

Luciano Maiani:

. Lezione Fermi 24

Nuova fisica ad alta energia, una nuova  
macchina dopo LEP

1. Nuova fisica ad alta energia?
2. Grande Unificazione
3. La Fisica va “underground”
4. Una questione di naturalezza
5. Come fa il bosone di Higgs a restare leggero?
6. Nuove particelle ad alta energia?

# 1. Nuova fisica ad alta energia?

- Nella seconda meta' degli anni settanta, dando per scontata la validita' della teoria Standard (Elettrodeboli + QCD) ci si comincio' a chiedere se questa fosse la teoria definitiva e, se no, cosa ci si potesse aspettare per la "teoria del tutto".
- La risposta alla prima domanda e': no, per almeno due o tre buone ragioni
  - la TS non descrive le interazioni gravitazionali
  - le tre componenti della TS, forze deboli, e.m. e forti sono tutte descritte da una teoria di Yang-Mills con tre componenti indipendenti (gruppi SU(2), U(1), SU(3)): possibile che non ci siano unificazioni ulteriori?
  - la TS contiene tre repliche della stessa struttura (le generazioni di quark e leptoni) e 17 parametri indeterminati, troppo per pensare che questa sia la teoria definitiva del mondo.
- queste domande ci portavano tutte a ipotizzare nuovi fenomeni ad alta energia...ma alta quanto?

# Gravita' e massa di Planck

- L'interazione gravitazionale, descritta dalla teoria della Relativita' Generale e' anch'essa, a suo modo, una teoria di gauge, ma la simmetria coinvolge le coordinate dello spazio tempo e la struttura e' molto piu' complicata che la teoria di Yang-Mills
- l'interazione e' caratterizzata dalla costante di Newton,  $G_N$ , che in unita' naturali ha le stesse dimensioni fisiche della costante di Fermi,  $G_F$
- in queste unita',  $1/\sqrt{G}$  ha le dimensioni di una massa:
  - $1/\sqrt{G_F} \approx 300 \text{ GeV}$ , la scala naturale delle interazioni deboli ( $M_W$ ,  $M_Z$ ,  $M_{\text{Higgs}}$ , ...)
  - $1/\sqrt{G_N} \approx 10^{19} \text{ GeV} = M_{\text{Planck}}$ , un'energia indicata come massa di Planck, che per primo ha notato questo valore straordinario
- la teoria di Einstein, quantizzata sull'esempio della QED, non e' rinormalizzabile
- gli effetti quantistici diventano dominanti ad energie dell'ordine  $M_{\text{Planck}}$ .

## 2. Grande Unificazione

- GUT: teoria di gauge basata su un gruppo semplice che include il gruppo di gauge della TS, rotto dalle masse dei bosoni intermedi addizionali:
  - $G \supseteq [SU(3)]_{\text{forti}} \otimes [SU(2) \otimes U(1)]_{\text{ED}}$
  - bosoni intermedi: gluoni [ $M=0$ ]; W, Z,  $\gamma$  [ $M$  conosciute]; X, Y,...Z [ $M_{X,..} \approx M_{\text{GUT}}$ ]
- quale gruppo G? quanto vale  $M_{\text{GUT}}$ ?
- primo esempio interessante: SU(5) di H. Georgi e S. Glashow, 1974
- prevede l'instabilita' del protone e un valore anch'esso straordinariamente grande di  $M_{\text{GUT}} \approx 10^{14}$  GeV
- tra  $M_{\text{W}}$  e  $M_{\text{GUT}}$  : il deserto...

# fermioni e bosoni in GUT SU(5)

- nella TS ci sono campi left-handed, doppietti di SU(2), e campi right-handed, singoletti.
- se usiamo per i singoletti i campi delle antiparticelle, abbiamo tutti campi left-handed che possiamo sistemare in multipletti (rappresentazioni) di SU(5).
- I campi di una stessa generazione si sistemano elegantemente in due multipletti di SU(5), 5 e 10 dimensioni:

$$\text{Trasformazioni} = \left( \begin{array}{c} SU(2) \otimes U(1) \\ \hline SU(3) \end{array} \right) f = \begin{pmatrix} \nu \\ e \\ (d_c)_1 \\ (d_c)_2 \\ (d_c)_3 \end{pmatrix} \quad \begin{matrix} Q : \\ \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ +1/3 \\ +1/3 \\ +1/3 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} B : \\ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ +1/3 \\ +1/3 \\ +1/3 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \begin{matrix} L : \\ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \text{“ 5 “}$$

$$g = -g^T = \begin{pmatrix} 0 & e_c & u_1 & u_2 & u_3 \\ & 0 & d_1 & d_2 & d_3 \\ & & 0 & (u_c)_3 & (u_c)_1 \\ & & & 0 & (u_c)_2 \\ & & & & 0 \end{pmatrix} \quad \text{“ 10 “}$$

# SU(5): il protone e' instabile !

- nella 5 e nella 10, lo stesso bosone intermedio induce le transizioni:

$$\begin{array}{c} \left[ \begin{array}{ccc} d_c & \rightarrow & e \\ & X(-4/3) & \end{array} \right] \\ \left[ \begin{array}{ccc} u_c & \rightarrow & u \\ & \bar{X}(+4/3) & \end{array} \right] \end{array}$$

- se  $X$  viene emesso nella prima e assorbito nella seconda transizione, abbiamo la reazione tra sole particelle leggere:

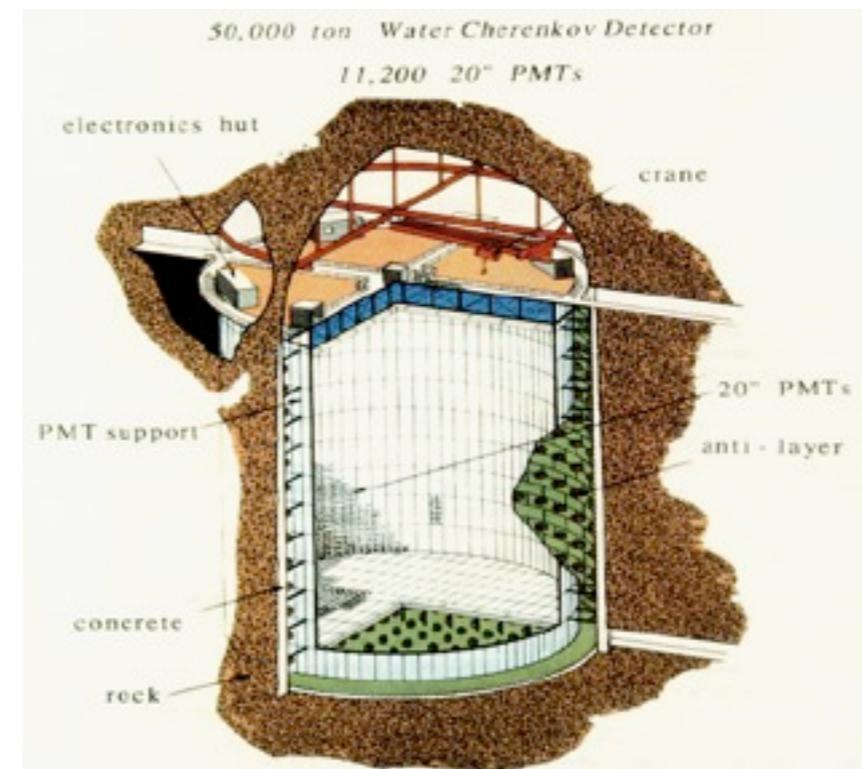
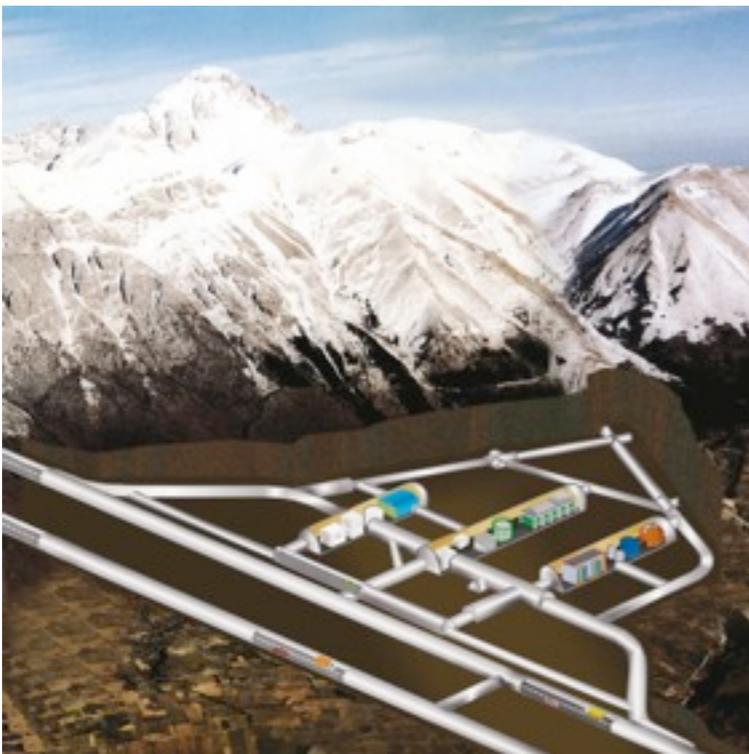
$$u + e \rightarrow d_c + u_c, \text{ ovvero : } u + d \rightarrow e^+ + \bar{u}$$

nel protone :  $(uud) \rightarrow e^+ + \bar{u}u \rightarrow e^+ + \pi^0$

- le interazioni mediate da  $X$  inducono delle interazioni che fanno decadere il protone, formalmente simili alle interazioni di Fermi,
- se  $X$  e' molto pesante, il protone puo' rispettare i limiti osservati:
- una vita media del protone  $\cong 10^{30}$  anni corrisponde a  $M_X \approx 10^{14}$  GeV

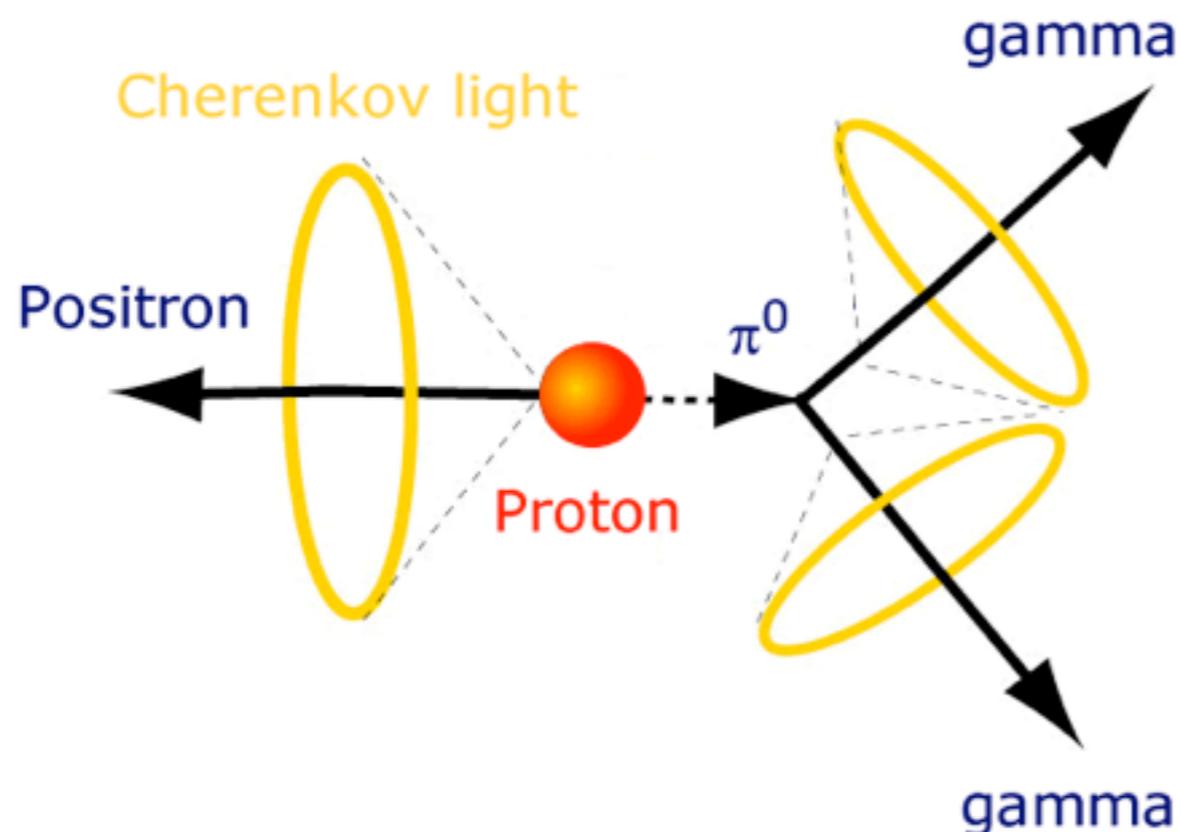
### 3. Fisica underground

- e' un po' come i neutrini: se guardiamo un protone non basta l'eta' dell' Universo per vederlo decadere, ma se guardiamo  $10^{23}$  protoni per un anno, 1 evento in 1 anno corrisponde ad una vita media di  $10^{23}$  anni
- dobbiamo "guardare" 1 ton di acqua ( $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m}$ )  $\approx 10^{30}$  protoni per 1 anno
- occorre limitare l'influenza dei raggi cosmici, che darebbero eventi spuri
- dagli anni '80 sono stati costruiti rivelatori di grande massa in laboratori sotterranei come ad es. i Laboratori del Gran Sasso in Italia e Superkamiokande in Giappone.



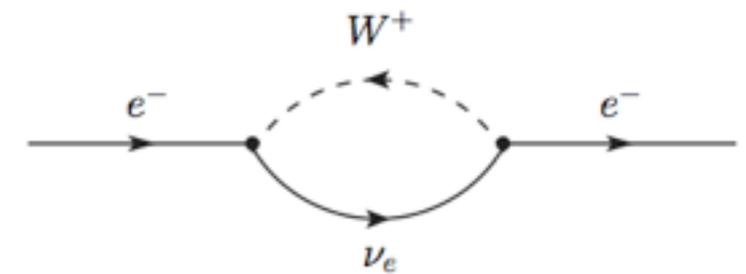
# GUT ?

- Con 50 000 ton di acqua purissima:  
Super-Kamiokande is the largest detector for the observation of proton decay in the world.  
So far, no candidate proton decay events are observed and it is found that the life time of the proton is more than  $8.2 \times 10^{33}$  years for the decay to a positron and a neutral pion.



- Contro tutte le aspettative il decadimento del protone non è stato osservato
- l'idea della Grande Unificazione è rimasta, come una possibilità elegante
- i laboratori underground si sono convertiti ai neutrini e alla ricerca della materia oscura
- attendiamo ulteriori lumi

## 4. Una questione di naturalezza

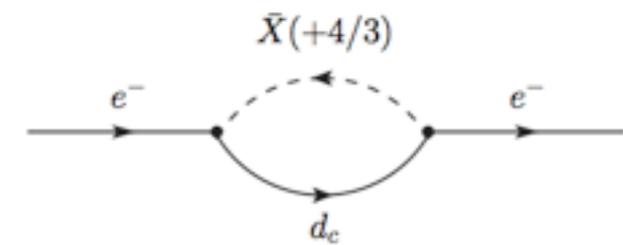


- le fluttuazioni quantistiche permettono all'elettrone di emettere ed assorbire anche particelle anche molto pesanti, ad es. di dissociarsi in  $W + \text{neutrino}$
- per il principio di indeterminazione, il processo non può durare un tempo superiore a  $\Delta t \approx \frac{\hbar}{M_W}$  e il  $W$  è confinato in una regione di raggio:  
$$R \approx c\Delta t \approx \frac{\hbar c}{M_W}$$
- l'energia di massa dell'elettrone è aumentata dell'energia elettrostatica del  $W$  (una carica ristretta in un raggio  $R$ ):

$$\Delta m \approx \frac{e^2}{R} \approx \frac{e^2}{\hbar c} M_W \approx 10^{-2} M_W \approx 1 \text{ GeV}$$

- come fa l'elettrone ad avere un'energia di riposo  $m_e \approx 0.5 \text{ MeV} = 1/2000 \text{ GeV}$ ?
- risposta (1):
  - l'elettrone è dotato di una massa di partenza,  $m_0$
  - tenendo conto delle fluttuazioni, la massa vera è  $m_e = m_0 + \Delta m$
- matematicamente non c'è problema, ma fisicamente è ragionevole che la somma di due numeri scollegati tra loro sia più di mille volte più piccola di ciascuno dei due?

# lo stesso, in GUT

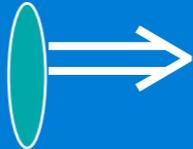
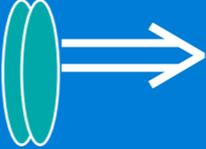
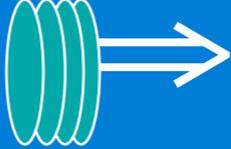


- la questione diventa piu' scomoda se considero l'effetto delle particelle GUT:
- $m_0$  e  $\Delta m$  devono essere di segno opposto e con piu' di 14 cifre decimali uguali
- i fisici sospettano, in questi casi, che ci sia l'effetto di una simmetria (un caso simile era l'uguaglianza della massa gravitazionale e inerziale) e in effetti e' cosi'
- risposta(2):
  - se  $m_0 \rightarrow 0$ , la QED acquista una simmetria in piu', detta simmetria chirale
  - le fluttuazioni quantistiche devono rispettare questa simmetria ed essere tali che  $m_e > 0$  se  $m_0 \rightarrow 0$ ,
  - questo puo' avvenire se anche  $\Delta m$  e' proporzionale a  $m_0$ , e cosi' avviene in QED
  - l'unico modo in cui  $M_X$  entra nelle correzioni e' attraverso il suo logaritmo:
$$\Delta m \approx \frac{e^2}{\hbar c} m_0 \log(M_X)$$
  - la correzione e' prossima a  $m_0$  anche per  $M_X = 10^{14}$  GeV e non c'e' piu' cospirazione
- se anche non ci fossero le particelle GUT, lo stesso varrebbe per  $M_{\text{PLANCK}}$
- l'esistenza della simmetria rende plausibile che sia  $m_e \lll M_{\text{GUT}}$ , o  $M_{\text{PLANCK}}$

## 5. Come fa il bosone di Higgs a restare leggero?

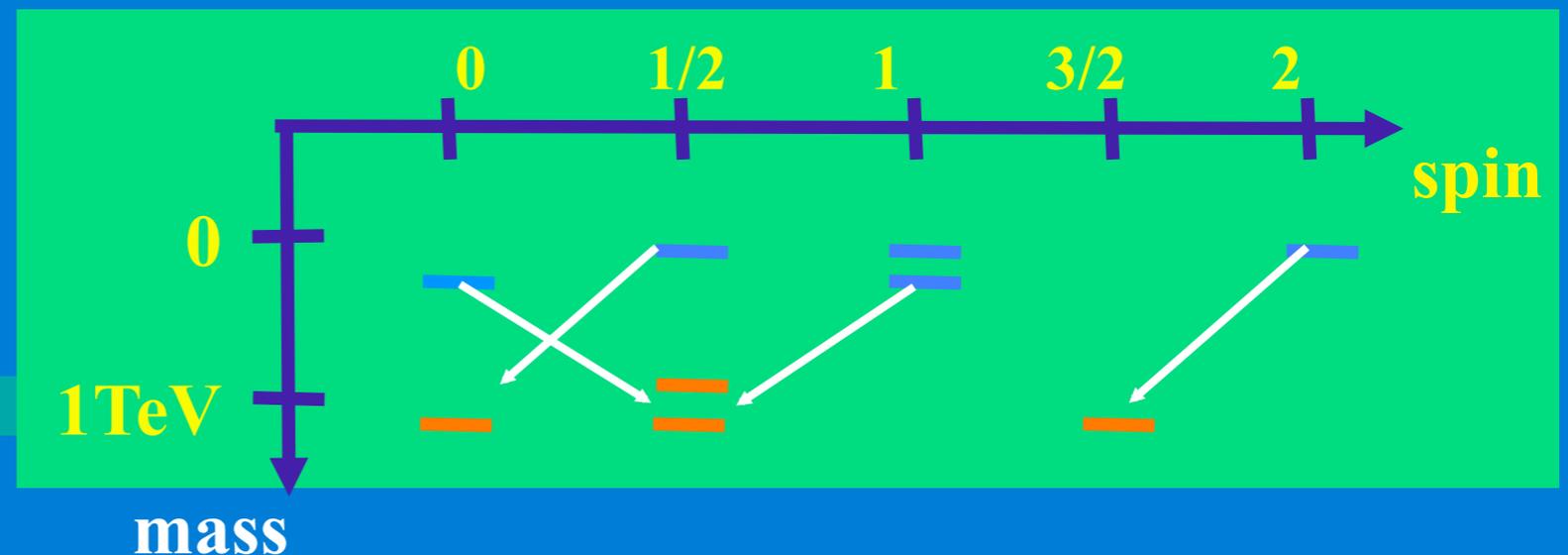
- l'esistenza della simmetria rende plausibile che sia  $m_e \lll M_{\text{GUT}}$ , o  $M_{\text{PLANCK}}$  e lo stesso vale per tutte le altre particelle di spin 1/2
- la simmetria di gauge permette di avere masse “piccole” anche per i bosoni di gauge, spin 1
- ma nella Teoria Standard non si acquista alcuna simmetria se la massa del bosone di Higgs tende a zero ('t-Hooft, 1979):
- come puo' restare “leggera” una particella di spin zero?
- conosciamo (ad oggi!) due casi in cui “si puo' ”
- La Supersimmetria (J. Wess e B. Zumino, 1973)
  - collega il bosone di Higgs a particelle di spin 1/2 e gli comunica la buona proprieta'
- il teorema di Goldstone,
  - una simmetria rotta spontaneamente, di cui il bosone di Higgs e' la particella di Goldstone
- in entrambi i casi, dovrebbero esistere nuove particelle con masse nella regione del TeV (uno, alcuni...) che riempiono il deserto della GUT!

# More Symmetry: SUPERSYMMETRY

		Spin
Higgs		0
Matter		1/2
Subatomic		1
Forces		2
Gravity		

Unification of Forces **requires** a Symmetry to relate different spins:  
SUPERSYMMETRY

## Particles in Supersymmetry



The lightest SP may still be around since the BIG-BANG

**Identified matter (H, He,...),  
accounts for less than 1/6 to 1/8  
of the mass of the Universe**

**Astronomical observations  
may trace the distribution of  
the dark matter,**

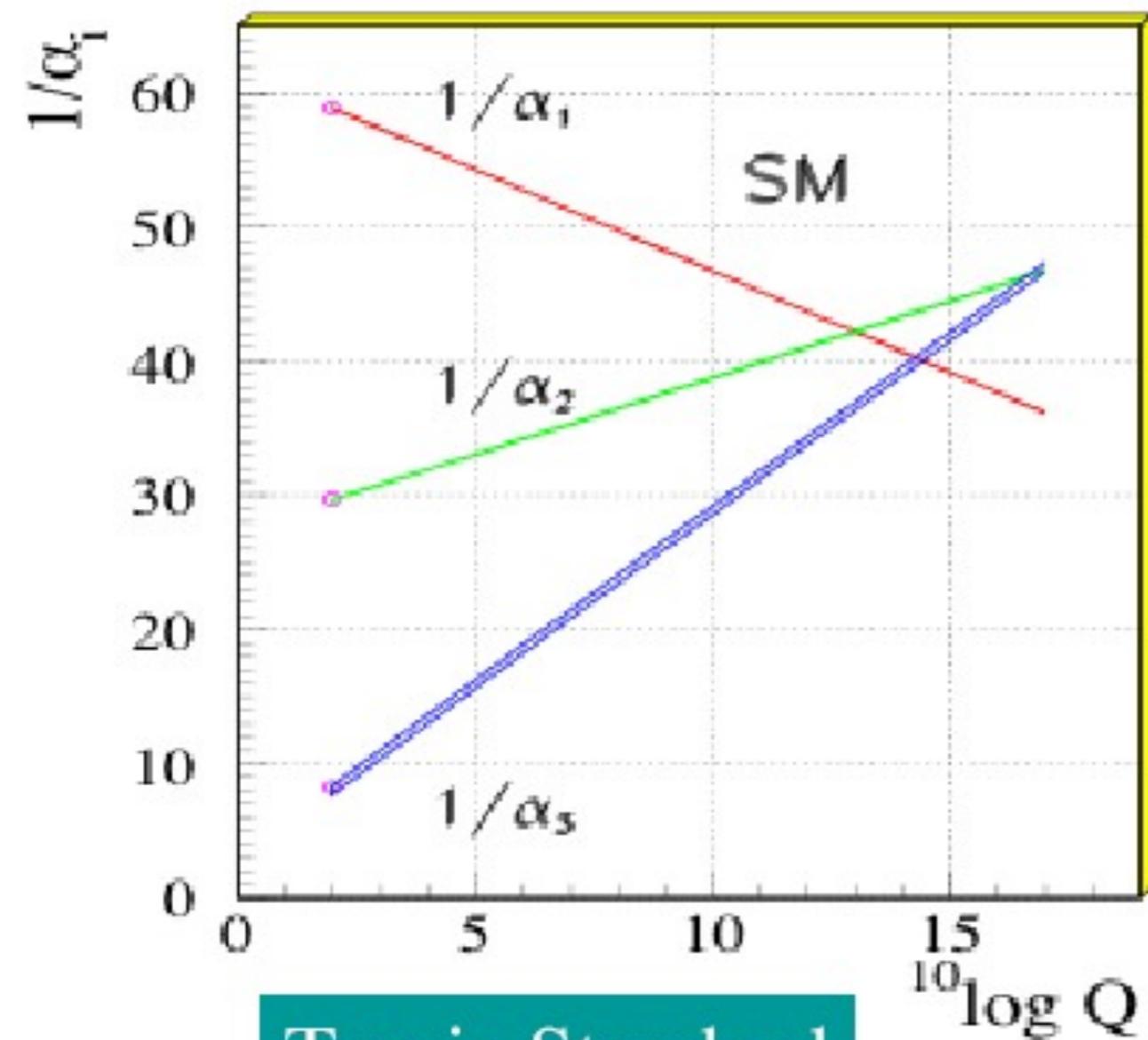
**but are unable to identify its  
physical properties  
(Neutrinos? Cosmic strings?  
Neutralinos?).**

**If the dark matter is made of  
supersymmetric particles,  
the Large Hadron Collider will be  
able to produce  
them in the Laboratory and  
characterize them completely**

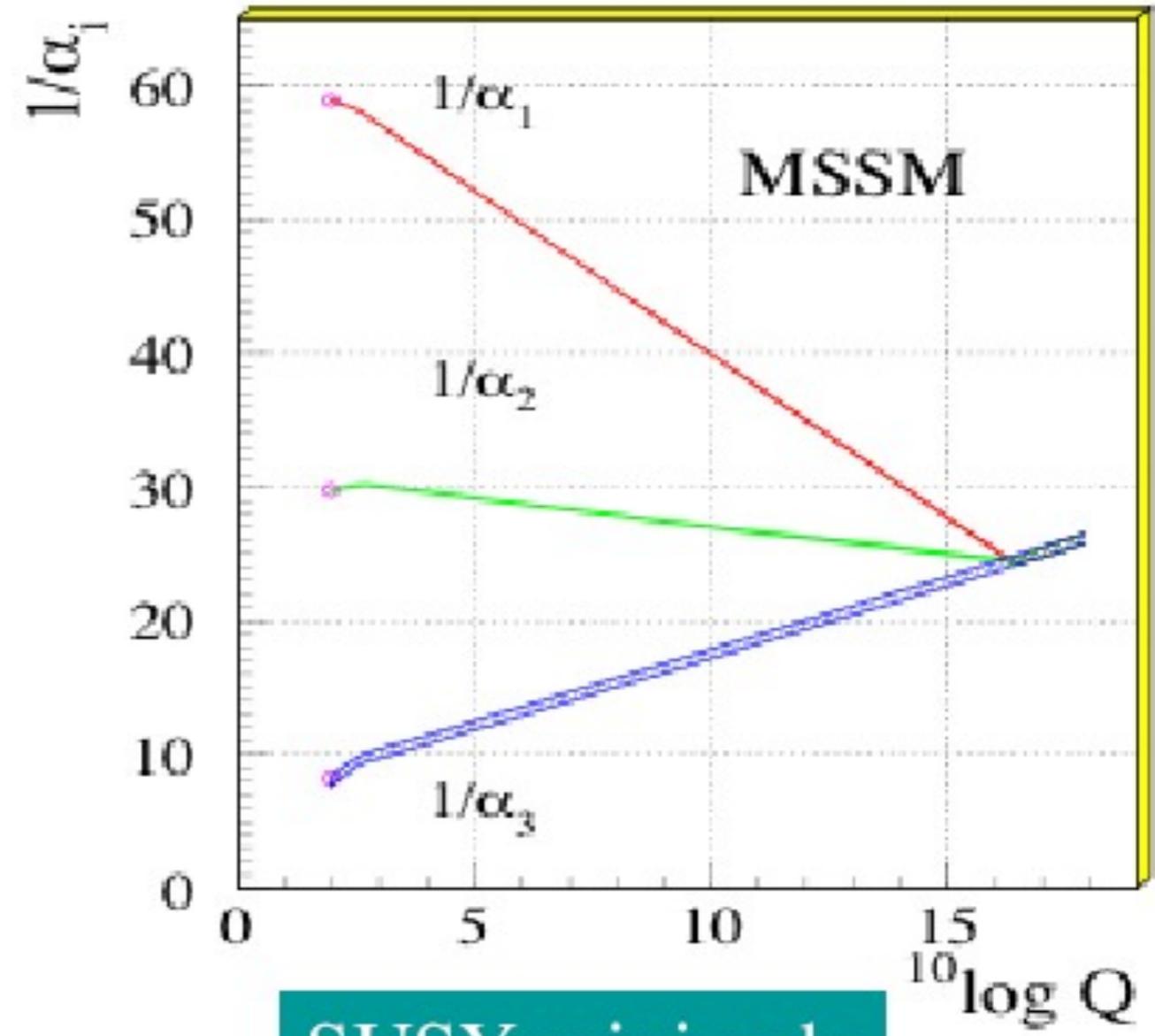


# Convergenza delle costanti di accoppiamento di $SU(2) \times U(1) \times S(3)_{\text{color}}$ ?

**Nota:**  $(\alpha_1)_{\text{graf.}} = 5/3 (\alpha_1)_{\text{nostro}} = (3/5 \cdot 99.08)^{-1} = (59.4)^{-1}$ ;



Teoria Standard



SUSY minimale

Ma il decadimento del protone si allontana...

## 6. Nuove particelle ad alta energia ?

*Caccia al Bosone di Higgs*, L. Maiani, R. Bassoli (Mondadori, 2013)

- All'inizio degli anni ottanta, SUSY e materia oscura avevano fornito un nuovo incentivo per una macchina a protoni con un'energia di un ordine di grandezza superiore a quella di LEP. L'idea di LHC prese quota.
- Come abbiamo visto, SUSY non e' l'unica soluzione possibile al problema della massa del bosone di Higgs. Ne abbiamo vista una, il Technicolor, e ce ne erano altre. Le spiegazioni avevano una cosa in comune tra loro e con SUSY. In tutti i casi, c'era un meccanismo che tagliava la crescita delle fluttuazioni sopra un'energia dell'ordine del TeV.
- Il mantra di quegli anni si poteva riassumere dicendo che tutti credevano alla Grande Unificazione, ma credevano, in aggiunta, che ci dovesse essere qualcosa di nuovo da scoprire nella regione del TeV.
- Il deserto c'era ancora, ma la fisica da esplorare era quella, sconosciuta, di SUSY o degli altri modelli. Al deserto si sarebbe pensato dopo.