

Elementi di Fisica Subatomica

Anno Accademico 2009-2010

Orario:

Lu 11.30-13.00 G10

Ma 9.00-10.30 G10

Me 9.00-10.30 G10

Raccomandazione - esame

- *Tenere il passo del corso e dare l'esame alla fine dello stesso*
- *una prova in itinere a meta' del corso*
(22 febbraio)
- *una seconda prova a fine corso*
(22 marzo)
- *Orale il 24 marzo*

Scopo del corso

- *Acquisire dimestichezza con gli ordini di grandezza caratteristici dei processi subatomici*
- *Negli appunti sono inseriti riferimenti per Approfondimenti.*
- *Testi particolarmente stimolanti (ma già abbastanza avanzati)*
 - *Galileo and Einstein*
<http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/>
 - *Taylor & Wheeler, Fisica dello spazio-tempo, Zanichelli*
 - *Segré, Nuclei e Particelle, Zanichelli*
 - *Cahn & Goldhaber, The Experimental Foundations of Particle Physics, Cambridge University Press*

Programma

0. Cenni storici (oggi)

- Spazio e tempo
- Impulso ed energia
- Masse ed energie di legame dei nuclei atomici
- Reazioni di fusione e fissione nucleare
- Cinematica dei processi d'urto
- Processi d'urto: dinamica
- Momento angolare e processi di collisione
- Processi di decadimento
- Numeri quantici additivi: la conservazione di Carica elettrica, numero Leptonico e Numero Barionico

Cenni storici

Le prime scoperte sperimentali che aprirono la via alla conoscenza della struttura dell'atomo si susseguirono rapidamente

- Röntgen (1895): scoperta dei raggi X nei tubi catodici
- Becquerel (1896): radioattività
- J.J. Thomson (1897): esistenza dell'elettrone negativo libero
- Planck (1900): quanti di energia
- Einstein (1905): teoria della relatività ristretta

I concetti quantistici, originati dalla termodinamica, dominano la microfisica e, assieme alla teoria della relatività ristretta costituiscono i fondamenti della fisica moderna

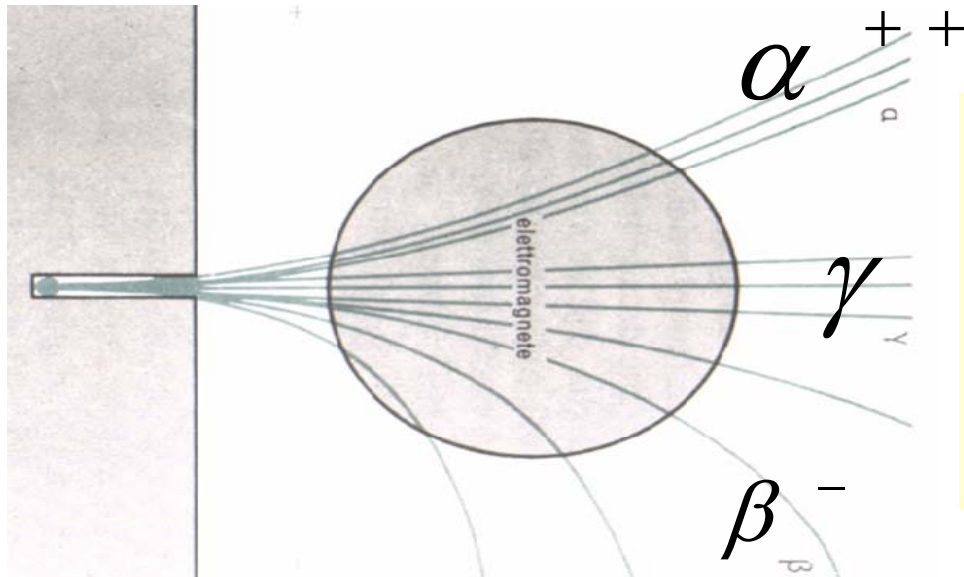


-1896 **H.Becquerel**, conservatore come suo padre e suo nonno di un museo delle pietre luminescenti a Parigi si entusiasmò della scoperta dei raggi X (che allora venivano rivelati con lastre fotografiche) e volle provare se venivano emessi dalle sue pietre. Espose al sole un minerale chiamato uranile, solfato doppio di U e K, e trovò che oltre alla luce il minerale eccitato imprimeva un la lastra fotografica. In un periodo senza sole depose casualmente un pezzo di

uranile sopra una chiave ed una lastra fotografica ben incartata in un cassetto. Espose poi il minerale al sole e finalmente sviluppò la lastra e trovò la macchia del minerale con dentro la forma della chiave. Comprese che il minerale da solo emanava una radiazione nuova più penetrante dei raggi X e che nulla aveva a che fare con la luminescenza, era la **Radioattività**.

Immediatamente molti scienziati si dedicarono a studiare la radioattività **Marie Skłodowska Curie** separò chimicamente gli elementi dell'uranile ed ha scoperto che l'uranio metallico era 5 volte meno attivo del uranile. Quindi cercò qualche altra sostanza che giustificasse il fatto, così scoprì un'altra sostanza attiva con proprietà simili al Bismuto che chiamò Polonio, ed un'altra simile al Bario ~ 2.000.000 di volte più attiva dell'Uranio, il **Radio**. Molte altre sostanze radioattive sono state scoperte in seguito. Questi fatti suscitarono un grande entusiasmo per le ricerche sulla Radioattività che rapidamente provocarono grandi scoperte.





1902-E.Rutherford scopre che vi sono vari tipi di radioattività: **Raggi alfa (+) pesanti,** **Raggi gamma neutri** e **Raggi beta leggeri (-).**

- α: fortemente ionizzanti, assorbiti in pochi cm di aria. Nuclei di elio doppiamente ionizzati
- β: penetrano spessori di alluminio di qualche decimo di mm e sono identici agli elettroni degli atomi
- γ: penetrano in diversi cm di piombo e non sono deflessi da campi elettrici e magnetici. Sono radiazioni elettromagnetiche di alta energia della stessa natura dei raggi X

L'identità chimica degli atomi radioattivi cambia nel tempo!

Teoria del decadimento radioattivo (Rutherford & Soddy, 1903)

$$-dN = \lambda \cdot N \cdot dt \rightarrow N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}$$

Cambiamenti dell'identità chimica regolati dalla legge dello spostamento (Russell, Soddy e Fajans 1913): una sostanza

- Per emissione α si trasforma in un'altra che la precede di due posti nel sistema periodico
- Per emissione β si trasforma in un'altra che la segue di un posto nel sistema periodico

- Il peso atomico diminuisce di 4 unità nel primo caso e resta immutato nel secondo
- Una disintegrazione α seguita da due disintegrazioni β deve pertanto dare una sostanza che ha un diverso peso atomico ma che occupa lo stesso posto (isotopo) della sostanza madre nel sistema periodico

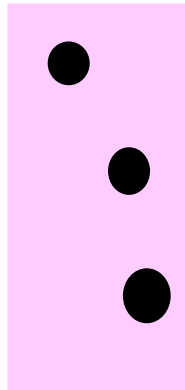
Il concetto di isotopo, sviluppato per elementi radioattivi, fu esteso da J. J. Thomson e Aston agli elementi stabili ordinari (1913-1919)

bersaglio

soffice



rigido

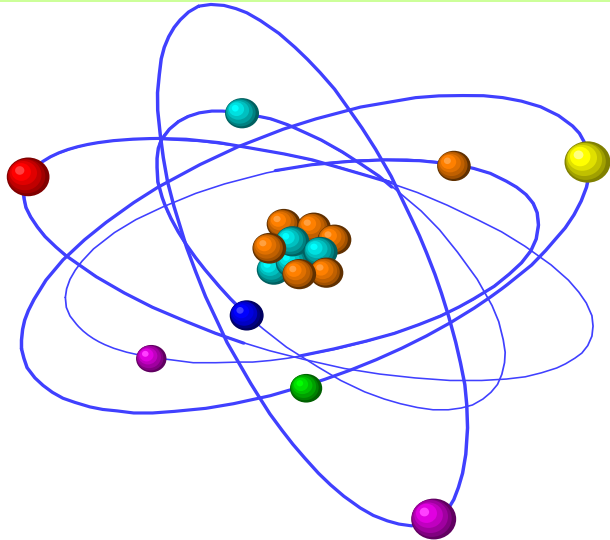
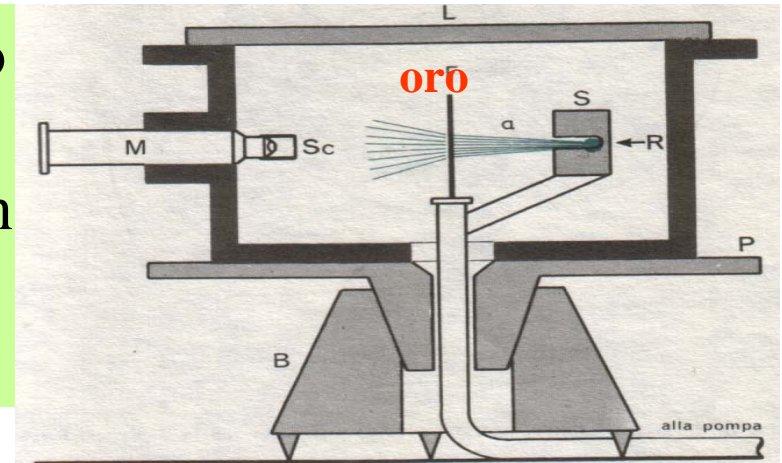


alfa



-1911 E. Rutherford invia delle **alfa** contro una lamina di **oro**, **1/8000** rimbalza. Stabilisce che la massa dell'atomo è concentrata in **1/100 000** del raggio di un atomo

$$r_{\text{nucleo}} = 10^{-13} \text{ cm} = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 1 \text{ cm}$$

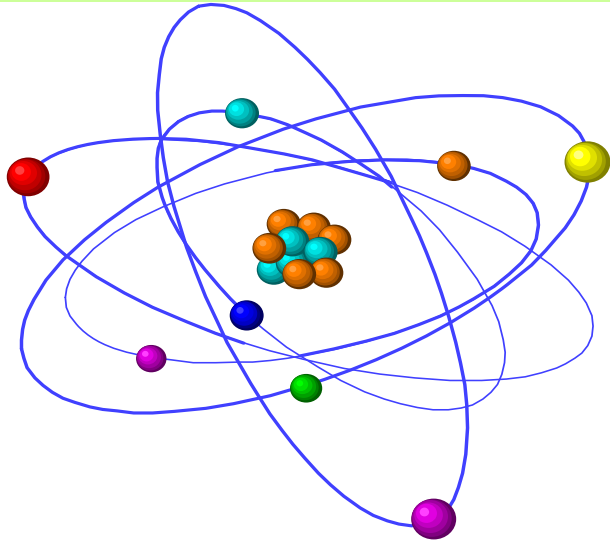
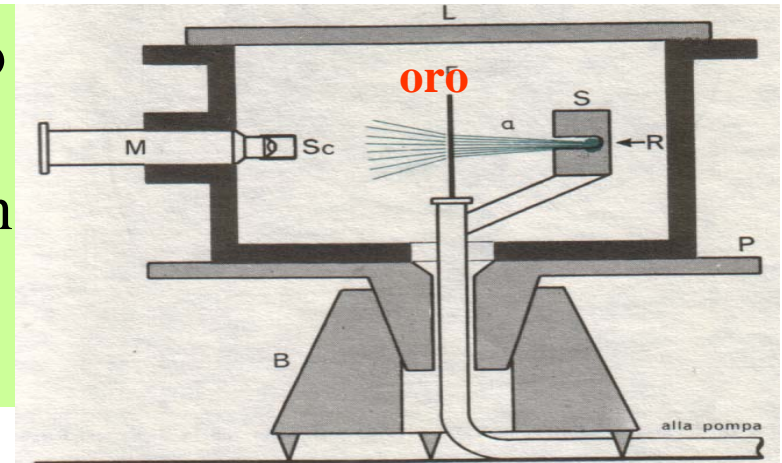


L'atomo di Rutherford è simile a un sistema planetario con un **nucleo positivo** che contiene più del 99.9% della massa dell'atomo circondato da una nuvola di **elettroni negativi**.

- Diffrazione raggi X (von Laue, Friederich e Knipping, 1912) → spettroscopia (Moseley) → concetto di numero atomico Z e chiarificazione di elemento chimico: tutti gli atomi di egual numero atomico appartengono allo stesso elemento
- Esperimento di Rutherford: numero atomico Z = carica positiva del nucleo, assumendo come grandezza dell'unità di carica quella dell'elettrone

-1911 E. Rutherford invia delle **alfa** contro una lamina di **oro**, $1/8000$ rimbalza. Stabilisce che la massa dell'atomo è concentrata in $1/100\ 000$ del raggio di un atomo

$$r_{\text{nucleo}} = 10^{-13} \text{ cm} = 0.000\ 000\ 000\ 0001 \text{ cm}$$



L'**atomo di Rutherford** è simile a un sistema planetario con un **nucleo positivo** che contiene più del 99.9% della massa dell'atomo circondato da una nuvola di **elettroni negativi**.

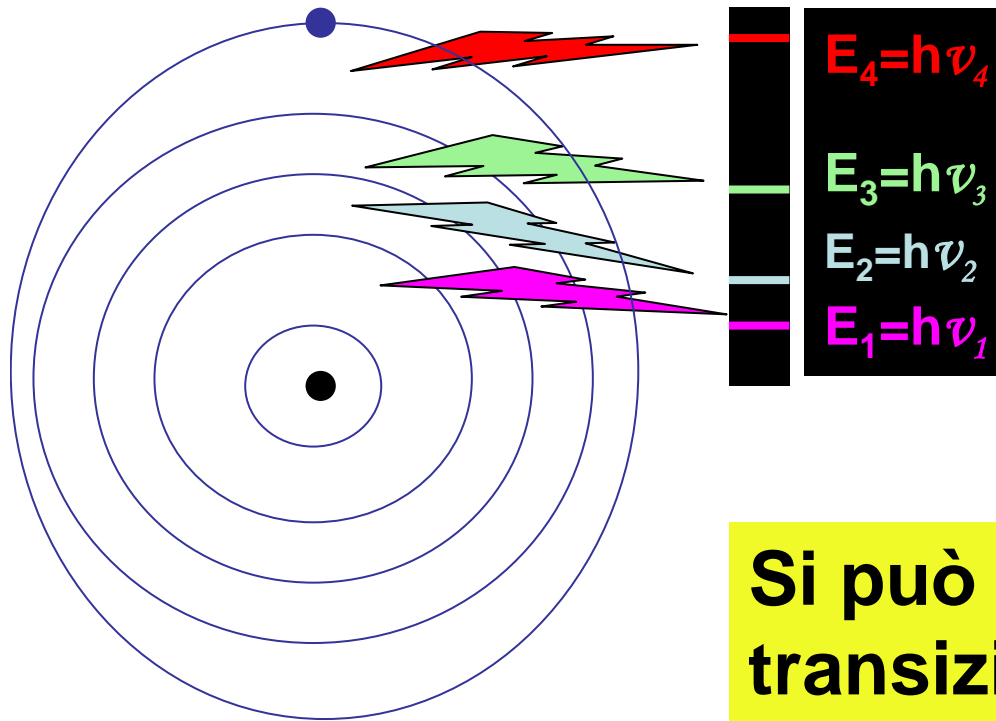
Nelle antenne gli elettroni accelerati emettono le onde radio

Gli elettroni accelerati o frenati emettono energia sotto forma di onde e-m

Nei tubi catodici gli elettroni frenati emettono i raggi X

Il modello planetario con elettroni rotanti quindi accelerati non funziona. Gli elettroni cadrebbero nel nucleo emettendo onde elettromagnetiche, in tempi brevissimi (meno di un miliardesimo di secondo). ASSURDO!!!

1912 Niels Bohr raggiunge il Laboratorio di E. Rutherford a Manchester in una situazione della Fisica molto complessa e confusa:



Bohr assume l'ipotesi che la luce sia emessa in grani (quanti) di energia come proposto da Planck nel 1900 e confermato con l'effetto fotoelettrico da Einstein.

Con queste ipotesi Bohr deriva la formula di Balmer

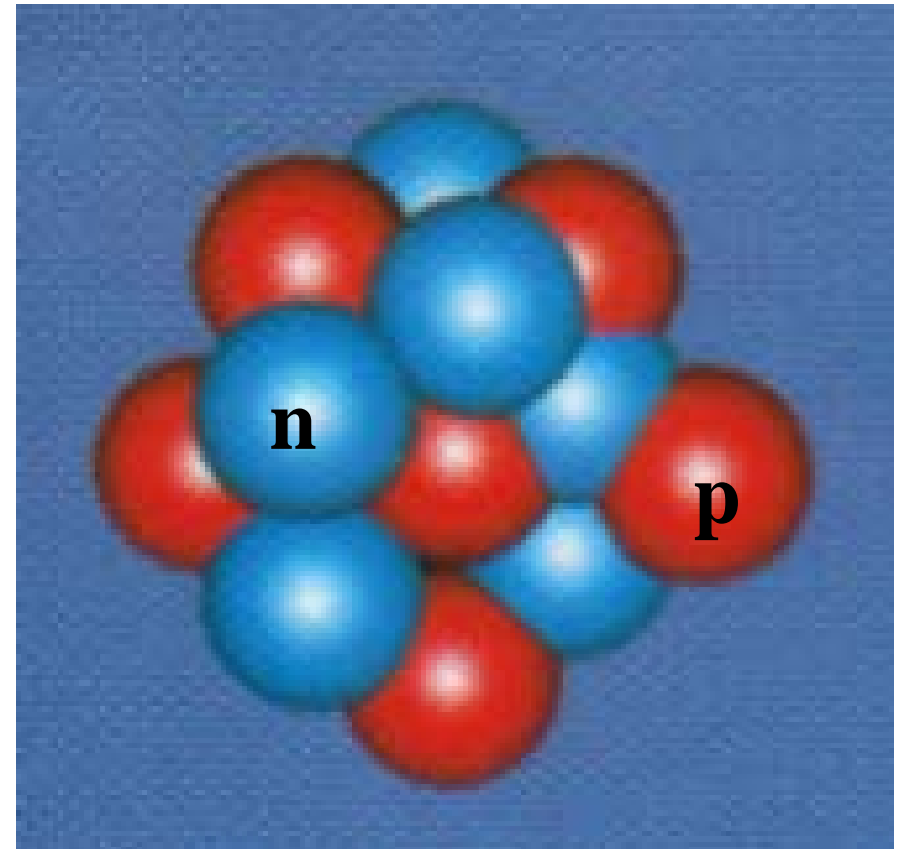
$$\nu = R \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)$$

Si può dimostrare che l'ultima transizione sul nucleo non è possibile. Questo da la stabilità della materia.

Dopo otto anni, a seguito di una serie di esperimenti la teoria di Bohr per gli atomi e la teoria della quantizzazione dell'energia, fu definitivamente adottata.

- La spiegazione di Bohr dello spettro dell'idrogeno costituì il punto di partenza del tumultuoso sviluppo della fisica atomica che culminò verso la fine degli anni venti nella formulazione della meccanica quantistica (de Broglie, Heisenberg, Born, Schroedinger, Dirac, Pauli e altri)
- Una volta accettata la nuova meccanica e i suoi concetti profondamente diversi da quelli della fisica classica, la legge di Coulomb dell'elettricità basta a spiegare innumerevoli fenomeni in spettroscopia, chimica e fisica dei solidi e, in generale, a dare una completa giustificazione delle proprietà atomiche e molecolari della materia
- In tutti questi studi è generalmente sufficiente schematizzare il nucleo come una carica puntiforme di massa opportuna
- Lo studio teorico della fisica del nucleo fu però inizialmente lento e trasse poco profitto dalla meccanica quantistica, non essendo nota né l'identità dei costituenti nucleari né la legge secondo cui essi interagiscono

- Rutherford (1919) bombarda azoto con particelle α e mostra che vengono emessi nuclei di idrogeno → identificato il protone ($\pi\rho\omega\tau\omicron\nu$ = primo)
- Ipotesi più naturale: il nucleo è composto da A protoni e $A-Z$ elettroni. A numero intero, *numero di massa*
 - Rende conto dell'uguaglianza approssimativa delle masse dei singoli isotopi a multipli interi di quella dell'idrogeno
 - Deviazioni dovute all'energia di legame: $E=\Delta mc^2$



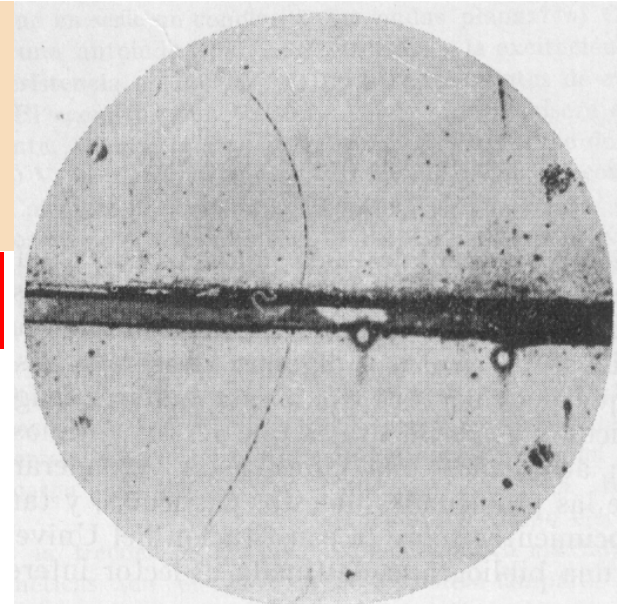
Ipotesi insostenibile per altri motivi → Z protoni e $A-Z$ neutroni.
Il neutrone fu scoperto da Chadwick nel 1932

**TUTTI I NUCLEI
SONO COMPOSTI
DI SOLI PROTONI
E NEUTRONI**

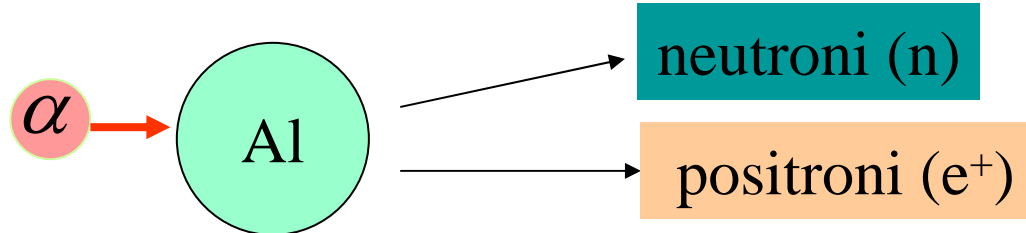
**Tutta la materia è
composta solo di**

**ELETTRONI
PROTONI
NEUTRONI**

-1932 **Anderson**, nei raggi cosmici scopre gli **elettroni positivi, (e+) positroni**, primo esempio di **antimateria**, prevista da **P.A.Dirac nel 1927**. L'analogo a livello nucleare (antiprotone) fu scoperto nel 1955 da Segré e Chamberlain.

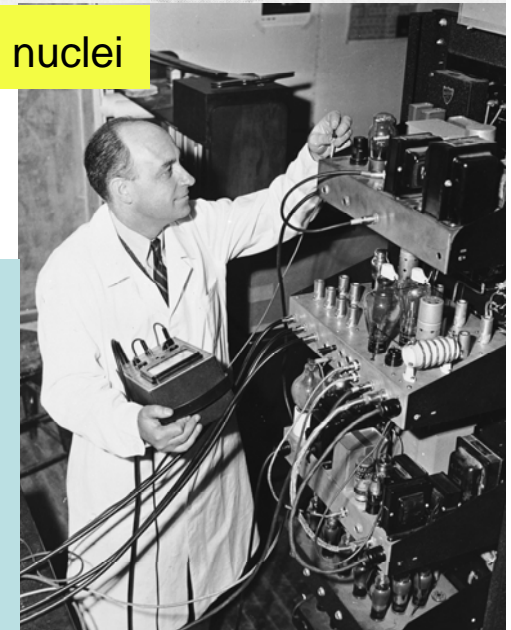


-1933 Joliot- Curie Radioattività artificiale

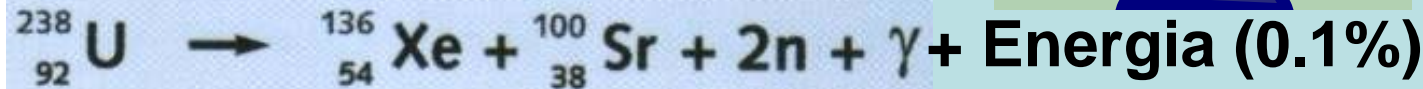
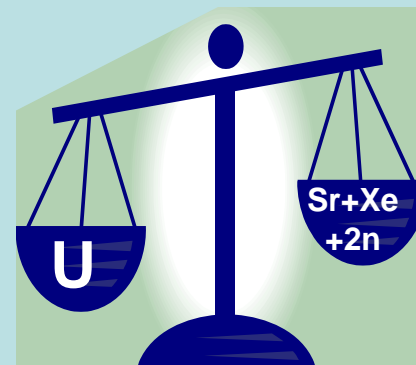
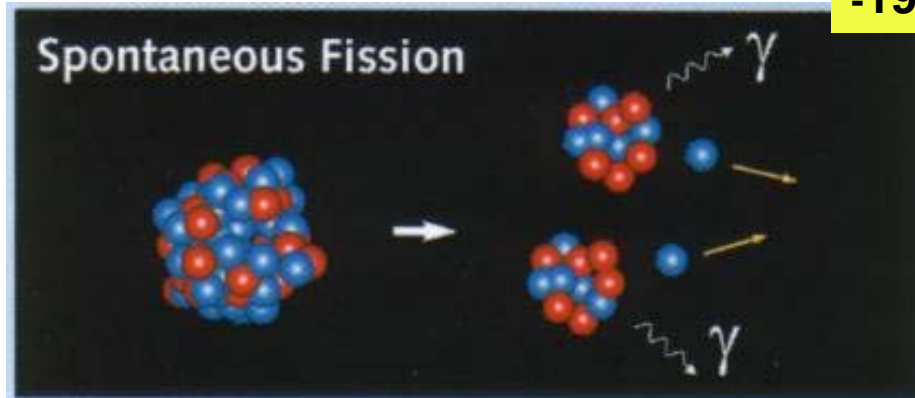


-1934 **E.Fermi**: neutroni lenti particolarmente efficaci nel disintegrare i nuclei

-1938 **Strassmann e Hahn**: fissione dell'uranio → liberazione dell'energia nucleare su larga scala

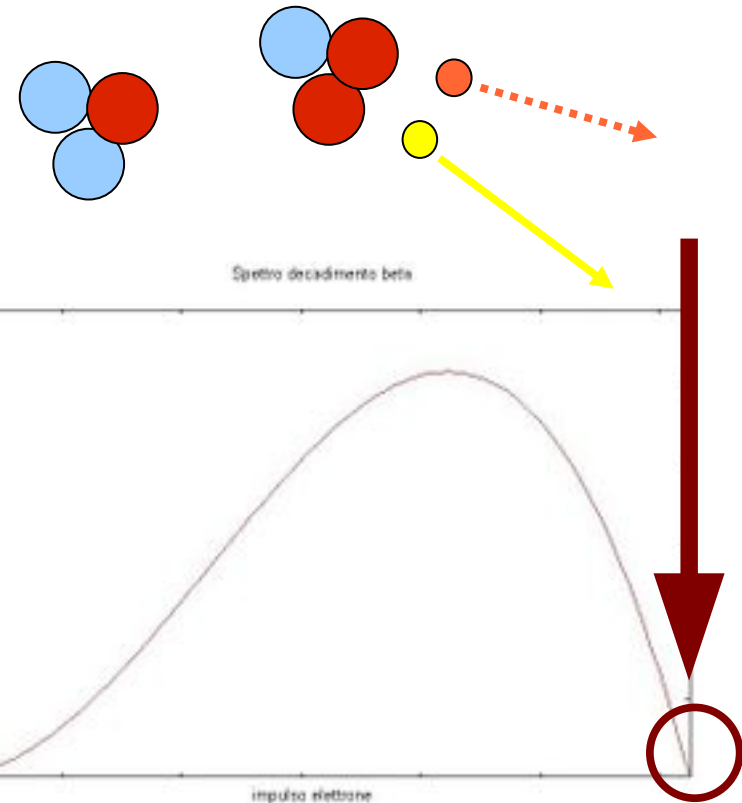


-1942 **Fermi**: pila atomica



Decadimento β

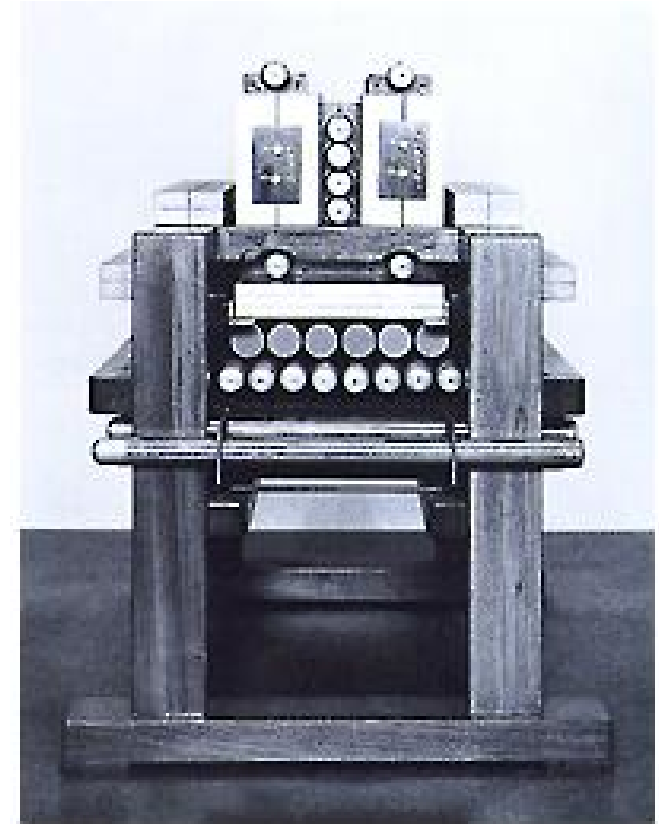
- La fenomenologia del decadimento β presentava gravi enigmi
- Fermi (1933), con l'aiuto dell'ipotesi del neutrino di Pauli (1930), introdusse il concetto di un nuovo tipo di forza in natura, l'interazione debole.
- Il neutrino è stato scoperto da Reyes e Cowan nel 1952



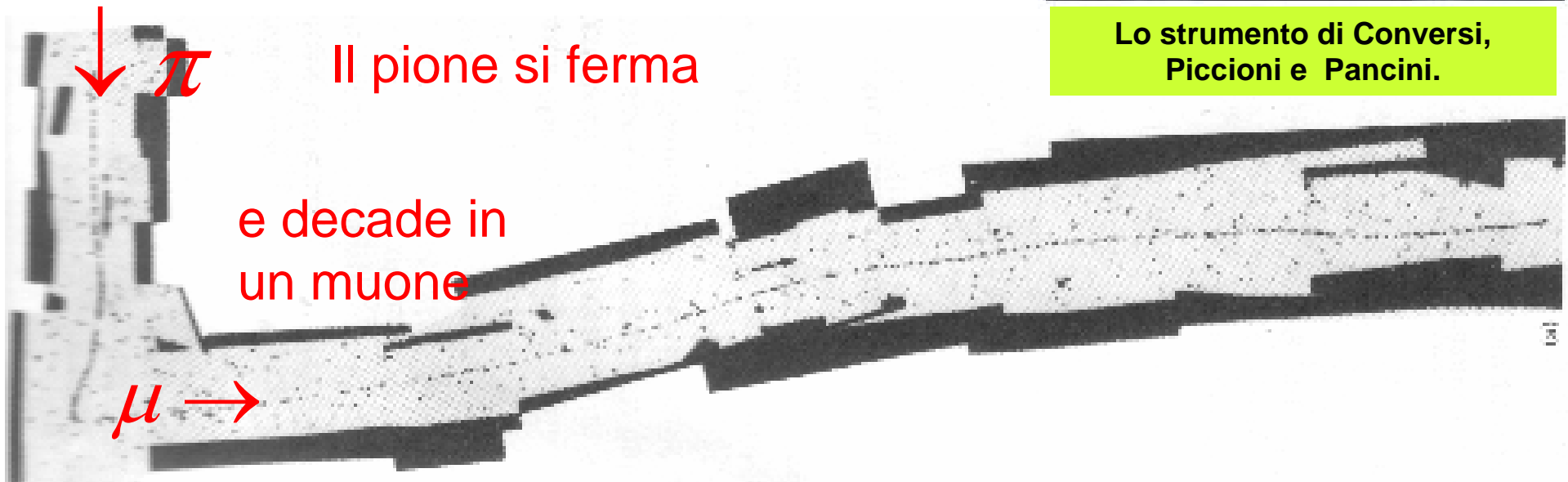
- Questa forza è molto importante in fisica delle particelle
- Violazione della *inversione spaziale* o parità P (Wu, 1958)
- Violazione di *parità e coniugazione di carica* o CP (Christenson et al. 1964, Babar & Belle 2001)

Ferrara!

- Ispirandosi a Fermi, Yukawa (1935) costruì la teoria delle forze nucleari, in cui postulava l'esistenza di una particella (mesone o pione) di massa intermedia tra quella dell'elettrone e quella del protone.
- Particelle di massa intermedia furono messe in evidenza nei raggi cosmici attorno al 1935 da Anderson, Neddermeyer, Rossi.
- Ma non erano quelle aspettate (Conversi, Pancini e Piccioni, 1947)
- Il mesone di Yukawa fu comunque trovato (Lattes, Occhialini e Powell, 1947)
- A ciò fece seguito la scoperta di varie altre particelle nei raggi cosmici e agli acceleratori



Lo strumento di Conversi, Piccioni e Pancini.



“Madamina, il catalogo è questo...”

- Tra il 1950 e oggi vengono fabbricate e osservate una pletera di particelle:
 - Tre Leptoni carichi (e, μ, τ)
 - Tre Leptoni neutri (ν_e, ν_μ, ν_τ)
 - Tre Bosoni mediatori (γ, W, Z)
 - Una miriade di Adroni carichi e neutri (svariate centinaia di stati osservati e catalogati a tutt'oggi) :

$\pi, \rho, K, \eta, \eta', \phi, f, \rho, n, a, \Delta, \Omega, \Pi, \Psi, Y, D, B...$

Interazione Forte, Elettromagnetica e Debole

Dal Molteplice all'Uno ?

- Come ci spieghiamo la fauna adronica ?
- Esiste un principio unitario sotto l'apparente molteplicità ?
- Torniamo ai classici !

Particle	Symbol	Anti-particle	Makeup	Rest mass MeV/c ²	S	C	B	Lifetime	Decay Modes
<u>Pion</u>	π^+	π^-	$u\bar{d}$	139.6	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^+ \nu_\mu$
<u>Pion</u>	π^0	Self	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135.0	0	0	0	0.83×10^{-16}	2γ
<u>Kaon</u>	K^+	K^-	$u\bar{s}$	493.7	+1	0	0	1.24×10^{-8}	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
<u>Kaon</u>	K_S^0	K_S^0	1^*	497.7	+1	0	0	0.89×10^{-10}	$\pi^+ \pi^-, 2\pi^0$
<u>Kaon</u>	K_L^0	K_L^0	1^*	497.7	+1	0	0	5.2×10^{-8}	$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e$
<u>Eta</u>	η^0	Self	2^*	548.8	0	0	0	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\mu$
<u>Eta prime</u>	η'	Self	2^*	958	0	0	0
<u>Rho</u>	ρ^+	ρ^-	$u\bar{d}$	770	0	0	0	0.4×10^{-23}	π, π
<u>Rho</u>	ρ^0	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	770	0	0	0
<u>Omega</u>	ω^0	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	782	0	0	0
<u>Phi</u>	ϕ	Self	$s\bar{s}$	1020	0	0	0	20×10^{-23}	$K^+ K^-, K^0 \bar{K}^0$

La Tavola Periodica

- ~1860 le regolarità nelle proprietà degli elementi portano Mendeleev (ed altri) a formulare la tavola periodica, indicazione di un principio unitario (l'atomo) che soggiace all'apparente molteplicità degli elementi

Periodic Table of Elements

1																	2																			
1	H																	He																		
2	3	Li	4	Be																	10															
3	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
6	55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	89	+Ac	104	Rf	105	Ha	106	107	108	109	110																					

* Lanthanide Series

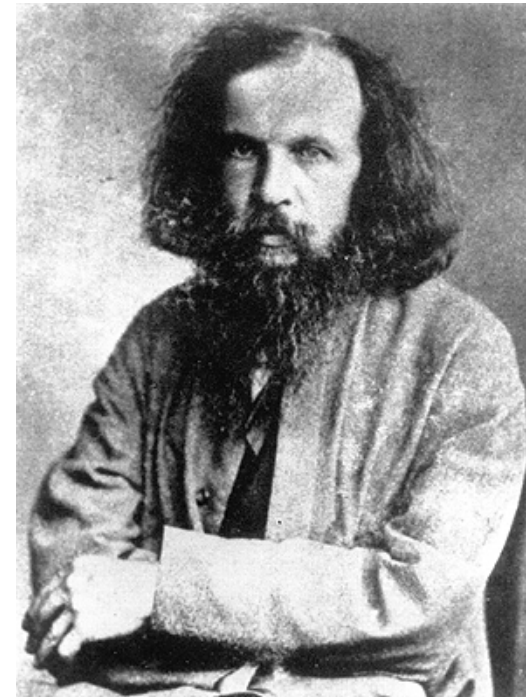
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

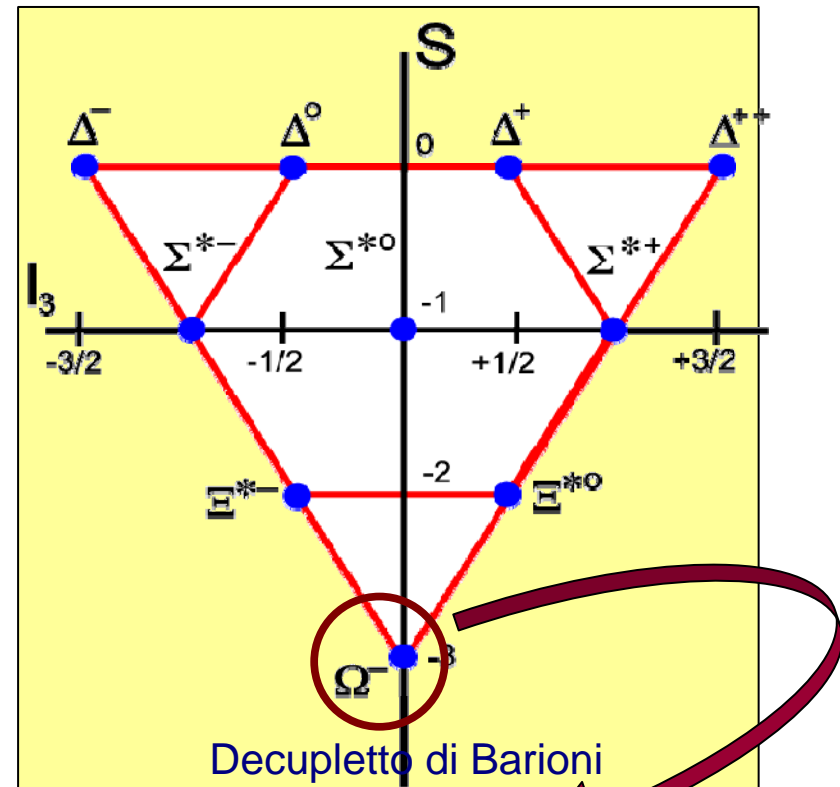
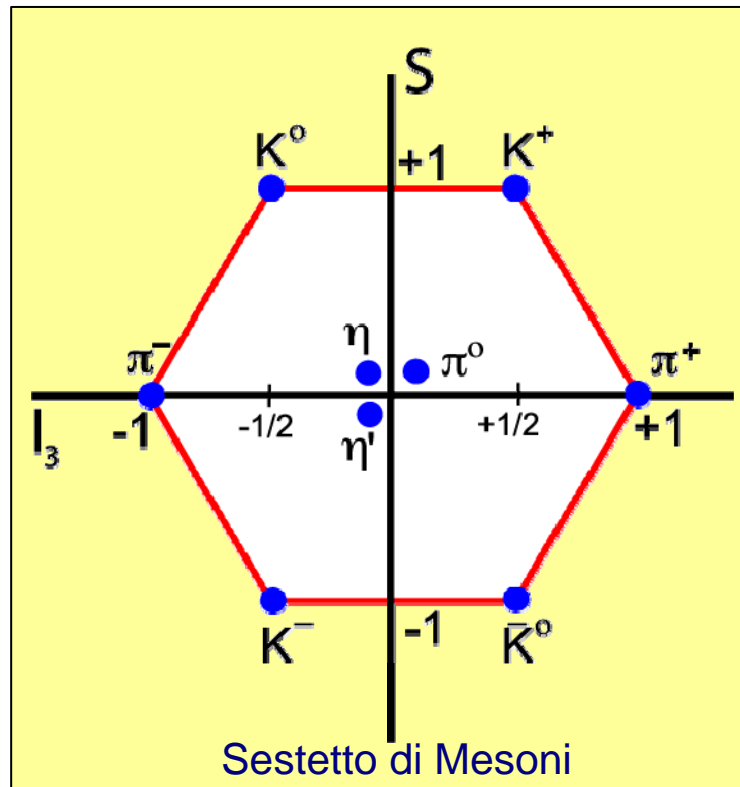
Legend - click to find out more...

H - gas	Li - solid	Br - liquid	Tc - synthetic
Non-Metals	Transition Metals	Rare Earth Metals	Halogens
Alkali Metals	Alkali Earth Metals	Other Metals	Inert Elements



Le Stesse Cose Ritornano (1)

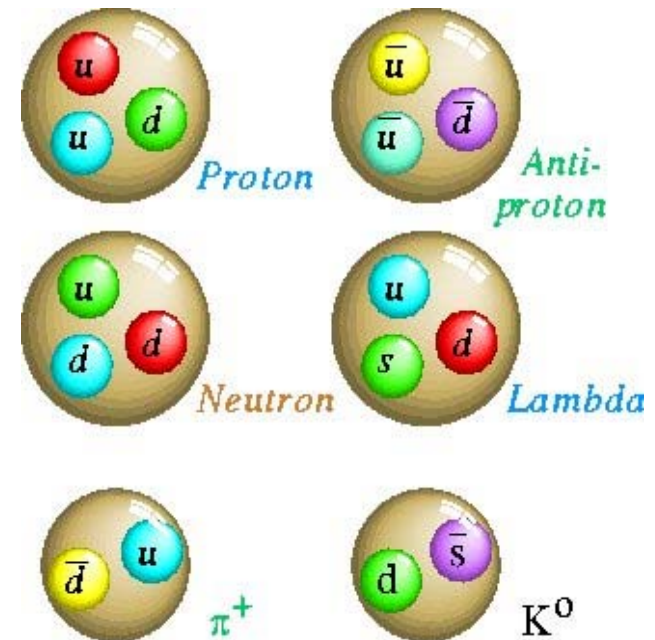
- Per mettere ordine in questa complessità si è resa necessaria l'introduzione di un nuovo numero quantico, la stranezza (Gell-Mann e Nishijima, 1953)
- 1964 Gell-Mann e Zweig scoprono regolarità nelle proprietà degli adroni, che possono essere catalogati in "multipletti"



L' Ω fu predetta dal modello prima di essere scoperta!

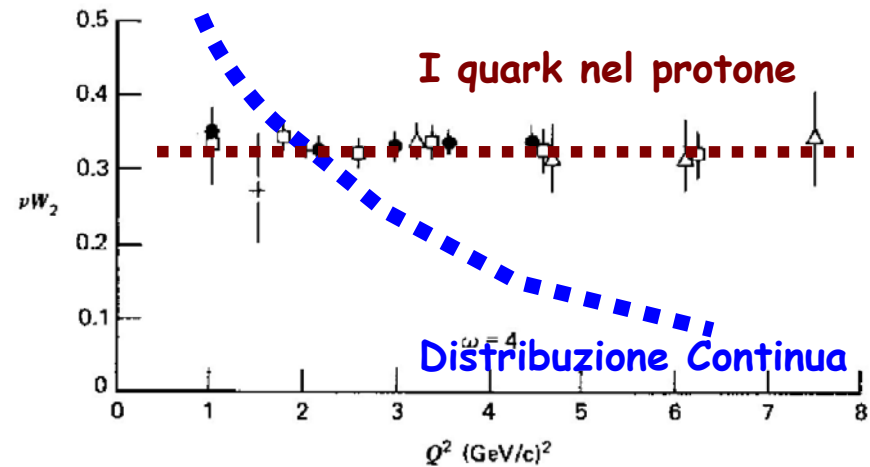
Three Quarks for Muster Mark

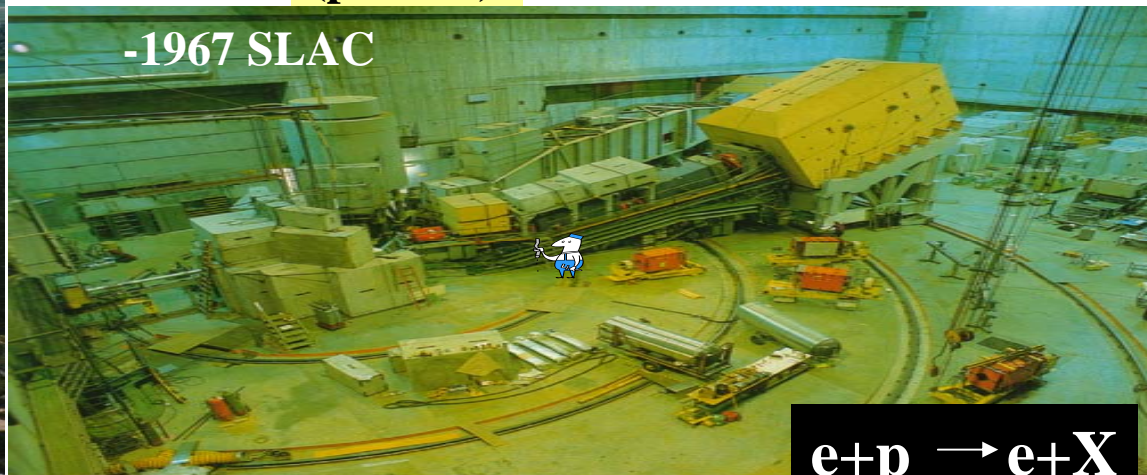
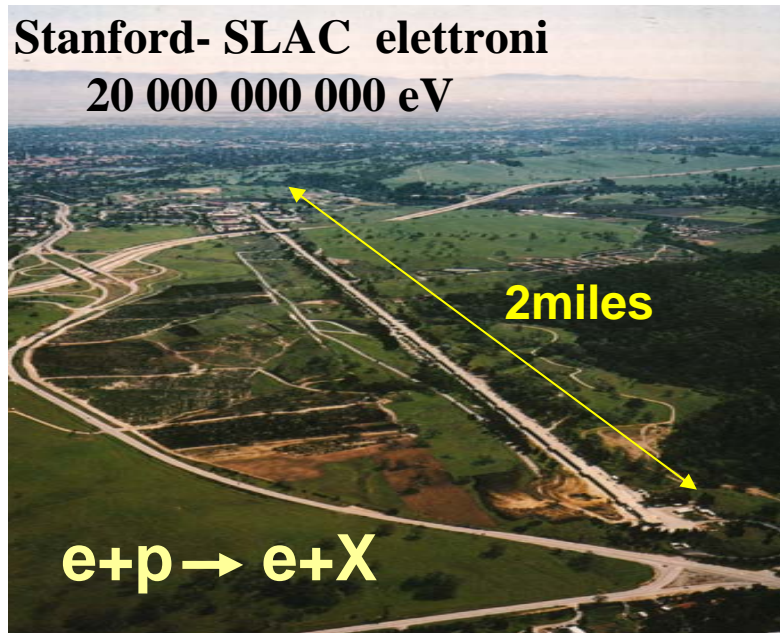
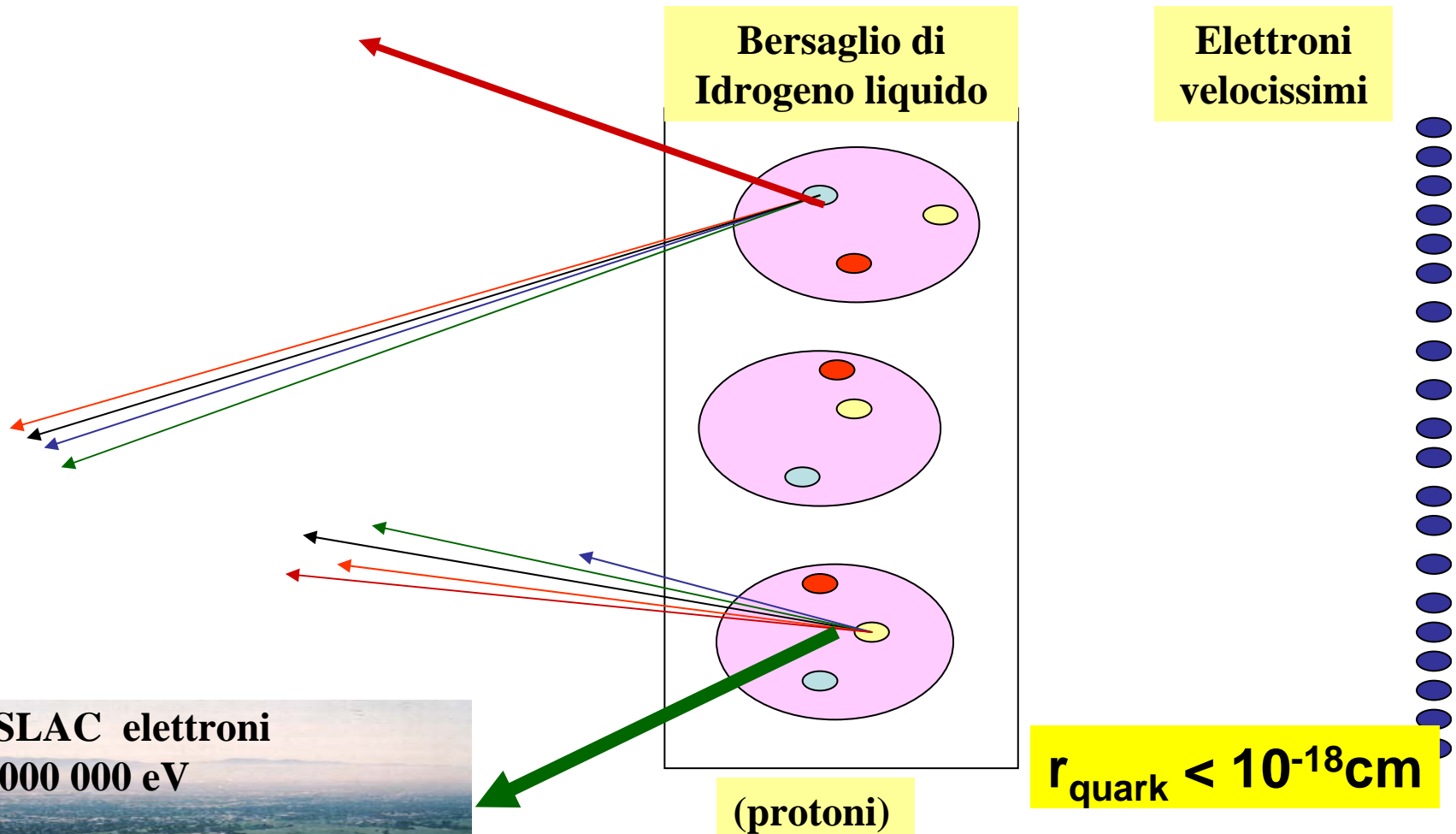
- Ogni adrone e' ottenuto combinando dei costituenti fondamentali (*i quark*), che formano le particelle osservabili, raggruppate in:
 - *Mesoni*, coppie quark-antiquark a spin intero
 - *Barioni*, terne di quark (o anti-quark) a spin semintero
 - Gell-Mann Zweig (1964): 3 quarks (u,d,s)
 - 1974 : scoperto il charm
(predetto nel 1970 da Glashow, Iliopoulos e Maiani!)
 - 1977 : scoperto il bottom
 - 1994 : scoperto il top
- ... per un totale di sei quark!



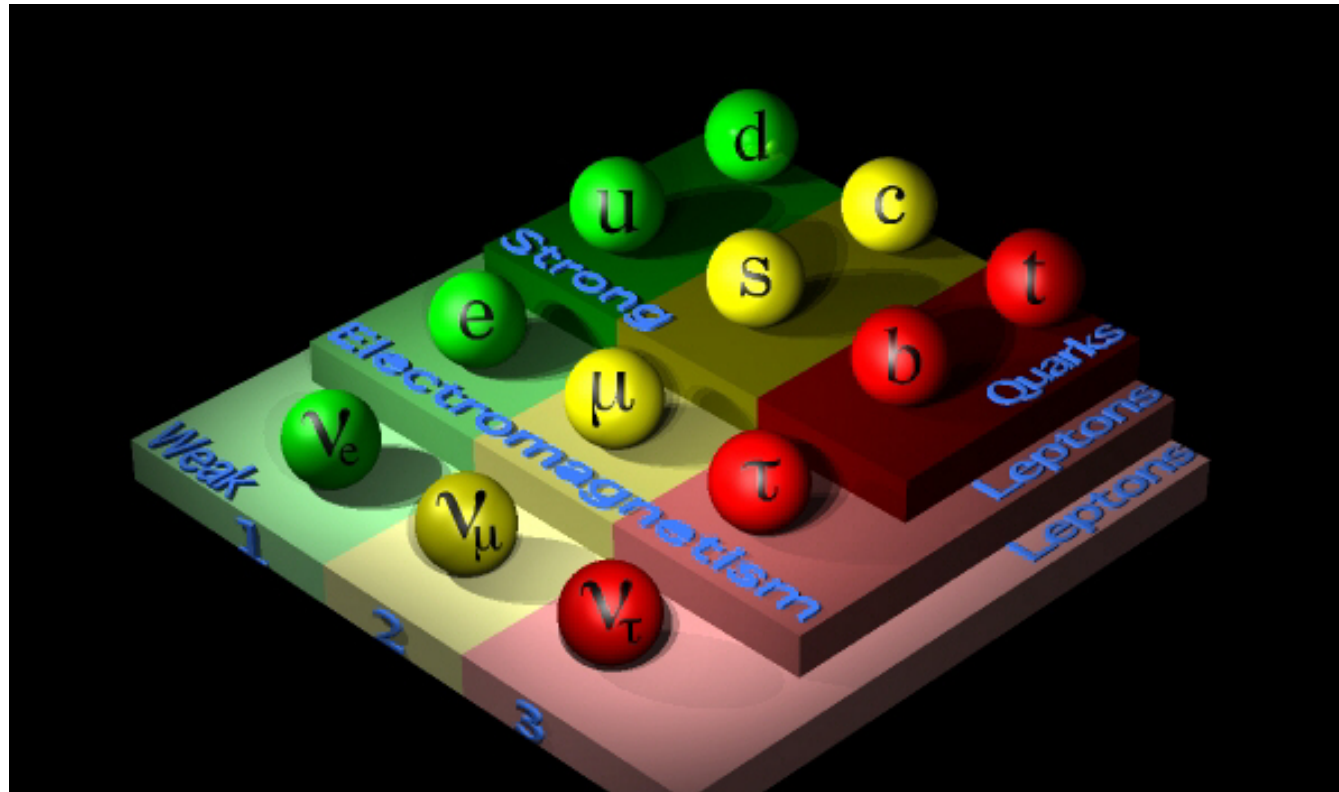
Le Stesse Cose Ritornano (2)

- Esperimenti Diffusione Inelastica confermano in maniera indipendente l'ipotesi dei quark
- Come Rutherford, 50 anni dopo
- Bombardo nuclei H (protoni) con sonde puntiformi (e) e studio la struttura del nucleone
- Le misure dell'angolo di diffusione dell' e mostrano che il protone e' composto da (tre) corpi puntiformi : *i quark*!





I Costituenti Fondamentali



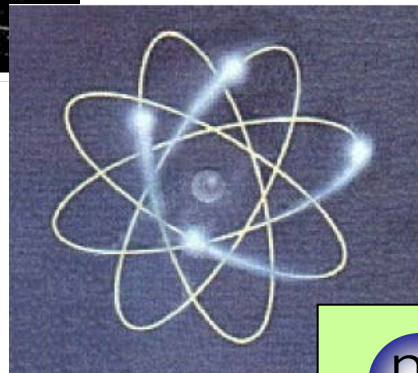
La materia consiste di 12 particelle elementari, 6 *leptoni* e 6 *quark*, che raggruppiamo in 3 famiglie (generazioni), di massa vieppiu' crescente

La materia ordinaria e' formata solo dalla prima generazione
La forza tra le particelle di materia e' trasmessa (mediata) da altre particelle , i cosiddetti campi di Gauge

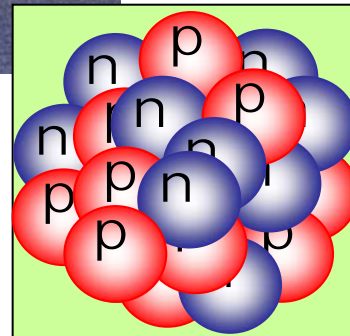
Le 4 interazioni fondamentali



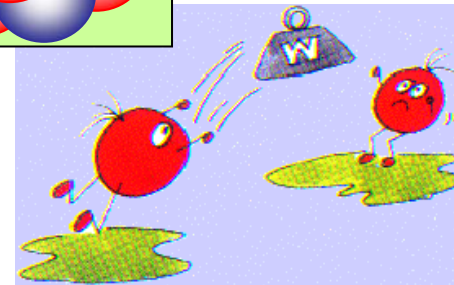
Gravitazionale



Elettromagnetica



Forte



Debole

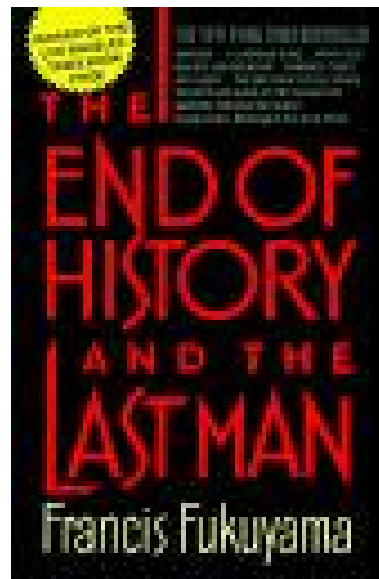
Il Modello Standard

- Proposto nel 1967 da Glashow, Salaam, Weinberg (piu' contributi di Cabibbo, Kobaiashi, Maskawa, t'Hoft ...)
- Descrive efficacemente tutte le proprietà delle particelle elementari osservate finora, in termini di interazioni Deboli , Elettromagnetiche e Forti
- Riconduce interazioni Deboli ed Elettromagnetiche ad un'unica origine (Teoria ElettroDebole)



Lo Stato dell'Arte

- Il Modello Standard descrive precisamente le interazioni tra le particelle elementari
- Tutti gli esperimenti di laboratorio sono in accordo con le previsioni del M.S.
 - Tranne quelli sulle masse del neutrino!
- La fine della storia ?



La Storia Continua (a)

- Il M.S. prevede l'esistenza (“dietro l'angolo”) di una particella non ancora osservata, il bosone di Higgs
- E' peculiare:
 - non è materia (leptone/quark)
 - non è un mediatore
 - genera le masse di tutte le particelle (incluse W e Z) mediante un processo noto come “rottura spontanea della simmetria”

La Storia Continua (b)

- Il M.S. non puo' essere la teoria ultima.

Non spiega:

- Perché 3 x 2 famiglie ?
- Perché masse cosi' diverse ?

$$(m_{\nu_e} < 1 \text{ eV} ; m_{\text{top}} = 175 \text{ GeV})$$

- Perché 4 interazioni ?
- Cosa dà le masse ai neutrini ?
- Come conglobare la gravità ?

La Storia Continua (c)

- Da un punto di vista Cosmologico
 - perche' l'universo e' fatto di materia ?
 - il 70% della massa dell'Universo non puo' essere attribuito alle particelle note: **MATERIA OSCURA**
 - il 95% dell'energia dell'universo non puo' essere attribuito alle particelle note: **ENERGIA OSCURA**
 - **INFLAZIONE**: in uno stadio primigenio, l'universo ha accelerato la sua espansione in base a meccanismi non spiegabili nel Modello Standard