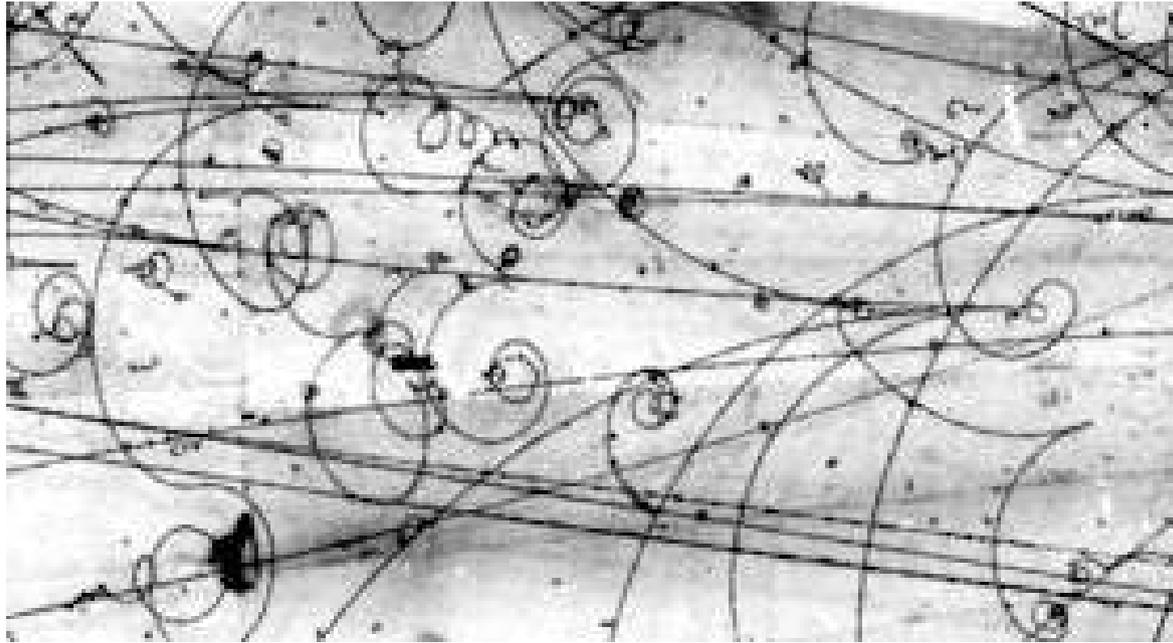


# Introduzione alla Fisica delle Particelle Elementari



Alessandro Gaz

Masterclass 2006

# Programma della lezione

- Introduzione: cos'e' la Fisica delle Particelle Elementari;
- Un po' di storia;
- Quali sono le Particelle Elementari;
- Le interazioni fondamentali, il Modello Standard;
- Verifiche sperimentali del Modello Standard: LEP;
- Due temi 'caldi' di Fisica delle Particelle Elementari;

# La Fisica delle Particelle Elementari

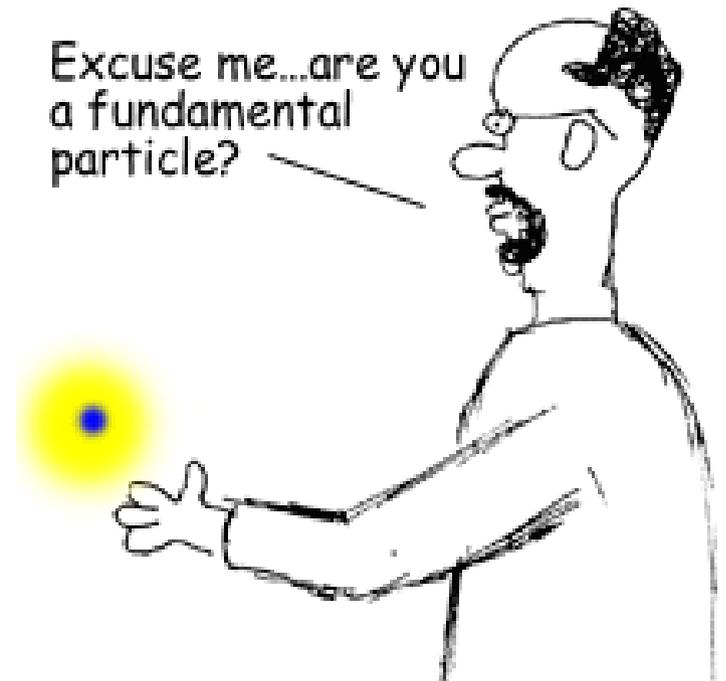
- La Fisica delle Particelle Elementari tenta di rispondere alle seguenti domande fondamentali:
  - Quali sono i componenti ultimi della materia?
  - Come si muovono?
  - Che cosa li muove?
- La risposta a queste domande viene ricercata tramite un'indagine teorica e sperimentale degli oggetti piu' piccoli a noi accessibili
- Qual e' il suo 'laboratorio'?
  - raggi cosmici
  - acceleratori di particelle

# La Fisica delle Particelle Elementari

- L'infinitamente piccolo si sposa con l'infinitamente grande...
- Nei primissimi istanti dell'Universo, molecole, atomi e nuclei atomici non esistevano. Il tutto era un brodo primordiale di particelle che interagivano e si annichilivano tra di loro;
- Comprendere le interazioni tra le particelle nei primissimi istanti di vita dell'Universo e' fondamentale per capire la struttura del nostro Universo;
- Nuovo campo di ricerca: la **Fisica Astro-Particellare...**

# Cosa vuol dire elementare?

- Elementare = **privo di struttura**, non composto da altri oggetti piu' piccoli;
- Elementare = **alla base di tutto cio' che ci circonda**, tutte le interazioni che osserviamo in Natura sono esprimibili tramite le interazioni dei costituenti elementari o fondamentali;
- Come facciamo a sapere se un oggetto e' elementare oppure no?



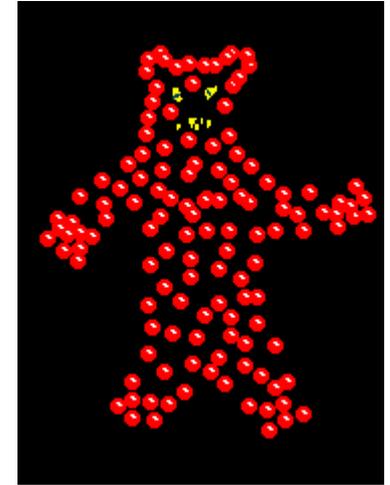
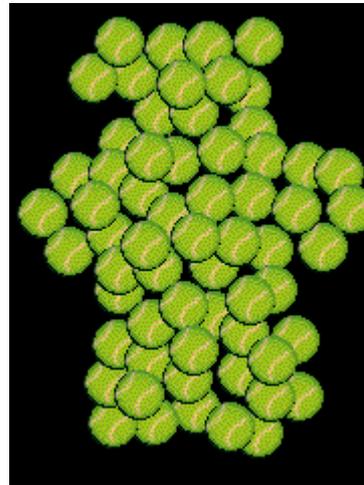
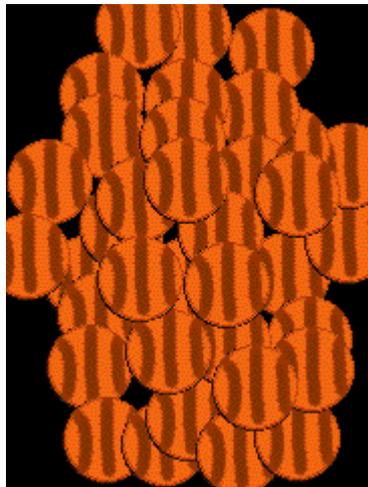
# Un esempio dalla Chimica

- Fino al ~1870 le particelle elementari erano gli 'atomi', che caratterizzavano gli 'elementi';
- Mendeleev scopre che gli elementi sono caratterizzati da proprietà che si ripetono a intervalli regolari: **Tavola Periodica**;
- Forte indizio sull'esistenza di una **struttura all'interno dell'atomo**;

	1 IA	2 IIA	Transition Metals										Non-Metals					18 VIIIA			
1	H																				He
2	Li	Be												B	C	N	O	F		Ne	
3	Na	Mg	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIIIB	9 VIIIB	10 VIIIB	11 IB	12 IIB		Al	Si	P	S	Cl		Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br		Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I		Xe		
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At		Rn		
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg										
	Metals																				
Lanthanides	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
Actinides	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr							

# L'atomo e' veramente fondamentale?

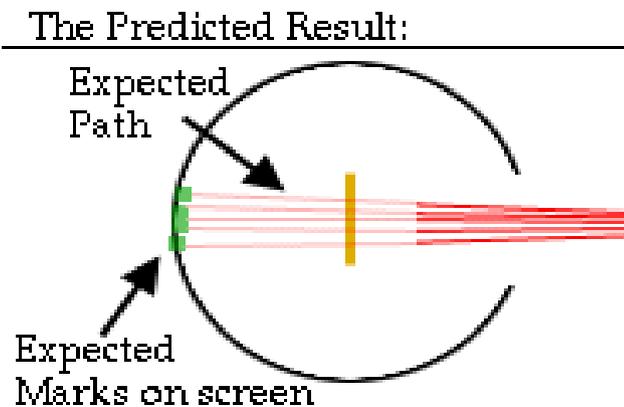
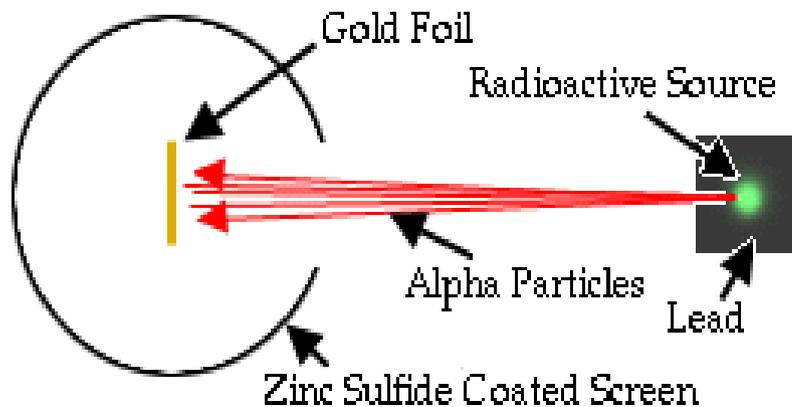
- Per verificare che l'atomo abbia una struttura (e capire quale), occorre un'esperimento!
- Con quali mezzi si possono osservare gli atomi?
  - Microscopio? La luce 'ordinaria' non va bene: la sua lunghezza d'onda ( $\sim 0.5 \mu\text{m}$ ) e' molto maggiore delle dimensioni degli atomi ( $\sim 1 \text{ nm}$ );



- Dobbiamo utilizzare delle sonde sufficientemente piccole e penetranti;

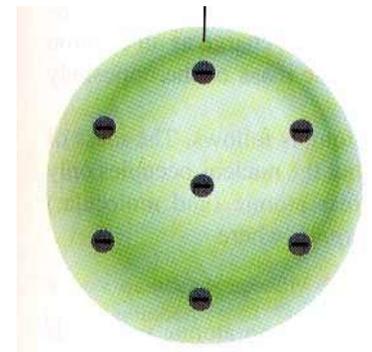
# L'esperimento di Rutherford (1910)

- 'Proiettili': particelle alfa emesse da una sorgente radioattiva;
- 'Bersaglio': una sottile lamina d'oro;
- Metodo sperimentale: misura dell'angolo di deflessione delle particelle alfa dopo l'attraversamento della lamina d'oro;



L'esperimento veniva effettuato per verificare il modello atomico di Thompson:

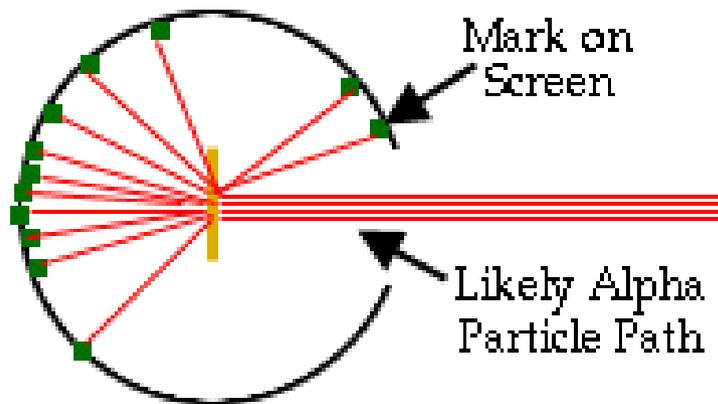
l'atomo era immaginato come una sfera all'interno della quale la carica positiva era distribuita in maniera continua e gli elettroni vi si muovevano attraverso.



# L'esperimento di Rutherford (1910)

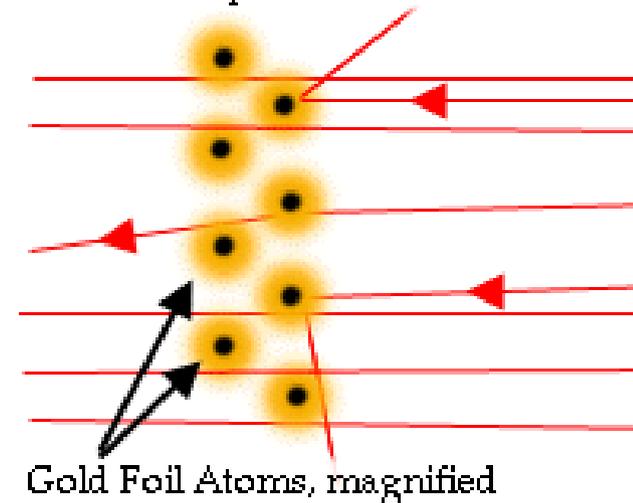
- Il risultato fu sorprendente!

Extrapolation of Result:



La maggior parte delle particelle alfa passava attraverso la lamina senza subire notevoli deflessioni, come previsto dal modello di Thompson...  
...ma alcune particelle alfa venivano deflesse di angoli elevati, fino quasi a  $180^\circ$

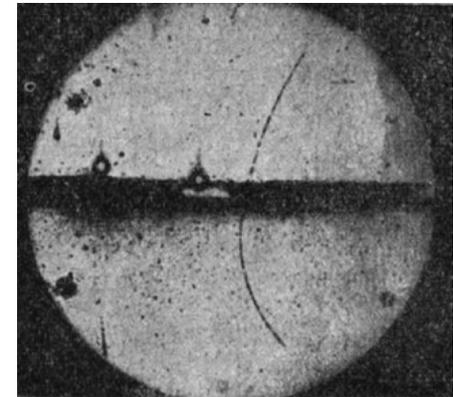
A Positive Nucleus Reflects Alpha Particles



Interpretazione del risultato:  
l'atomo e' costituito da un nucleo di carica positiva molto piccolo (10-100.000 volte rispetto alle dimensioni dell'atomo) e gli elettroni orbitano attorno ad esso

# La nascita della Fisica delle Particelle

- All'inizio del 1900 si sapeva che l'atomo non era 'elementare' (radioattività, tubi di Crookes, ...);
- 1932: scoperta del neutrone: **protone, neutrone ed elettrone** assumono il ruolo di **costituenti elementari** della materia;



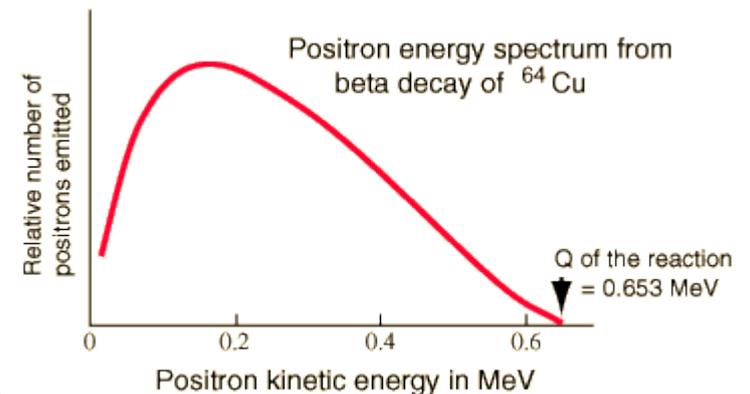
- Intanto si cominciano a studiare i raggi cosmici;
- 1933: scoperta del positrone (= anti-elettrone), questo risultato era previsto dall'equazione di Dirac:

$$(i\hbar c \not{\partial} - mc^2)\psi = 0$$

formulata pochi anni prima: **ad ogni particella corrisponde un'anti-particella avente massa e spin uguali**

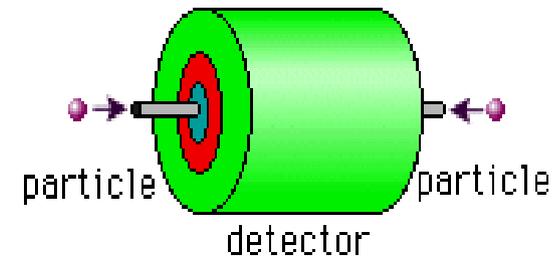
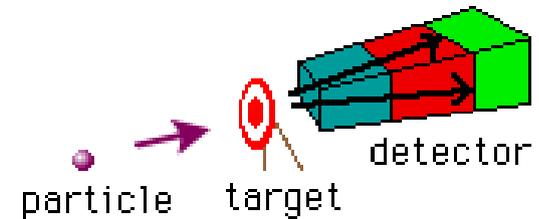
# La nascita della Fisica delle Particelle

- Tutti gli oggetti con cui abbiamo a che fare sono composti da protoni, neutroni ed elettroni – tutto risolto dunque?
- Fin dagli anni '30 emergevano indizi dell'esistenza di un mondo ben più vasto...
  - Problema del **decadimento  $\beta$** : una parte dell'energia del decadimento non era osservata. Il problema si risolveva solo introducendo una particella neutra avente massa estremamente piccola: il **neutrino** (osservato sperimentalmente solo nel 1956!);
  - Scoperta del **muone ( $\mu$ )**: una nuova particella presente in abbondanza nei raggi cosmici che non si sapeva dove collocare;



# La nascita della Fisica delle Particelle

- Negli anni successivi alla Seconda Guerra Mondiale continuo' lo studio dei raggi cosmici e si iniziarono a costruire acceleratori di particelle;
- Esperimenti agli acceleratori:
  - fascio di particelle cariche (protoni o elettroni) accelerato contro un bersaglio fisso: produzione di nuove particelle e studio delle proprieta' del bersaglio (cfr. Rutherford);
  - due fasci di particelle vengono fatti collidere uno contro l'altro: massima efficienza per la produzione di particelle molto piu' massicce dei proiettili usati ( $E = mc^2!$ );
- L'uso degli acceleratori di particelle e' di fondamentale importanza per lo sviluppo dell'indagine sperimentale: permette di superare i limiti di energia ed intensita' posti dalla natura dei raggi cosmici.



# Un paziente lavoro di catalogazione...

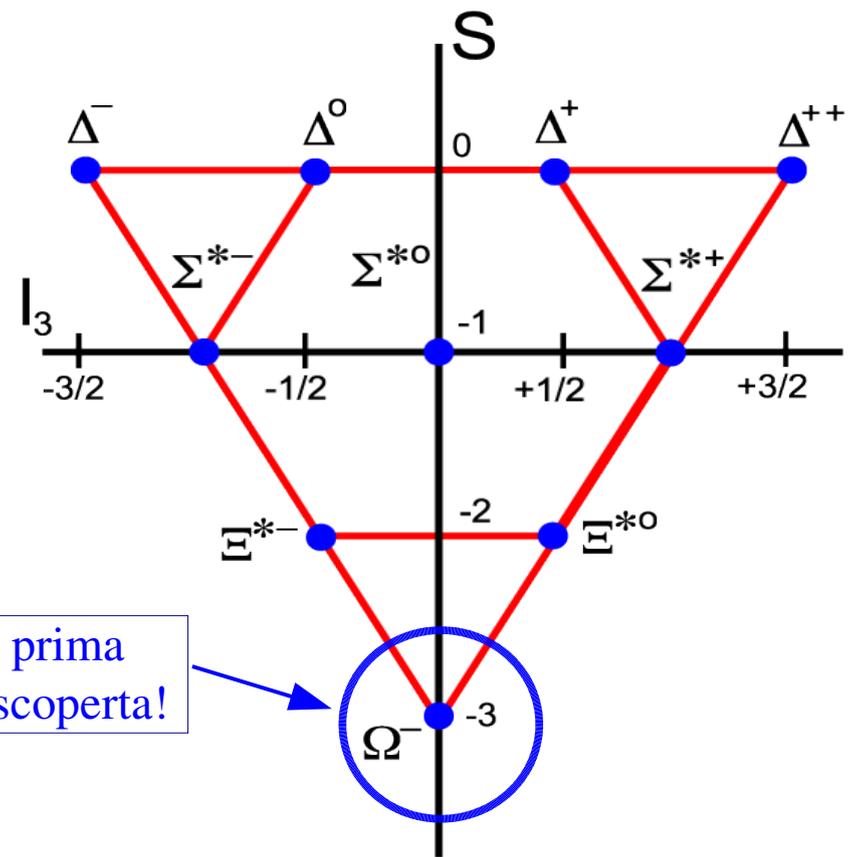
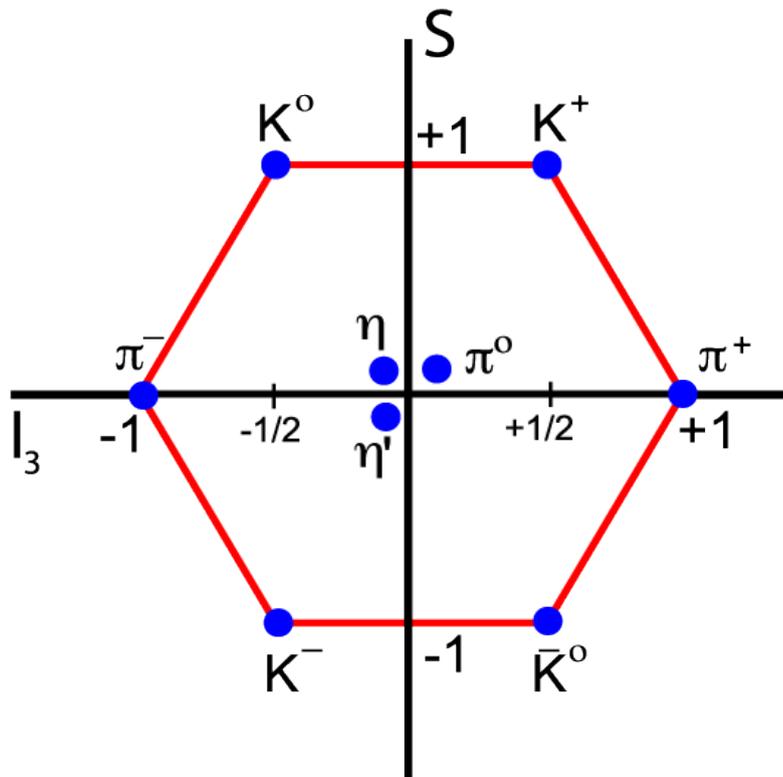
- Nei primi anni '60 erano conosciute **alcune decine di particelle** (classificate in mesoni, iperoni, ... a seconda della loro massa e delle modalita' di decadimento);
- Così tante particelle non possono essere tutte fondamentali, ci deve essere qualcosa sotto... ;
- Per trovarlo può essere utile ripercorrere la strada compiuta da Mendeleev: **ricerca di regolarità** che diano qualche indizio su una struttura interna a queste particelle;

Particle	Symbol	Anti-particle	Makeup	Rest mass MeV/c <sup>2</sup>	S	C	B	Lifetime	Decay Modes
<u>Pion</u>	$\pi^+$	$\pi^-$	$u\bar{d}$	139.6	0	0	0	$2.60 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$
<u>Pion</u>	$\pi^0$	Self	$\frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$	135.0	0	0	0	$0.83 \times 10^{-16}$	$2\gamma$
<u>Kaon</u>	$K^+$	$K^-$	$u\bar{s}$	493.7	+1	0	0	$1.24 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
<u>Kaon</u>	$K_S^0$	$K_S^0$	1*	497.7	+1	0	0	$0.89 \times 10^{-10}$	$\pi^+ \pi^-, 2\pi^0$
<u>Kaon</u>	$K_L^0$	$K_L^0$	1*	497.7	+1	0	0	$5.2 \times 10^{-8}$	$\pi^+ e^- \bar{\nu}_e$
<u>Eta</u>	$\eta^0$	Self	2*	548.8	0	0	0	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\mu$
<u>Eta prime</u>	$\eta'$	Self	2*	958	0	0	0	...	...
<u>Rho</u>	$\rho^+$	$\rho^-$	$u\bar{d}$	770	0	0	0	$0.4 \times 10^{-23}$	$\pi, \pi$
<u>Rho</u>	$\rho^0$	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	770	0	0	0	...	...
<u>Omega</u>	$\omega^0$	Self	$u\bar{u}, d\bar{d}$	782	0	0	0	...	...
<u>Phi</u>	$\phi$	Self	$s\bar{s}$	1020	0	0	0	$2.0 \times 10^{-23}$	$K^+ K^-; K^0 \bar{K}^0$



# La nascita del modello a quarks

- Ordinando le particelle soggette all'interazione forte (adroni) allora note secondo due particolari 'numeri quantici' (isospin e stranezza) si notano delle regolarita';
- Questo suggerì a Gell-Mann e Zweig che tutti gli adroni potessero essere costituiti da particelle ancora più fondamentali: i quarks;



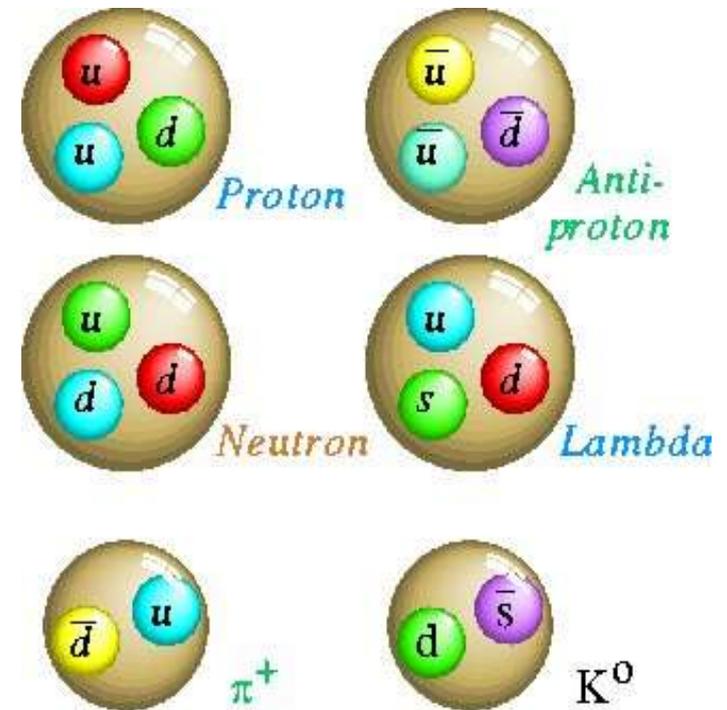
# La nascita del modello a quarks

- Nella sua formulazione originaria, il modello prevedeva l'esistenza di tre quarks (e dei relativi anti-quarks):

**u** (up)      **d** (down)      **s** (strange)

ciascuno caratterizzato da numeri quantici ben precisi;

- Tutte le proprietà degli adroni allora conosciuti venivano riprodotte bene dal modello;
- Gli adroni vengono classificati in due categorie:
  - **barioni**: costituiti da tre quarks (anti-barioni da tre anti-quarks);
  - **mesoni**: costituiti da una coppia quark-antiquark;



# Il modello a quarks si consolida

- All'inizio degli anni '70, per spiegare alcune osservazioni sperimentali, viene prevista teoricamente l'esistenza di un altro quark sensibilmente piu' massiccio degli altri: il **c (charm)**;
- Nel 1974 viene scoperta la **J/ψ**, mesone formato da una coppia charm-anticharm. Successivamente vengono scoperte altre particelle che sono una combinazione di charm e quarks piu' leggeri;

la massa del charm e' circa uguale alla massa del protone

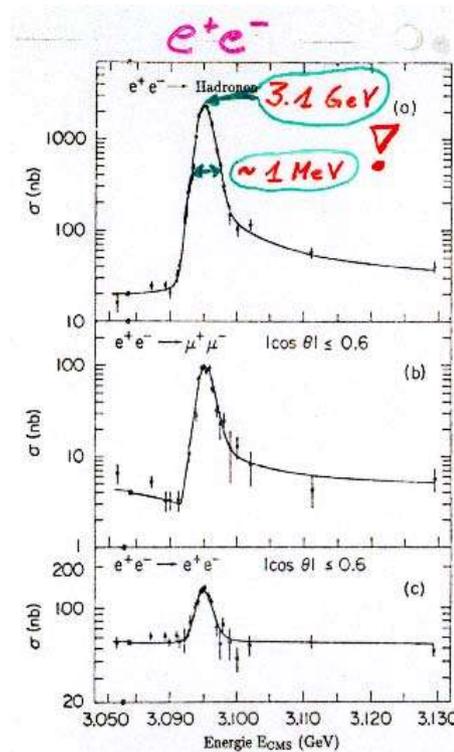


Abbildung 5.9 Ergebnisse der Messungen von Augustin et al. (1974), die die J/ψ-Resonanz bei einer Masse von 3.1 GeV zeigen. Die Resonanz wurde in e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Kollisionen am Speicherring SPEAR des SLAC erzeugt.

J/ψ - Meson (c c̄)

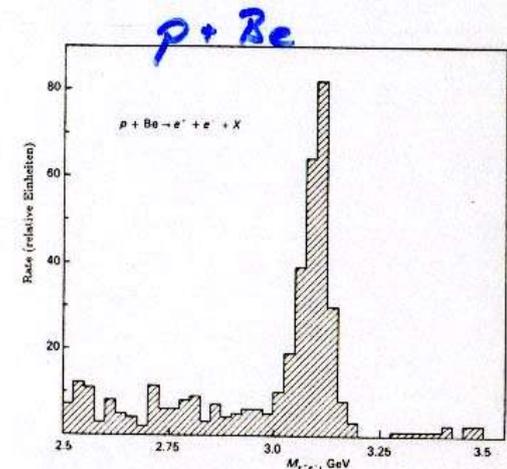
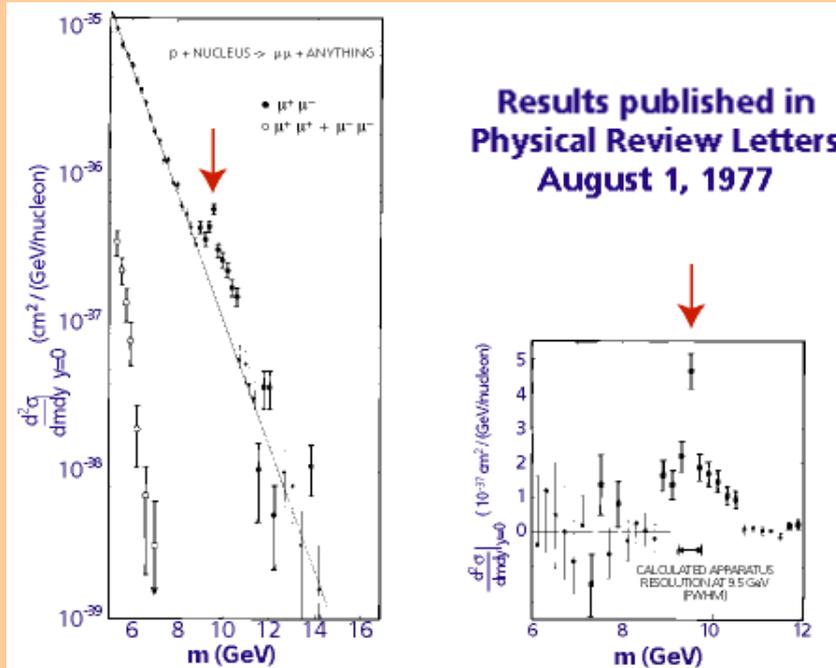


Abbildung 5.10 Die Ergebnisse von Aubert et al. (1974) zeigen die schmale J/ψ-Resonanz in der Verteilung der invarianten Masse des e<sup>+</sup>e<sup>-</sup>-Paares, das in inklusiven Reaktionen von Protonen an einem Berylliumtarget erzeugt wurde. Dies Experiment wurde am 28 GeV-AGS des Brookhaven National Laboratorys ausgeführt.

M = 3097 MeV  
L = 0, S = 1, P = -1

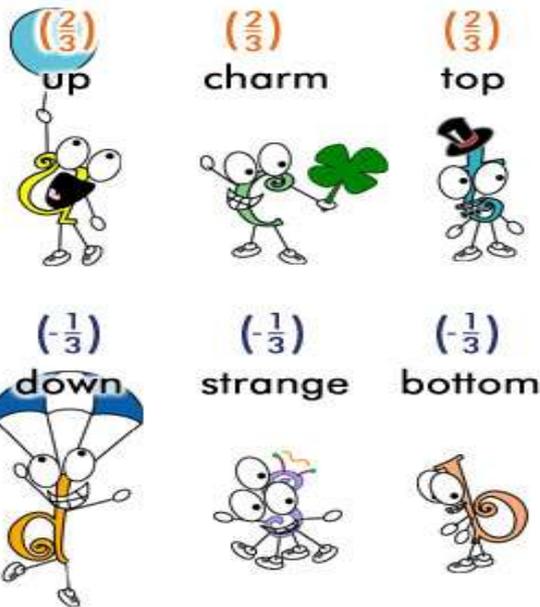
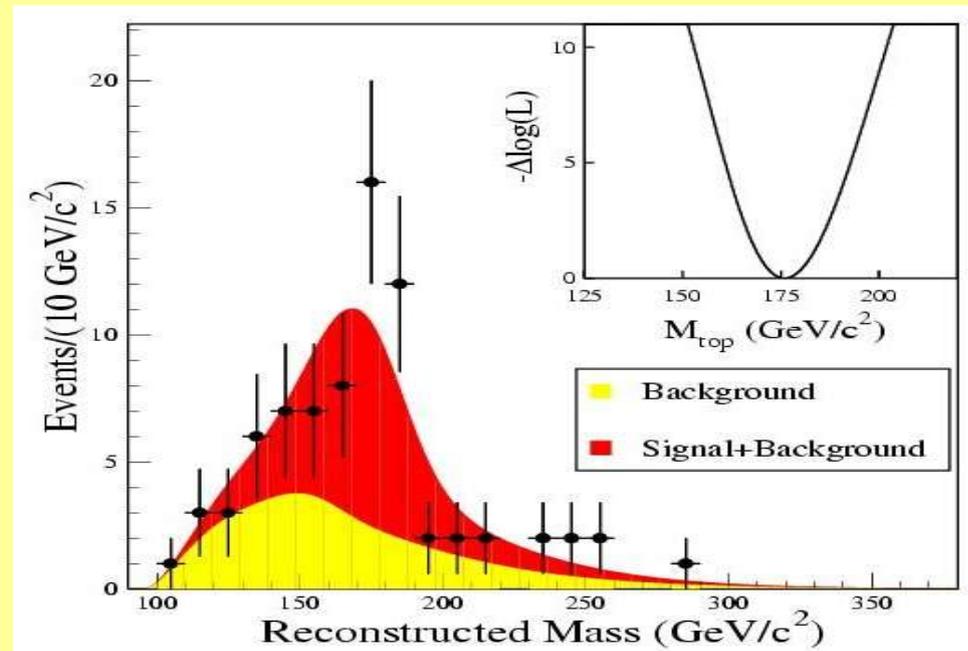
il **b** (bottom o beauty)  
e' pesante circa come 5 protoni



# I quarks piu' pesanti

il **t** (top)

scoperto nel 1994 dopo molti anni di ricerche, e' pesantissimo: ~200 protoni



tutti gli adroni che conosciamo oggi sono composti da questi **6 quarks** (+ i loro antiquarks)

# I quarks esistono veramente?

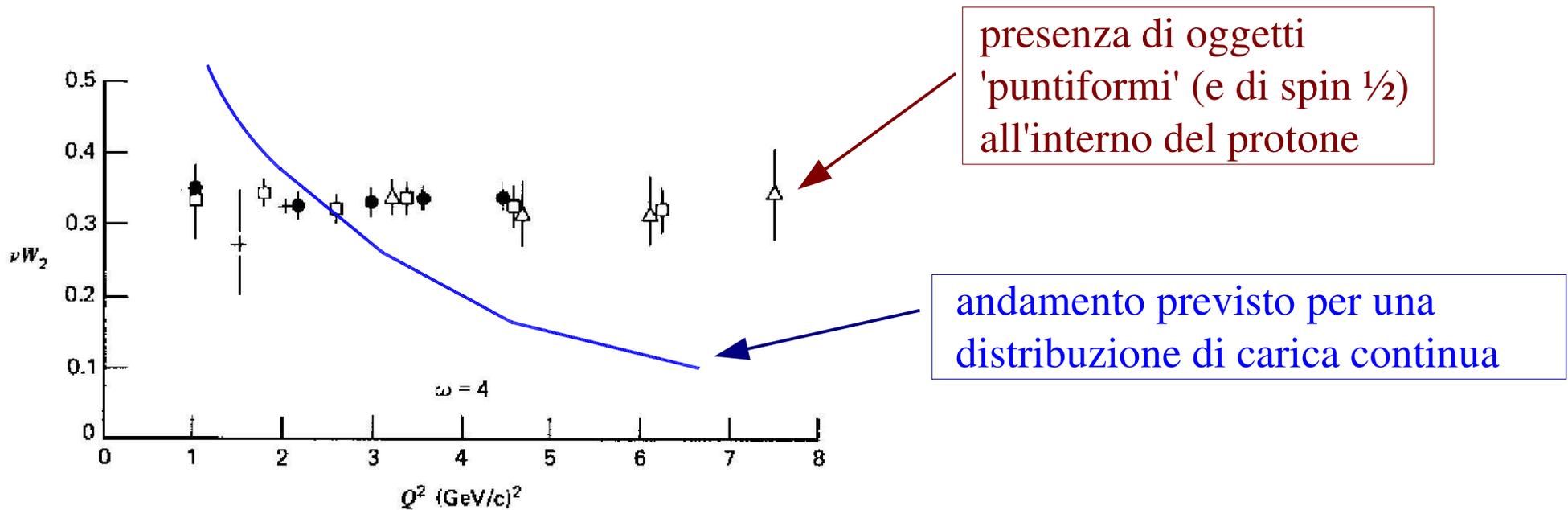
- Finora abbiamo parlato dei quarks all'interno di un modello che spiega la fenomenologia delle particelle che osserviamo negli esperimenti;
- In alcuni decenni di esperimenti, un quark da solo non e' mai stato osservato;
- Possiamo 'vedere' almeno indirettamente i quarks all'interno dei protoni?

Ricordate l'esperimento sulle lamine d'oro: Rutherford non osserva direttamente il nucleo atomico, ne deduce le proprieta' dalla distorsione delle traiettorie delle particelle alfa

- Ripetiamo l'esperienza di Rutherford sul protone (bersaglio). Come proiettile dobbiamo usare una 'sonda' **piccola e penetrante: l'elettrone e' il candidato ideale** (non abbiamo evidenze di una sua struttura interna e non e' soggetto all'interazione forte);

# I quarks esistono veramente?

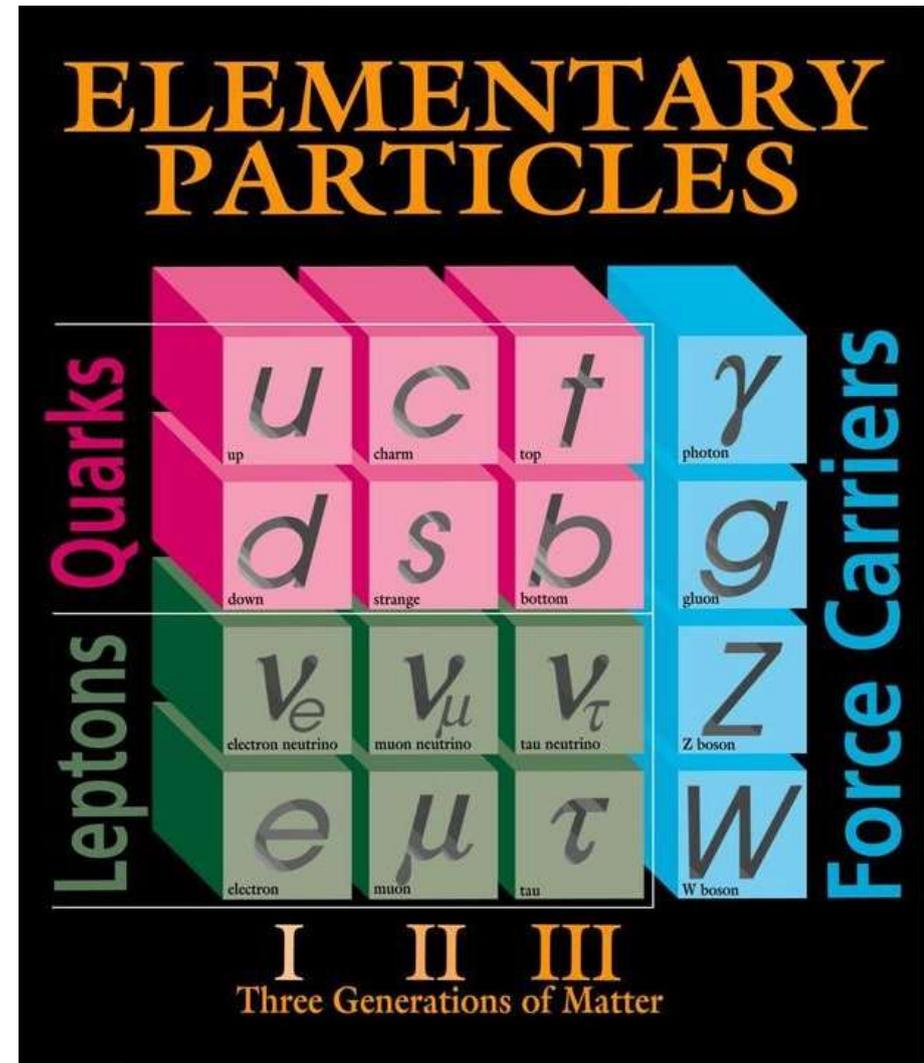
- Esperimento effettuato ~1970. Un bersaglio di idrogeno viene bombardato con un fascio di elettroni ad alta energia. Si misura la direzione e l'energia degli elettroni dopo l'urto (cinematica un po' piu' complicata che nel caso di Rutherford):



Fino ad oggi i quarks non hanno evidenziato alcuna struttura e non ne abbiamo mai misurato le dimensioni: li consideriamo come oggetti **puntiformi** e quindi **elementari**

# Le Particelle Elementari oggi

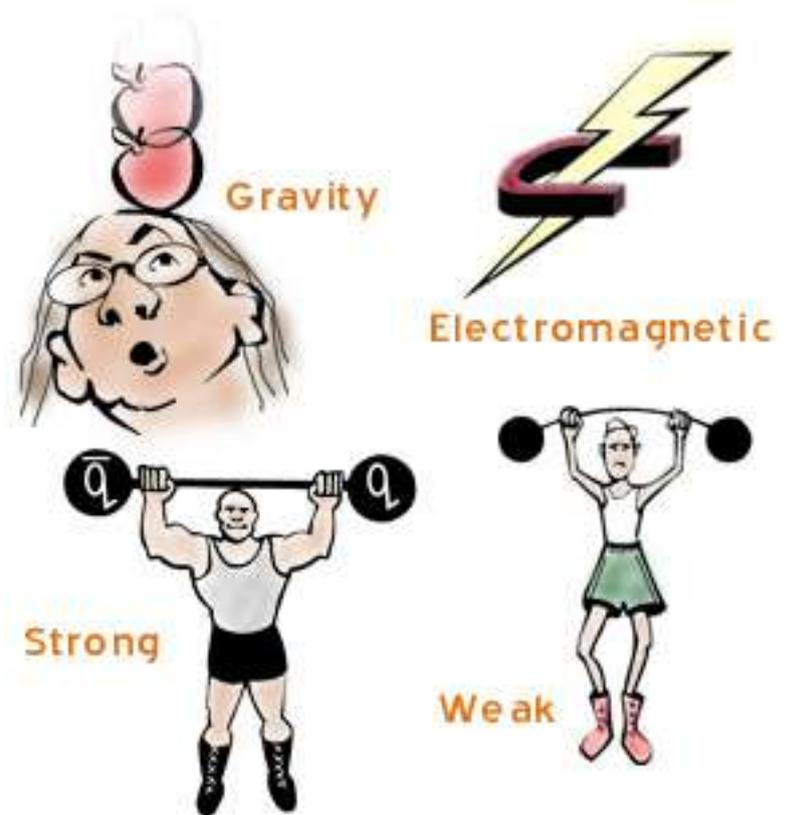
- Al meglio delle conoscenze attuali, conosciamo 12 particelle elementari: 6 quarks e 6 leptoni (+ le relative antiparticelle...)
- Quarks e leptoni si raggruppano in tre 'generazioni' di massa via via crescente;
- Tutta la materia 'ordinaria' e' costituita da particelle della prima generazione;
- A queste particelle si affiancano le particelle che 'scambiano le interazioni': i **bosoni vettori**;



Fermilab 95-759

# Le Interazioni Fondamentali

- Le interazioni fondamentali in natura sono quattro:
  - Gravitazionale;
  - Elettromagnetica;
  - Interazione forte;
  - Interazione debole;
- Solo delle prime due abbiamo esperienza diretta nella vita quotidiana, il loro raggio d'azione e' infinito, le altre due rimangono confinate nel mondo microscopico;



# Le Interazioni Fondamentali

## → L'interazione gravitazionale:

non ha bisogno di presentazioni, e' di gran lunga la piu' debole di tutte, domina sulle altre solo su larga scala. Viene mediata dal **gravitone**, una particella prevista teoricamente, ma non ancora osservata;



## → L'interazione elettromagnetica:



e' stata compresa a fondo solo nella seconda meta' del 1800 (Equazioni di Maxwell), con l'unificazione dei fenomeni elettrici e magnetici. E' responsabile di una vastissima molteplicita' di fenomeni che include tutti i legami chimici. A differenza della gravita', ha un ruolo molto importante nella Fisica delle Particelle Elementari, viene scambiata dal **fotone**;

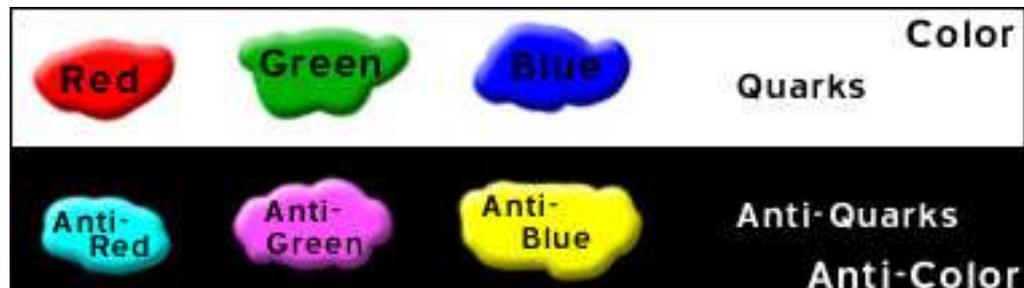
# Interazione Forte ed Interazione Debole

- Fin dall'inizio dello studio dei fenomeni nucleari apparve chiaro che esistevano due diversi tipi di interazione:
- Una (detta Interazione Nucleare Forte), responsabile della **stabilita' del nucleo**, composto di particelle di carica positiva o neutre, che in presenza della sola interazione elettromagnetica non potrebbe in alcun modo essere stabile;
- Un'altra responsabile di fenomeni quali il **decadimento  $\beta$** , caratterizzata da un'intensita' molto inferiore rispetto alla precedente (e all'interazione elettromagnetica);

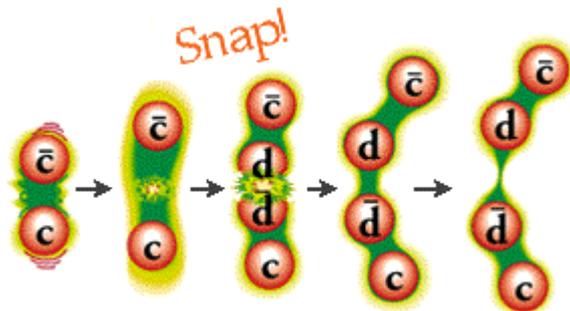
Nella Fisica delle Particelle, la vita media delle particelle il cui decadimento e' governato dall'interazione forte e' in generale molti ordini di grandezza piu' breve di quella di particelle che decadono attraverso l'interazione debole

# Ancora sull'Interazione Forte

- L'interazione fondamentale e' quella che lega insieme i quarks negli adroni. Essa e' spiegata (per il momento bene) dalla **Cromodinamica Quantistica (QCD)**, una teoria sviluppata alla fine degli anni '60;
- L'interazione e' mediata dai **gluoni**, e avviene tra particelle dotate di 'carica di colore' (cioe' tra i quarks e i gluoni stessi);



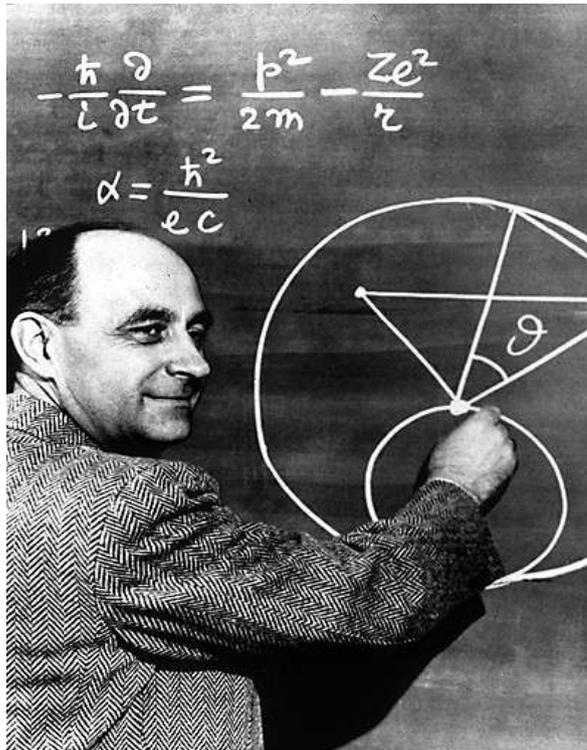
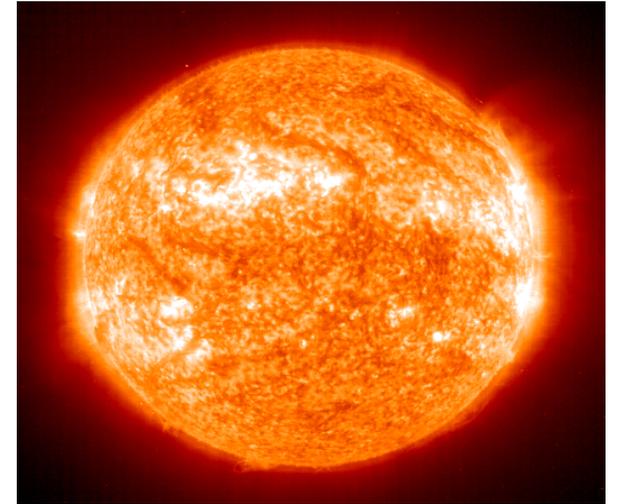
- Caratteristica unica dell'interazione forte: sono stabili solo **combinazioni 'neutre' di colore**. Le sole ammesse sono  $qqq$ ,  $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$  e  $q\bar{q}$ :



Questa e' la ragione per cui non si osservano singoli quarks liberi: sono oggetti colorati!

# L'Interazione Debole

- Pur essendo 'debole', ha un ruolo determinante nel nostro Universo: e' la sola che permette di trasformare un protone in un neutrone (reazioni termonucleari all'interno del Sole);



- E' la sola interazione a cui e' sensibile il neutrino (e per questo e' difficile osservarlo);
- 'Distingue tra destra e sinistra';
- Una prima formulazione (anche se incompleta) dell'interazione debole risale ad Enrico Fermi (~1930);

# Il Modello Standard

- Nel 1967 **Glashow**, **Weinberg** e **Salam** proposero una teoria in cui le interazioni elettromagnetica e debole venivano unificate in un'unica interazione: **l'interazione elettrodebole**;

- I mediatori di quest'interazione sono quattro:

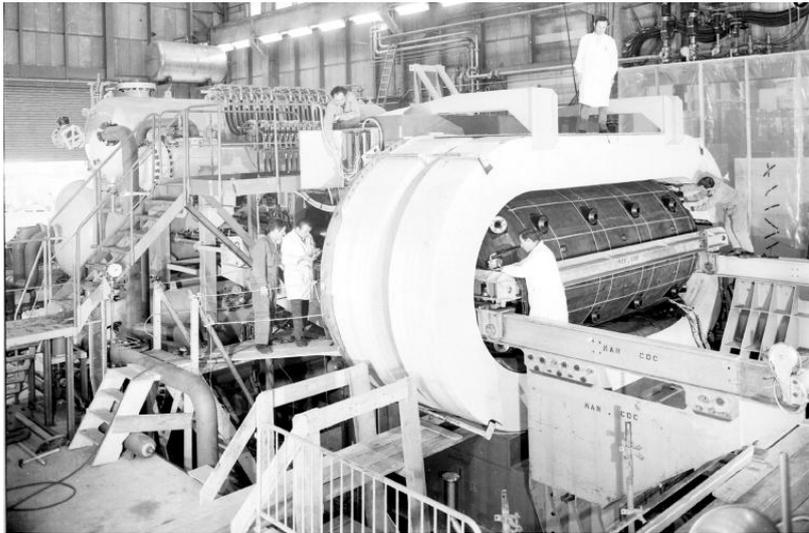
$$\gamma \quad W^+ \quad W^- \quad Z^0$$

- I mediatori (**virtuali**) si accoppiano a quarks e leptoni con intensita' comparabili, la debolezza delle interazioni mediate da W e Z e' dovuta al fatto che queste particelle (allora ipotetiche!) dovevano avere una massa molto elevata (pari a quella di circa 100 protoni);
- Novita' assoluta: la teoria prevedeva l'esistenza di '**correnti deboli neutre**', cioe' processi mediati dalla particella  $Z^0$ , di cui fino ad allora non si aveva alcuna evidenza sperimentale;



# L'esperimento Gargamelle

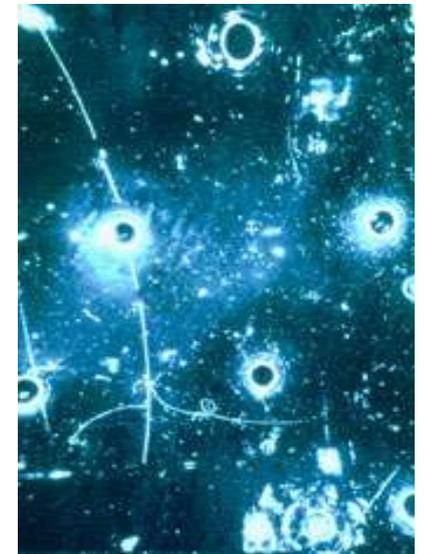
- Il fatto che non si fossero mai osservate correnti deboli neutre costituì un serio pregiudizio contro il Modello Standard;



- Nel 1973, l'esperimento Gargamelle si proponeva di cercare eventi del tipo (possibili solo grazie all'esistenza di un mediatore neutro):

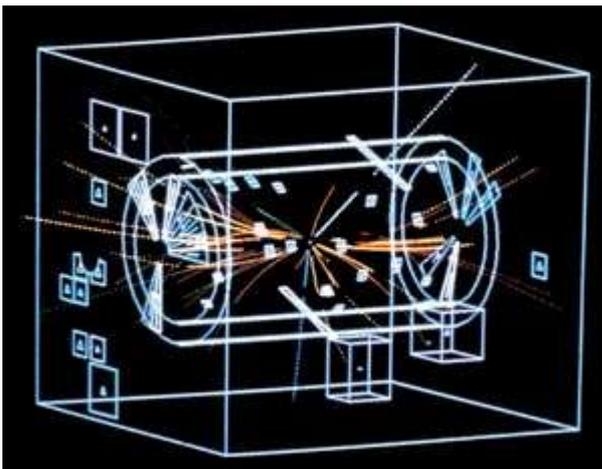
$$\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_{\mu} + e^{-}$$

- Il risultato positivo di Gargamelle costituì il primo grande successo del Modello Standard;
- Altre conferme sperimentali della teoria permisero agli autori di vincere il premio Nobel prima ancora che le particelle W e Z fossero osservate **direttamente**;



# L'esperimento UA1

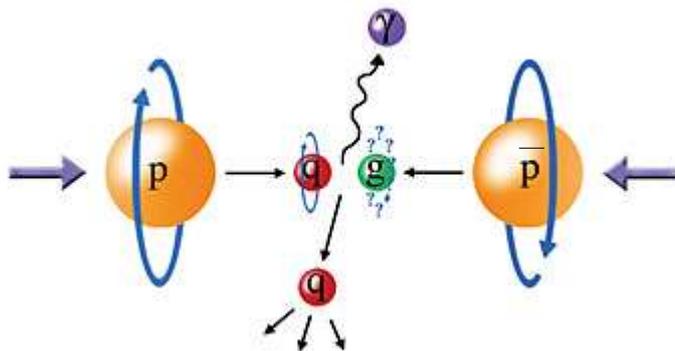
- Data l'elevata massa delle particelle W e Z, fu possibile produrle direttamente in un esperimento solo con la costruzione del primo collisore **protone-antiprotone** ( $S\bar{p}\bar{p}S$ ) al CERN di Ginevra, entrato in funzione nel 1983;
- L'osservazione di alcuni decadimenti delle particelle W e Z permise di determinare con discreta precisione la loro massa (in ottimo accordo con le previsioni del Modello Standard) e frutto' a Carlo Rubbia la vittoria del premio Nobel;



- Il Modello Standard si presentava quindi come una teoria di grande successo, pronta per raccogliere la sfida dei test di altissima precisione imposti dalla successiva macchina acceleratrice: **LEP**;

# LEP: Large Electron Positron collider

- Visti gli iniziali successi del Modello Standard, era necessario misurare con precisione i parametri incogniti della teoria e verificare il maggior numero possibile delle sue predizioni;
- Un collisore **protone-antiprotone** e' molto indicato per produrre un gran numero di W e Z, ma la precisione delle misure che puo' effettuare e' limitata:



Il protone non e' una particella elementare: la collisione avviene tra i quarks (e i gluoni) di cui e' costituito. L'energia dell'urto tra i quarks varia in modo casuale da evento ad evento.

- Un collisore **elettrone-antielettrone** invece lavora con particelle elementari, l'energia della collisione e' sotto controllo;



Possiamo far collidere elettrone e positrone all'energia giusta per produrre una  $Z^0$

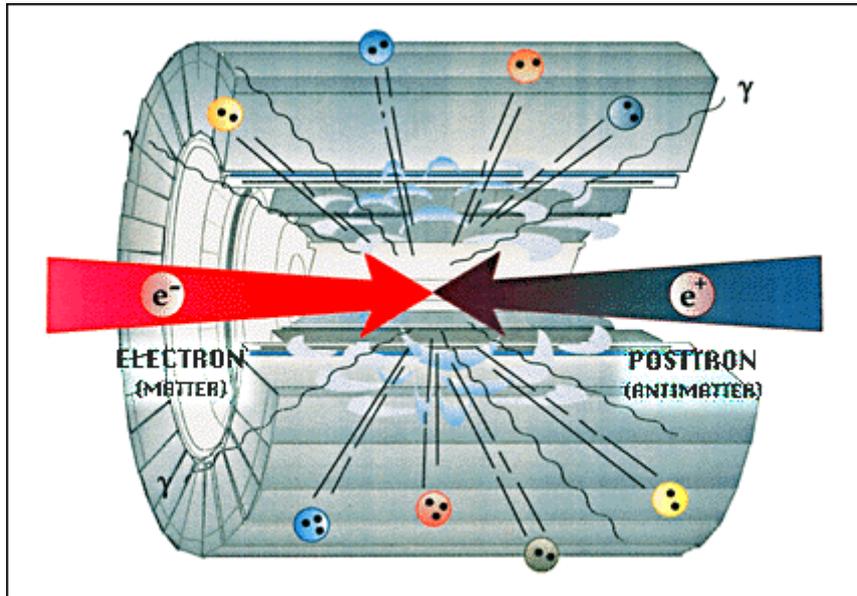
# LEP: Large Electron Positron collider

- Circonferenza dell'acceleratore: 27 km;
- Operativo nel periodo 1989-2000;
- 4 diversi rivelatori nei 'punti di interazione';



- Due fasi nell'attività di LEP:
- 1) produzione di alcuni milioni di  $Z^0$  per esperimento;
  - 2) collisioni ad energia maggiore: produzione di coppie di  $W$ , ... ;

# DELPHI: uno dei rivelatori di LEP

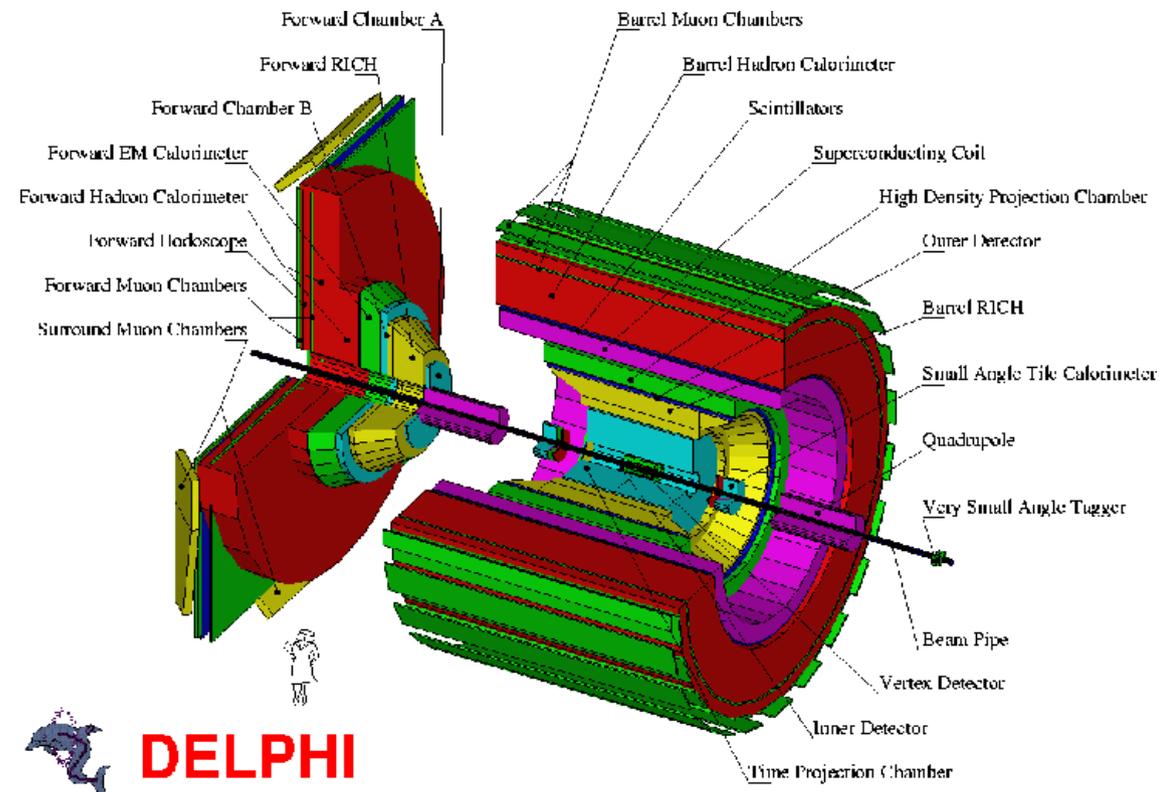


Elettroni e positroni collidono con la stessa energia: la  $Z^0$  e' prodotta a riposo al centro del rivelatore.

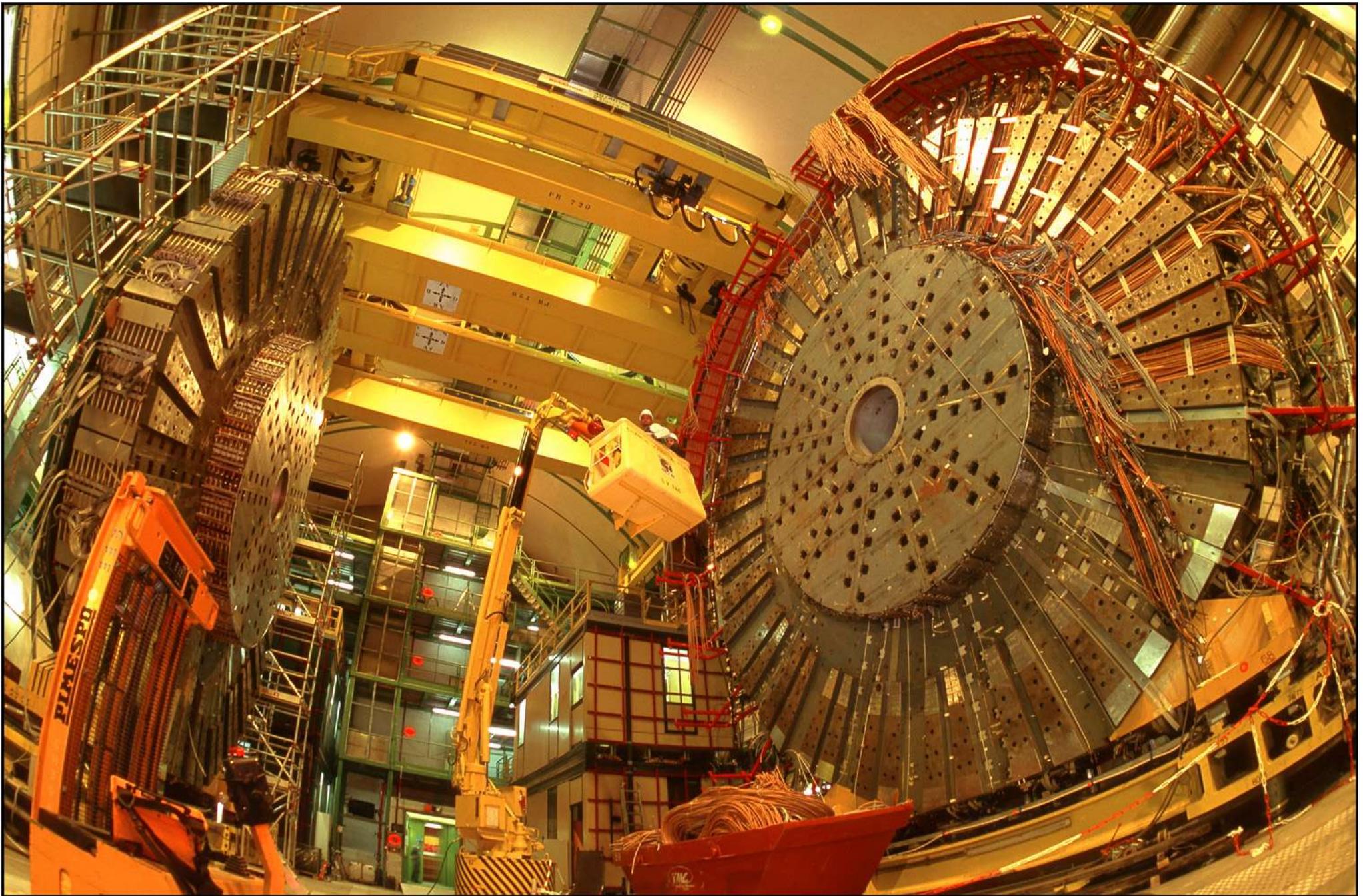
Il compito del rivelatore e' di misurare le proprieta' delle particelle che derivano dal decadimento della  $Z^0$

Le misure avvengono in due fasi:

- 1) 'non distruttiva': posizione e quantita' di moto;
- 2) 'distruttiva': energia, identificazione di particelle penetranti;

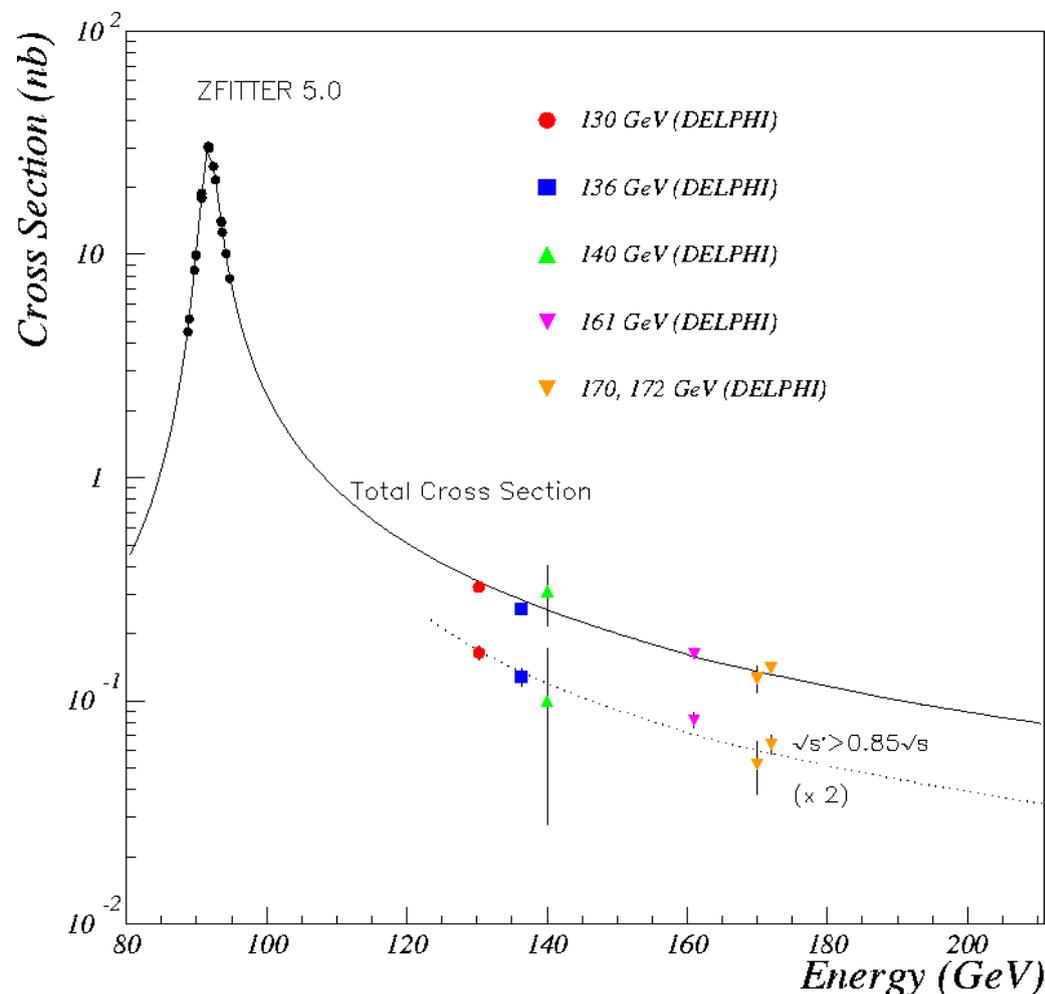


 **DELPHI**



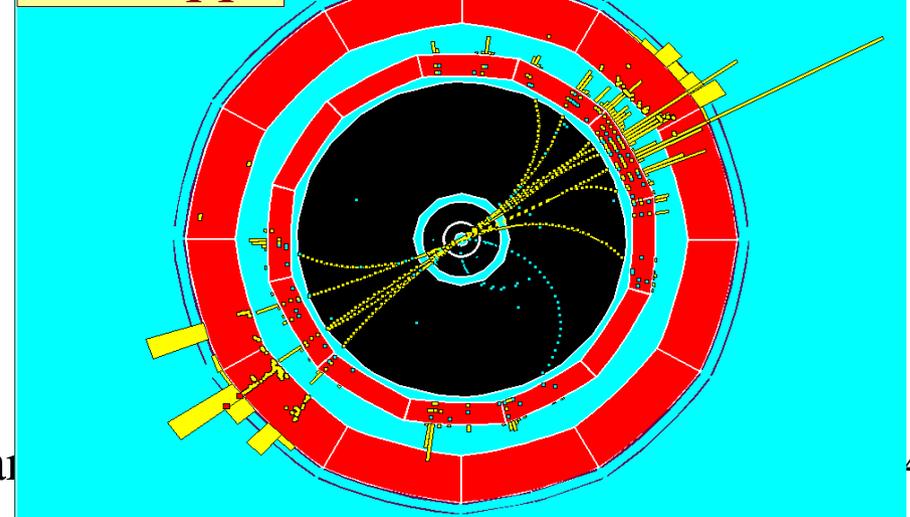
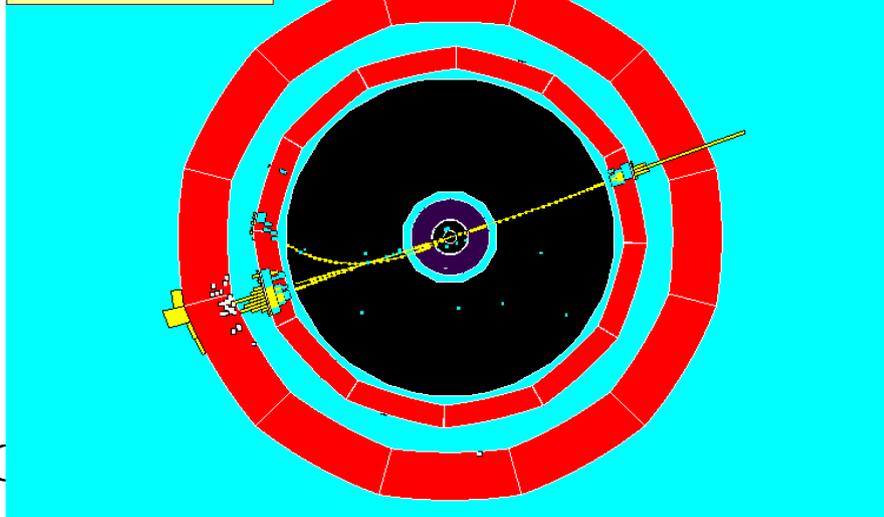
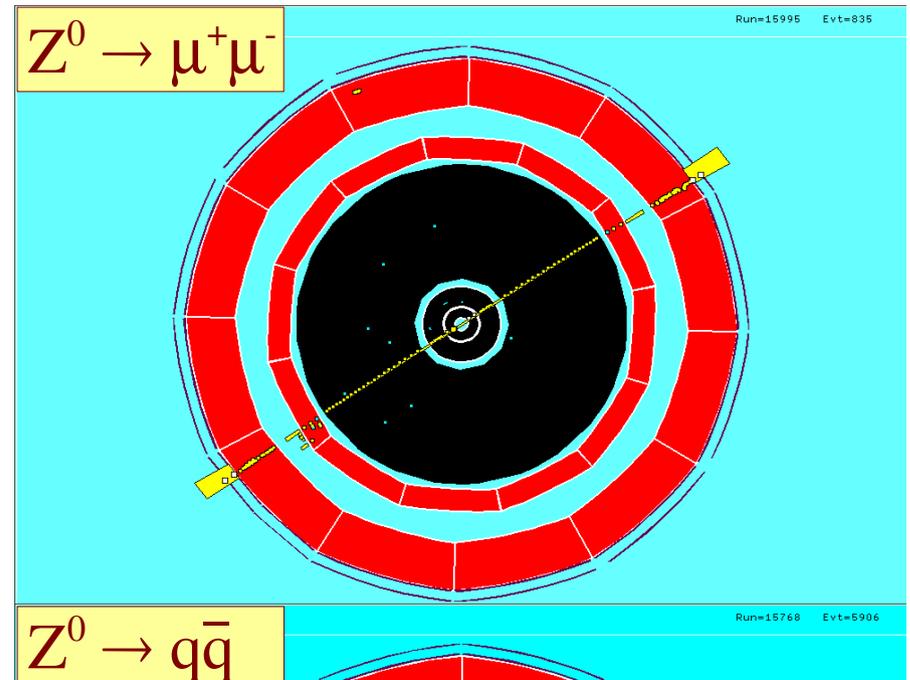
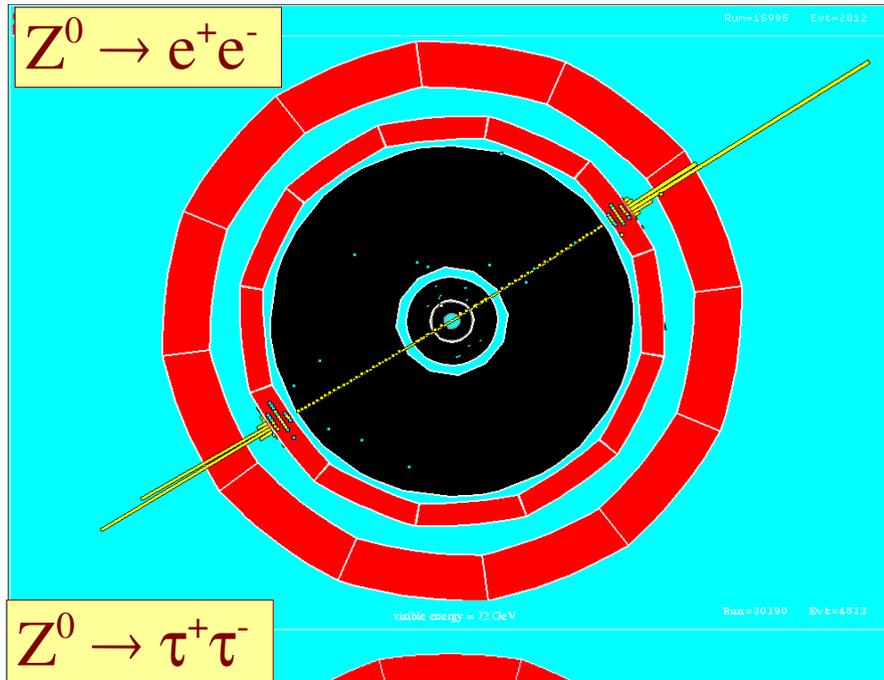
# La misura della massa della $Z^0$

- Variando l'energia delle collisioni, il numero di eventi che si osservano al centro del rivelatore cambia;
- Evidentissima 'curva di risonanza' in corrispondenza della produzione di  $Z^0$ ;
- Poiche' l'energia delle collisioni e' misurata molto bene, la massa della  $Z^0$  si puo' misurare con un errore dello **0.002 %** (precedentemente era nota con un errore  $\sim 1\%$ )



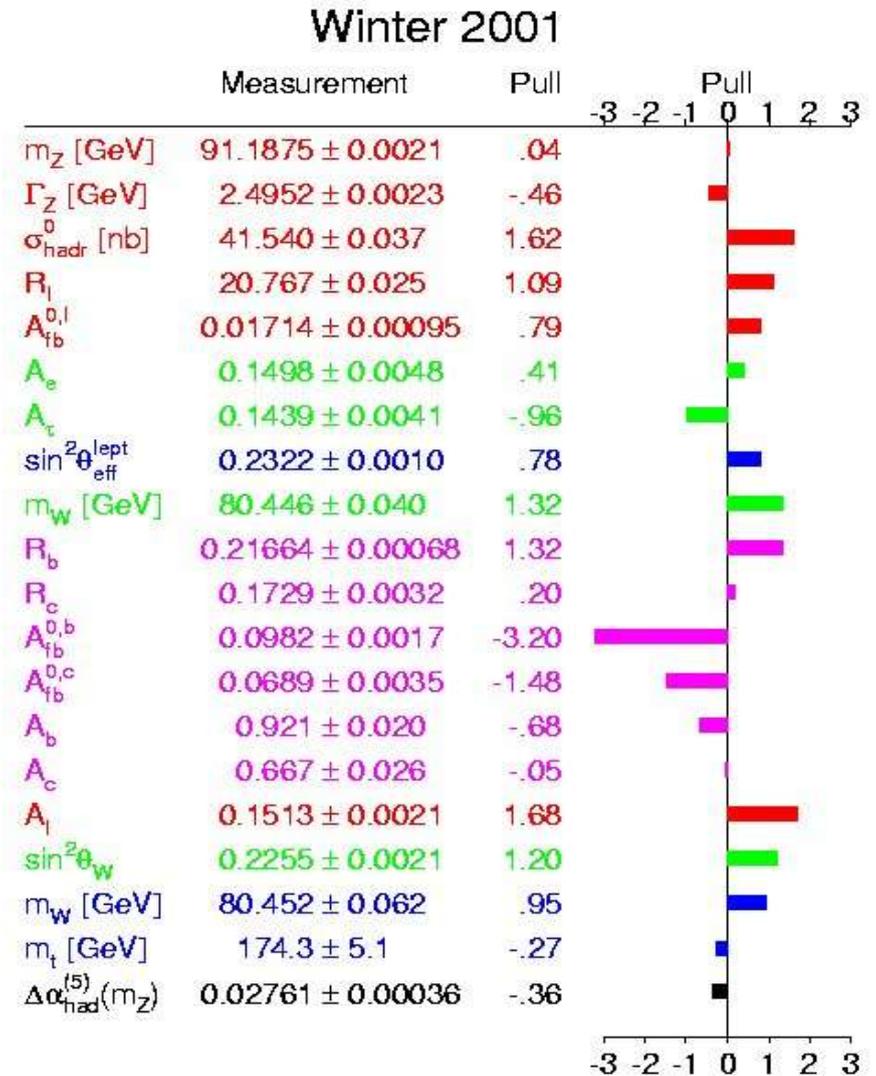
# Il decadimento della $Z^0$

- La  $Z^0$  decade con probabilita' differenti (ma previste dal Modello Standard) in diverse coppie di particelle;



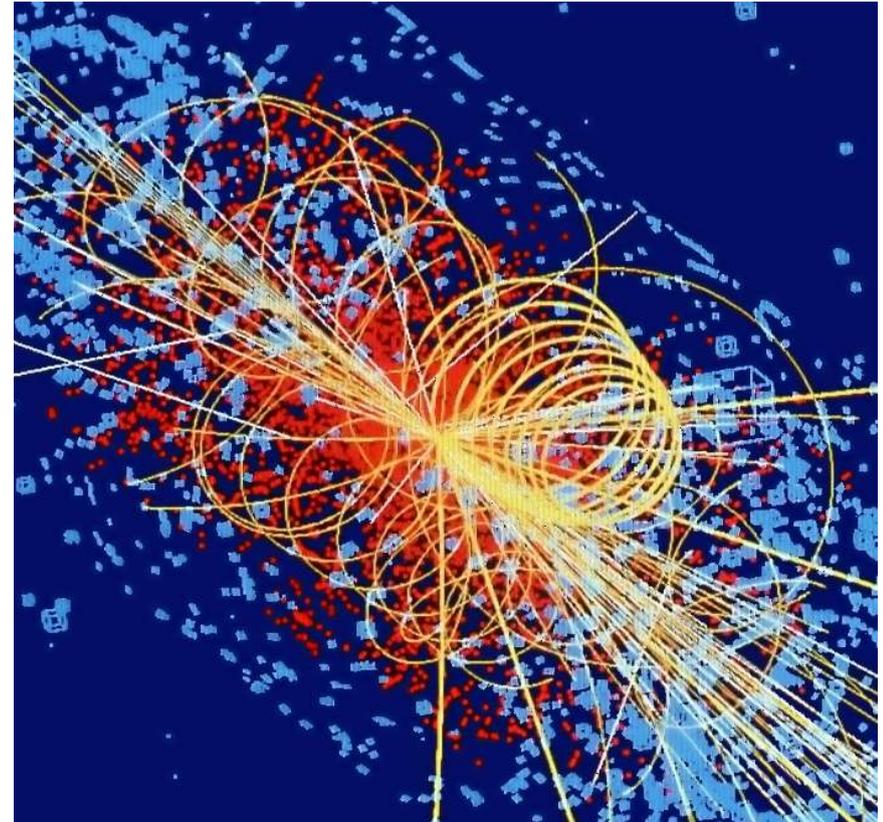
# Verifiche del Modello Standard a LEP

- La misura dei decadimenti della  $Z^0$  permette anche di contare il numero di neutrini 'leggeri': **il risultato e' 3**;
- 12 anni di misure di precisione a LEP non hanno evidenziato alcuna discrepanza con la teoria: **il Modello Standard funziona, molto piu' di quanto pensavano all'inizio i suoi autori!**
- Nonostante il successo delle sue previsioni, il Modello Standard non e' la Teoria Finale, molte cose rimangono ispiegate (la **gravita'** rimane al di fuori della teoria, e' impossibile spiegare l'attuale **asimmetria tra materia ed antimateria** dell'Universo, ... )



# L'unico pezzo mancante: l'Higgs

- Una sola particella la cui esistenza e' prevista dal Modello Standard non e' ancora stata osservata: **il bosone di Higgs**;
- L'esistenza di tale particella e' richiesta per spiegare la massa di tutte le altre particelle;
- Non e' stato trovato a LEP perche' la sua massa e' troppo elevata per le energie disponibili in quell'acceleratore;
- Tuttavia l'Higgs (se esiste) sara' alla portata del prossimo acceleratore del CERN, il **Large Hadron Collider (LHC)**, che entrera' in funzione tra ~2 anni, nello stesso tunnel di LEP;
- E' possibile che la scoperta dell'Higgs apra la porta a **Nuova Fisica oltre il Modello Standard**



# Due temi 'caldi' in Fisica delle Particelle

- La fisica del neutrino;
- Gli esperimenti di LHC;

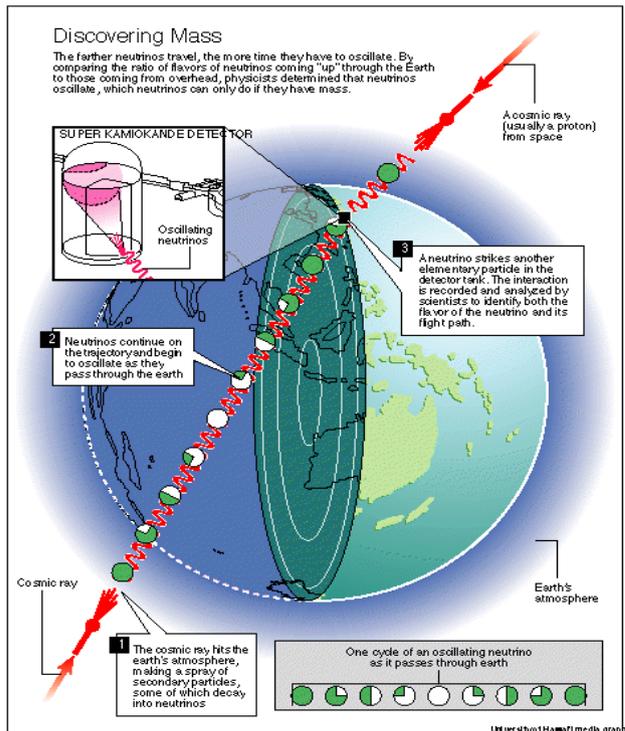
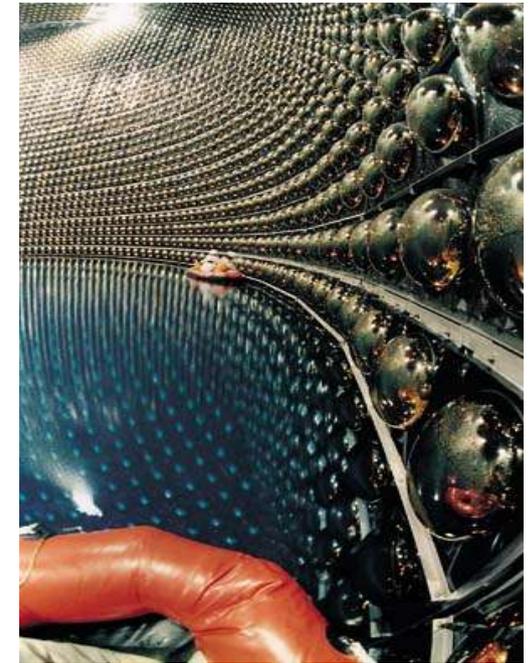
# L'oscillazione dei neutrini

- Storico problema: deficit dei neutrini solari;
- Le reazioni termonucleari all'interno del Sole producono una **enorme quantita' di  $\nu_e$** . Misurare il flusso di neutrini che provengono dal Sole costituisce un test dei modelli astrofisici sulla struttura interna delle stelle;
- Fin dalla fine degli anni '60 furono realizzati esperimenti in miniere profonde per misurare il flusso dei neutrini solari;
- Il risultato era sempre nettamente in difetto rispetto alle previsioni: **circa il 60% dei neutrini mancavano all'appello**;
- Fino a pochi anni fa, il deficit veniva attribuito ad un errore nei modelli astrofisici;



# L'oscillazione dei neutrini

- La svolta avviene nel 1998 con i risultati di Super-Kamiokande;
- Super-Kamiokande misura il flusso dei neutrini prodotti nell'atmosfera dai raggi cosmici;



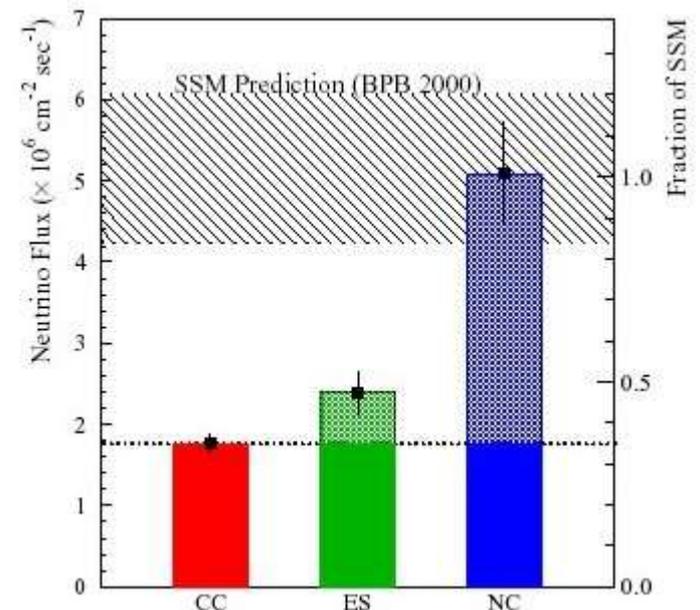
- Risultato: il flusso dei  $\nu_\mu$  che hanno attraversato la Terra e' inferiore a quello dei  $\nu_\mu$  che provengono dall'alto. Si osservano inoltre distorsioni nello spettro di energia;
- Interpretazione: i neutrini 'oscillano':

$$\nu_x \leftrightarrow \nu_y$$

# L'oscillazione dei neutrini

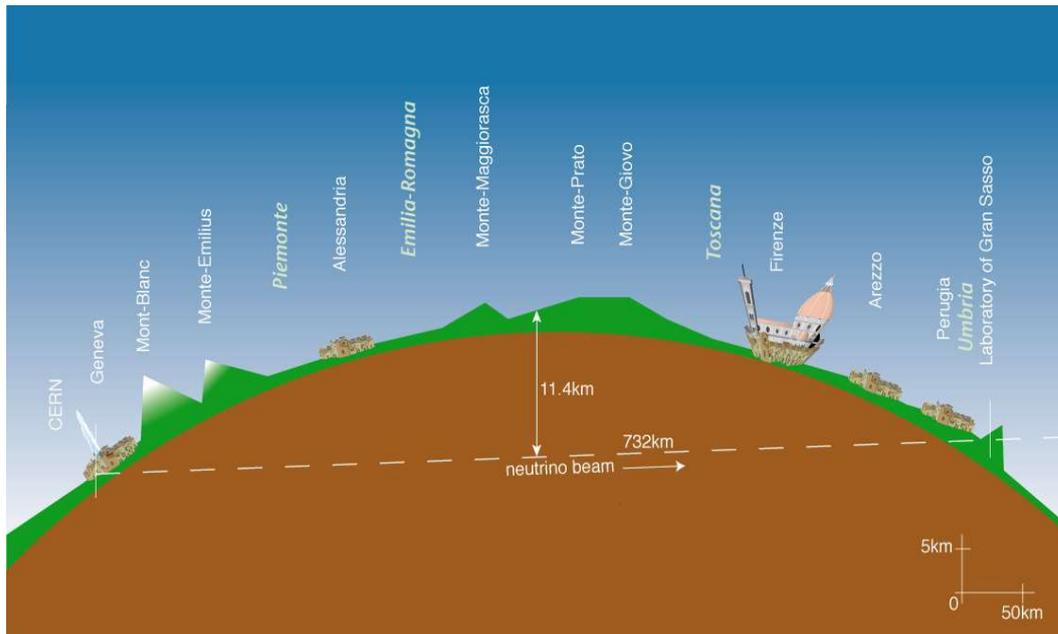
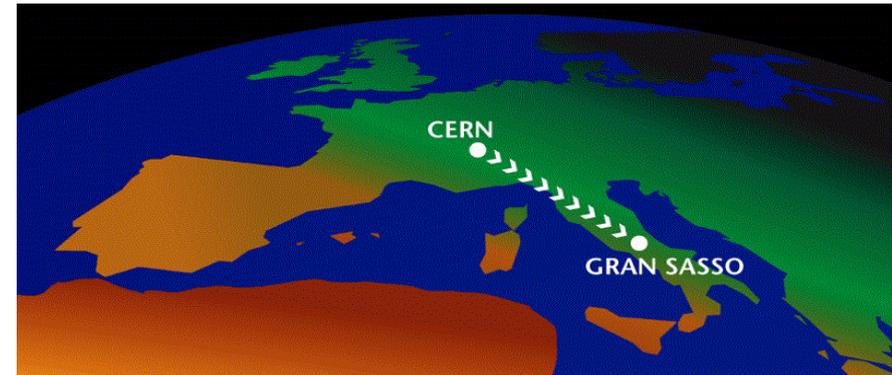
- La scoperta delle oscillazioni dei neutrini e' il primo caso di Fisica non prevista dal Modello Standard;
- Nel Modello Standard i neutrini sono privi di massa;
- Perche' il meccanismo dell'oscillazione possa funzionare, **i neutrini devono avere una massa**;
- Non sappiamo (ancora) quali siano le masse dei neutrini: le oscillazioni sono sensibili solamente alle differenze di massa;

- Le oscillazioni spiegano inoltre il deficit dei neutrini solari. L'esperimento SNO ha recentemente misurato il flusso totale di neutrini, trovandolo **in accordo con le previsioni dei modelli astrofisici!**



# L'oscillazione dei neutrini: CNGS

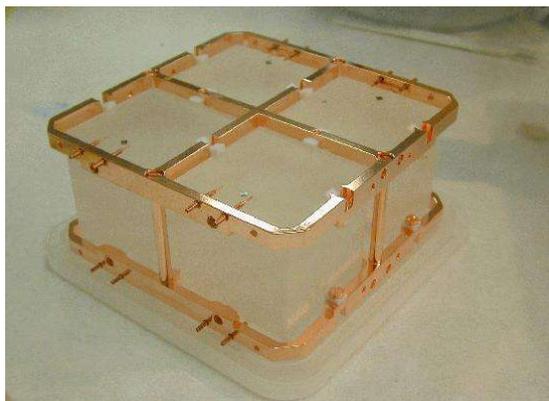
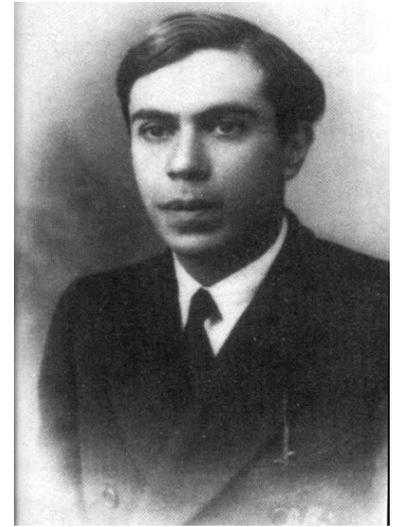
- Anche l'Italia e' impegnata nella ricerca sulle oscillazioni dei neutrini;
- CNGS = Cern Neutrinos to Gran Sasso
- Due esperimenti (OPERA e ICARUS) partiranno nella prossima estate;



- Lo scopo e' quello di identificare dei  $\nu_{\tau}$  prodotti nell'oscillazione (dopo 732 km di 'volo') di un fascio di  $\nu_{\mu}$ ;

# La natura del neutrino

- Non e' ancora chiaro se il neutrino abbia la stessa natura delle altre particelle (a cui corrispondono anti-particelle), oppure coincida con la propria antiparticella;
- Quest'ultimo caso fu per la prima volta ipotizzato da **Ettore Majorana**;
- Sperimentalmente, si osserva che il neutrino coincide con l'antineutrino se si osserva il **decadimento doppio-beta senza emissione di neutrini**;
- Questo decadimento e' ricercato in isotopi radioattivi a vita media lunghissima ( $\sim 10^{18}$  anni). Grande interesse dell'Italia in questo campo, con gli esperimenti **CUORICINO** e **CUORE** al Gran Sasso;

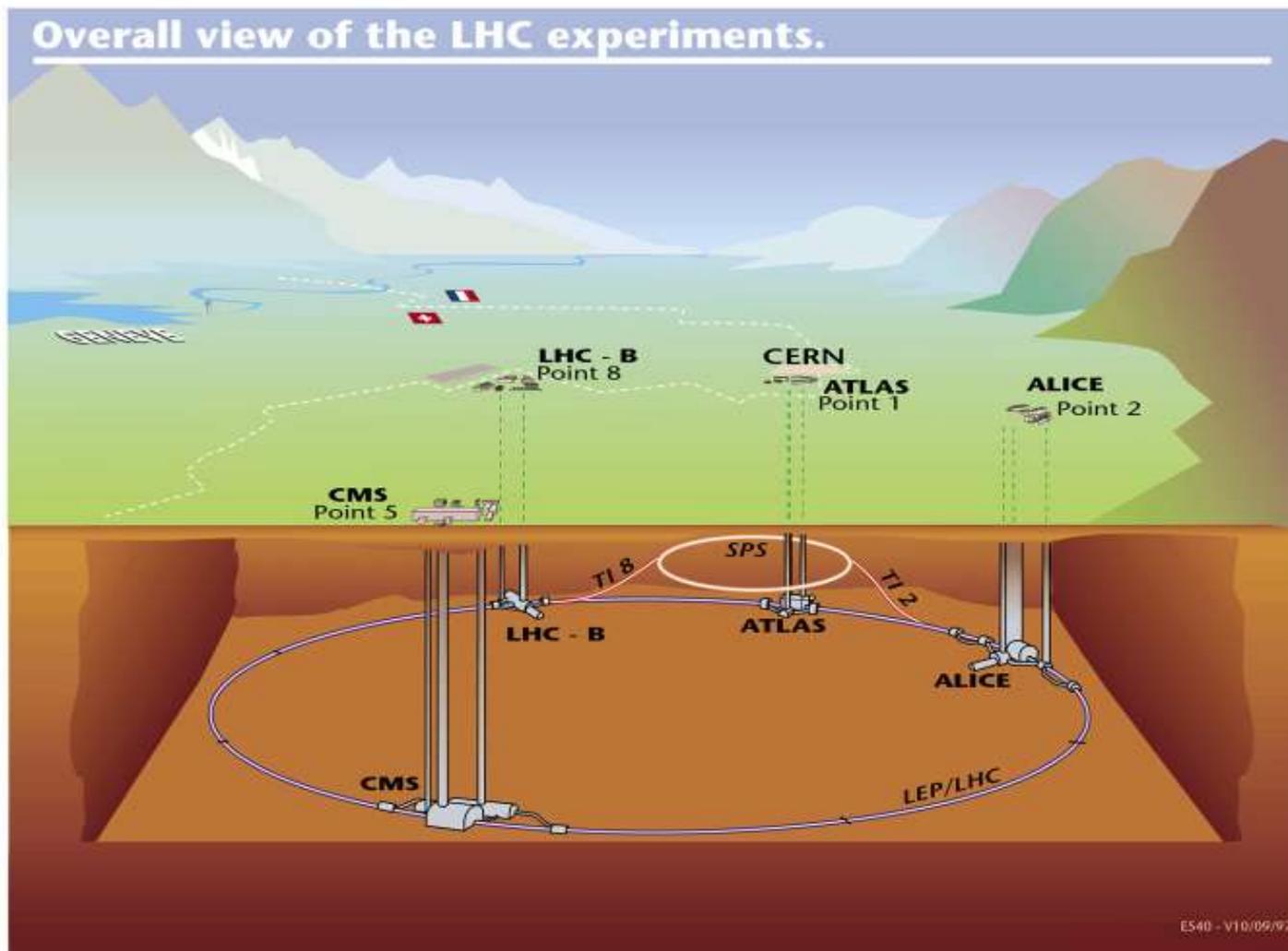


Cristallo di ossido di Tellurio  
dell'esperimento **CUORICINO**

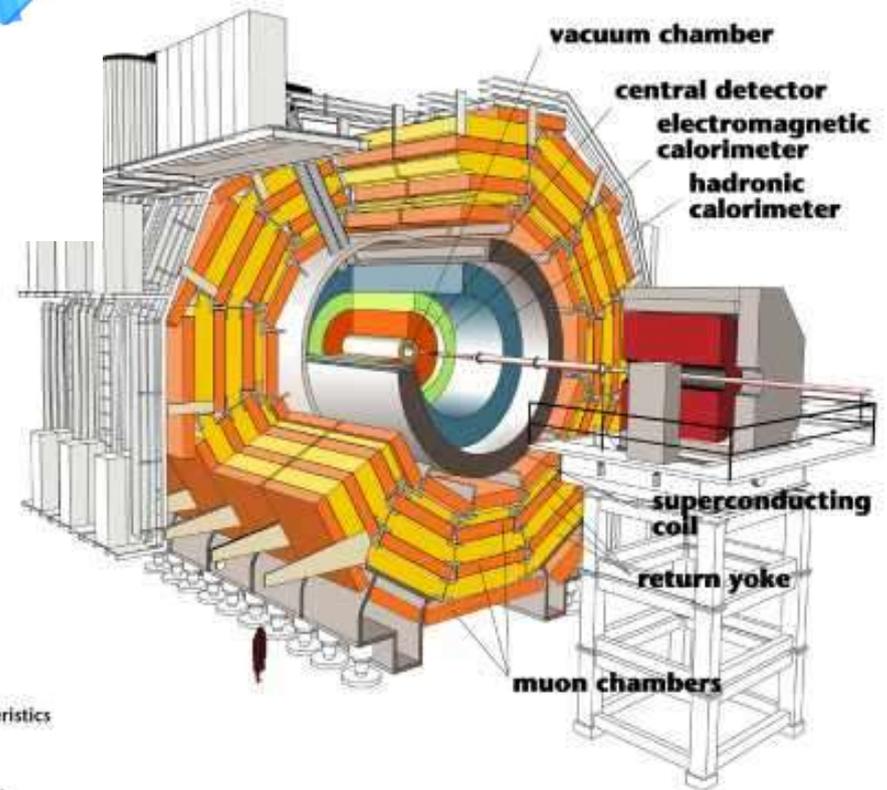
# Gli esperimenti di LHC

- Nella fase iniziale di LHC opereranno 4 esperimenti:

**ALICE, ATLAS, CMS, LHCb**



# ATLAS e CMS

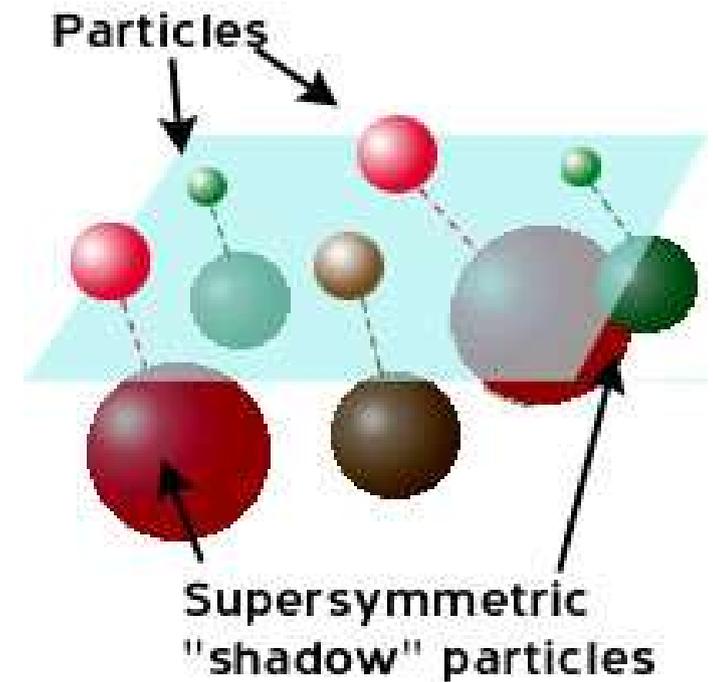


## Detector characteristics

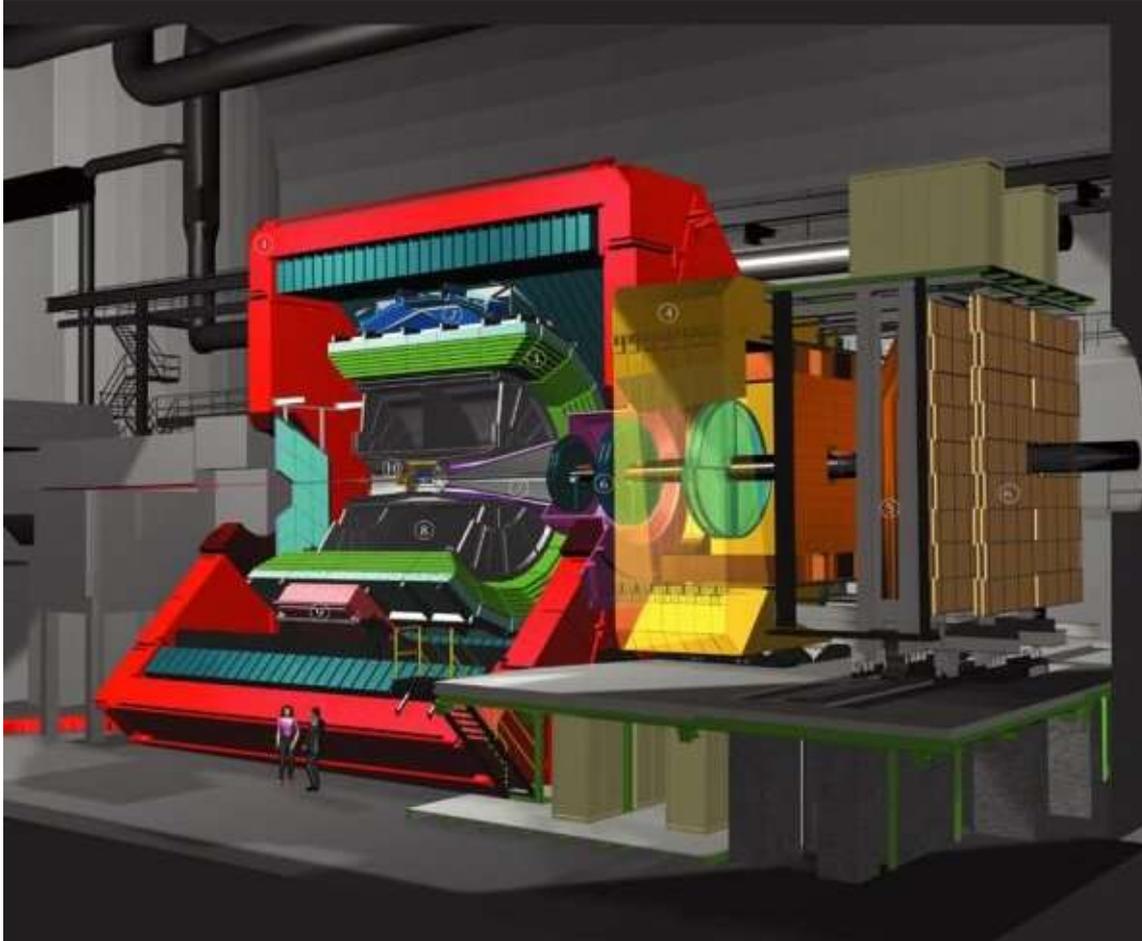
Width: 22m  
Diameter: 15m  
Weight: 14'500t

# La fisica di ATLAS e CMS

- **ATLAS e CMS**: rivelatori 'omni purpose', cioè non focalizzati su un singolo processo di fisica;
- Il primo compito di questi due esperimenti sarà quello di **trovare il bosone di Higgs**;
- Altri obiettivi: verifiche sulle previsioni del Modello Standard in questa finestra di energie...
- ... ma soprattutto: **trovare Nuova Fisica non prevista dal Modello Standard**, ad esempio l'esistenza di **particelle supersimmetriche**;
- ...



# ALICE



- Rivelatore dedicato allo studio delle collisioni tra nuclei di piombo;
- Scopo: studiare i primi istanti dell'Universo, ricreando il **Quark-Gluon Plasma**, lo stato primordiale della materia in cui i quark non erano confinati all'interno degli adroni;

# LHCb

- Dedicato alla fisica dei mesoni B;
- Il decadimento dei B e' particolarmente utile per lo studio dell'**asimmetria tra materia ed antimateria**;
- La violazione della simmetria tra materia ed antimateria e' prevista dal Modello Standard e conosciuta sperimentalmente da piu' di 40 anni;
- L'entita' dell'asimmetria e' pero' troppo piccola per spiegare l'asimmetria tra materia ed antimateria dell'Universo: **si devono cercare nuovi fenomeni al di la' di quelli previsti dal Modello Standard**;

