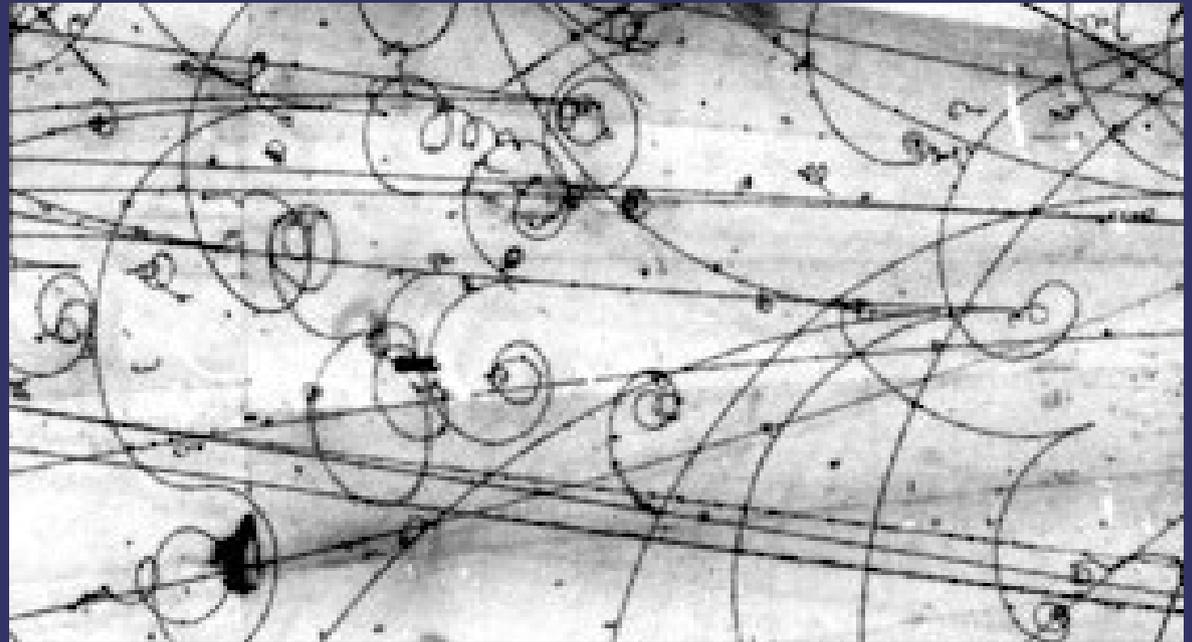


Introduzione alla Fisica delle Particelle Elementari

- Introduzione
 - Scopo del Gioco
 - Regole del Gioco
 - Strumenti del Gioco
- Excursus storico
- Lo stato attuale
- Le prospettive



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



Lo Scopo del Gioco

- Fine di questa ricerca :
 - Identificare i costituenti fondamentali della materia
 - Identificare le forze che si sviluppano tra essi
 - Ricreare in Laboratorio particelle estinte dai primi istanti del Big Bang e capire i meccanismi all'origine dell'Universo



“Aim of Physics Research is to add new terms to the Universe Lagrangian; all the rest is Chemistry”



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



Regole del Gioco

- La Forza di Lorentz :

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

- II Principio Dinamica:

$$\vec{F} = \frac{d \vec{p}}{dt}$$

- Quantita' di Moto :

$$\vec{p} = \frac{m \vec{v}}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

- Energia :

$$E = \sqrt{(cp)^2 + (mc^2)^2}$$

$$E = mc^2$$

Particella a riposo,
($p = 0$)

$$E \simeq cp$$

Particella Ultrarelativistica
($p \gg m$)

Termini del Gioco

- L'unita' di misura dell'energia delle particelle elementari e' l'elettronVolt:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

- Corrisponde all'energia cinetica acquisita da un elettrone sottoposto alla differenza di potenziale di un Volt
- Di conseguenza la quantita' di moto si esprime in eV/c
- Di conseguenza la massa si esprime in eV/c^2

$$M_e = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ Kg} = 0.511 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2 \sim \frac{1}{2} \text{ MeV}/c^2$$

$$M_p = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ Kg} = 0.939 \cdot 10^9 \text{ eV}/c^2 \sim 1 \text{ GeV}/c^2$$



Gli Strumenti del Gioco

Sorgenti di particelle :

- Naturali
 - Sostanze Radioattive
 - Raggi Cosmici
- Artificiali
 - Acceleratori
 - Reattori

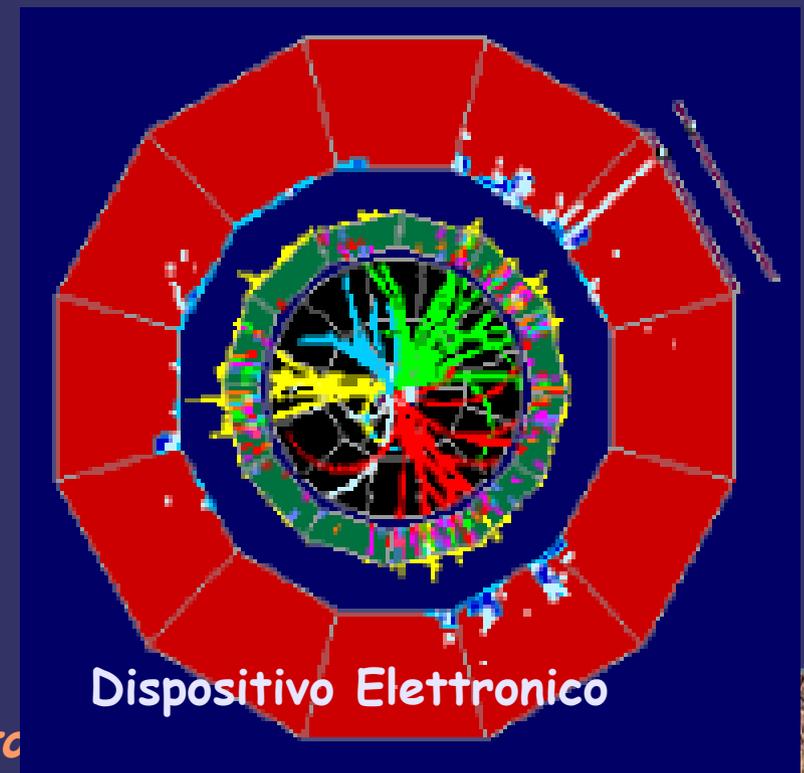
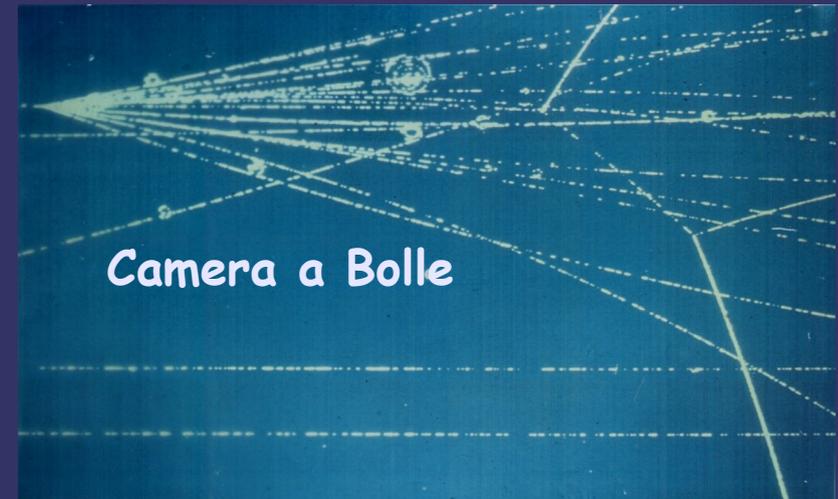
Rivelazione delle particelle

- Cariche:
 - Ionizzazione
- Neutre
 - Sciami



Gli Strumenti del Gioco: la Ionizzazione

- Se una particella carica (e, μ, π, K, p) attraversa un mezzo strappa gli elettroni esterni dagli atomi, che restano ionizzati
- Elettroni e ioni creano una sorta di "scia" attorno alla sua traiettoria della particella
- La "scia", e quindi la traiettoria originale, sono osservate mediante strumenti noti come rivelatori



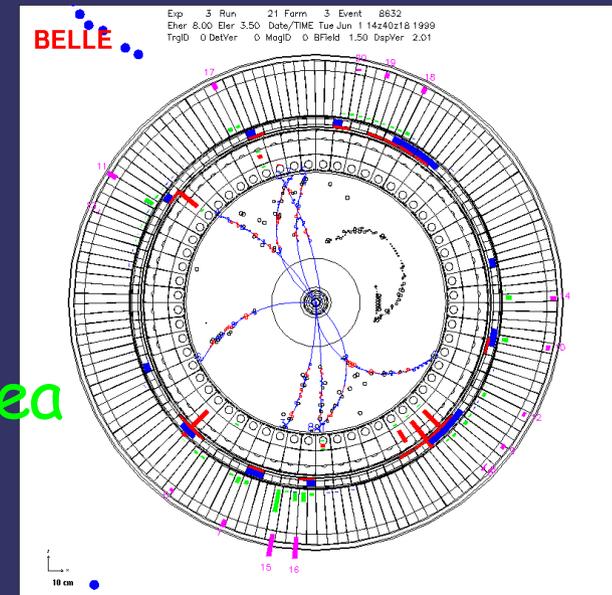
Gli Strumenti del Gioco: misura di P

- Quantita' di Moto (momento):
- Una particella di carica q in moto con momento p un campo magnetico uniforme B descrive una circonferenza di raggio r :
- Misurando le traiettorie, determino p e il segno di q
- Nota :

p grande $\Rightarrow r$ grande, traiettoria \sim rettilinea

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

$$r = \frac{p}{qB}$$

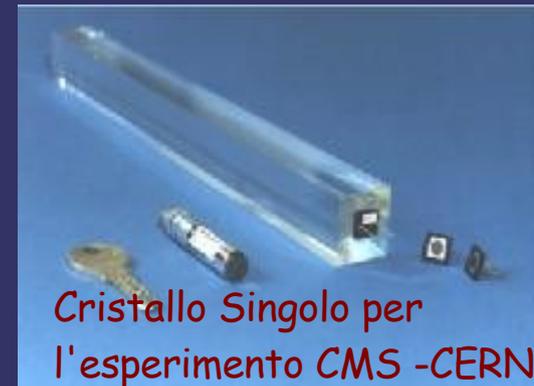
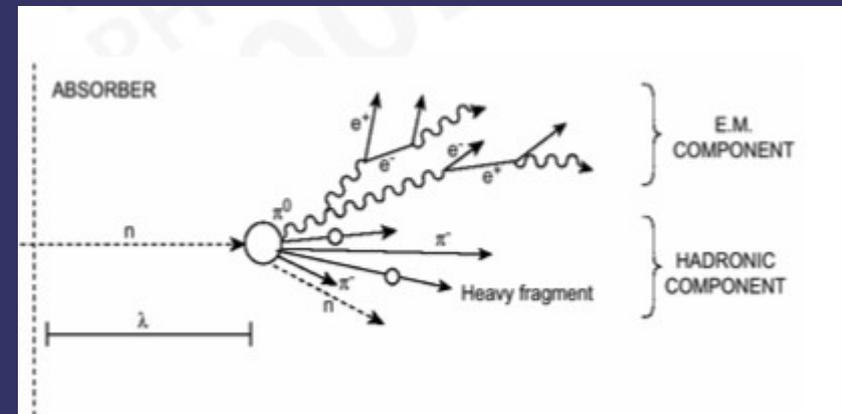


Franco Simonetto
 Universita' & INFN Padova



Gli Strumenti del Gioco: particelle neutre

- Quanti di luce (*fotoni γ*), neutroni (*n*) e mesoni K neutri (*K_L*)
- Vengono assorbite in "tamponi" (calorimetri) che ne raccolgono tutta l'energia
- In alcune sostanze (scintillatori, vetri al piombo, gas) l'assorbimento e' accompagnato da *rilascio di luce*, che viene raccolta da opportuni strumenti (diodi, fotomoltiplicatori), consentendo *la misura dell'energia* della particella originaria



IL GIOCO

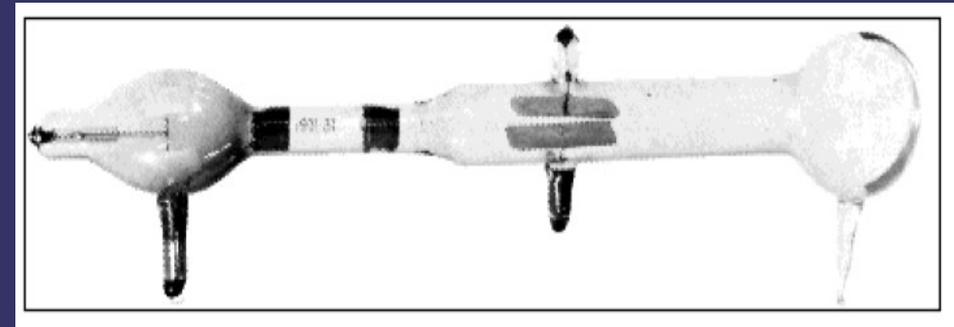
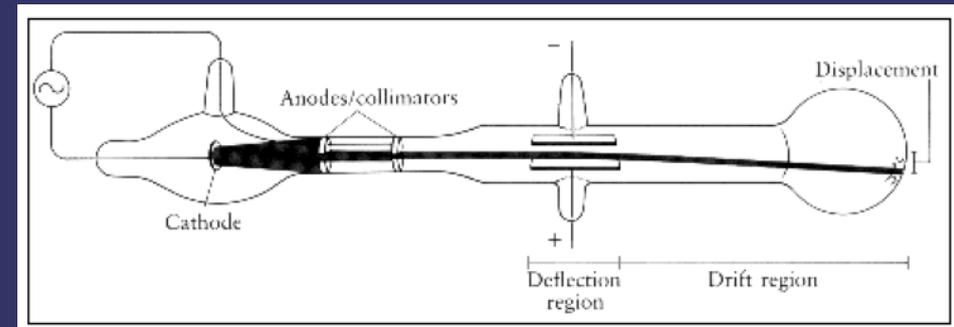


Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



Lo sviluppo storico: gli elettroni (1897)

- Fasci di particelle di carica negativa vengono facilmente estratti da superfici metalliche riscaldate
- Combinando le misure di moto in campo magnetico con le misure di Millikan si determinano la massa e la carica dell'elettrone



$$m = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ Kg} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

$$q = -1.6021 \cdot 10^{-19} \text{ C} = -e$$

Tutte le particelle elementari hanno carica in modulo pari a multipli interi di e

Lo sviluppo storico: i nuclei

- La materia tuttavia e' neutra
- Come sono distribuite le cariche (positive e negative) al suo interno ?
- Nota : le particelle sono cosi' minuscole che non possono essere osservate dal piu' preciso microscopio ottico
- Come possiamo risolvere la struttura della materia ?



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova

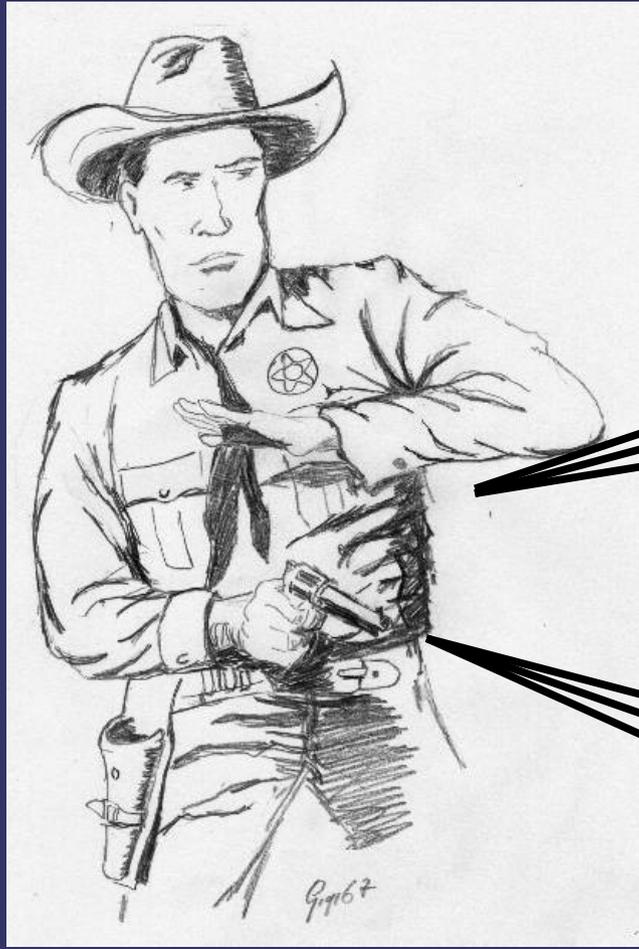


Un'analogia

- Uno dei due sacchi contiene solo sabbia, e un'altro anche pepite d'oro
- Come faccio a scegliere se non posso toccarli?



Il metodo di Tex Willer

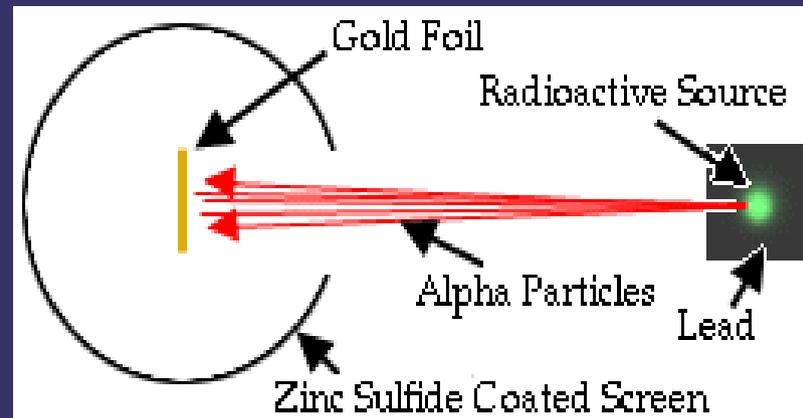


Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



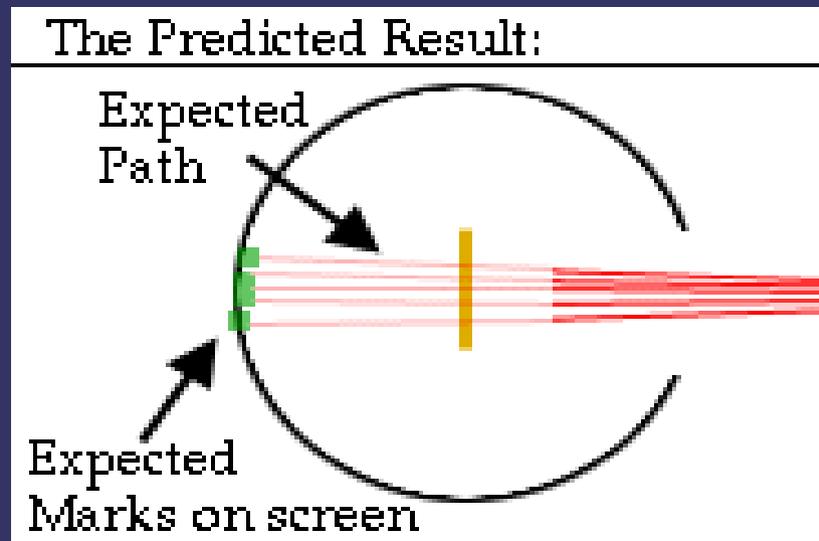
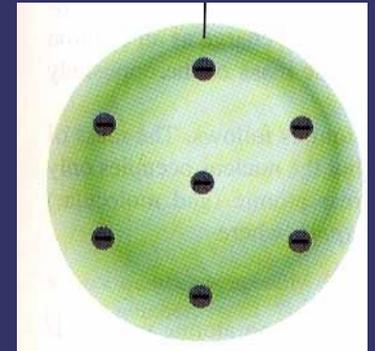
L'esperimento di Rutherford (1910)

- Pallottole : particelle α ($q = 2 e$, $m \sim 8000 m_e$) prodotte da sorgente radioattiva
- Bersaglio : sottile lamina d'oro
- Osservo la deflessione delle particelle dopo l'urto



Il pregiudizio : modello di Thomson

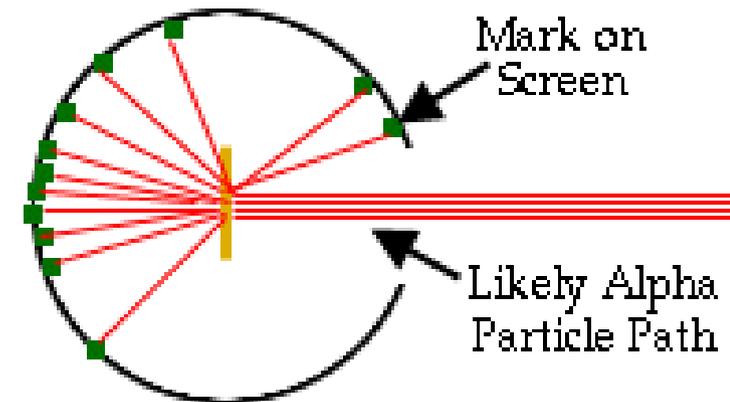
- Il panettone: la carica positiva e' distribuita uniformemente su una sfera (la pasta) su cui sono incastonati gli elettroni (l'uvetta)
- Predizione: le particelle α non subiscono apprezzabili deviazioni (la sabbia)



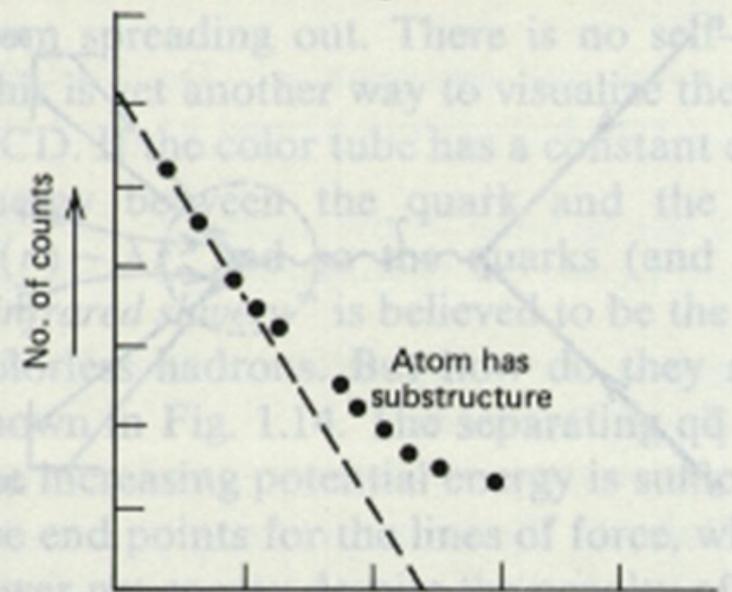
La misura : il risultato inatteso

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !

Extrapolation of Result:



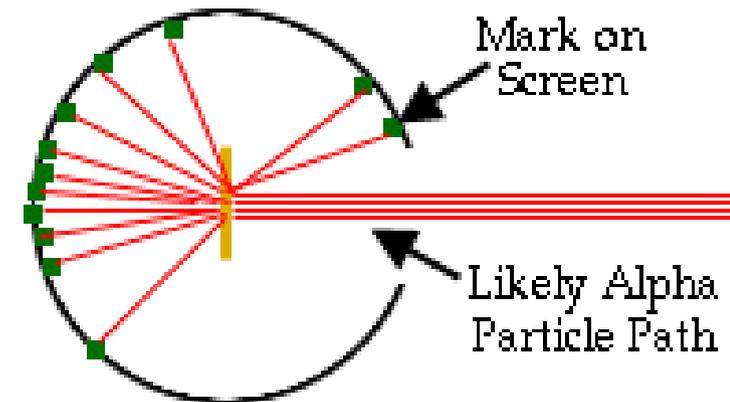
Au target *Phil. Mag.* xxi, 669 (1911)



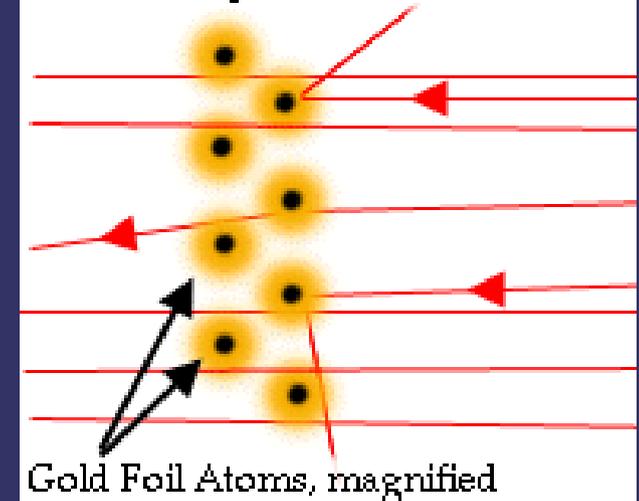
L'interpretazione: il modello nucleare

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata (le pepite)

Extrapolation of Result:



A Positive Nucleus Reflects Alpha Particles

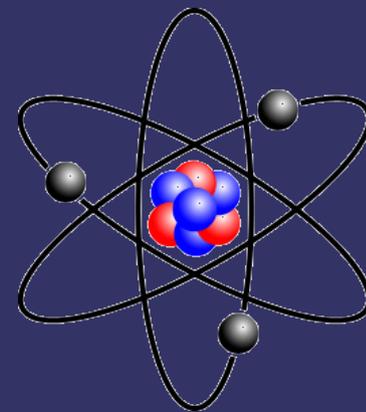
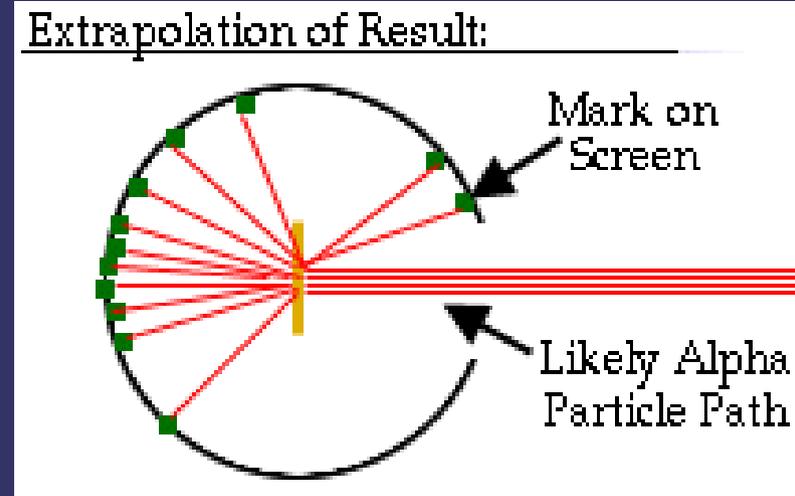


L'interpretazione: il modello nucleare

- Si osservano particelle deviate a grande angolo !
- La carica positiva deve essere concentrata (le pepite)
- Ora sappiamo che :

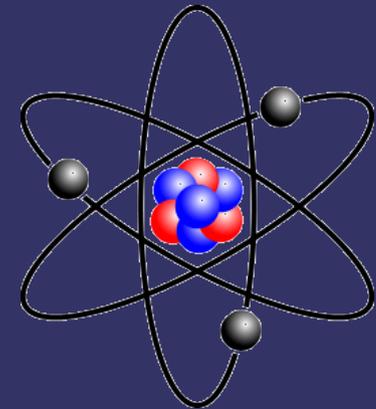
- $R_{\text{Atomo}} \sim 10^{-10} \text{ m}$

- $R_{\text{Nucleo}} \sim 10^{-15} \text{ m} \sim 1/100\,000 R_{\text{Atomo}}$



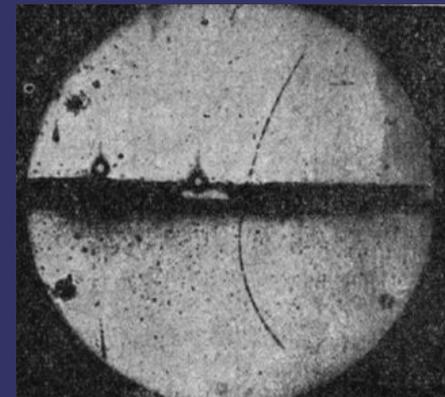
La struttura del nucleo

- Le cariche positive (*protoni*, $q_p = +e$, $m_p \sim 2000 m_e$), non possono dar luogo da sole ad un nucleo stabile (repulsione Coulombiana)
- Servono:
 - dei moderatori (*neutroni*, $q_n = 0$, $m_n \sim m_p \sim 1 \text{ GeV}/c^2$ osservati da Chadwick nel 1932)
 - un nuovo collante : la *Forza Nucleare Forte*
- Definizione:
 - ADRONI: tutte le particelle sensibili alla *FNF* (protoni, neutroni e molti altri)
 - Gli elettroni non sono adroni, ma leptoni

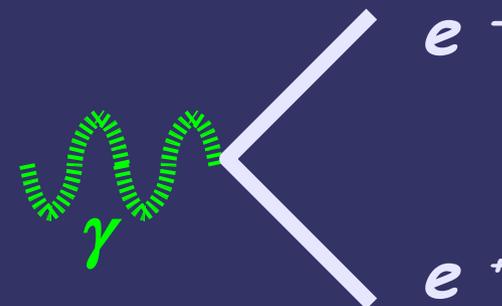


La materia non si conserva !

- E' noto che frenando elettroni in un mezzo pesante si producono fotoni (raggi X e γ)
- 1933 : Andersen irradia una sbarra di piombo con raggi γ
- Osserva la produzione in coppie di un elettrone e di una particella identica (uguale massa, uguale momento angolare intrinseco) ma di carica opposta , il **positrone**
- **Scoperta l'antimateria !** (Predetta da Dirac nel 1929)
- Conversione Energia (fotone) -> Materia + Antimateria, in accordo con la Relativita' Ristretta:



$$E_{\gamma} = E_{e^{-}} + E_{e^{+}} = \sqrt{(M_e c^2)^2 + (cp_{e^{-}})^2} + \sqrt{(M_e c^2)^2 + (cp_{e^{+}})^2}$$

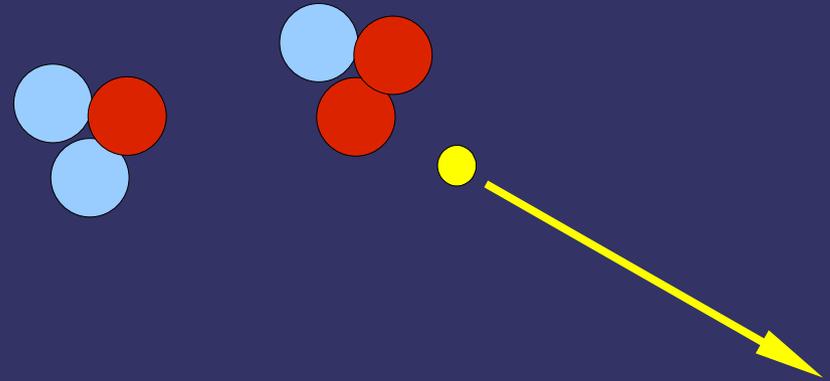


Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



... ma l'Energia si conserva ?

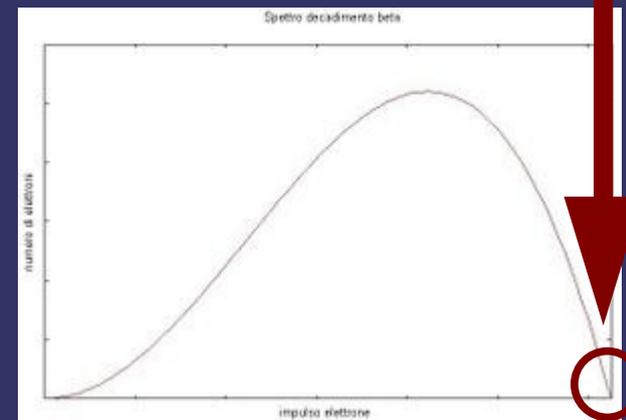
- Decadimento β^- dei nuclei :



- Se il decadimento e' in due corpi l'elettrone ha energia fissa :

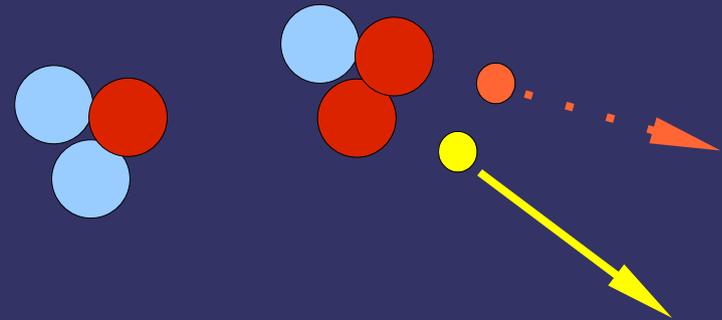
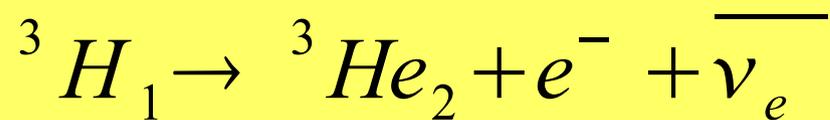
$$E_e = E({}^3\text{H}_1) - E({}^3\text{He}_2) \sim (M({}^3\text{H}_1) - M({}^3\text{He}_2)) c^2 = 17.3 \text{ KeV}$$

- L'esperimento mostra invece un insieme continuo (*spettro*) di valori di E_e , da 0 a 17.3 KeV



... ma l'Energia si conserva ad ogni costo

- Pauli : e' un decadimento a tre corpi



- La nuova particella (neutrino ν) trasporta l'energia non osservata :

$$E_{\bar{\nu}} = E_{Max,e} - E_e \simeq (M_{{}^3H_1} - M_{{}^3He_2})c^2 - E_e$$

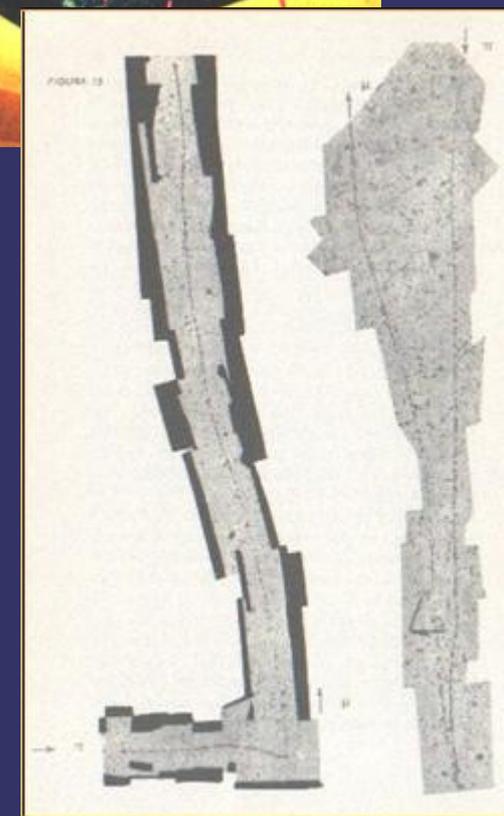
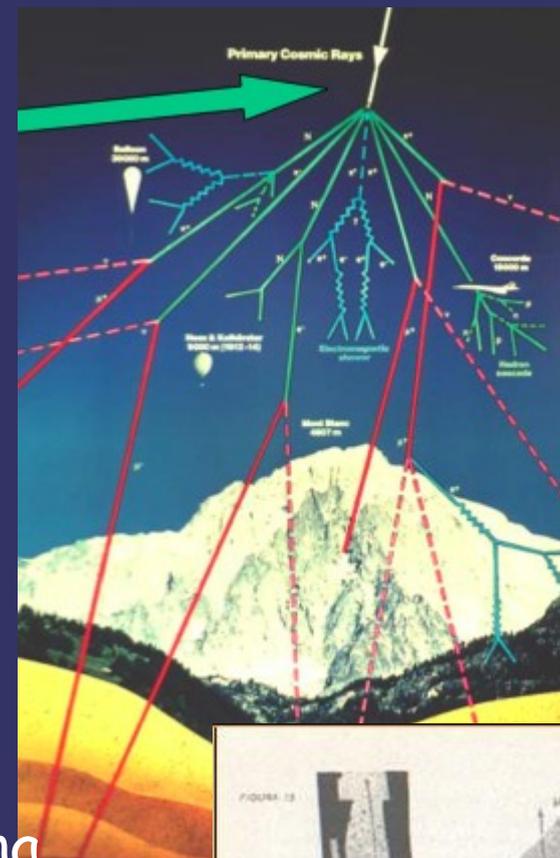
- Il neutrino non viene osservato perche' e' insensibile alla forza elettromagnetica e alla forza nucleare forte
- Viene scoperto nel 1952 da Reynes e Cowan che osservano interazioni dovute all'unica forza cui il neutrino e' sensibile, la **Forza Nucleare Debole**

La Manna dal cielo ...

- I Raggi cosmici

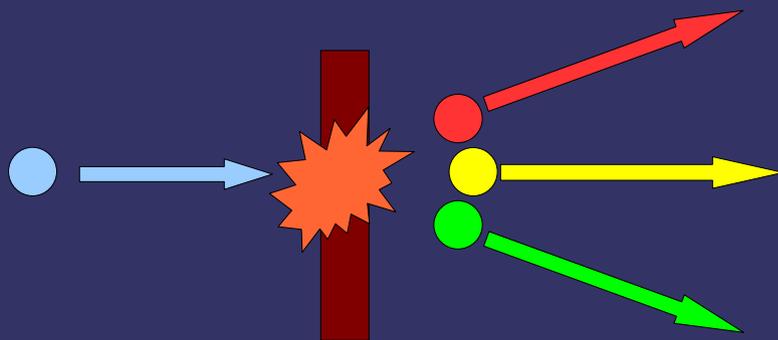
- Radiazione Elettromagnetica
- neutrini
- elettroni
- protoni:

Interagendo con l'atmosfera, producono una pletora di nuove particelle (π, K, \dots), che vennero osservate con emulsioni su pallone, o con esperimenti elettronici a terra (μ). Tipicamente queste particelle hanno una vita media dell'ordine del μsec , o inferiore.



... e la Terra Promessa

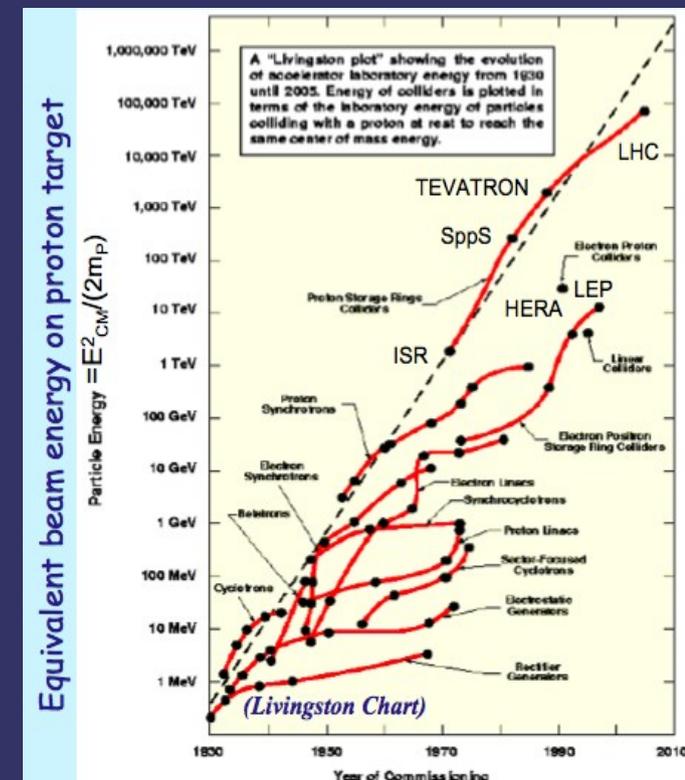
- Lo sviluppo di acceleratori di particelle consente di riprodurre artificialmente queste particelle e osservarne le tracce nei rivelatori



- Condizione necessaria :

$$E_{\text{Urto}} \geq \sum_i M_i c^2$$

- Per creare particelle di massa maggiore servono acceleratori sempre piu' potenti



Gli acceleratori : il principio

- Forza di Lorentz:

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

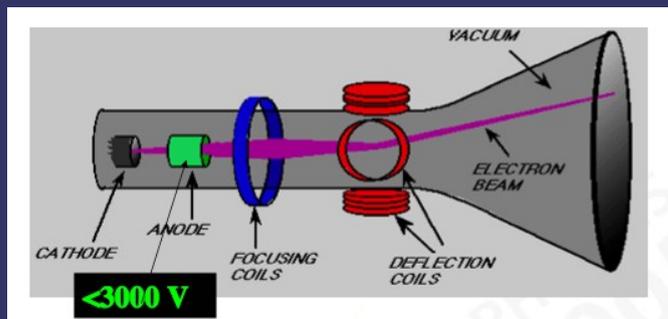
- Attraversando una regione dove e' presente E, la particella acquista un'energia cinetica U_k :

$$U_k = q \int \vec{E} \cdot d\vec{s} = -q \Delta V$$

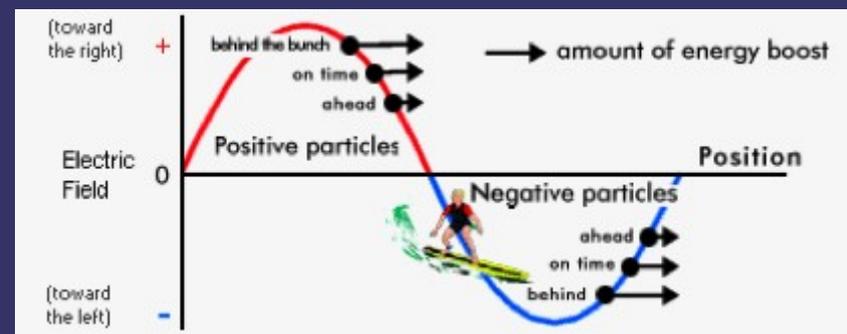
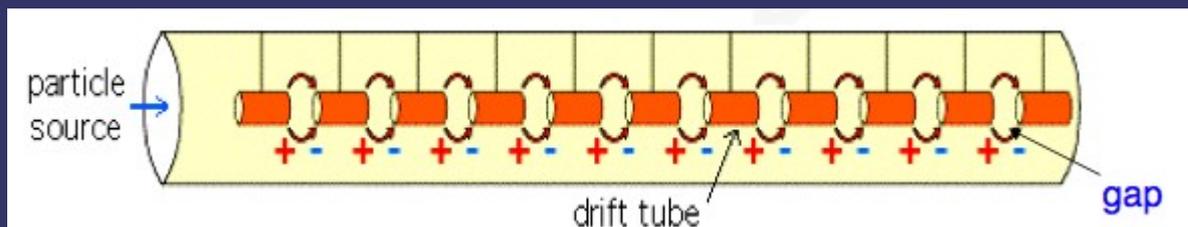


Gli acceleratori : esempi

- Tubo catodico : l' acceleratore domestico (ancora per poco)

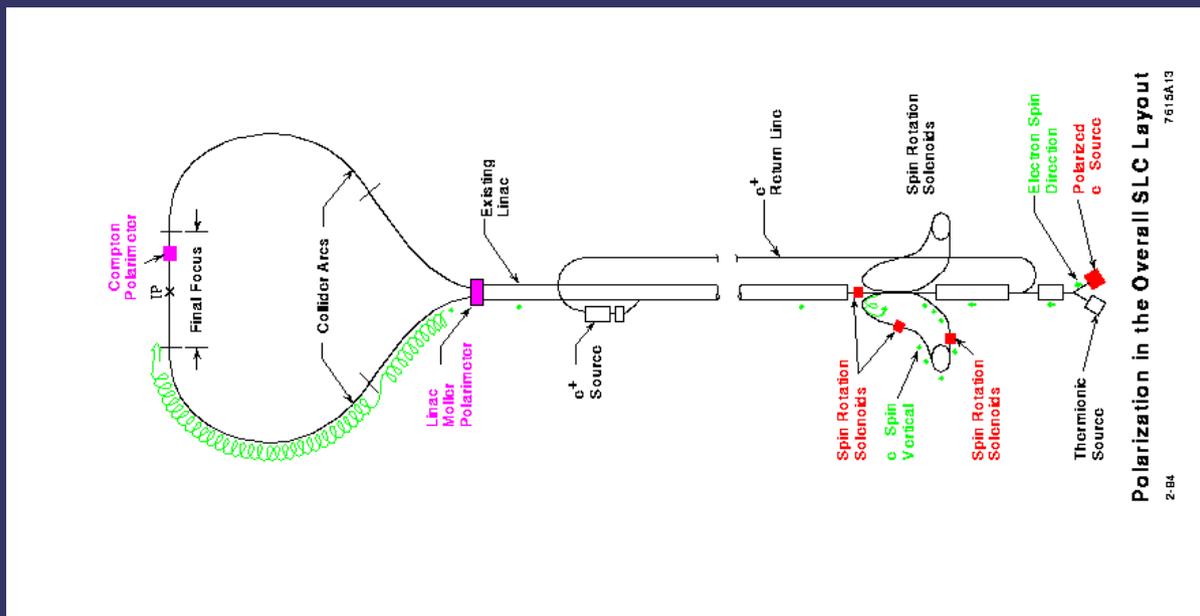


- Negli acceleratori E viene modulato in modo da essere massimo quando passano le particelle (cavita' risonanti)



Acceleratori Lineari

- Dispongo in successione tante cavita' risonanti
- Massima Energia determinata da:
 - Dimensioni (=lunghezza dell'acceleratore)
 - Costi (= numero di cavita' dispiegate)



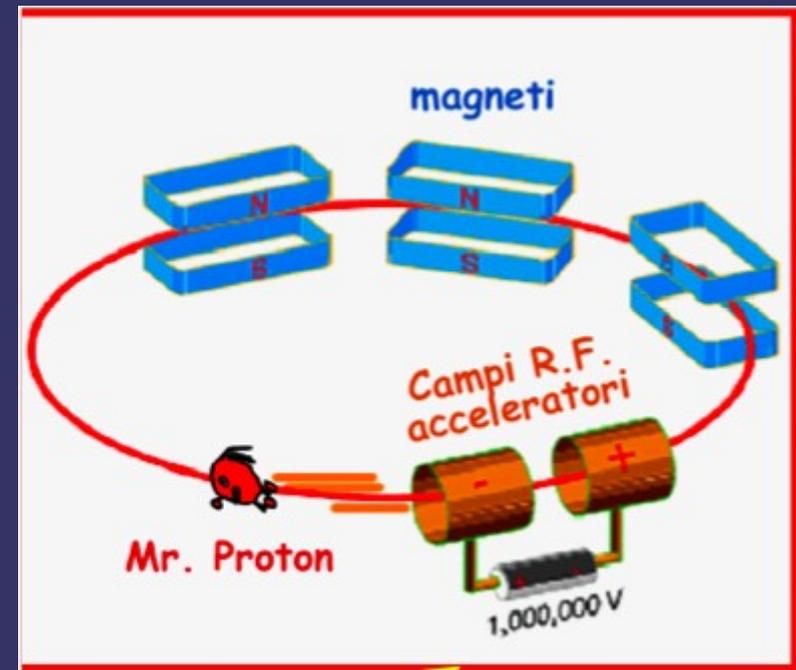
Acceleratori Circolari

- Le particelle vengono costrette su di un'orbita circolare mediante dei magneti
- Incontrano piu' volte le cavita' e ricevono un "calcio" ad ogni passaggio, fino a raggiungere l'energia massima:

Dimensioni contenute 😊

Costi contenuti 😊

- Quali i limiti ?



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



I Limiti (Protoni)

- La massima energia che posso raggiungere e' determinata dalla potenza dei magneti B e dal raggio di curvatura r della macchina :

$$E \simeq cp = c B q r$$

- LHC due fasci di protoni:
 - $E = 7 \cdot 10^{12} \text{ eV}$ (7 TeV)
 - $r = 4.3 \text{ Km}$
 - $B = 9 \text{ Tesla}$!



I Limiti : la Radiazione di Sincrotrone

- Una particella carica su un'orbita circolare *perde energia* emettendo fotoni ("luce di sincrotrone"):

$$\Delta U = \frac{4\pi a_0}{3} \frac{U_k^4}{r (mc^2)^3}$$

I Limiti : la Radiazione di Sincrotrone

- Una particella carica su un'orbita circolare *perde energia* emettendo fotoni ("luce di sincrotrone"):

$$\Delta U = \frac{4\pi a_0}{3} \frac{U_k^4}{r (mc^2)^3}$$

Se $U \times 2 \Rightarrow \Delta U \times 16 !$

I Limiti : la Radiazione di Sincrotrone

- Una particella carica su un'orbita circolare *perde energia* emettendo fotoni ("luce di sincrotrone"):

$$\Delta U = \frac{4\pi a_0}{3} \frac{U_k^4}{r (mc^2)^3}$$

Se $r \times 2 \Rightarrow \Delta U \times 1/2 !$

I Limiti : la Radiazione di Sincrotrone

- Una particella carica su un'orbita circolare *perde energia* emettendo fotoni ("luce di sincrotrone"):

$$\Delta U = \frac{4\pi a_0}{3} \frac{U_k^4}{r (mc^2)^3}$$

$$m_p \sim 2000 m_e$$

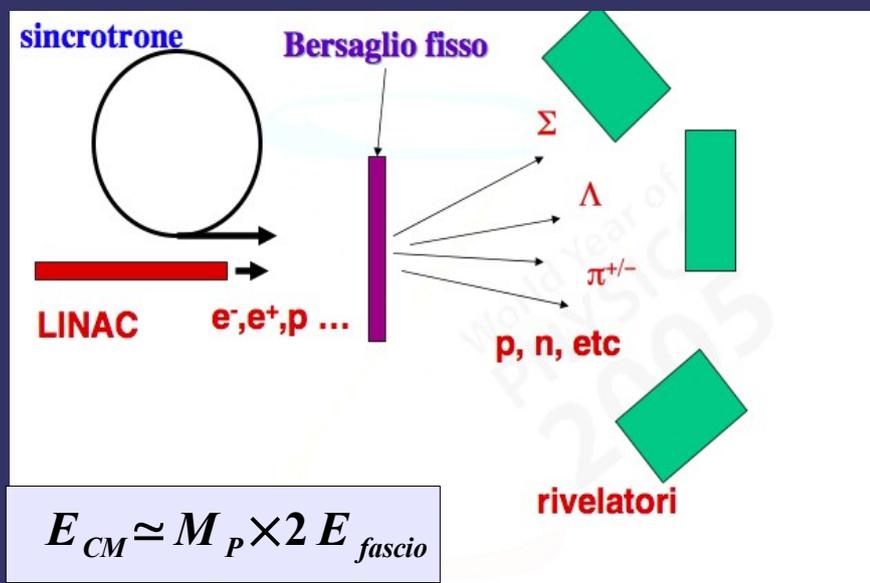
$$\Delta U_e \sim 8 \cdot 10^9 \Delta U_p$$

- L'effetto e' significativo solo per gli elettroni
- LEP due fasci ($e^+ e^-$), nel sito ora di LHC
 - $r = 4.3 \text{ Km}$
 - $U_{\max} = 10^{11} \text{ eV} = 100 \text{ GeV} \sim 1/70 U_{\max}^{\text{LHC}}$

Acceleratori: Guida all'Uso

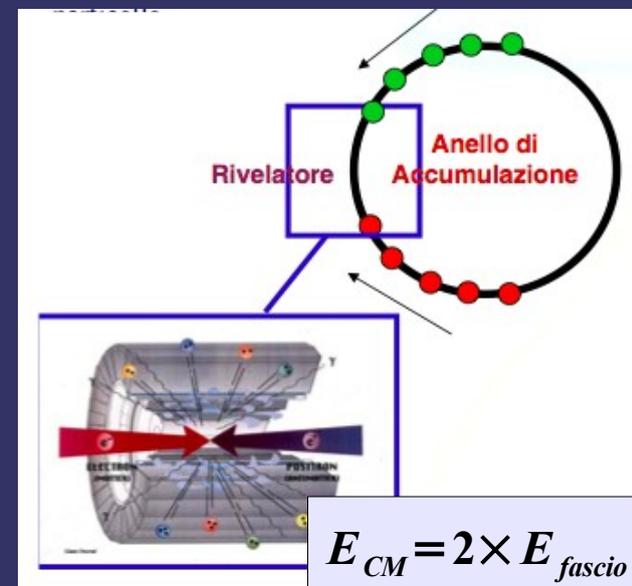
Bersaglio Fisso

Un fascio di particelle e' accelerato per colpire un bersaglio fisso



Collisori (B.Touschek ~1970)

Due fasci vengono accelerati a collidere l'uno contro l'altro



- I primi sono piu' semplici da realizzare, ma raggiungono energie di collisione (E_{CM}) inferiori. Esempio: se $E_{fascio} = 450 \text{ GeV}$ (SPS, CERN):

$$E_{CM} = 29 \text{ GeV}$$

$$E_{CM} = 900 \text{ GeV}$$

Come osserviamo una particella ?

- Tranne e, p, γ e i neutrini, tutte le altre particelle sono instabili (cioe' decadono in corpi piu' leggeri)
- Esempio:

$$K^0 (498) \rightarrow \pi^+(139) \pi^-(139)$$

$$\rightarrow e^- (0.51) \nu_e$$

$$\rightarrow \mu^+ (105) \nu_\mu$$

$$\rightarrow e^+ (0.51) \nu_\mu \nu_e$$

Tra parentesi le masse
in MeV/c^2 delle particelle



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova

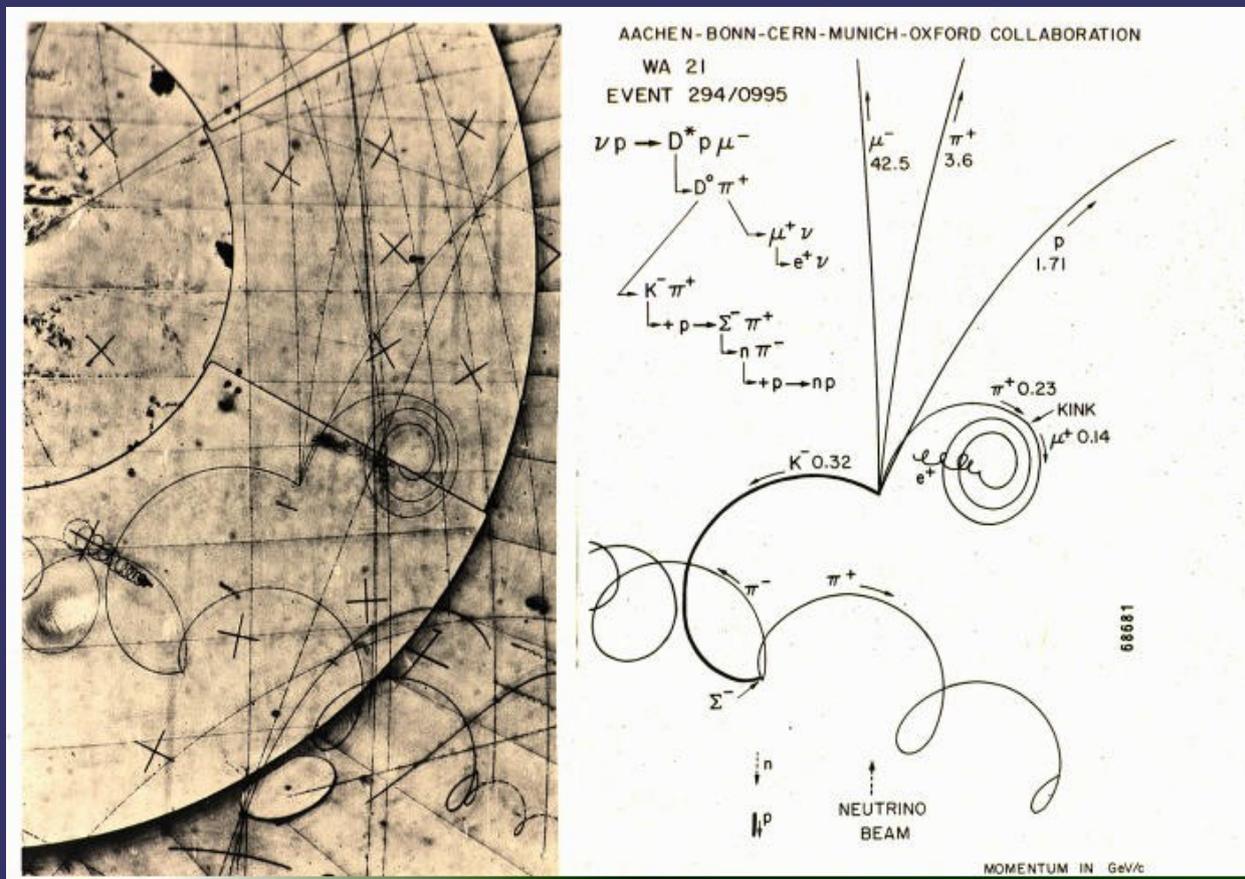


Come osserviamo una particella ?

- Tipicamente, se $T_{1/2} > 10^{-8}$ sec la particella carica lascia una traccia nei rivelatori (e, μ , π ,K,p)

- Inferiamo la presenza delle altre, ricostruendone il decadimento negli stati finali visibili e calcolando la massa invariante:

$$Mc^2 = (\sum_i E_i)^2 - (\sum_i c \vec{p}_i)^2$$



La Fauna Multiforme

- Tra il 1950 e oggi vengono fabbricate e osservate una pletera di particelle:
 - Tre Leptoni carichi (e, μ, τ) Interazione Elettromagnetica e Debole
 - Tre Leptoni neutri (ν_e, ν_μ, ν_τ) Interazione Debole
 - 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



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



Dal Molteplice all'Uno ?

- Come ci spieghiamo la fauna adronica ?
- Esiste un principio unitario sotto l'apparente molteplicita' ?
- 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	2.6×10^{-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

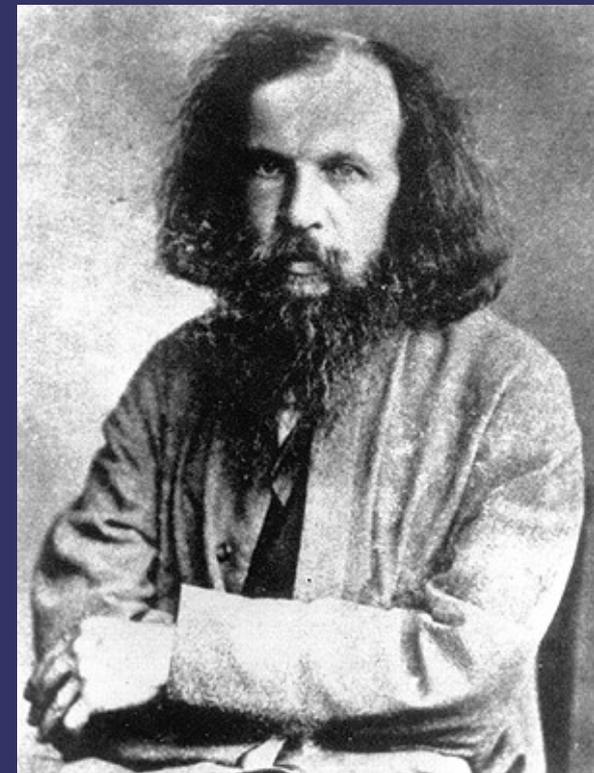
1	IA																0		
1	H																	He	
2	3	4																	10
2	Li	Be																	Ne
3	11	12																	18
3	Na	Mg	III A	IV A	V A	VI A	VII A	VII								IB	IB	18	
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	
6	Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	87	88	89	104	105	106	107	108	109	110									
7	Fr	Ra	+Ac	Rf	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

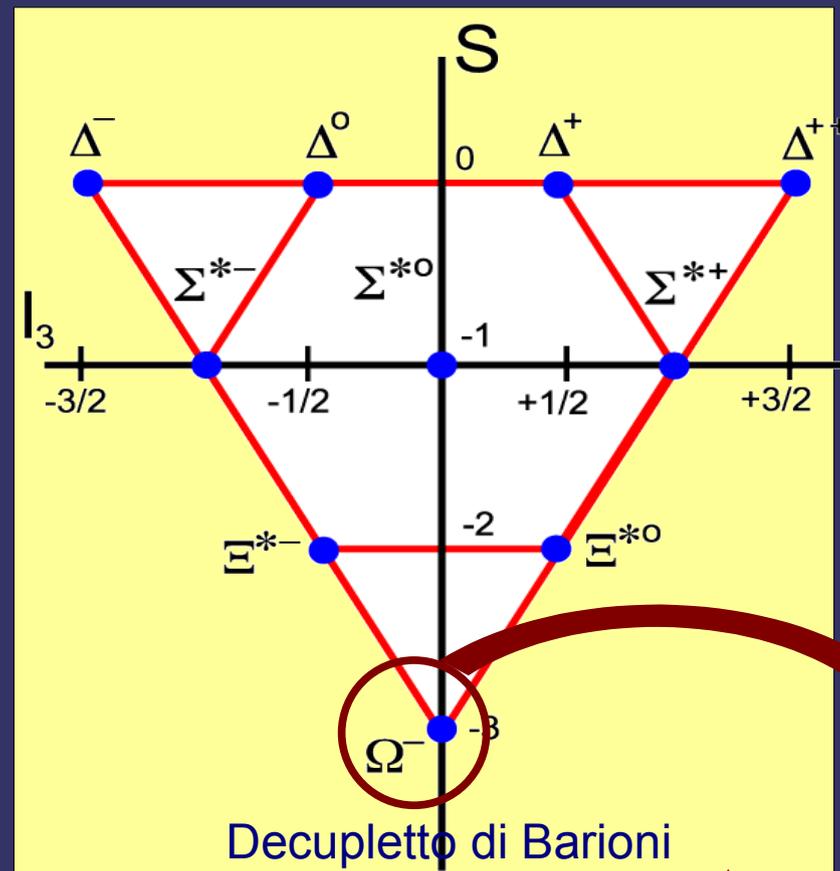
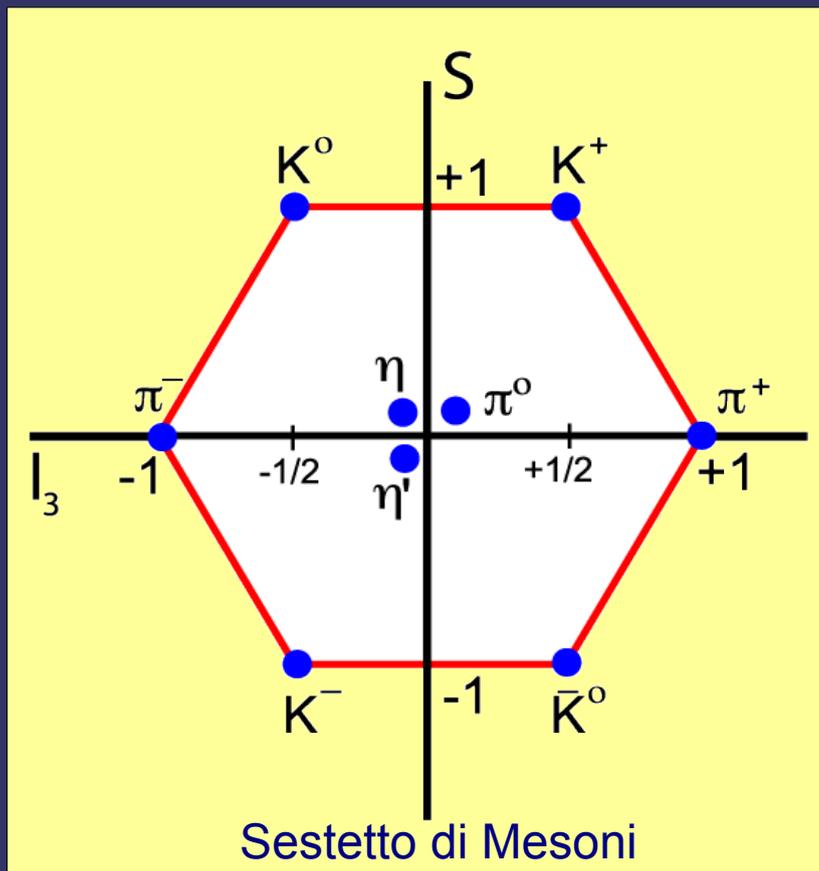
Legend - click to find out more...

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)

- 1964 Gell-Mann e Zweig scoprono regolarita' nelle proprieta' degli adroni, che possono essere catalogati in "multipletti":



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

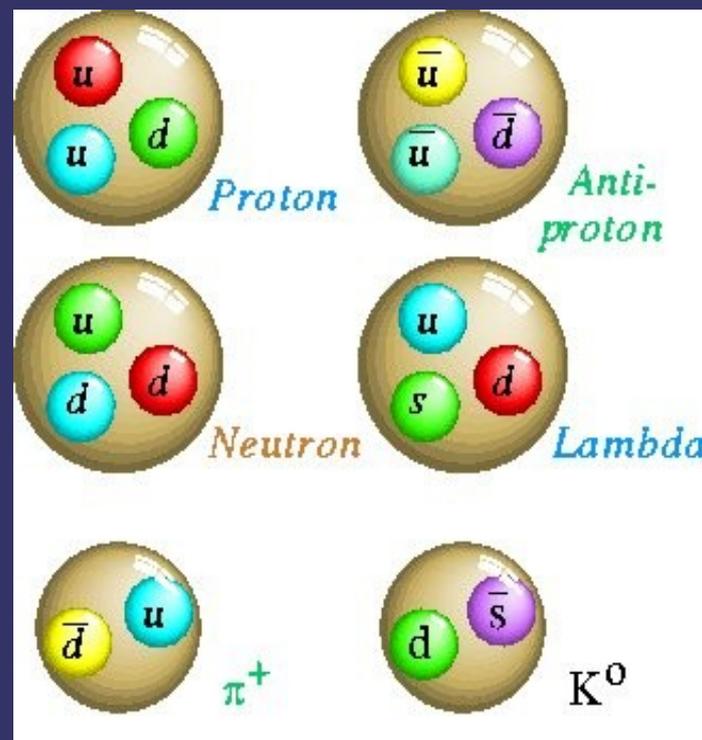


Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



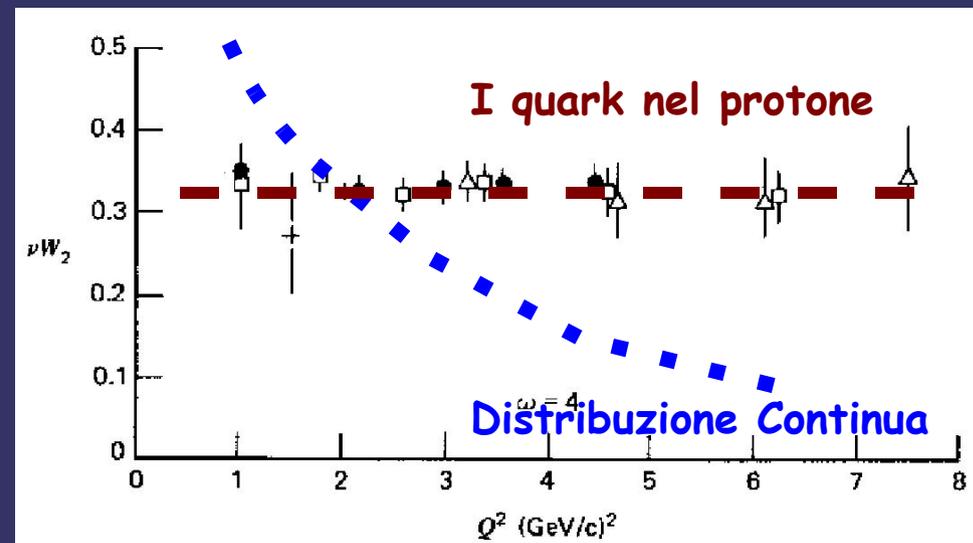
Three Quarks for Muster Mark

- 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)
 - 1973 : scoperto il charm
 - 1977 : scoperto il bottom
 - 1994 : scoperto il top
- ... per un totale di sei quark!

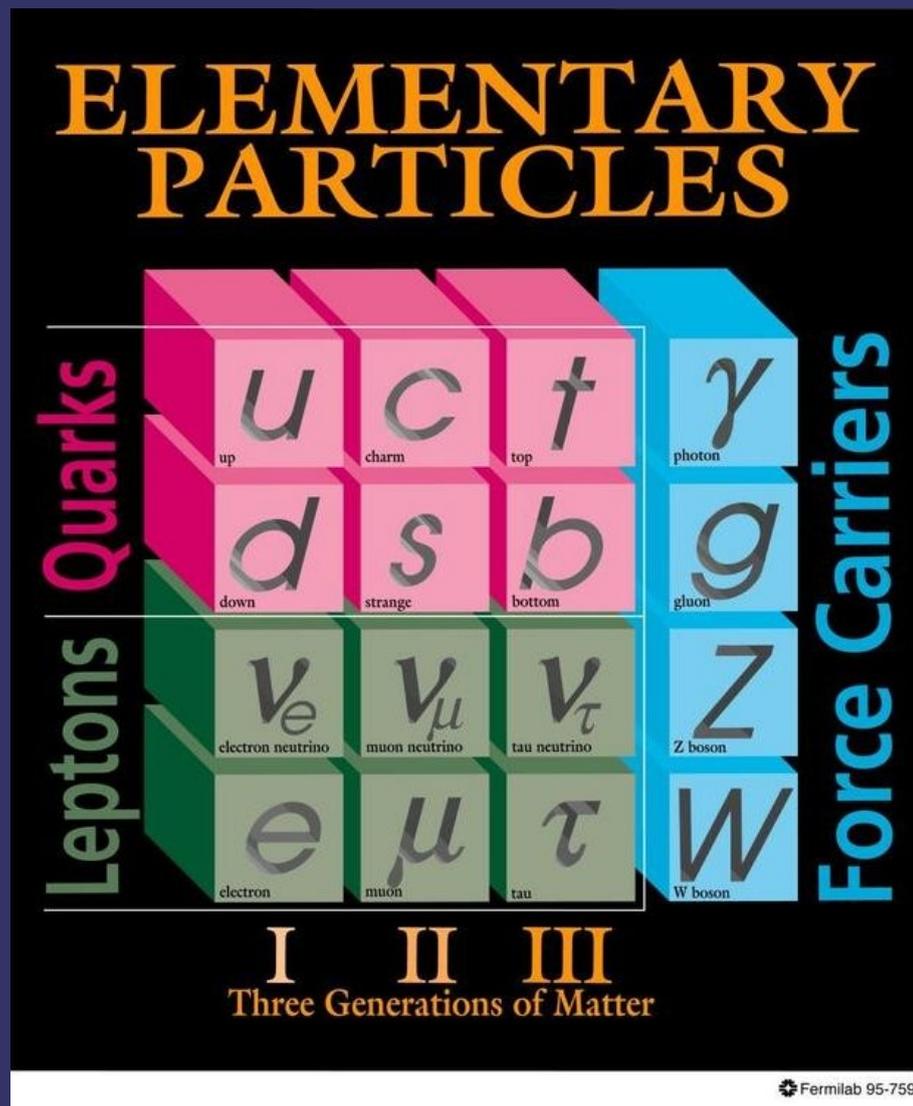


Le Stesse Cose Ritornano (2)

- 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 è composto da (tre) corpi puntiformi : *i quark* !



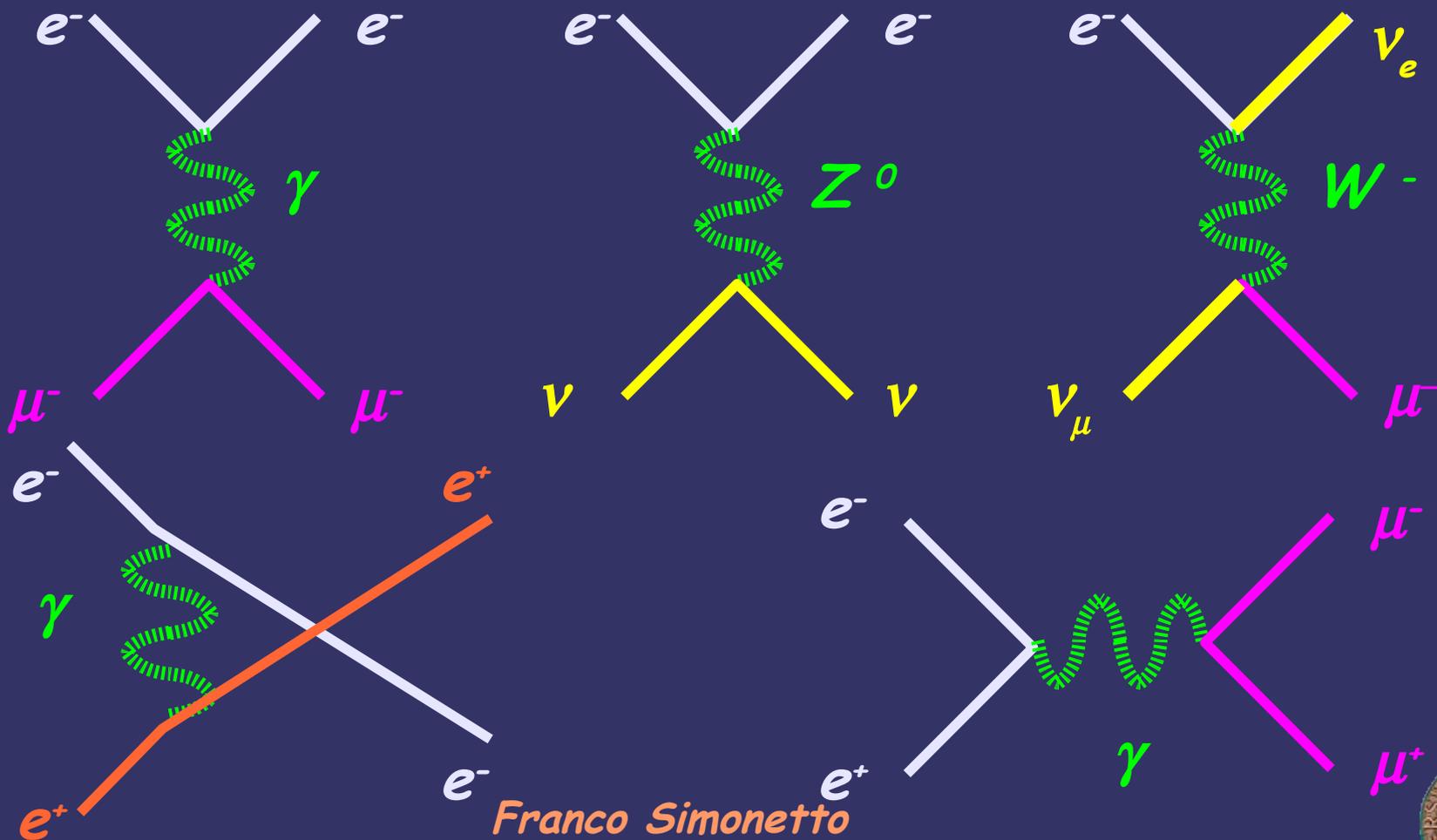
I Costituenti Fondamentali



- La materia consiste di 12 particelle elementari, 6 *leptoni* e 6 *quark*, che raggruppiamo in 3 famiglie (generazioni), di massa vieppiù 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 Forze "Elementari"

- Interazione tra particelle elementari: scambio di mediatori (bosoni di Gauge)



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova

Le Interazioni Fondamentali

- Gravitazione

Trascurabile su scala microscopica

- tutte le particelle

- Elettromagnetismo

- solo particelle cariche

- Interazione Debole

- tutte

- Interazione Forte

- solo i quark (e i loro compositi, gli adroni)

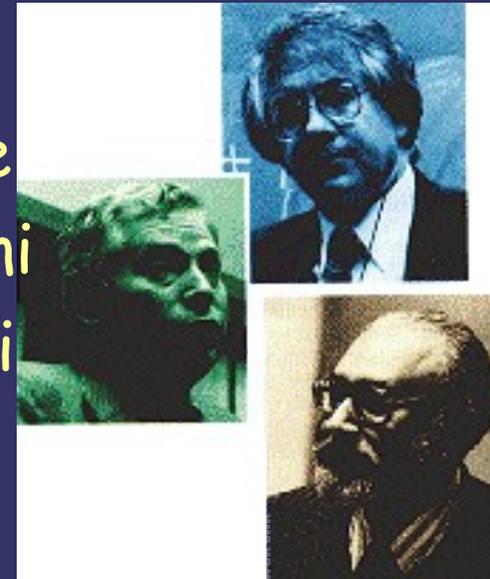
Osservabili solo su
scala microscopica

Modello Standard

Stringa ? Extra Dimensioni ? Superer?

Il Modello Standard

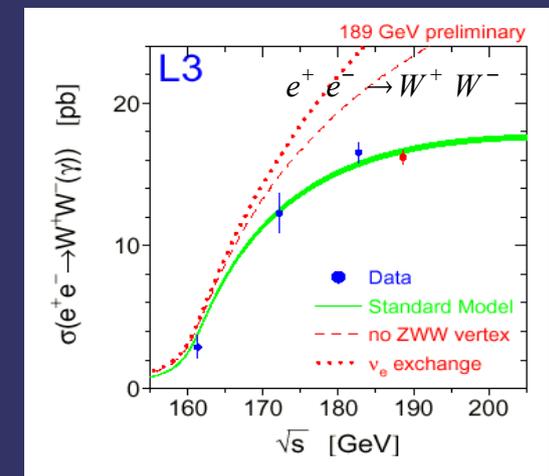
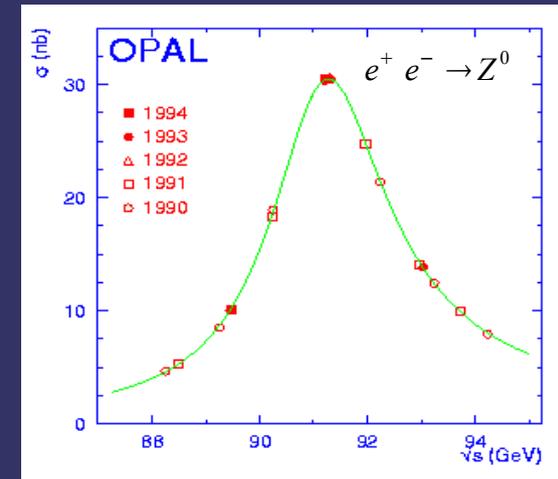
- Proposto nel 1967 da *Glashow, Salaam, Weinberg* (piu' contributi di *Cabibbo, Kobaiashi, Maskawa, t'Hoft ...*)
- Descrive efficacemente tutti le proprieta' delle particelle elementari osservate finora, in termini di interazioni Deboli , Elettromagnetiche e Forti
- Riconduce interazioni Deboli ed Elettromagnetiche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



Le Interazioni Deboli (1)

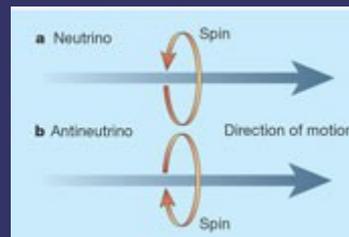
- Riguardano tutte le particelle di materia
- Mediate da due particelle molto "pesanti", la W ($M_W \sim 80 \text{ GeV} \sim 80 M_p$) e la Z^0 ($M_Z \sim 90 \text{ GeV} \sim 90 M_p$), scoperte al CERN nel 1980
- Potenziale "a corto raggio":

$$V(r) \propto \frac{e^{-\kappa \frac{r}{M}}}{r}$$
- Solo effetti "microscopici":
 - Decadimenti di Nuclei radioattivi, dei leptoni μ e τ , e di molti adroni, tra cui il quark top
 - ν interagiscono solo debolmente e sono perciò difficili da osservare



Le Interazioni Deboli (2)

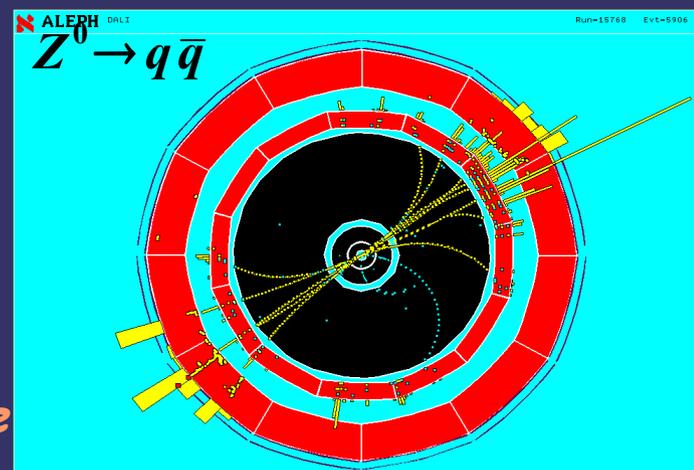
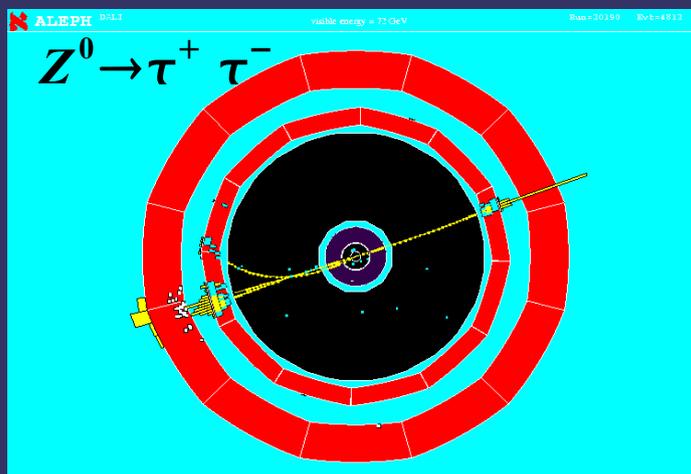
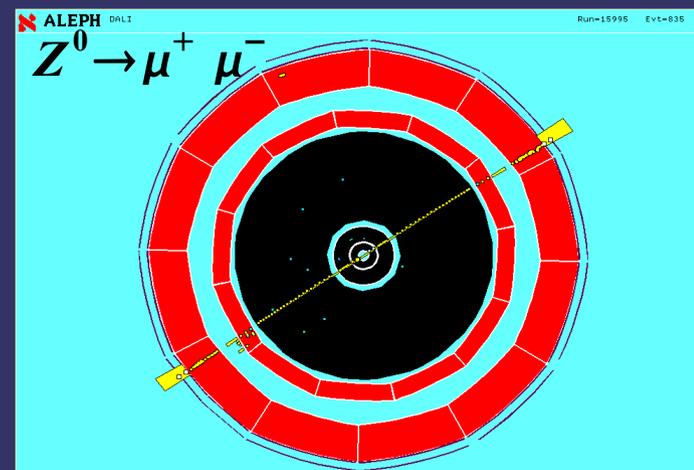
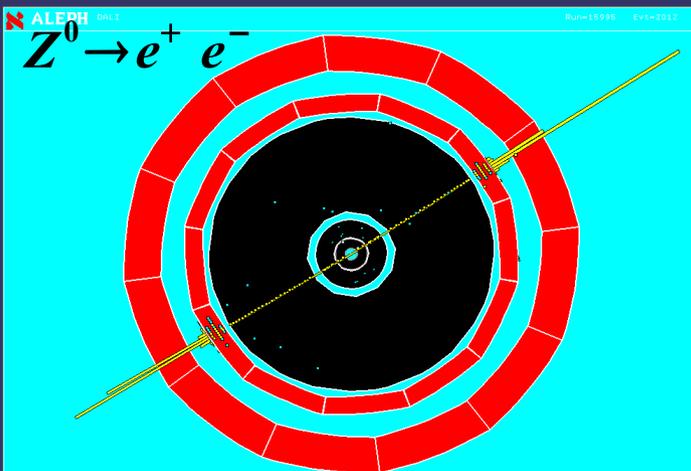
- Distinguono tra destra e sinistra ! (Parita'):
 - Particella (e, ν, q) procede come vite levogira
 - Anti-particella come vite destrogira



- Prevedono una leggera differenza (asimmetria) tra le proprieta' della materia e quella dell'antimateria, confermata dagli esperimenti *BABAR (SLAC, CA)* e *Belle (Tsukuba, Jp)*, ma insufficiente a spiegare perche' il nostro mondo e' fatto solo di materia

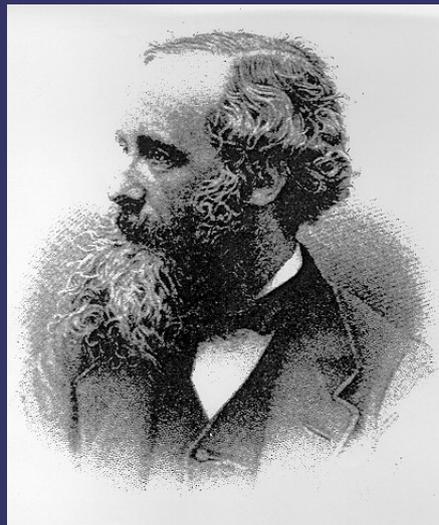
Le Interazioni Deboli (3)

- Le proprietà di W e Z sono state studiate negli anni 90 a LEP
- Esercizio Master Class : classificare gli eventi osservati dagli esperimenti OPAL e DELPHI a LEP



Interazione ElettroMagnetica

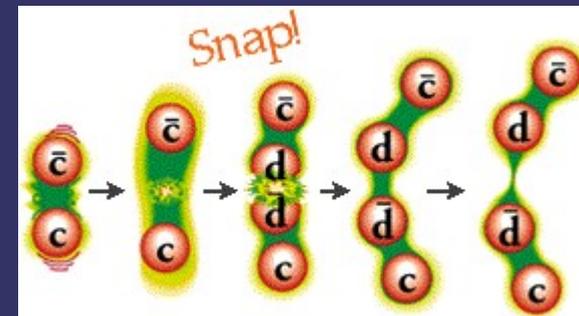
- Solo particelle cariche (quark e adroni carichi, e, μ, τ)
- Mediata dal fotone (quanto di luce), che ha massa nulla
- Di conseguenza, potenziale a lungo raggio, e tutta la fenomenologia nota da Maxwell in poi



$$V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

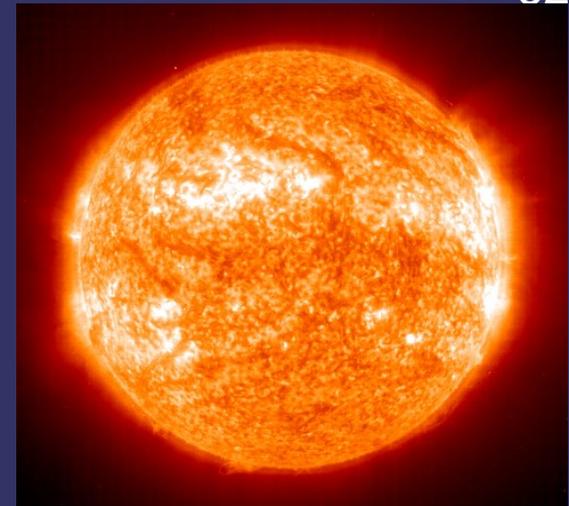
Interazioni Forti (1)

- Regolano l'interazione tra quark (no leptoni)
- Descritte dalla Cromodinamica Quantistica (QCD) :
 - 8 mediatori di massa nulla: Gluoni
 - a differenza dei fotoni, i gluoni interagiscono tra loro, oltre che con i quark
 - Confinamento: i quark non riescono a vivere isolati, ma devono aggregarsi a gruppi di due (mesoni) o di tre (barioni, come p o n)
 - Solo effetti microscopici ...
 - ... ma di enorme importanza



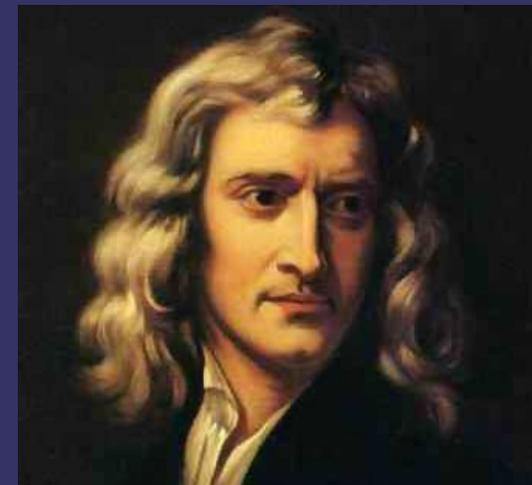
Interazioni Forti (2)

- Forza tra i nuclei : effetto residuale delle I.F. (similmente alla forza di Van der Waals tra le molecole)
- Responsabile :
 - stabilita' dei nuclei (e quindi della materia)
 - processi di fusione (produzione di energia nel sole)
 - processi di fissione (reazioni nucleari controllate e non)



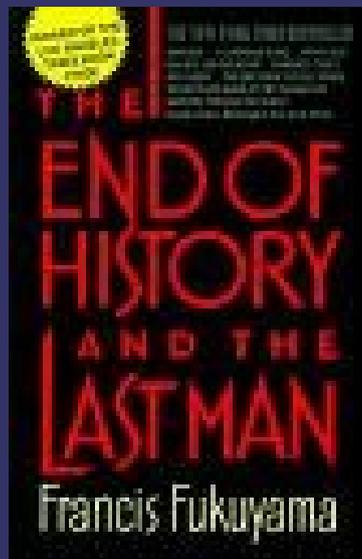
Interazione Gravitazionale

- La piu' evidente
- La piu' antica
- La meno nota :
 - Non esiste una teoria di campo gravitazionale quantistica soddisfacente
 - Non si sono osservate ancora le onde gravitazionali
 - Esiste il gravitone ?
 - Non si capisce perche' sia cosi' poco intensa



Lo Stato dell'Arte

- Il Modello Standard descrive precisamente le interazioni tra le particelle elementari
- Non esiste un solo esperimento in laboratorio che contrasti con le previsioni del M.S.
- La fine della storia ?



Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



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 e' materia (leptone/quark)
 - non e' 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:
 - Perche' 3 x 2 famiglie ?
 - Perche' masse cosi' diverse ?
($m_{\nu_e} < 1 \text{ eV} ; m_{\text{top}} = 175 \text{ GeV}$)
 - Perche' 4 interazioni ?
 - Come conglobare la gravita' ?



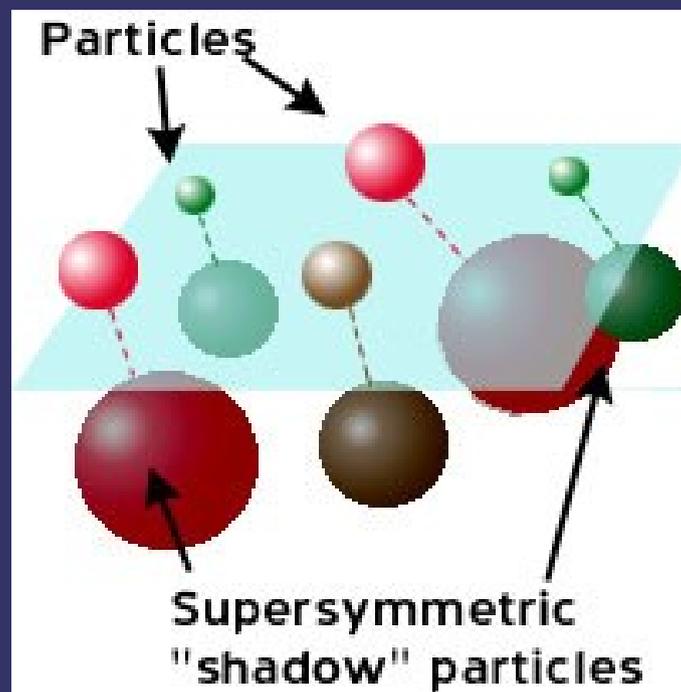
La Storia Continua (c)

- 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 una stadio primigenio, l'universo ha accelerato la sua espansione in base a meccanismi non spiegabili nel Modello Standard



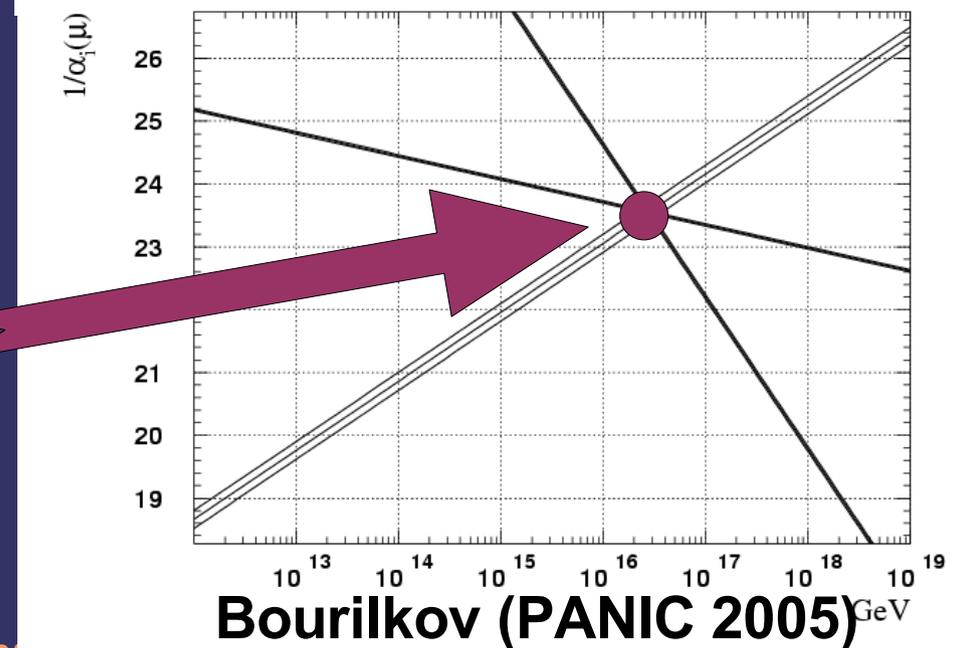
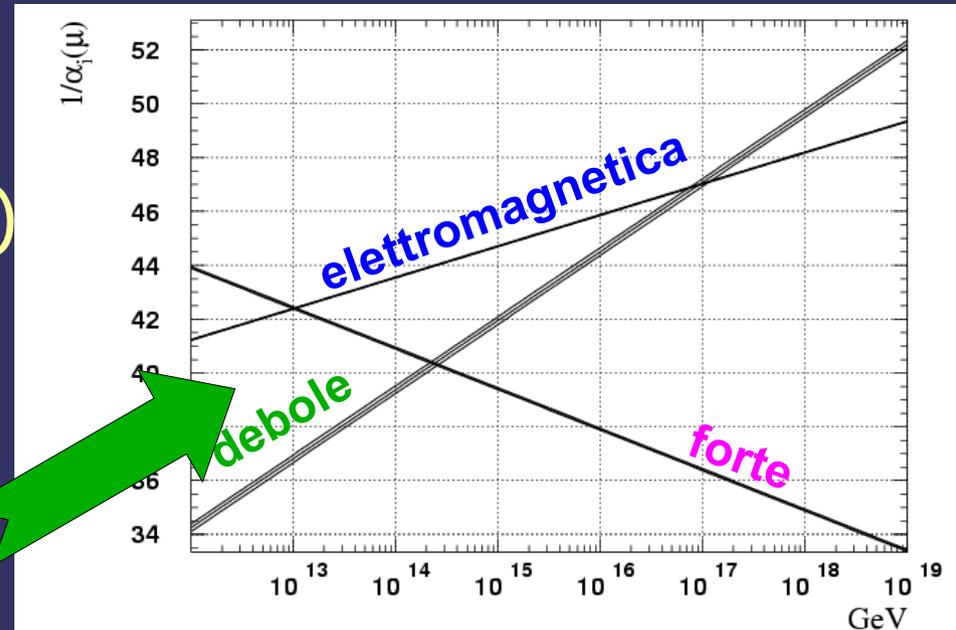
La SuperSimmetria

- Molti di questi problemi sarebbero risolti introducendo una nuova teoria (la supersimmetria, SuSy), che prevede tra l'altro una folla di nuove particelle (una per ogni particella fondamentale nota)



La Grande Unificazione

- L'intensita' delle tre forze (debole/elettromagnetica/forte) varia con l'energia.
- Unificazione = stessa intensita'
- Impossibile nel Modello Standard
- Possibile ipotizzando Nuova Fisica a due scale diverse:
 - Supersimmetria $M \sim 300 \text{ GeV}$
 - GUT $M \sim 10^{16} \text{ GeV}$



La Rivoluzione Dietro l'Angolo ?

- Large Hadron Collider : collisioni pp ad energie ($E_{CM} \sim 14 \text{ TeV}$) ed intensita' mai raggiunte prima
- Ogni singolo protone (raggio 10-15 m) ha la stessa quantita' di moto di una zanzara
- Ogni pacchetto del fascio ha la quantita' di moto di una granata da obice
- Finalita':
 - Scoperta del bosone di Higgs
 - Ricerca di Processi oltre il MS
 - SUSY ?
 - SuperGravita' ?
 - Nuove dimensioni ?



Delacroix's "Liberty Leading the People"

Large Hadron Collider : l'impresa

- Una sfida costruttiva che coinvolge CERN, USA, Jp
 - 5 anni di progettazione
 - 10 anni di costruzione
 - 144 magneti superconduttori ($B=9$ Tesla, $T = -269$ °C) in un tunnel di 27 KM di circonferenza scavato 100 m sottoterra
 - 5 Mld Euro di spesa
- Impresa paragonabile alla conquista della Luna

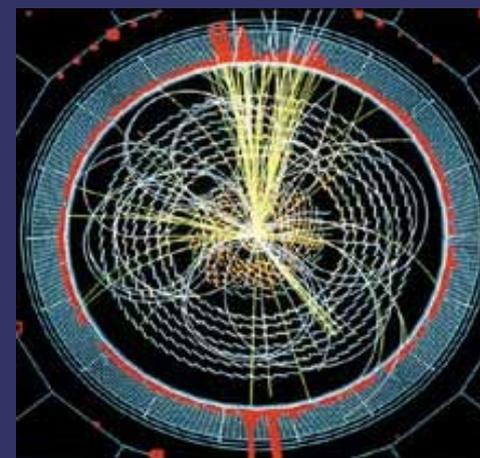
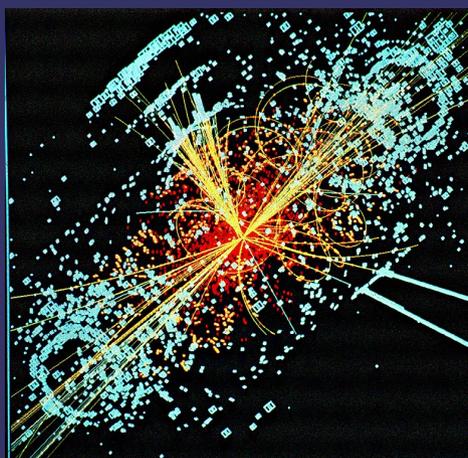
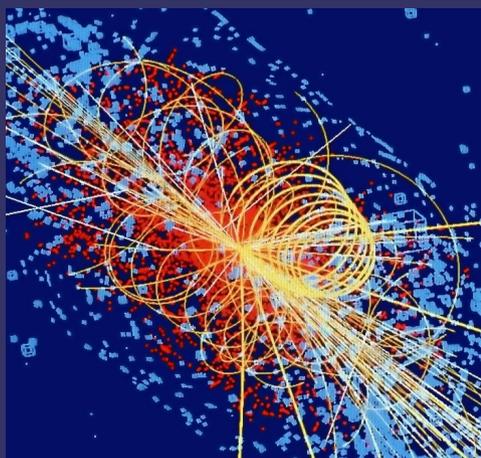


Franco Simonetto
Universita' & INFN Padova



Large Hadron Collider : la sfida

- Gli eventi interessanti sono rarissimi (meno di uno per miliardo)
- Le topologie sono complicatissime (migliaia di tracce e sciame in ogni evento)
- Servono rivelatori enormi con milioni di canali: CMS e ATLAS



Simulazioni di tipici eventi a LHC

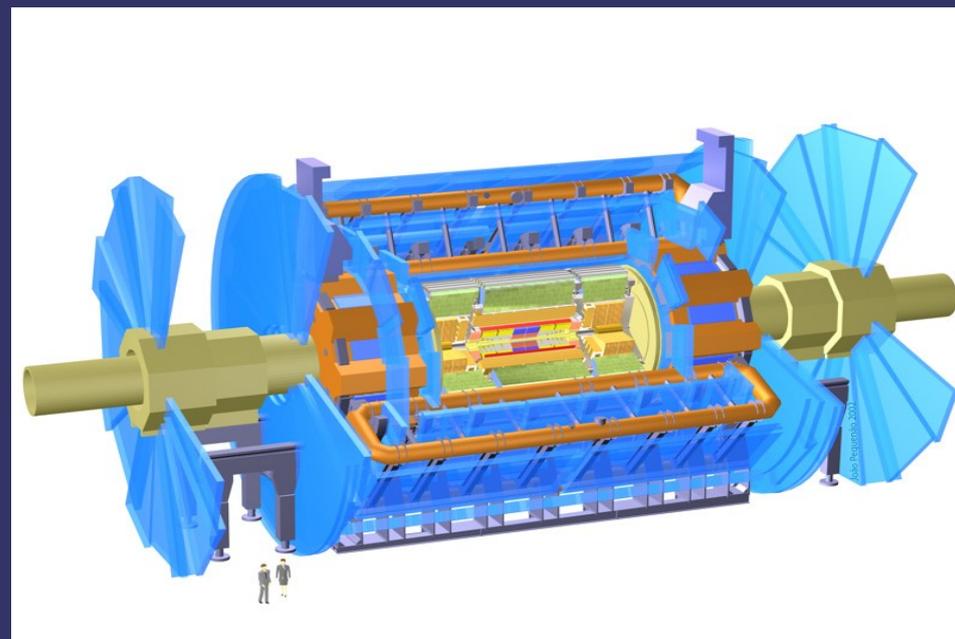
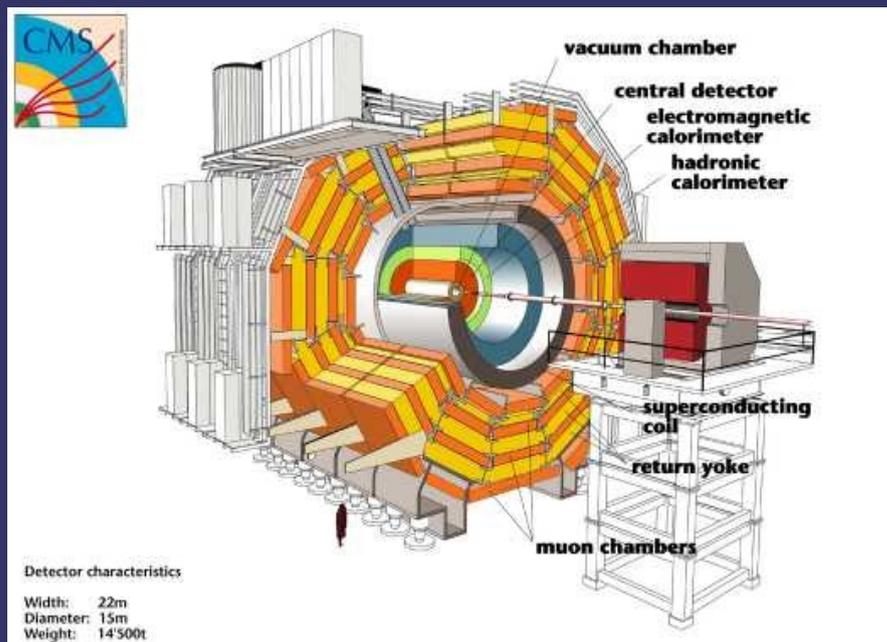
Franco Simonetto

Universita' & INFN Padova



LHC : i rivelatori

- CMS quello "piccolo"
 - ATLAS, quello grande
- Centinaia di milioni di segnali elettronici da leggere simultaneamente



Sono previsti :

- tra i cinque e i dieci anni di operazione
- primi risultati nel 2008

Conclusioni

- Dopo piu' di cento anni di ricerca, non abbiamo ancora capito le fondamenta del Mondo Fisico
- Anche se descrive con esattezza tutti i fenomeni osservati in laboratorio, il Modello Standard non e' la teoria finale
- Nei prossimi dieci, grazie in primo luogo al Large Hadron Collider, potremo esplorare la fisica oltre il Modello Standard, spiegare i puzzle cosmologici, e, forse, coronare il sogno dei presocratici, identificando l'*απειρον*

