Incontri di Fisica 2009, LNF, 7 Ottobre '09

Dalle Particelle Elementari alla Cosmologia: La Fisica Fondamentale e LHC

Guido Altarelli

Ordinario di Fisica Teorica all'Universita' di Roma Tre

Gia' Direttore dell'Unita' di Fisica Teorica del CERN

LHC partira' tra breve, ... lo speriamo!

Dopo l'incidente del 19 Settembre '08 riparte nel Nov. '09
[LEP si e' chiuso alla fine del 2000] Si parte con 3.5 TeV/fascio

Top priorita' di fisica LHC (ATLAS&CMS):

- Chiarire il meccanismo fisico della rottura della simmetria elettrodebole
- Ricerca di nuova fisica alla scala del TeV
- Identificazione delle particelle che costituiscono la Materia Oscura nell'Universo

Inoltre:

- LHCb: Decadimenti degli adroni con b (violazione di CP)
- ALICE: Collisioni di ioni pesanti & QCD ad alta densita' e T

⊕ A questo punto nuovi dati sono veramente necessari!!

CERN: in origine Comitato Europeo per la Ricerca Nucleare

In realta' e' un laboratorio per la fisica delle particelle.
Ricerca fondamentale non applicata (direttamente)

Quando il CERN e' sorto nel 1954 la ricerca in Europa era in fase di ricostruzione dalle rovine della guerra

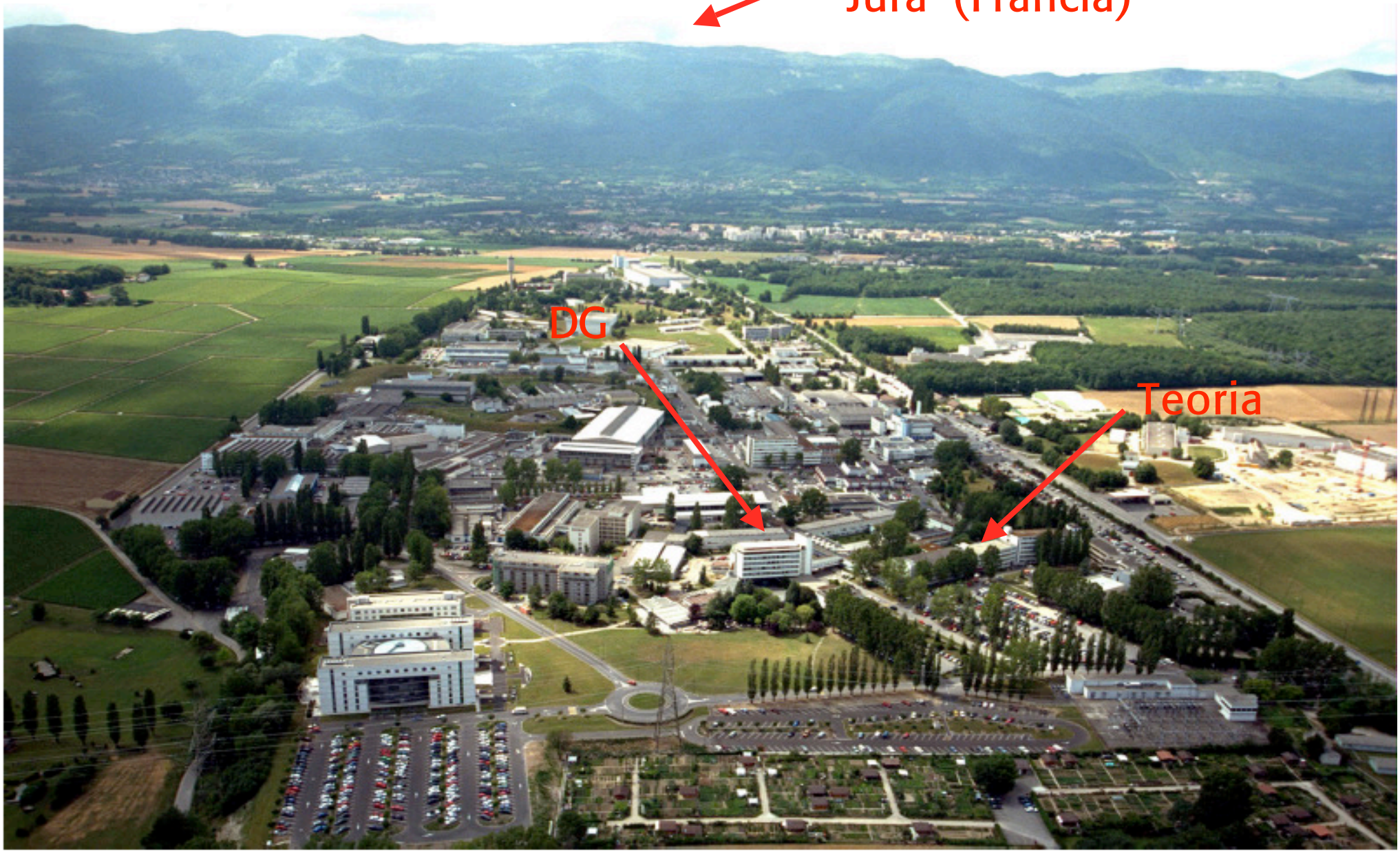
La crescita del CERN e' andata di pari passo con il recupero della scienza in Europa

A partire dagli anni '70 il gap con gli USA e' stato colmato e oggi addirittura il CERN e' all'avanguardia nella fisica delle particelle (in particolare il progetto LHC)

LHC: un anello di ~26 Km con magneti superconduttori a 1.9° K per accelerare due fasci di protoni (collisioni pp) fino a 7+7=14 TeV (1 TeV = 10^{12} eV ~ 1.6 erg)

CERN-Meyrin

Catena montuosa del Jura (Francia)

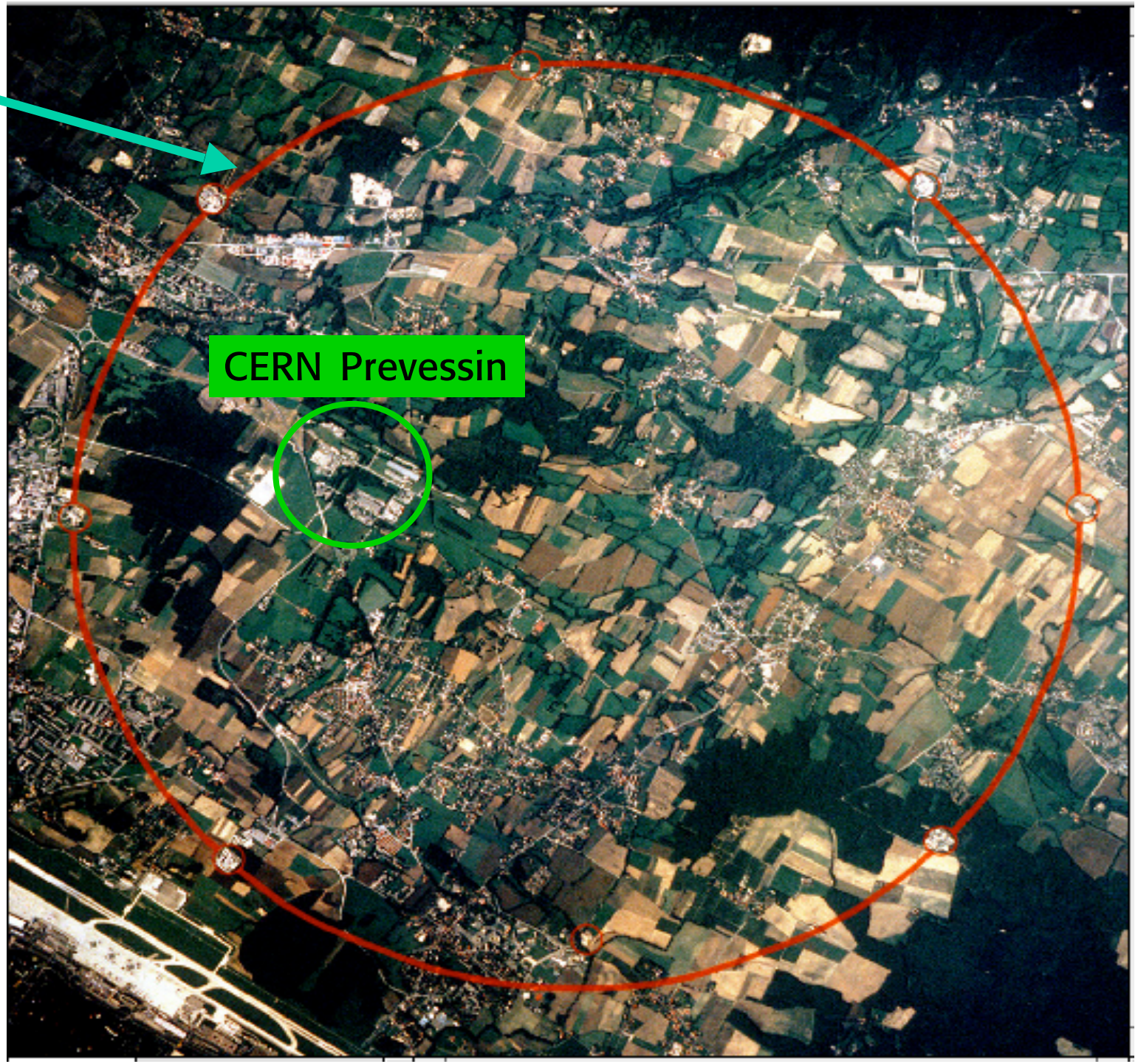


Tunnel
LEP/LHC
(26 Km)

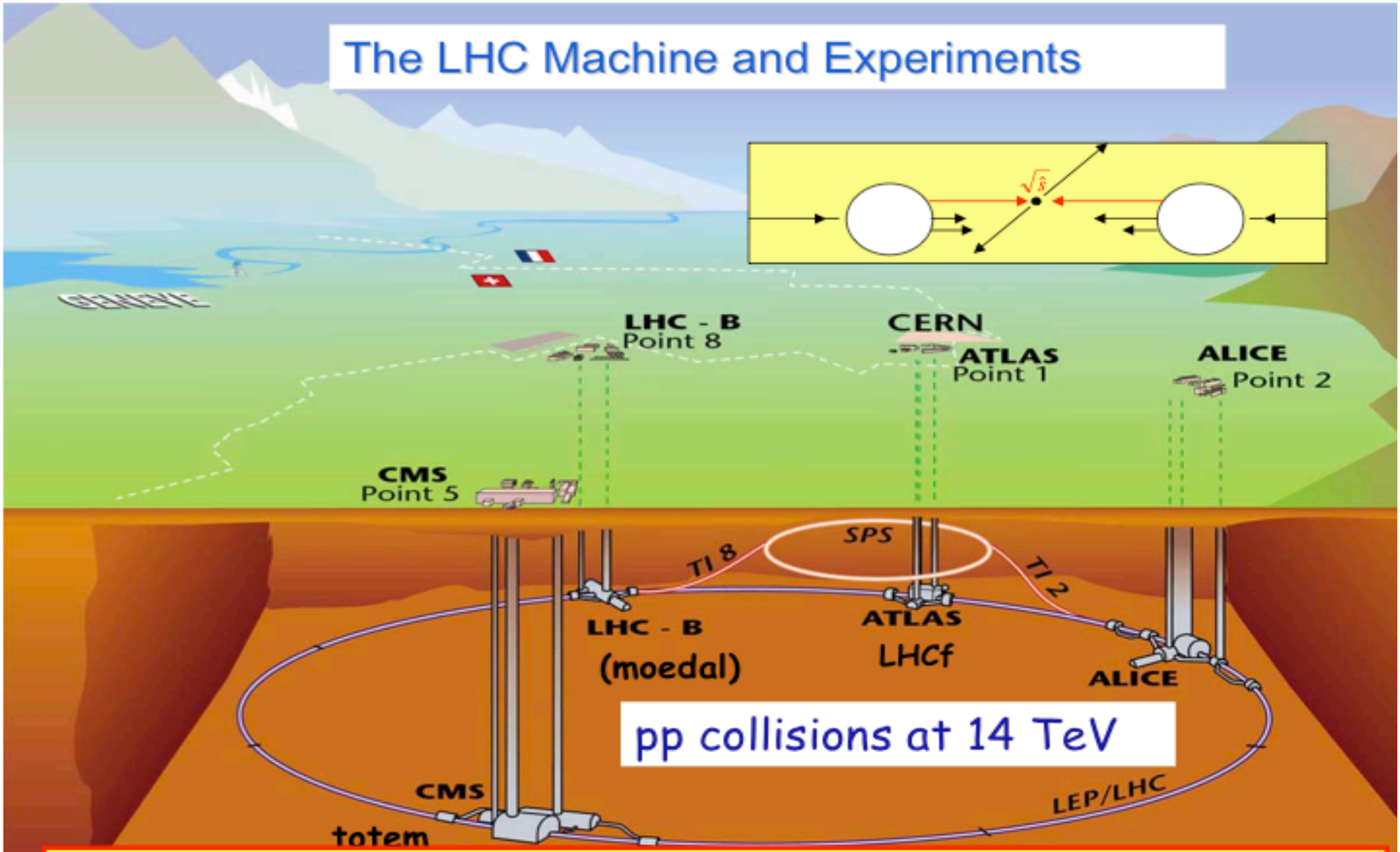
Frontiera
Fr-Ch

CERN Meyrin

Aeroporto



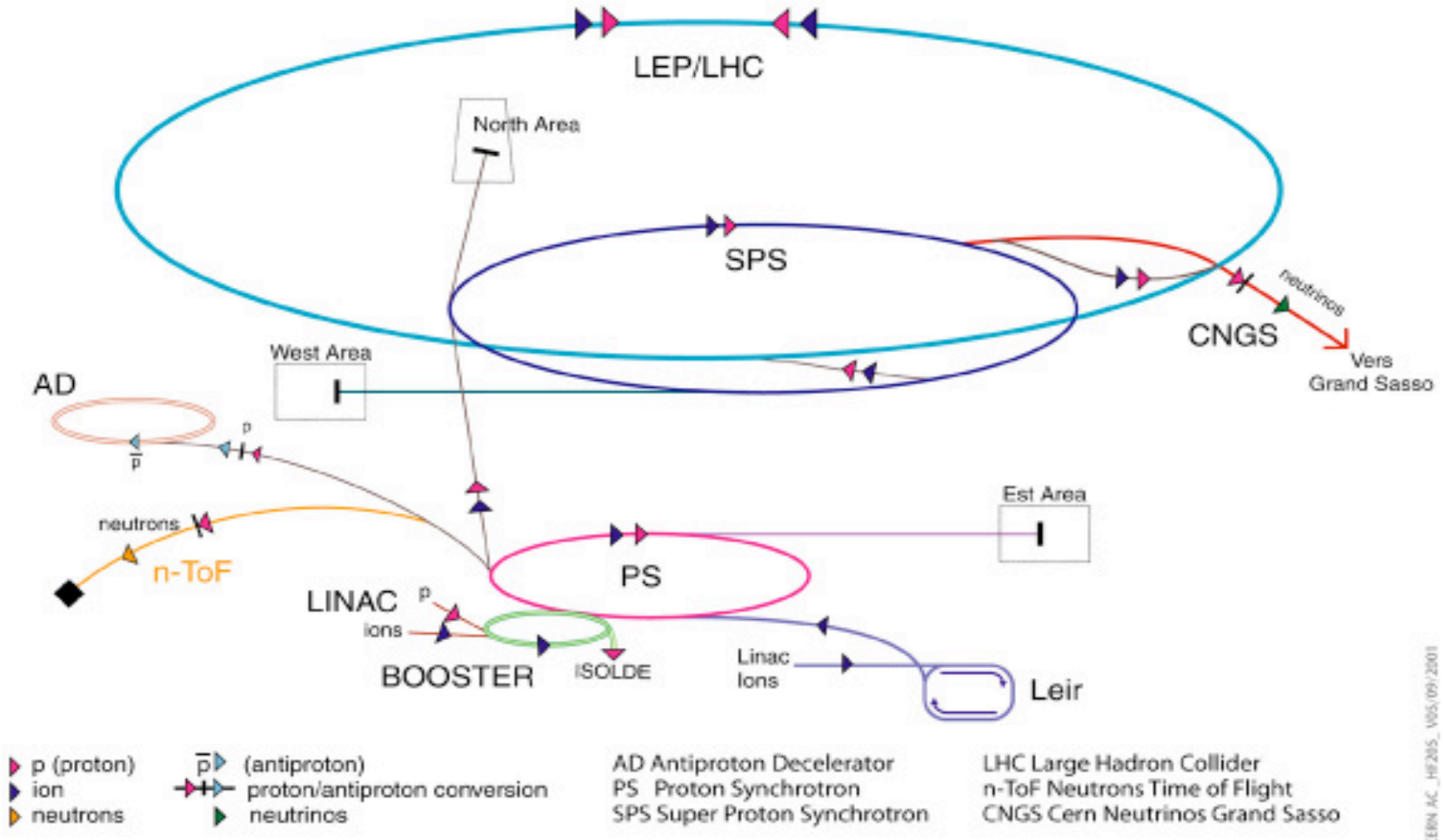
The LHC Machine and Experiments



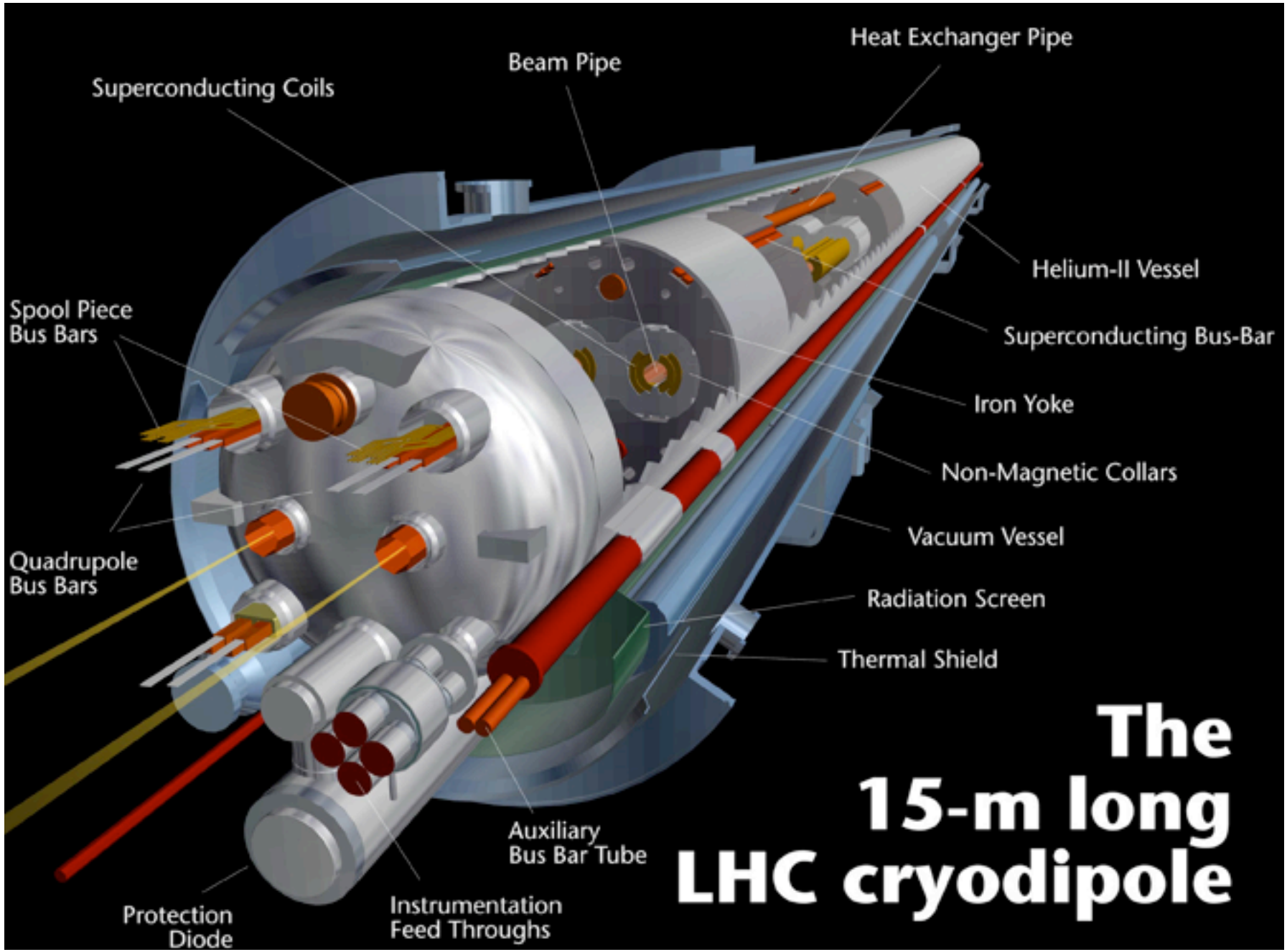
pp collisions at 14 TeV

- High Energy ⇒ factor 7 increase w.r.t. present accelerators
- High Luminosity (# events/cross section/time) ⇒ factor 100 increase

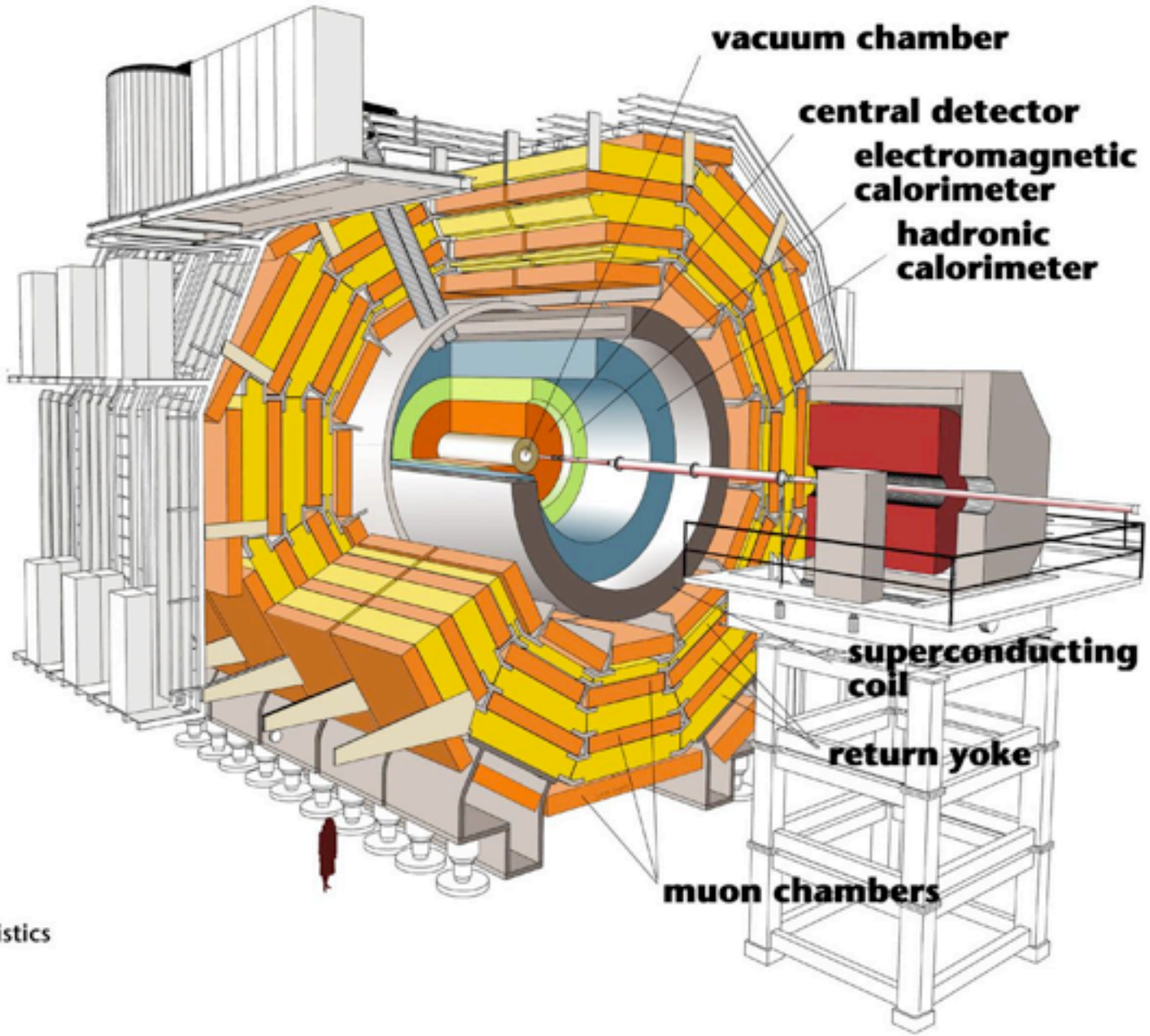
Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)



I magneti superconduttori del LHC (1.9 ^{0}K, 8-9 Tesla) sono istallati nel tunnel di ~26 Km

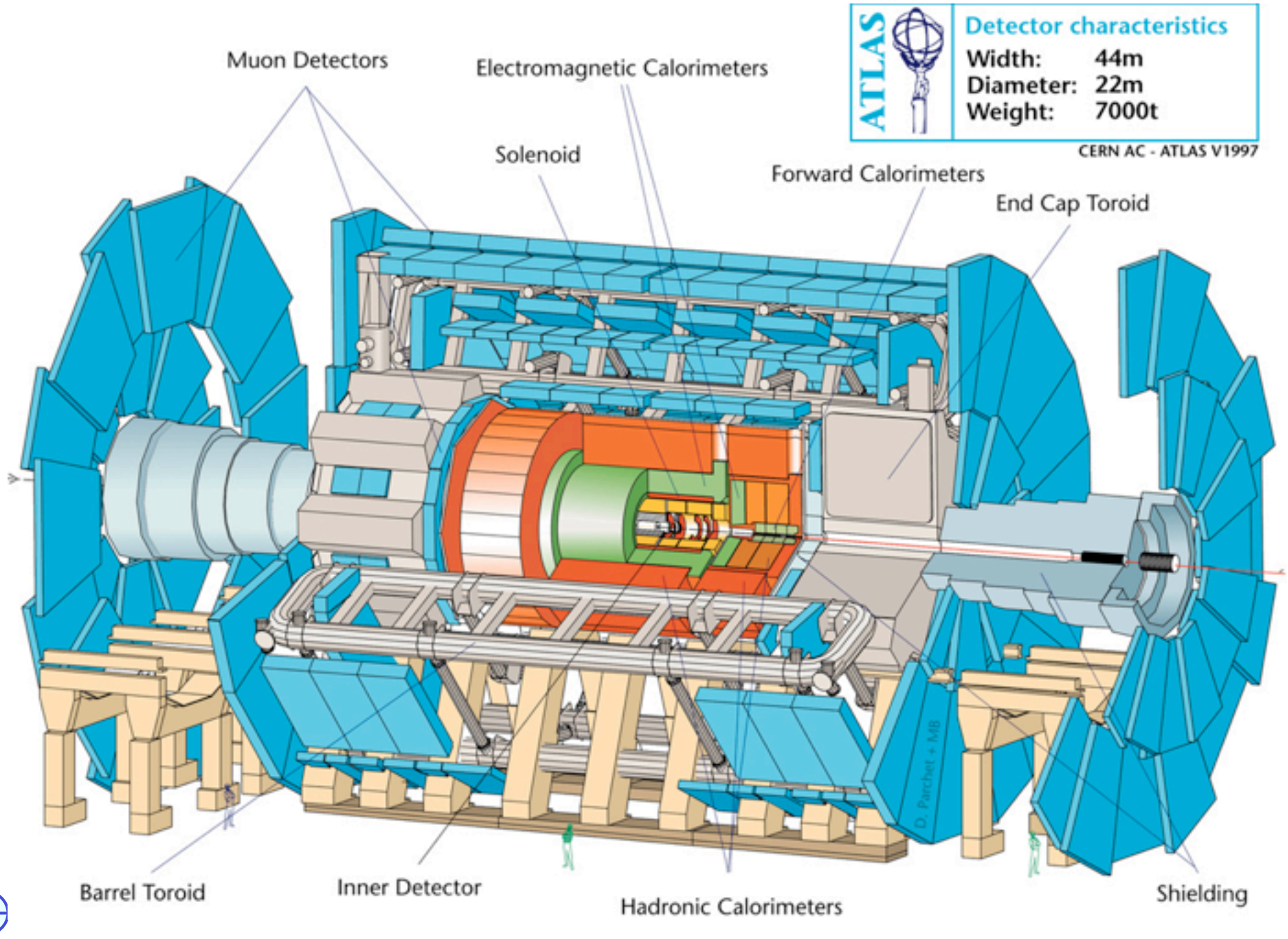


B= 8.3 Tesla i ~ 12000 A



Detector characteristics

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


ATLAS
Detector characteristics
Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t
CERN AC - ATLAS V1997
Muon Detectors
Electromagnetic Calorimeters
Solenoid
Forward Calorimeters
End Cap Toroid
Barrel Toroid
Inner Detector
Hadronic Calorimeters
Shielding
D. Parchet + MB

In fisica fondamentale:

C'e' un grande progresso verso l'unita'

Molti problemi comuni

Teorie quantistiche
e relativita'
Fisica delle particelle

Relativita' Generale
Cosmologia

Meccanica statistica

Gravita' quantistica
Superstringhe
Grand Unified Theories
.....
Materia Oscura
Energia del vuoto
Nucleosintesi
Bariogenesi
.....

Formalismo collegato in teoria dei campi

$e^{-\beta H}$ → e^{-iHt}

Boltzmann ($\beta=1/kT$)

Schrodinger H: hamiltoniana (energia)

Quattro interazioni fondamentali:

- forti (legame dei nuclei, adroni, quark e gluoni…)
- elettromagnetiche (luce, onde em, atomi, molecole….)
- deboli (radioattivita', energia delle stelle, neutrini…)
- gravitazionali (peso, attrazione newtoniana, astronomia)

Trascurabile in fisica delle particelle alle energie degli esperimenti fattibili → Negli atomi: $F_{em} \sim 10^{40} F_{Newton}$

La grande maggioranza dei fenomeni osservati sono descritti dal Modello Standard delle int. forti ed elettrodeboli (una teoria di gauge di campi relativistici quantizzati)+ la teoria classica della dinamica gravitazionale (relativita' generale)

(Ma non tutti i fenomeni!!)

Il Modello Standard

$$\underbrace{SU(3)}_{\text{Forti}} \otimes SU(2) \underbrace{\otimes}_{\text{Elettrodeboli}} U(1)$$

La simmetria $SU(3)_{colore}$ e' esatta

La simmetria ED e' rotta spontaneamente fino a $U(1)_Q$

Settore di Higgs (???)

Bosoni di Gauge

8 gluoni g^A

$W^{\pm}$, Z, γ

Campi di materia:
3 generazioni di quark (colorati) e di leptoni

$$\begin{bmatrix} u & u & u & \nu \\ d & d & d & e \end{bmatrix}$$

+ 2 repliche (???)

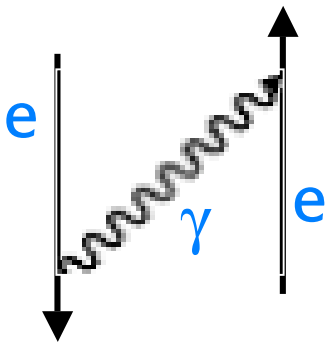
$m_W, m_Z \sim G_F^{-1/2} \sim 300$ GeV

Scala di Fermi per le masse (???)

1970-

Il Modello Standard della fisica delle particelle: il "colore", quark c e le correnti deboli neutre. Osservazione di Z e $W^{\pm}$, del leptone τ e dei quarks b e t

$$\begin{bmatrix} uuu\nu_e \\ ddde \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} ccc\nu_\mu \\ sss\mu \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} ttt\nu_\tau \\ bbb\tau \end{bmatrix}$$



3 "famiglie" o "generazioni" (???)

Forti ⊗ Elettrodeboli ⊗ Gravitazionali

QCD (Quantum ChromoDynamics)

8 gluoni g

QED e interazioni deboli

$W^{\pm}$, Z, γ

Higgs?

Classica: Einstein

Quantistica ???? Corde?

G: gravitone

Teoria basata su una simmetria "di gauge" perfettamente formulata e ben verificata salvo il settore di Higgs (masse dei W,Z, q & l)

Le generazioni sono identiche (stesse cariche etc) salvo che le masse sono differenti

Leptons spin =1/2			Quarks spin =1/2		
Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-0.13)\times10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	–1	d down	0.005	–1/3
ν_M middle neutrino*	$(0.009-0.13)\times10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	–1	s strange	0.1	–1/3
ν_H heaviest neutrino*	$(0.04-0.14)\times10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	–1	b bottom	4.2	–1/3

Quark e leptoni pesanti sono instabili e decadono per effetto delle interazioni deboli (le uniche che cambiano il "sapore")

I "portatori" delle interazioni

γ e g sono senza massa, mentre $W^{\pm}$ e Z sono molto pesanti

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	–1
W^+ W bosons	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin =1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Interazioni forti

Interazioni deboli

QCD e' una teoria "semplice" [quark e gluoni colorati]

$$L = -\frac{1}{4}\sum_{A=1}^{8} F^{A\mu\nu}F^{A}_{\mu\nu} + \sum_{j=1}^{n_f} \bar{q}_j(i\widehat{D} - m_j)q_j$$

gluoni quark e gluoni

$$D_\mu = \partial_\mu - ie_s g_\mu \qquad \widehat{D} = D_\mu \gamma^\mu$$

$$F^{A}_{\mu\nu} = \partial_\mu g^{A}_{\nu} - \partial_\nu g^{A}_{\mu} - e_s C_{ABC} g^{B}_{\mu} g^{C}_{\nu}$$

Ma con un contenuto fisico molto ricco:

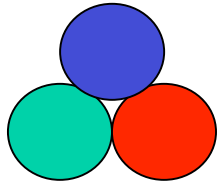
- Lo spettro complesso degli adroni
- Confinamento
- Liberta' asintotica (Premio Nobel 2004)
- Transizioni di fase

[Deconfinamento (plasma q-g), ……]

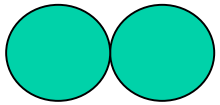
• • •

Heavy ion collisions (CERN, RHIC, LHC)

Tutti gli adroni osservati sono composti senza colore di quark



Barioni: qqq



Mesoni: $q\bar{q}$

Per esempio:

Protone p: uud

Neutrone n: ddu

Pione π^+: $u\bar{d}$

Il colore e' essenziale per la statistica di Fermi

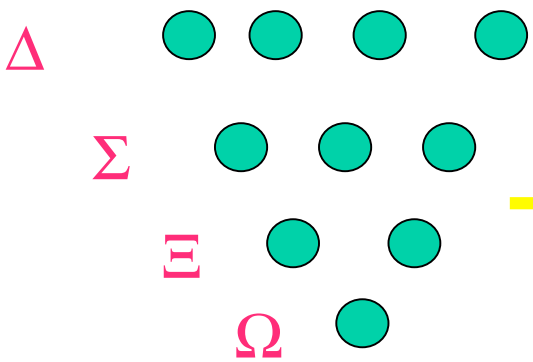
Lo stato Δ^{++} con spin 3/2 = $u\uparrow u\uparrow u\uparrow$

e' simmetrico in spazio e spin ma antisimm. in colore

e per la spiegazione dello spettro osservato

Per es. Il "decupletto"

I barioni osservati sono ottetti e decupletti



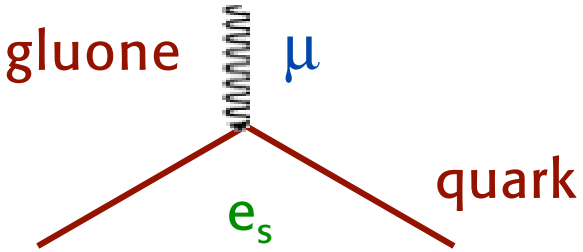
ddd ddu duu uuu

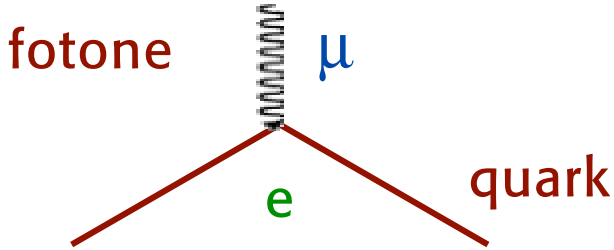
dds dus uus

dss uss

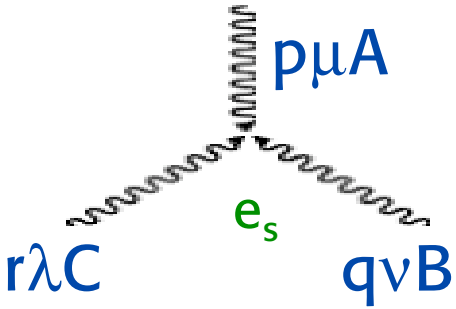
sss

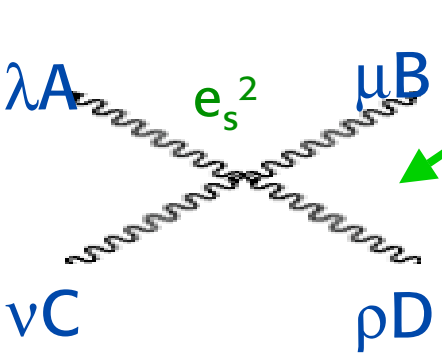
Vertici d'interazione in QCD





In QED il fotone e' accoppiato a tutte le particelle cariche ma lui e' neutro.
In QCD i gluoni sono colorati
E quindi auto accoppiati





e_s: accoppiamento forte

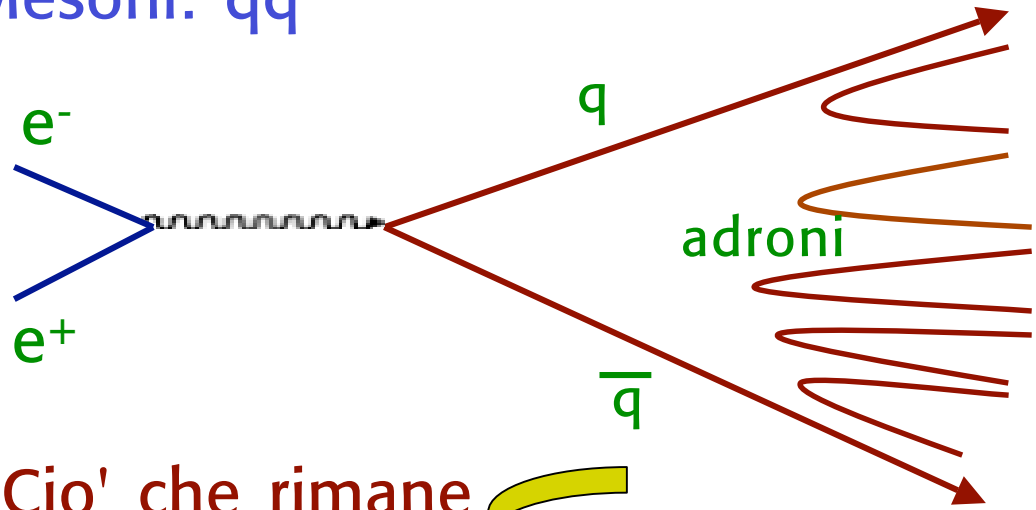
$$\alpha_s = \frac{e_s^2}{4\pi}$$

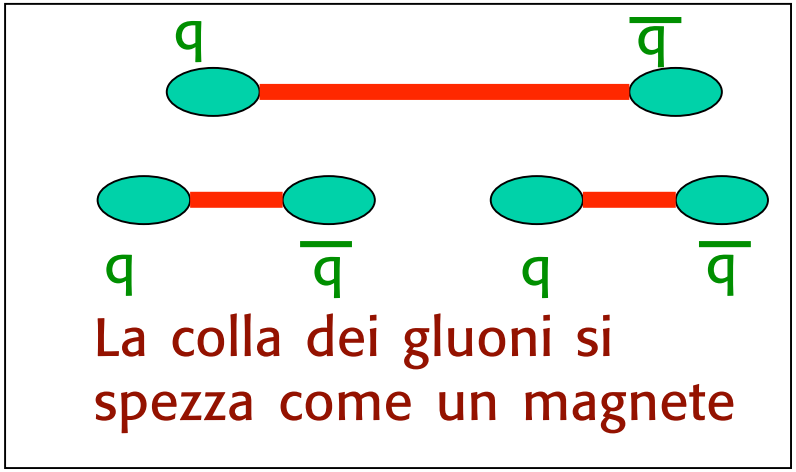
Il confinamento: non ci sono particelle colorate libere

Potenziale $q\text{-}\bar{q}$: $V(r) \approx C_F \left[\frac{\alpha_s(r)}{r} + \ldots + \sigma r \right]$

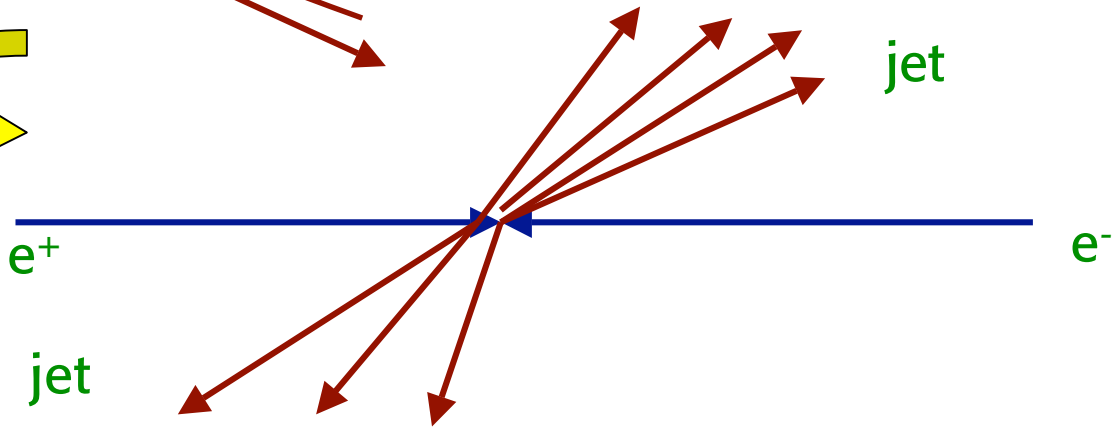
short — long dist.

Barioni: qqq
Mesoni: $q\bar{q}$

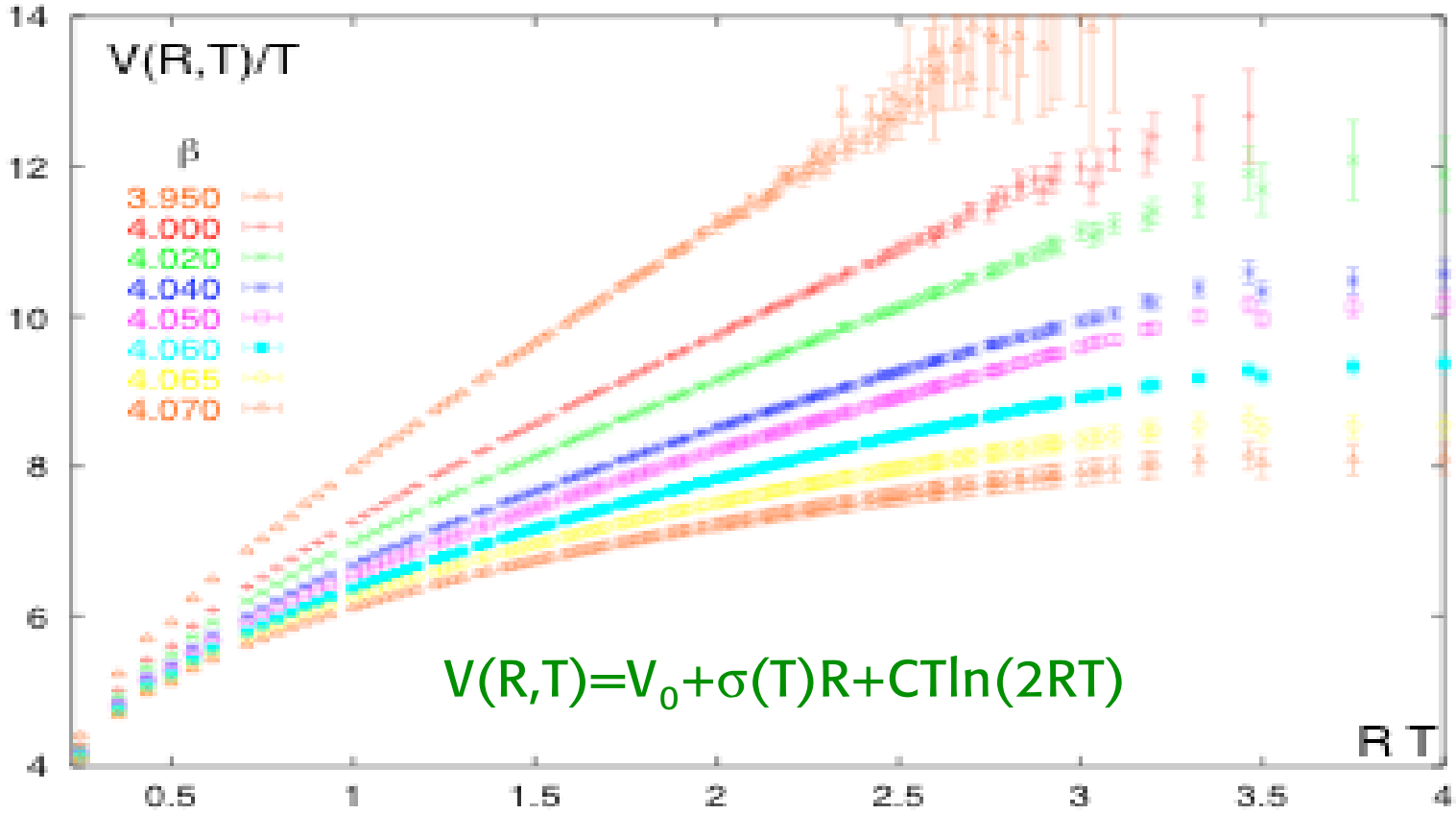




Cio' che rimane del quark e' un getto di adroni senza colore



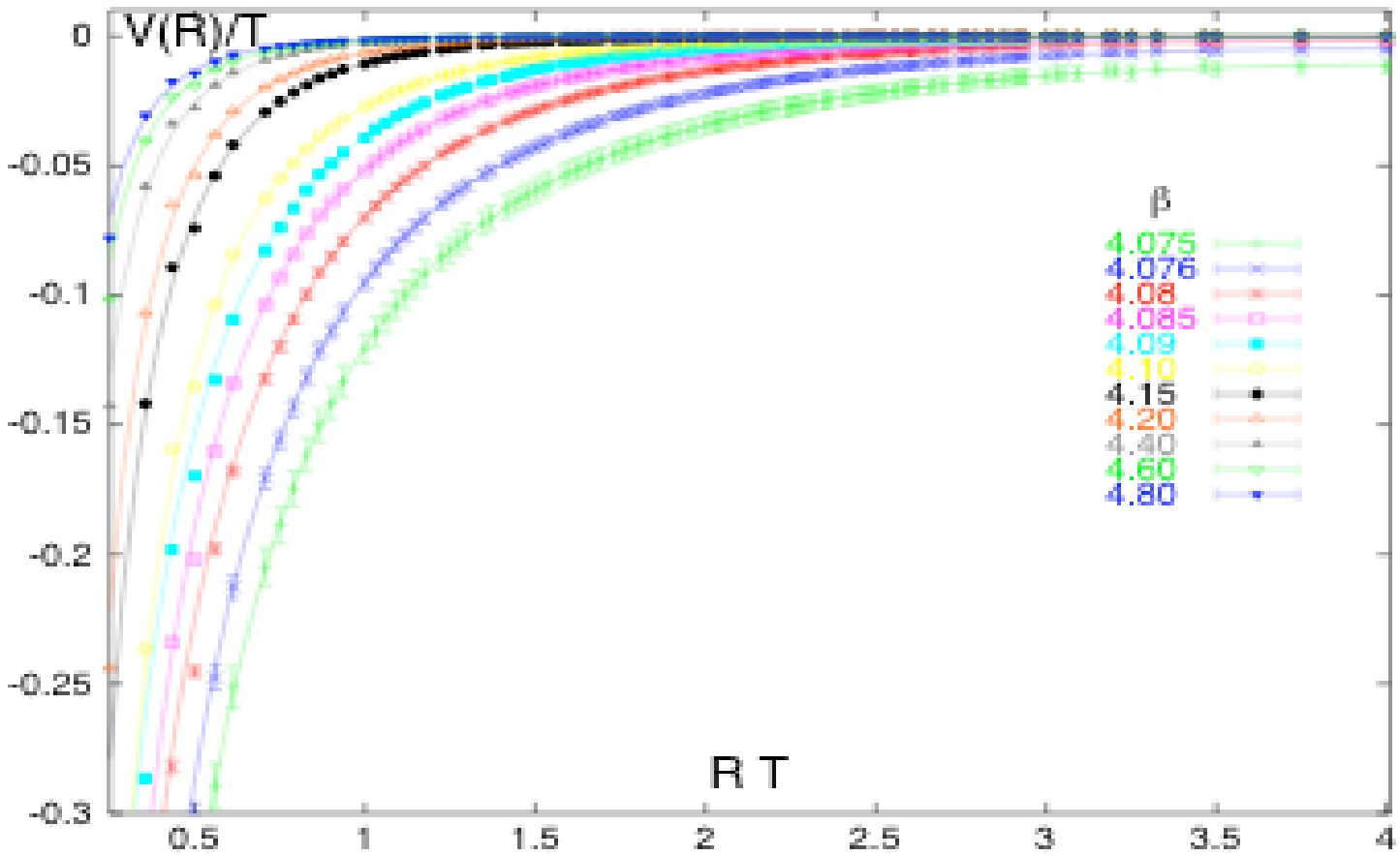
Potenziale quark-antiquark sul reticolo (simulazione della QCD su uno spazio-tempo finito e discretizzato)



Alzando la temperatura il coefficiente σ del termine lineare in r decresce

Alla temperatura critica T_C si annulla: non piu' confinamento!

A $T>T_C$ la pendenza in r rimane zero



T_C dipende dal numero di sapori di quark

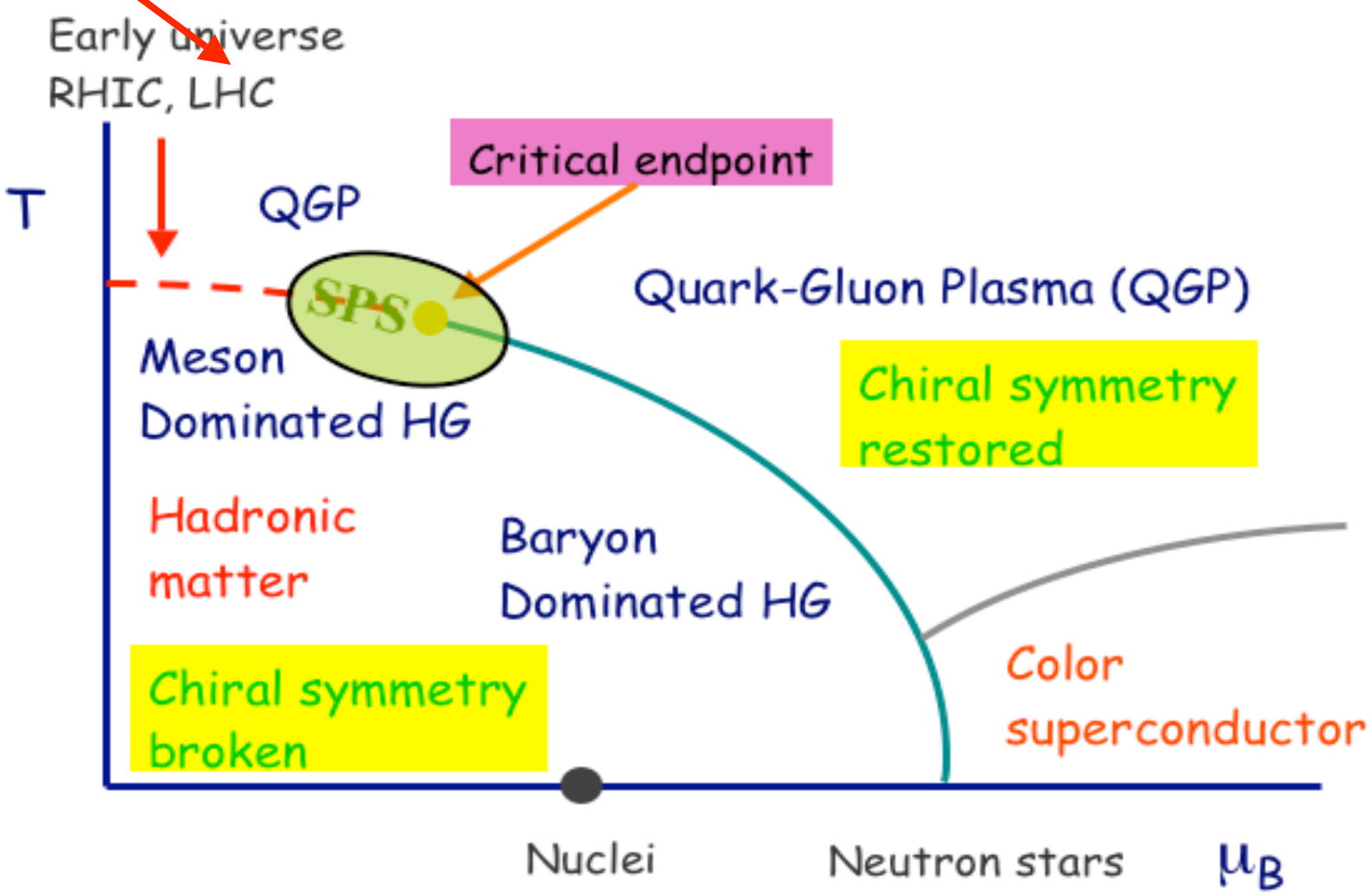
$T_C \sim 175$ MeV

Un evento a due getti nel rivelatore DELPHI a LEP

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

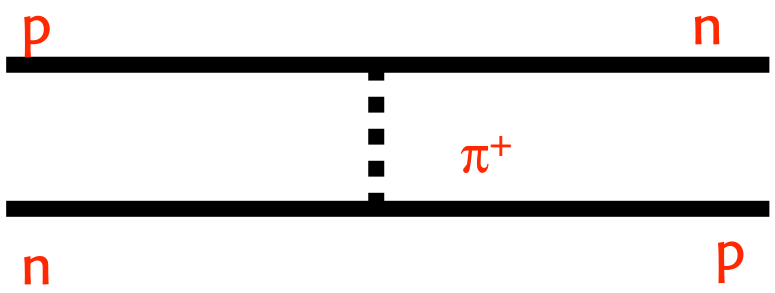
ALICE (studio di collisioni tra ioni pesanti a LHC)

QCD Phase Diagram



Il confinamento spiega il corto raggio delle int. nucleari mentre i gluoni senza massa dovrebbero corrispondere a lungo raggio

I nucleoni sono senza colore: possono solo scambiare particelle senza colore (pioni non gluoni)



$V \sim \exp(-m_\pi r)/r$

Il range delle forze nucleari e' determinato dalla massa del pione: $r \sim m_\pi^{-1} \sim 10^{-13}$ cm

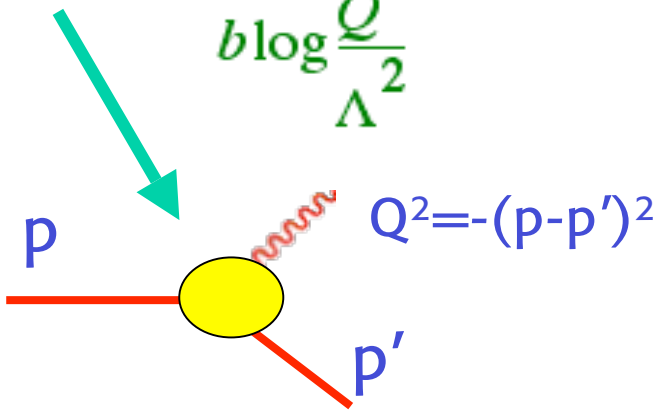
Materia->Molecole->Nuclei->Protoni, Neutroni->Quarks

Finisce qui? Pare di si:
Nessuna indicazione di componenti dallo spettro, dalle transizioni osservate

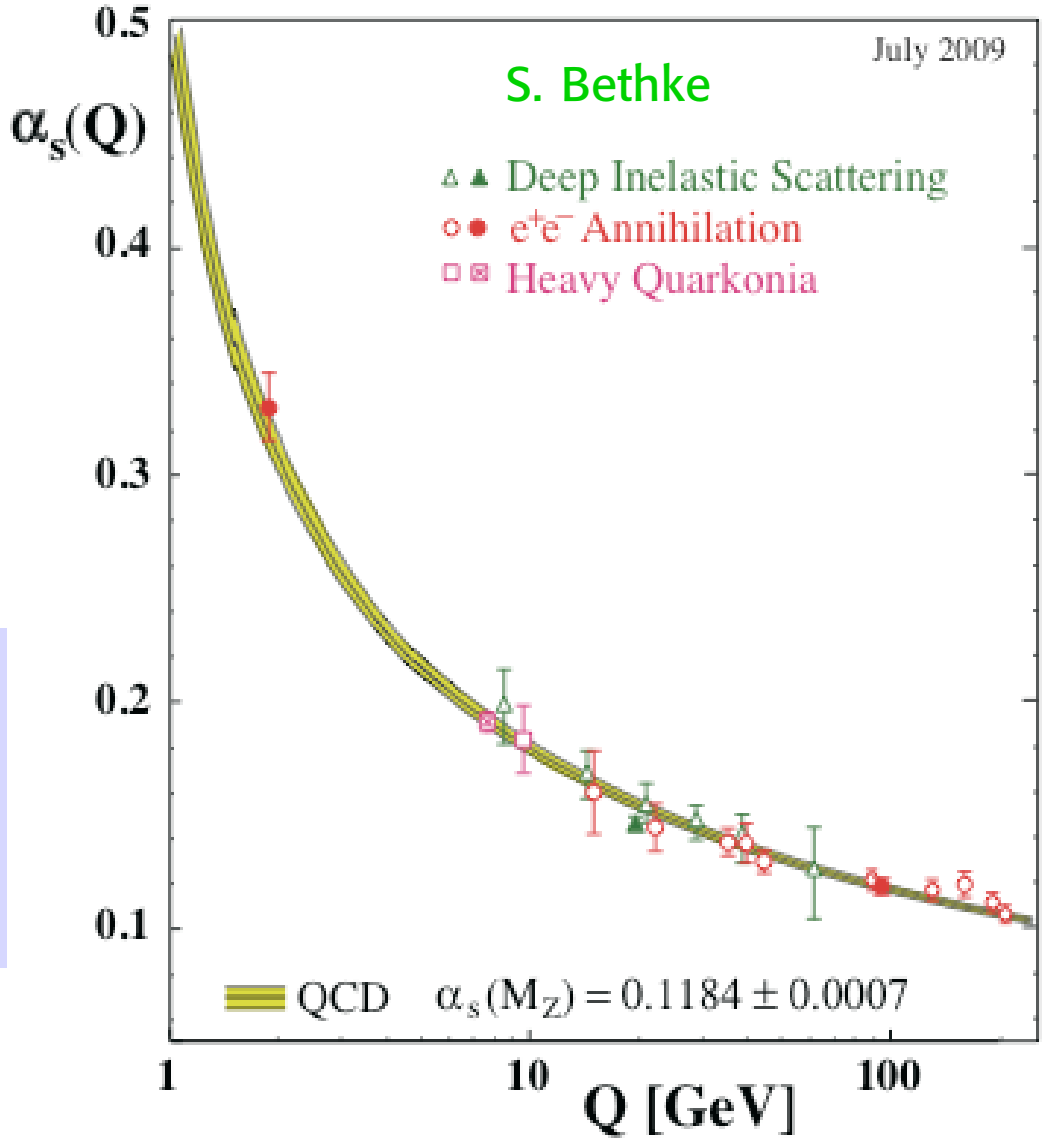
Confinati
Puntiformi $r < 10^{-17}$ cm
6 sapori e 3 colori

Liberta' asintotica: per le correzioni quantistiche l'accoppiamento effettivo decresce con Q, il momento trasferito

$$\alpha(Q^2) \cong \frac{1}{b \log \frac{Q^2}{\Lambda^2}} (1 + \ldots.)$$

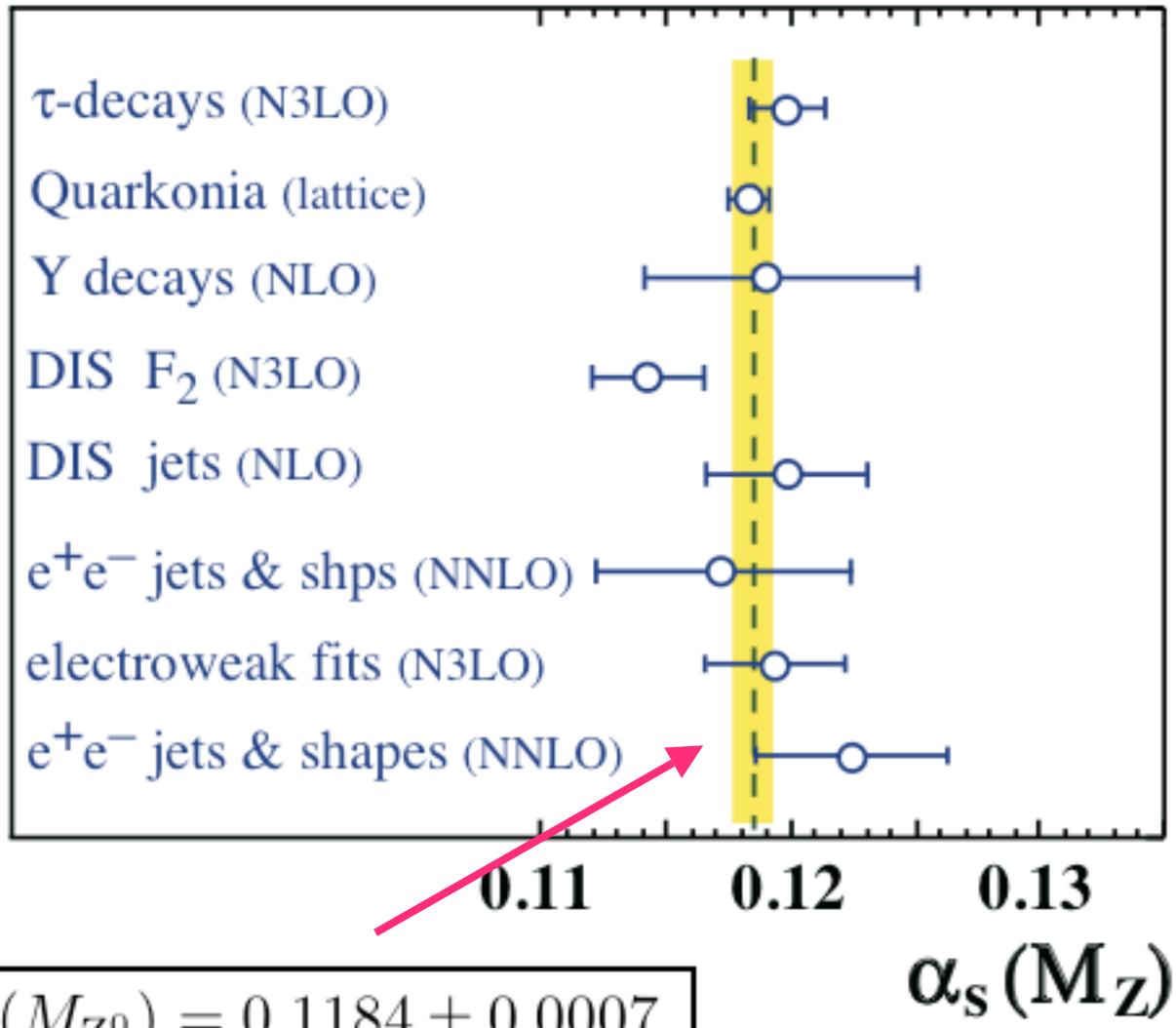


Le misure di $\alpha_s(Q)$ a differenti scale mostrano chiaramente
la diminuizione di $\alpha_s(Q)$



Measurements of $\alpha_s(m_Z)$ $(\overline{MS})$

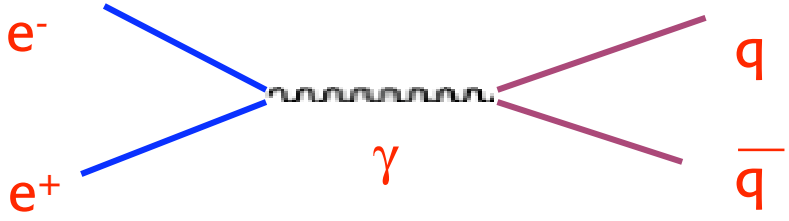
S.Bethke



$$\alpha_s(M_{Z^0}) = 0.1184 \pm 0.0007.$$

SU(N_C): molti processi misurano N_C (n. colori di ogni q)

Esempio: • $R=\sigma(e^+ e^- \to \text{adroni})/\sigma(e^+ e^- \to \mu^+ \mu^-))$



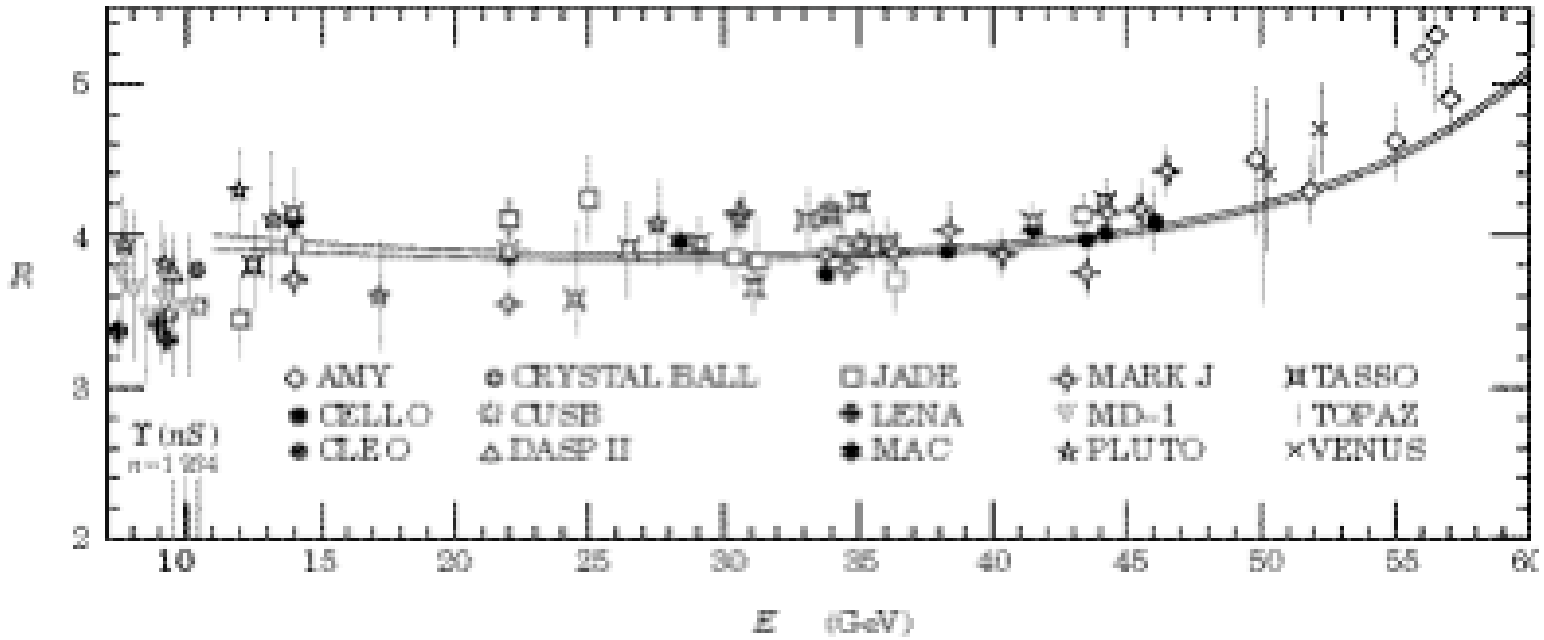
q=d,s,b,u,c

Sopra la soglia $b\bar{b}$ e sotto m_Z

$$R = N_C \cdot \left[3 \cdot \frac{1}{9} + 2 \cdot \frac{4}{9}\right] = \left(N_C \cdot \frac{11}{9}\right)$$

d,s,b u,c

(Trascurando piccole correz. calcolabili)



← 11/3

La teoria ED: $\mathcal{L} = \mathcal{L}_{symm} + \mathcal{L}_{Higgs}$

$$\mathcal{L}_{symm} = -\frac{1}{4}[\partial_\mu W^A_\nu - \partial_\nu W^A_\mu - ig\varepsilon_{ABC} W^A_\mu W^B_\nu]^2 + -\frac{1}{4}[\partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu]^2 + + \bar{\psi}\gamma^\mu[i\partial_\mu + g W^A_\mu t^A + g' B_\mu \frac{Y}{2}]\psi$$

$$\psi = \psi_{R,L} = \frac{1}{2}(1 \pm \gamma_5)\psi$$

Una teoria chirale:

$$(t, Y)_R \neq (t, Y)_L$$

$$Q = t^3 + Y/2$$

$$\mathcal{L}_{Higgs} = |[\partial_\mu - ig W^A_\mu t^A - ig' B_\mu \frac{Y}{2}]\phi|^2 + + V[\phi^\dagger\phi] + \bar{\psi}\Gamma\psi\phi + h.c$$

with

$$V[\phi^\dagger\phi] = \mu^2(\phi^\dagger\phi)^2 + \lambda(\phi^\dagger\phi)^4$$

$\mathcal{L}_{symm}$: ben verificata (LEP, SLC, Tevatron…), $\mathcal{L}_{Higgs}$: ~ non verif.

Test di precisione -> $m_H < 186$ GeV

Ma l'Higgs non e' stato visto a LEP2: $m_H > 114.4$ GeV;

Sola certezza $m_W = m_Z \cos\theta_W$ ⟶ l'Higgs e' un doppietto

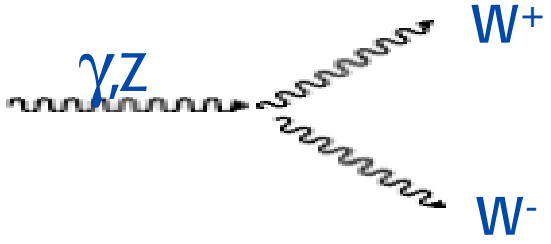
Gli esperimenti provano che i couplings sono simm.

(accuratezza pochi 0/00)

Relazioni predette dalla simm. di gauge:

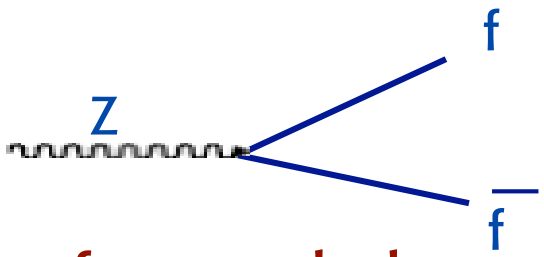
[Con piccole correzioni radiative calcolate $f(m_t^2, \log m_H)$]

- $g\sin\theta_W = e;$ • $g'/g = tg\theta_W;$ • $m_W = m_Z\cos\theta_W$
- $\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8m_W^2};$
- $\frac{g_{WW\gamma}}{g_{WWZ}} = tg\theta_W$



- $\frac{g}{2\cos\theta_W}\bar{\psi}\gamma_\mu(g_V^f - g_A^f\gamma_5)\psi Z^\mu$

$$\begin{cases} g_A^f = \pm\frac{1}{2} \\ g_V^f/g_A^f = 1 - 4|Q^f|\sin^2\theta_W \end{cases}$$



f=u,c,t, d,s,b,
e,μ, τ, ν's

Tuttavia la simmetria e' completamente rotta nello spettro!

La simmetria di gauge richiede

Tutti i bosoni di gauge, tutti i fermioni } Masse zero

Ma m_W, m_Z differenti da zero

$m_Z \sim M_{\text{molybdenum atom}} \sim 91$ GeV ~ 97 nucleoni

Nello spettro: non c'e' nemmeno traccia della simmetria globale SU(2) !

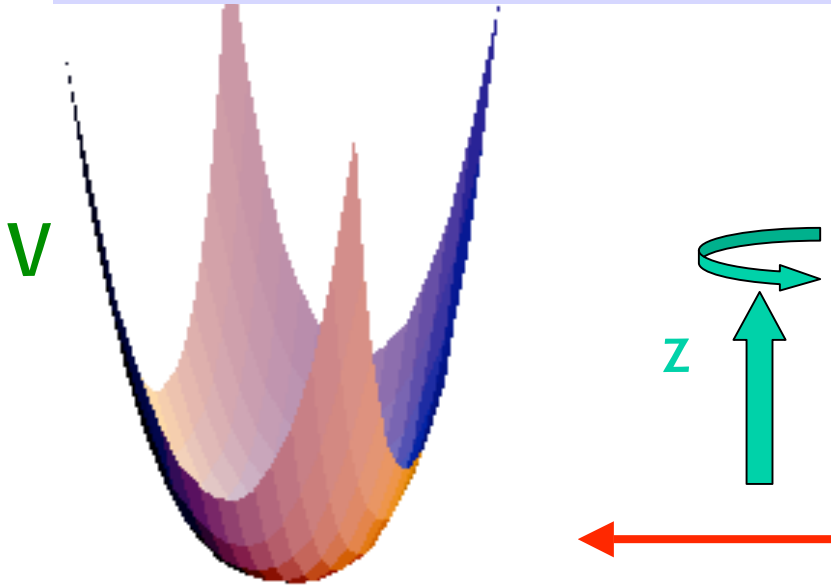
Per esempio, $m_t \gg m_b > 0$ (m_t: 171, m_b: 4.5 GeV)

Rottura spontanea di simmetria

Correnti, cariche simmetriche. Spettro totalm. non simmetrico

RSS in teorie di gauge $\longrightarrow$ meccanismo di Higgs

Rottura Spontanea di Simmetria (RSS)



Si ha quando il minimo del potenziale V non e' unico

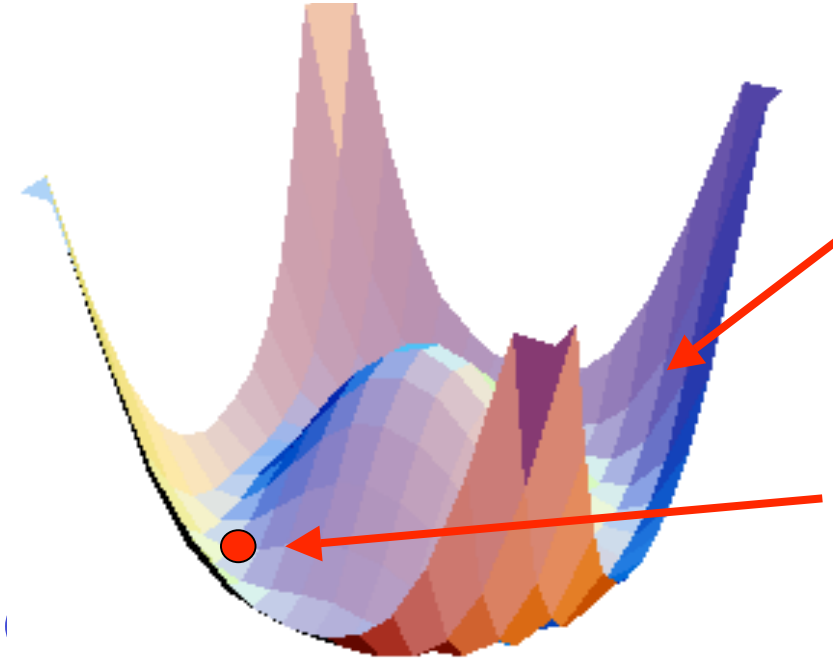
Qui la simmetria e' per rotazioni intorno a z

Unico minimo $\phi=0$: nessuna RSS

$$V= |\mu|^2\phi^2+\lambda\phi^4$$

Una linea di minimi $\phi^2=\mu^2/2\lambda$: RSS

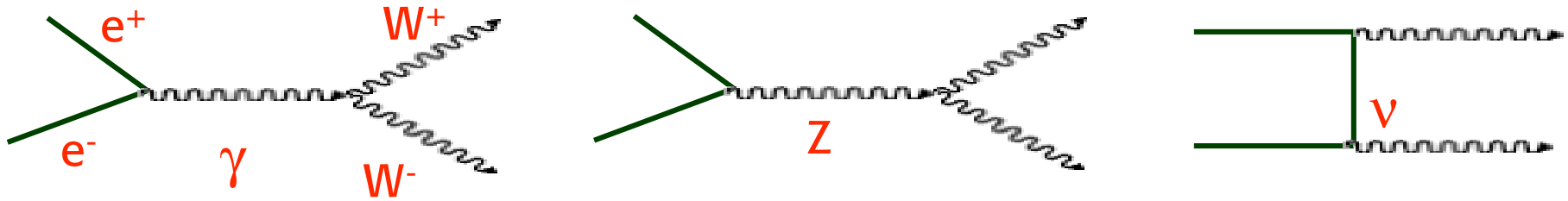
$$V= - |\mu|^2\phi^2+\lambda\phi^4$$

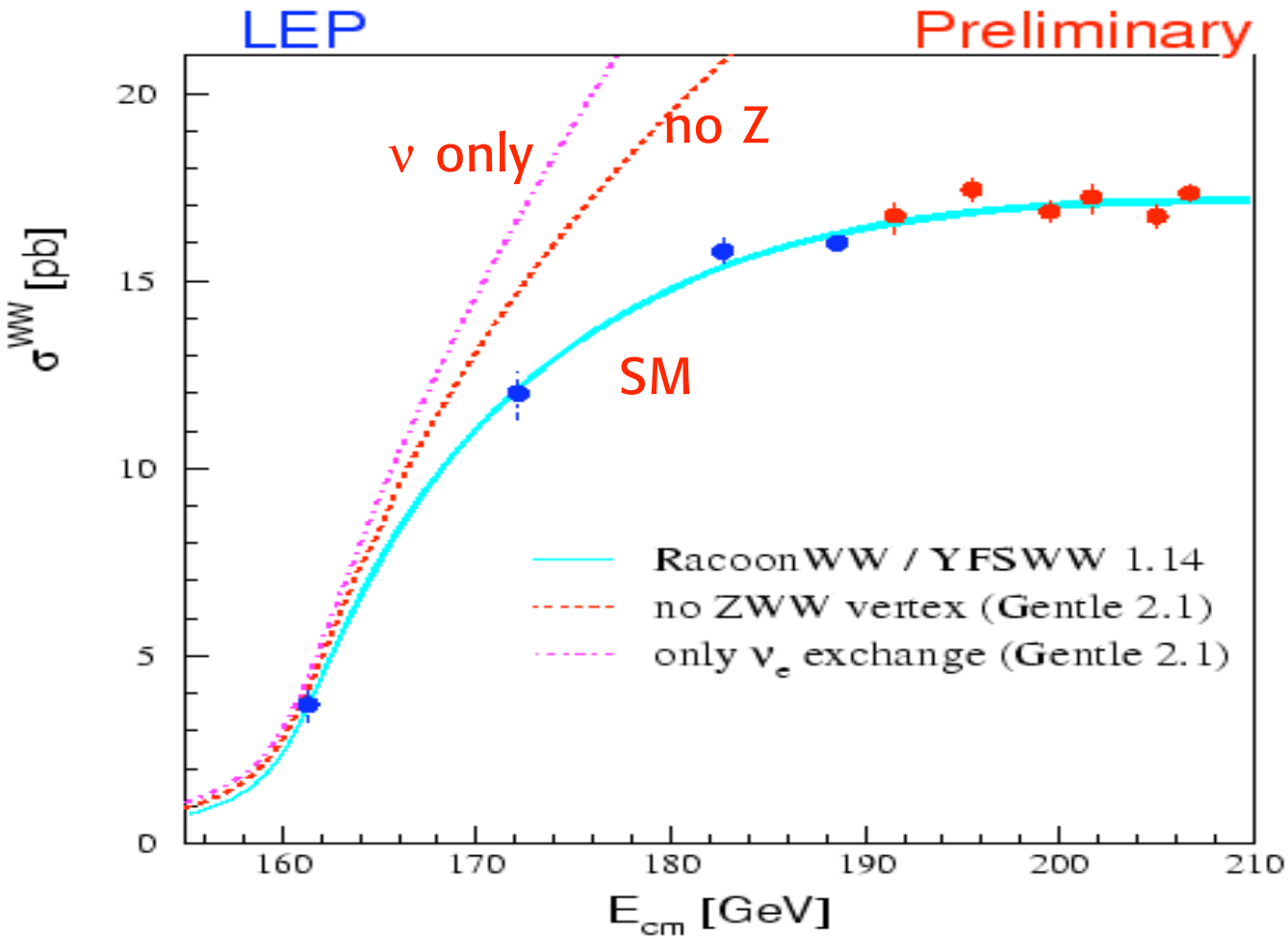


La simmetria e' rotta quando il sistema sceglie un particolare punto di minimo

(come in un magnete)

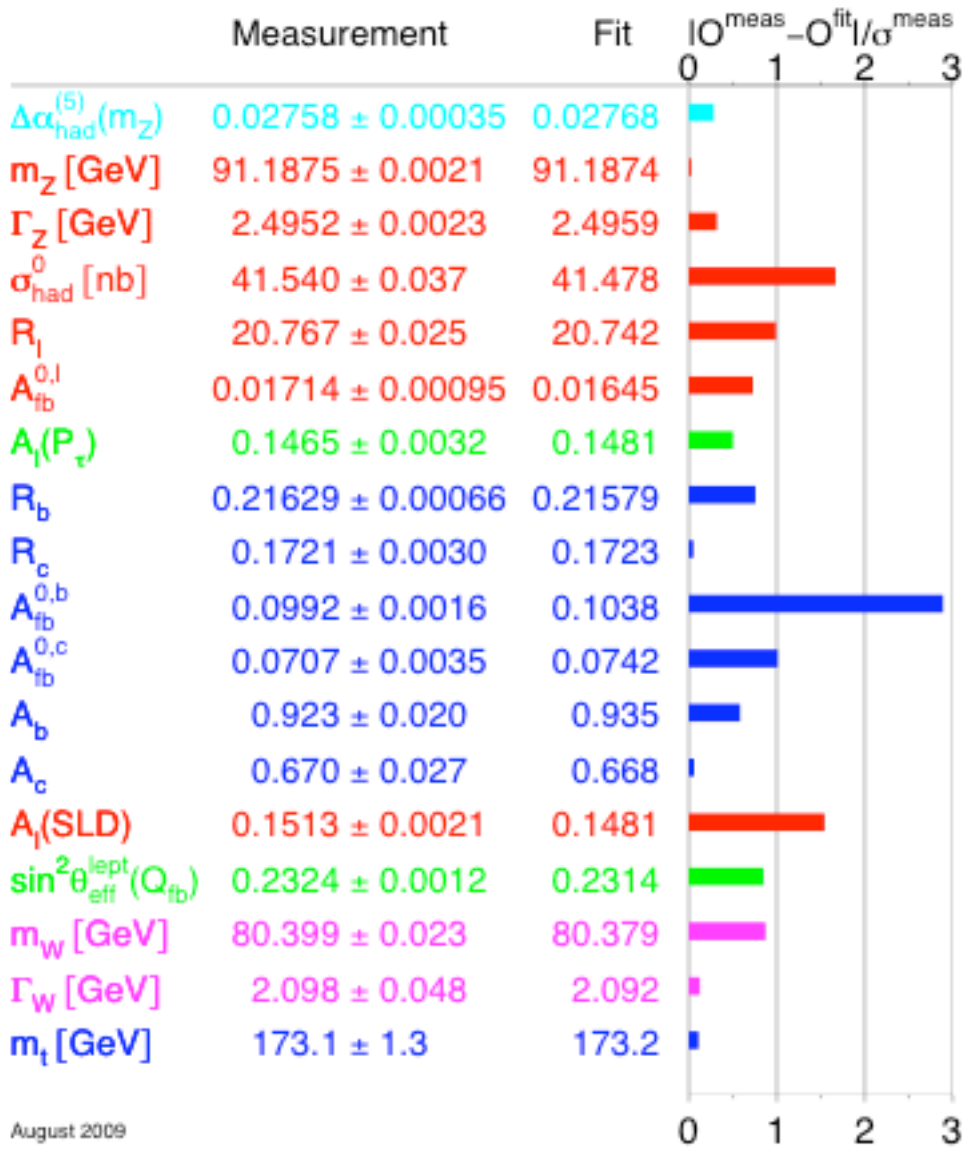
$\sigma(e^+e^- \to W^+W^-)$





Nel 1989-2000 il MS
e' stato verificato al CERN (LEP)
e anche a SLC
(Stanford Linear Collider)
e al Tevatron
(FermiLab, Illinois)

2009



LEP: e^+e^- (2E=90-210 GeV)

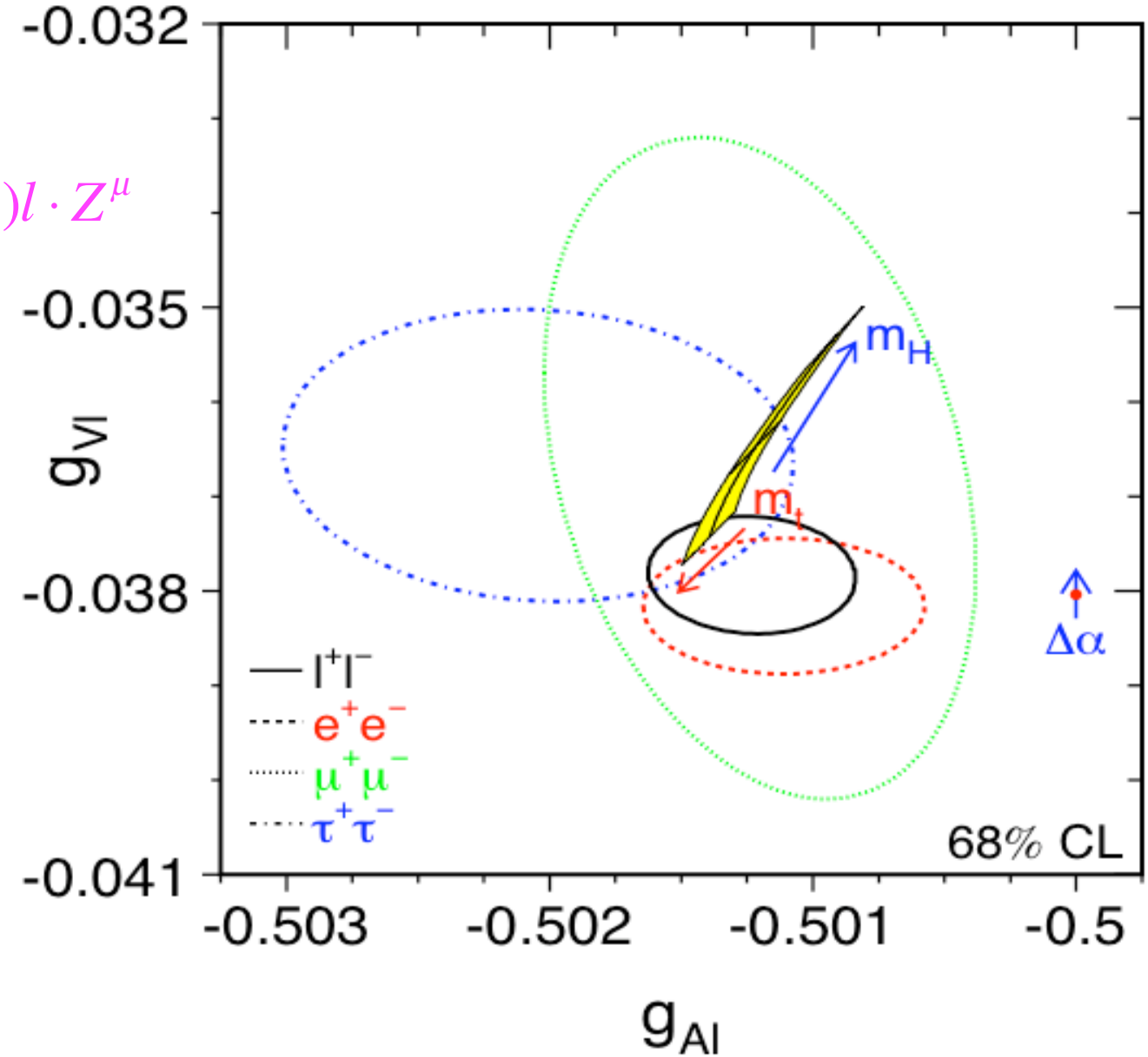
Il risultato e' che i tests
di precisione confermano
il MS e richiedono un
Higgs leggero

Esempio: i couplings vettoriali e assiali per Z ->l^+l^-

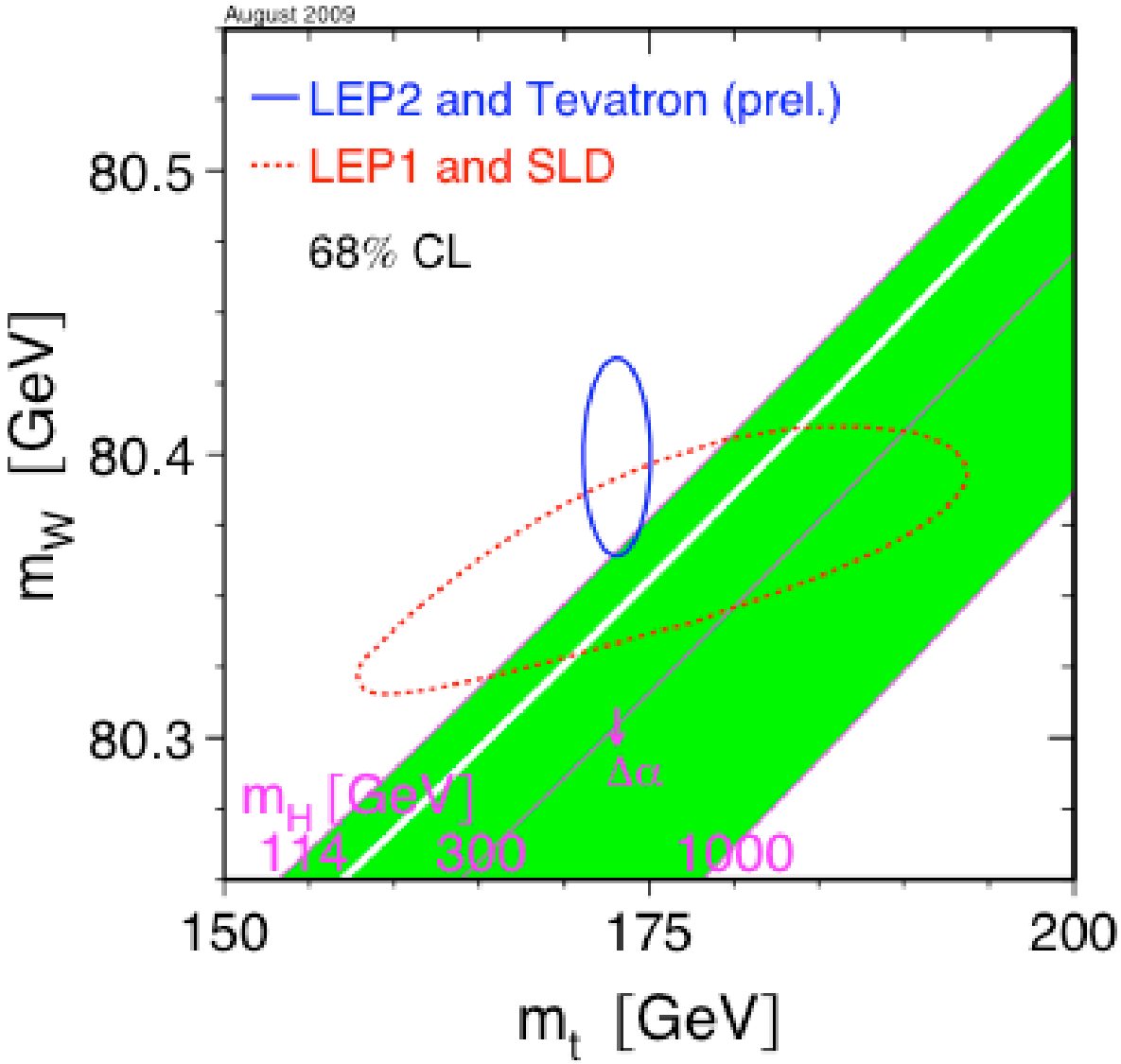
$$\frac{g}{2\cos_W}\bar{l}\gamma_\mu(g_{Vl} - g_{Al}\gamma_5)l \cdot Z^\mu$$

$$g_{Al} = \pm 1/2$$

$$g_{Vl}/g_{Al} = 1 - 4\sin^2\theta_{eff}$$

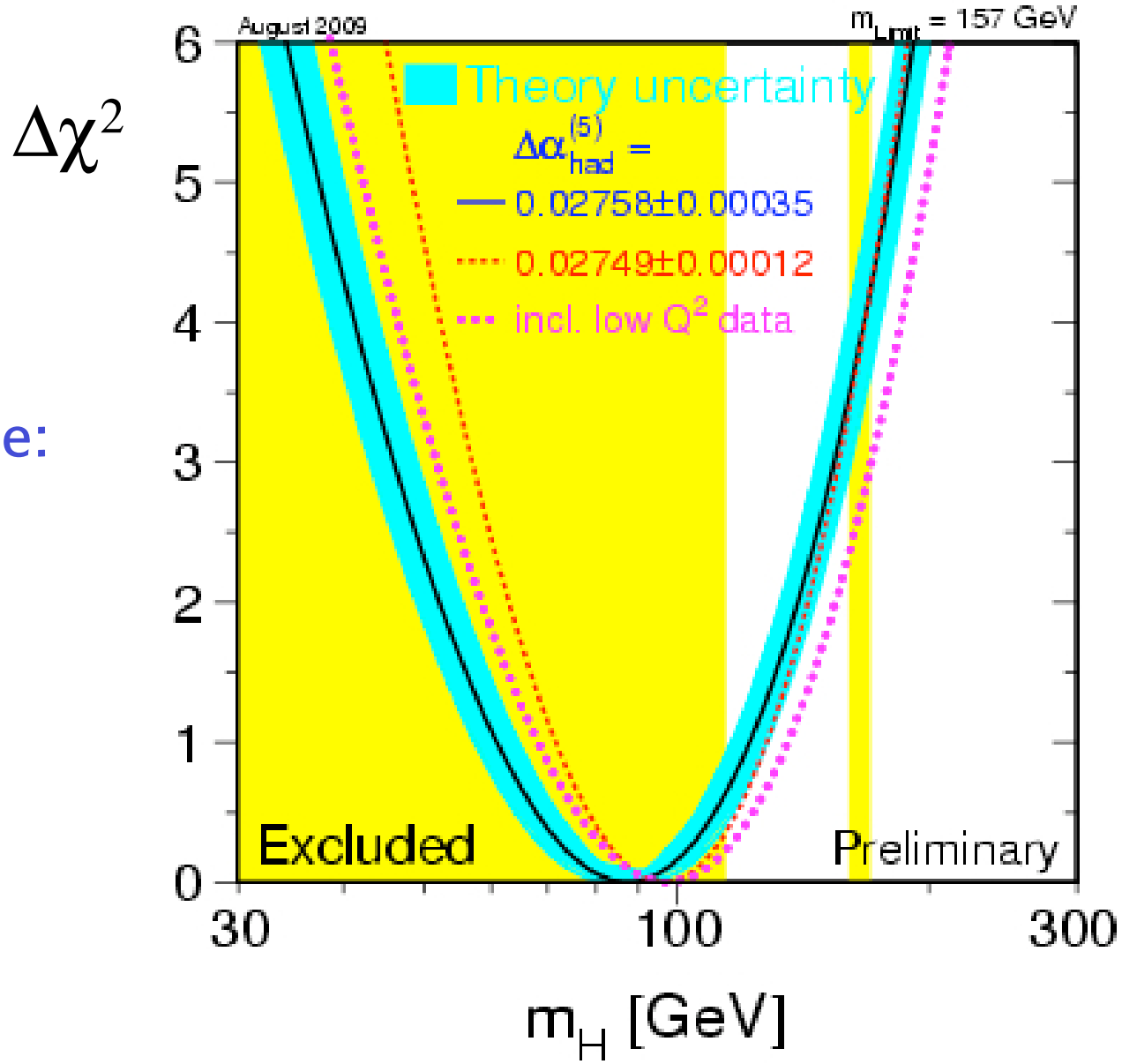


I valori misurati di m_W (LEP, TeVatrone) e m_t (TeVatrone) indicano un Higgs leggero



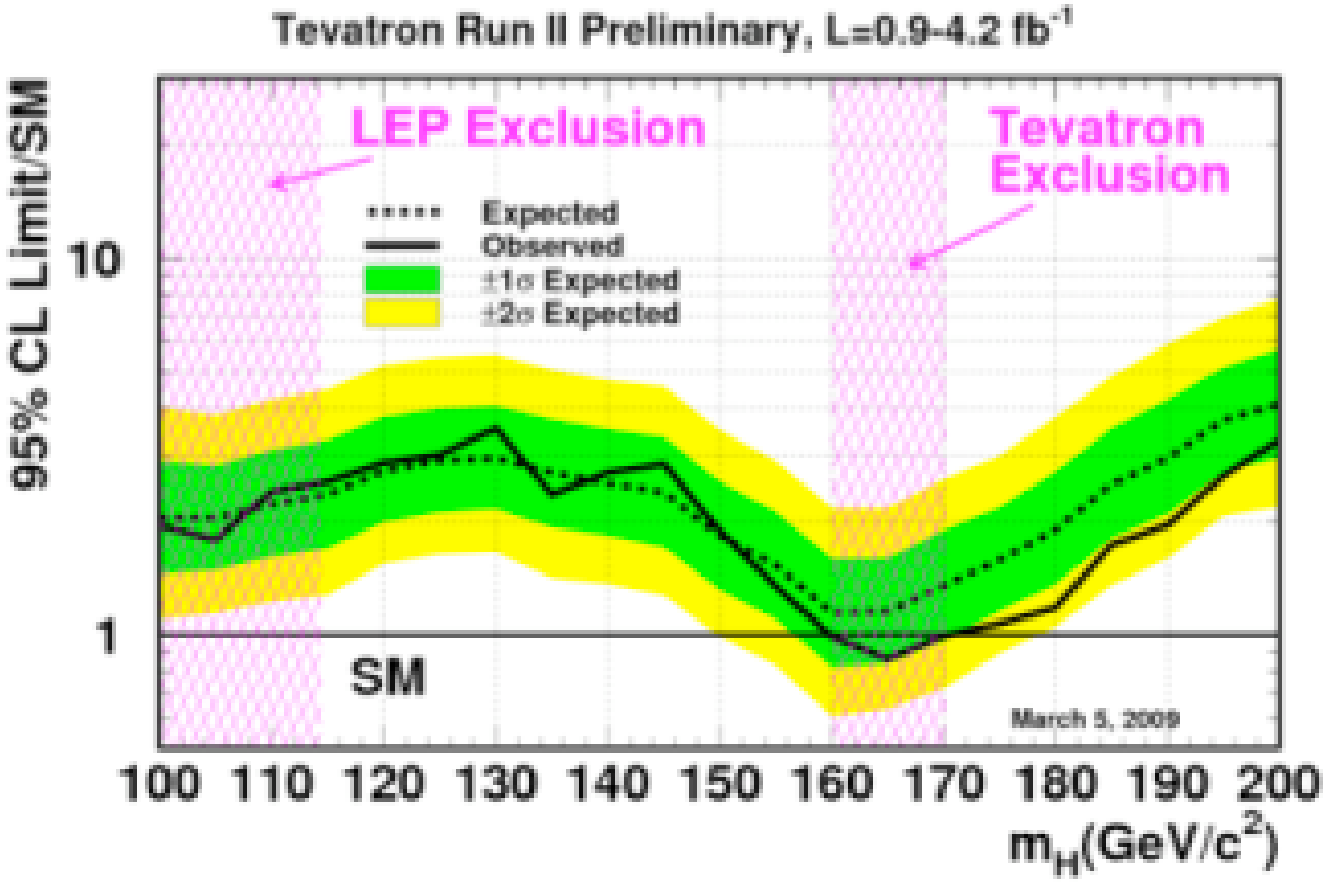
Il bosone di Higgs dovrebbe proprio essere vicino!

Dalle correz. radiative
(banda blu)
$m_H < 186$ GeV
Ma dalle ricerche dirette:
(banda gialla)
$m_H > 114.4$ GeV



Ora il Tevatron sta raggiungendo la sensibilita' per H in SM: escluso $160 < m_H < 170$ GeV

TeVatron (Illinois, USA): collisioni protone-antiprotone a 2 TeV



La particella di Higgs

Il settore elettrodebole del modello standard si basa su una congettura ancora non verificata: esiste una particella, il bosone di Higgs che ha una interazione con tutte le altre particelle in proporzione alla loro massa.

Nel MS le masse dei $W^{\pm}$ e Z, dei quark e dei leptoni sono tutte dovute a questa interazione

Dal fatto che non e' stata ancora trovata sappiamo che $m_H c^2 > 114$ GeV, ma dai suoi effetti indiretti che $m_H c^2 < 186$ GeV

E' difficile da produrre e da rivelare perche' e' molto pesante ed e' solo accoppiata a particelle pesanti

⊕ Il LHC e' stato progettato per trovarla

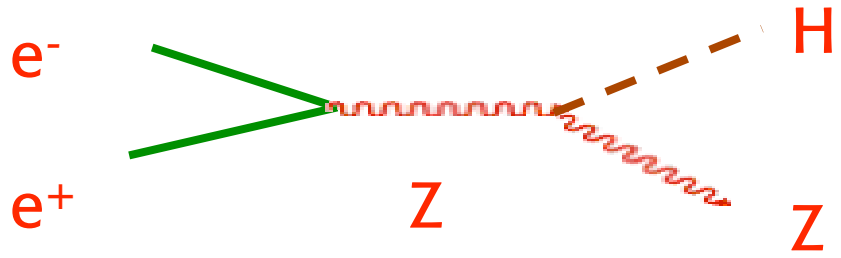
Il MS funziona molto bene

Quindi perche' non trovare l'Higgs e poi dichiarare che la Fisica delle particelle e' compiuta?

Prima di tutto bisogna trovarlo! → LHC

Difficile perche' e' solo accoppiato a particelle pesanti

p.es. a LEP:



A causa di:

Problemi concettuali

- La gravita' quantistica
- Il "problema della gerarchia"

E indicazioni sperimentali:

- Unificazione degli accoppiamenti
- Masse dei neutrini
- Materia oscura
- Bariogenesi
- Energia del vuoto

Problemi concettuali del MS

I piu' ovvi:

- Niente gravita' quantistica ($M_{Pl} \sim 10^{19}$ GeV)
- Ma una diretta estrapolazione del MS porta direttamente alle GUT's ($M_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV)

M_{GUT} vicino a M_{Pl}

- suggerisce l'unificazione con la gravita' (teoria delle stringhe)
- pone il problema della relazione m_W vs M_{GUT}- M_{Pl}

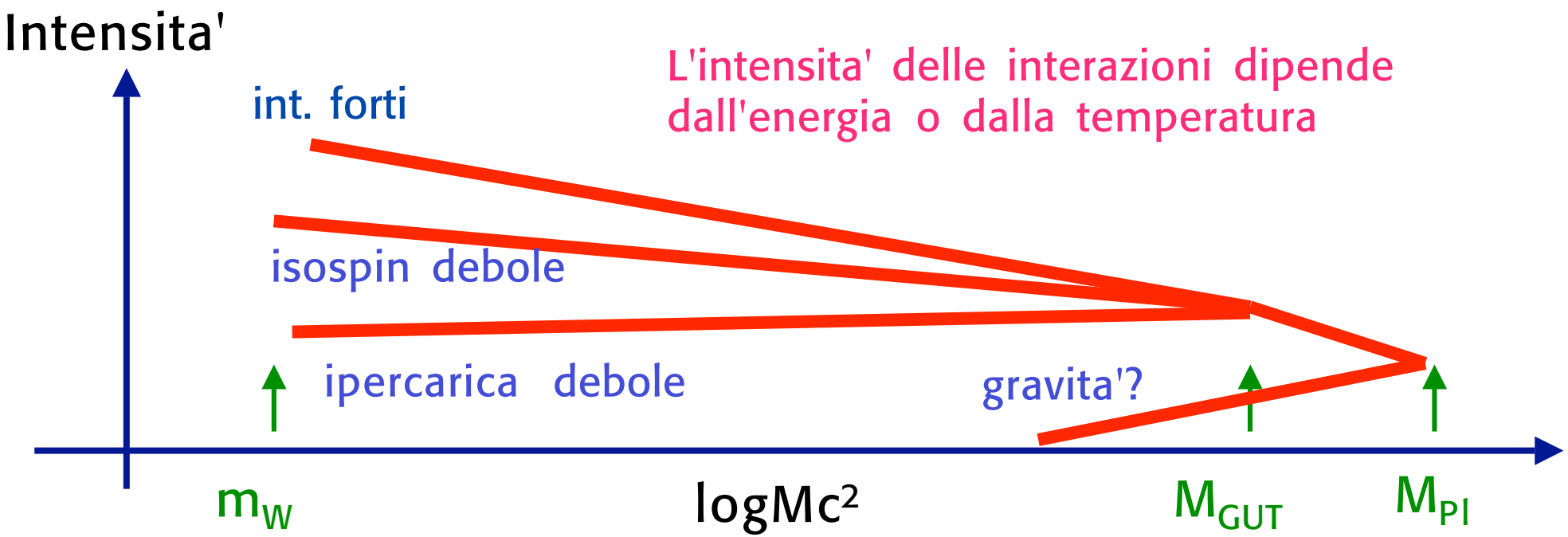
Puo' il MS essere valido fino a M_{GUT}- M_{Pl}??

Il problema della gerarchia

Non solo appare molto improbabile ma la nuova fisica deve essere vicina (~qualche TeV)!

LHC

La Grande Unificazione GUT's



Le interazioni forti e elettrodeboli si unificano a $M_{GUT}c^2 \sim 10^{16}$ GeV

La gravita' quantistica a $M_{Pl}c^2 \sim 10^{19}$ GeV

$r \sim 10^{-33}$ cm

$$G_{Newton} = \frac{\hbar c}{M_{Pl}^2}$$

Il vero livello fondamentale e' a $M_{Pl}c^2$

La Grande Unificazione e' ormai accettata dai fisici teorici

- Un'unica grande simmetria G per tutte le interazioni
- Unita' delle forze
- Unita' dei quark e dei leptoni

  differenti "direzioni" in G
- Spiegazione delle cariche osservate

  $Q_d = -1/3 \rightarrow -1/N_{colour}$
- Decadimento del protone, bariogenesi, masse dei neutrini

  exp: vita media p $\tau_p > 2\ 10^{29}$ - $1.6\ 10^{33}$ anni

  (Eta' dell'Universo ~ $1.4\ 10^{9}$ anni)

• • • • •

Il problema della gerarchia

- Perche' la gravita' e' cosi' piu' debole delle altre interazioni?

- Ovvero, perche' m_W, m_H sono cosi' piu' piccole che M_{Pl}?

$$G_{Fermi} = \frac{g_W^2}{4\sqrt{2}m_W^2} \qquad G_{Newton} = \frac{\hbar c}{M_{Pl}^2}$$

g_W: accoppiamento di gauge di SU(2)

Se il MS fosse valido fino alle energie di ordine Λ allora, per la presenza del settore di Higgs (campi scalari), m_W, m_H dovrebbero essere $m_W, m_H \sim g_W\Lambda$

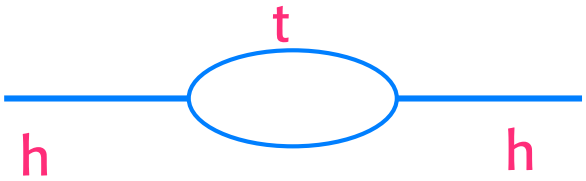
Nel MS, se uno parte da m_W al livello classico, tale valore verrebbe spinto a $o(g_W\Lambda)$ appena si accendono le correzioni quantistiche

Il MS deve essere completato a O(TeV) per arrivare a M_{GUT}!

Il problema e' molto chiaro!

p.es. Il top loop (il piu' urgente!):

$m_h^2 = m^2_{bare} + \delta m_h^2$



$$\delta m^2_{h|top} = \frac{3G_F}{\sqrt{2}\pi^2} m_t^2 \Lambda^2 \sim (0.3\Lambda)^2$$

$\Lambda \sim o(1\text{TeV})$

Il problema della gerarchia richiede nuova fisica alla scala debole

Λ: scala della nuova fisica oltre il MS

- $\Lambda >> m_Z$: lo SM funziona molto bene a LEP
- $\Lambda \sim$ deve essere vicino a $G_F^{-1/2} \sim o(1\text{TeV})$ for a spiegazione naturale di m_h o m_W

Un paradosso: m_h leggero, quindi la nuova fisica deve essere vicina, ma allora perche' non ne vediamo gli effetti? Niente a LEP, niente alle "fabbriche di B"!

⊕ La nuova fisica deve essere molto speciale

Soluzioni possibili:

SUSY

- Supersimmetria: simm. bosoni-fermioni

  esatta (non realistico): cancellazione di δm^2

  approssimata (possibile): $\Lambda \sim m_{SUSY} - m_{ord}$

  La piu' accettata, ma gia' attesa a LEP2

- L'Higgs e' costituito da fermioni. Non ci sono scalari fond. Ma serve una nuova forza molto intensa che li leghi. $\Lambda_{new} \sim 10^3\, \Lambda_{QCD}$ (technicolor).

  Il modello originale molto sfavorito da LEP, riappare in nuove forme

- Nuove dimensioni spazio-temporali che cambino M_{Pl} forse fino a o(1TeV) e che spieghino la differenza tra m_W e M_{Pl}

  Elegante e affascinante. Molte possibilita': un vasto scenario

- Ulteriori simmetrie ……

⊕ • • • • •

Perche' grandi acceleratori (alto costo)?

- Per guardare dentro le particelle a piccole distanze

Meccanica quantistica:

h: costante di Planck

Lunghezza d'onda $\lambda \sim h/p \sim hc/E \sim$ risoluzione

Adesso $E \sim 100 - 1000$ GeV $\rightarrow$ $\lambda \sim 10^{-16} - 10^{-17}$ cm

(atomo $\sim 10^{-8}$ cm, protone $\sim 10^{-13}$ cm)

- Per produrre particelle pesanti con $Mc^2 < E$
  (instabili con vita media corta)

p.es. la particella Z, il mediatore delle correnti neutre deboli, studiata al LEP ha $M \sim 91$ GeV/c^2 e $\tau \sim 2.6\ 10^{-25}$ s

- Per seguire la storia dell' Universo fino a

$$t(s) \sim (1\ \text{MeV}/kT)^2$$

tempo dal Big Bang

$kT \sim E$

$E \sim 100\text{-}1000$ GeV

$t \sim 10^{-10} - 10^{-12}$ s

Particelle elementari e Cosmologia:
un'unita' sempre piu' stretta

Eta' dell'Universo: 13.7 Gy (Miliardi di anni) dal Big Bang

L'Universo si espande e si raffredda

$$kT = \frac{1MeV}{\sqrt{t(s)}}$$

tempo
in sec
dal big bang

1 MeV = 10^6 eV ~ 1.16 10^{10} ^{0}K
1 GeV = 1000 MeV
1 TeV = 1000 GeV

k ~ 8.6 10^{-5} eV/^{0}K
costante di Boltzmann

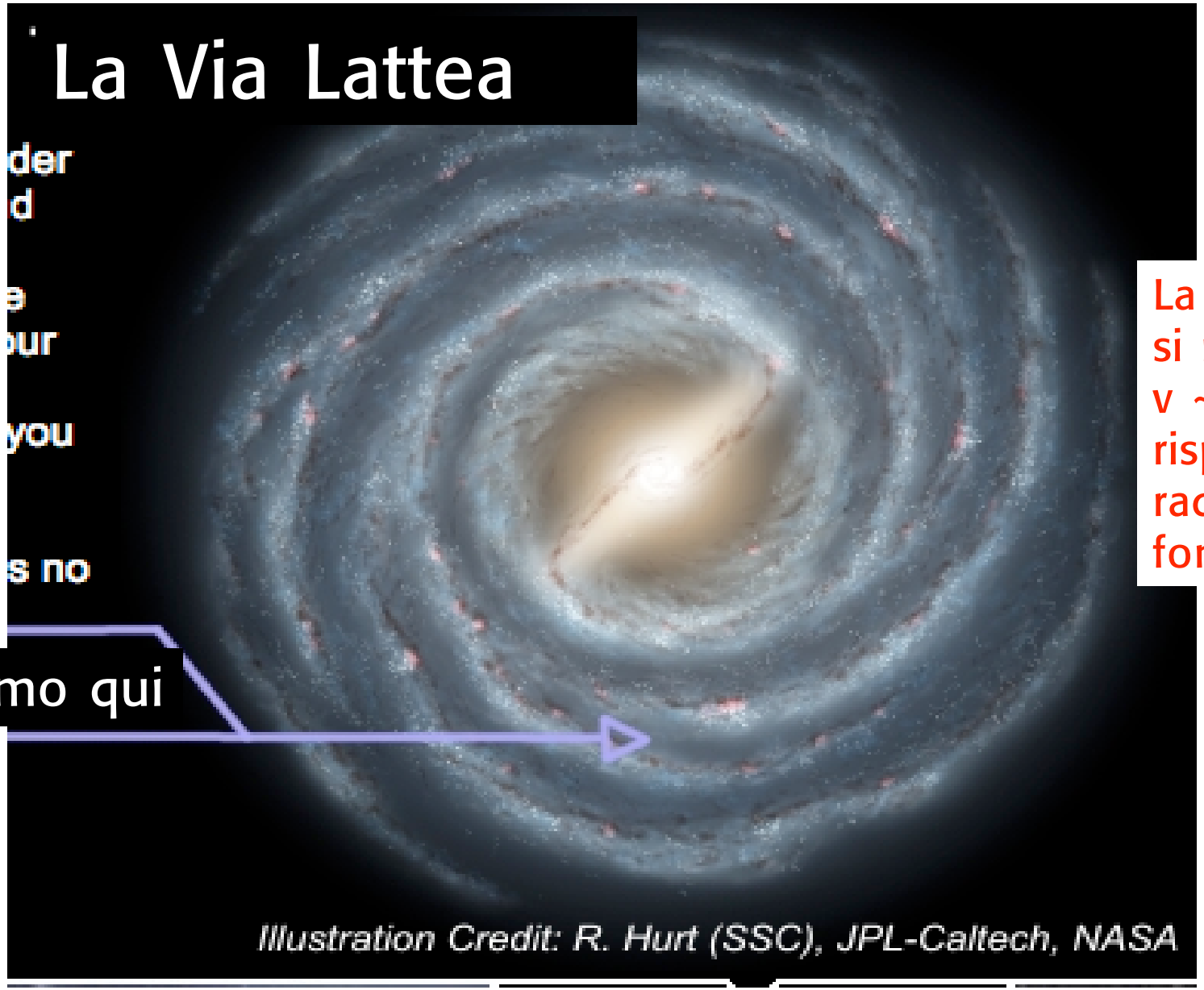
Per es.:
I processi elementari all'energia di 100 GeV determinano la composizione dell'Universo a 10^{-10} s dopo il Big Bang

Gli acceleratori di particelle e la teoria dei processi fondamentali ricostruiscono l'Universo primordiale

Nel primo secondo di vita dell'Universo c'e' tutta la Fisica!

Presente:	$t \sim 5\ 10^{17}$s $\sim$ 14 Gys,	$T \sim 2.76\ ^{0}$
Atomi:	$t \sim 10^{12}$,	$kT \sim$ eV
Nuclei:	$t \sim 1$,	$kT \sim$ MeV
QCD:	$t \sim 10^{-4}$,	$kT \sim 100$ MeV
EW:	$t \sim 10^{-10}$,	$kT \sim 100$ GeV
LHC:	$t \sim 10^{-12}$,	$kT \sim 1$ TeV
GUT's:	$t \sim 10^{-38}$,	$kT \sim 10^{16}$ GeV
Planck:	$t \sim 10^{-44}$,	$kT \sim 10^{19}$ GeV

Per Cosmologia si intende qui la struttura in grande, non il nostro vicinato!

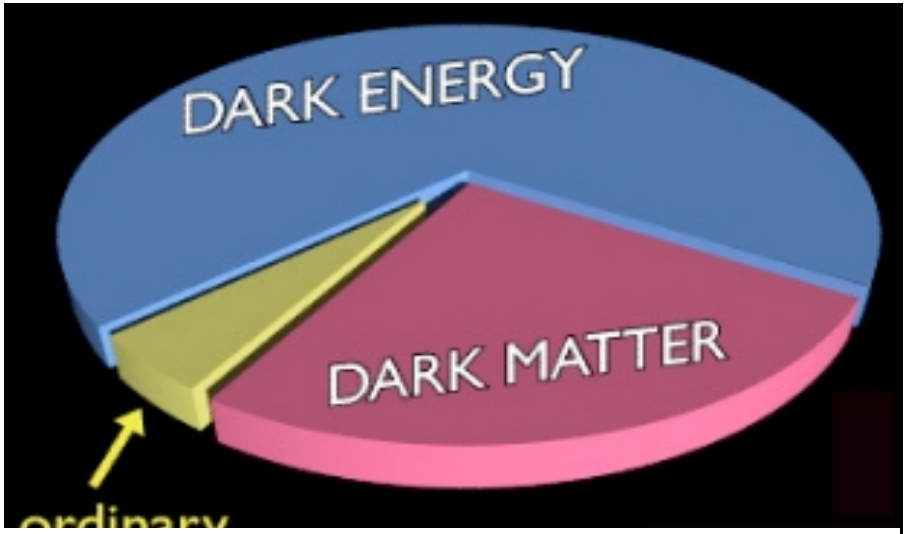


La Terra si muove con v ~600 Km/s rispetto alla radiazione di fondo

La materia oscura (non visibile ma gravitante)

Oggi, da un complesso di esperimenti, sappiamo che
$\Omega = 1$ Universo piatto, in accordo con le teorie inflazionarie
(Ω= densita' di energia/densita' critica):
$\Omega < 1$ Universo aperto, $\Omega > 1$ Universo chiuso

Sappiamo anche che la maggior parte della materia e' non visibile e non e' fatta di atomi: una misteriosa nuova particella neutra stabile (per es il neutralino delle teorie supersimmetriche)



Alla fine dell'800 J.J.Thomson dimostro' che ci dovevano essere nuove forme di energia perche' il sole e le stelle non si possono spiegare con la chimica. Analogamente, oggi la materia oscura ci indica l'esistenza di una nuova fisica -> LHC

L'energia del vuoto

I dati indicano che attualmente l'Universo si espande con una accelerazione positiva.

La gravitazione di per se da' una accelerazione negativa (attrazione tra le masse)

Bisogna aggiungere alle eq.ni di Einstein un termine (costante cosmologica) che determina una pressione negativa che overcompensa l'attrazione gravitazionale. Tale termine era stato gia' ipotizzato da Einstein quando tentava di ottenere un Universo stazionario (prima della scoperta del Big Bang)

L'accelerazione osservata e' vicina al valore massimo oltre il quale non si potrebbero formare le galassie (Weinberg)

La fisica teorica attuale non e' in grado di comprendere il valore osservato del termine cosmologico.

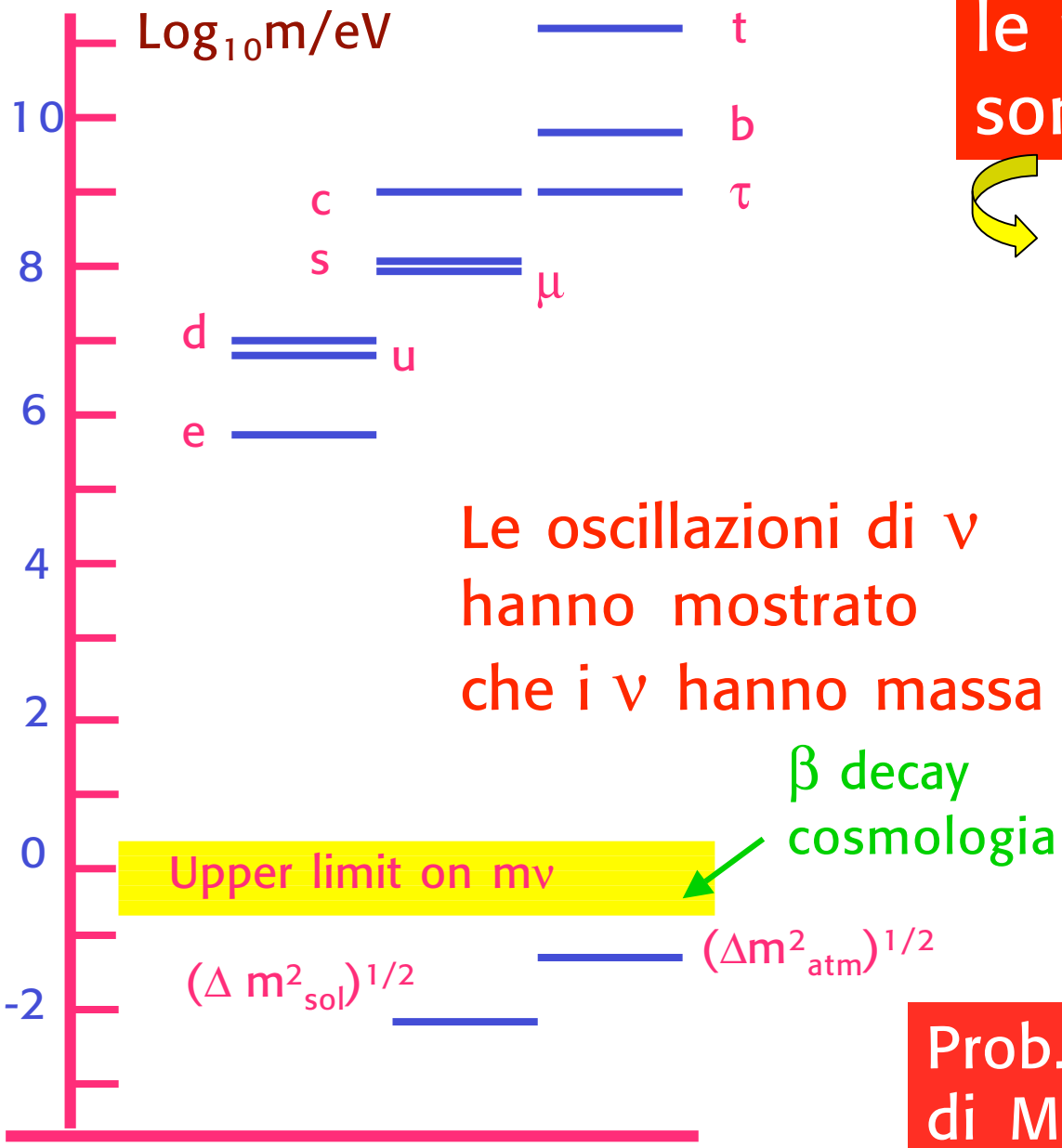
La bariogenesi (dov'e' finita l'antimateria nell'Universo?)

Attualmente nell'Universo si vede solo materia.
Ma in realta' nulla impedisce di pensare che al Big Bang ci fosse uguaglianza tra materia e antimateria.

Infatti lo squilibrio osservato puo' essersi generato dinamicamente se le interazioni fondamentali violano la conservazione del numero barionico e del numero leptonico (come accade nella Grande Unificazione) e se violano C e CP (in misura sufficiente).

Soddisfatte queste condizioni lo squilibrio osservato puo' essere generato dinamicamente durante una delle fasi di non equilibrio Termodinamico durante l'espansione dell'Universo (Sakharov).

Nel Modello Standard esteso a incorporare le masse dei neutrini si puo' spiegare la bariogenesi



Le oscillazioni di ν hanno mostrato che i ν hanno massa

le masse dei neutrini sono speciali!

$m_t/(\Delta m^2_{atm})^{1/2} \sim 10^{12}$

ν senza massa ?

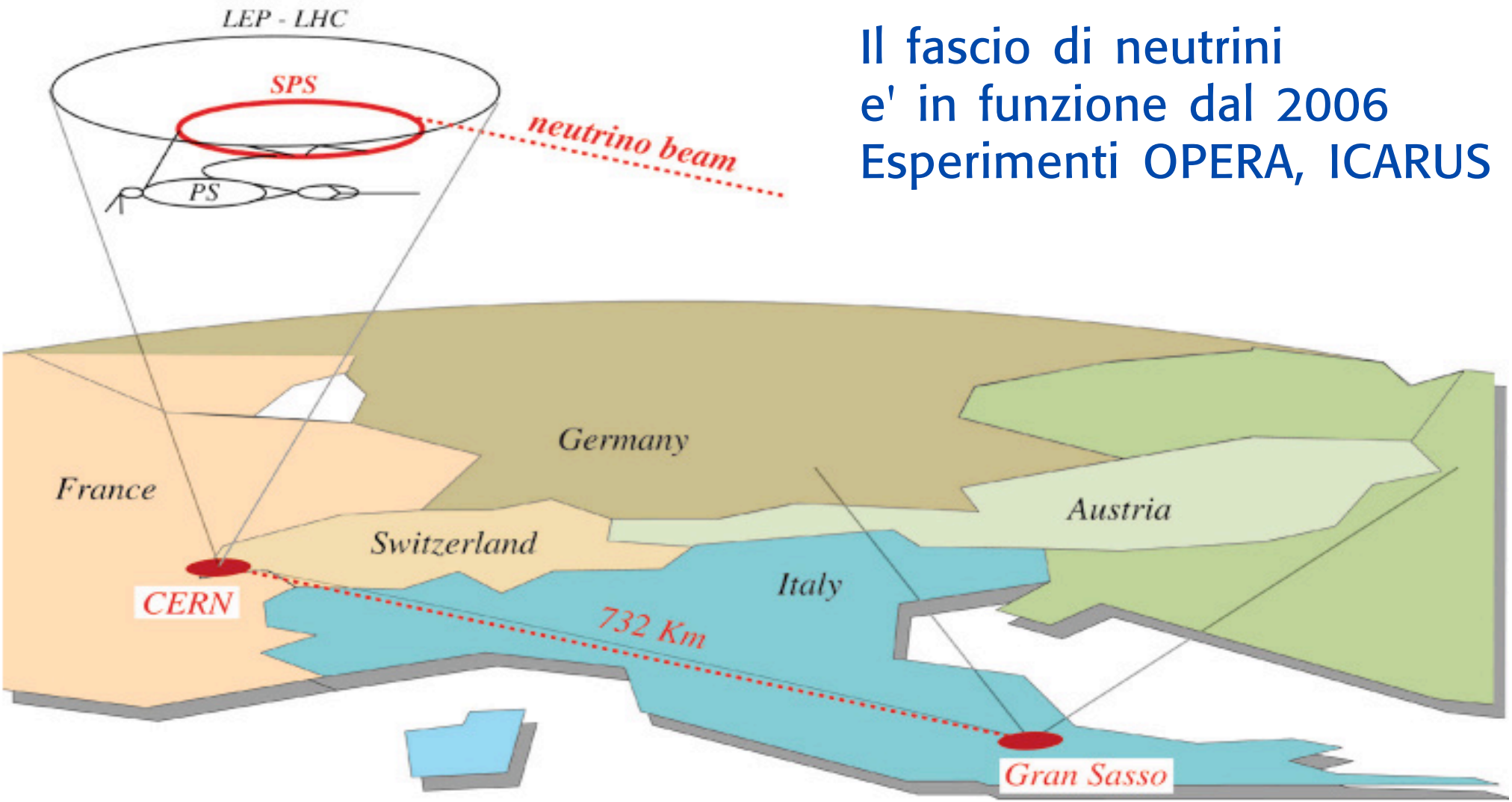
- no ν_R
- L conservato

Piccole masse dei ν?

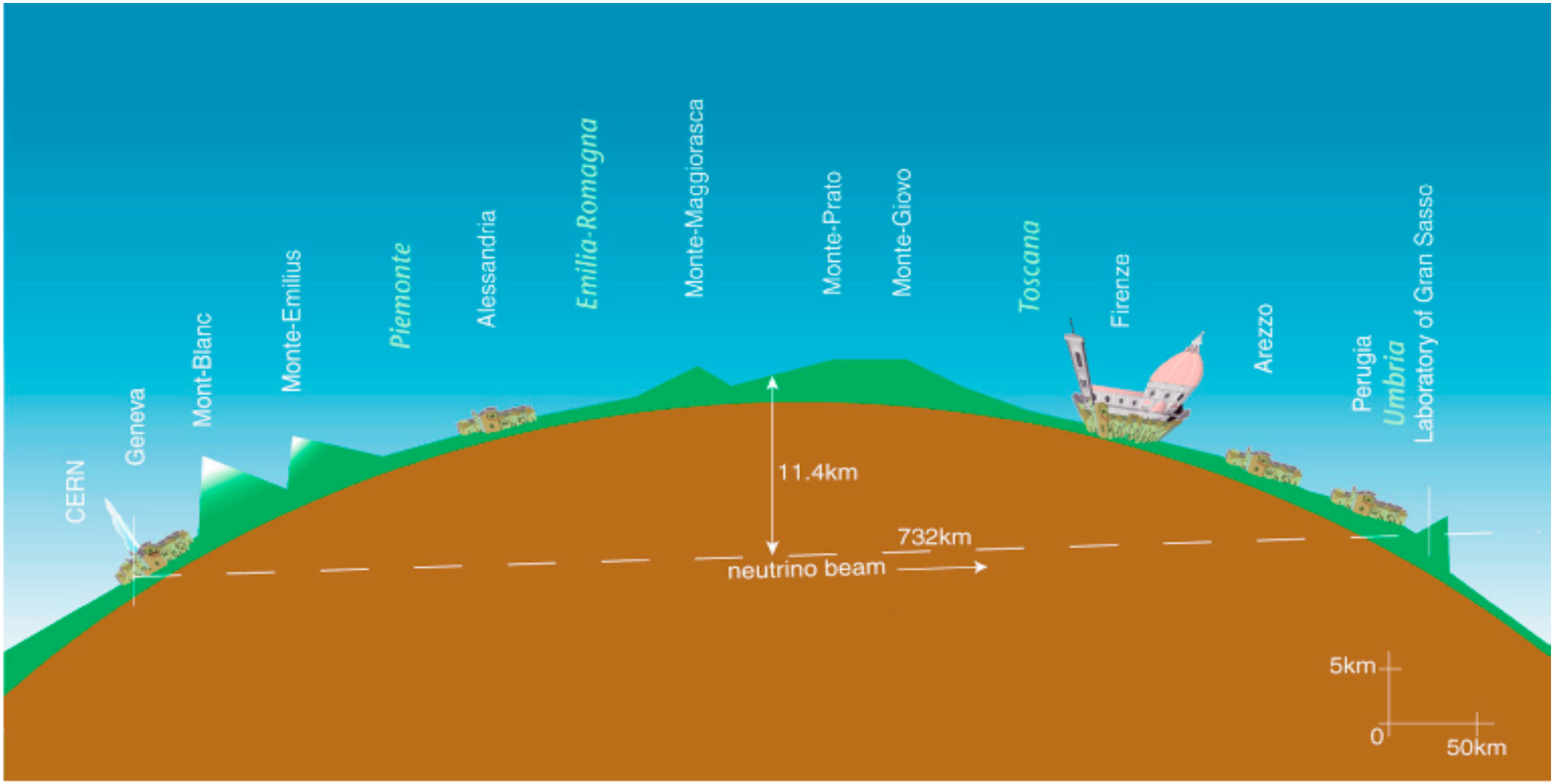
- ν_R molto pesante
- L non conservato

Prob. i neutrini sono part.lle di Majorana (neutrino=antineutrino)

CERN to Gran Sasso Neutrino Beam



Il fascio di neutrini
e' in funzione dal 2006
Esperimenti OPERA, ICARUS



Al Gran Sasso si studiano le oscillazioni dei neutrini, e la fisica delle masse e degli angoli di mixing dei neutrini

La teoria quantistica della gravitazione

Uno dei maggiori problemi della fisica teorica contemporanea e' la formulazione di una teoria quantistica della gravita'.

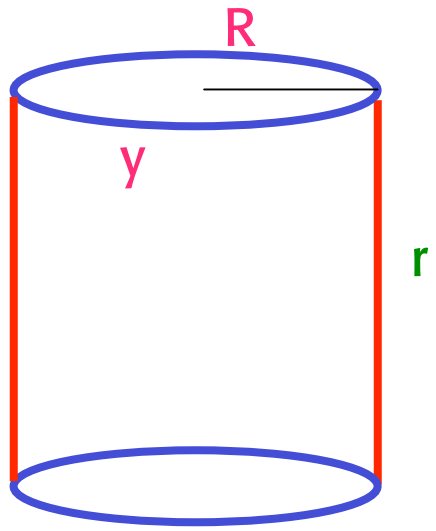
La teoria delle stringhe e' emersa come una possible soluzione.

In questa teoria le particelle fondamentali sono oggetti estesi, stringhe, con dimensioni tipiche di 10^{-33} cm (oggi sappiamo che appaiono puntiformi fino a ~ 10^{-17} cm) e lo spazio-tempo ha 10 o 11 dimensioni (10 = 9 di spazio + 1 di tempo).

Il nostro Universo a 4 dimensioni sarebbe una particolare soluzione in cui le altre 6 dimensioni sono "compattificate" ovvero arrotolate su se stesse con un raggio di curvatura finito, per es di 10^{-33} cm.
In altri Universi si potrebbero avere differenti soluzioni.

Nuove dimensioni spazio-temporali

Immaginiamo un piccolo insetto
che abita su un lungo filo r.
Per lui l'Universo ha 1 dim di spazio
(e 1 di tempo).
Ma in realta' il filo ha uno spessore:
e' un cilindro con sezione di raggio R
(raggio di compattificazione).



Similmente il nostro Universo 4-dimensionale potrebbe avere un piccolo spessore.

La gravita' che e' collegata alla geometria agisce in tutte le dimensioni, mentre le altre interazioni potrebbero essere confinate lungo r.

Forse la gravita' ci appare debole solo perche' molte delle sue linee di forza si estendono nelle dimensioni ulteriori

Universo o Multiverso?

E' concepibile che il nostro Universo sia una di tante bolle generate dal vuoto da fluttuazioni quantistiche

Infatti tutte le grandezze conservate (energia, momento angolare, carica elettrica,....) sono compatibili con zero.
(per es l'energia cinetica dell'esplosione puo' essere compensata dalla attrazione gravitazionale)

Invece di un singolo Universo stazionario, una continua creazione di Universi

In ognuno la fisica potrebbe essere diversa (per esempio, nel nostro la costante cosmologica avrebbe il valore giusto per la formazione delle galassie: spiegazione "antropica")

Osservazione conclusiva: una scienza inutile?

Alcune recenti applicazioni (per non parlare di tutto il resto)

Web, Grid
Computers
Crittografia
Posizionamento Globale (GPS)
Acceleratori per terapia
Immagini per la medicina
Superconduttivita'
Isotopi radioattivi
Luce di sincrotrone
Sorgenti di neutroni
••••••(Glashow)

Oggi i governi insistono troppo su un immediato ritorno delle ricerche

In realta' nella storia recente sono state piu' produttive le ricadute della ricerca fondamentale che non la ricerca "applicata"

La fisica fondamentale (particelle e cosmologia) ha un magnifico curriculum.

Un secolo fa non si conosceva la relativita', la dinamica della gravitazione, la meccanica quantistica, la fisica atomica, la struttura nucleare, lo spettro delle particelle e la dinamica delle loro interazioni, il Big Bang, l'eta'dell'Universo, la sua evoluzione....

Le risorse investite nella fisica fondamentale hanno prodotto un progresso enorme di conoscenze e di formidabili applicazioni tecnologiche

Un gran numero di questioni basilari rimane aperto (l'Higgs, fisica oltre il MS, Grande Unificazione, decadimento del protone, gravita' quantistica, teoria delle stringhe, materia oscura, bariogenesi, l'energia del vuoto, ...

La fisica non e' finita!!!