

Il problema della piccola gerarchia

IFAE 2004
Torino, 14-16 Aprile

Michele Papucci
Scuola Normale Superiore

La massa dell'Higgs

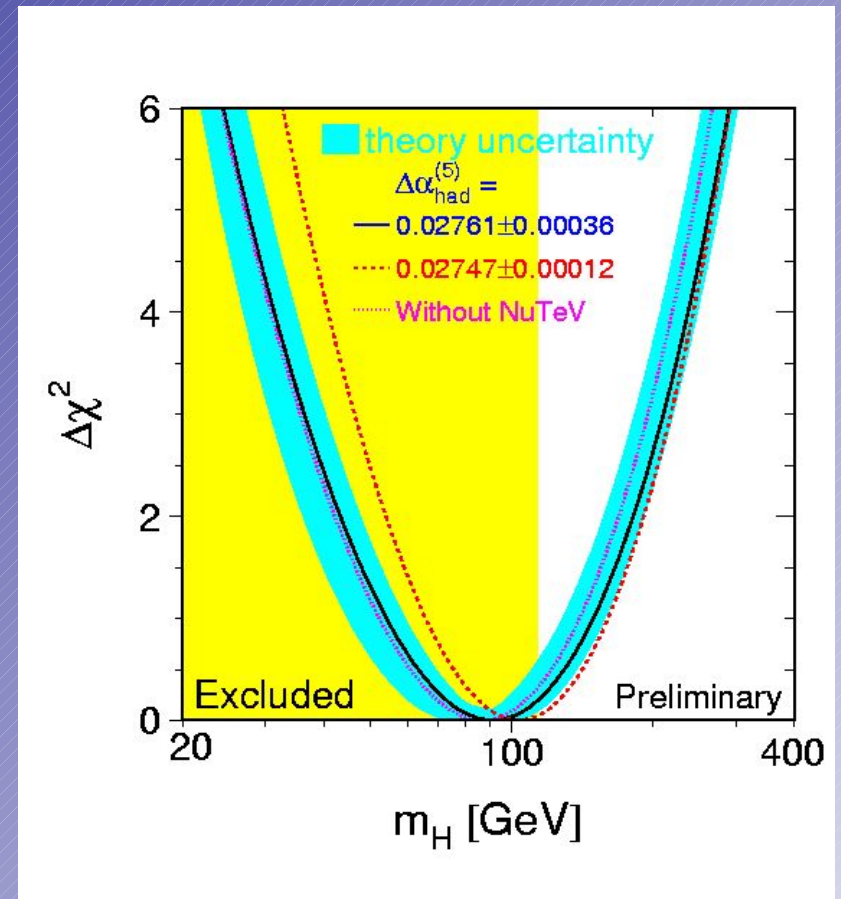
Nello Standard Model a 1-loop

$$m_H^2 = m_{H, \text{tree}}^2 + \delta m_H^2$$

con

$$\delta m_H^2 = 3 \frac{G_F}{4\sqrt{2}\pi^2} (2m_W^2 + m_Z^2 + m_H^2 - 4m_t^2) \Lambda_{\text{SM}}^2$$

$$= -(115 \text{ GeV})^2 \left(\frac{\Lambda_{\text{SM}}}{400 \text{ GeV}} \right)^2$$



I dati elettrodeboli suggeriscono

$$m_H < 200 \text{ GeV}$$

$$\Lambda_{\text{SM}} \ll M_{\text{GUT}}, M_{\text{Pl}}$$



Problema della gerarchia

Se $\Lambda_{\text{SM}} >$ qualche TeV si ha comunque finetuning

Nuova fisica e dati di precisione

La nuova fisica può essere parametrizzata aggiungendo allo SM operatori di ordine superiore:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}^{(\text{SM})} + \mathcal{L}^{(\text{np})} \quad \mathcal{L}^{(\text{np})} = \sum_i \frac{c_i}{\Lambda_i^{4-d_i}} \mathcal{O}_i^{(d_i)}$$

Assumendo $c_i = \pm 1$

dai *dati di precisione* si ha un *lower bound* sui Λ_i

	+1	-1
$ \text{H}^\dagger \tau^a \text{H} \text{W}_{\mu\nu}^a \text{B}_{\mu\nu}$	10	9,7
$ \text{H}^\dagger \text{D}_\mu \text{H} ^2$	5,6	4,6
$\frac{1}{2} (\bar{\text{L}} \gamma^\mu \tau^a \text{L})^2$	6,1	7,9
$i (\text{H}^\dagger \text{D}_\mu \tau^a \text{H}) (\bar{\text{L}} \gamma^\mu \tau^a \text{L})$	9,2	7,3

I dati indicano

$$\Lambda_{\text{np}} \sim 5 \div 10 \text{ TeV}$$

Il problema della piccola gerarchia

- *La scala a cui la nuova fisica interviene nello SM è molto più alta della scala “naturale” per l'ElectroWeak Symmetry Breaking:*

$$\Lambda_{SM} \ll \Lambda_i$$

- *È solo una coincidenza o ci stiamo perdendo qualcosa?*

$\Lambda_{SM} \ll \Lambda_i$: Cosa vuol dire?

- *La nuova fisica nel settore elettrodebole è accoppiata debolmente fino a energie di 5-10 TeV*
- *La nuova fisica debolmente accoppiata presente sotto al TeV non deve modificare sensibilmente lo SM a tree level*

Un candidato ben noto: l'MSSM

$$\delta m_H^2 \approx -3 \frac{G_F}{\sqrt{2} \pi^2} m_t^2 m_{\text{stop}}^2 \log \left(\frac{\Lambda_{\text{SSB}}^2}{m_{\text{stop}}^2} \right) \longrightarrow \Lambda_{\text{SM}} \text{ è diventato } m_{\text{stop}}$$

m_{stop} non deve essere alta per non avere finetuning

LEP2 non ha trovato la supersimmetria



Finetuning al livello di qualche %

“Nuove” idee?

E' interessante trovare nuove soluzioni al problema:

EWSB + Piccola Gerarchia

*“Piccolo” obiettivo:
teorie specifiche e valide
fino a 5-10 TeV*

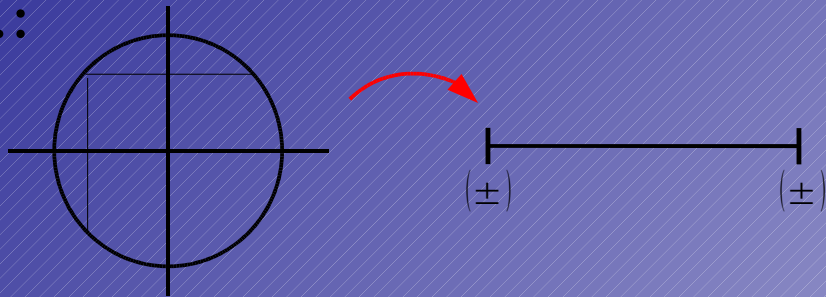
Ingredienti:

- *SUSY*
cancellazione tra bosoni/fermioni
- *Dimensioni extra*
rottura di simmetrie (con condiz. al contorno)
gerarchie (con redshift gravitazionale)
AdS/CFT
- *Rottura collettiva di simmetrie*
- *Pseudo Goldstone Bosons*
cancellazione tra bosoni/bosoni, fermioni/fermioni
- *...*

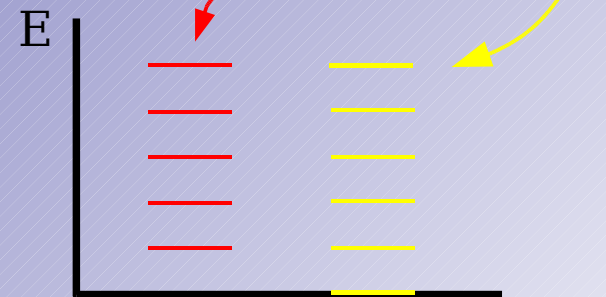
Modelli con rottura di Susy in 5D

Con una *dimensione extra*, assegnando *condizioni al bordo* diverse a bosoni e fermioni si può *rompere* la supersimmetria

Es.:



$$\begin{pmatrix} \phi(y) \\ \psi(y) \end{pmatrix} : \begin{pmatrix} + \\ - \end{pmatrix} \begin{matrix} \longrightarrow \\ \longrightarrow \end{matrix} \begin{pmatrix} \cos(ny) \\ \sin(ny) \end{pmatrix}$$



È una rottura *non locale*



Meno *parametri liberi*



Maggiore *calcolabilità*

Constrained Standard Model

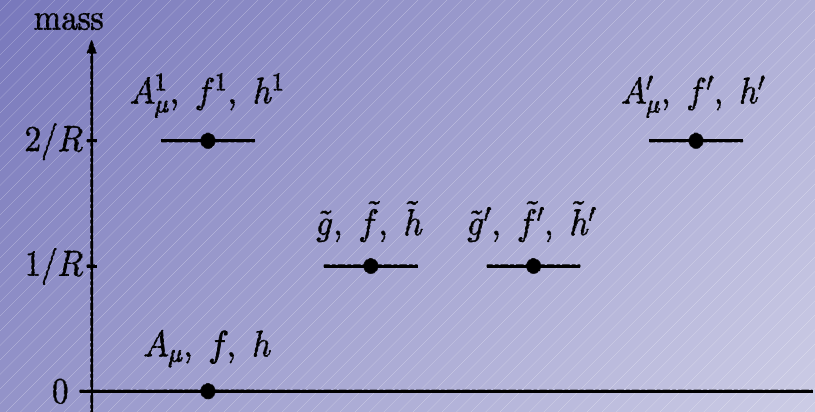
$$S^1/Z_2 \times Z'_2 : \begin{array}{c} \text{N=2} \\ \text{-----} \\ \text{N=1} \qquad \qquad \text{N=1}' \end{array}$$

In ogni punto la teoria è *supersimmetrica*

Sufficiente **1 solo Higgs** con $v \neq 0$

Ogni particella ha **2 superpartners**

LSP è sfermione (stop) (meta)stabile



1) **Versione minimale:**

$$G_F \Rightarrow 1/R \Rightarrow m_H \text{ fissati}$$

$$\delta m_H^2 \approx \frac{0.19}{R^2}$$

Tuttavia: **S, T, U non calcolabili**

1/R	360±70 GeV
h	130±10 GeV
\tilde{t}_1, \tilde{u}_1	210±20 GeV
$\chi^\pm, \chi^0, \tilde{g}, \tilde{q}, \tilde{l}$	360±70 GeV
A_1, q_1, l_1, h_1	720±140 GeV

Constrained Standard Model

2) *Versione con Top Quasi Localizzato a $y=0$*

Top/stop hanno una massa 5D \longrightarrow *1 parametro in più*

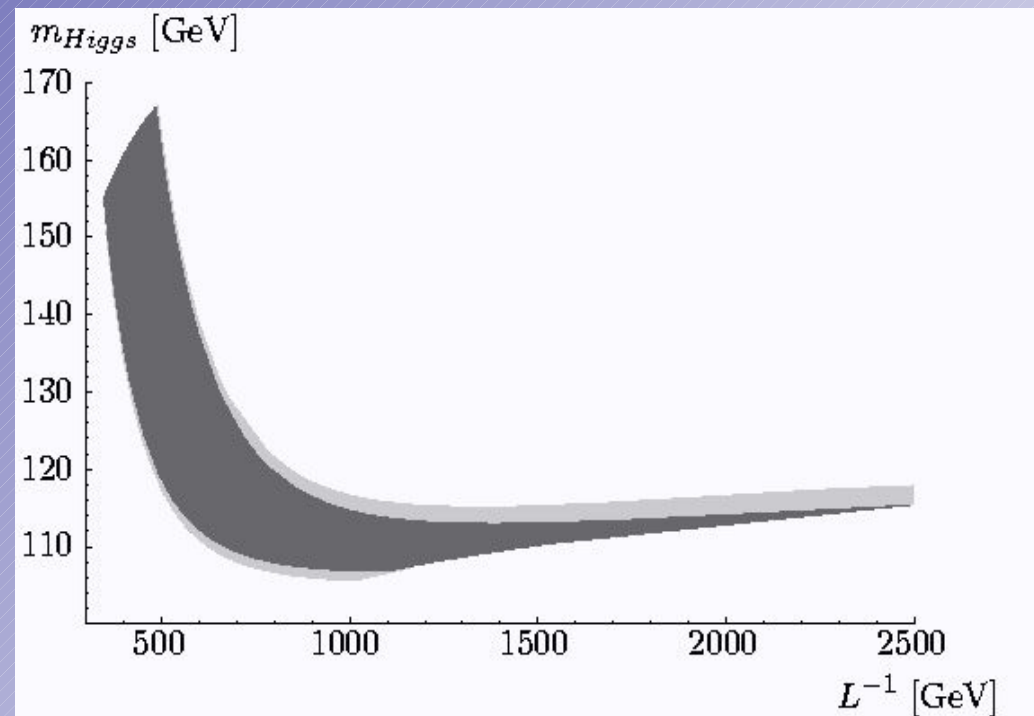
$$\delta m_H^2 \approx \frac{10^{-2}}{R^2} (3 \exp(-\pi MR/2) - .1)$$

\longrightarrow *finetuning ridotto*

$$m_{\text{stop}}^2 \approx m_t^2 + \left(\frac{370 \text{ GeV}}{L \text{ TeV}} \right)^2$$

Modifiche allo SM piccole se

$$1/L > 1 \text{ TeV}$$

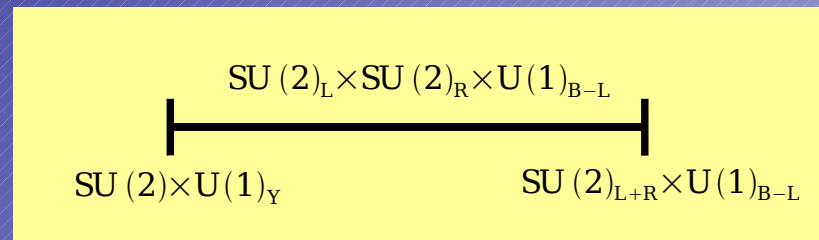


Teorie “Higgsless”

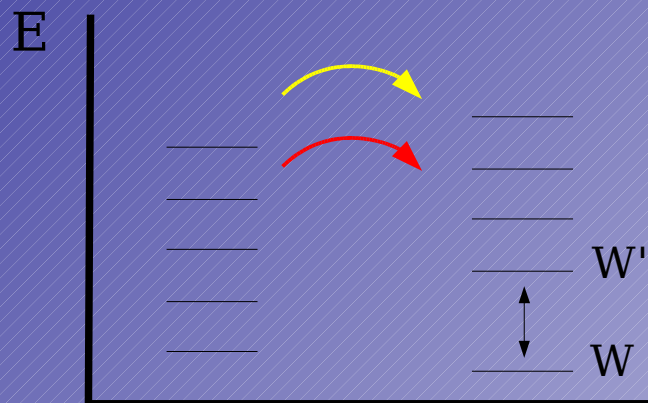
$SU(2)_L \times U(1)_Y$ rotto da condizioni al contorno

nessun bosone di Higgs \rightarrow unitarietà mantenuta dai KK di W, Z, A

Setup:



2 possibilità:



Teorie “Higgsless”

Simili a *technicolor* (AdS/CFT), ma *maggiore calcolabilità*

Tuttavia:

Cutoff non molto elevato $\Lambda < 5-6 \text{ TeV}$

S, T potenzialmente *grandi*
(specie dopo l' introduzione della materia)



(Grossi) problemi con i dati di precisione

Teorie “Little Higgs”

Se un meccanismo ad-hoc *cancella le divergenze quadratiche a 1-loop*:

$$\delta m_{H,2\text{loop}}^2 \sim \frac{G_F^2}{\pi^4} \Lambda_{\text{SM}}^2 m_t^4$$

Λ_{SM} può arrivare anche a **10 TeV**

Come?

- 1) L' Higgs è uno **Pseudo Goldstone boson** (come i pioni)
- 2) Servono almeno **2 interazioni diverse per rompere la simmetria globale** di cui l' Higgs è il Goldstone boson

$$\delta m_{H,2\text{loop}}^2 \sim \frac{g_1^2 g_2^2}{(4\pi)^4} \Lambda_{\text{SM}}^2$$

Teorie “Little Higgs”

Es.: modello minimale (“Littlest Higgs”)

$$\begin{aligned} & \text{SU}(5) \rightarrow \text{SO}(5) \\ & [\text{SU}(2) \times \text{U}(1)]^2 \rightarrow \text{SU}(2)_L \times \text{U}(1)_Y \end{aligned}$$

Alla scala di rottura $f \sim 1 \text{ TeV}$ ci sono *nuovi bosoni vettori, top e Higgs* che *cancellano le divergenze quadratiche a 1-loop* in m_H

Il cutoff della teoria è a $\Lambda = 4\pi f \approx 10 \text{ TeV}$

Tuttavia:

La *naturalità* richiede che f e m_f non eccedano di molto il *TeV*

I *dati di precisione* richiedono **$f > 5 \text{ TeV}$**



C'è una *significativa dose di finetuning* (che può essere ridotta complicando il modello)

Conclusioni

- *Le misure di precisione dello SM hanno messo in luce un nuovo problema, quello della piccola gerarchia:*
- *A meno di cancellazioni accidentali in m_H c'è una gerarchia incompresa tra la scala naturale dell' EWSB e quella della nuova fisica*
- *I tentativi di risoluzione di questo problema hanno aperto nuove possibilità per la rottura della simmetria elettrodebole, testabili negli esperimenti attuali e futuri*
- *Una soluzione soddisfacente a tale problema è ancora mancante*

Riferimenti

Constrained SM:

R.Barbieri, L.Hall, Y.Nomura, ph/0011311

R.Barbieri, G.Marandella, M.P., ph/0205280

R.Barbieri, L.Hall, G.Marandella, Y.Nomura, T.Okui, S.Oliver, M.P., ph/0208153

R.Barbieri, G.Marandella, M.P., ph/0305044

G.Marandella, M.P., ph/0405xxx

Higgsless Theories:

C.Csaki, C.Grojean, H.Murayama, L.Pilo, J.Terning, ph/0305237

C.Csaki, C.Grojean, L.Pilo, J.Terning, ph/0308038

C.Csaki, C.Grojean, J.Hubisz, Y.Shirman, J.Terning, ph/0310355

R.Barbieri, A.Pomarol, R.Rattazzi, ph/0310285

G.Burdman, Y.Nomura, ph/0312247

R.Foadi, S.Gopalakrishna C.Schmidt, ph/0312324

C.Csaki, G.Cacciapaglia, C.Grojean, J.Terning, ph/0401160

H.Davoudiasl, J.Hewett, B.Lillie, T.Rizzo, ph/0403300

M.P., ph/0405xxx

Riferimenti

Little Higgs:

N.Arkani-Hamed, A.Cohen, E.Katz, A.Nelson, ph/0206021

N.Arkani-Hamed, A.Cohen, T.Gregoire, A.Nelson, J.Wacker, ph/0206020

G.Burdman, M.Perelstein, A.Pierce, ph/0212228

D.Kaplan, M.Schmalz, ph/0302049

C.Csaki, J.Hubisz, G.Kribs, P.Meade, J.Terning, ph/0303236

R.Casalbuoni, A.Deandrea, M.Oertel, ph/0311038

G.Azuelos et al., ph/0402037

...