu}$).

Decadimento β nucleare



In questo modo, partendo dall'ultimo elemento conosciuto, è stato possibile produrre **NUOVI ELEMENTI CHIMICI** non riscontrabili in natura. Se l'uranio-238 (che ha $Z = 92$) decade Beta, si trasforma in un elemento nuovo con $Z = 93$ che fu chiamato **nettunio**, sintetizzato per la prima volta da E.M. Mac Milian nel 1940; questo a sua volta, decadendo Beta, si trasforma in **plutonio** con $Z = 94$.

In teoria si potrebbe procedere all'infinito a costruire nuovi elementi.



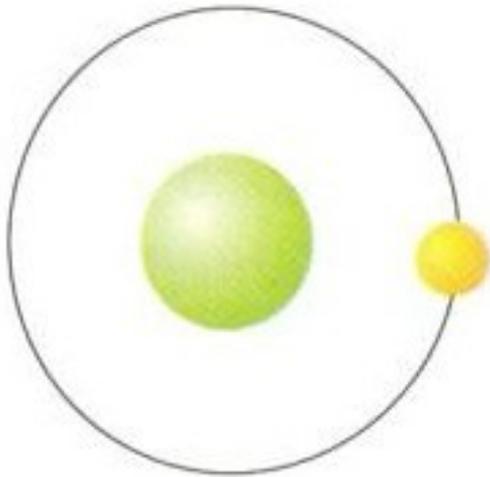
Ma perché "in teoria"?



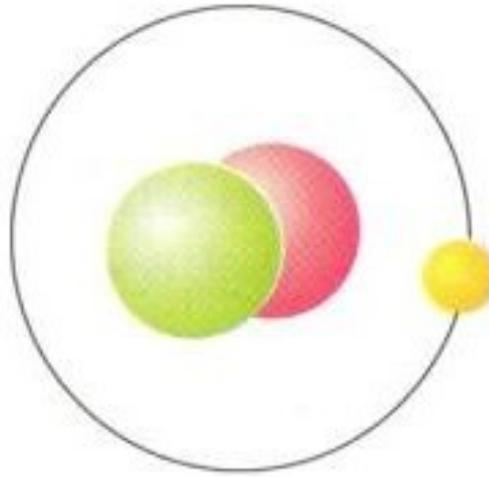
Un campione di plutonio, elemento velenosissimo ed utilizzato purtroppo per realizzare ordigni nucleari

Anzitutto, esistono nuclei che hanno lo stesso numero atomico Z , ma diversa massa atomica A . In pratica si tratta di nuclei con lo stesso numero di protoni, ma diverso numero di neutroni. Questi nuclei sono chiamati **ISOTOPI** (dal greco "stesso posto", perché occupano lo stesso posto nella Tavola Periodica degli Elementi)

L'idrogeno, ad esempio, ha tre isotopi: il **Protio** ($A = 1$) con un solo protone nel nucleo, il **Deuterio** ($A = 2$) con un protone e un neutrone, e il **Tritio** ($A = 3$), con un protone e due neutroni.



Protio



Deuterio



Tritio

A scoprire gli isotopi fu l'inglese **Frederick Soddy** (1877-1956). Ci sono 21 elementi (come berillio, fluoro o sodio) che possiedono in natura un solo isotopo, anche se nella maggior parte dei casi gli elementi chimici sono costituiti da più di un isotopo, come l'idrogeno.



Ogni elemento tuttavia ha **isotopi stabili** ed **isotopi instabili**. Che significa? Alcuni di essi non subiscono alcuna trasmutazione nucleare, e non mutano mai, mentre altri sono radioattivi e, attraverso decadimenti Alfa o Beta, si trasformano presto o tardi in altri elementi.

Così, il protio e il deuterio sono stabili, mentre il tritio è instabile e tende a trasformarsi in elio-3.

Si chiama **VITA MEDIA** di un isotopo radioattivo il tempo che il 50 % di esso impiega per decadere in un altro elemento.

Il Tritio ha una vita media di 12,3 anni. Alcuni isotopi hanno una vita media brevissima, altri invece ce l'hanno lunghissima: l'uranio-238, per esempio, ha una vita media di ben 4 miliardi e 447 milioni di anni.

Questo fatto è importante, perché l'uranio in realtà, come tutti gli elementi molto pesanti, è **pri-vo di nuclidi stabili**, eppure noi lo troviamo in natura in vaste miniere, per esempio nel Congo.

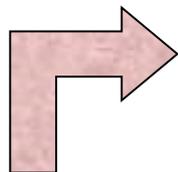


Pechblenda, un minerale d'uranio

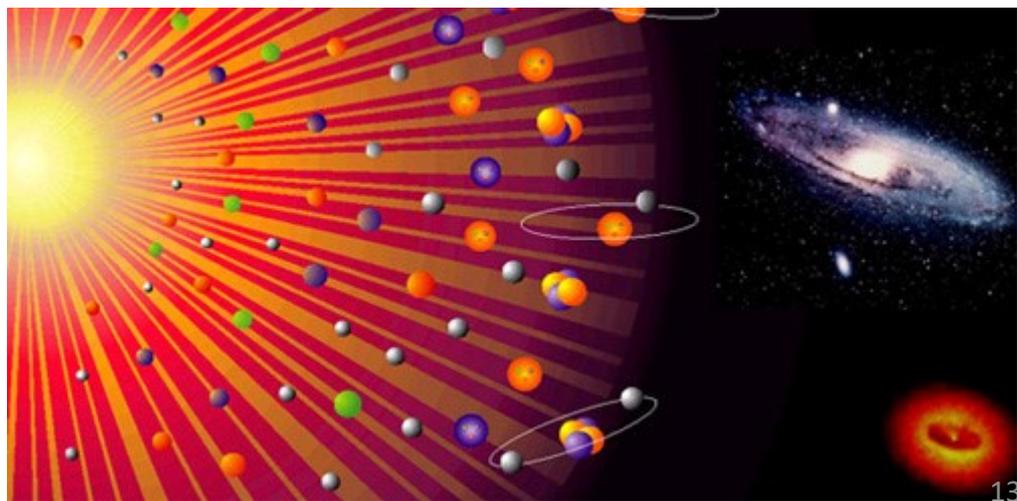
Nel Big Bang furono prodotti praticamente tutti gli isotopi possibili, ma la maggior parte di essi sono decaduti perchè avevano una vita media troppo breve.

Quelli a lunga vita sono sopravvissuti proprio perchè non hanno fatto in tempo a sparire completamente. L'uranio che oggi troviamo in natura è stato fucinato dentro il Big Bang, ma è una specie di FOSSILE NUCLEARE. Elementi di questo tipo sono chiamati **primordiali**.

Cerchiamo ora di capire perchè i nuclei più pesanti non hanno isotopi stabili.



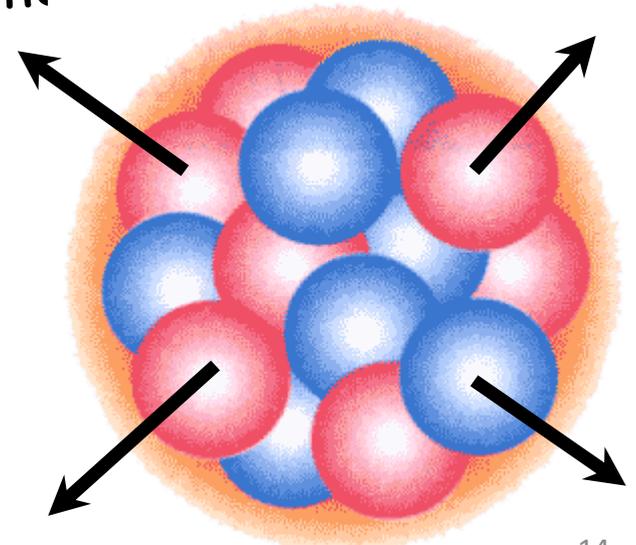
Rappresentazione artistica
del Big Bang



Il nucleo atomico è formato da particelle positive, i protoni. Ma noi sappiamo che particelle di ugual carica si respingono. Come mai allora il nucleo dell'atomo è così stabile?

Sempre il solito Enrico Fermi congetturò che esistesse una forza agente tra i nucleoni (protoni e neutroni), di tipo attrattivo e 100 volte più forte della repulsione elettrostatica, in grado di tenere coeso il nucleo. La denominò **FORZA NUCLEARE FORTE**, mentre chiamò **forza nucleare debole** quella responsabile del decadimento β .

Il nucleo dunque sopravvive grazie ad un tira e molla tra la repulsione elettrica e l'attrazione nucleare forte. Però c'è un problema.

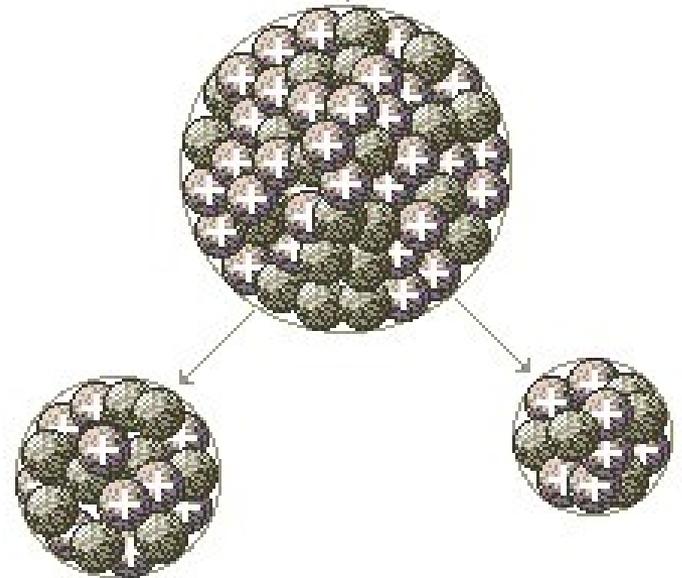


La forza gravitazionale e quella elettromagnetica sono **FORZE A LUNGO RAGGIO**, cioè hanno un raggio d'azione praticamente infinito. Le due forze nucleari invece sono **A CORTO RAGGIO**, cioè agiscono solo su una distanza dell'ordine delle dimensioni nucleari

.Per questo, se il nucleo è troppo grosso, la repulsione elettrica prevale sull'attrazione nucleare, e il nucleo diventa fatalmente **instabile**.

Addirittura, i nuclei molto grandi come quelli di uranio e plutonio vengono spaccati in due dalla repulsione elettrica: si parla di **FISSIONE SPONTANEA**.

(il fenomeno della fissione fu poi utilizzato da Fermi per accendere il primo reattore nucleare)



neutroni

Se la forza debole si è resa necessaria per spiegare i decadimenti beta, la repulsione reciproca tra i protoni all'interno di un nucleo ha imposto l'esistenza di una forza forte senza la quale il nucleo non potrebbe esistere

la sua intensità tipica è un centinaio di volte maggiore di quella della forza elettromagnetica che, da sola, farebbe andare in pezzi il nucleo (Legge di Coulomb).

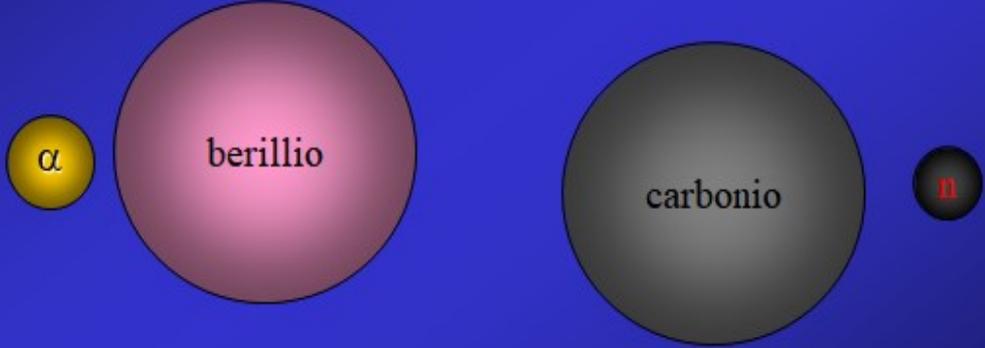
Non basta sapere che l'unico modo per tenere unito il nucleo è fare ricorso a una forza così gigantesca. Qual è la sua origine?

IL NEUTRONE

Che le particelle conosciute potessero essere composte da particelle ancora più piccole, alcuni fisici lo sospettavano già negli anni 50, di fronte alla rivelazione di particelle sempre più massicce, e soprattutto dopo la scoperta del tutto inattesa che il neutrone, pur essendo privo di carica, è dotato di un momento magnetico proprio, come se avesse dei costituenti carichi.

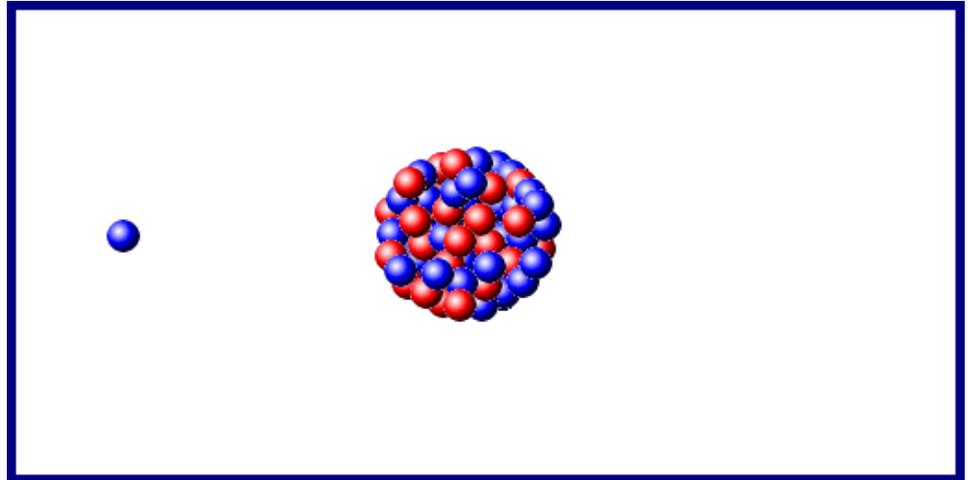
La scoperta del neutrone

Chadwich, 1932



Il neutrone è una particella con massa quasi uguale a quella del protone

15



le tre particelle ed il fotone

All'inizio degli anni trenta del Novecento, dunque, tutta la materia conosciuta sembrava poter essere descritta mediante tre sole particelle, immaginate come "sferette" fondamentali e indivisibili: il **PROTONE**, il **NEUTRONE** e l'**ELETRONE**, cui andava aggiunto solo il **FOTONE**, il quanto di luce introdotto nel 1905 da Albert Einstein (1879-1955), per interpretare la propagazione delle onde elettromagnetiche

Le particelle sub-atomiche hanno caratteristiche **ELETTRICHE** diverse:

- I protoni hanno carica elettrica positiva ($+1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).
- I neutroni non hanno carica elettrica.
- Gli elettroni hanno carica negativa opposta a quella dei protoni ($-1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

Particella	Massa (kg)	Carica elettrica (C)
protone	$1.672 \cdot 10^{-27}$	$1.60 \cdot 10^{-19}$
neutrone	$1.675 \cdot 10^{-27}$	0
elettrone	$9.11 \cdot 10^{-31}$	$-1.60 \cdot 10^{-19}$

Sembrava un risultato davvero straordinario ed appagante: dopotutto lo scopo ultimo della scienza consiste proprio nello

sforzo di scoprire veramente
(p^+ , n , γ)
dello scien.

numero
ti (e^-
anche

Ma il proliferare ben presto tutti ci circonda (elementi di

e fece
iò che
i



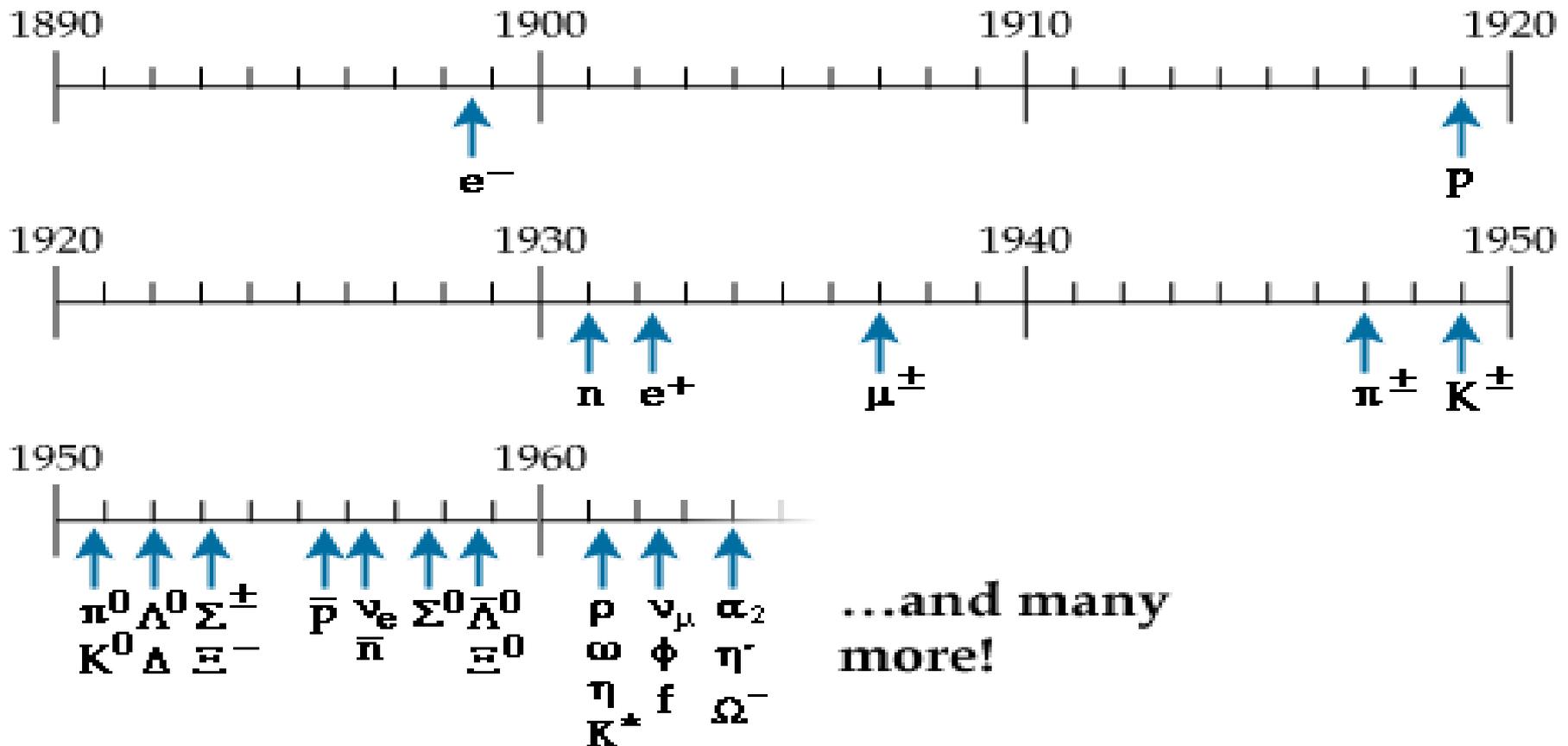
PARTICELLE ...ELEMENTARI

A metà degli anni sessanta inaspettatamente si conosceva già un gran numero di corpuscoli, e il problema della classificazione già prospettato per gli atomi degli elementi chimici si pose di nuovo, su una scala più piccola.

L'incredibile "zoo" delle particelle subatomiche poteva trovare una sistemazione attraverso un numero limitato di oggetti fondamentali?

Questo poteva avvenire solo se le cosiddette particelle elementari... non sono elementari, ma hanno a loro volta dei componenti.

1950 - 1960: esperimenti → tantissime nuove particelle
 Grande confusione!!

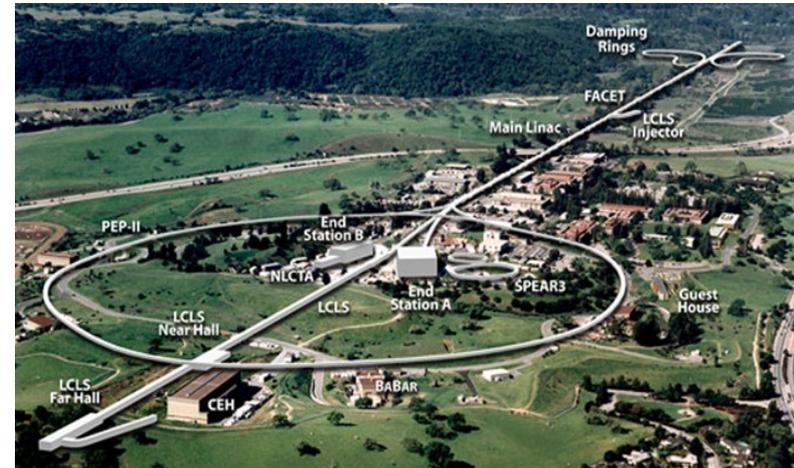


Vengono creati molti modelli e teorie, ma nessuna riesce a trovare un riscontro sperimentale

Interazione nucleare forte

Dato però che le dimensioni di un nucleone sono dell'ordine di un Fermi, cioè di un femtometro (1×10^{-15} m), per indagare la sua struttura interna occorre bombardare un nucleo con particelle molto più piccole dei nucleoni, per esempio con gli elettroni, con un'energia enorme.

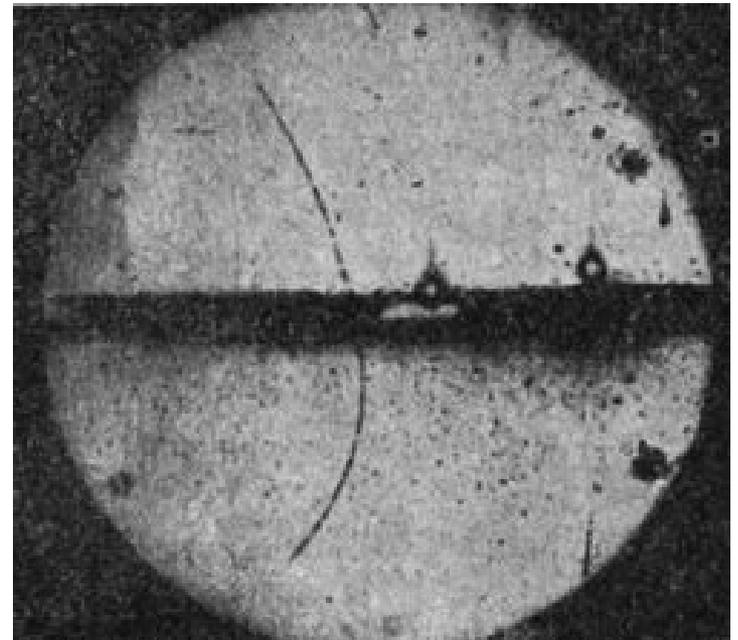
Nello **S**tanford **L**inear **A**ccelerator of **C**alifornia si cominciò a lanciare contro i protoni contenuti nell'idrogeno liquido dei fasci di elettroni con energie superiori ai 20 GeV, dall'analisi delle modalità con cui gli elettroni erano deflessi, si intuì



che i bersagli erano dotati davvero di una struttura interna (analogamente al famoso esperimento di Rutherford con raggi alfa, il quale aveva permesso di affermare che l'atomo possedeva un nucleo dentro di esso).

Tuttavia, proprio mentre la Fisica Atomica sembrava in grado di ridurre la materia a soli tre componenti (protone, neutrone, elettrone), la Fisica Nucleare complicò irrimediabilmente le cose, allontanandoci dalla sperata Teoria del Tutto, in grado di spiegare ogni cosa con soli pochi elementi. Ben presto, infatti, vennero irrimediabilmente scoperte nuove PARTICELLE SUBATOMICHE.

La prima fu il già citato neutrino di Fermi. Nel 1932 **Carl Anderson** (1905-1991) fotografò (vedi a destra) le tracce di una particella identica all'elettrone ma di carica positiva, da lui chiamata **positrone**. Era la prima ANTIPARTICELLA conosciuta.





Le antiparticelle erano state previste dal fisico francese **Paul Dirac** (1902-1984); oggi sappiamo che ogni particella ha la sua antiparticella, in tutto uguale fuorché nella carica, che è opposta. Così, l'**antiprotone** è un protone di carica negativa.

Ad esse si aggiunsero poi altre particelle dai nomi esotici. Alcune erano molto massicce come il protone e il neutrone, e vennero chiamate **BARIONI** (es. **Csi**, **Sigma**...);

altre erano leggere come l'elettrone, e vennero chiamate **LEPTONI** (es. **Mu**, **Tau**); altre ancora avevano masse intermedie e vennero dette **MESONI** (es. **Pi**, **Kappa**...)

A partire da uno zoo di 119 elementi chimici ci eravamo ridotti a sole tre particelle subatomiche, ed ora ci ritroviamo tra le mani un altro zoo di almeno 100 corpuscoli nuovi.

Come uscirne?

RÉPUBLIQUE DE GUINÉE
OFFICE DE LA POSTE GUINÉENNE

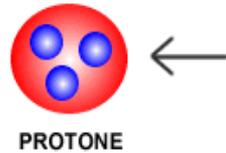
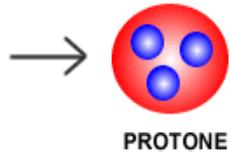
750F



MURRAY GELL-MANN

Il colpo di genio lo ebbe l'americano **Murray Gell-Mann** (1929-vivente), il quale ipotizzò che era possibile costruire tutte le particelle subatomiche conosciute usando solo tre nuove particelle e le relative antiparticelle. Egli chiamò queste particelle **QUARK** (da un verso del "Finnegan's Wake" dello scrittore irlandese James Joyce)

Quark



WWW.ANDREAMININI.ORG

Insieme a George Zweig (1937-), discepolo del grande Richard P. Feynman, Murray Gell-Mann (1929-) furono due veri e propri rivoluzionari nel campo della Fisica delle particelle:

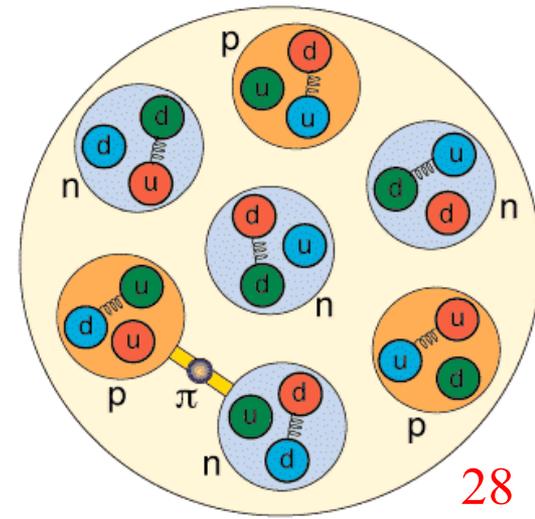
Entrambi, indipendentemente l'uno dall'altro, nel 1964 elaborarono la teoria matematica di uno dei pilastri fondanti della Fisica degli Anni Duemila:

il Modello a Quark.

Negli anni '60 la introduzione matematica dell'esistenza dei *quark* (Gell-Mann/Ne'emen): permise di spiegare le centinaia di particelle osservate, sulla base di sole 3 particelle (*up, down, strange*). In base a tale teoria :

- I quark hanno carica elettrica frazionaria.
- La combinazione opportuna di 2 o 3 quark (**ADRONE**) fornisce una particella a carica intera (rispettivamente **mesoni** e **barioni**)

Per di più si ipotizzò il *confinamento* IMPONENDO che le interazioni tra quarks abbiano caratteristiche tali da impedire ad un quark di esistere isolato

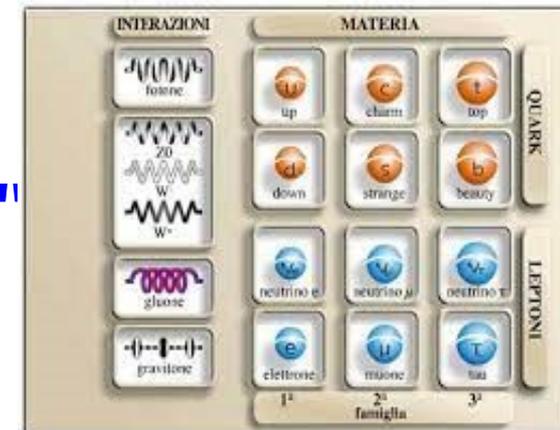
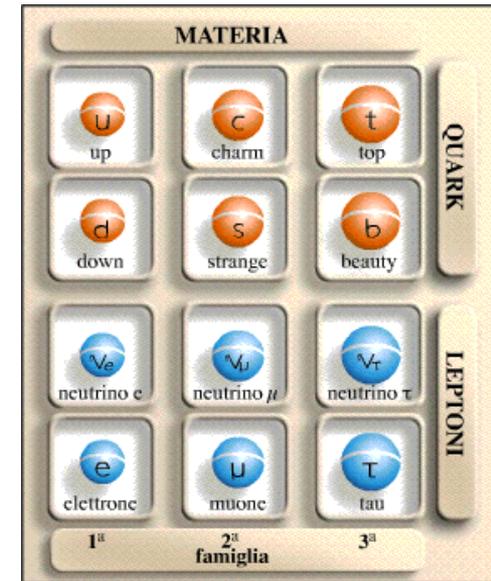


Il modello Standard (1964)

Idea chiave:

Ci sono due generi di particelle:

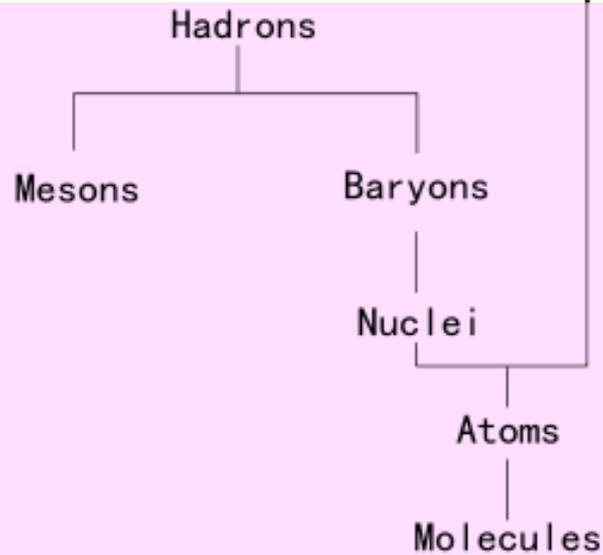
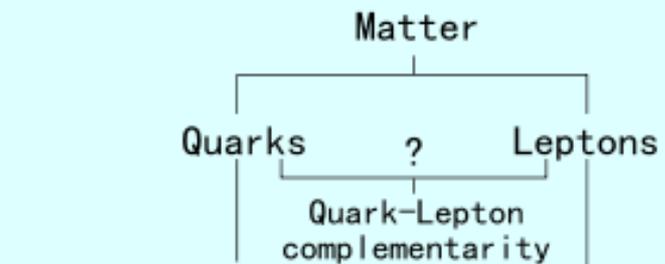
- particelle che sono materia (i quark ed i leptoni)
- particelle che mediano le forze (ogni tipo di interazione fondamentale agisce "mediante" una particella mediatrice di forza)



In seguito la gravita` viene inclusa nella discussione anche se in realta' non appartiene al modello standard.

Il modello standard (1964)

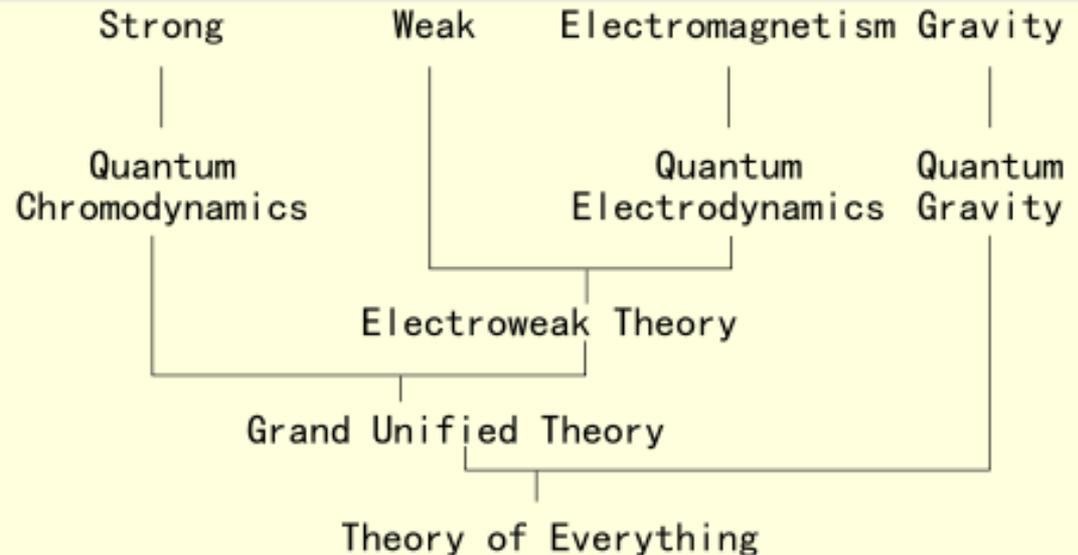
Elementary Particles



Composite Particles

Force Carriers

Glueons W & Z bosons Photons Gravitons



Forces