



# La Fisica delle Particelle Elementari:

## Un viaggio nell'estremamente piccolo alla scoperta dei segreti della materia

Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni



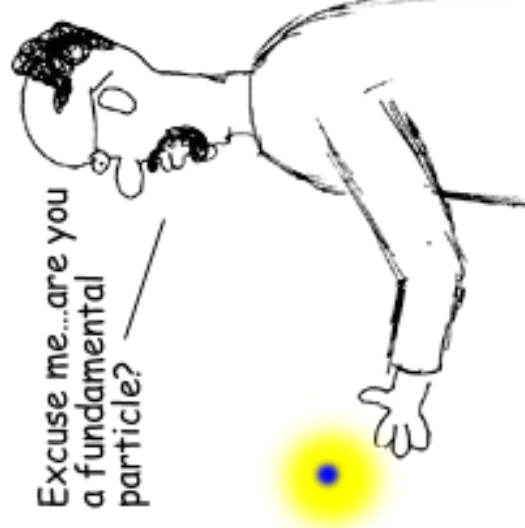
# Sommario

- ★ Di cosa si occupa la fisica delle particelle?
- ★ Un po' di fisica teorica:
  - Classificazione e proprietà delle particelle elementari;
  - Il "**Modello Standard**" e l'unificazione delle interazioni.
- ★ Un po' di fisica sperimentale:
  - Gli acceleratori e i rivelatori di particelle;
  - Un esempio concreto: l'esperimento **DELPHI** all'acceleratore **LEP** del **CERN** di Ginevra e la verifica del Modello Standard.
- ★ **Il futuro**: cosa stiamo cercando e perché?



# Perche' studiamo le particelle?

- ★ L'uomo si e' chiesto da sempre:
  - "Da cosa e' costituito il mondo"?
  - "Quali sono le leggi che lo governano?"
  - "Come mai tanti corpi e fenomeni presentano delle regolarita' comuni?"
- ★ Fin dall'antichita' si e' capito che la materia e' costituita dalla combinazione di pochi elementi fondamentali, **elementari** (Democrito, 460 a.C.)
- ★ Si studia l'elementare per capire il **macroscopico**



# Cosa significa 'elementare'?

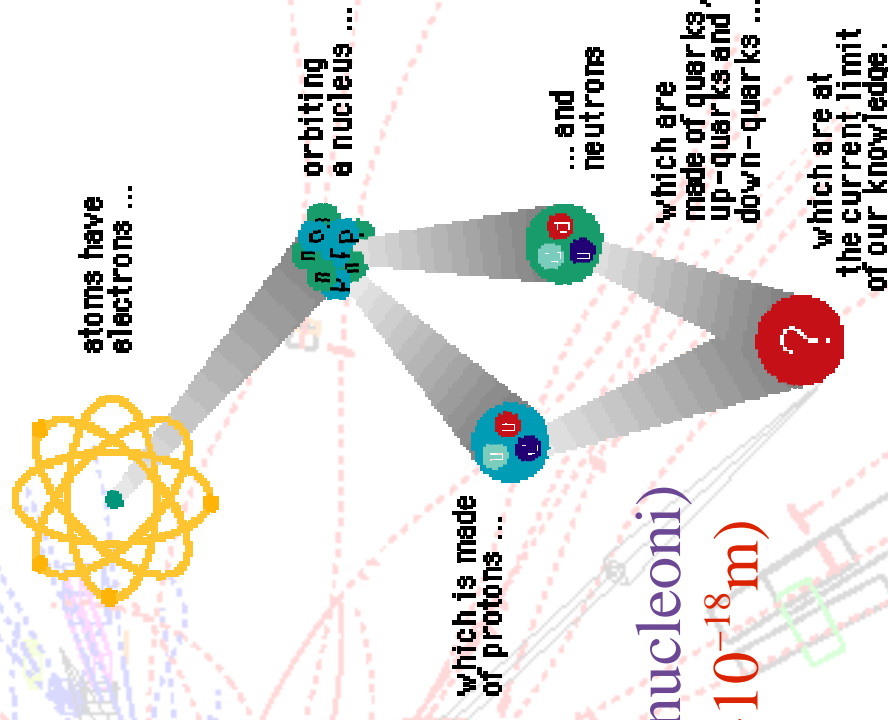


★ La fisica subnucleare studia i costituenti fondamentali della materia e mette in relazione le loro interazioni con le leggi che governano il mondo macroscopico.

★ Il concetto di "elementare" si è evoluto nel tempo:

- Fisica atomica (~1900):  
atomo ( $r \sim 10^{-10}$  m)
- Fisica nucleare (~1930):  
nucleo ( $r \sim 10^{-14}$  m),  
nucleone ( $r \sim 10^{-15}$  m)
- Fisica delle particelle (oggi):  
quarks (costituenti dei nucleoni)  
e leptoni (elettrone) ( $r \sim 10^{-18}$  m)

■ ... e poi?



Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni

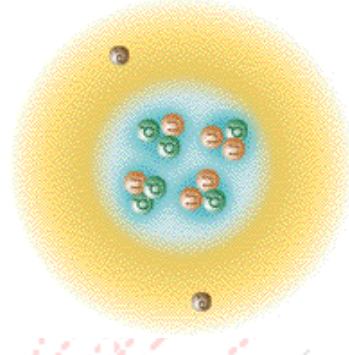
# Le interazioni fondamentali



- ★ **Concetto di interazione** tra due corpi:
  - **Classico:** l'interazione e' descritta in termini di campo e potenziale (gravitazionale, elettomagnetico)
  - **Quantistico:** l'interazione avviene attraverso lo scambio di particelle specifiche: i **propagatori**

## ★ Le interazioni fondamentali sono quattro:

- ★ **Gravitazionale:** interazione tra corpi massivi;
- ★ **Nucleare debole:** decadimenti radioattivi (attività stellare);
- ★ **Elettromagnetica:** interazione tra corpi carichi (elettroni e protoni nell'atomo);
- ★ **Nucleare forte:** interazione tra quarks nei nucleoni.





# Caratteristiche delle interazioni

★ Le interazioni si differenziano per : particella che funge da propagatore, intensità, sorgente, raggio d'azione e tipo di particelle interessate:

Interazione    Sorgente    Propagatore    Intensità' rel.    Raggio

★ Gravitazionale    **m**    Gravitone     $10^{-38}$      $\infty$

★ Nucl. Debole    **q debole**     $W, Z^0$      $10^{-5}$      $10^{-15}m$

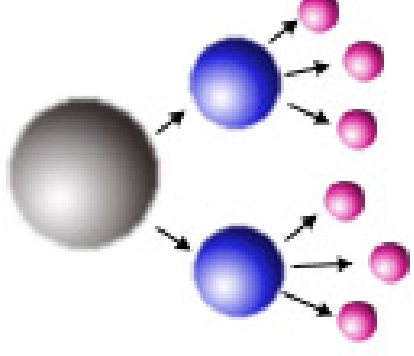
★ Elettromagnetica    **q**    Fotone     $10^{-2}$      $\infty$

★ Nucl. Forte    **"colore"**    Gluone    1     $10^{-15}m$



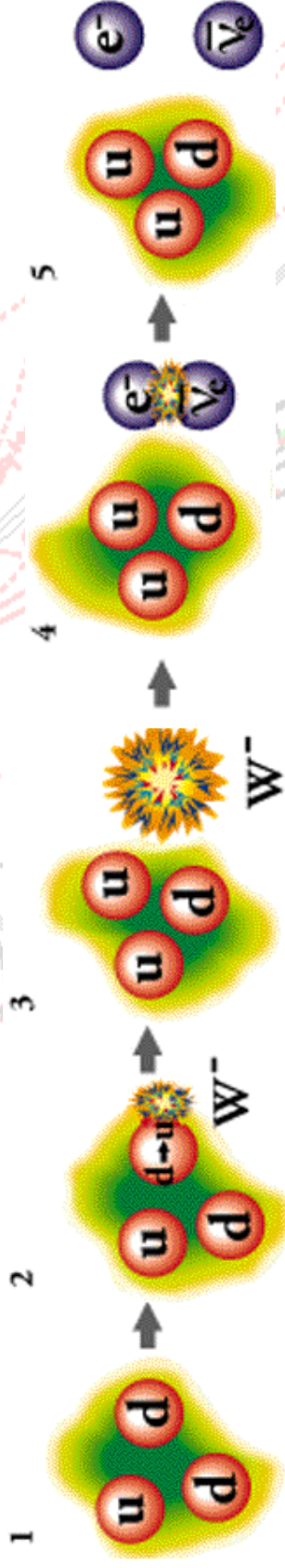
# Interazioni deboli

- ★ Sono responsabili dei decadimenti delle **particelle instabili** in quelle stabili da cui e' formata la materia ordinaria
- ★ Sono mediate dai bosoni vettori  $Z^0$  e  $W$  che sono pesanti **come 90 protoni!**



No further decay is possible!

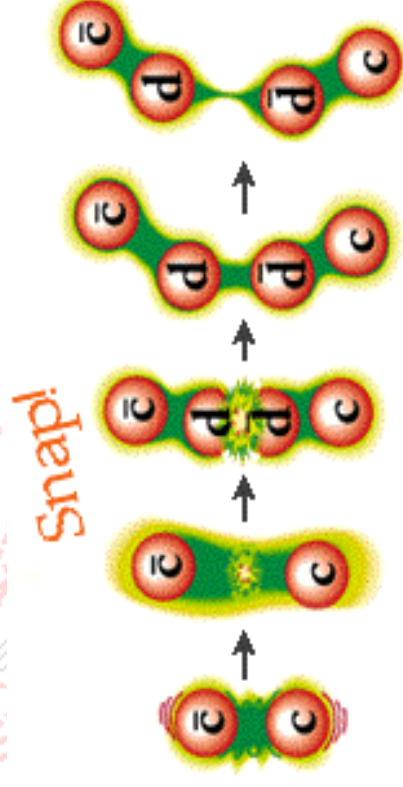
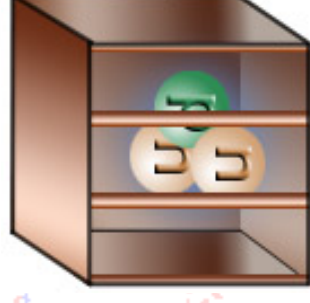
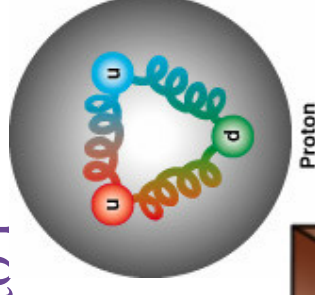
- ★ Esempio: decadimento del neutrone:





# Interazioni forti

- ★ Sono responsabili della coesione dei protoni all'interno dei nuclei e dei quarks all'interno dei nucleoni, per questo i propagatori vengono chiamati gluoni (da "colla")
- ★ La sorgente e' la carica di colore di cui esistono tre diversi "valori" detti **rosso**, **verde** e **blu**.
- ★ Questa carica e' troppo forte perche' i quarks possano essere separati, tale fenomeno si chiama **confinamento**:
- ★ **Se un adrone viene rotto, i quarks che lo compongono frammentano subito in nuovi adroni:**



Martino Margoni

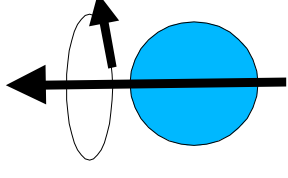
Feltre, 12 Giugno 2004



# Classificazione delle particelle



- ★ Le particelle si differenziano per la loro massa **m**, carica elettrica **q**, momento angolare intrinseco (spin) **S**, vita media  **$\tau$**  e tipo di interazione a cui sono soggette:



- ★  **$m > 0$**   $\Rightarrow$  interazione gravitazionale
- ★  **$q \neq 0$**   $\Rightarrow$  interazione elettromagnetica

- ★ Si differenziano in due grandi classi:

- ★ **Leptoni (elettrone, neutrino)**: interazione debole
- ★ **Adroni (quarks,...)**: interazione debole+forte

- ★ Per ogni particella esiste una anti-particella con stessa massa e spin e opposta carica elettrica

# Vita media e decadimenti



- ★ Le particelle possono essere stabili o instabili:
  - Stabili: formano la materia ordinaria (elettrone, nucleoni);
  - Instabili: vivono troppo poco per formare aggregati: la durata della loro "vita" dipende in particolare dall'intensità dell'interazione.
- ★ Una particella decade se ne esistono di più leggere che interagiscono con la stessa forza e se il decadimento segue determinate "regole di selezione" che dipendono dall'interazione.
- ★ Quasi tutte le particelle sono instabili. La legge che regola il decadimento è:  $N(t) = N^0 e^{-t/\tau}$  ossia il numero di particelle diminuisce in modo esponenziale.

$\tau$  è detta vita media della particella.



## \* $\tau$ tipiche:

\* Interazione debole:

$$10^{-13} - 10^{-12} \text{ s}$$

\* Interazione elettromagnetica:

$$10^{-20} - 10^{-16} \text{ s}$$

\* Interazione forte:

$$< 10^{-21} \text{ s}$$

\*  $\tau$  è misurata nel sistema della particella. Secondo il

principio di relatività, la durata di un intervallo di tempo dipende dal sistema di riferimento:

$$\tau^* = \tau / (1 - v^2/c^2)^{1/2} \quad (\tau^* \text{ nel laboratorio,}$$

$\tau$  vita media)

\* I **muoni** (leptoni prodotti

dall'interazione dei raggi cosmici

con l'atmosfera) riescono a raggiungere

la terra anche se la loro  $\tau$

sarebbe troppo breve.





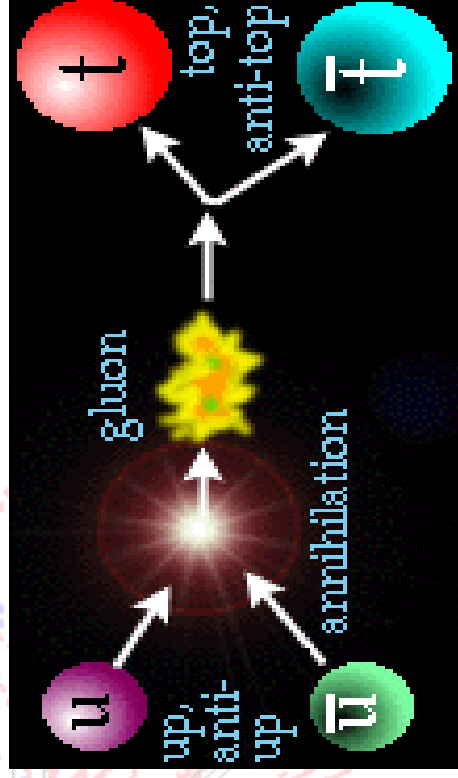
Mass is just a form of energy!

# Carica e Massa

- ★ **Carica elettrica:** e' quantizzata
  - E' sempre multipla di  $e=1.6 \times 10^{-19} C$  (q elettrone).
  - I quarks hanno carica frazionaria ( $e/3$  o  $2e/3$ ).
  - In una reazione la carica totale si conserva e non dipende dal sistema di riferimento.

- ★ **Massa:** non e' quantizzata
  - Non si conserva nelle reazioni.
  - Vale la relazione relativistica di equivalenza con l'energia:

$$E=mc^2 / (1-v^2/c^2)^{1/2} \text{ ossia energia e massa possono trasformarsi l'una nell'altra.}$$

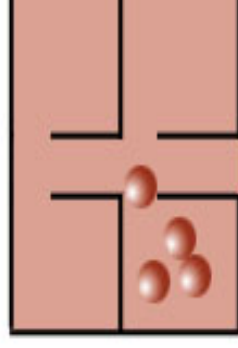
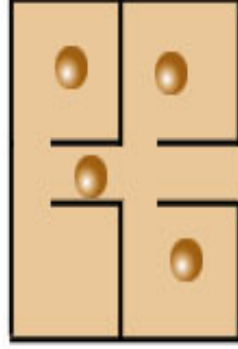
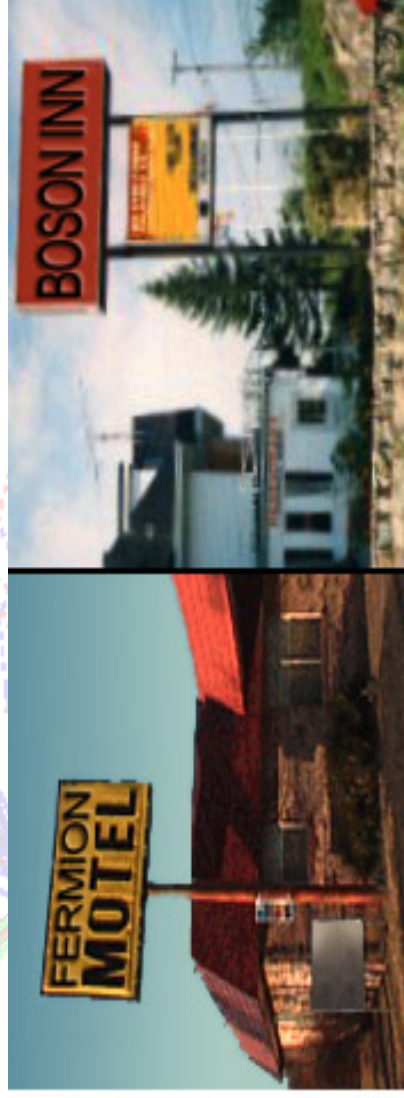




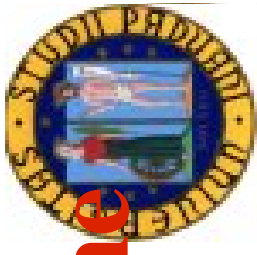
# Spin: Fermioni e Bosoni

- ★ **Fermioni** (quarks e leptoni) : Spin multiplo semintero di  $\hbar$ .  
 due particelle identiche non possono stare nello stesso stato  
 quantico (principio di esclusione di Pauli)
- ★ **Bosoni** (propagatori,...) : Spin multiplo intero di  $\hbar$ : due  
 particelle identiche preferiscono stare nello stesso stato  
 quantico...

Fermions	Bosons
Leptons and Quarks	Force Carrier Particles
Spin = $\frac{1}{2}$	Spin = $1^*$
Spin = $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$	Spin = 0, 1, 2, ...
anyons (qqq)	Mesons (qq̄)



# Simmetrie e leggi di conservazione



★ Se in un sistema si stabilisce una proprietà di invarianza (simmetria) rispetto a una trasformazione, c'è una grandezza che si conserva nella stessa trasformazione:

★ **Nel mondo macroscopico:**

## Invarianza

traslazione nello spazio (tempo)  $\Rightarrow$

rotazione

trasformazione di "gauge"

Quantità 'conservata

$p$  (E)

$\Rightarrow$  momento angolare L

$Q$

★ Nella fisica delle particelle ci sono altre simmetrie:

★ **P** (Parità): inversione destra-sinistra

★ **C** (coniugazione di carica): trasform. particella-antiparticella

★ **T** (inversione temporale): inverte il tempo nelle interazioni

★ **P, C, T** non sono simmetrie rispettate nelle interazioni deboli,

mentre lo è, sempre il loro prodotto **CPT**.

Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni



# Il Modello Standard:

★ E' la teoria delle particelle elementari (non completa, manca la gravita'). Descrive tutte le particelle e le interazioni in termini di 6 quarks e 6 leptoni piu' i propagatori (e le rispettive anti-particelle)

	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
<b>Quarks</b>			
	$\nu_e$ e- Neutrino	$\nu_\mu$ μ- Neutrino	$\nu_\tau$ τ- Neutrino
<b>Leptons</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau
	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>
	<b>The Generations of Matter</b>		

**Barioni:**



**Mesoni:**



La mutua interazione tra questi mattoni fondamentali e' regolata da "costanti di accoppiamento debole"



# Numero barionico e leptonic

★ Le leggi di conservazione assolute (E, p, L, Q) e parziali (P, C) impongono dei vincoli nelle trasformazioni, ma ci sono altre leggi di conservazione verificate sperimentalmente.

★ A ogni **barione** si associa un **numero barionico** +1 (-1 agli anti-barioni)

★ A ogni **leptone** di una famiglia si associa il **numero leptonic** +1 (-1 per gli anti-leptoni) di quella famiglia

★ In ogni reazione tra particelle, il numeri barionico e leptonic iniziali devono essere uguali a quelli finali.  $\tau^- \rightarrow \mu^- + \nu_\tau$  **Impossibile!**

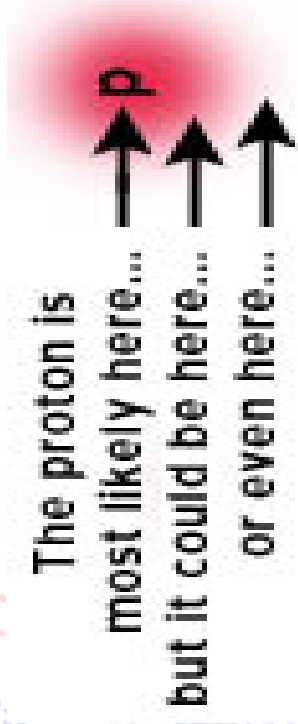
	muon	muon neutrino	electron	electron antineutrino
equation:	$\mu$	$\rightarrow \nu_\mu$	$+ e^-$	$+ \bar{\nu}_e$
electron number:	0	= 0	+ 1	+ -1
muon number:	1	= 1	+ 0	+ 0
tau number:	0	= 0	+ 0	+ 0





# Un po' di meccanica quantistica

- ★ Le reazioni tra particelle non sono predette deterministicamente, ma probabilisticamente: "tutto quello che puo' accadere accadrà".
- ★ La posizione e p, come l'energia e il tempo non possono essere misurate contemporaneamente con precisione assoluta (Principio di indeterminazione di Heisemberg  $\Delta p \Delta x > \hbar/2$ ;  $\Delta E \Delta t > \hbar/2$ )
- ★ Spesso un decadimento mediato da propagatori sembra violare le leggi di conservazione assolute. E' possibile perche' i propagatori sono virtuali, nel senso che vivono talmente poco da non violare il principio di indeterminazione.





# Unificazione delle interazioni

- ★ Il **Modello Standard** unifica l'interazione elettromagnetica con quella debole: Cosa vuol dire?
  - A distanze molto piccole ( $r \sim 10^{-18}$  m) tra le particelle, queste due forze hanno simile intensità'.
  - I propagatori: fotone,  $W$  e  $Z^0$  sono dal punto di vista matematico delle combinazioni lineari di altri stati che **non compaiono nella realtà** .
- ★ In questa teoria le particelle a un primo livello **sono senza massa**. Per ottenerla deve essere introdotta una particella al momento non ancora scoperta: il bosone di Higgs e un meccanismo che si chiama "rottura spontanea di simmetria" .

# Come si 'vedono' le particelle?



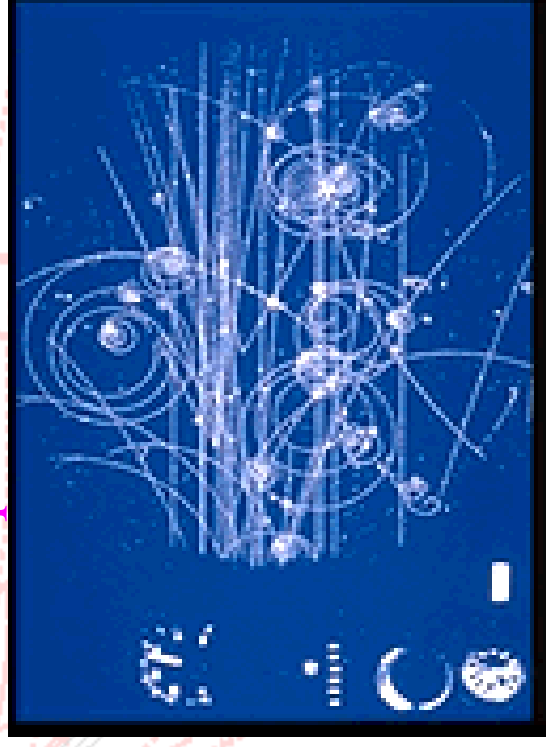
★ Le interazioni fondamentali vengono studiate mediante urti tra particelle cariche stabili, accelerate tramite un campo elettrico negli **acceleratori**.

★ Primo Fattore determinante: **Energia**

- Per studiare la struttura del bersaglio ci vuole una lunghezza d'onda corta ( $\lambda = h/p$ ,  $p =$  **quantità' di moto**)
- Per produrre altre particelle sfruttando l'equivalenza di massa e energia ( $E = mc^2$ )

★ Le particelle da accelerare vengono prodotte da apposite **sorgenti**;

★ I prodotti di decadimento lasciano traccia nei **rivelatori**.





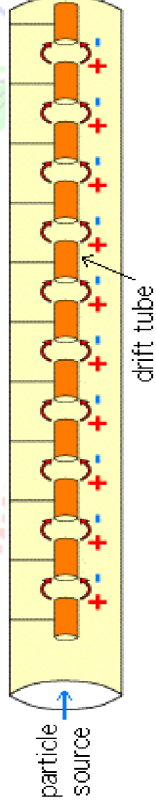
# Gli Acceleratori

- ★ **Elettrostatici:** le particelle vengono accelerate mediante una forza  $F=qE$  con un aumento di energia cinetica  $\Delta E_k=q\Delta V$
- ★ **Oppure:** per limitare  $\Delta V$  si usano campi elettromagnetici variabili all'interno di cavità risonanti.
- ★ **Secondo fattore determinante: Luminosità**
  - Il numero di urti al secondo con produzione di particelle ("**eventi**") dipende dalla probabilità che il fenomeno si manifesti e dalla **luminosità** dell'acceleratore:  
 **$L \sim I^2/Sf$**  (  $I$ =corrente nel fascio,  $S$ =area trasversale,  $f$ =frequenza di rivoluzione, se circolari)

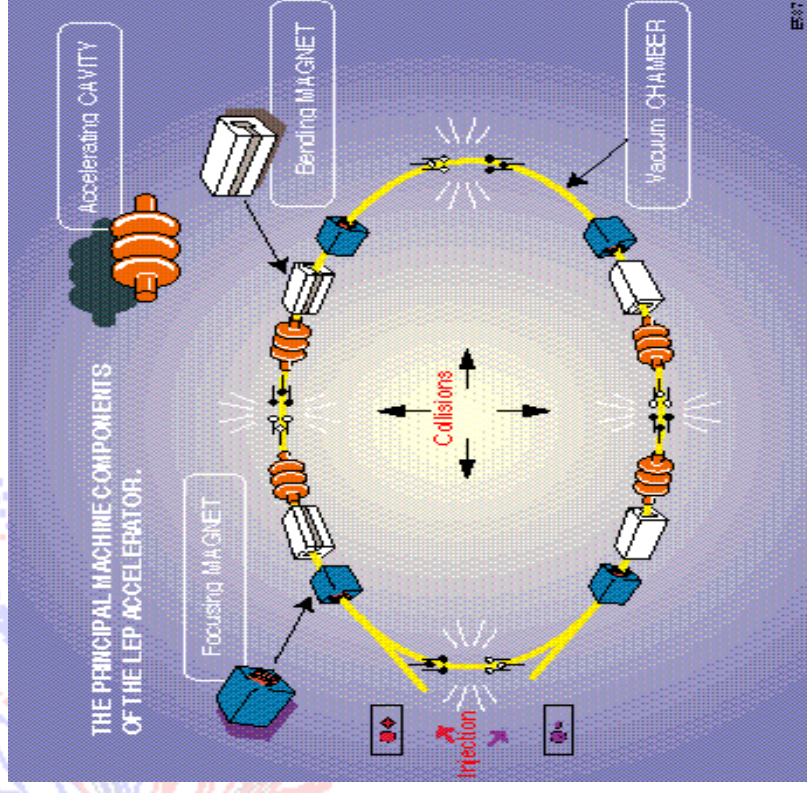
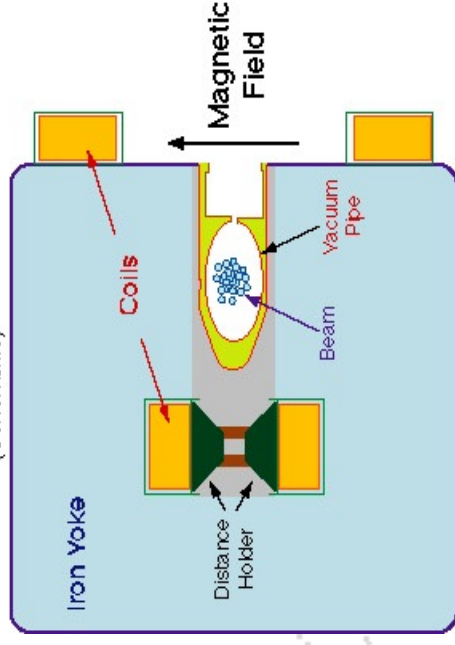
# Lineari o Circolari?



- ★ **Lineari:** l'energia dipende dalla lunghezza
- ★ **Circolari:** energia maggiore facendo passare piu' volte le particelle per lo stesso punto grazie a un campo magnetico (forza di Lorentz):  $P=0.3 B r$



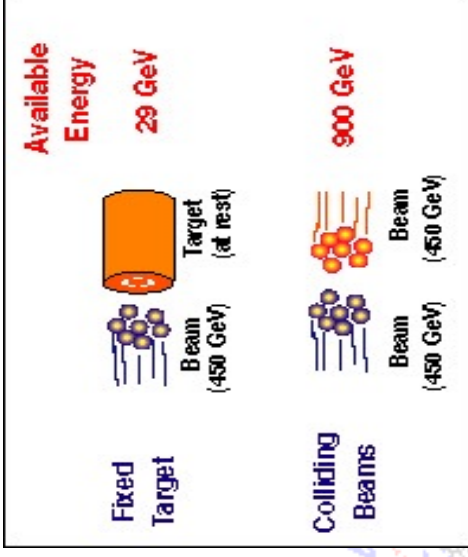
LEP Dipole (Schematic)





# I Colliders

- ★ Facendo urtare una particella accelerata contro una ferma, una parte dell'energia disponibile viene sprecata perché la seconda particella viene "trascinata via".

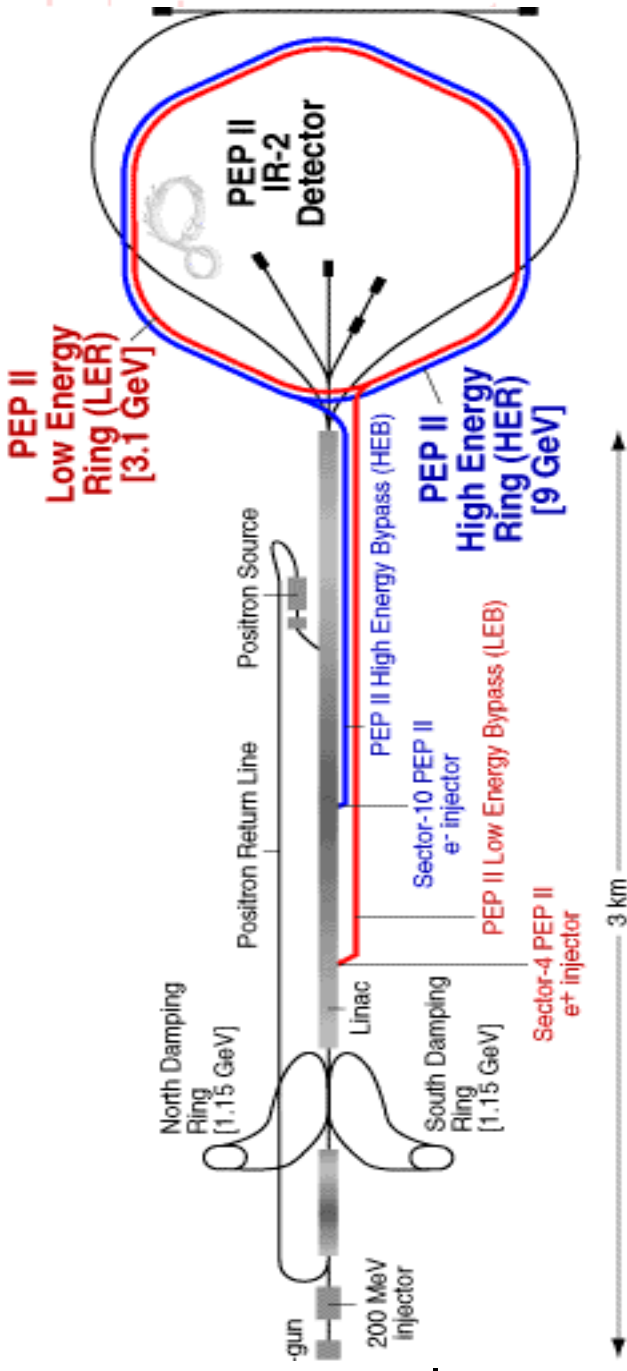


- ★ **IDEA!:** fare collidere testa a testa due fasci di particelle (difficile!!)

Heh-heh. I have a lot of kinetic energy!



energy + energy = lots of energy



Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni

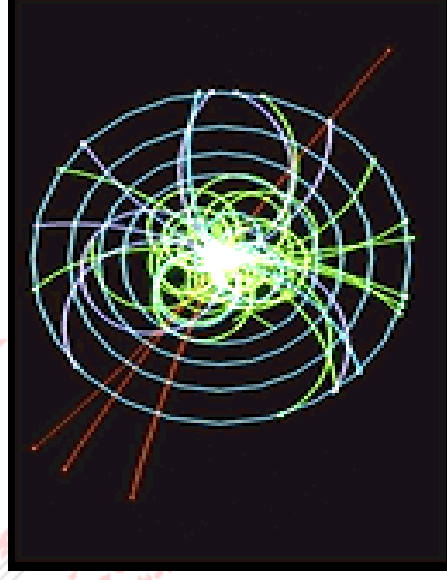
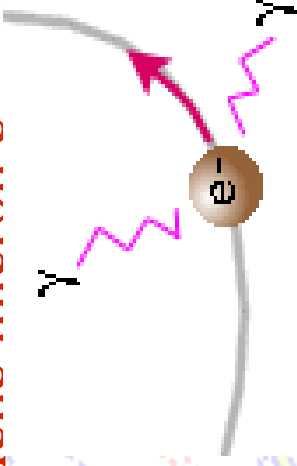


★ I fasci sono suddivisi in pacchetti **"bunches"** lunghi qualche centimetro e di raggio pari a qualche micron e devono incontrarsi lungo orbite di Km!!

★ Parte dell'energia viene persa per radiazione di sincrotrone a ogni giro:  $\Delta E \sim v^3 / m^4 \Rightarrow$  **importante per gli elettroni**

★ Per generare particelle così leggere ci vogliono strumenti tanto grandi e potenti!!

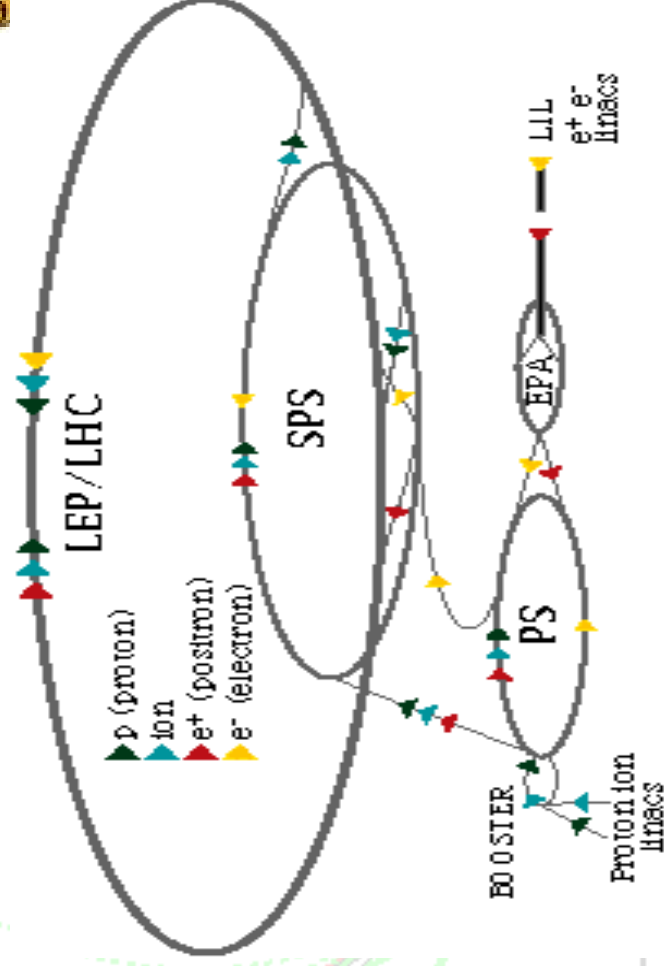
**$m(e) = 0.5 \text{ MeV} = 10^{-27} \text{ g}$ ,  $m(Z^0) = 92 \text{ GeV} = 10^{-19} \text{ g}$**



Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni

# Il complesso del CERN



## Acceleratore Raggio Energia Luminosità

(m) GeV  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Acceleratore	Raggio (m)	Energia (GeV)	Luminosità ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )
LIL	lineare	0.05(p)	
Booster	pochi	1(p)	
PS	100	28(p)	
SPS	950	450(p)	$6 \cdot 10^{30}$
LEP	4300	100(e)	$10^{31}$
LHC(futuro)	4300	7000(p)	$10^{34}$

Feltre, 12 Giugno 2004

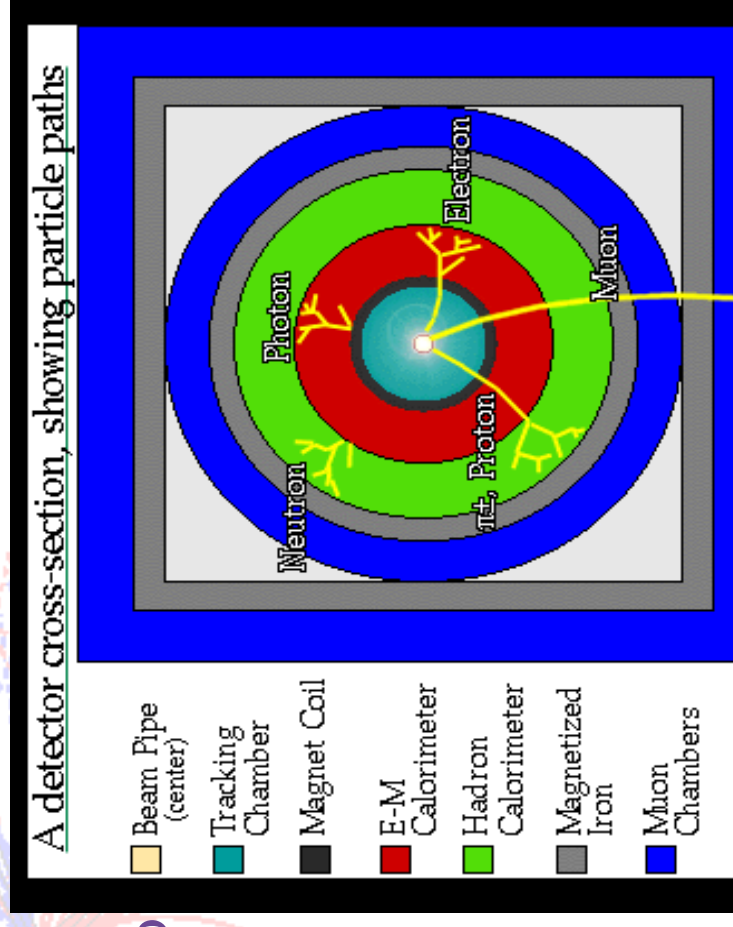
Martino Margoni



# I Rivelatori



- ★ Come si fa a rivelare le particelle prodotte negli urti negli acceleratori se vivono così poco e sono così piccole?
- ★ Si sfrutta la loro interazione con la materia costruendo rivelatori nei quali il loro passaggio lasci una traccia convertita in un segnale (normalmente elettrico) che viene poi letto da un computer e scritto su disco.
- ★ Diverse classi di particelle (cariche, neutre, fotoni) hanno interazioni diverse con la materia, per cui vengono costruiti rivelatori giganti costituiti da diversi sotto-rivelatori adatti alle differenti classi. Le varie informazioni vengono poi combinate.





## ★ **Particelle cariche:**

- Urtano gli elettroni atomici comunicandogli energia e **ionizzando il mezzo**. L'energia rilasciata al loro passaggio viene raccolta dai **rivelatori di tracce cariche**.

## ★ **Particelle neutre (neutroni):**

- Causano reazioni nucleari dovute all'interazione forte che originano **sciame adronici** (cascate di adroni di energia sempre inferiore) rivelati dai **calorimetri adronici**.

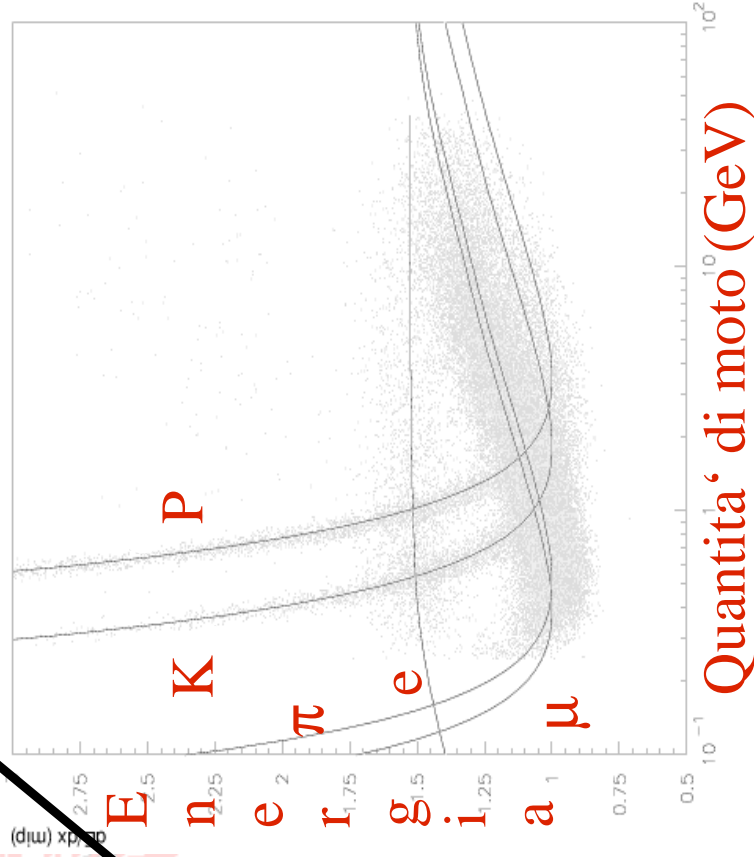
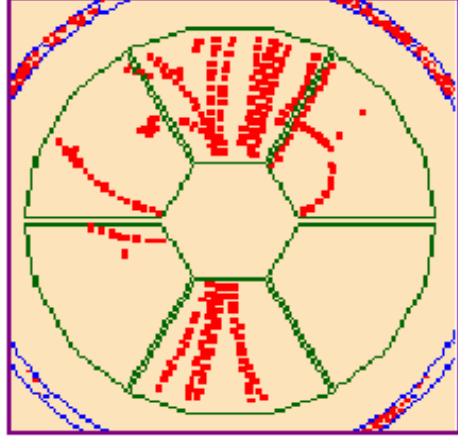
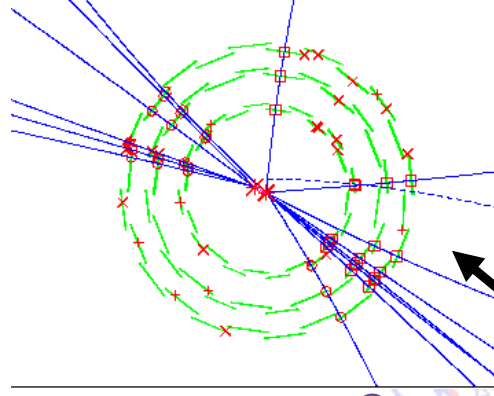
## ★ **Fotoni e elettroni:**

- Sviluppano **sciame elettromagnetici** (cascate di elettroni e fotoni) prodotti dalla creazione di coppie  $e^+$  e  $e^-$  dai fotoni e dall'emissione di fotoni dagli elettroni. Gli sciame vengono rivelati dai **calorimetri elettromagnetici**.

# I rivelatori di tracce cariche



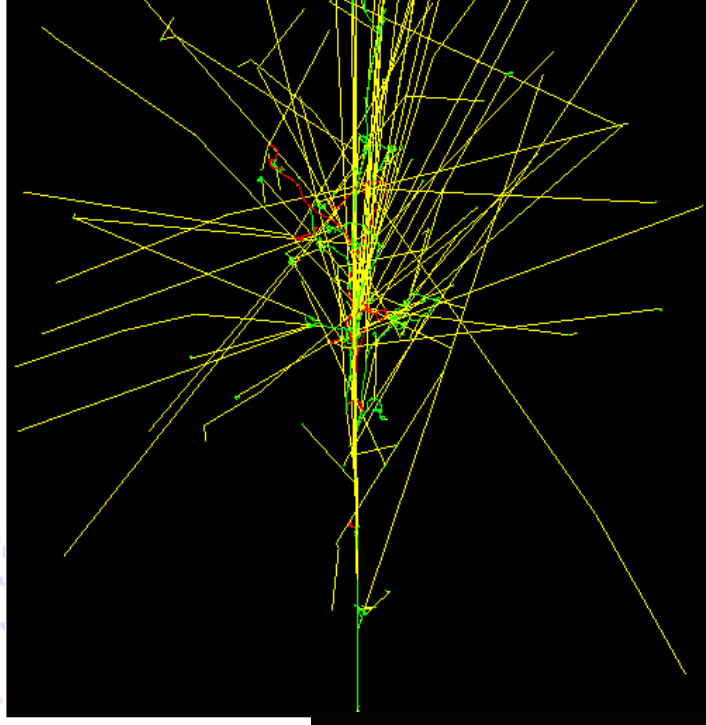
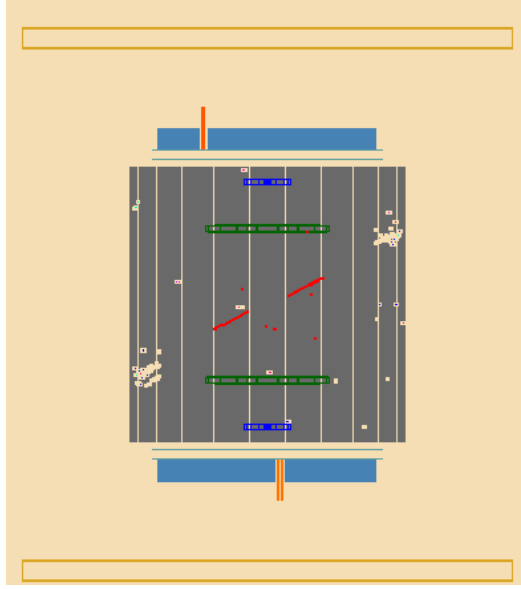
- ★ Sono di solito camere con fili a alta tensione o piani di semiconduttori. Vengono attraversati dalle particelle.
- ★ Sono posti in un campo magnetico per misurare la quantità di moto della particella dalla curvatura della traiettoria (forza di Lorentz)
- ★ Rivelatori di vertice: sono posti vicino alla regione di interazione per misurare con precisione il punto della collisione.
- ★ La misura dell'energia persa per ionizzazione indica la quantità di moto della particella



# I Calorimetri



★ La rivelazione degli sciame elettromagnetici e adronici nei calorimetri consente misure di energia e posizione delle particelle che li hanno prodotti. In questi dispositivi le particelle arrivano a fermarsi cedendo tutta la loro energia.



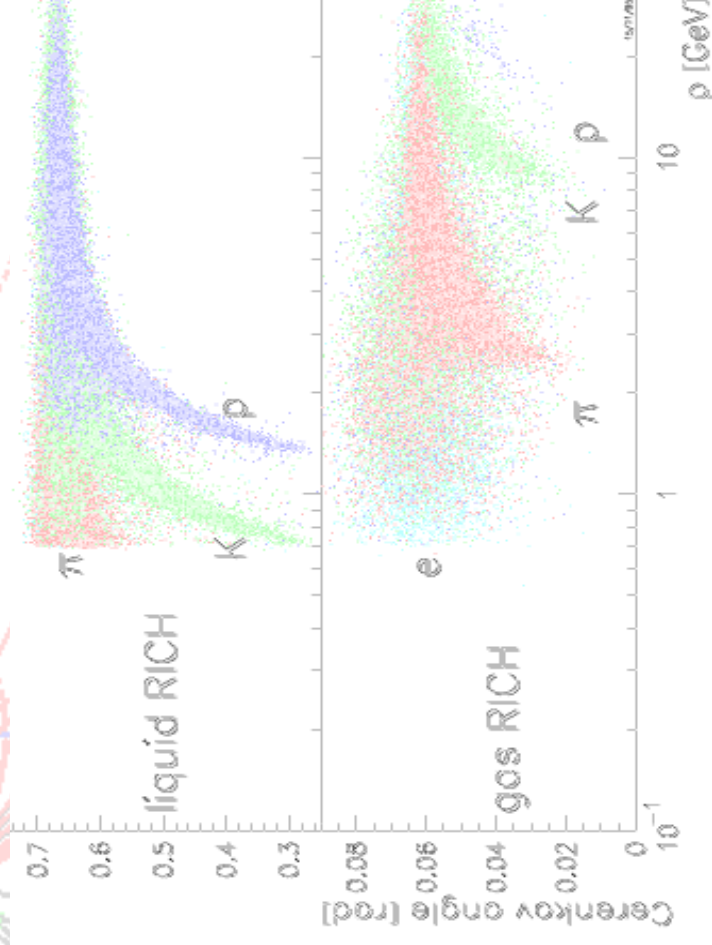
Feltre, 12 Giugno 2004

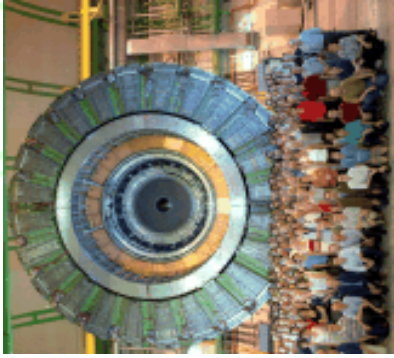
Martino Margoni



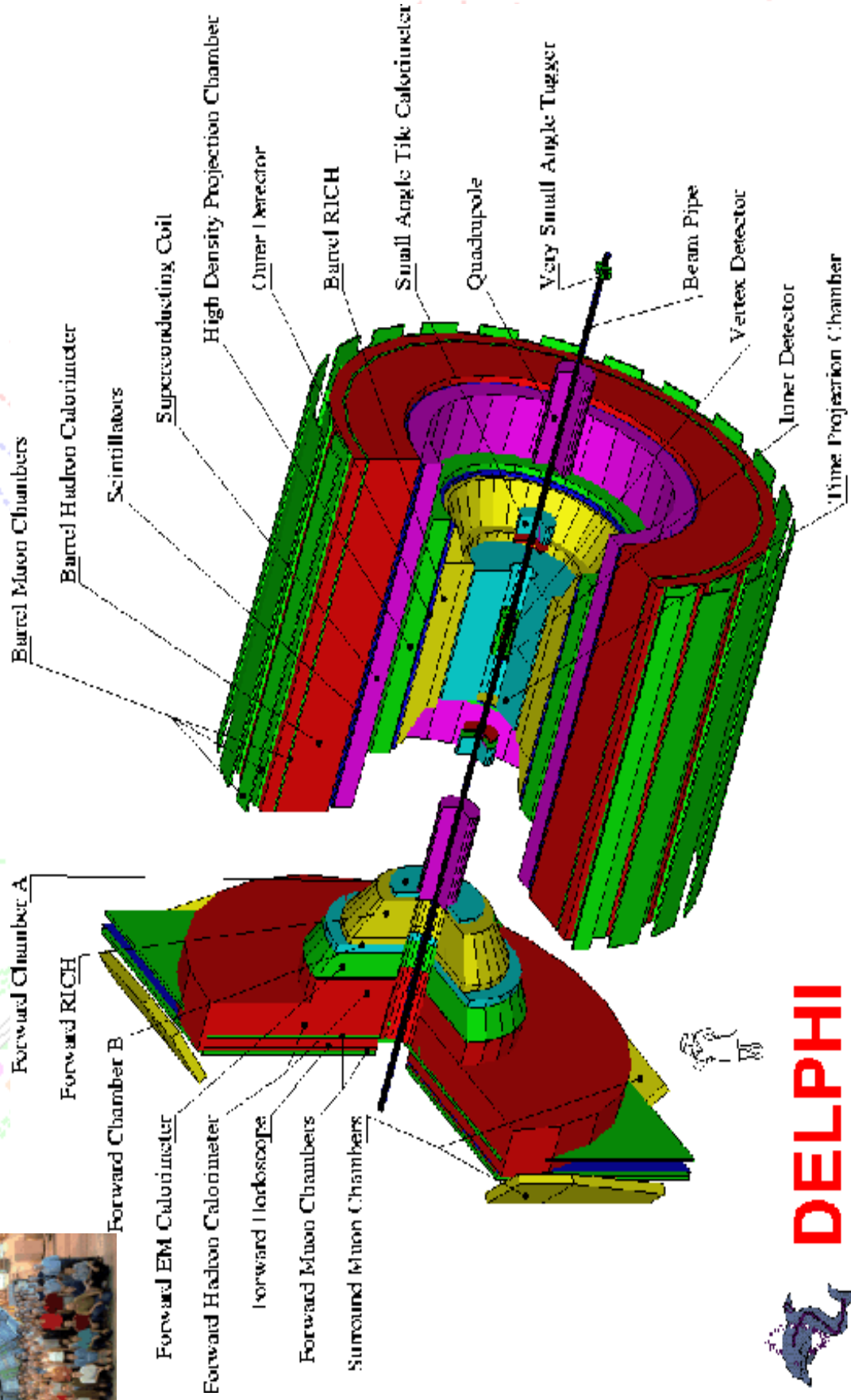
# Misura di velocità: l'effetto Cherenkov

- ★ A causa del passaggio di una particella carica, il mezzo irradia un impulso elettromagnetico a un angolo  $\Theta = \arccos(1/n\beta)$ , ( $\beta=v/c$ ,  $n$ =indice di rifrazione) rispetto alla direzione della particella (analogia con la scia di una nave). Dalla misura dell'angolo, conoscendo la quantità di moto (rivelatori di traccia) **si identifica la particella.**





# Il rivelatore DELPHI al LEP



Feltre, 12 Giugno 2004

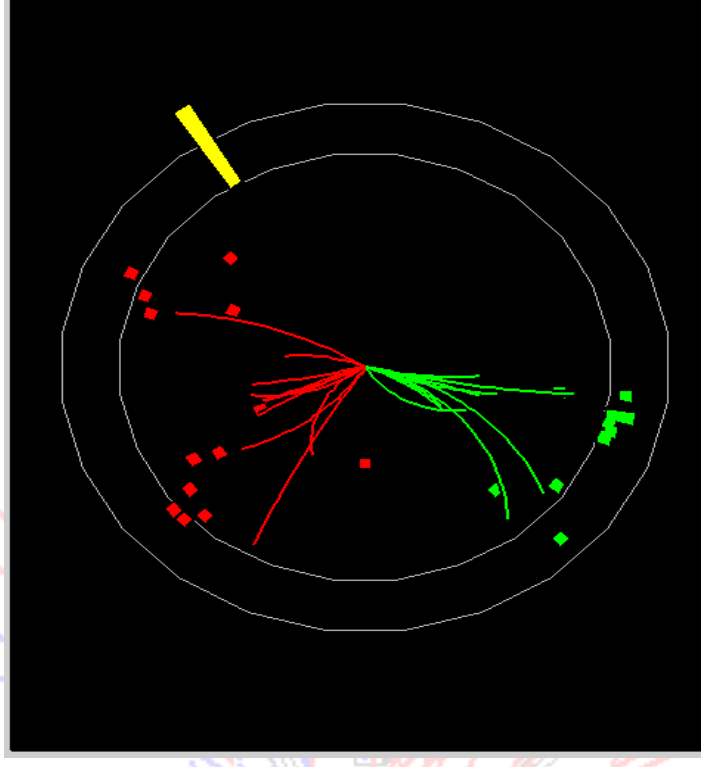
Martino Margoni

# Come si esegue una misura?



## La massa e la vita media della $Z^0$

- ★ Dai dati raccolti sotto forma di segnali elettrici vengono ricostruiti gli "eventi" fisici attraverso appositi programmi.
- ★ Per eseguire una misura di una grandezza, questi eventi devono essere selezionati in modo da prendere in considerazione quelli interessanti al nostro scopo.
- ★ In generale gli eventi selezionati non si "guardano", le loro caratteristiche si analizzano con il computer.

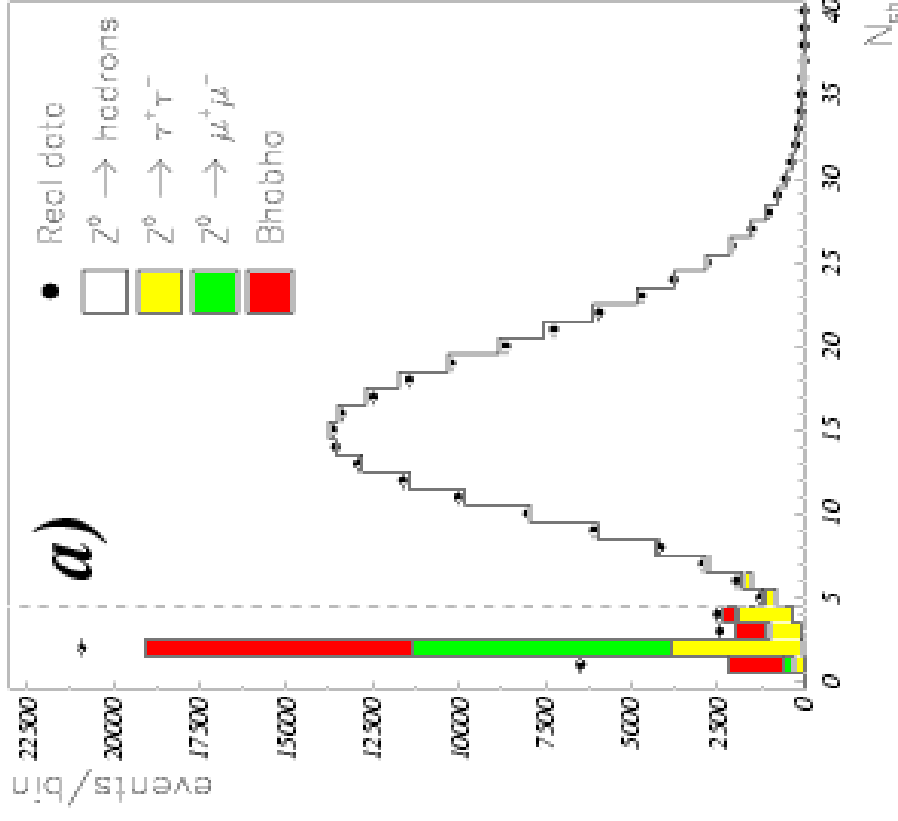


★ Le quantità caratteristiche dei decadimenti interessanti vengono studiate in modo tale da rigettare gli eventi che non soddisfino alcuni requisiti. A tale fine usualmente vengono anche utilizzati programmi di simulazione Monte Carlo.

★ Una volta selezionato un campione, si definiscono due grandezze caratteristiche della selezione:

★ Efficienza =  $N(\text{Evts "buoni" selezionati})/N(\text{Evts "buoni" totali})$

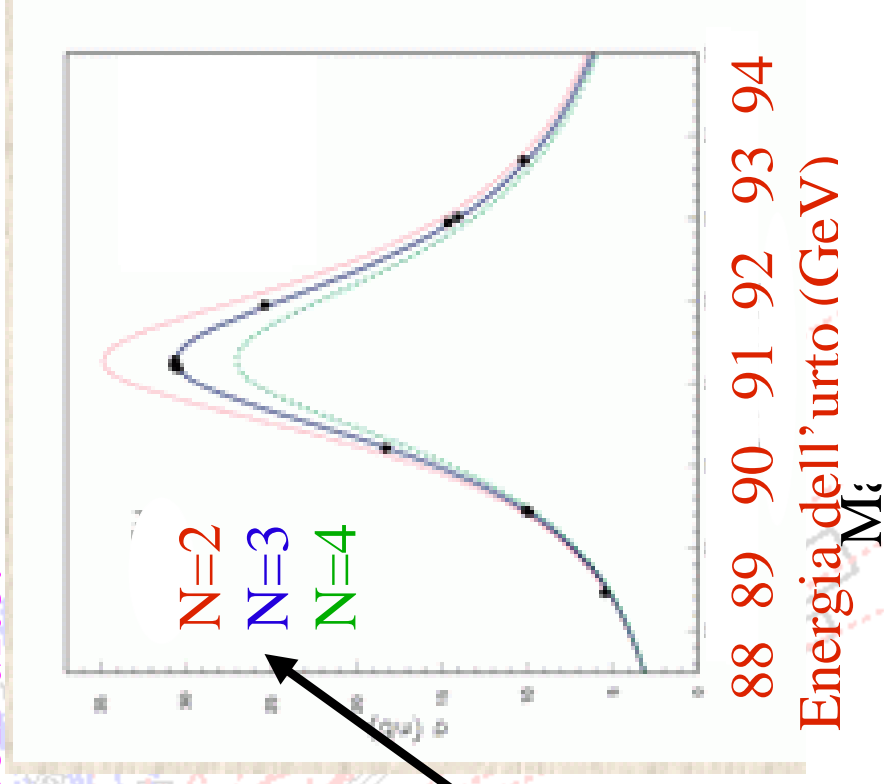
★ Purezza =  $N(\text{Evts "buoni" selezionati})/N(\text{Evts selezionati})$







- ★ Gli eventi selezionati, ma non appartenenti alla tipologia richiesta (background), devono essere sottratti prima della misura della grandezza in questione.
- ★ La massa e la vita media della  $Z^0$  vengono poi ottenute dall'interpolazione della curva che descrive la probabilità di produzione in funzione dell'energia dell'urto:
- ★ La massa dal valore del massimo:  
 **$m = 91.1964 \pm 0.0028 \text{ GeV}$**
- ★ La vita media dalla larghezza:  
 **$\tau = (2.646 \pm 0.004) \times 10^{-25} \text{ s}$**
- ★ L'altezza indica che le famiglie dei neutrini sono tre come previsto.



# La verifica di una teoria: Il Modello Standard e i risultati sperimentali

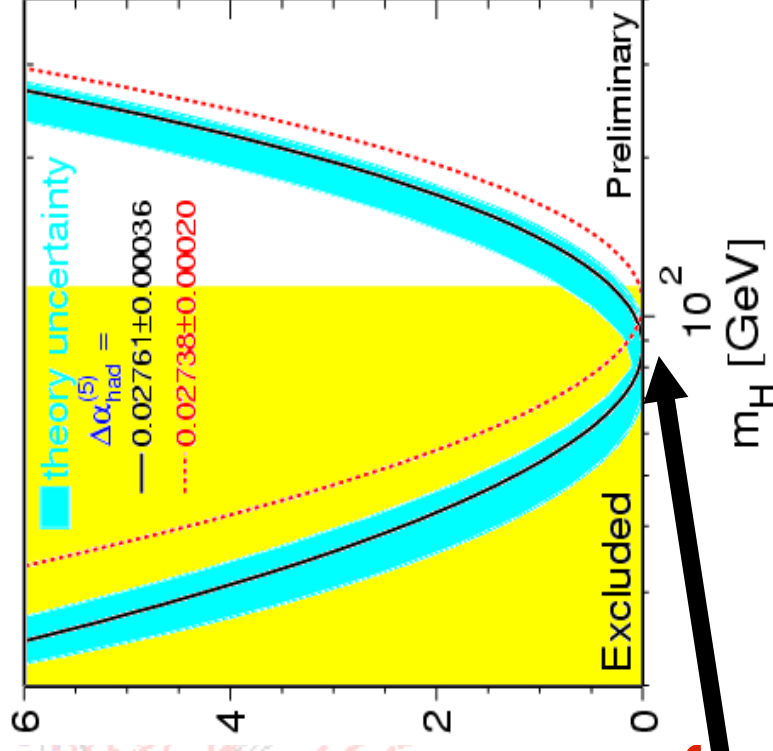


★ Anche se incompleto, il Modello Standard non ha avuto al momento smentite sperimentali, ossia tutte le quantità misurate sono in accordo con le previsioni teoriche.

★ La precisione di queste misure getta luce anche su caratteristiche di particelle che non possono essere prodotte a causa della loro massa troppo elevata, ma che intervengono a livello virtuale nelle interazioni, come il bosone di Higgs (anche il quark top e' stato inizialmente "scoperto" così')

**HIGGS: Massa piu' probabile**

Feltre, 12 Giugno 2004



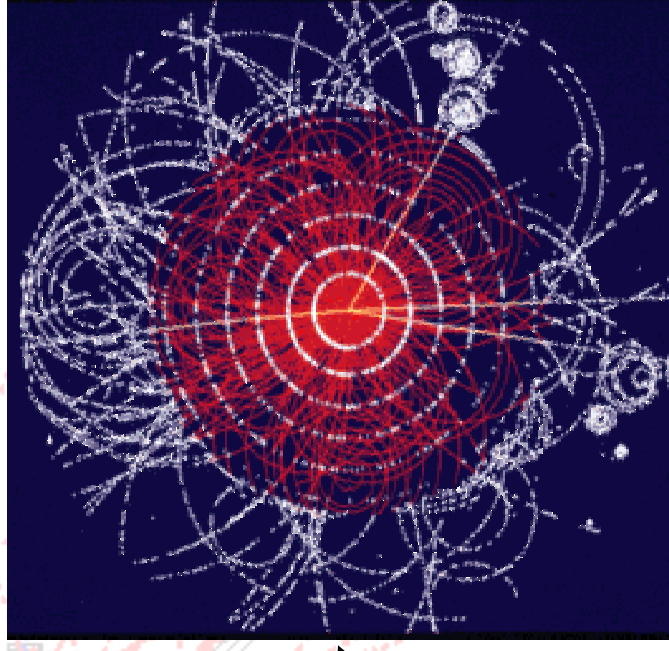
# Il Futuro:

## 1) Higgs e Supersimmetria

★ Solo con la scoperta del bosone di Higgs si capirà se il Modello Standard predice correttamente il meccanismo della nascita della massa o se sarà necessario estendere questa teoria alle cosiddette "particelle supersimmetriche".

★ Questo sarà possibile con gli esperimenti di nuova generazione all'acceleratore LHC del CERN che inizierà a funzionare attorno al 2006.

★ Simulazione di  $H \rightarrow 4\mu$



## 2) L'enigma dei Neutrini: hanno massa? SI'!!

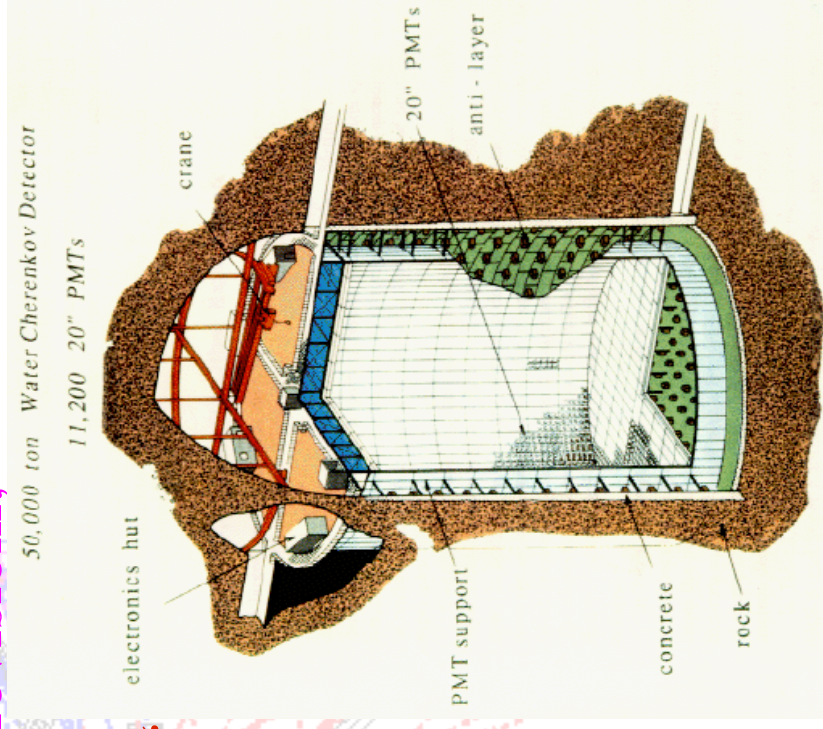
★ Nel Modello Standard NO, pero' :

★ I neutrini elettronici che arrivano sulla terra dalle reazioni solari sono in numero inferiore alle previsioni;

★ Il rapporto tra neutrini atmosferici del muone e dell'elettrone e' la meta' di quello aspettato

- Questi fatti potrebbero essere giustificati dall'oscillazione di un neutrino di una famiglia in quello di un'altra, cosa possibile solo nel caso di neutrini massivi.

➔ Effetto verificato recentemente!



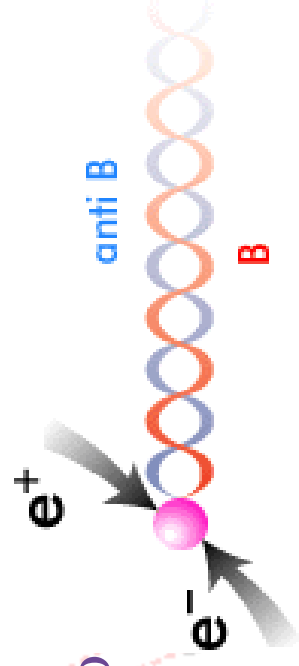
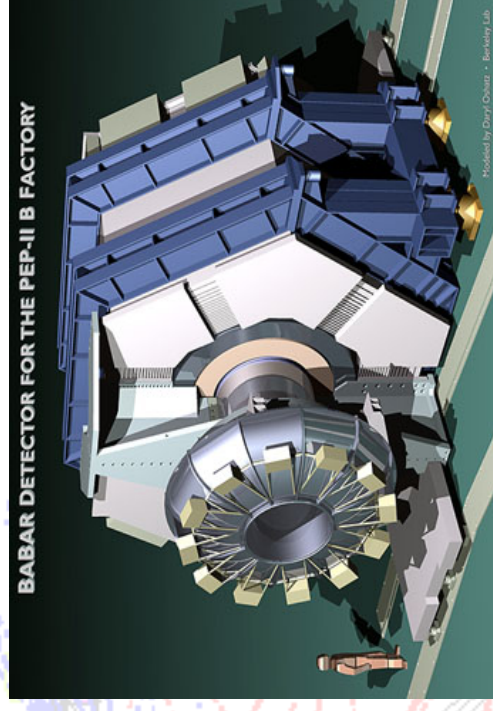
Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni



### 3) La violazione di CP: materia > antimateria!

- ★ Come mai il mondo è fatto di materia e non di antimateria?
- ★ Cio' sembra legato alla piccolissima violazione della simmetria **CP** (coniugazione di carica × parità) nelle interazioni deboli, nota dagli anni '70, ma che viene misurata oggi direttamente con le **Beauty Factories**: acceleratori in grado di produrre centinaia di migliaia di quarks **b** al giorno.



Feltre, 12 Giugno 2004

Martino Margoni



# Conclusioni

- ★ **La fisica delle particelle** e' una avventura affascinante che porta l'uomo alla conoscenza dei **principi che regolano le leggi fisiche del mondo che ci circonda.**
- ★ Anche se non e' motivata dall'applicazione delle scoperte, spesso la fisica di base ha modificato la vita di tutti i giorni dell'uomo (medicina: dalla radiografia, alla radioterapia, alla radiazione di sincrotrone,...)
- ★ Questa ricerca ha una forte ricaduta economica sulle industrie a elevata tecnologia (superconduttori, computer).

