

La Fisica Nucleare e delle Particelle Elementari

Associazione
UNIVERSITA'
DEL TEMPO LIBERO
DI CARAVAGGIO *aps*



G. Battistoni
INFN Milano

Corpuscoli emessi da alcune sostanze

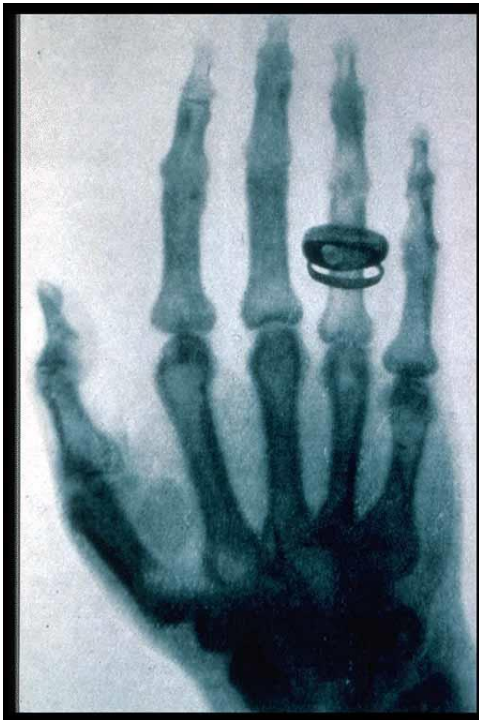
- **1885:** Eugen Goldstein scopre che esistono delle particelle che sotto l'azione di un campo elettrico si muovono in direzione opposta ai “raggi catodici”
- Hanno carica elettrica positiva
- Furono battezzati con il nome di “protoni” più tardi, da E. Rutherford, nel 1919. Fu lui che ne comprese l'importanza:



- Risiedono nel nucleo atomico al centro dell'atomo

I Raggi X

- **1895:** W. Röntgen, studiando anche lui i raggi catodici, scopre questo tipo di radiazione penetrante, non visibile
- Non hanno carica elettrica positiva



- Solo molto più tardi si capì che erano “fotoni” di origine atomica

Premio Nobel 1901

L'elettrone

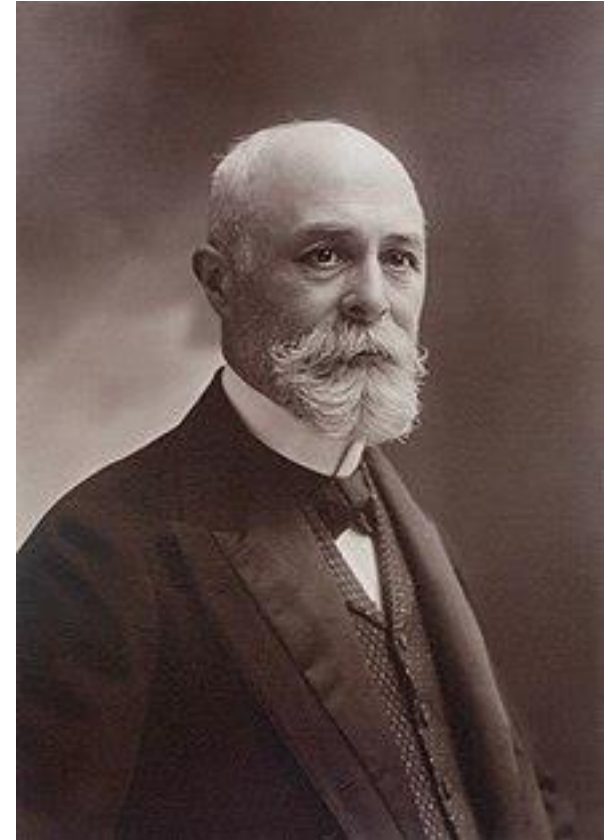
Premio Nobel 1906



- **1897:** J.J Thomson, svolse una serie di esperimenti che dimostrarono che i raggi catodici erano costituiti da singole particelle, piuttosto che onde, atomi o molecole
- Stimò in maniera accurata la carica elettrica e la massa, trovando che le particelle dei raggi catodici, che lui chiamò "corpuscoli", avevano probabilmente una massa migliaia di volte inferiore a quella dello ione idrogeno
- Mostrò come le particelle cariche negativamente prodotte dai materiali radioattivi, dai materiali riscaldati e dai raggi catodici erano della stessa natura
- Il nome "elettrone", inizialmente usato nel 1874 da G. Stoney per indicare il concetto di "unità di carica elettrica fondamentale" fu nuovamente proposto per identificare tali particelle dal fisico irlandese G. FitzGerald e da allora il nome venne universalmente accettato

Elettroni

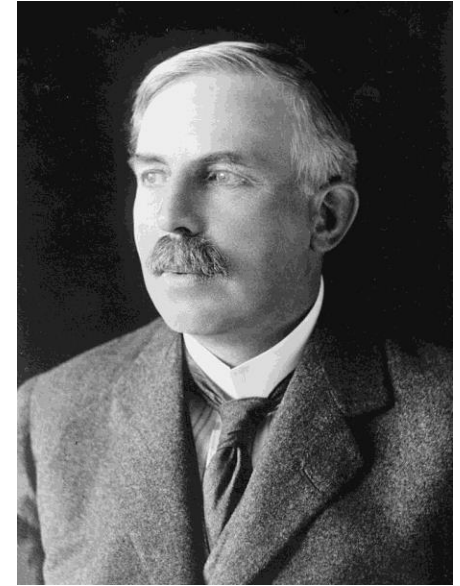
- L'anno precedente, nel 1896, H. Becquerel aveva identificato una radiazione emessa dal radio che non si comportava come i raggi X
- Nel 1899, E. Rutherford, che aveva continuato gli esperimenti di Becquerel, denominò questo tipo di radiazione come “raggi Beta”
- Successivamente, nel 1900, Bequerel dimostrò che si trattava di elettroni misurandone il rapporto carica/massa



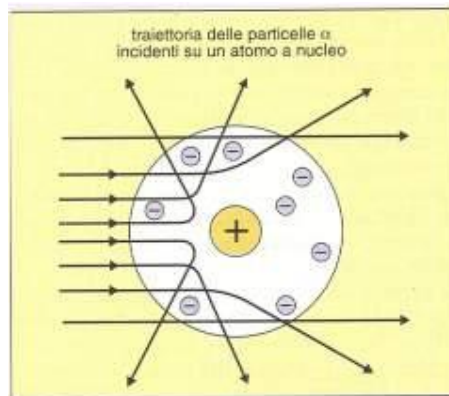
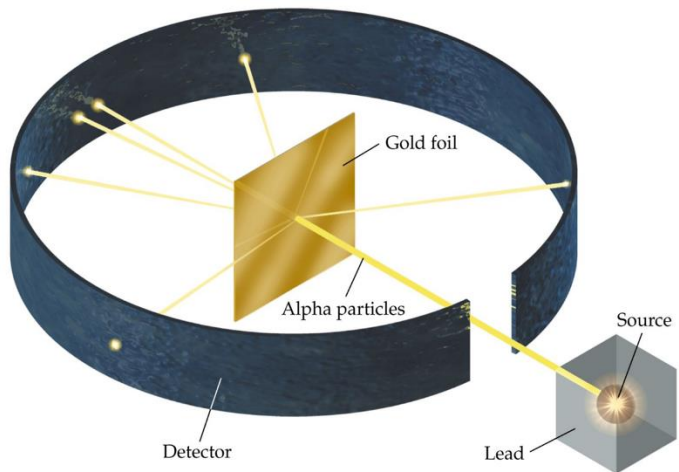
Premio Nobel 1903

Le particelle “ α ”

- **1898:** Ernest Rutherford scopre che l'uranio emette delle particelle cariche positivamente, più pesanti dei protoni. Si distinguono da quelle cariche negativamente, poi identificate come elettroni.
- Tale radiazioni vengono denominate rispettivamente raggi **alfa** (α) e **beta** (β)
- Con le particelle alfa condurrà il famoso esperimento (**1911**) che porta alla concezione del nuovo modello atomico



Premio Nobel per la
Chimica 1908



- Solo molto più tardi si capirà che le particelle alfa sono nuclei dell'atomo di Elio

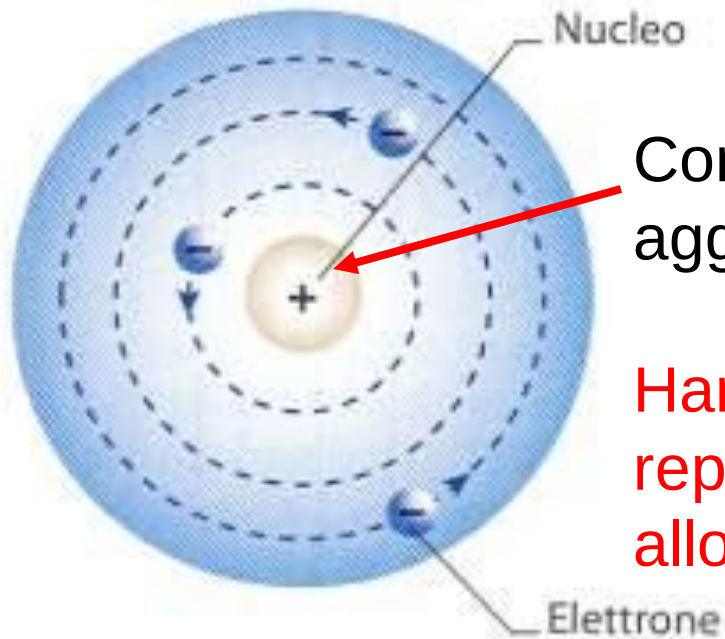
I raggi gamma (γ)

- Il primo a osservarli fu P. Villard nel 1900 mentre studiava la radiazione emessa dal radio. Questa radiazione era più penetrante delle altre osservate nel radio, come i raggi α e β



- La radiazione gamma fu riconosciuta come una differente radiazione fondamentale da Rutherford nel 1903 e venne così chiamata con la terza lettera dell'alfabeto greco, che segue α e β
- Oltre alla maggiore capacità penetrante dei raggi γ , Rutherford notò anche che quest'ultimi non venivano deflessi da un campo magnetico
- Dopo il 1914 si dimostrò che si trattava di una radiazione elettromagnetica, cioè **fotoni**, come i raggi X

Problema del modello di Rutherford



Come fanno i protoni a rimanere aggregati nel nucleo dell'atomo?

Hanno tutti carica uguale: la repulsione elettrostatica dovrebbe allontanarli uno dall'altro!!

→ deve esistere una forza di attrazione molto maggiore della forza elettrostatica di Coulomb
Cosa può essere?

La scoperta del neutrone

- Nel 1930, W. Bothe e H. Becker osservarono che, se le particelle α emesse dal Polonio (molto energetiche) incidevano su nuclei di elementi leggeri come Berillio, Boro e Litio, veniva prodotta una radiazione particolarmente penetrante.
- I. Curie e F. Joliot-Curie dimostrarono che non erano raggi γ
- Nel **1932** J. Chadwick dimostrò che particelle neutre dotate di massa approssimativamente uguale a quella dei protoni, e le chiamò **neutroni**, come proposto nel 1921 dal chimico W.D. Harkins, quando semplicemente si ipotizzava l'esistenza di qualcosa del genere

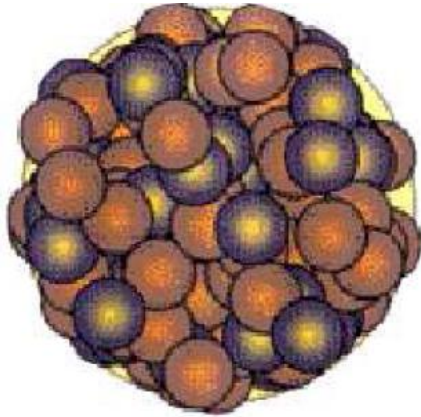


Rutherford, in precedenza aveva ipotizzato l'esistenza di una particella neutra, con una massa pari all'incirca a quella del protone, che risulterebbe dalla cattura di un elettrone da parte di un protone.



Premio Nobel 1935

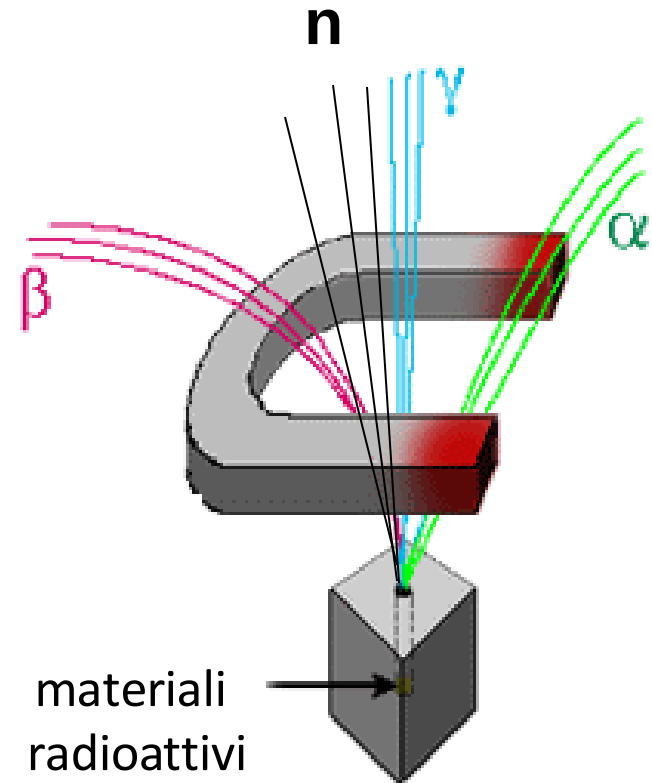
Il Nucleo Atomico



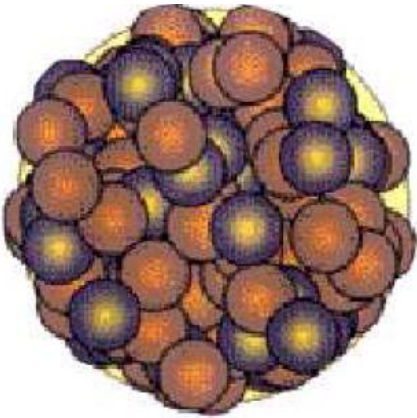
Protoni e Neutroni sono tenuti insieme nel nucleo in modo da formare una regione quasi sferica, grazie ad una forza di nuovo tipo: **la Forza Nucleare**

Oggi la chiamiamo “Forza Nucleare Forte” o
“Interazione **Adronica**”
(forza a raggio d’azione cortissimo! $\sim 10^{-15}$ m)

Esistono nuclei stabili, e altri che sono instabili:
“decadono”
Cioè si trasformano (“**decadono**”)
in altri tipi di nucleo emettendo radiazione che
può essere α, β, γ



Classificazione dei nuclei



Z: numero di protoni (numero di carica)

N: numero di neutroni

A = Z+N : numero di massa

Esempio:

^{16}O (Ossigeno 16) $\rightarrow A=16, Z=8, N=8$

I nuclei con lo stesso Z (stessa carica elettrica) ma con A diverso, si chiamano “**isotopi**”: hanno un diverso numero di neutroni

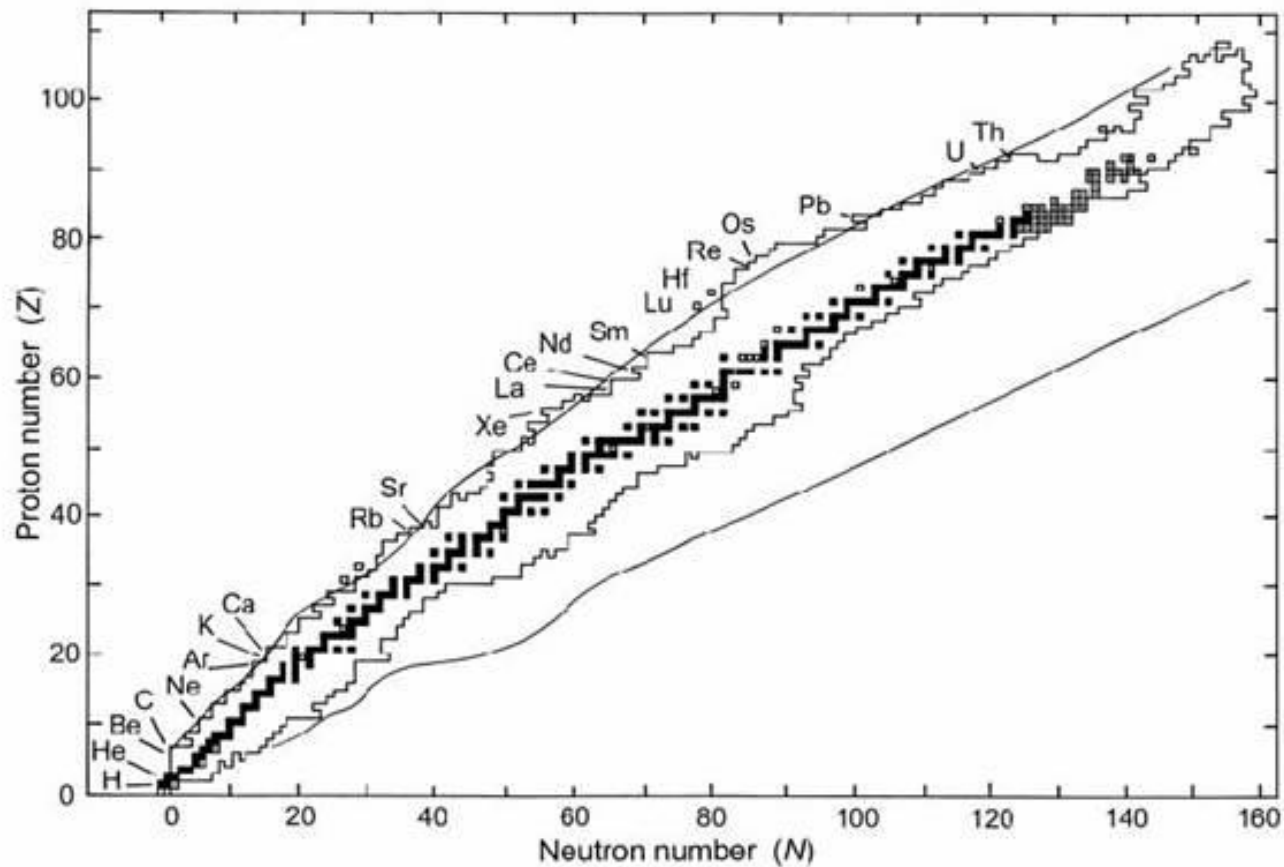
Per esempio:

Esiste ^{18}O (Ossigeno 18) $\rightarrow A=18, Z=8, N=10$

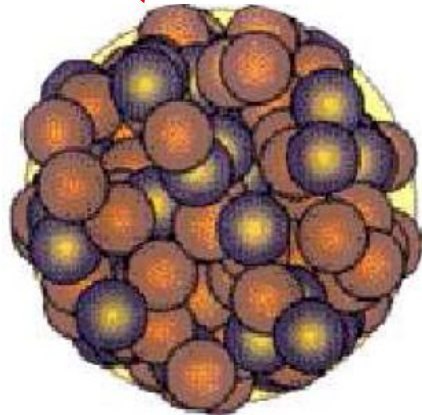
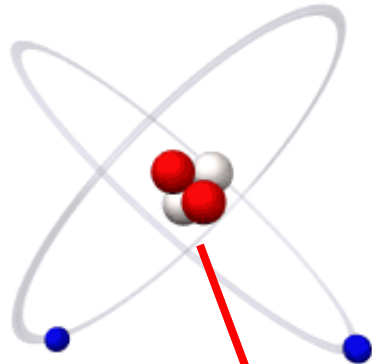
La forza nucleare

Il numero di protoni e neutroni che possono dare luogo a nuclei non è arbitrario.

I punti neri in figura indicano i nuclei stabili.



L'atomo ed il suo nucleo



Gli **elettroni** sono legati al nucleo dalla “**Forza ElettroMagnetica**”

E' assai meno intensa della Forza Nucleare, ma è a raggio d'azione esteso.

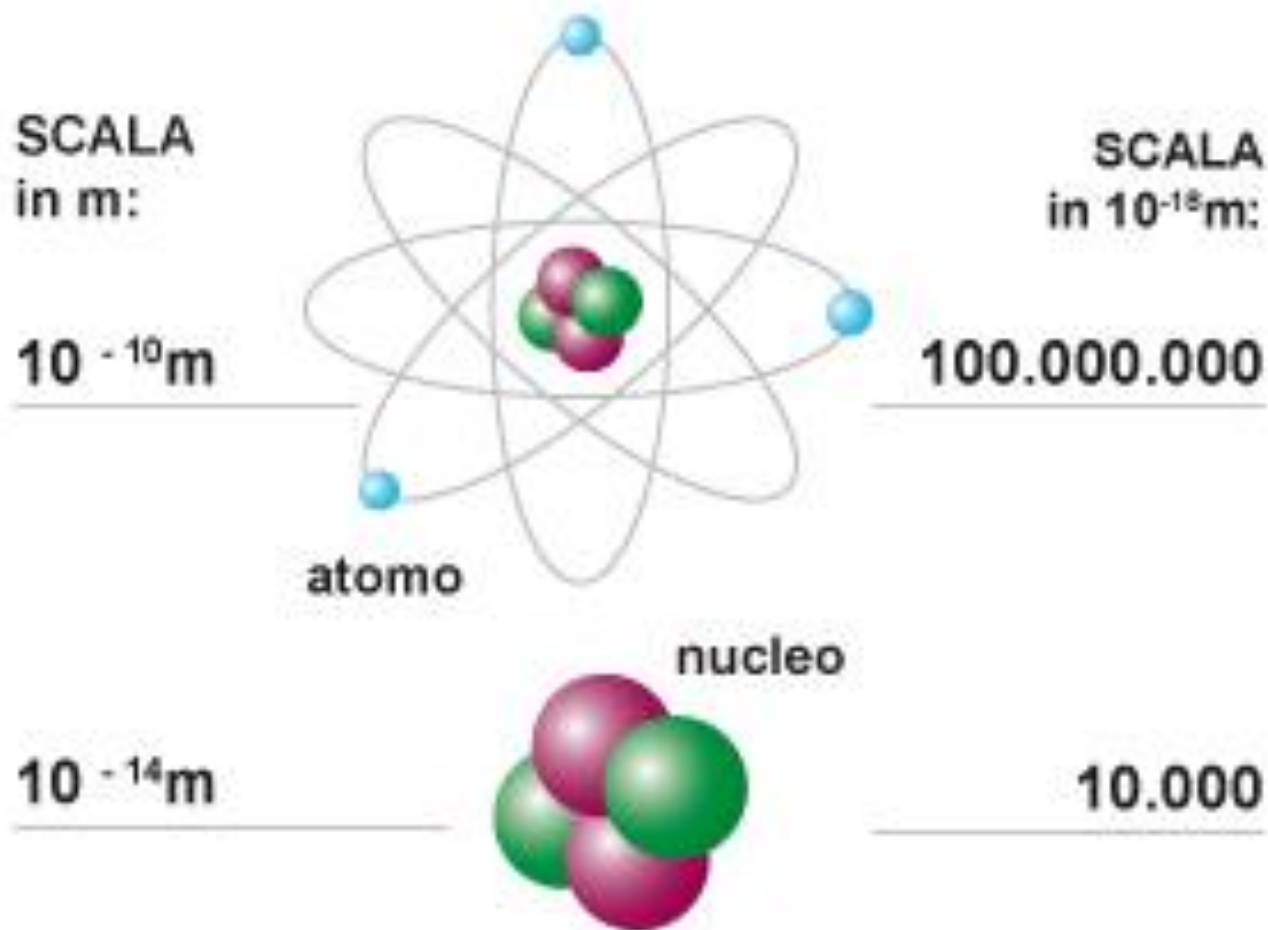


Determinano la Chimica (Fisica Atomica e Molecolare)

Forza	Intensità	Andamento	Raggio di azione
Nucleare	100	r	$1,4 \times 10^{-15} \text{ m}$
Elettro-magnetica	1	$1/r^2$	∞

La Forza Nucleare governa il comportamento del nucleo e le Reazioni Nucleari (**Fisica Nucleare**)

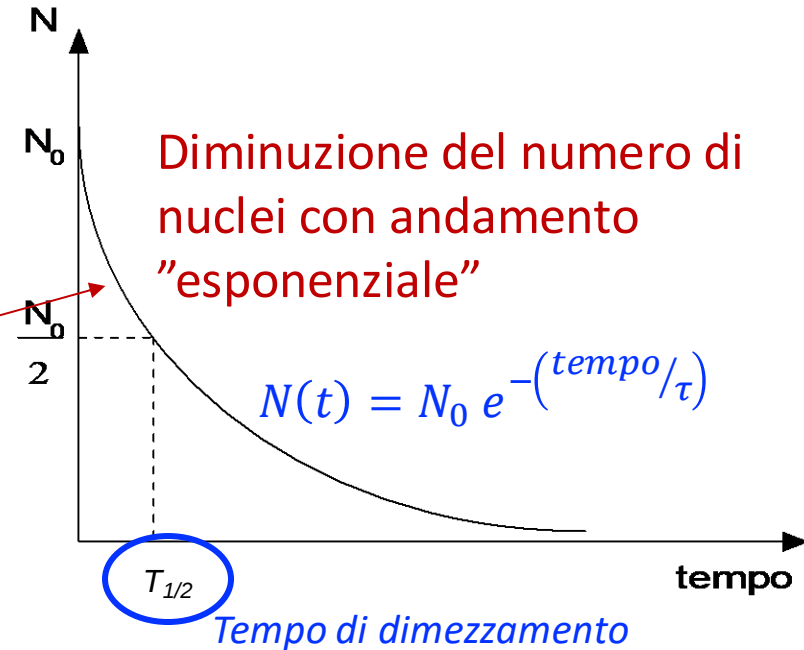
Le dimensioni del nucleo rispetto all'atomo



Decadimento radioattivo: vita media e attività

Parametro importante per valutare la pericolosità di un elemento radioattivo e la sua vita media:

$$DN = \frac{-NDt}{t}$$



τ è il tempo medio che deve trascorrere prima che il nucleo decada.

Attività: numero di decadimento per unità di tempo ($\Delta N/\Delta t$)

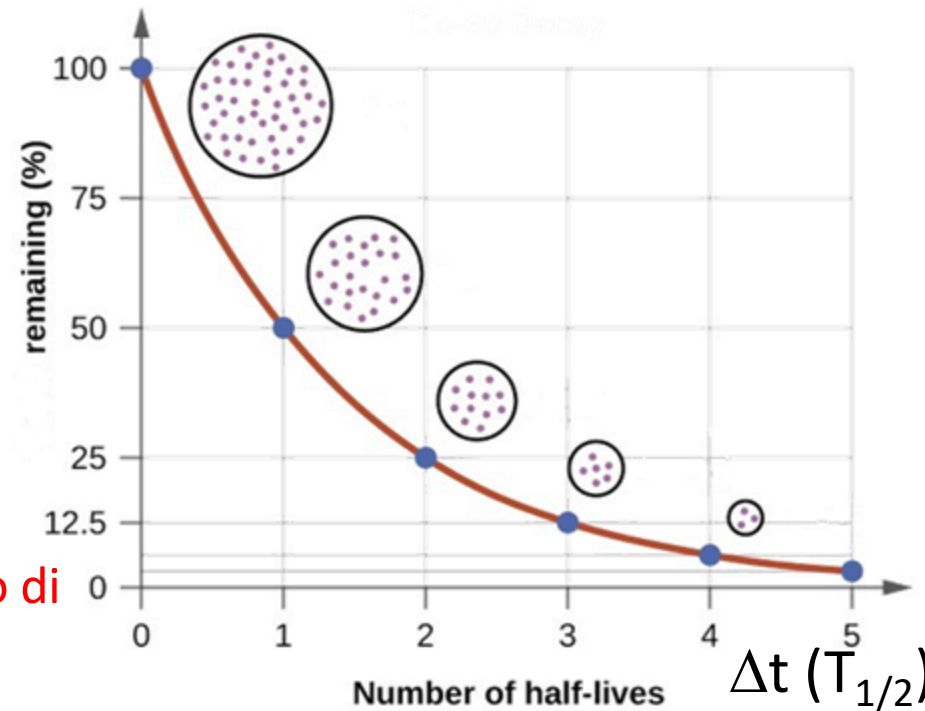
Se τ è breve $\rightarrow$ l'attività è elevata e quindi la sostanza è "più radioattiva" e potenzialmente più pericolosa, anche se decadrà più velocemente verso elementi stabili e quindi sarà necessario schermarla per un tempo inferiore.

Vita media e tempo di dimezzamento

$$\text{Vita media} = t = \frac{T_{1/2}}{\ln(2)}$$

$$N(Dt) = N_{t=0} \exp\left(-\ln(2) \frac{Dt}{T_{1/2}}\right)$$

Ogni elemento radioattivo ha il suo tempo di dimezzamento $T_{1/2}$



Se aspetto un tempo $\Delta T = T_{1/2}$ sopravviverà metà della sostanza radioattiva e metà sarà decaduta. Se aspetto $2T_{1/2}$, ne rimane $\frac{1}{4}$, se aspetto $3T_{1/2}$ solo $\frac{1}{8}$ e così via.

Unità di misura della radioattività

L'unità di misura della radioattività fu proposta all'inizio del secolo scorso da Marie Curie come l'attività di 1 g di radio.

Nel 1950 la definizione di tale unità è stata modificata in modo da corrispondere esattamente a 37 miliardi di disintegrazioni al secondo; tale grandezza è chiamata **curie (Ci)** e corrisponde approssimativamente a circa 1 g di ^{226}Ra .

Attualmente l'unità che esprime la quantità di radioattività è misurata in **becquerel (Bq)** e corrisponde ad una disintegrazione al secondo.

Curie (Ci): attività di 1 g di ^{226}Ra

Becquerel (Bq): una disintegrazione al secondo

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

ESEMPIO:

Un grammo di ^{60}Co ($\tau = 5.27$ anni) avrà un'attività di $4.185 \cdot 10^{13} \text{ Bq}$

Un grammo di ^{238}U ($\tau = 4.47 \cdot 10^9$ anni) avrà un'attività di 12500 Bq

Nella **roccia** (terreno) il contenuto di **Uranio** è dell'ordine del **ppm** (10^{-6} g/g)

Quindi in **1 kg di roccia** si hanno qualche **decina di Bq!**

Effetti biologici delle radiazioni nucleari

“Dose” (1 Joule/kg = 1 Gray)

Misura dell'effetto:

energia deposta per unità di massa $\times W$ (numero caratteristico del tipo di radiazione)

1 Sv (Sievert) = 1 Joule/kg $\times W$ = 1 Gray $\times W$

($W = 1$ per i raggi gamma)

Tasso di dose da radioattività naturale (varia enormemente sul territorio):

media in lombardia: 0.32 mSv/h

Limiti stabiliti da ICRP: < 5-20 mSv/anno (dipende dalla categoria di persone)

Tipici effetti in seguito a esposizione «full body»:

250 mSv: diminuzione linfociti nel sangue

1 Sv: nausea, vomito, astesia

4 Sv: dose emiletale

6 Sv: morte entro 1 mese

Confronto statistico per prob. morte 10^{-6}

Assorbire 6 mSv

Guidare 65 km in auto

Volare 4000 km in aereo

Fumare 1.4 sigarette

Mangiare 40 cucchiaini di burro di arachidi

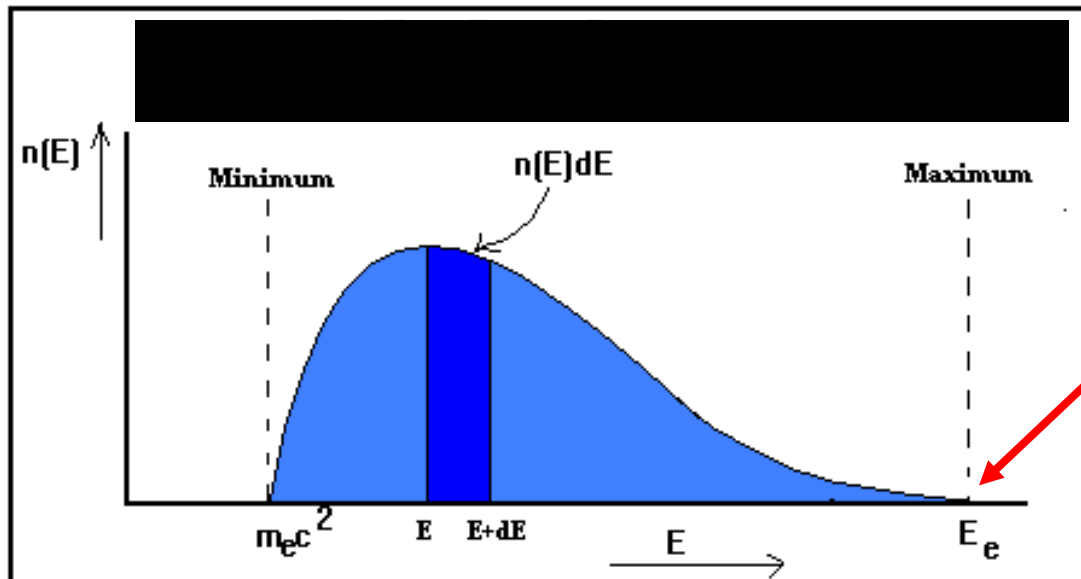
Un secondo tipo di Forza Nucleare: la Forza Nucleare Debole

Il neutrone libero (fuori dal nucleo) non è stabile: decade β ($\tau \sim \frac{1}{4}$ d'ora per il neutrone libero). Il decadimento β di un nucleo implica che un suo neutrone è decaduto.

Inizialmente si pensava che il neutrone decadesse seguendo la trasformazione:



Ma le cose non tornavano: in questa ipotesi l'elettrone deve essere "monocromatico"
Invece le misure indicano uno "spettro continuo" di energia...



Valore dell'energia
che avrebbe
l'elettrone
se il processo fosse
 $n \rightarrow p e^-$

Ipotesi di una nuova particella: il neutrino

Tutto si spiega se esiste un'altra particella molto “leggera” e neutra Fu chiamata “**neutrino**”

$$n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$



W. Pauli

Premio Nobel 1945

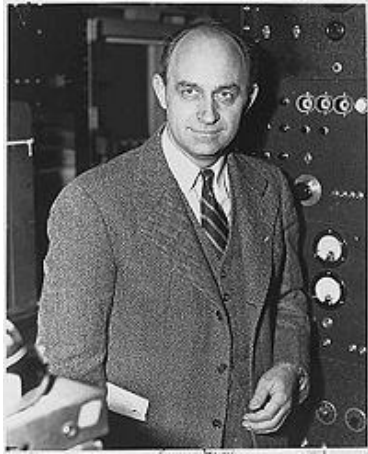
Passarono molti anni prima che la sua esistenza fosse dimostrata completamente.

Il decadimento β è governato da un nuovo tipo di forza:

la Forza Nucleare Debole.

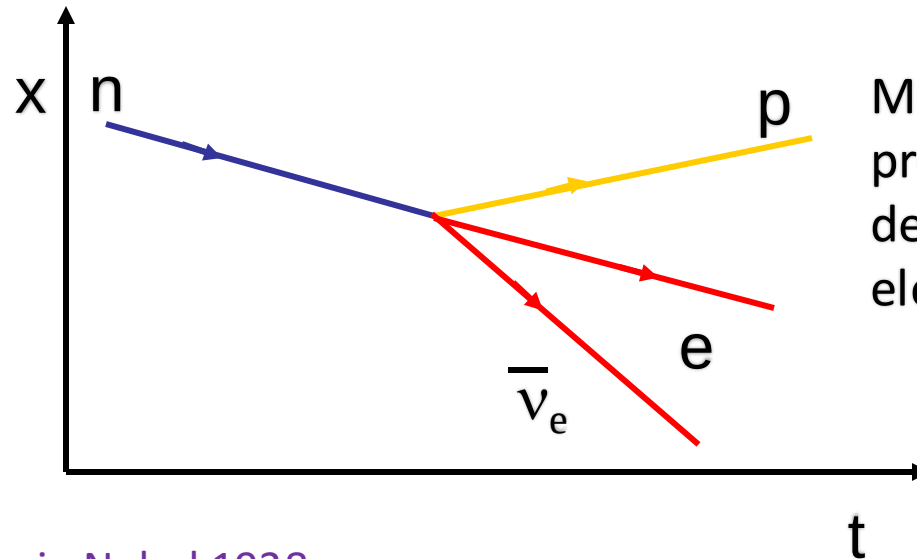
Essa ha un ruolo fondamentale nelle reazioni che convertono neutroni in protoni, e viceversa. Queste reazioni sono anche importanti per il funzionamento del Sole e delle altre stelle.

E' stato Fermi a dare una prima teoria convincente quantitativa della forza nucleare debole e del decadimento β



Enrico Fermi
(1901 –1954)

Premio Nobel 1938



Mutuando concetti presi dalla teoria delle interazioni elettro-magnetiche

L'intensita' della forza e' proporzionale ad una quantita':

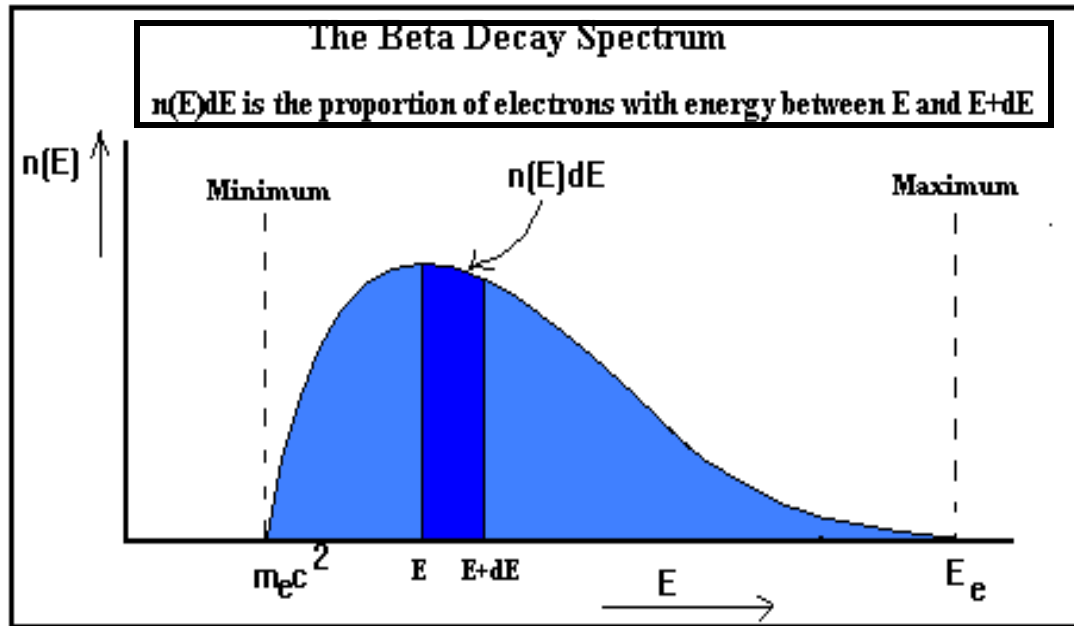
Costante di Fermi: $G_f = 1.166 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} (\hbar c)^3$

("G" preso ad imitazione della costante di Newton)

Una sorta di "carica debole" in analogia alla carica elettrica

Ma Fermi (con i suoi ragazzi di via Panisperna) ha contribuito a tanti altri aspetti della fisica nucleare: il Nobel lo ha avuto per la scoperta della radioattività indotta dai neutroni

Tale teoria permise di calcolare la forma dello spettro dell'energia dell'elettrone emesso

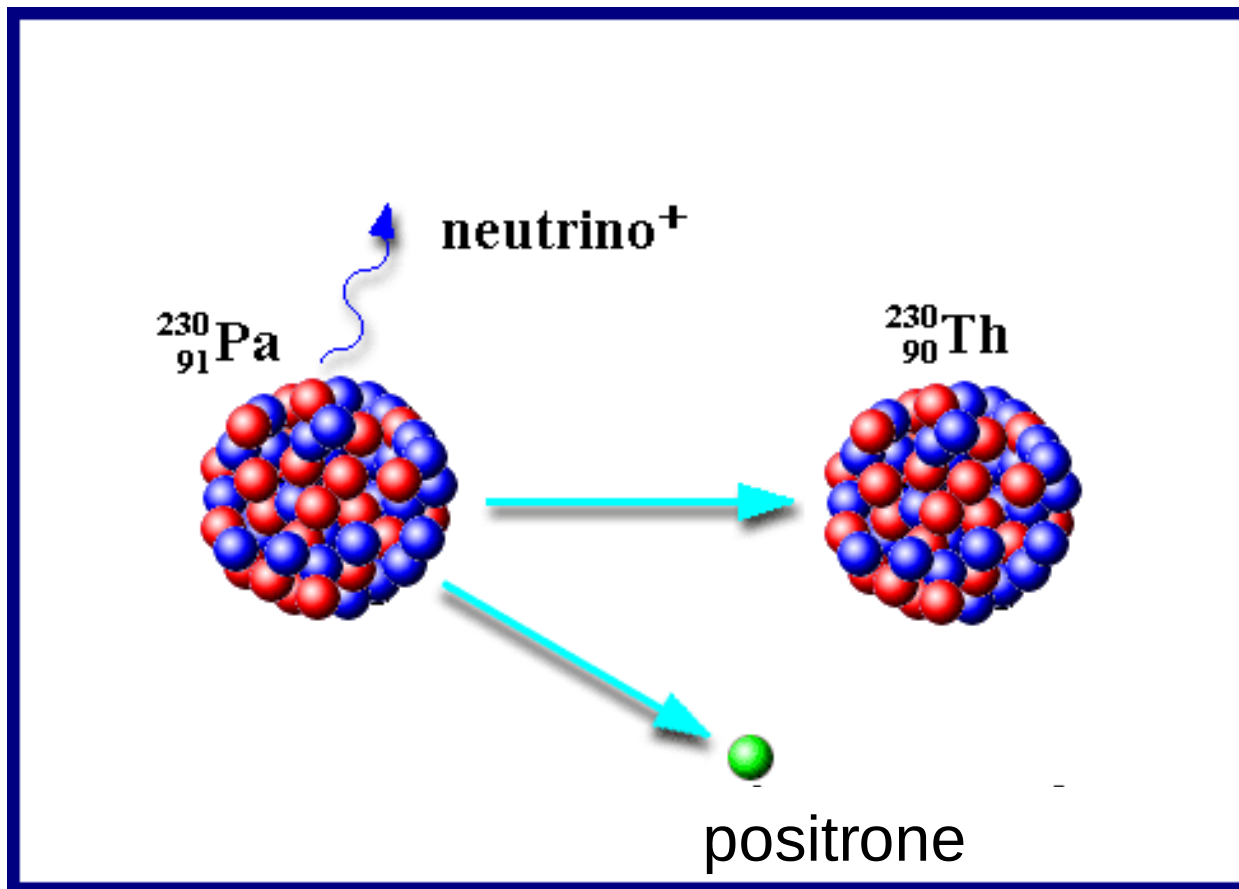


$$\frac{dN_a}{dE_a} \propto F(Z_D, E_a) E_a (E_0 - E_a)^2 \sqrt{E_a^2 - m_e^2 c^4} \left(1 - \frac{m_\nu^2 c^4}{(E_0 - E_a)^2}\right)^{1/2}$$

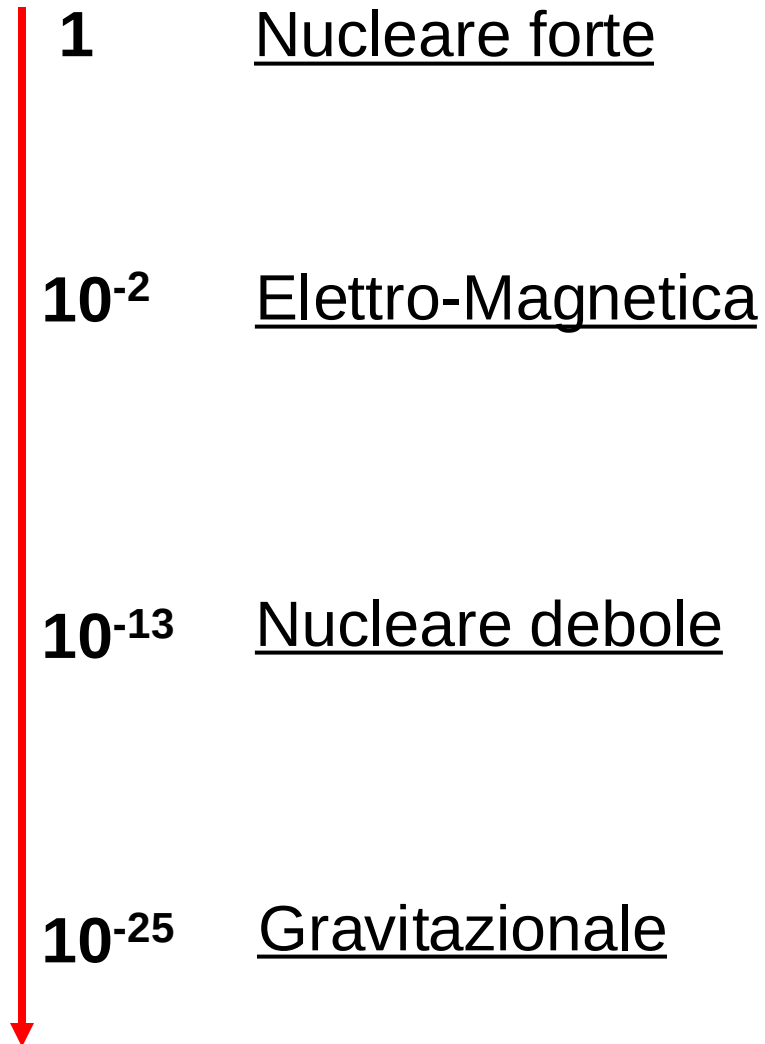
La Forza Nucleare Debole ha ruolo fondamentale nelle reazioni che convertono neutroni in protoni, e viceversa. Queste reazioni sono anche importanti per il funzionamento del Sole e delle altre stelle.

Decadimento β e antimateria

Esistono nuclei radioattivi che decadono β^+ , cioè emettendo positroni (gli anti-elettroni)



Le Forze Fondamentali della Natura e la loro scala di intensità



Unità di misure “comode” per l’energia di nuclei e particelle

elettron-Volt (eV) 1 eV = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Joule

1 keV = 1000 eV	(kilo elettron volt)
1 MeV = 1000 000 eV	(mega elettron volt)
1 GeV = 1 miliardo di eV	(giga elettron volt)

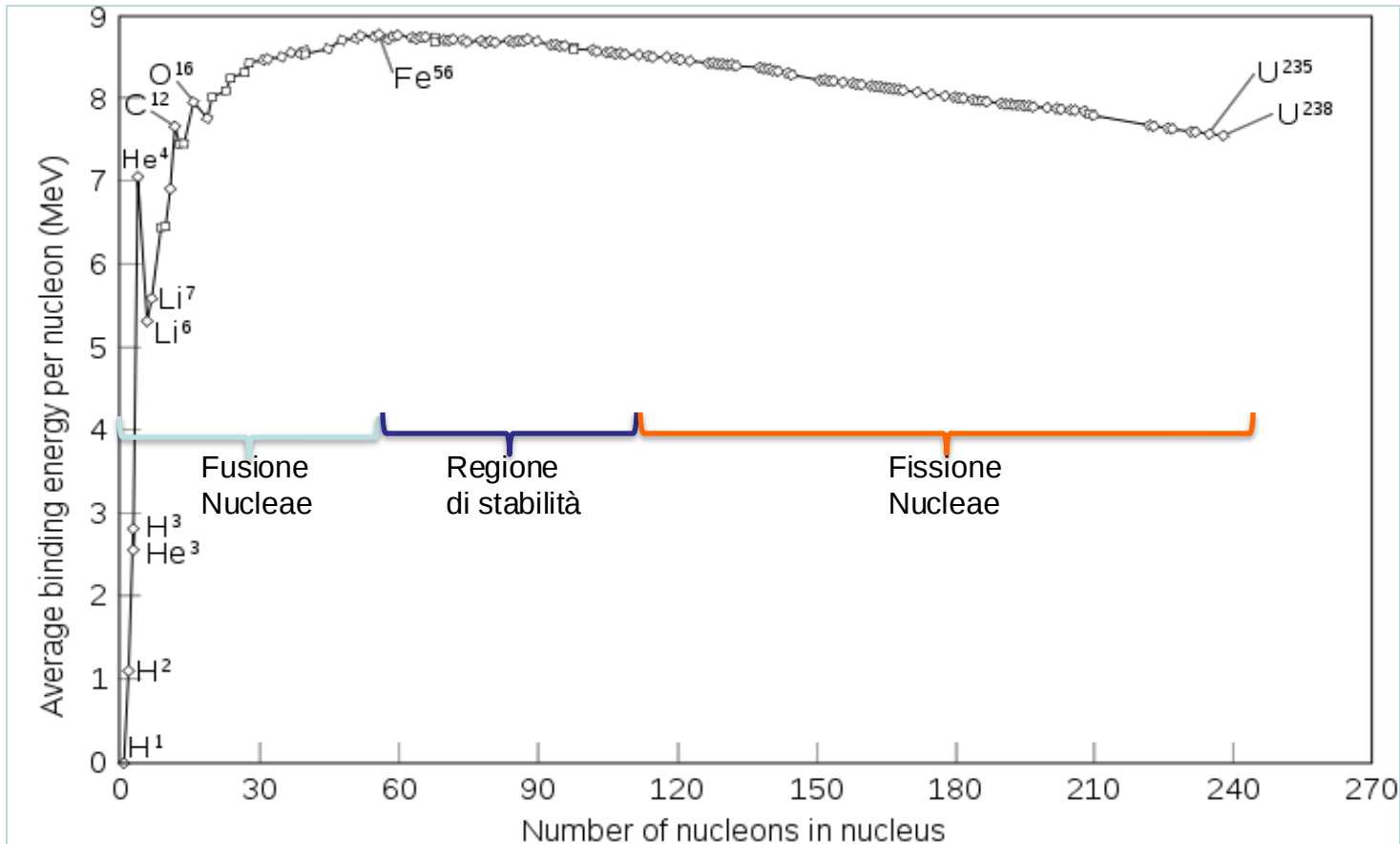
ecc.

L’acceleratore piu’ grande del mondo (LHC al CERN)
accelera protoni fino a 7 TeV = 7000 miliardi di eV

Nell’universo si producono particelle accelerate
fino a circa 10^{21} eV (1000 000 000 000 000 000 000 eV)

Energia di legame nucleare

Se la massa di un nucleo fosse esattamente uguale alla somma delle masse degli Z protoni e N neutroni il nucleo non sarebbe stabile



Ogni nucleo ha massa leggermente inferiore alla somma delle masse degli A nucleoni che contiene. La differenza, Δm , indica di legame dei protoni e dei neutroni in quel nucleo e rappresenta la minima energia che occorre fornirgli per romperlo.

Energia di legame chimico

Il concetto di energia di legame non è nuovo, lo ritroviamo anche in chimica

Gli atomi si uniscono l'uno all'altro per formare molecole. Tali legami si formano quando la molecola risultante è energeticamente più stabile dei suoi componenti separati. La formazione di un legame chimico coinvolge gli elettroni che possono essere trasferiti da un atomo ad un altro, oppure condivisi fra due o più atomi.

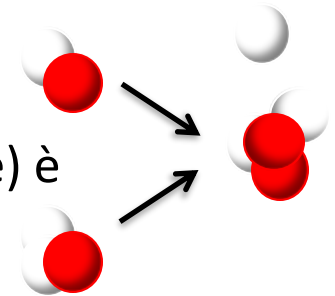


Nella combustione, ad esempio del Metano [CH₄], fornendo una piccola energia iniziale per rompere i legami se ne formano altri [CO₂] [H₂O] liberando più energia di quella fornita inizialmente. Abbiamo una reazione esotermica.

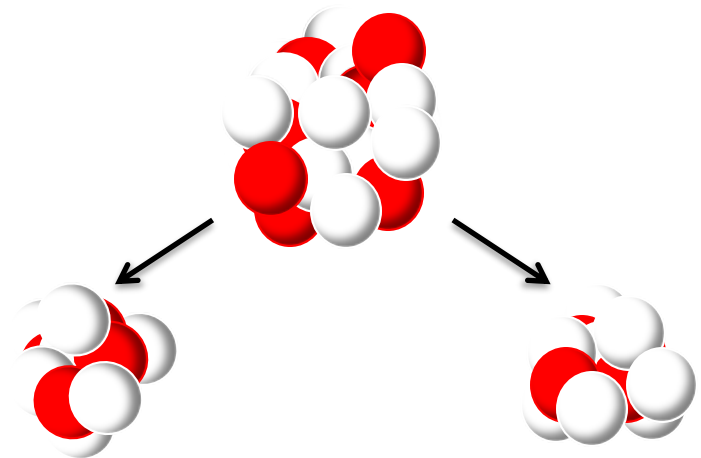
Energia dai nuclei

Analizzando la figura delle energie medie di legame si vedono 2 cose interessanti:

1. La **fusione** (cioè l'unione di due nuclei leggeri in uno più pesante) è energeticamente favorevole per i nuclei leggeri.
2. La **fissione** (cioè la scissione di un nucleo pesante in due nuclei di massa circa metà) è energeticamente favorevole per i pesanti.



Un nucleo risulta instabile quando la sua energia di legame per nucleone è inferiore a quella nei frammenti in cui può dividersi. Questo fatto si verifica per tutti i nuclei di numero $A > 100$, che pertanto sono instabili rispetto al processo di fissione



Reazioni chimiche e nucleari

Le reazioni chimiche sono processi che modificano la distribuzione degli elettroni atomici dando origine a nuovi composti molecolari.

La combustione è un esempio di reazione chimica usata per produrre energia.

Le reazioni nucleari avvengono ad energie molto più elevate e modificano la struttura dei nuclei dando origine a nuovi elementi.

Anche dalle reazioni nucleare si può ottenere energia. Nello specifico le reazioni nucleari sono il modo più efficiente per trasformare massa in energia.



Reazioni nucleari

Le energie in gioco nelle reazioni nucleari sono enormemente più grandi di quelle delle reazioni chimiche:

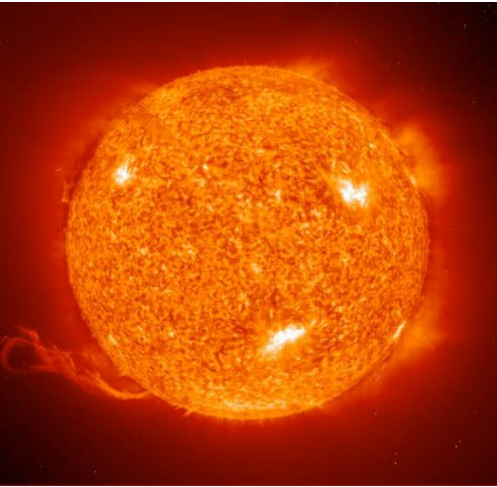
per strappare un elettrone da un atomo di H servono 13.6 eV

l'energia media di legame per nucleone in un nucleo ${}^4\text{He}$ è 7.07 MeV.

Le reazioni nucleari sono anche le più efficienti nel trasformare materia in energia:

- Fusione nucleare $7^0/_{00}$ della massa si trasforma in energia
- Fissione nucleare $1^0/_{00}$ della massa si trasforma in energia
- Reazioni chimiche 10^{-8} della massa si trasforma in energia

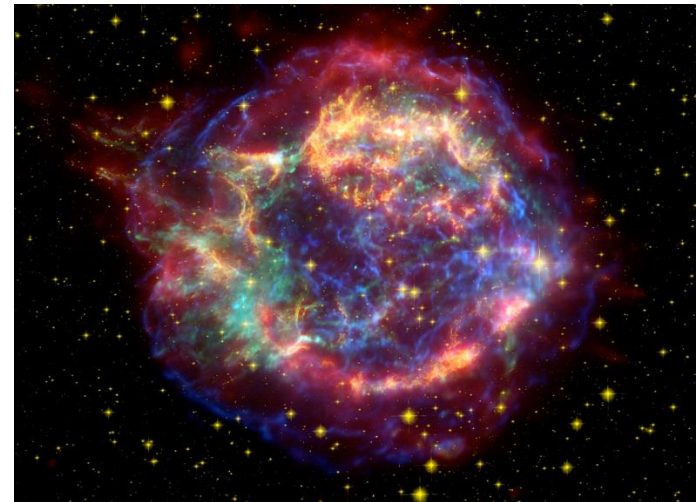
Reazioni nucleari stellari



All'interno delle stelle per effetto della grande pressione esercitata dalla massa dell'astro, i nuclei di H (elemento di cui è costituita la stella) sono portati a stretto contatto fra loro e possono fondere, dando luogo a una serie di reazioni che portano alla produzione di nuclei di He, liberando, sotto forma di radiazione e rilascio di neutrini, un'energia pari a circa 28 MeV.

Quando la zona centrale si è arricchita di He, con un altro meccanismo di fusione, le stelle fabbricano C, N e O.

In uno stadio successivo, vengono prodotti elementi ancora più pesanti, come Fe e Si. Nelle fasi finali di vita la stella può esplodere scaraventando fuori i prodotti della sua attività. Nella fase dell'esplosione vengono prodotti tutti i nuclei più pesanti.



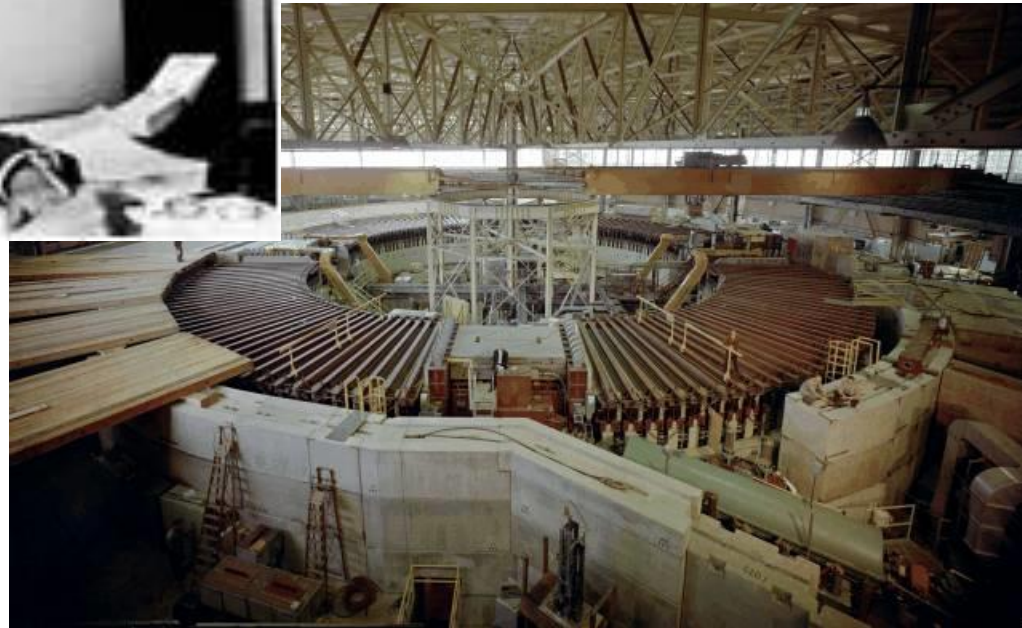
Ancora AntiMateria: Emilio Segre e la scoperta dell'antiprotone

1955

$$p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p}$$

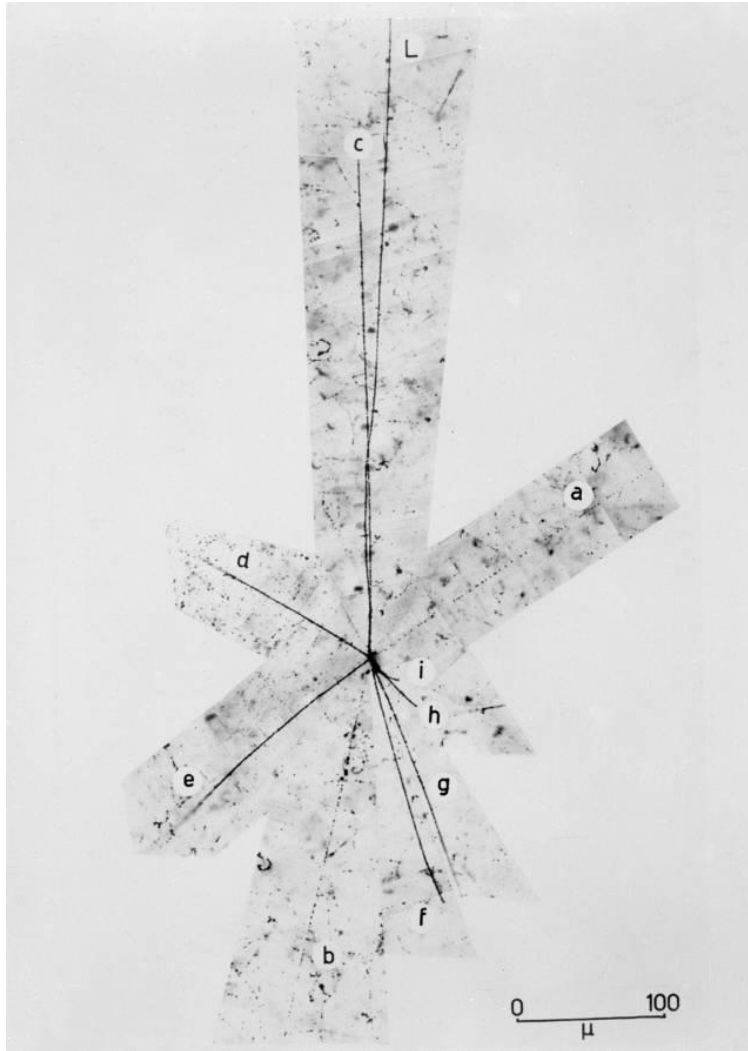


Il “Bevatron”
di Berkley



Primo acceleratore a raggiungere l'energia di 6.5 GeV

Rivelazione con emulsioni fotografiche



L'annichilazione di
un anti-protone

Nasce il CERN a Ginevra

1954

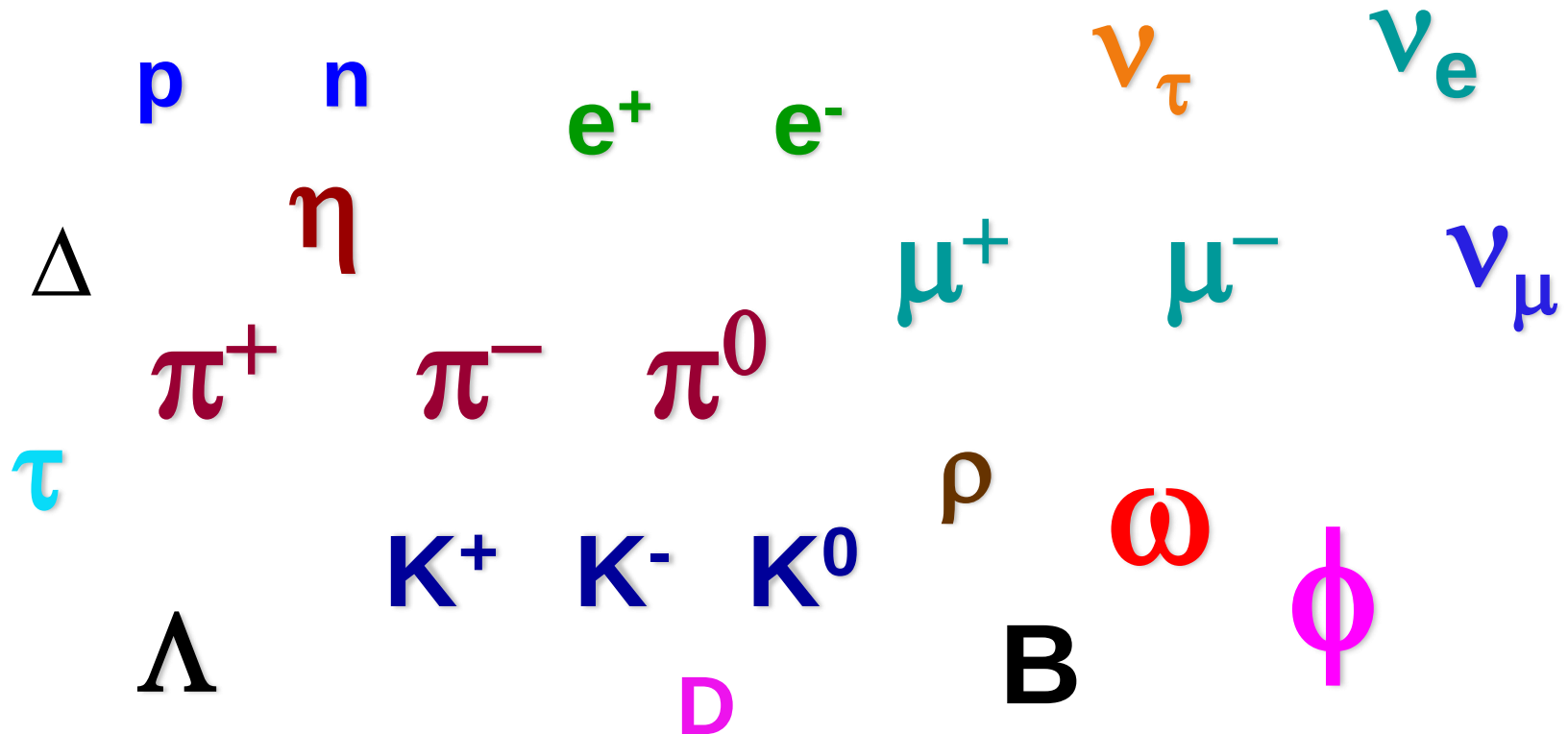


E. Amaldi

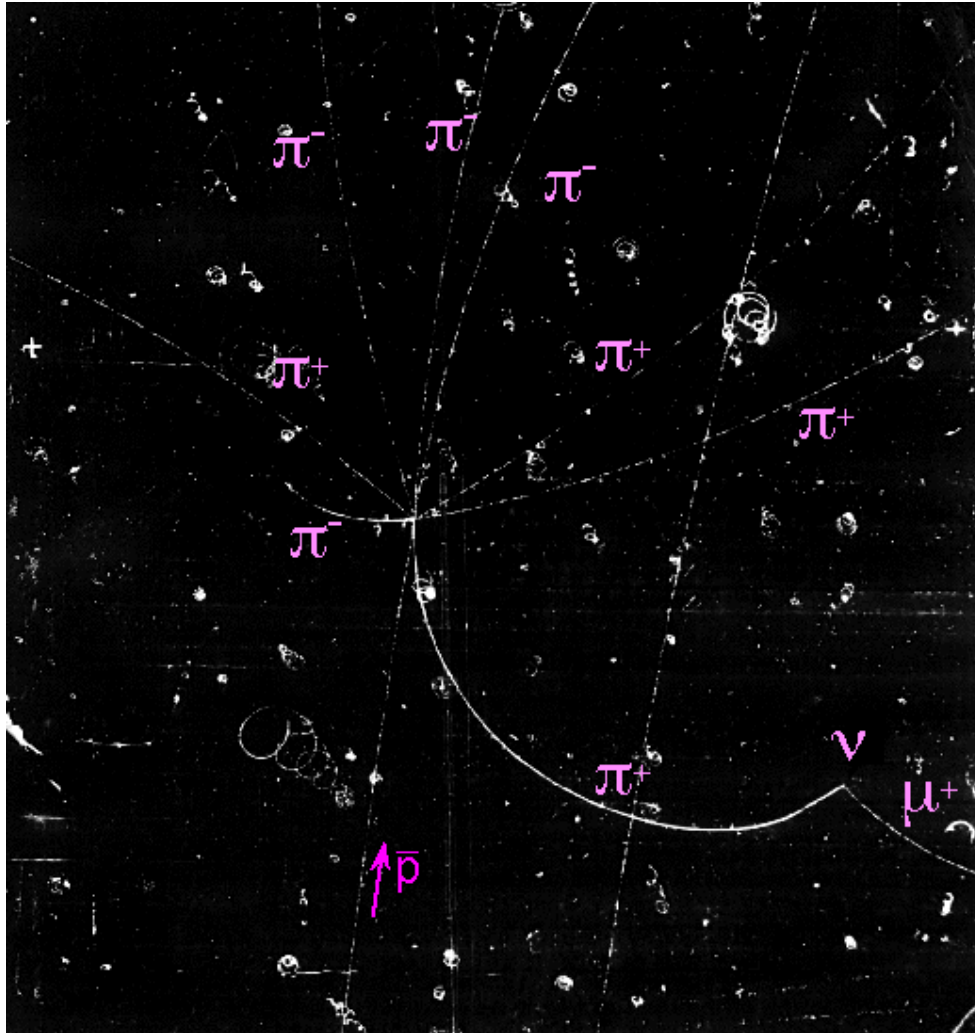


Il sincrotrone per protoni da 30 GeV
Entrato in funzione nel 1959

In pochi anni lo “zoo” delle particelle subnucleari cresce...



Cominciano ad essere troppe per essere veramente “elementari” e “fondamentali”...



tracce di particelle
subnucleari venivano
visualizzate nella
“camera a bolle”

Oggi usiamo dispositivi
dove le particelle
producono segnali di
corrente elettrica che
vengono “digitalizzati”
e registrati mediante
computer

Un nuovo modello semplifica lo zoo delle particelle...

“adroni”

Le particelle che subiscono o generano la forza nucleare **NON SONO ELEMENTARI**

Esse sono composte da particelle più elementari:

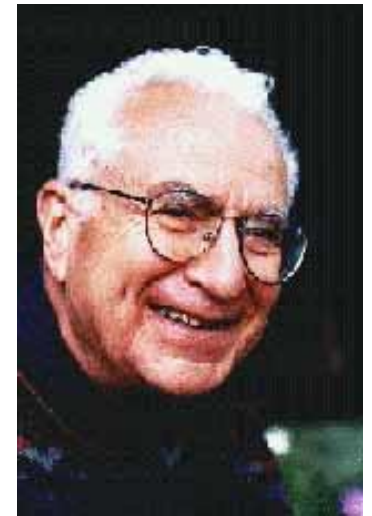
i “quarks”

“barioni” (protoni, neutroni,...) : 3 quarks

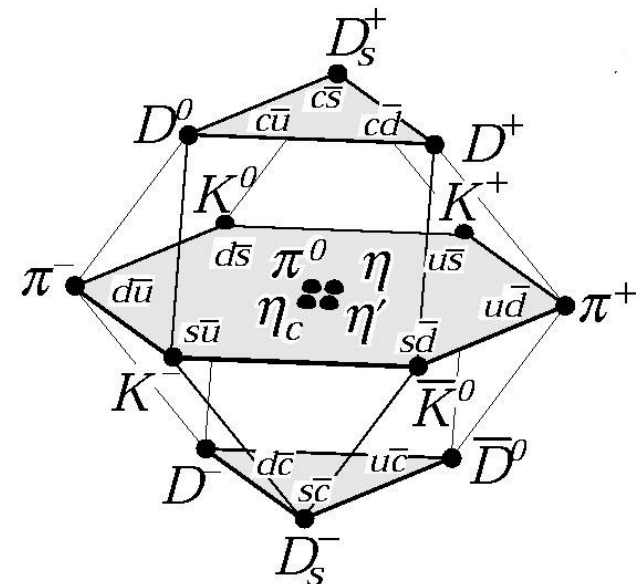
(carica elettrica frazionaria)

“mesoni”: 1 quark + 1 antiquark

L'algebra (Teoria dei Gruppi) contribuisce alla fisica teorica...



M. Gellman



Stanford Linear Accelerator Center



Anni 60

Qui furono fatti
i primi esperimenti
chiave per dimostrare
che il protone non
era elementare...

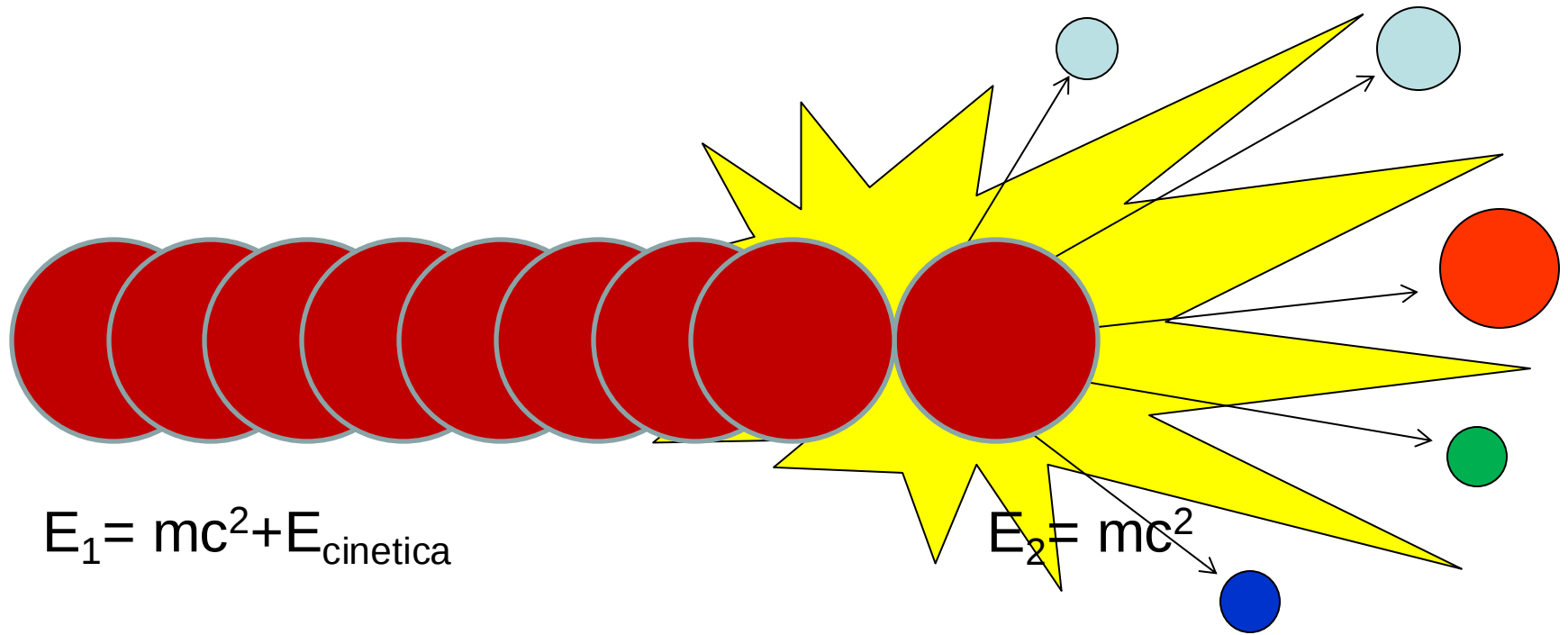
3 tipi di quark:

u, d, s

(*up, down, strange*)

Si comincia a
pensare che forse
ce n'è un quarto...

Urto di una particella accelerata contro un bersaglio fermo

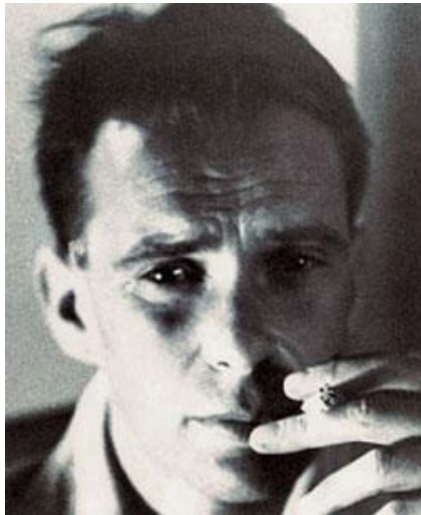


Energia disponibile per la
conversione in nuove
particelle

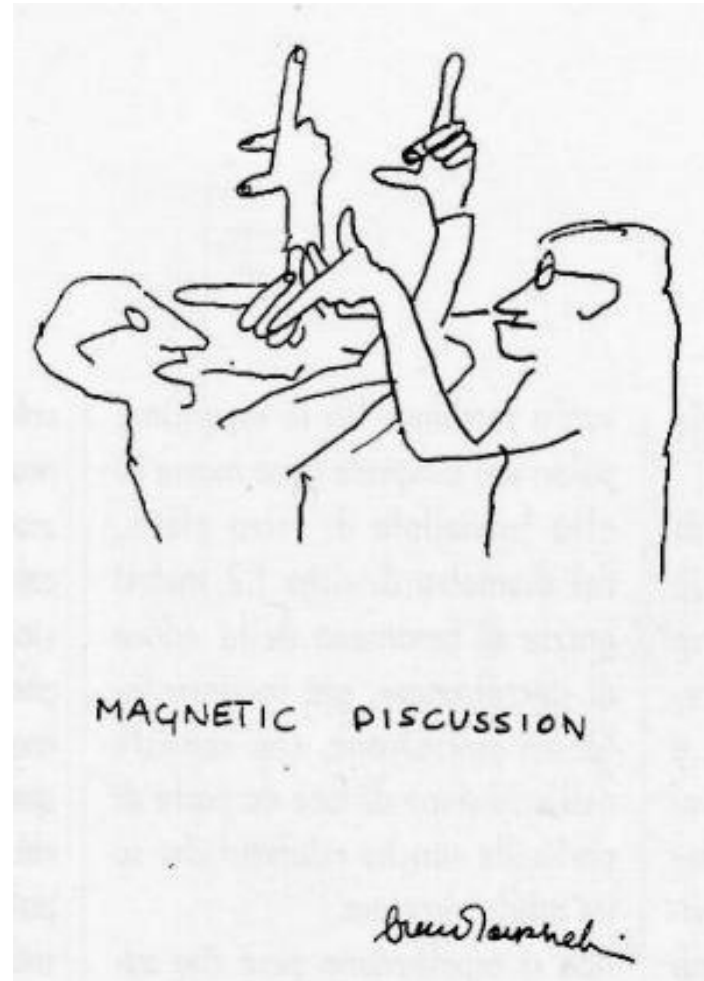
$$\approx \sqrt{2mc^2 E_1}$$

Anni '60: una nuova idea sperimentale...

made in Italy

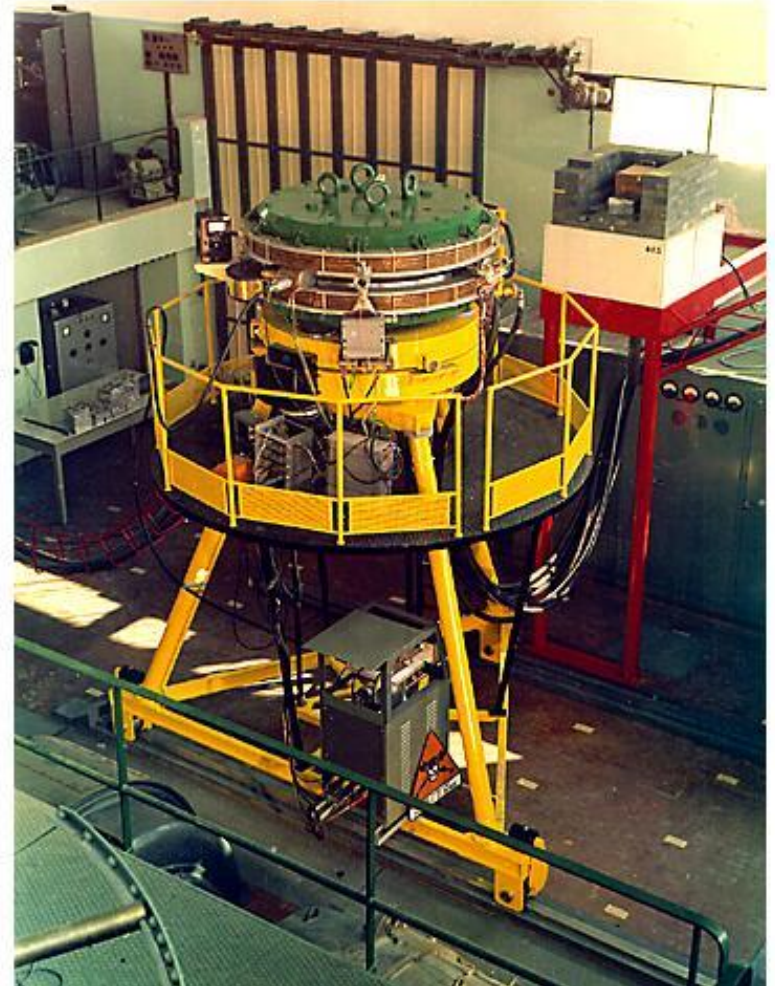
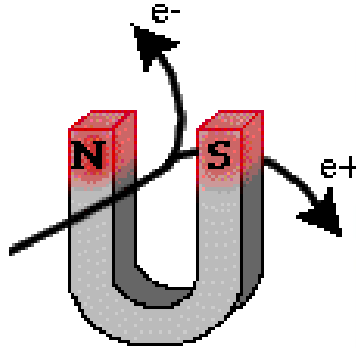


B. Zevi

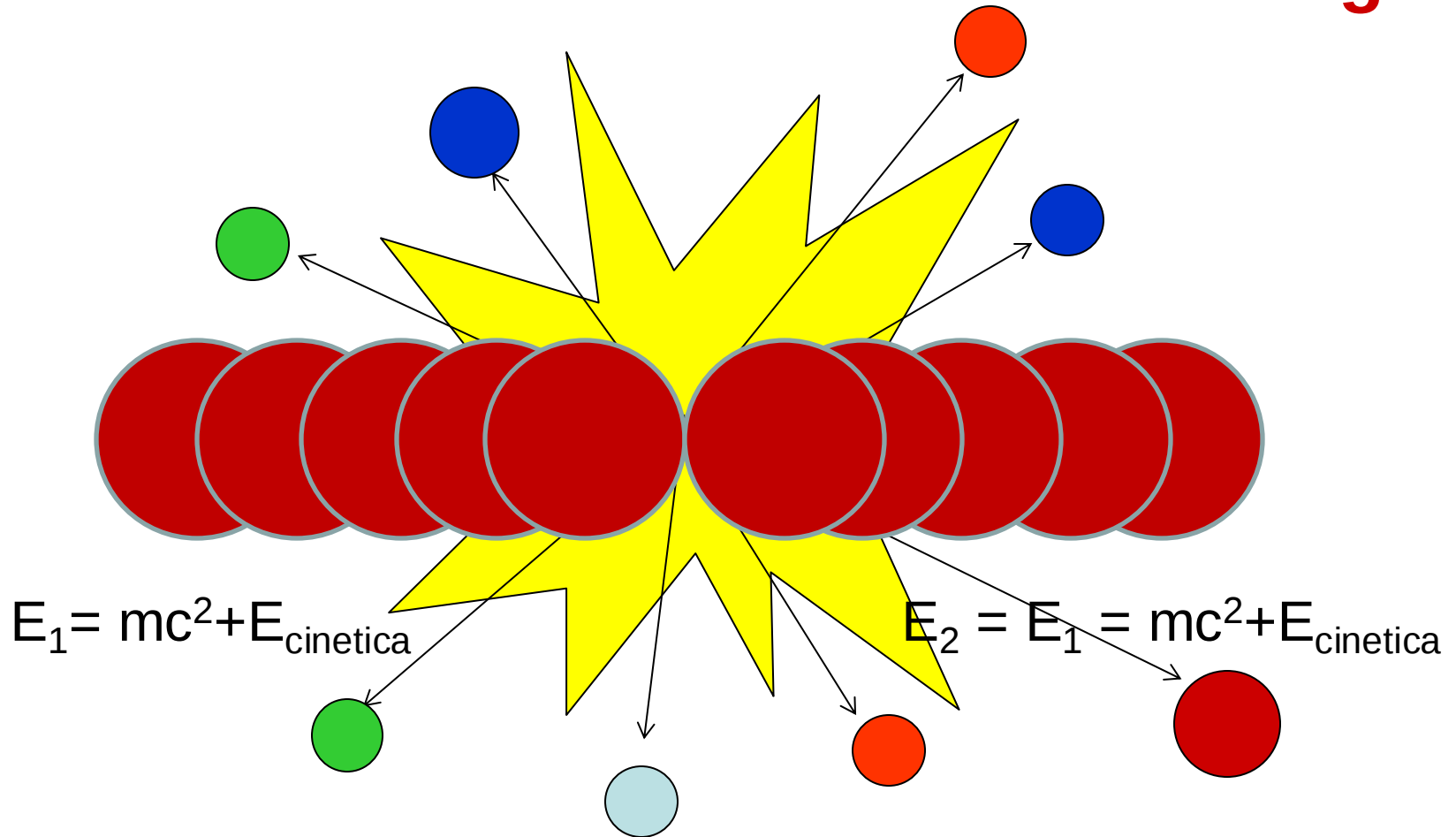


Nasce AdA

Anello
di
Accumulazione
(di elettroni e positroni)



Urto di una particella accelerata contro un'altra accelerata alla stessa energia



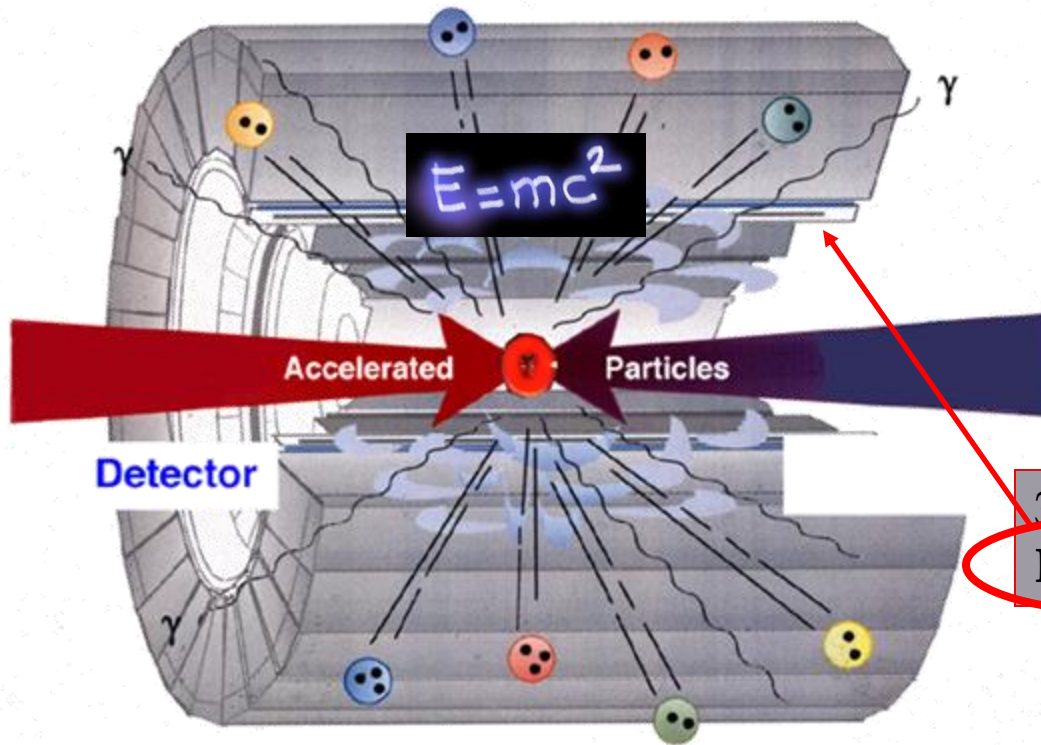
Energia disponibile per la
conversione in nuove
particelle

$$= 2E_1$$

Il «Collider»: 2 fasci di particelle che circolano in senso opposto



Il metodo sperimentale della Fisica delle Particelle

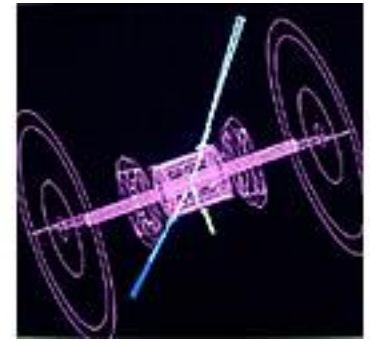


1) Concentrare energia su particelle stabili (**acceleratore**)

2) Farle collidere (mettere a disposizione un'alta densità di energia)

3) Indentificare le particelle create
Rivelatori (ricerca di nuovi indizi)

Materia ad alta energia



Nel 1973 viene scoperto il 4° quark, chiamato “**charm**”

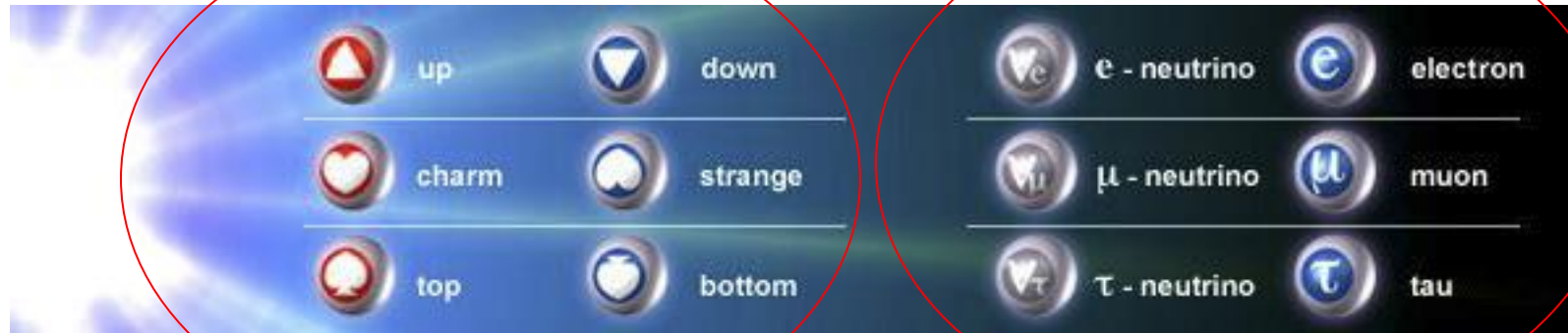
Dopo pochi anni vengono scoperte delle particelle pesanti che si sono composte da altri nuovi quarks più pesanti di “up”, “down” e “strange” e “charm”: essi sono i quarks chiamati “**bottom**” e “**top**”.

Oggi conosciamo quindi in totale **6 differenti tipi** (“sapori”) di quark.

I mattoni fondamentali della materia

quarks

leptoni



L'attenzione si sposta alle forze che tengono insieme le particelle

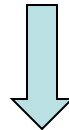
Cosa sono le forze e come funzionano?

La relatività di Einstein **IMPONE** di superare il concetto classico di “**azione immediata a distanza**” :

Nulla può essere trasmesso a velocità maggiore della luce

I campi di forze vengono infine studiati nel quadro della Meccanica Quantistica:

Teoria Quantistica dei Campi



Ogni particella esercita un'azione su un'altra attraverso lo scambio di un “**mediatore**”

forza = interazione = scambio

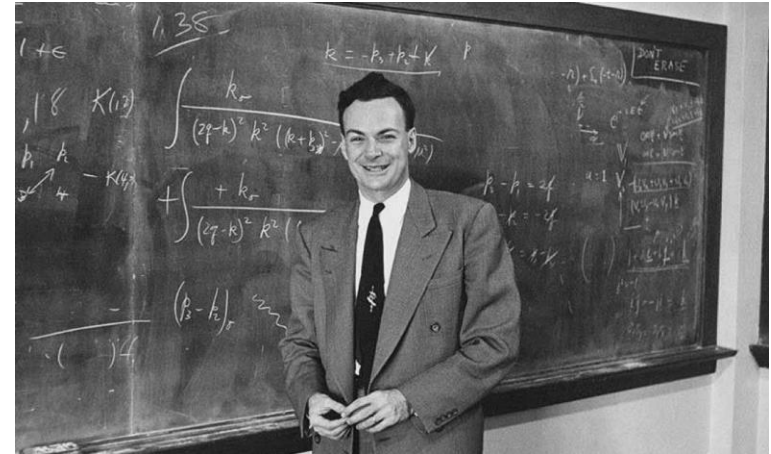
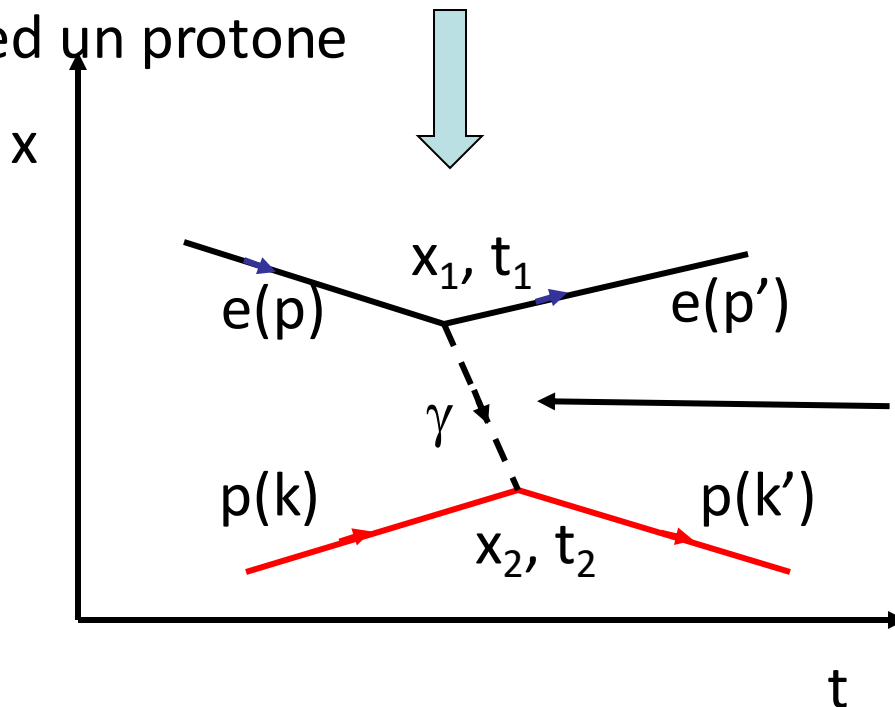
I mediatori delle forze sono altre particelle

Descrizione moderna di ciò che chiamiamo “Forze” o “Interazioni”

Meccanica Quantistica + Relatività =
Teoria Quantistica dei Campi

I “diagrammi di **Feynman**”

Un esempio di base: l'interazione
elettromagnetica fra un elettrone
ed un protone



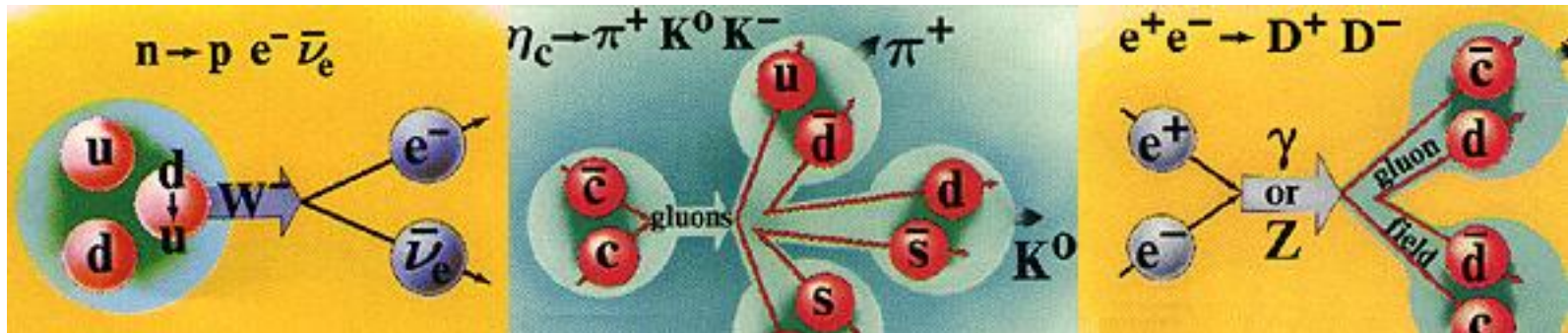
R.P. Feynman
(Premio Nobel 1965)

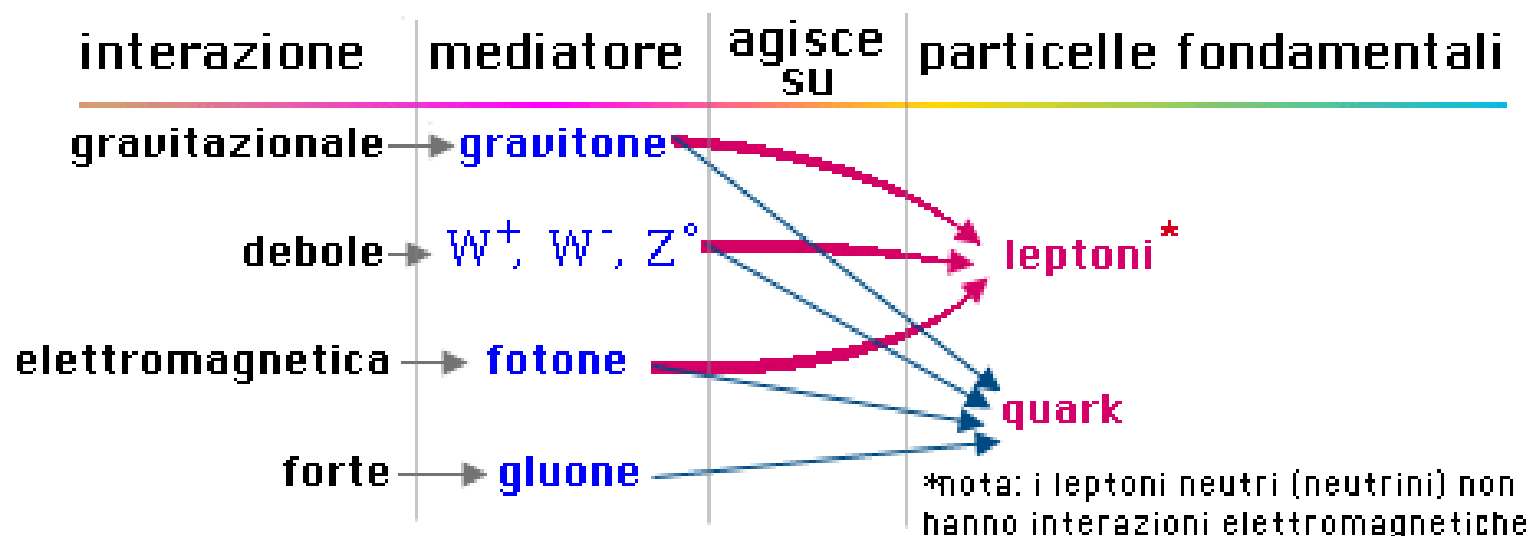
Un fotone viene “scambiato”
fra la 2 particelle:
esso **media** l'interazione

La Fisica della Particelle oggi: il “Modello Standard”

Tutte le scoperte e le teorie elaborate da migliaia di fisici dall'ultimo secolo ad oggi hanno portato all'elaborazione di un quadro sulla struttura fondamentale della materia che chiamiamo: il **Modello Standard delle Forze e delle Particelle**.

Esso richiede: **12 particelle** (“Fermioni”= spin semi-intero) che costituiscono la materia e **4 particelle** (“Bosoni” = spin intero) che sono “portatori” delle forze.





FISICA DEL NUCLEO



FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



FISICA DELLE FORZE FONDAMENTALI

Sono descrivibili da un unico modello matematico?

“Teoria Unificata delle Interazioni Fondamentali”

Il Modello Standard oggi

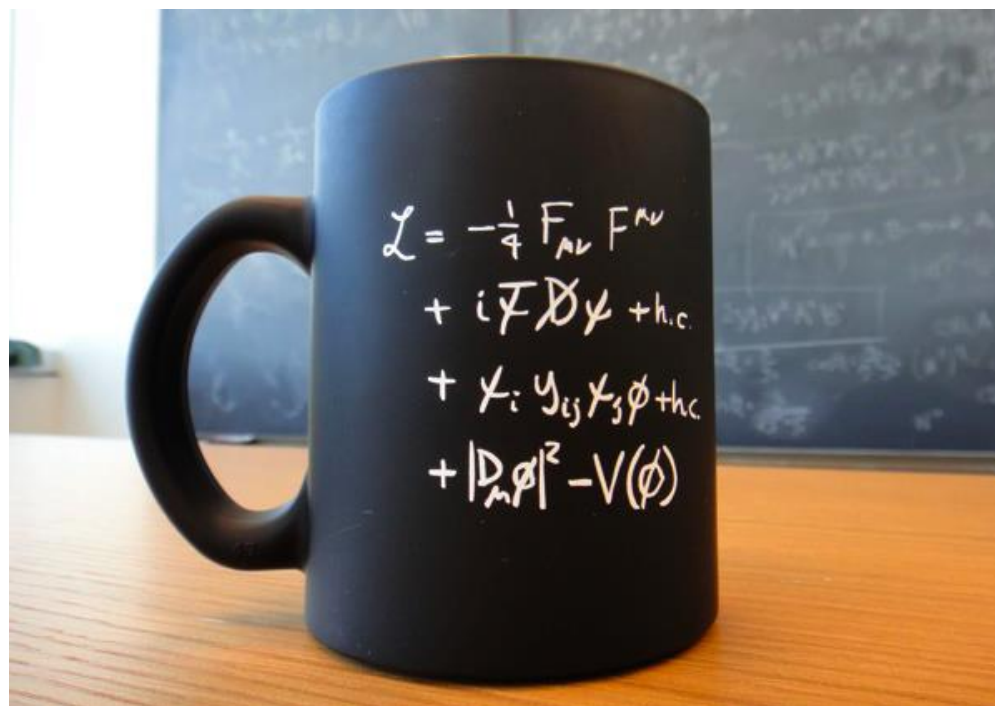
- La sperimentazione al CERN ha permesso di verificare quasi tutte le previsioni di questo modello
- Ci sono tuttavia alcuni eccezioni: per esempio, abbiamo capito che anche i neutrini hanno una massa, e questo non è previsto dal Modello Standard
- Non siamo ancora all'unificazione completa: non sappiamo ancora elaborare una Teoria Quantistica della gravitazione che sia convincente
- Anche l'astrofisica e la cosmologia mostrano che ci sono delle cose che non tornano:
 - Dove è andata l'antimateria nell'universo?
 - Sembra esserci bisogno di altra materia e altra energia: la “Materia Oscura” e l’ “Energia Oscura”

Il Modello Standard va quindi ancora completato o addirittura superato

Nuove idee emergono in questi anni, nuovi fronti sperimentali si stanno aprendo

Grazie per
l'attenzione!

Le equazioni del Modello Standard...



Per qualsiasi domanda sul tema:
giuseppe.battistoni@mi.infn.it



Piazza Morettini (Centro Sportivo)
Tel 339 7091963
www.utlcaravaggio.org
utlcaravaggio@gmail.com