



Laboratori Nazionali di Frascati
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Frascati 7-9-2001

Il Modello Standard

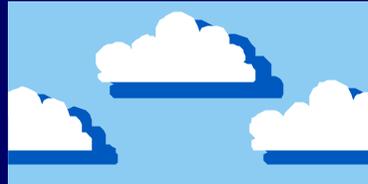
Introduzione alle particelle elementari
ed alle forze fondamentali

Fabrizio Murtas
(fabrizio.murtas@lnf.infn.it)

Programma

- La Materia : le Particelle elementari
- Le forze fondamentali
- Elettrodinamica quantistica QED
- Cromodinamica quantistica QCD
- Teoria elettrodebole
- Simmetrie e rottura spontanea di simmetria
- Violazione di CP
- Unificazione delle forze
- Conclusioni

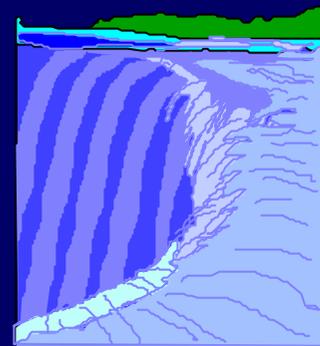
Di cosa è fatto il mondo



Aria



Fuoco



Acqua



Terra

Sin dall'antichità l'umanità ha cercato di capire quali fossero i costituenti *fondamentali dell'universo*

Atomi

Dopo circa 2000 anni (1900 dC), questa era la visione della materia

Periodic Table of the Elements

1	IA	1	H	IIA	2	He	0																													
2	3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																				
3	11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
4	19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	V	24	Cr	25	Mn	26	Fe	27	Co	28	Ni	29	Cu	30	Zn	31	Ga	32	Ge	33	As	34	Se	35	Br	36	Kr
5	37	Rb	38	Sr	39	Y	40	Zr	41	Nb	42	Mo	43	Tc	44	Ru	45	Rh	46	Pd	47	Ag	48	Cd	49	In	50	Sn	51	Sb	52	Te	53	I	54	Xe
6	55	Cs	56	Ba	57	*La	72	Hf	73	Ta	74	W	75	Re	76	Os	77	Ir	78	Pt	79	Au	80	Hg	81	Tl	82	Pb	83	Bi	84	Po	85	At	86	Rn
7	87	Fr	88	Ra	+Ac	104	Rf	105	106	107	108	109	110	111	112																					

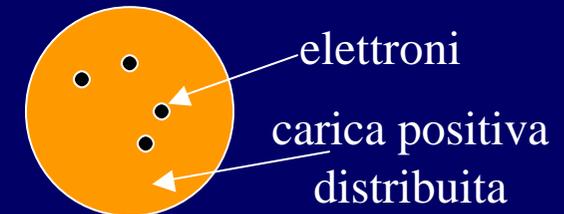
Naming conventions of new elements

* 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

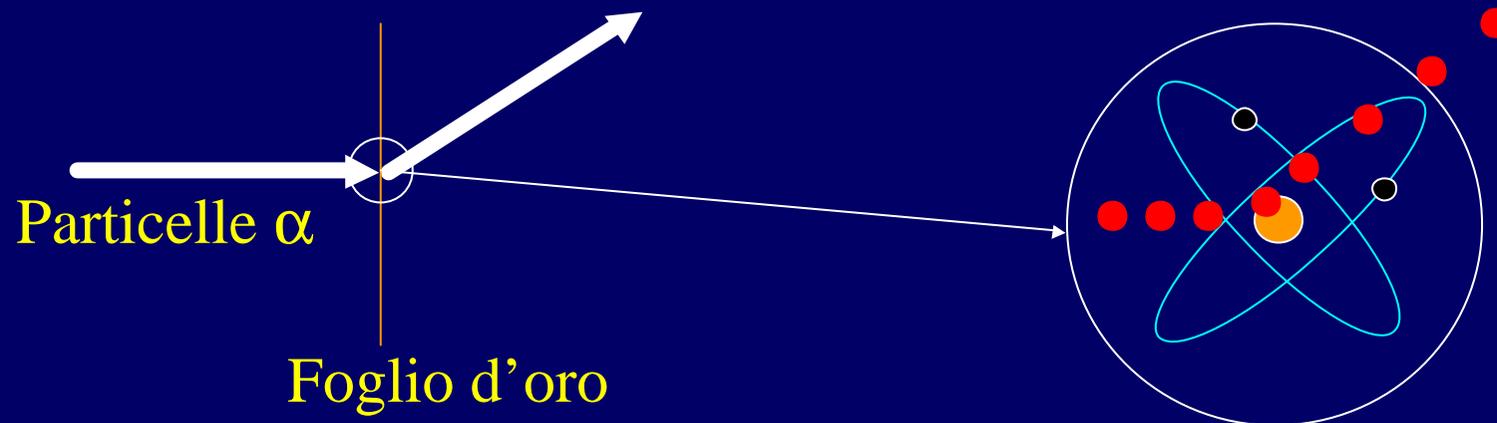
L'organizzazione di tutti i tipi di atomi in una **Tabella Periodica** è di fatto il suggerimento che esiste una struttura più semplice che ne governa la regolarità.

Struttura dell'atomo

- Nel 1897 Thompson scopre l'elettrone
- Se l'elettrone è carico negativamente questo implica
 - L'atomo *non* è elementare,
 - Ci deve anche essere una carica positiva.



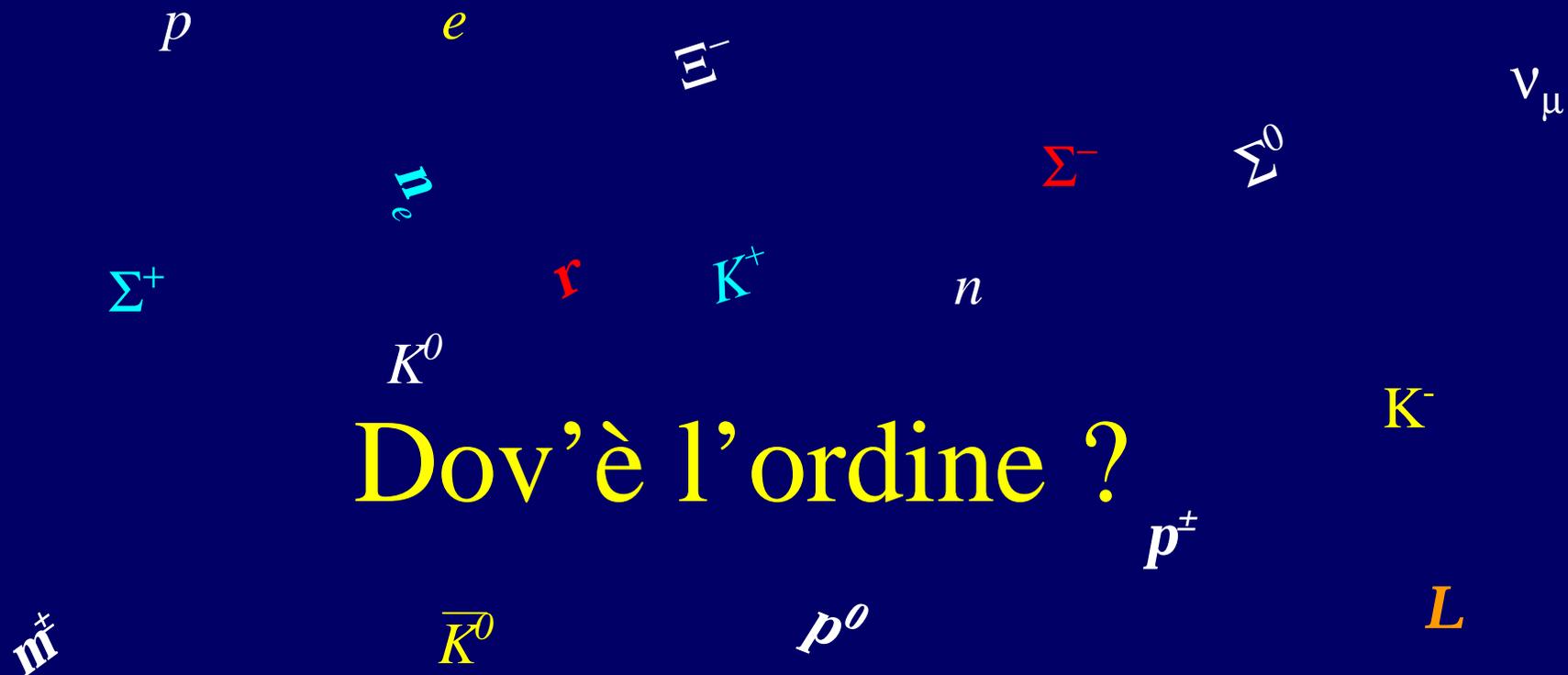
Rutherford: il primo fisico delle alte energie



- Viene scoperto il nucleo dell'atomo !
- La materia e' composta di **protoni neutroni ed elettroni**

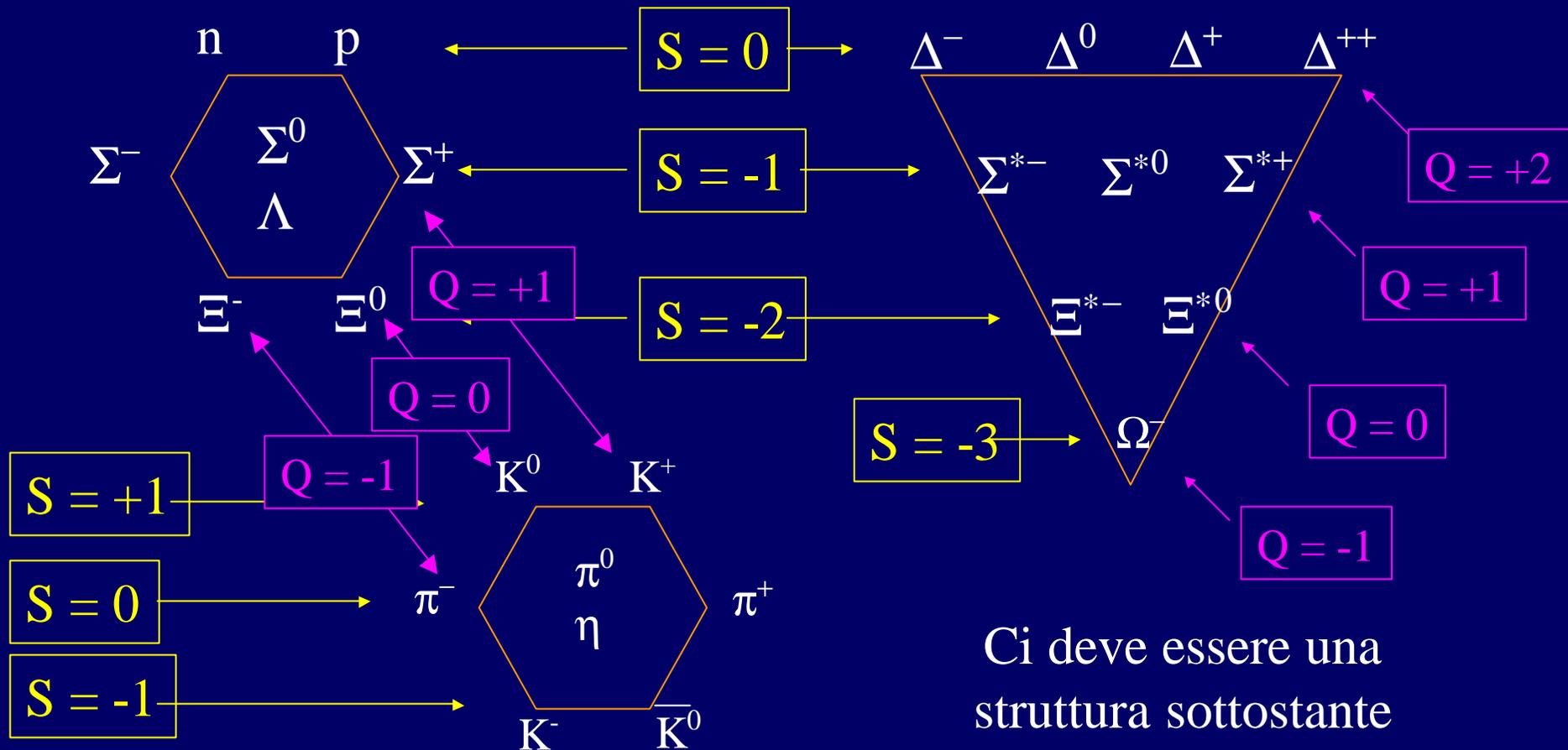
Solo 3 particelle elementari ?

Grazie a nuovi acceleratori ed a rivelatori di particelle come la Camera a bolle, il numero di particelle elementari alla fine degli anni '50 era notevolmente aumentato



Nuova regolarità

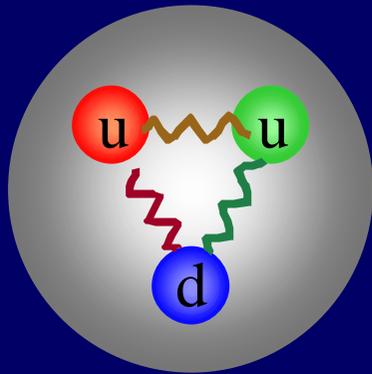
- Nel 1961 Gell-Mann & Ne'eman fecero per le particelle “fondamentali” ciò che Mendeleev aveva fatto 100 anni prima per gli atomi “fondamentali”.



Ci deve essere una struttura sottostante

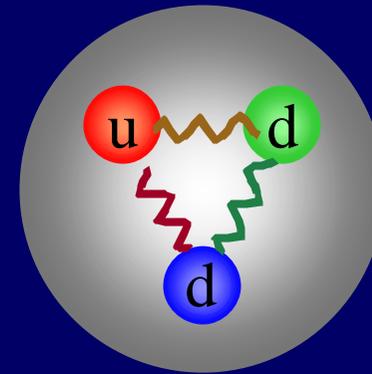
I Quarks

I quarks hanno carica frazionaria !



Quark up $Q = +2/3$

Quark down $Q = -1/3$



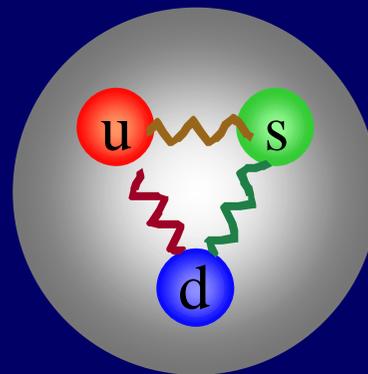
Protone $Q = +2/3 + 2/3 - 1/3 = 1$

Neutrone $Q = +2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Particella "strana" Λ

$Q = +2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

$S = -1$



Storia del Modello Standard

Il Modello Standard fù formulato nel 1968 circa da **Glashow, Weinberg e Salam**

Unificazione delle interazioni deboli ed elettromagnetiche in una sola teoria

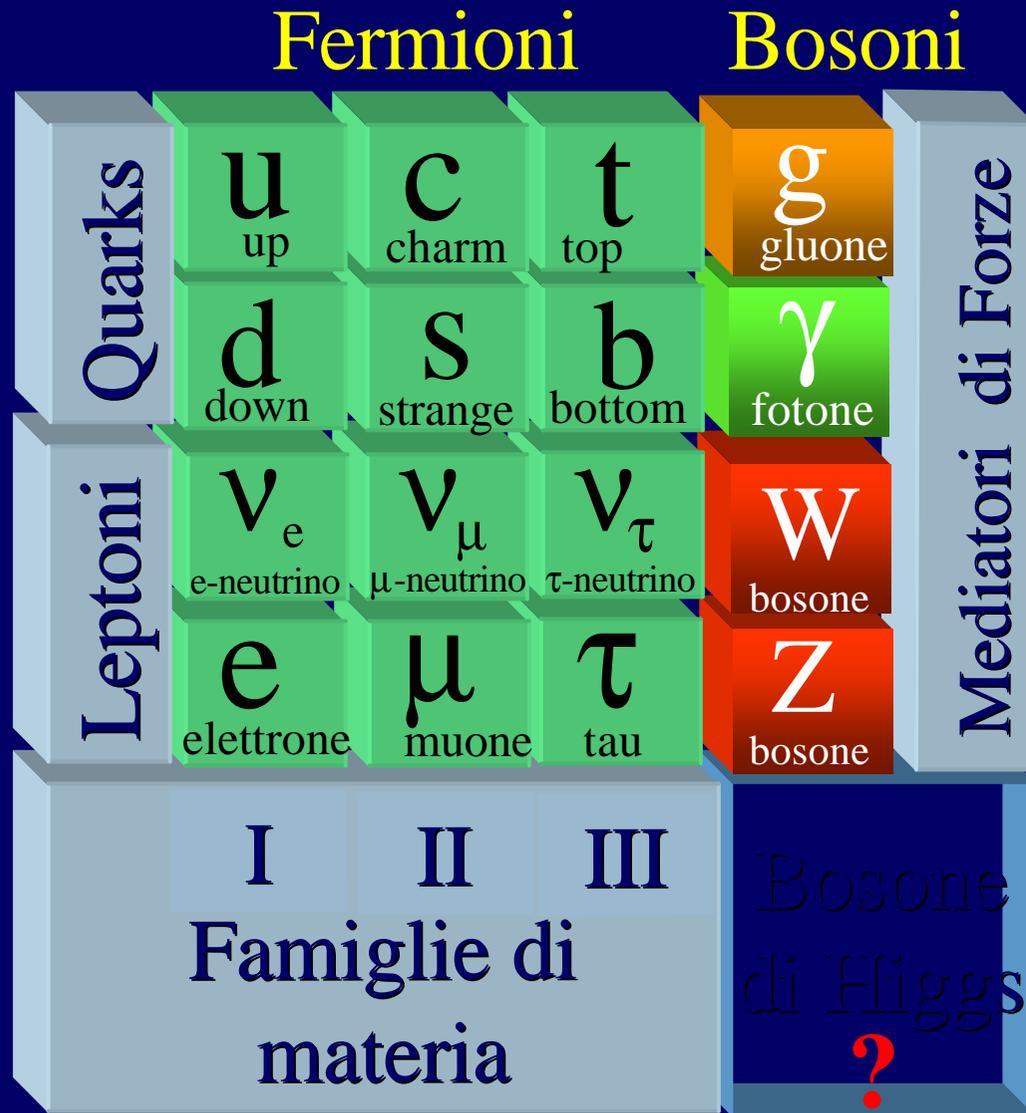
La teoria ha introdotto **un bosone** massivo neutro, lo Z^0 , e le correnti deboli neutre scoperte successivamente nel 1973

La teoria aveva fatto anche la predizione del rapporto tra le masse dei due bosoni deboli W^\pm e Z^0 . La scoperta diretta di entrambi i bosoni nel 1983 fatta da **Rubbia** e collaboratori al Cern di Ginevra ha mostrato che le predizioni erano corrette.

Tutte le misure effettuate fino ad oggi da numerosi esperimenti in tutto il mondo, sono consistenti con le predizioni di questo modello

Esistono comunque alcune cose non ancora spiegate ...

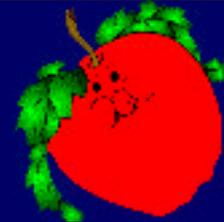
Il Modello Standard



Gravit 



il fantasma
dell'opera

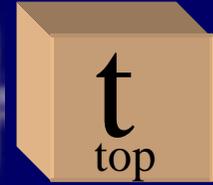
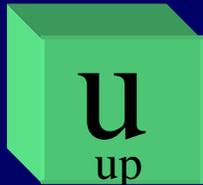


I Fermioni : le masse

Q
U
A
R
K
S

L
E
P
T
O
N
I

0.003

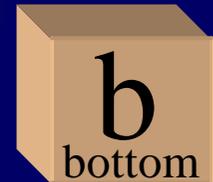


1 GeV \approx protone

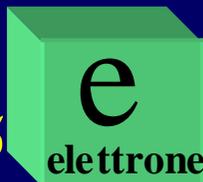
0.006



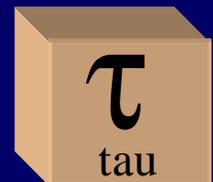
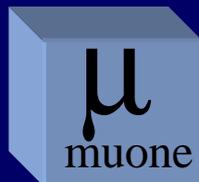
0.12



0.0005



0.105



≈ 0



≈ 0



≈ 0



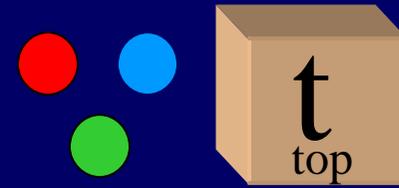
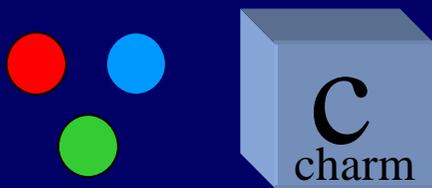
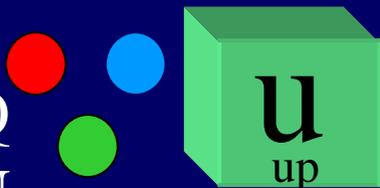
I Fermioni : la carica elettromagnetica

Q U A R K S	$+ 2/3$		$+ 2/3$		$+ 2/3$	
	$1 = \text{carica dell'elettrone (o protone)}$					
L E P T O N I	$- 1/3$		$- 1/3$		$- 1/3$	
	$- 1$		$- 1$		$- 1$	
	0		0		0	

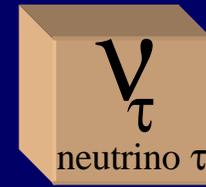
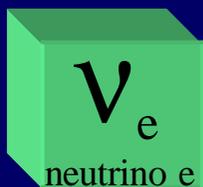
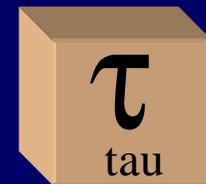
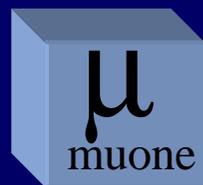
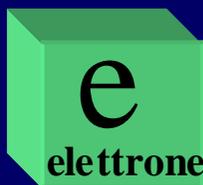
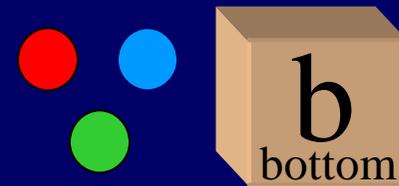
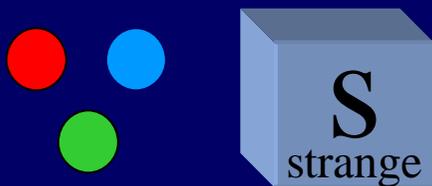
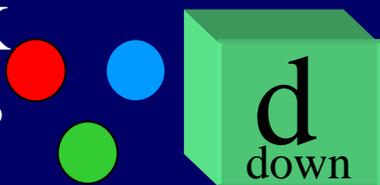
I Fermioni : la carica di colore

Q
U
A
R
K
S

L
E
P
T
O
N
I

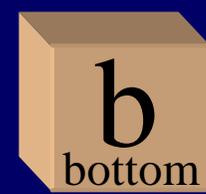
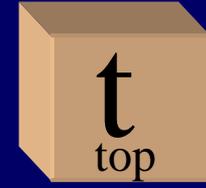
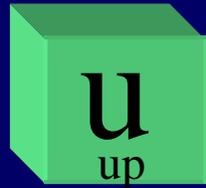


Solo i quark hanno carica di colore !



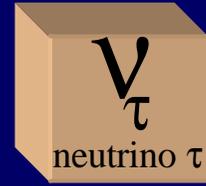
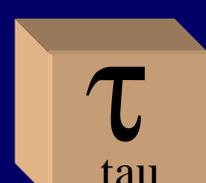
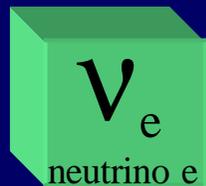
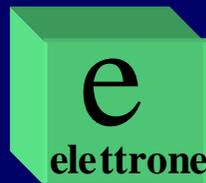
I Fermioni : la carica debole

Q
U
A
R
K
S



E' proprio il "sapore" dei fermioni (solo per le componenti levogire)

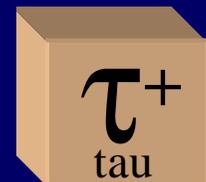
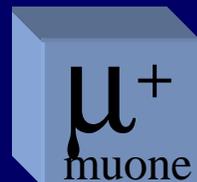
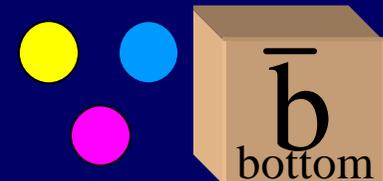
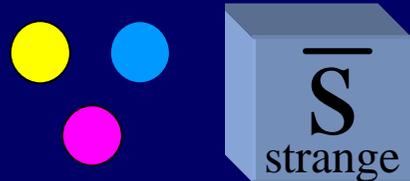
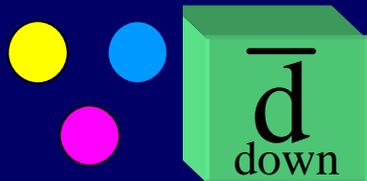
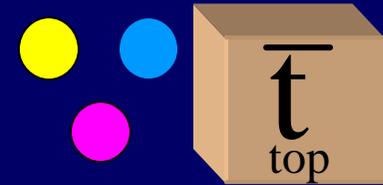
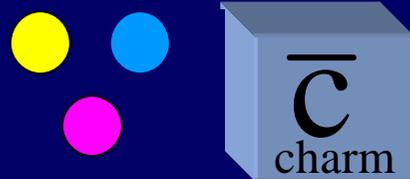
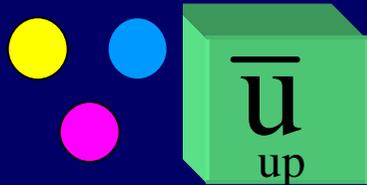
L
E
P
T
O
N
I



Anti-materia : tutte le cariche opposte !

Q
U
A
R
K
S

L
E
P
T
O
N
I



Le forze fondamentali

Forza	Intensità relativa	
Gravitazionale	1	Vi tiene seduti sulle sedie
Debole	10^{29}	Decadimenti: $n \rightarrow p e^- \nu$
Elettromagnetica	10^{40}	Tiene insieme elettroni e protoni
Forte	10^{43}	Tiene insieme i nuclei

Per ciascuna di queste forze è stata creata una *teoria dei campi quantistica* che ne descrive il comportamento (ma non abbiamo ancora una teoria funzionante per la forza più conosciuta, **la gravità**).

Ciascuna **forza**, e quindi un **campo**, ha una particella associata ad esso, un *bosone di gauge*, che permette alla forza di agire a distanza.

Ad esempio per la forza elettromagnetica la teoria è l'elettrodinamica quantistica **QED** e il bosone di gauge è il **fotone**.

I Bosoni di gauge

Sono particelle che interagiscono con le particelle di materia: **fermioni**.

Sono anche dette **mediatori** delle interazioni tra particelle,

e ne cambiano le loro proprietà :

Forza Elettromagnetica : **Fotoni**

Interagiscono con la carica elettrica delle particelle

Forza Debole : **W^\pm Z^0**

Interagiscono con il “sapore” delle particelle

Forza Forte : **gluoni**

Interagiscono con il “colore” delle particelle

hanno Spin 1

La Grande Teoria Unificata (GUT) unifica le prime 3 Interazioni in una singola simmetria, ma lascia fuori la gravità

Forza Gravitazionale : **gravitone**

Interagiscono con la massa delle particelle

ha Spin 2

I Bosoni: le masse



0



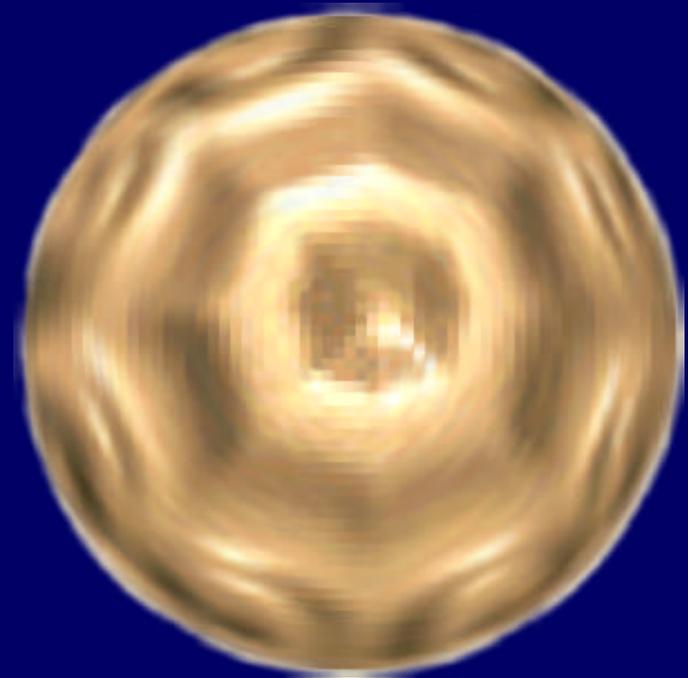
0



80.4 GeV



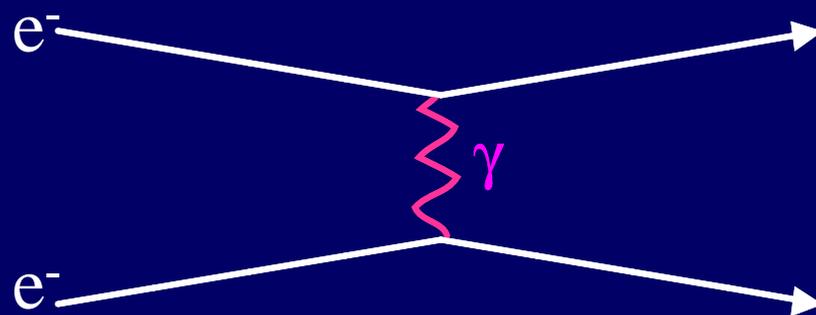
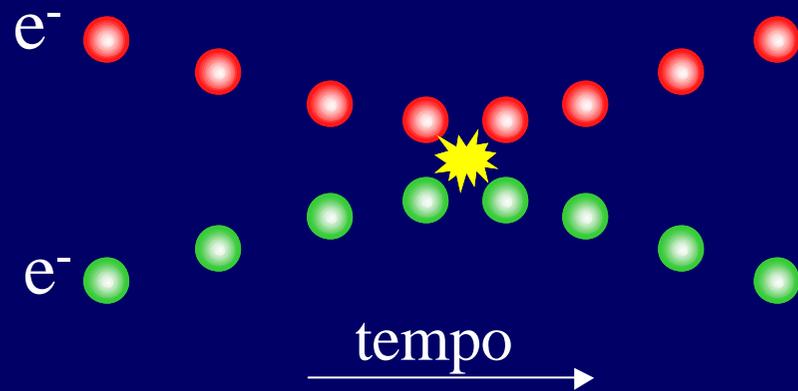
91.2 GeV



1 GeV \approx protone

Materia e campi di Forza

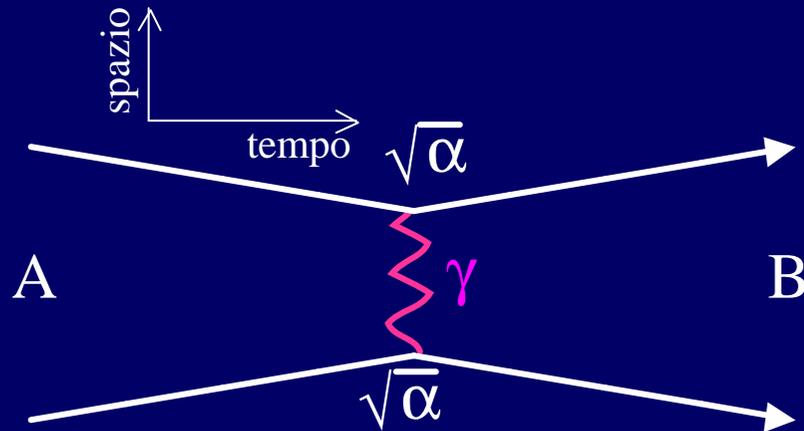
Vediamo ora come interagiscono **le particelle di materia (o antimateria)**



Questi diagrammi non sono soltanto rappresentazioni grafiche ma autentiche formule matematiche che ci permettono di calcolare l'intensità dell'interazione.

Gli elettroni si scambiano un bosone: il fotone (il mediatore di forza).

Diagrammi di Feynmann



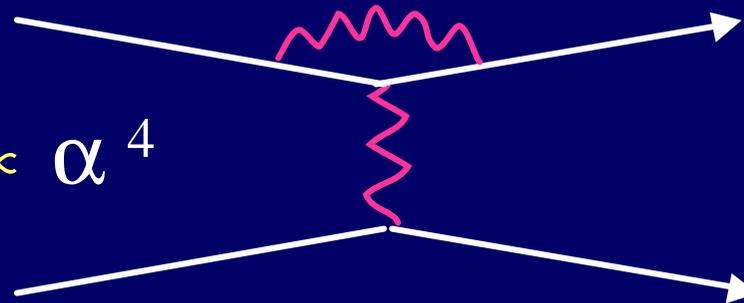
Questo diagramma definisce l'ampiezza di probabilità che due particelle passino da uno stato A ad uno stato B.

Ogni vertice ha una costante di accoppiamento che definisce l'intensità dell'interazione fermione – bosone mediatore.

Per definire la probabilità che il sistema passi dallo stato A allo stato B devo sommare le ampiezze di tutti i contributi possibili e quindi farne il quadrato

$$\text{Probabilità} \propto \alpha^4$$

($\alpha = 1/137$)



Successo della QED

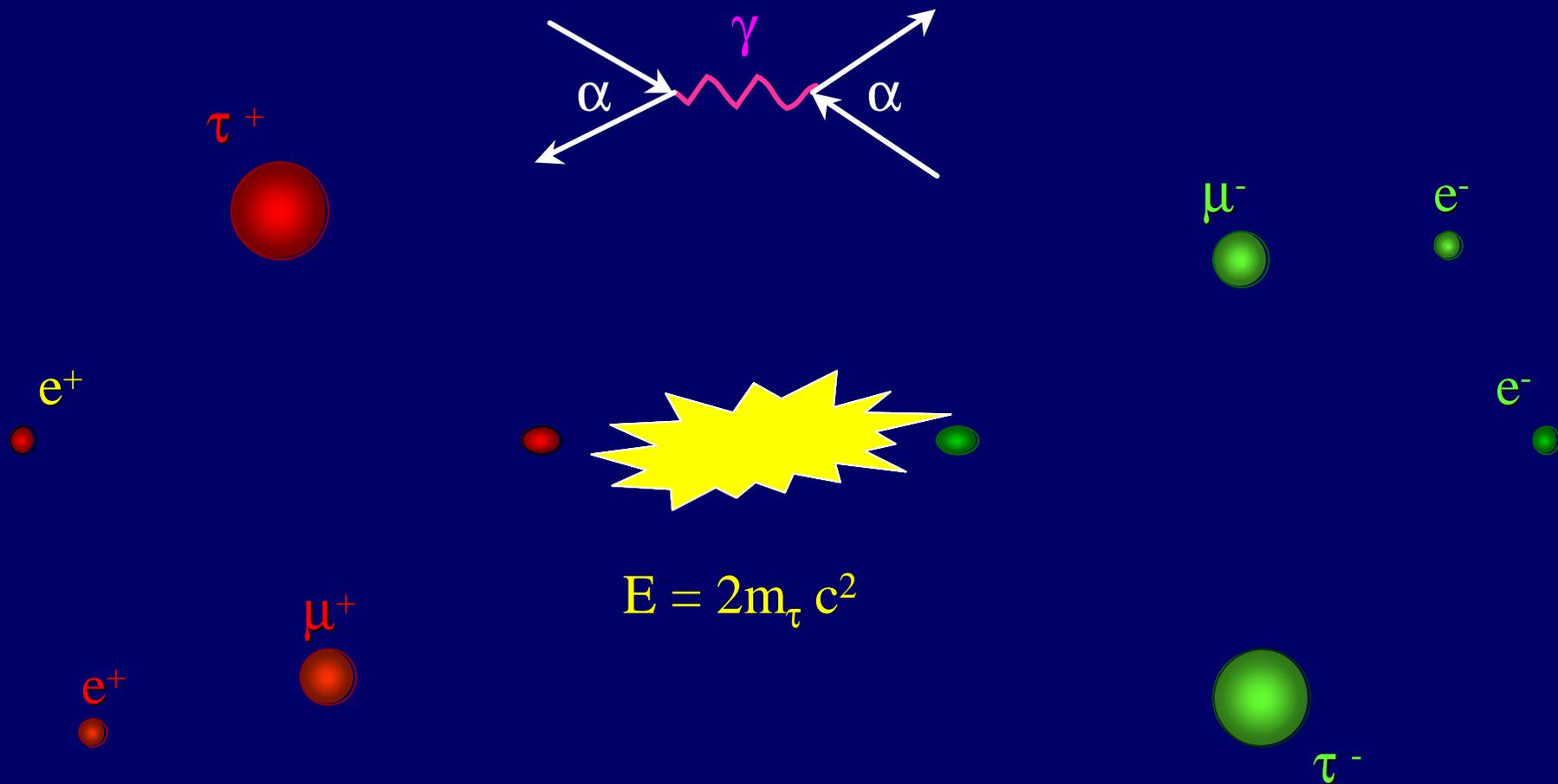
Misura del momento magnetico del muone

Standard Model Value for a_μ [1]

$$\begin{aligned}a_\mu(QED) &= 116584706(3) \times 10^{-11} \\a_\mu(HAD; 1) &= 6924(62) \times 10^{-11} \text{ (DH98)} \\a_\mu(HAD; > 1) &= -100(6) \times 10^{-11} \text{ (Except LL)} \\a_\mu(HAD; LL) &= -85(25) \times 10^{-11} \\a_\mu(EW) &= 151(4) \times 10^{-11} \\TOTAL &= 116591596(67) \times 10^{-11} \\ \\ \text{BNL E821-A results: } a_\mu &= (1165920.2 \pm 1.4 \pm 0.6)10^{-9} \\ \text{Theoretical value: } a_\mu^{th} &= (1165915.96 \pm .67)10^{-9} \\ \text{Deviation: } a_\mu(Exp) - a_\mu(Theory) &= (430 \pm 160)10^{-11}\end{aligned}$$

Se si misurasse con la stessa precisione la distanza Roma-Firenze si avrebbe un risultato approssimato a meno dello spessore di un capello !!

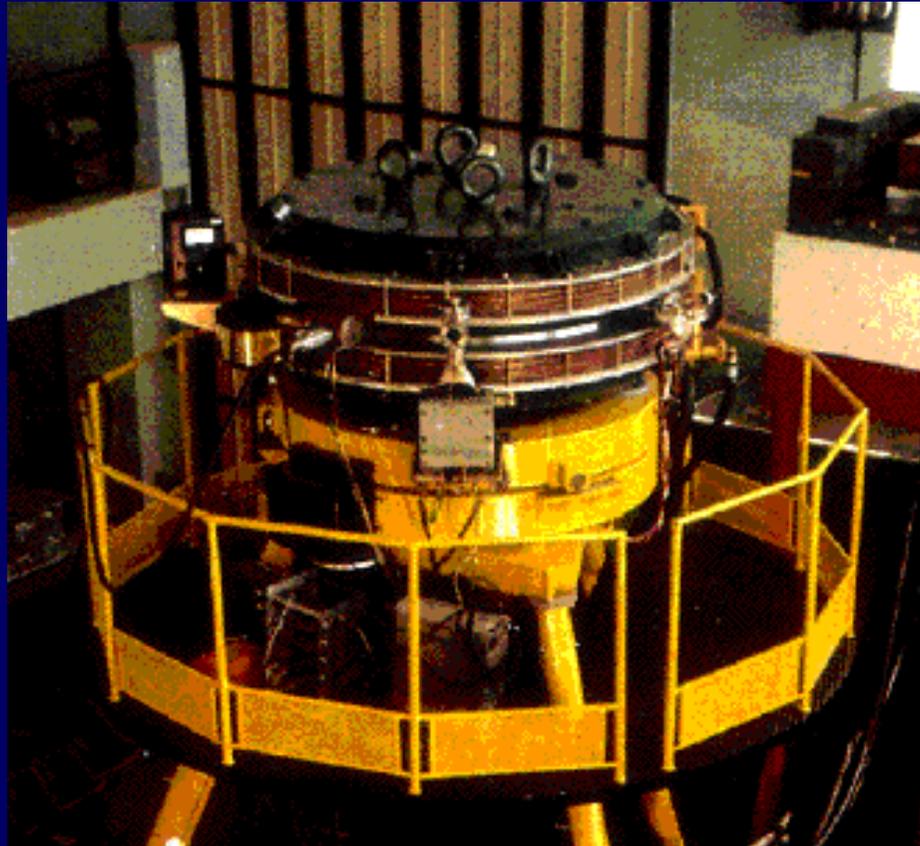
Materia e Antimateria



Con questo tipo di tecnologia sviluppata a Frascati nel 1961 da B.Touscheck si raggiungono energie di collisione elevate e si ha la possibilità di studiare le proprietà di materia e antimateria.

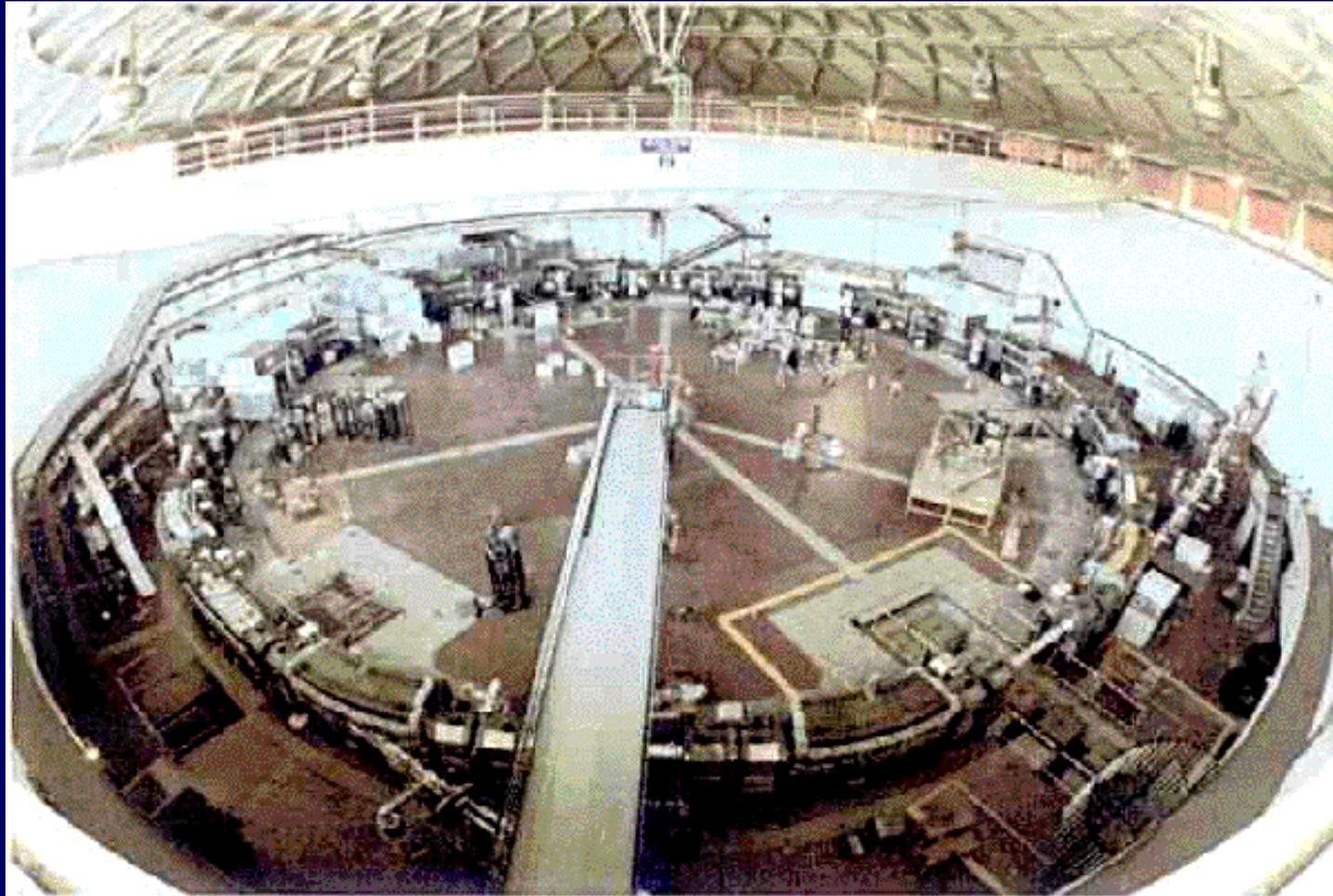
I collisori materia-antimateria

ADA a Frascati 1959



I collisori materia-antimateria

ADONE a Frascati nel 1969



I collisori materia-antimateria

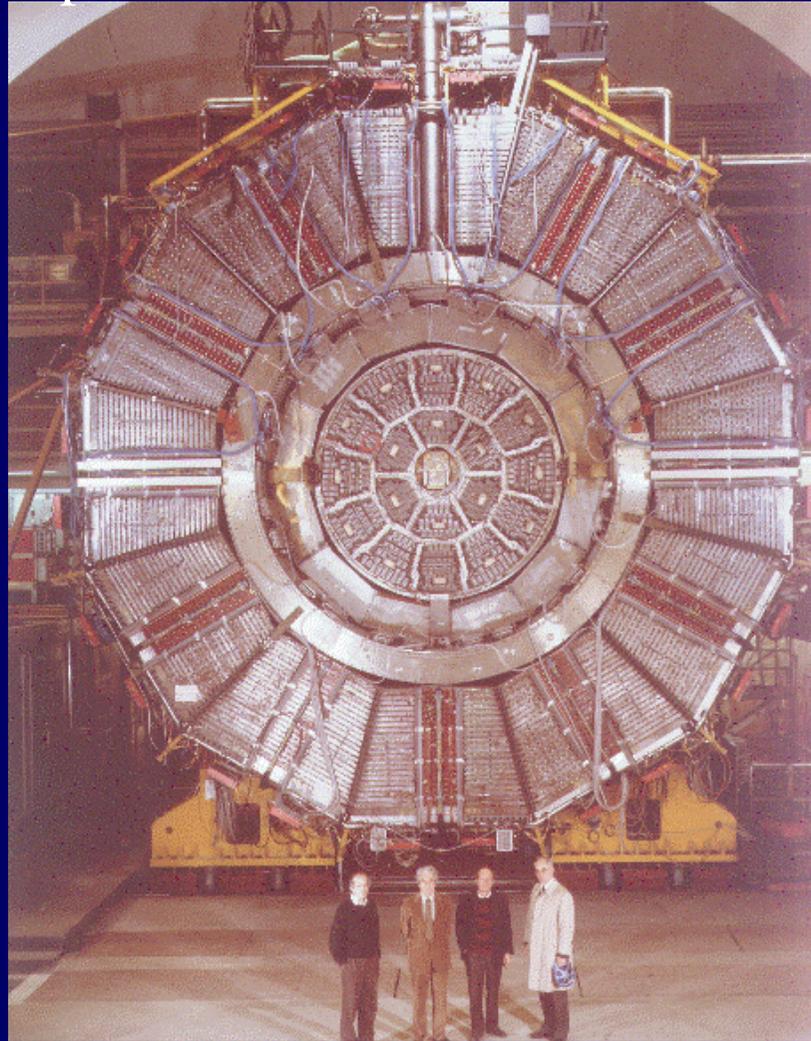
LEP al Cern di Ginevra 1988



LHC al Cern di Ginevra > 2006

Creazione di Leptoni al Lep

Esperimento ALEPH 1988-2001

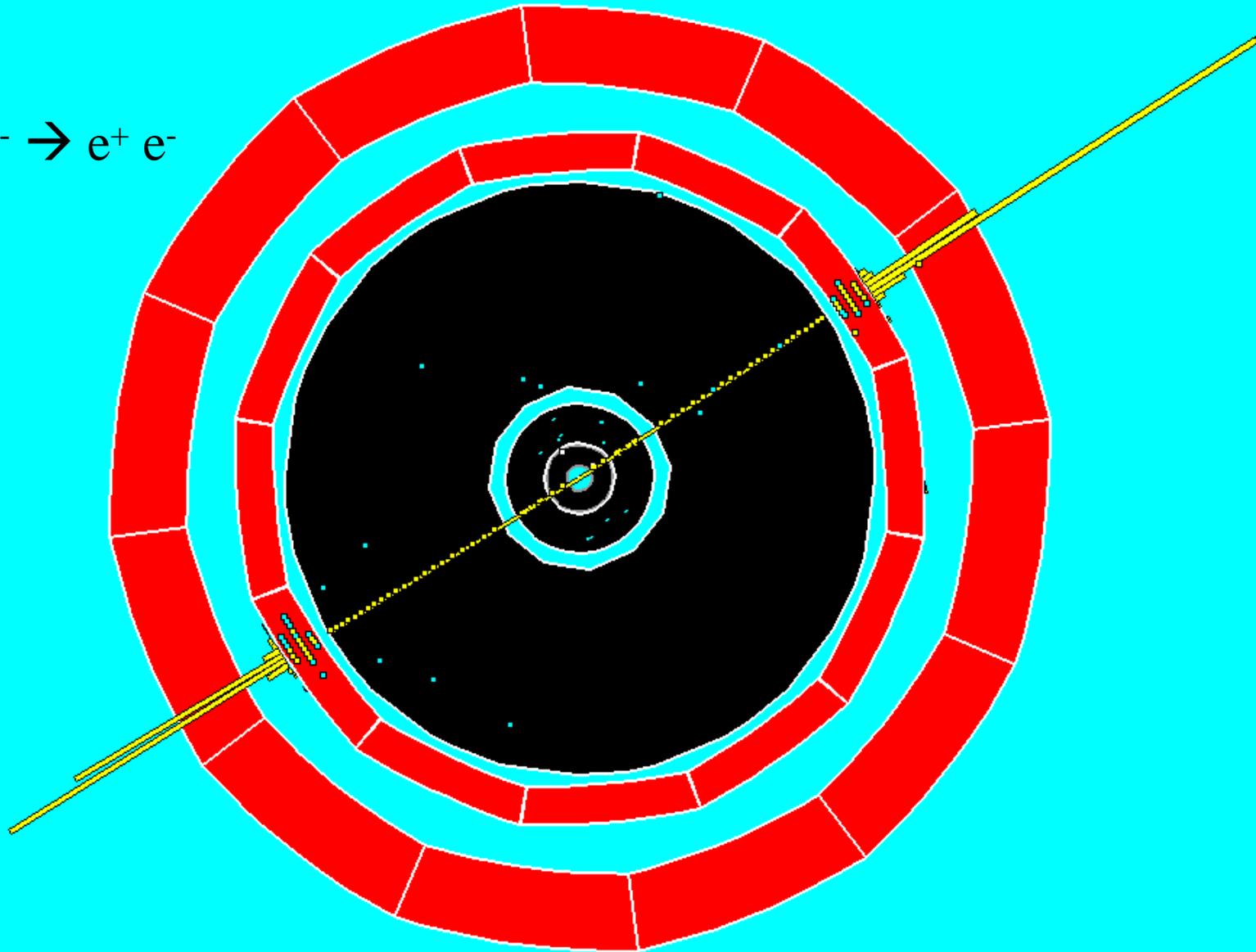


Creazione di Leptoni al Lep

 ALEPH DALI

Run=15995 Evt=2012

$e^+ e^- \rightarrow e^+ e^-$

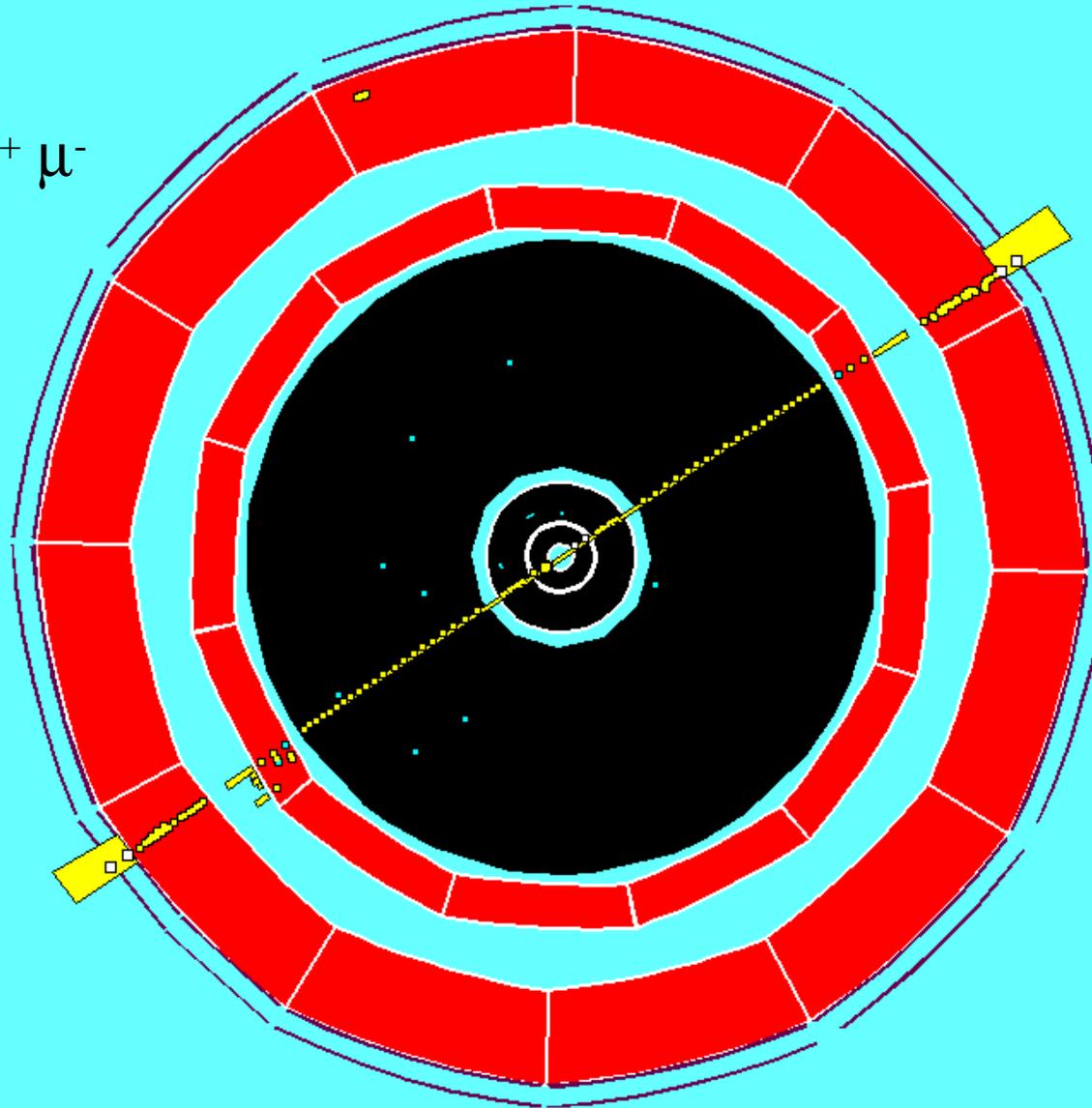


Creazione di Leptoni al Lep

 **ALEPH** DALI

Run=15995 Evt=835

$e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$



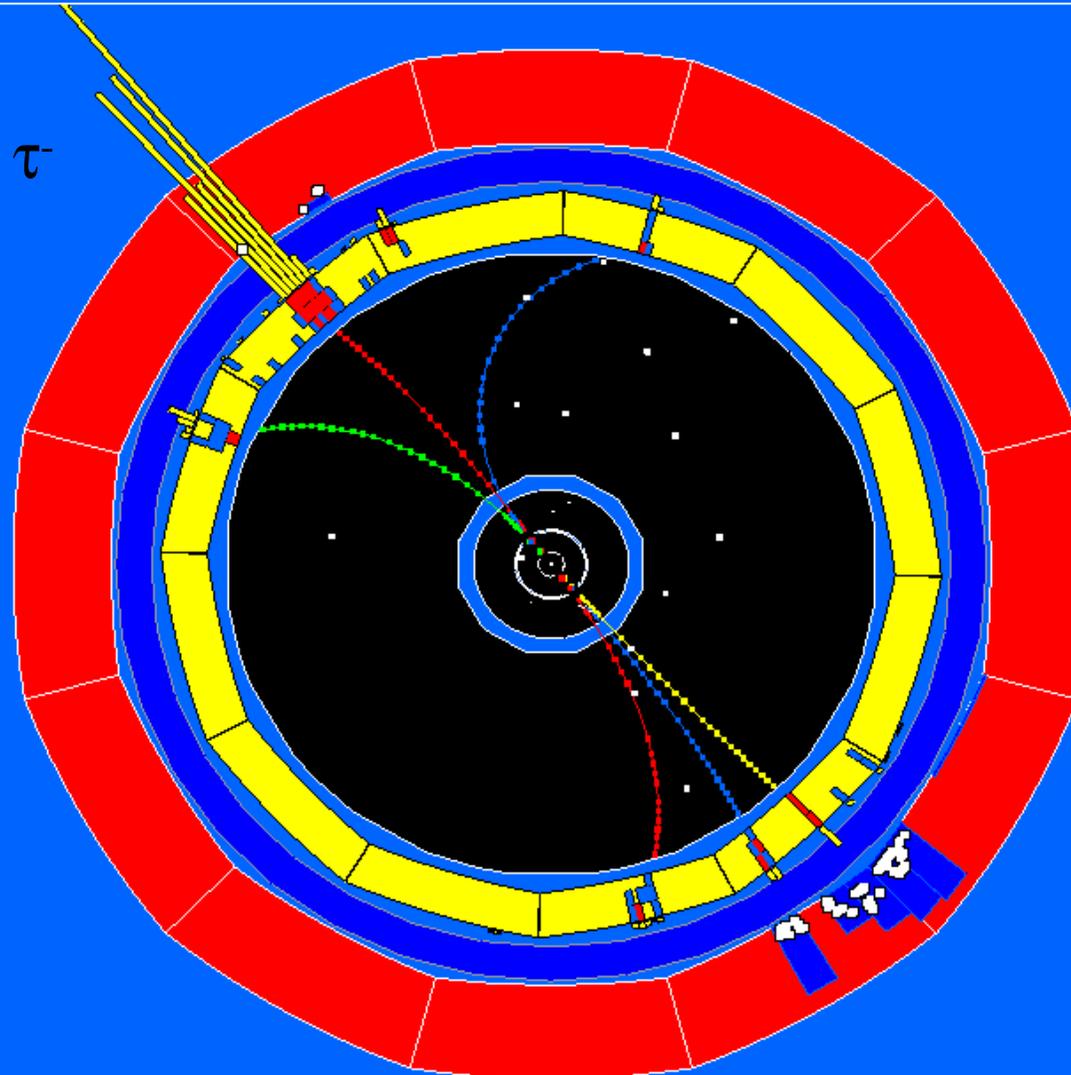
Creazione di Leptoni al Lep

 **ALEPH** DALI

$e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow 3\pi \quad 3\pi \quad \nu's$

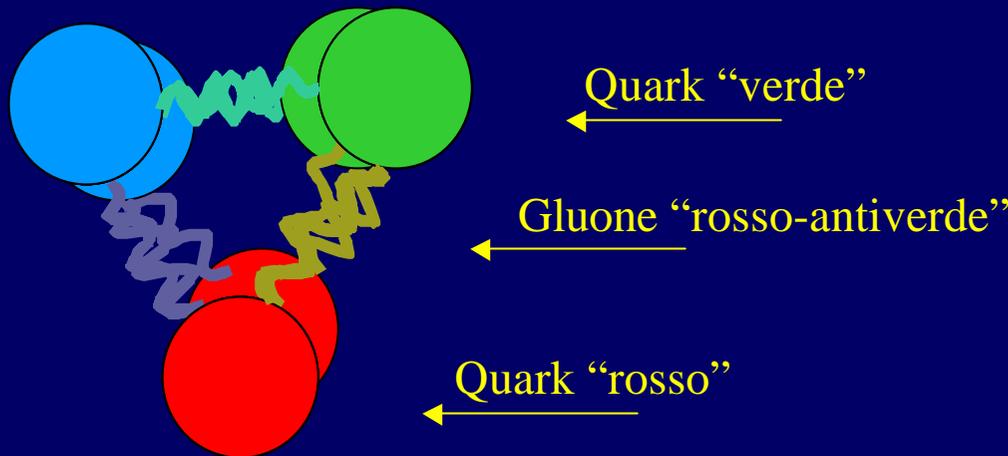
Run=15996 Evt=524

$e^+ e^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$

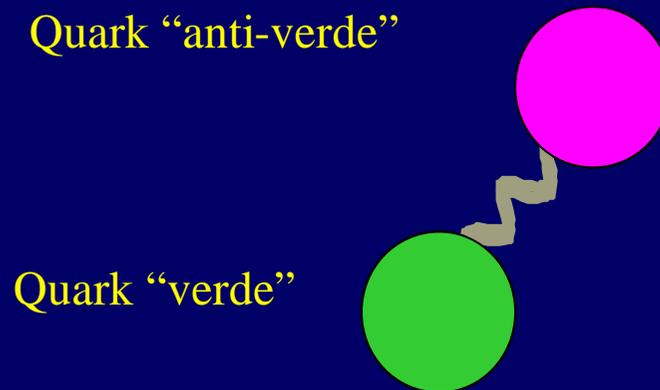


Cromo Dinamica Quantistica

- Dato il grande successo della QED, negli anni '70 si sviluppò una teoria quantistica delle interazioni forti che venne chiamata *Cromo Dinamica Quantistica* (QCD). Questa teoria include un nuovo bosone di gauge chiamato *gluone*.
- La “carica” delle interazioni forti è chiamata **colore**, e ciascun quark ha tre possibili valori di colore: **rosso**, **verde** e **blu**. Questo tipo di interazione è mediata da un **gluone**.



La particella così composta (**barione**)
risulta “bianca”



La particella così composta (**mesone**)
risulta “bianca”

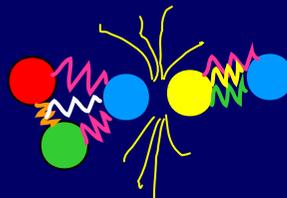
Quark isolati ?

- La forza forte fra i quarks decresce con il decrescere della distanza (*libertà asintotica*) e aumenta alle grandi distanze
- Questo e' ciò che succede quando si cerca di estrarre un quark da un **barione** :

barione



L'Energia nel campo
aumenta fino a ...



raggiungere $E=Mc^2$
($M=m+m$) per produrre
una coppia di
quark e anti-quark

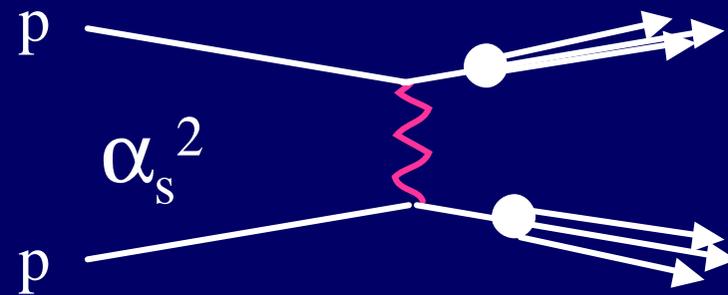
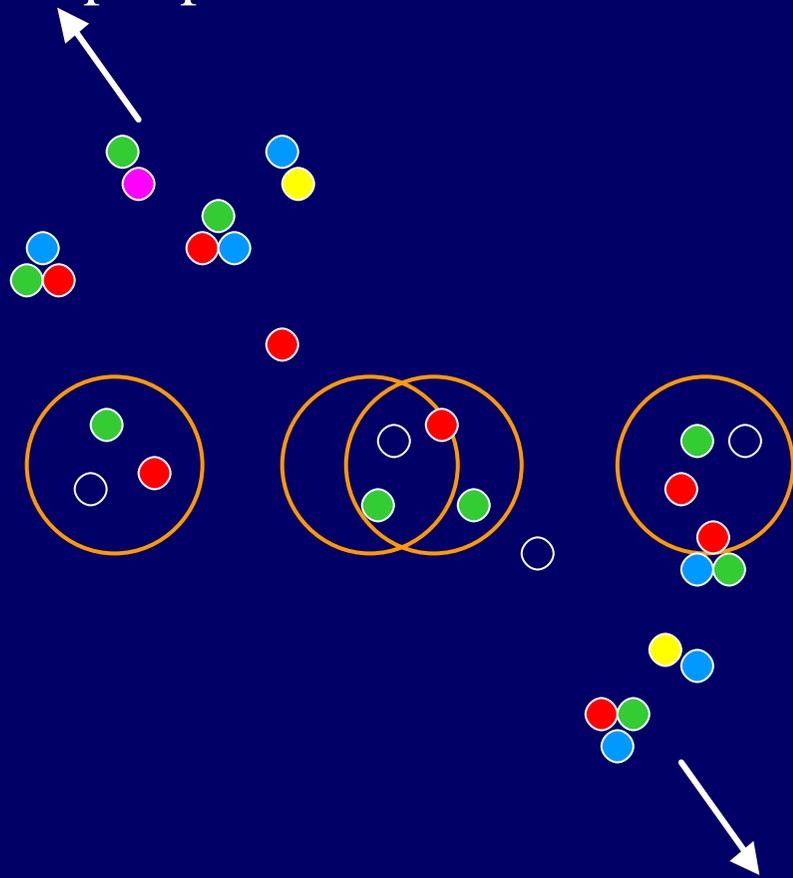
mesone



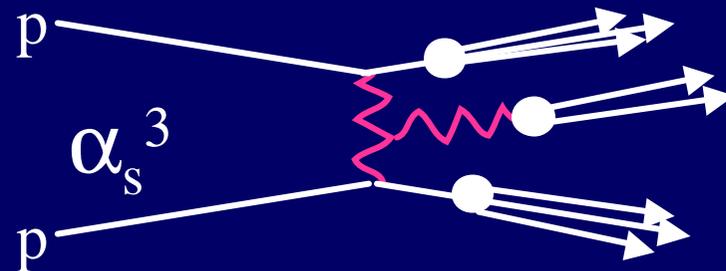
Un quark rimarrà nel
barione, mentre l'antiquark
si unirà al quark strappato
per formare un mesone

Evidenza della QCD

La QCD mi dice che non posso vedere dei quark liberi.
Quindi, cosa succede se provo a far scontrare due protoni ad energie sempre più elevate?



Ma i gluoni possono interagire tra di loro in quanto anche loro sono colorati !!

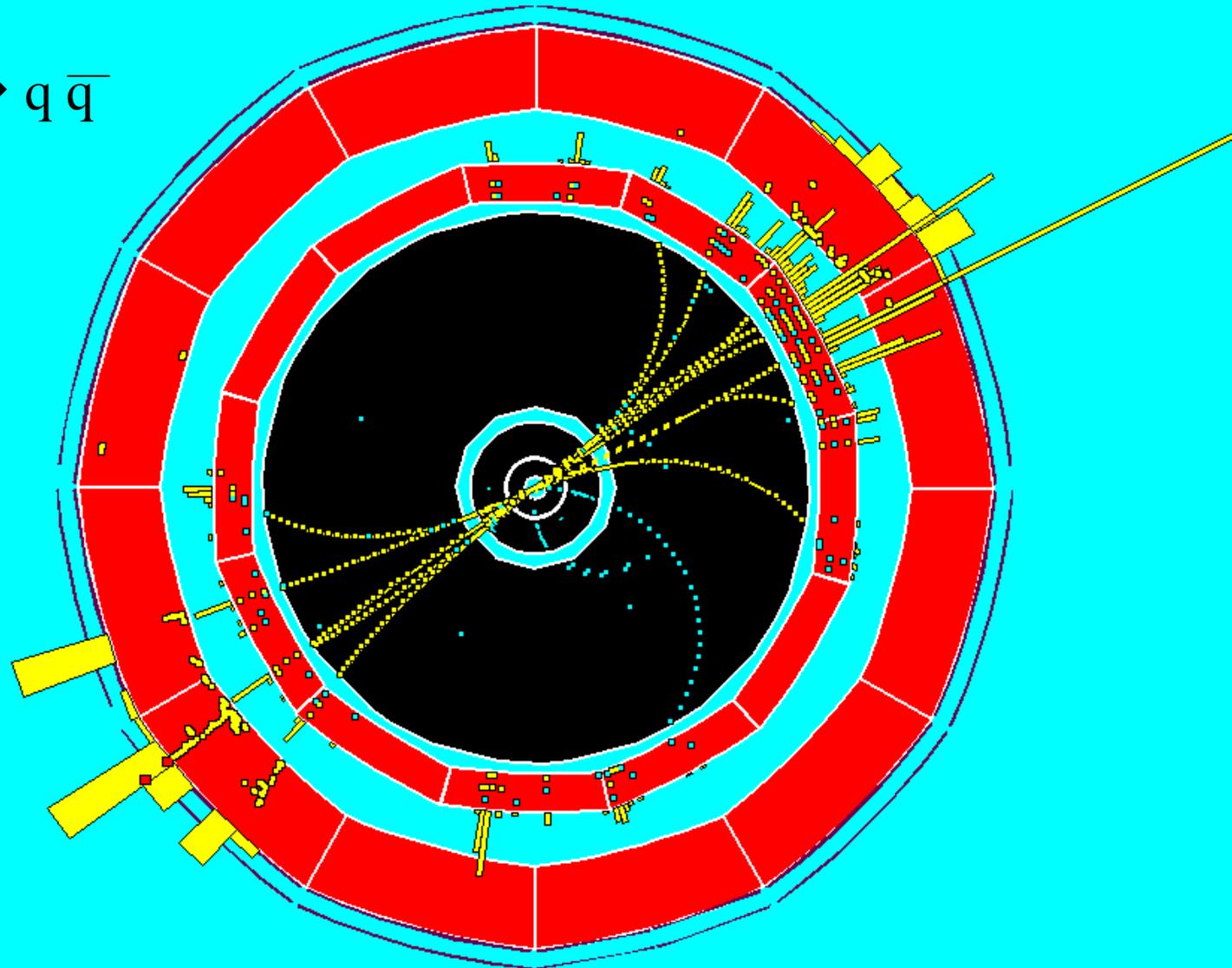


Creazione di quarks al LEP

 **ALEPH** DALI

Run=15768 Evt=5906

$$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q}$$

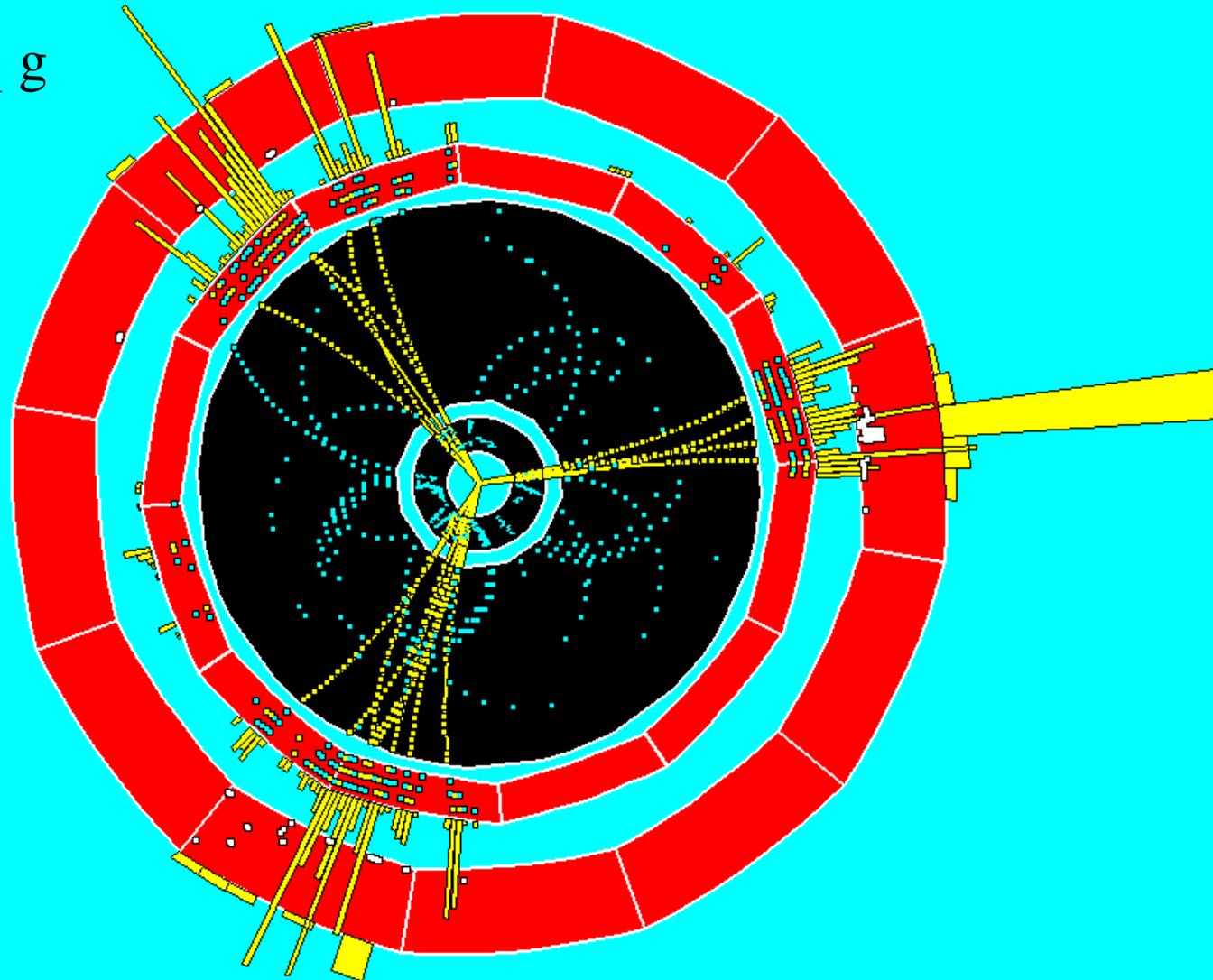


Creazione di quarks al LEP

 **ALEPH** DALI

Run=9063 Evt=7848

$e^+ e^- \rightarrow q \bar{q} g$



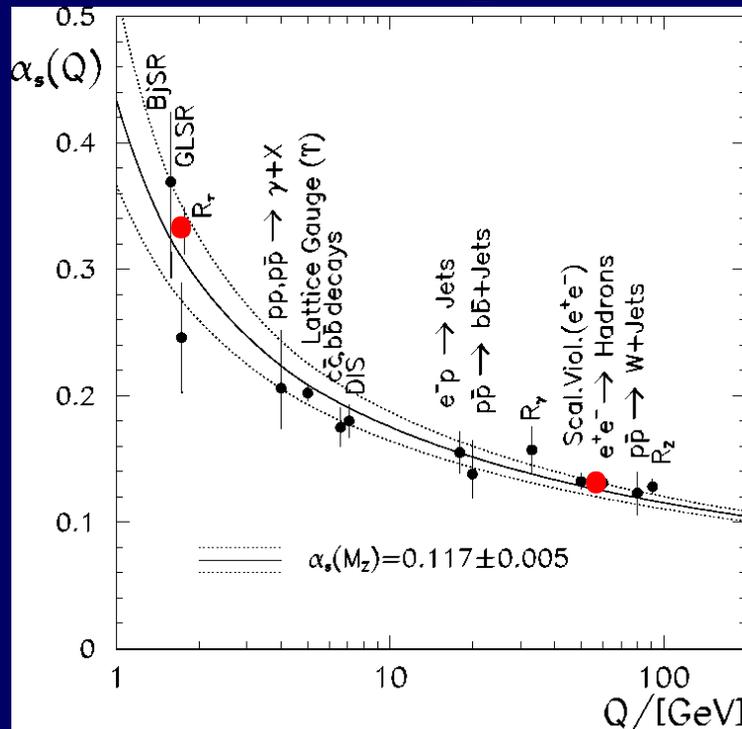
Costante α_s

La teoria QCD predice una intensità delle interazioni forti decrescente all'aumentare dell'energia.

LEP ha misurato questa costante a

basse energie ($M_\tau = 1.8 \text{ GeV}$) : $\alpha_s(m_\tau) = 0.332 \pm 0.002$

alte energie ($M_Z = 91.19 \text{ GeV}$) : $\alpha_s(m_Z) = 0.119 \pm 0.004$



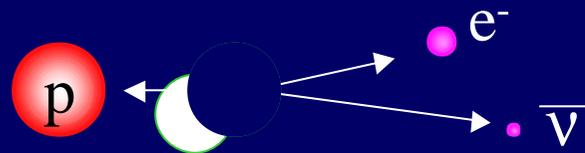
Precisione al 1 %

La decrescita osservata è in accordo con la predizione della QCD.

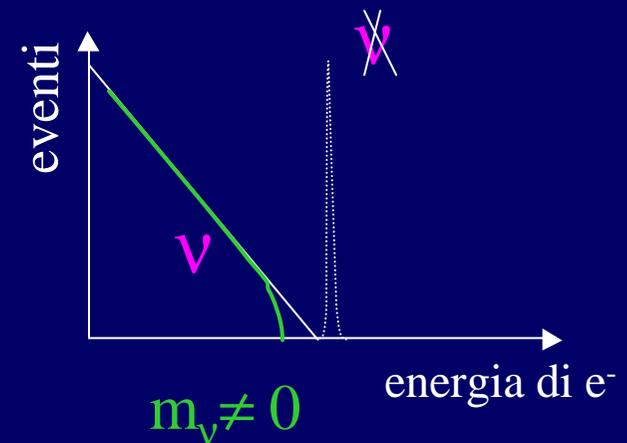
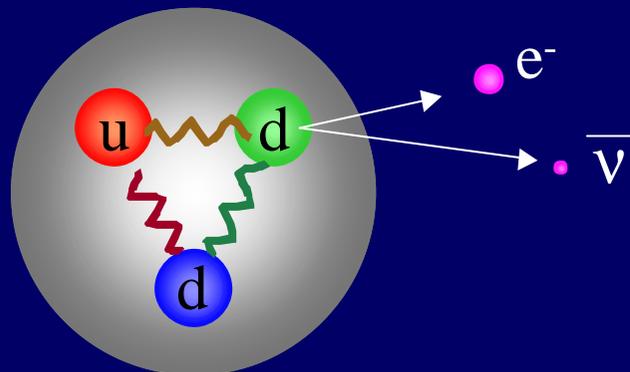
Scoperta del neutrino

Nel 1896 Bequerel scopre la radioattività naturale: alcuni materiali come l'Uranio o il Radio producono raggi α , β o γ .

Nel 1930 Pauli fa l'ipotesi che insieme all'emissione di β vengano emesse particelle neutre di massa molto piccola : i neutrini.

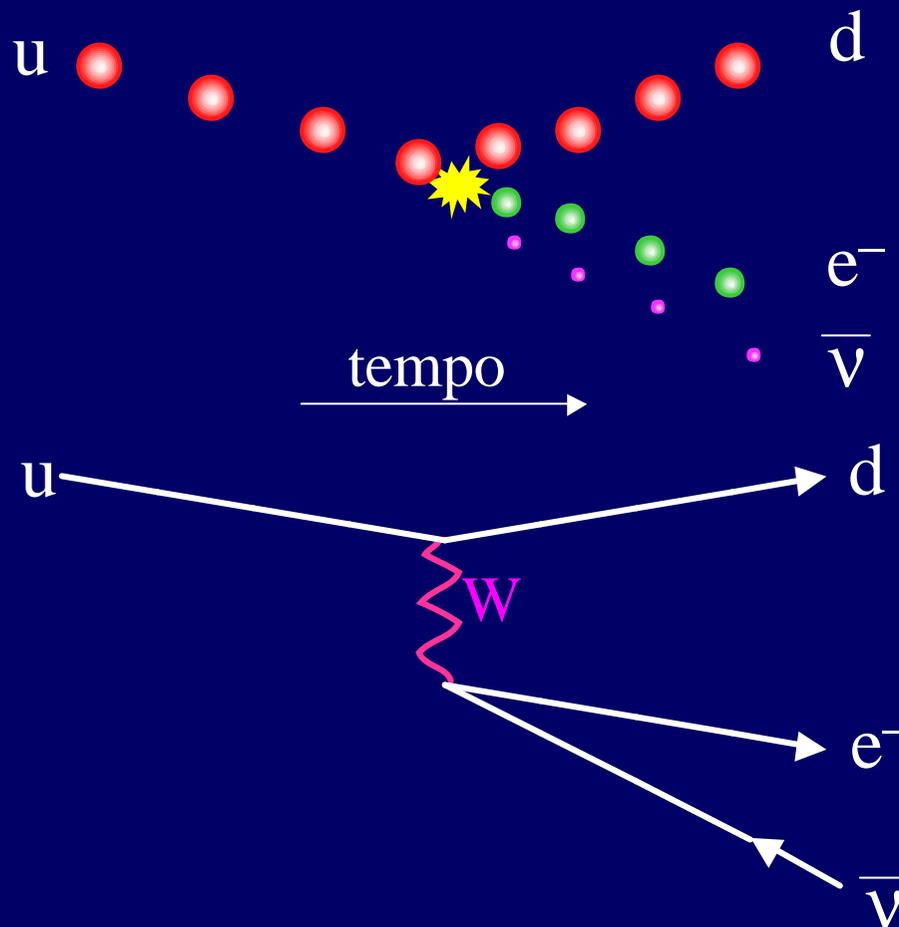


Con il modello a quark ...



Il bosone W

Ma come avviene l'interazione debole ?

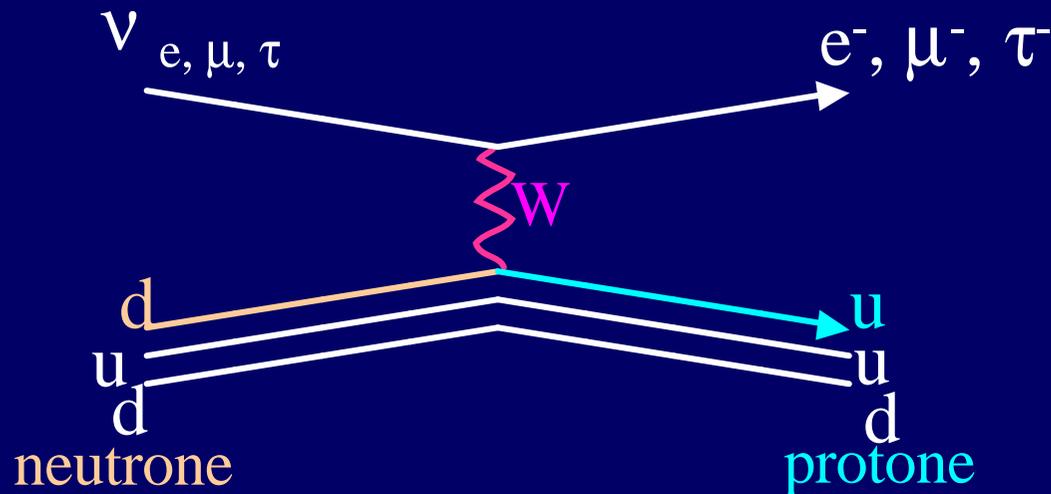


Il bosone W interagendo con il fermione ne cambia il “sapore”

La costante di accoppiamento del fermione al W è molto vicina ad α della QED.

Quello che rende debole l'interazione è il fatto che il bosone W ha una massa molto elevata (**probabilità più bassa di emissione**)

Interazioni del neutrino

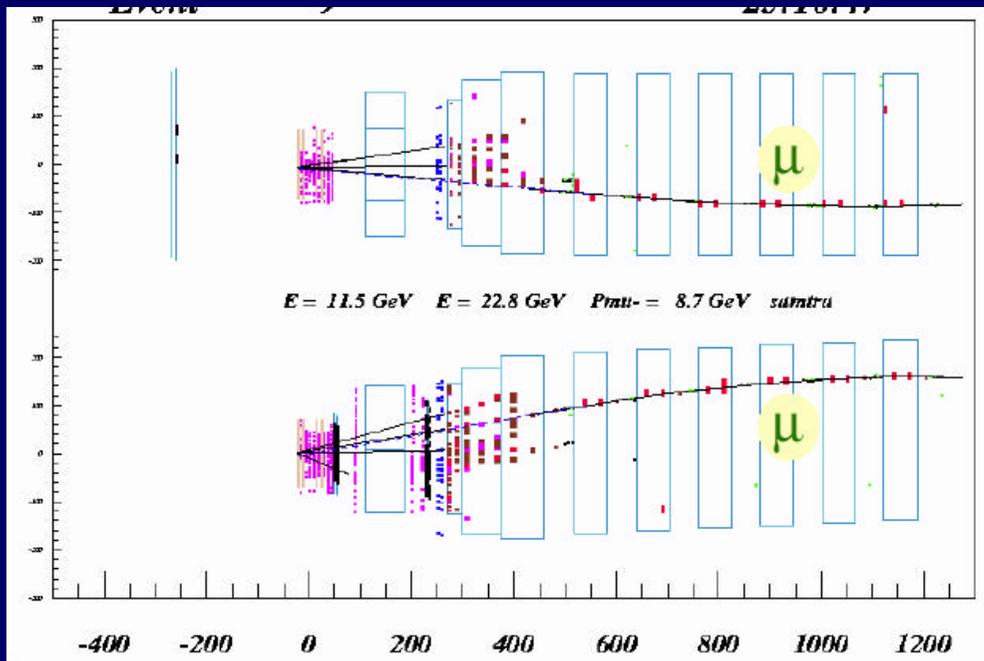


La sezione d'urto che si ricava da questo diagramma di Feynmann e' di 10^{-38} cm^2

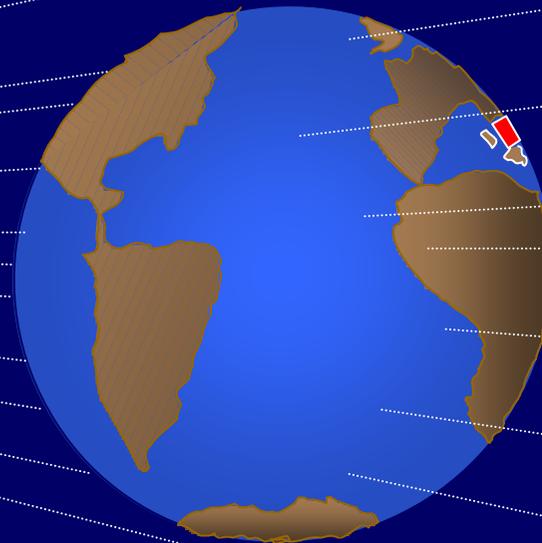
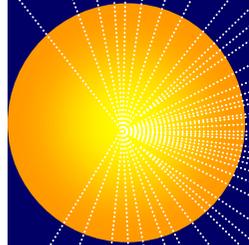
Diametro dell'atomo 10^{-8} cm

Diametro del nucleo 10^{-13} cm

Quindi i neutrini interagiscono pochissimo con la materia !



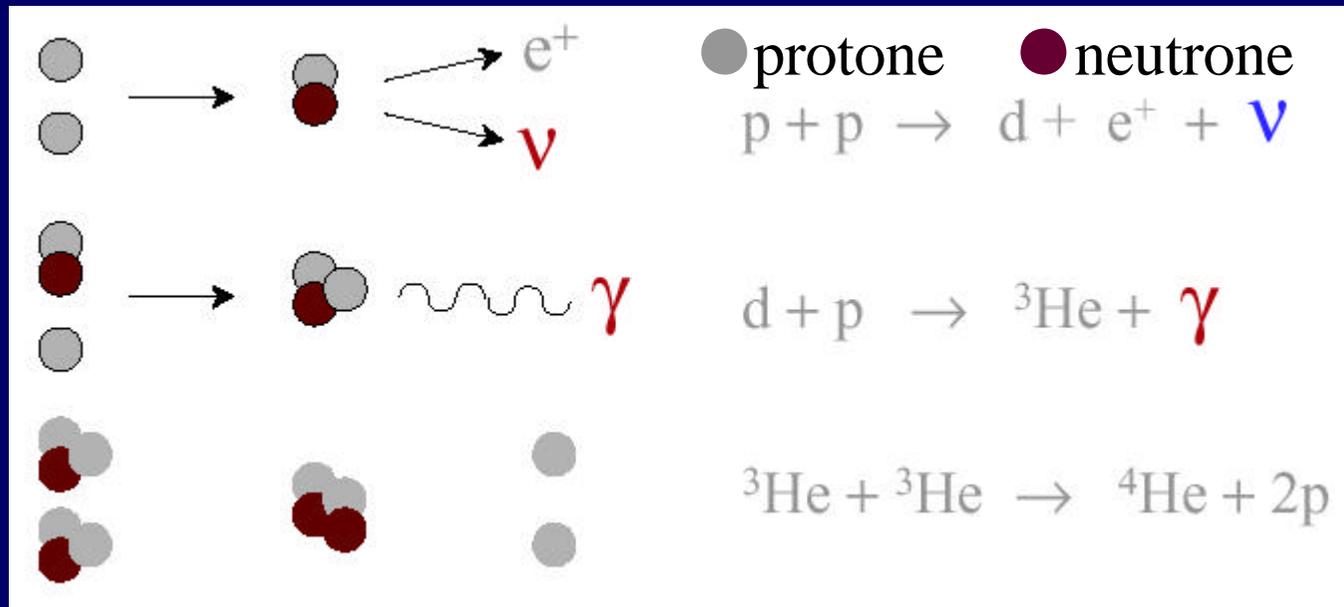
Neutrini



10^{11} neutrini al secondo per cm^2 !!

Lunga vita al Sole

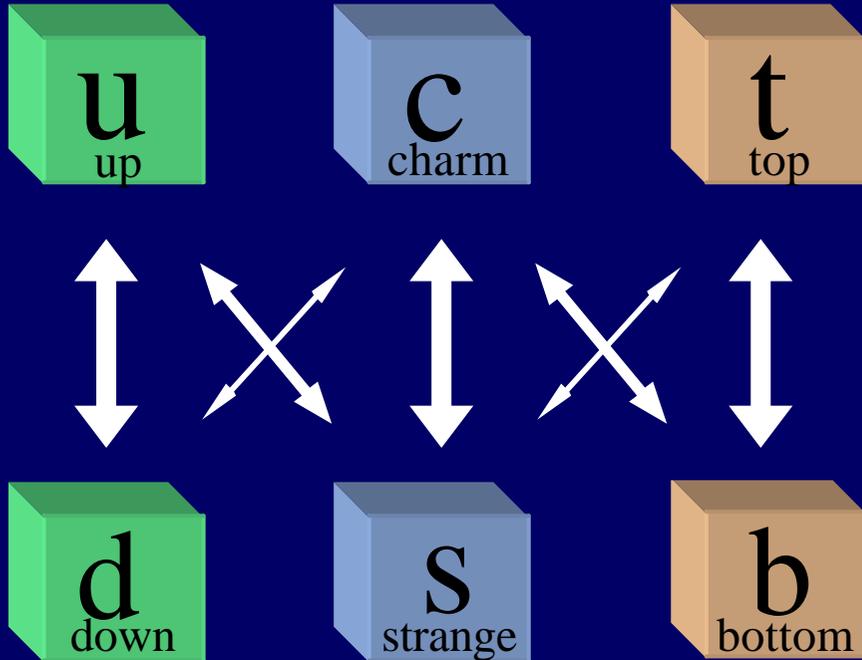
Grazie alla forza debole, la combustione dell'idrogeno in elio è sufficientemente lenta da dare al Sole una vita di **10 Miliardi di anni**



Si potrebbe dire che lo sviluppo di forme di vita nell'universo è possibile grazie all'esistenza della forza debole.

Le famiglie “si parlano”

Interazione del W con i fermioni



Se così fosse avremmo un Universo composto da particelle appartenenti a tutte e tre le famiglie...

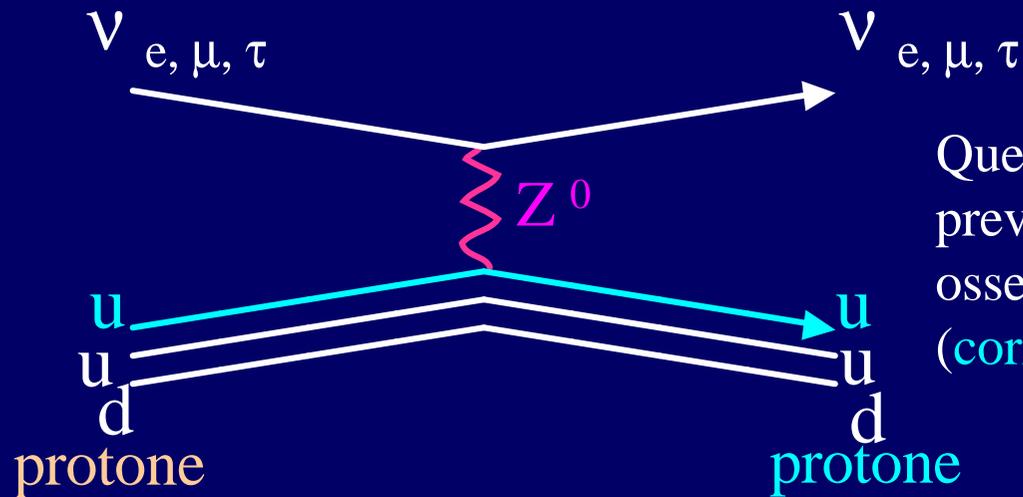
Universo estremamente complicato !

Questa “**rotazione**” e’ descritta dalla matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa

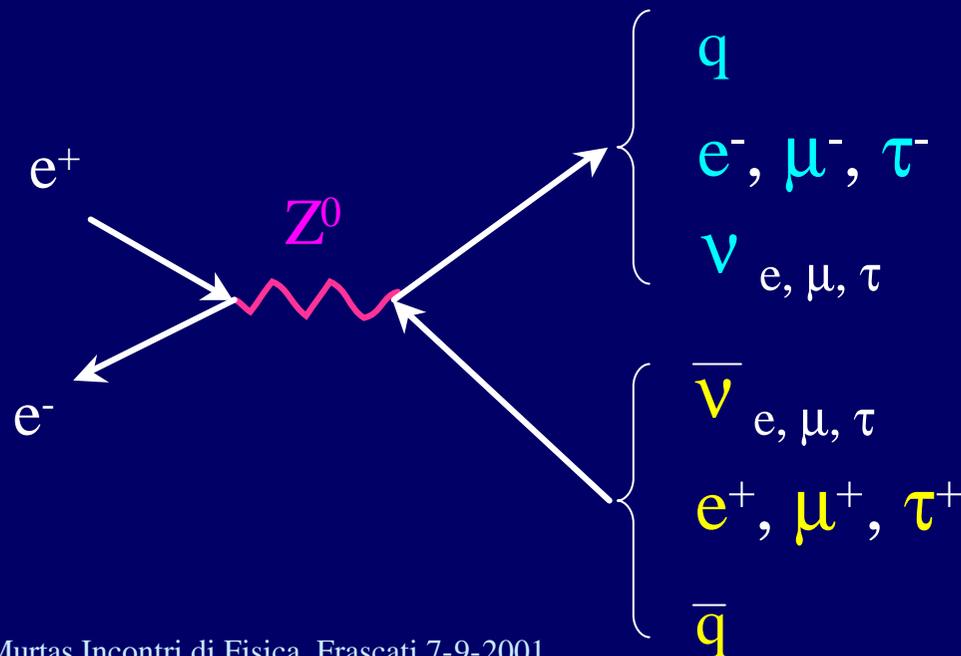
Le particelle dotate di **Top** e **Charm** hanno una vita media più piccola rispetto alle particelle dotate di **Bottom** e **Strange**.

Misurando i decadimenti queste particelle di fatto misuriamo gli angoli di questa rotazione (il primo fù **l’angolo di Cabibbo**)

Il bosone Z^0 e le correnti neutre



Questo tipo di interazioni erano state previste dal Modello Standard 1968 ed osservate per la prima volta nel 1973 (correnti neutre) al CERN.



Il LEP è stato costruito per poter studiare in dettaglio questo tipo di interazione.

Circa 1200 fisici da tutto il mondo per costruire gli esperimenti e analizzare i dati per ~10 anni

Quante Famiglie ?

Lo Z decade in leptoni e antileptoni di ciascuna famiglia, così come in quark e antiquark.

Tanto più sono i modi in cui può decadere lo Z, tanto è più facile decadere e quindi più corta è la sua vita.

Il principio di indeterminazioni di Heisenberg può essere scritto

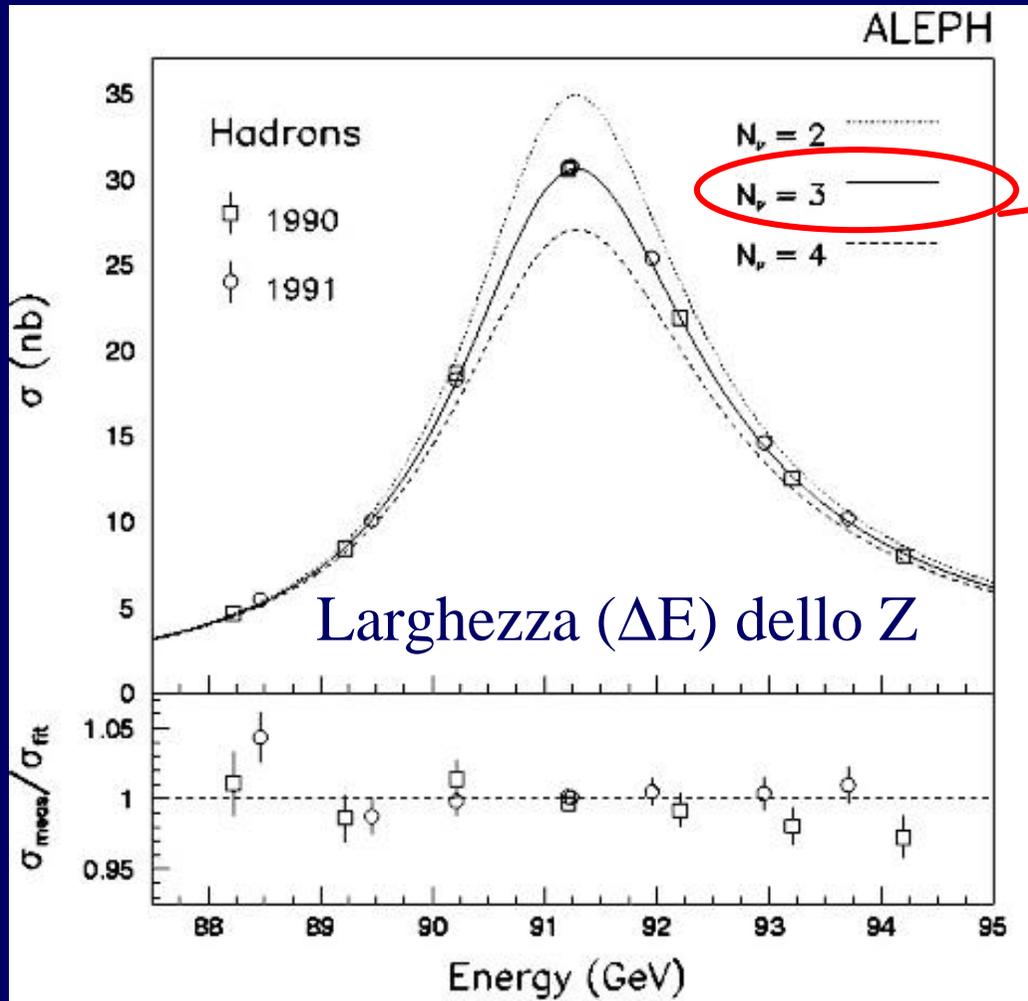
$$\Delta E \Delta t \leq h/2\pi$$

Considerato che $E=Mc^2$, questo significa che la massa dello Z quando decade è inversamente proporzionale alla sua vita media

$$\Delta M_z \propto \frac{1}{\Delta t}$$

La larghezza dello Z

Numero di decadimenti Z



Solo tre famiglie

A meno che non esista un quarto neutrino con massa > 93 GeV

Massa Z ($=E/c^2$)

Risultati di LEP

I quattro esperimenti di LEP hanno raccolto 15.5 milioni di decadimenti Z in quarks, piu' 1.7 milioni di decadimenti in leptoni carichi (**luminosita' integrata ~ 200 pb⁻¹ per esperimento**).

$$M_Z = 91.1874 \pm 0.0021 \text{ GeV}$$

~2 parti su 100 000 !!

Quantity	Expected error	Achieved
m_Z	50 to 20 MeV	2.1 MeV
m_W	100 MeV	39 MeV
N_ν	0.3	0.008
$A_{\text{FB}}^{0,\mu}$	0.0035	0.0013
$A_{\text{FB}}^{0,b}$	0.0050	0.0017
A_τ	0.0110	0.0043

Risultati di altissima precisione e tutti in accordo con
il Modello Standard

Simmetrie e Grandezze Conservate

- Le simmetrie sono governate da una branca della matematica chiamata Teoria dei Gruppi
- Se la Lagrangiana che governa un sistema è invariante sotto un gruppo di trasformazione, questo implica l'esistenza di una grandezza conservata
- Esempi:

Operazione di Simmetria

Traslazione nello spazio
Rotazione nello spazio
Traslazione nel tempo
Cambiamento di fase

Quantità conservata

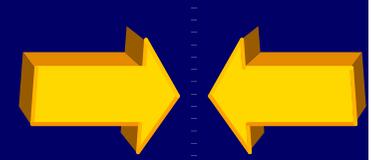
Momento P
Momento angolare L
Energia E
Carica Elettrica Q

Tre importanti simmetrie discrete

- Parità, ***P***

- La Parità riflette un sistema rispetto ad un origine prefissata. Converte un sistema di coordinate destrorso in uno levogiro.
- I Vettori cambiano segno ma i vettori assiali rimangono inalterati

$$\bullet \mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x} \quad \mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}$$



- Coniugazione di Carica, ***C***

- La coniugazione di carica trasforma una particella in una anti-particella

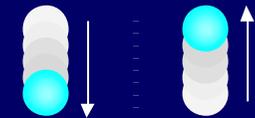
$$\bullet e^+ \rightarrow e^- \quad K^- \rightarrow K^+ \quad \gamma \rightarrow \gamma$$



- Inversione Temporale, ***T***

- Cambia, ad esempio, la direzione di moto di particelle

$$\bullet t \rightarrow -t$$

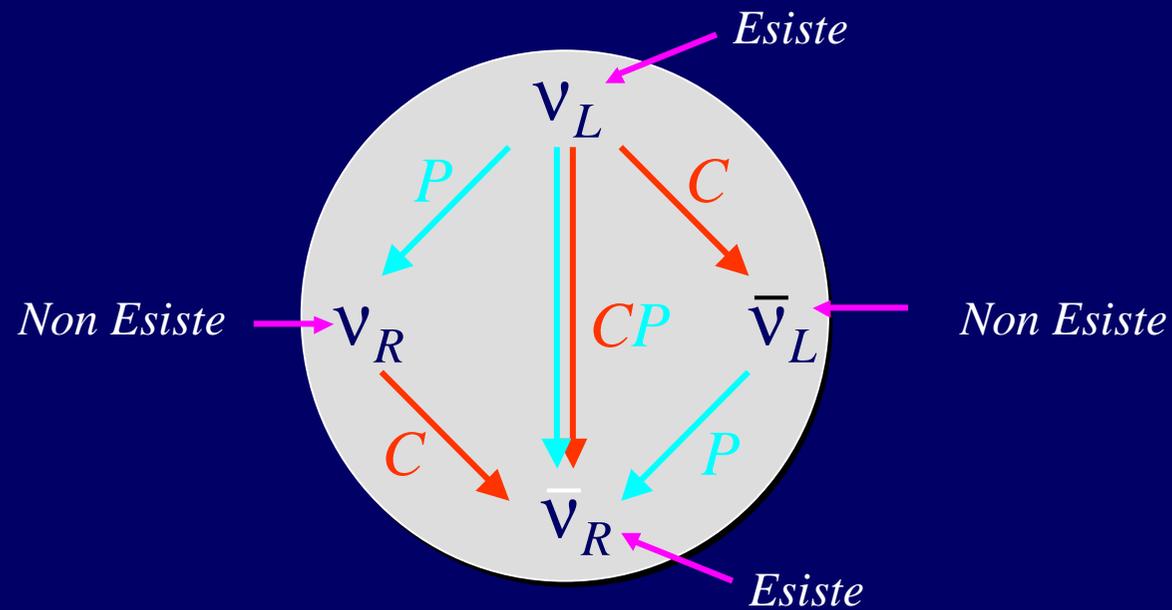


- **Teorema CPT**

- E' uno dei più importanti teoremi nella teoria dei campi quantistica.
- Tutte le interazioni sono invarianti sotto una combinazione di *C*, *P* e *T*
- Questo implica che le particelle e le loro anti-particelle **hanno uguali masse e vite medie**

CP e le interazioni deboli

A dispetto della massima violazione della simmetria C e P nelle **interazioni deboli**, la combinazione delle due operazioni CP , e' quasi esatta.



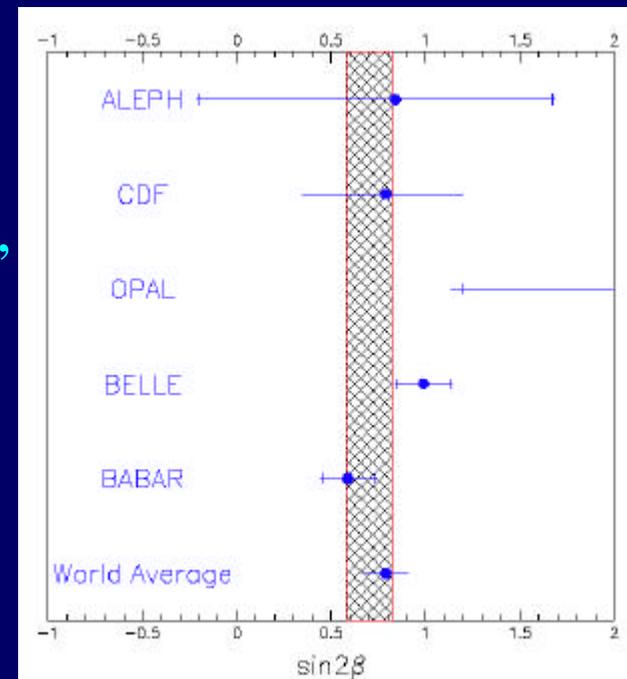
Ma, **nel 1964**, Christensen, Cronin, Fitch and Turlay osservarono la violazione di CP nel decadimento dei K neutri (**violazione al ≈ 2 per mille**)

Violazione di CP

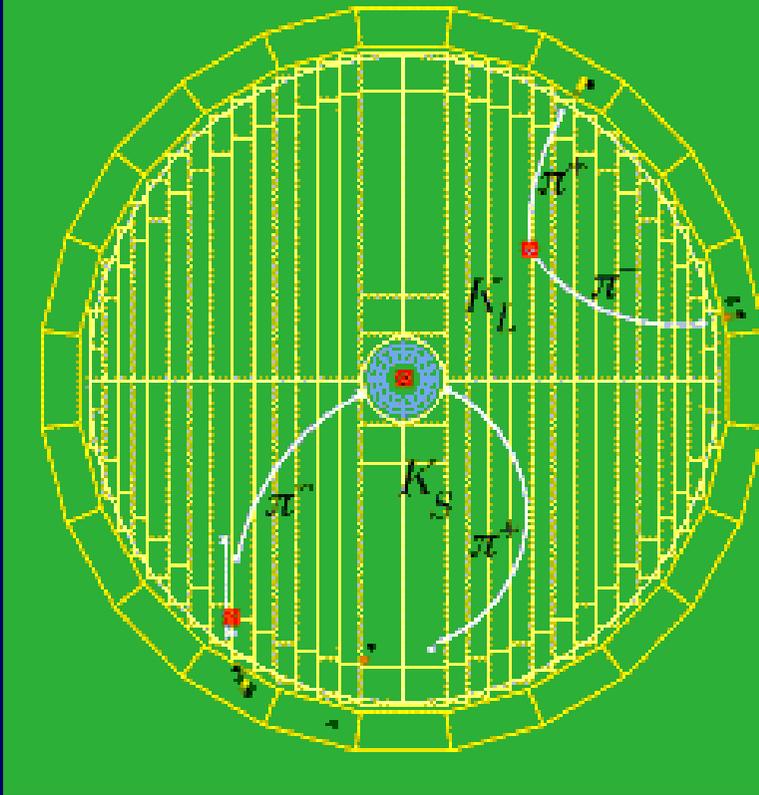
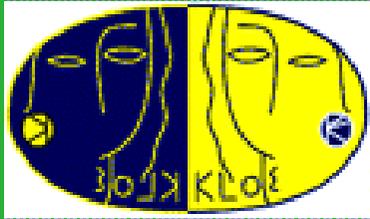
Una possibile causa della violazione di CP nelle interazioni deboli e' data da questo termine diverso da zero nella matrice CKM .

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - I^2/2 & I & AI^3(r - ih) \\ -I & 1 - I^2/2 & AI^2 \\ AI^3(1 - r - ih) & -AI^2 & 1 \end{pmatrix} + O(I^4)$$

Fino a qualche mese fa la violazione di CP era stata osservata solo negli esperimenti che osservavano particelle **Strane** (NA48 al CERN, KTeV al Fermilab , Kloe a Frascati) ora anche negli esperimenti che osservano particelle con **Beauty** (Belle in Giappone e Babar a Stanford) .

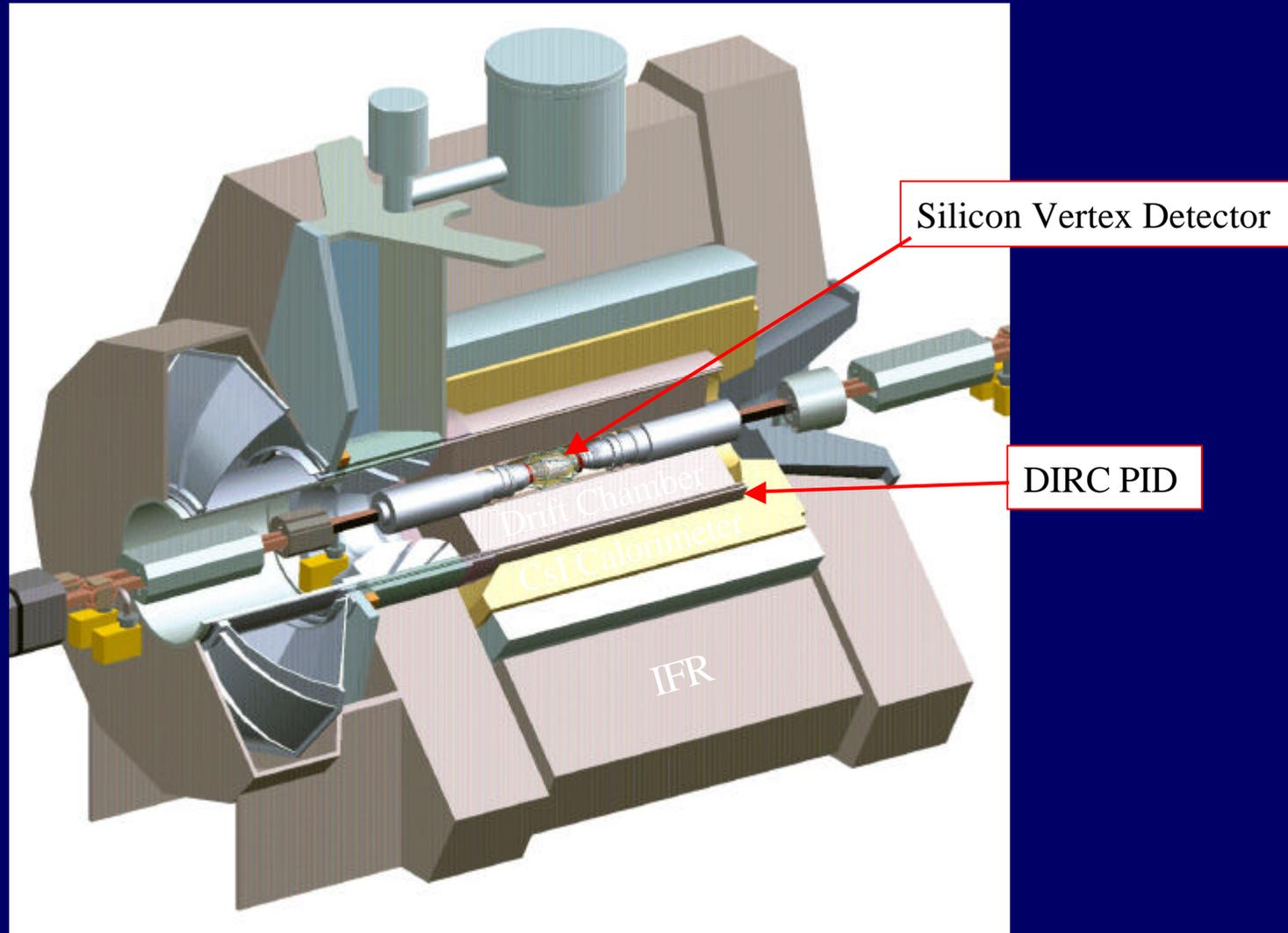


Candidato di Violazione di CP in Kloe



The *BABAR* Detector

Una collaborazione di ~530 fisici ed ingegneri provenienti da 10 paesi



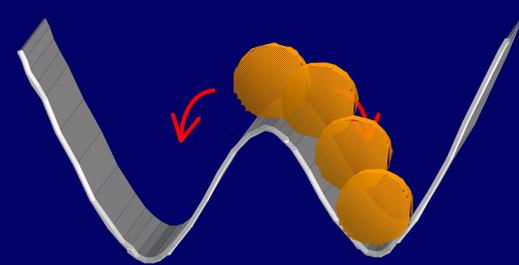
Rottura di Simmetria

- Alcune simmetrie non sono perfette, ma possono essere estremamente utili per capire la dinamica di un sistema
- Il primo modello a quark si basava su una simmetria $SU(3)$ di sapore (**up**, **down**, **strange**), quasi perfetta ...
Infatti questa simmetria è rotta dalla diversità delle masse dei quark

– Come abbiamo visto, la Forza Debole viola la parità (P) e la coniugazione di carica (C)

- *Rottura spontanea di simmetria*

- Talvolta, la simmetria di un sistema può essere rotta dall'esistenza di uno stato fondamentale asimmetrico:



- **Altri esempi:**

- Materiali ferromagnetici
- Prendere il tovagliolo in una tavola rotonda
- Il potenziale di Higgs

Rinormalizzazione

La teoria della QED e della QCD funzionano e ci permettono di calcolare le intensita' delle interazioni (**che possiamo verificare sperimentalmente**) perche' i **bosoni di gauge** non hanno massa.

Le interazioni deboli invece avvengono per scambio di bosoni **massivi**.

Se provo ad inserire “a mano” i **termini di massa** nella **Lagrangiana elettrodebole**, la teoria non e' piu' **rinormalizzabile**, ossia non riesco piu' a calcolare degli osservabili fisici (es.: sezione d'urto).

Se introduco nella Lagrangiana un campo scalare (**Campo di Higgs**) **che rompe la simmetria spontaneamente**, questo mi permette di avere una teoria **rinormalizzabile** e **di avere i termini di massa** per i bosoni di Gauge.

Higgs & la rottura spontanea di Simmetria

Quindi il bosone di Higgs con **spin-zero** (campo scalare) rompe la simmetria elettrodebole e rende diverse le interazioni elettromagnetica e debole.

Il campo di Higgs interagisce e **fornisce la massa ai bosoni W e Z** (ed a **tutti gli altri fermioni**), ma lascia il fotone senza massa.

Si può pensare al campo di Higgs come un “medium” sul quale le particelle si muovono (un moderno etere ?).

E' un campo (come l'EM o il gravitazionale) ma con lo stesso valore in tutto lo spazio.

Come il fotone per l'elettromagnetismo, il campo di Higgs **ha una particella associata**, il Bosone di Higgs, con una massa di almeno 100 GeV.

Higgs e la massa dei fermioni

Ma come fa **il campo di Higgs** a fornire la massa alle particelle ?

Supponiamo di avere un campo di Higgs e
facciamoci correre sopra tre particelle

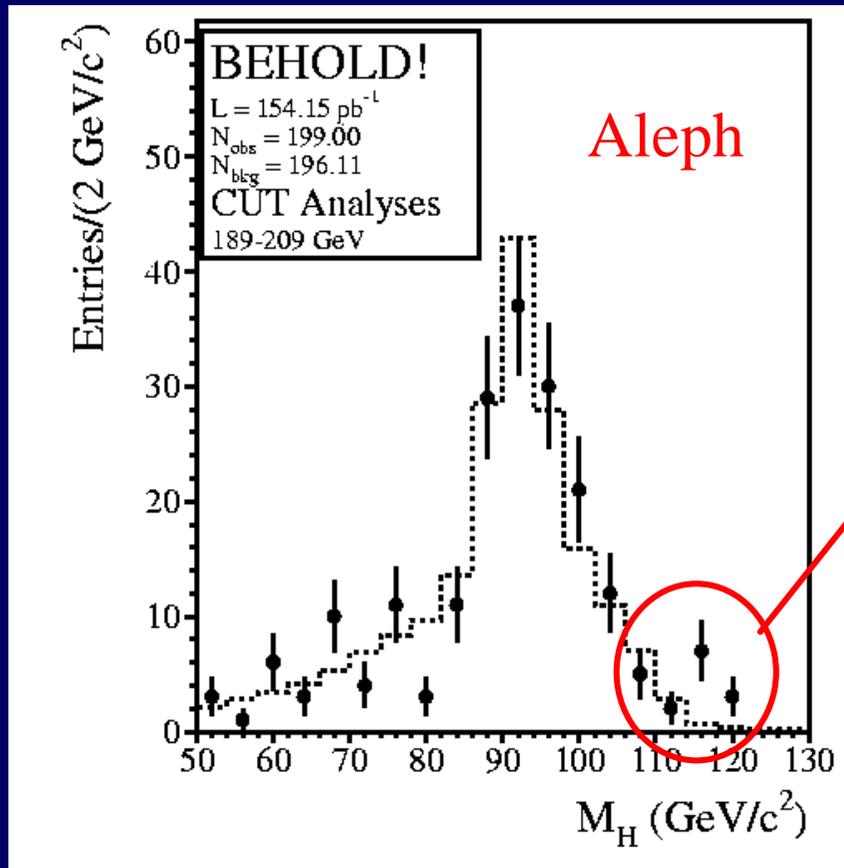


Tanto più grande è
l'accoppiamento tra **il campo
di Higgs** e la particella,
tanto più grande è **la massa**
ad essa associata !

Raggio di azione

Se volete altri esempi <http://hepwww.ph.qmw.ac.uk/epp/higgs.html>

Esiste la particella di Higgs ?



Questo eccesso di eventi ad alta energia ha fatto pensare ad un primo segnale dell'esistenza della particella di Higgs un anno fa.

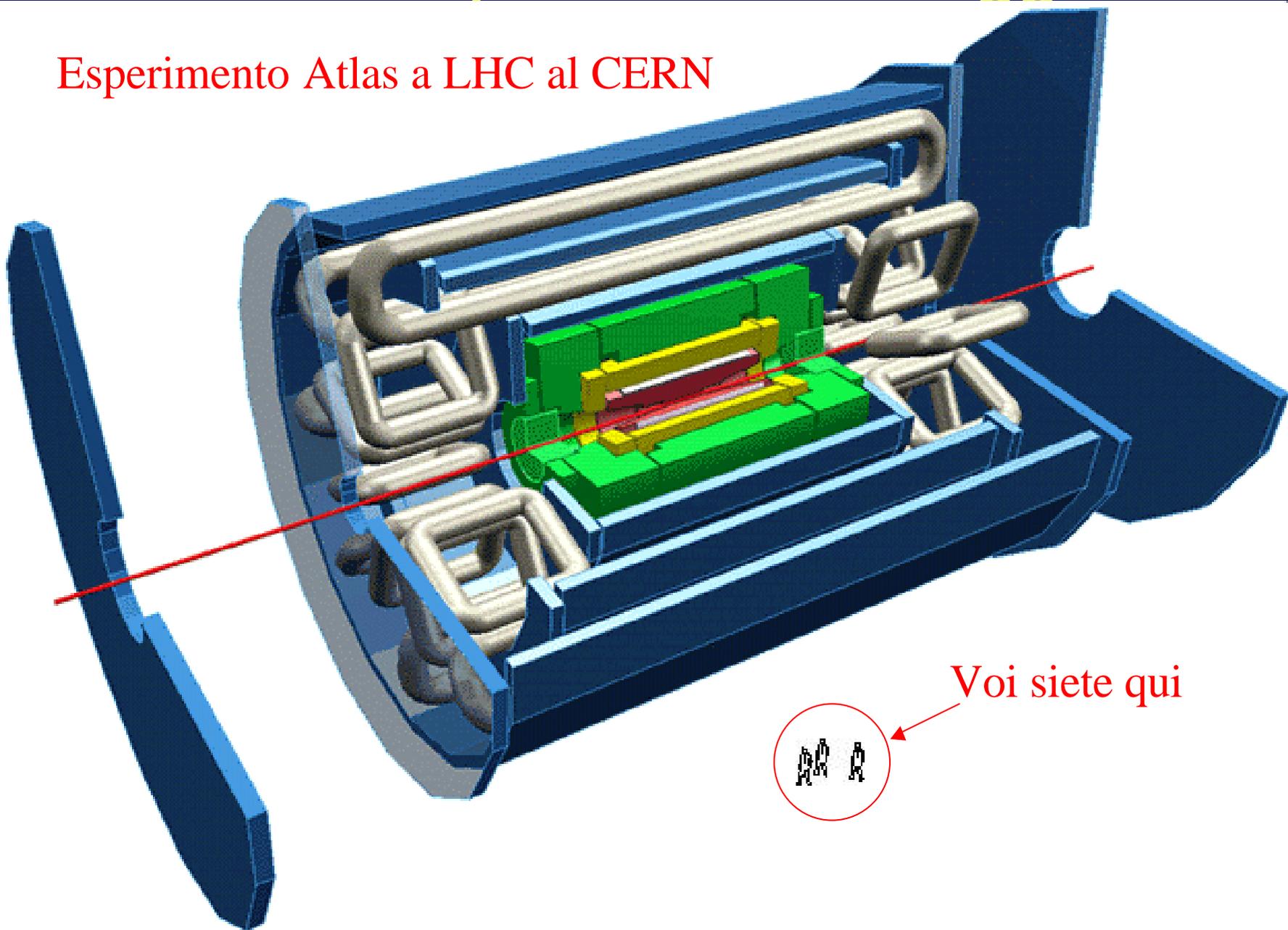
Significanza statistica di “solo” 3.9 sigma, compatibile con un SM Higgs di circa 114 GeV.

Questo segnale lo ha visto solo uno dei quattro esperimenti !

Quindi bisogna aspettare qualche anno ...

Esiste la particella di Higgs ?

Esperimento Atlas a LHC al CERN



Voi siete qui

Unificazione

ben testate

1800 : L'elettricità e il magnetismo vengono unificate grazie alla Teoria di Maxwell sull'elettromagnetismo

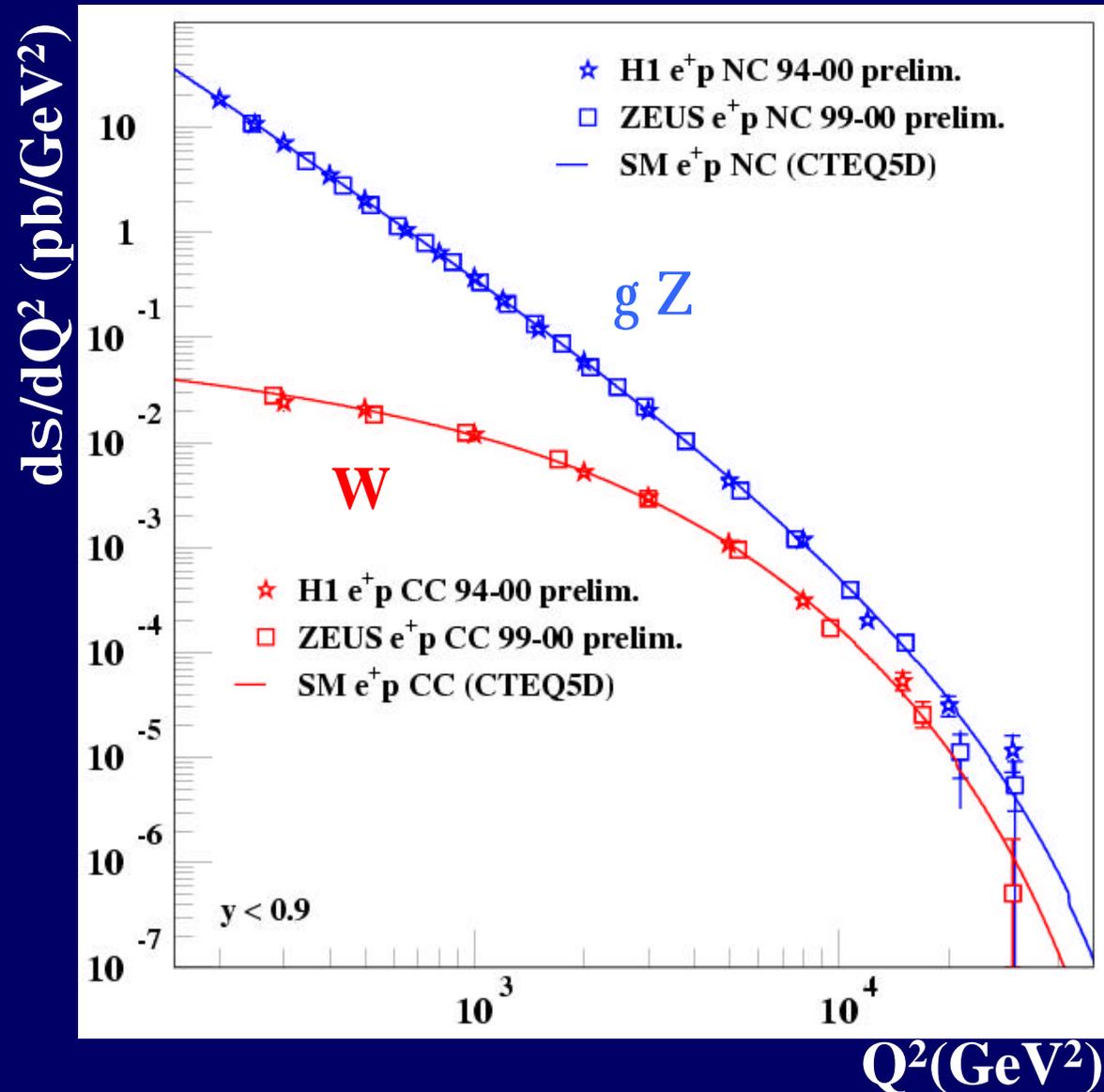
1970 : Le interazioni elettromagnetiche e quelle deboli vengono unificate nella teoria elettrodebole (Glashow, Weinberg, Salam)

speculazione

1980 : Interazioni Elettrodeboli e Forti unificate nelle
→ Teorie di Grande Unificazione GUT

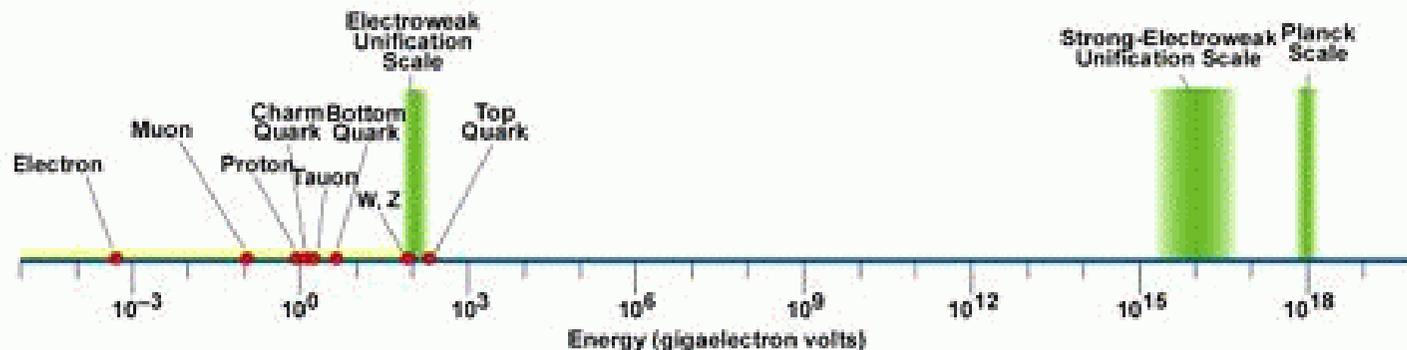
1980 : Unificazione Elettrodebole Forte e Gravitazionale
→ interactions inella Teoria delle Superstringhe

Unificazione elettrodebole

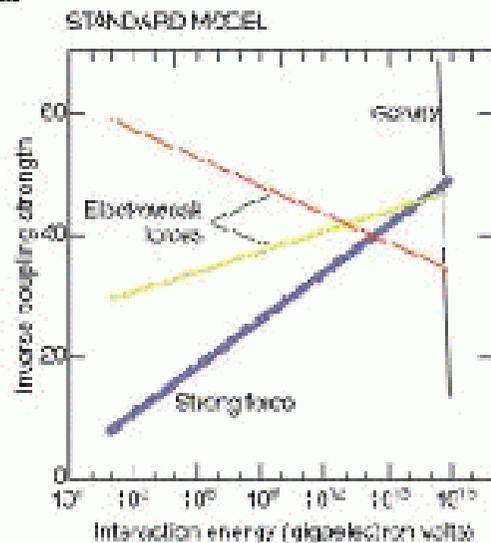


Le **interazioni deboli** ed **elettromagnetiche** hanno una intensità simile ad energie elevate ($Q^2 \sim M_W^2$)

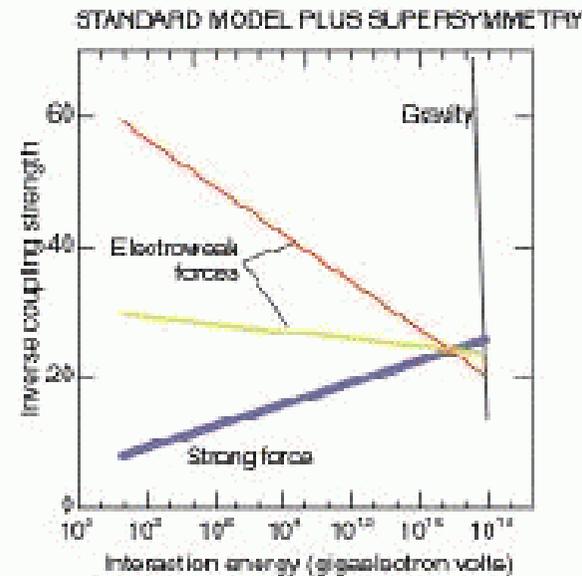
Supersimmetria



a.

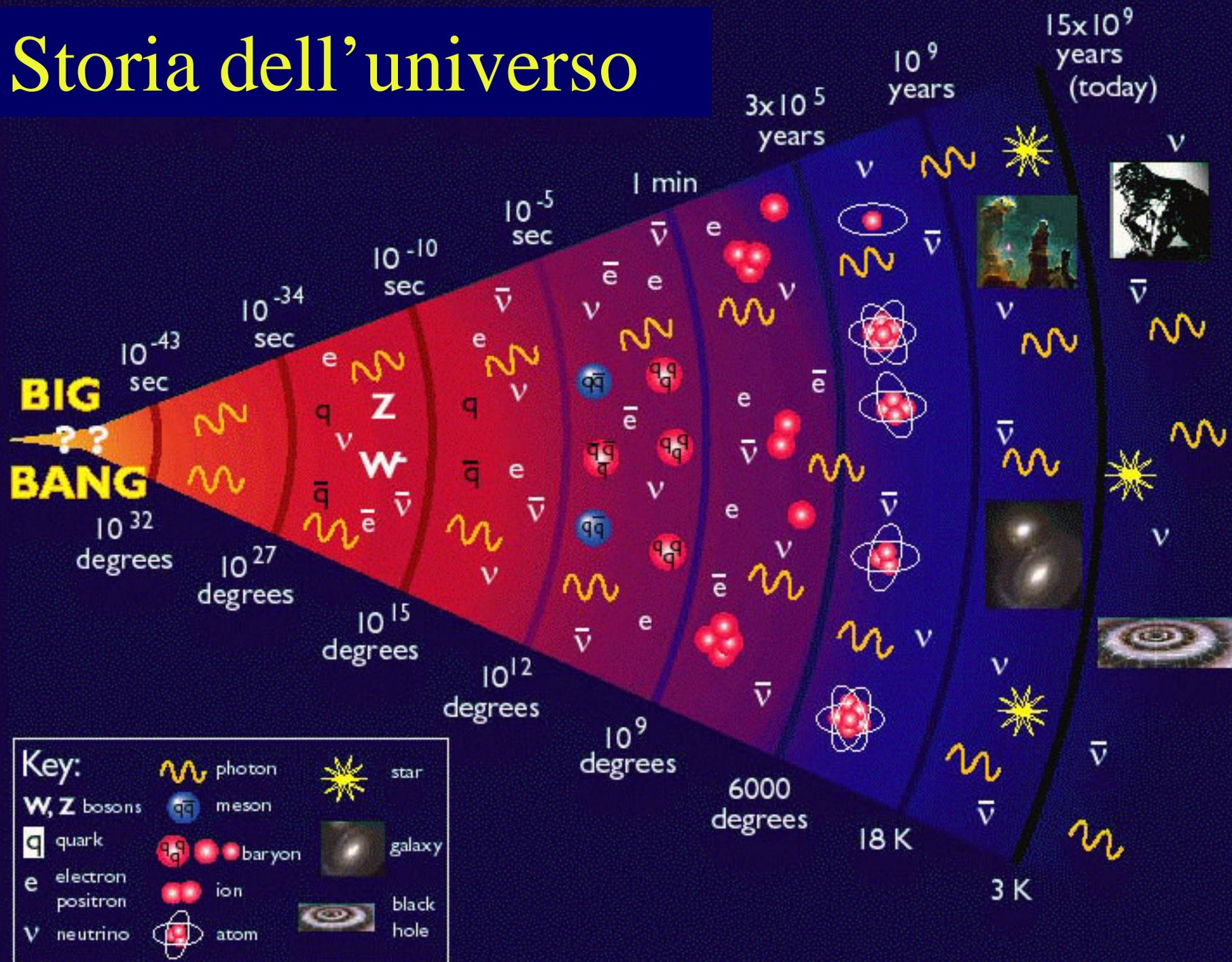


b.



Le costanti di accoppiamento delle tre differenti interazioni si unificano a $\sim 10^{16}$ GeV solo se si introduce la Supersimmetria ...

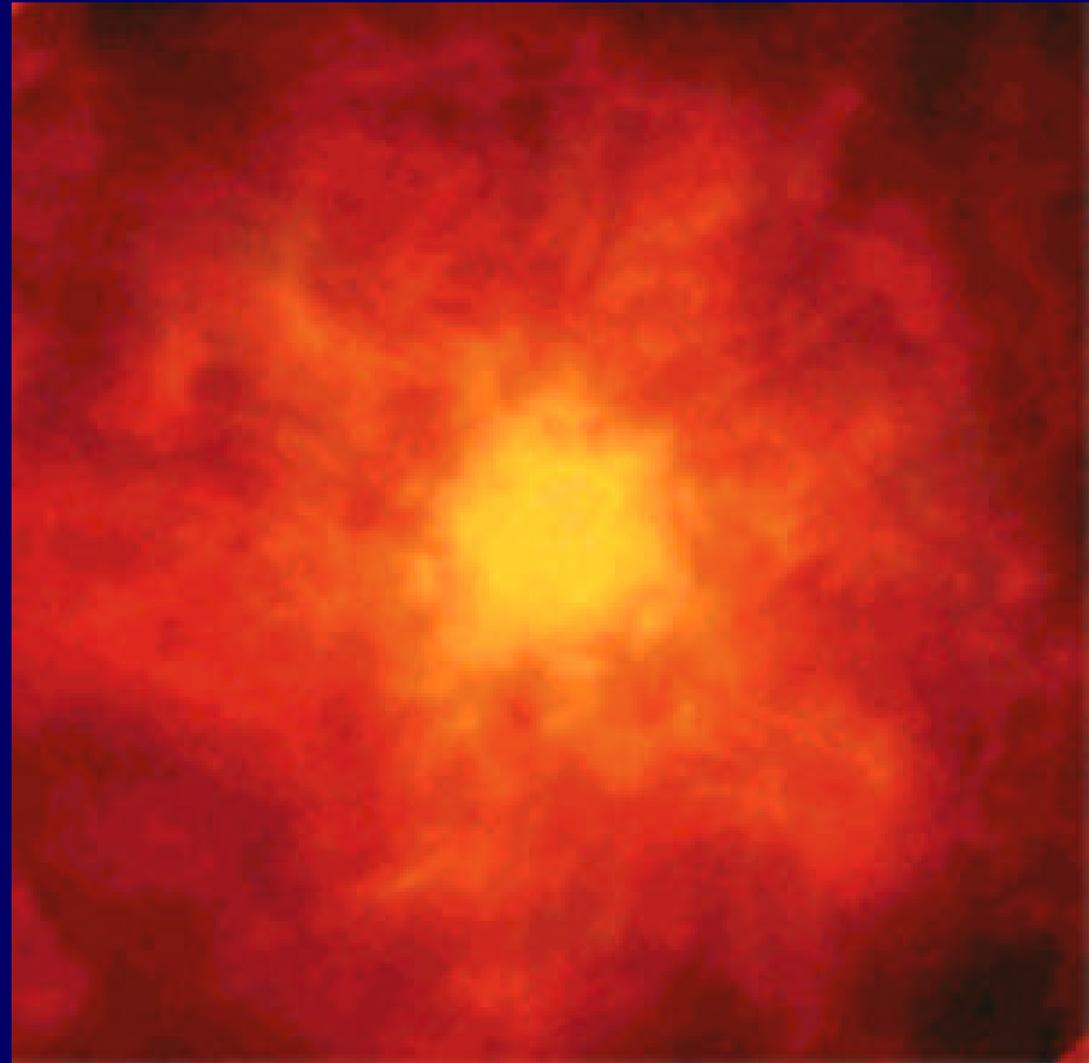
Storia dell'universo



Il Big Bang

Il Big Bang

0 secondi



Il Big Bang

Era della grande
unificazione

10^{-35} sec

L'inflazione spazio-
temporale cessa

Si rompe la Grande
Unificazione e si
distinguono forza
forte ed elettrodebole



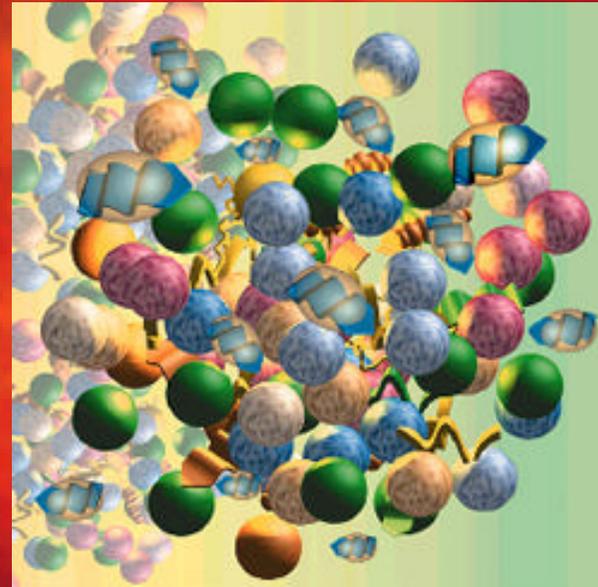
Il Big Bang

Era elettrodebole

1 miliardesimo di sec

Le forze elettrodeboli

si distinguono

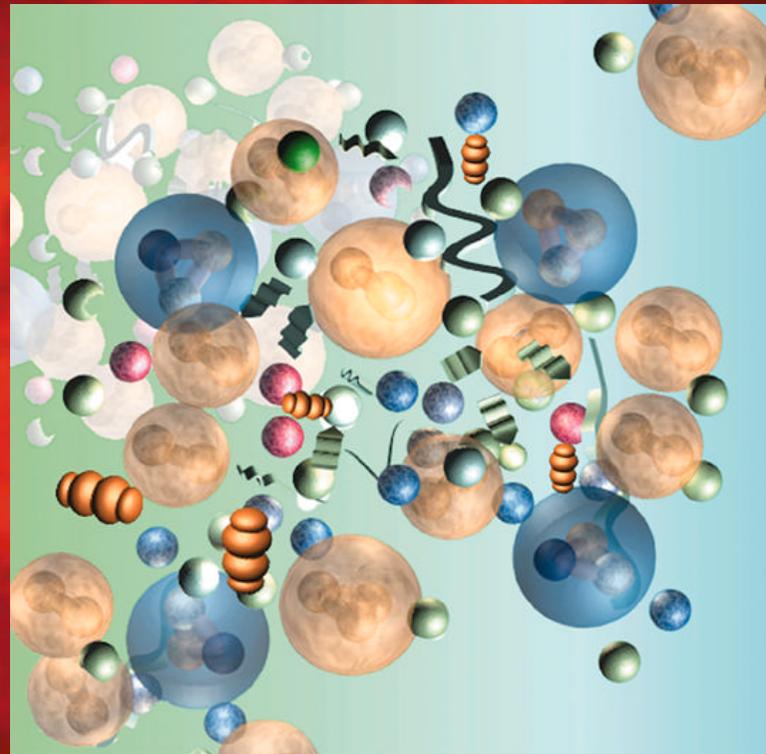


Il Big Bang

Era dei protoni

1 millesimo di sec

I Quark si combinano
per formare
Protoni e Neutroni

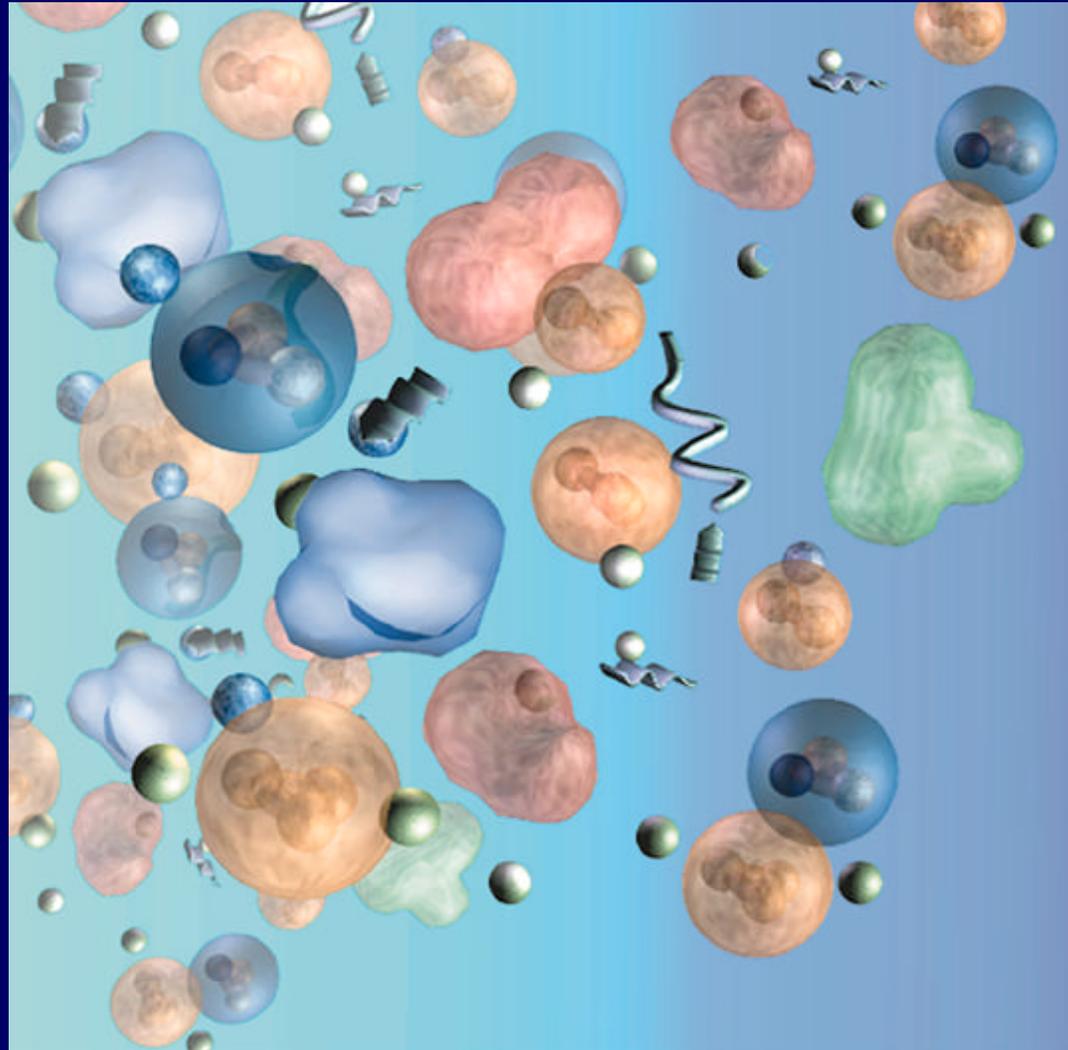


Il Big Bang

Era dei Nuclei

100 sec

I Protoni e Neutroni
si combinano per
formare
i nuclei di elio



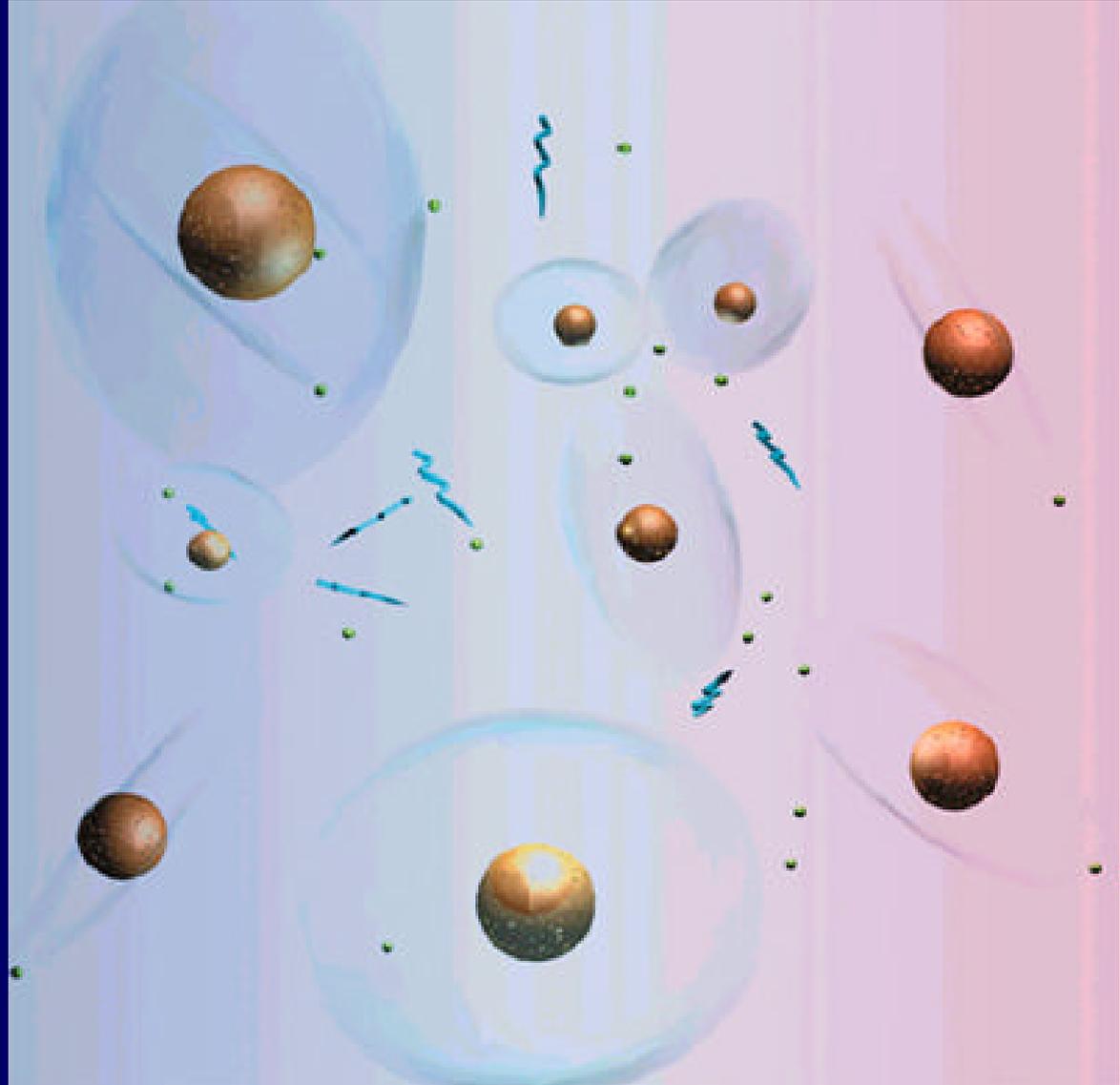
Il Big Bang

Era della luce e degli
atomi

300.000 anni

L'universo diventa
trasparente

e si riempie di luce



Il Big Bang

Formazione delle
Galassie

1

Miliardo di anni



Bibliografia

Modello Standard

QED

Richard Feynmann Ed. ADELPHI

La Fisica delle Particelle

Luciano Maiani Le Scienze Quaderni n° 103 Settembre 1998

Quarks & Leptons: an introductory Course in Modern Particle Physics

F. Halzen A.D. Martin Ed Wiley

Cultura Scientifica

Il senso delle cose

Richard Feynmann Ed. ADELPHI

Le Scienze Edizione italiana dello Scientific American

<http://www.lescienze.it>