Teoría de cuerdas en búsqueda del MSSM

Saúl Ramos-Sánchez

IFUNAM

Fac. de Ciencias Físico Matemáticas, BUAP
Junio 8, 2011

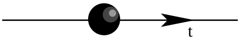
En colaboración con

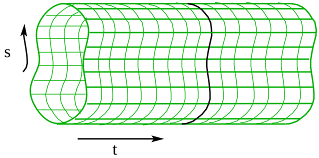
H.P. Nilles, S. Raby, M. Ratz, P. Vaudrevange: (2006-2008)
O. Lebedev: arxiv:0912.0477
S. Parameswaran, I. Zavala: arxiv:1009.3931

Cuerdas

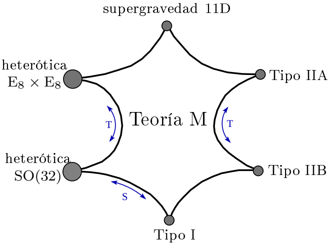
Cuerdas

1970's: partículas $\rightarrow$ cuerdas





80-90's: 5 teorías de supercuerdas (+branas)



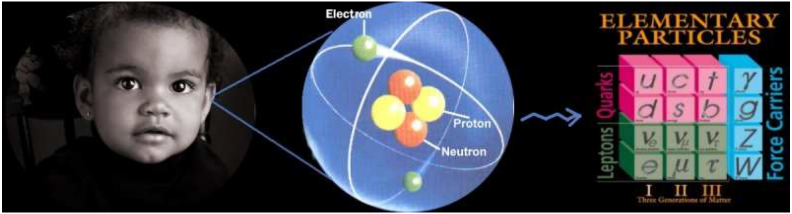
consistencia cuántica

(no anomalías, "fantasmas", taquiones):

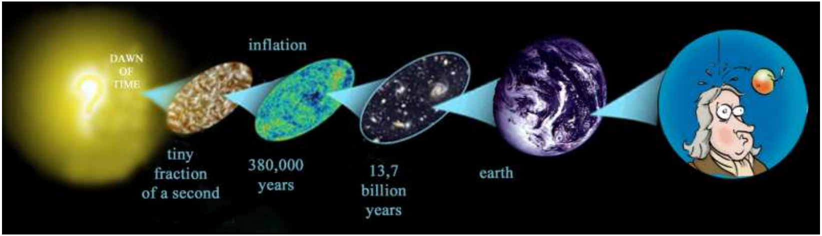
$\rightarrow$

* gravitón incluido
* bosones de norma
* supersimetría
* 10 dimensiones

Phenomenología. A dónde vamos ?



SM = QCD $(\mathrm{SU}(3))$ + EW $(\mathrm{SU}(2)\times\mathrm{U}(1)_Y)$ ☺



Relatividad general (RG): Cosmología ☺

Por qué teoría de cuerdas ?

- ☺ predice SUSY ✓
- ☺ incluye gravedad $\rightarrow$ unificación ✓
- ☺ es una teoría cuántica $\rightarrow$ gravedad cuántica ✓
- ☺ incluye grupos de norma naturalmente ✓
- ☺ puede reproducir el espectro $exacto$ del MSSM ✓
- ☺ describe mecanismos de ~~SUSY~~ $\rightarrow$ ~~EW~~ ✓
- ☺ tiene muchas simetrías internas $\rightarrow$ sabor, estabilidad,... ✓

Por qué teoría de cuerdas ?

- ☺ predice SUSY ✓
- ☺ incluye gravedad → unificación ✓
- ☺ es una teoría cuántica → gravedad cuántica ✓
- ☺ incluye grupos de norma naturalmente ✓
- ☺ puede reproducir el espectro *exacto* del MSSM ✓
- ☺ describe mecanismos de ~~SUSY~~ → ~~EW~~ ✓
- ☺ tiene muchas simetrías internas → sabor, estabilidad,... ✓

- ☹ predice $D = 10$
- ☹ tiene simetrías de norma muy grandes (e.g. $\mathrm{SO}(32)$)
- ☹ genera QFTs con muchos parámetros libres
- ☹ ha sido cuantizada sólo en fondos particulares
- ☹ ningún resultado verificable!

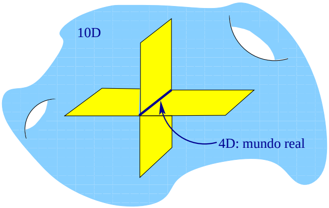
10 D ?

☹ $D = 10 \xrightarrow{\text{cómo?}} D = 4$

10 D ?

☹ $D = 10 \xrightarrow{\text{cómo?}} D = 4$

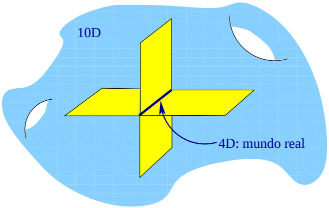
- mundos brana:



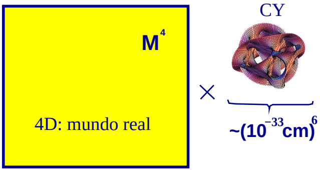
10 D ?

☹ $D = 10 \xrightarrow{\text{cómo?}} D = 4$

- mundos brana:



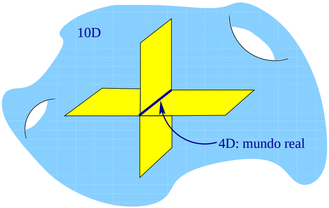
- compactificaciones: CY u orbifolds



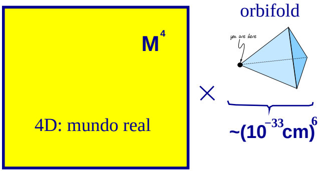
10 D ?

☹ $D = 10 \xrightarrow{\text{cómo?}} D = 4$

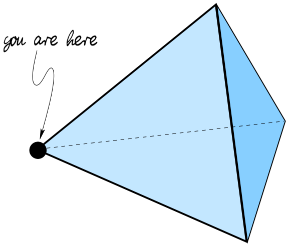
- mundos brana:



- compactificaciones: CY u orbifolds



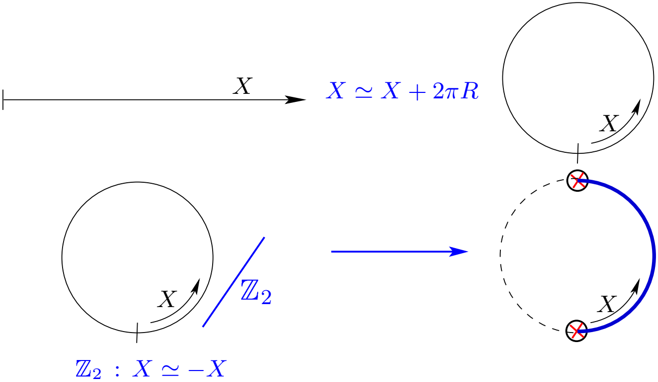
Orbifolds



Dixon, Harvey, Vafa, Witten (1985-86)
Ibáñez, Nilles, Quevedo (1987)
Casas, de la Macorra, Mondragón, Muñoz (1989-1990)
Katsuki, Kawamura, Kobayashi, Ohtsubo, Ono, Tanioka (1990)
Erler, Klemm (1993)
Förste, Nilles, Vaudrevange, Wingerter (2004)
Buchmüller, Hamaguchi, Lebedev, Ratz (2004-06)
Kobayashi, Nilles, Plöger, Raby, Ratz (2006)
Faraggi, Förste, Timirgaziu (2006)
Förste, Kobayashi, Ohki, Takahashi (2006)
Kim, Kyae (2006-07)
Choi, Kim (2006-08)
...

Compactificaciones en Orbifolds

Orbifold de 1D con simetría $\mathbb{Z}_2$ en 5D



Espacio singular muy pequeño $R \ll 1mm \rightarrow$ no lo vemos!!

Kaluza, Klein (1920s)

Orbifolds heteróticos

La cuerda heterótica

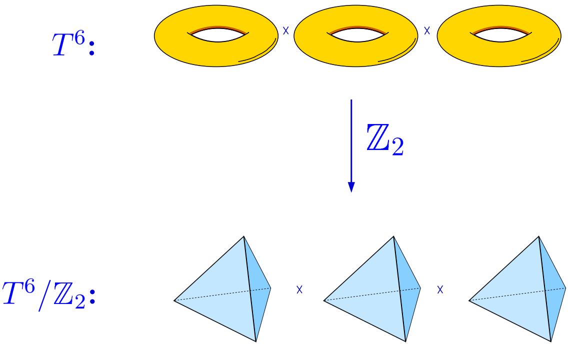
- 10 D
- SUSY (de hecho, SUGRA) $\mathcal{N} = 1 \rightarrow$ quiralidad ✓
- bosones de norma

$$\mathrm{E}_8 \times \mathrm{E}_8 \supset \mathrm{E}_6, \mathrm{SO}(10), \mathrm{SU}(5), \mathrm{SU}(4) \times \mathrm{SU}(2)_L \times \mathrm{SU}(2)_R, \mathcal{G}_{SM} \checkmark$$

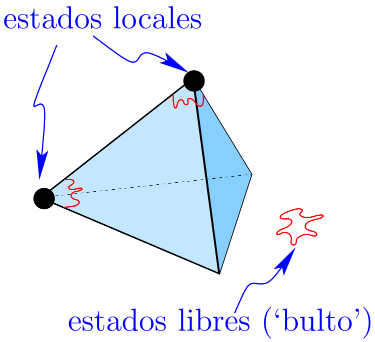
- sólo cuerdas cerradas (no D-branas) $\rightarrow$ interacciones calculables exactamente ✓
- dualidades con heterótica $\mathrm{SO}(32)$, tipo IIB, teoría F,...

Orbifolds heteróticos

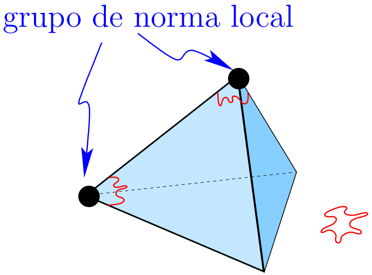
Orbifold de 6D con simetría $\mathbb{Z}_2$ en 10D



Orbifolds heteróticos: cuerdas y estados

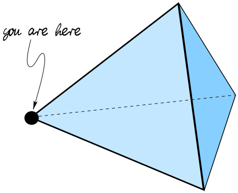


Orbifolds heteróticos: cuerdas y estados



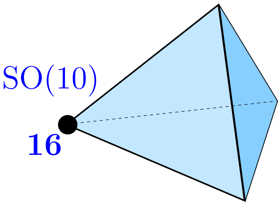
$\mathcal{G}_{4D} = \cap$ grupos de norma locales

Orbifolds heteróticos: cuerdas y estados



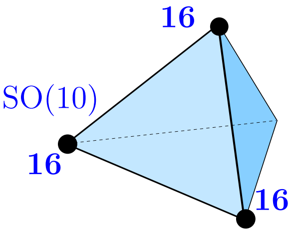
$$\to W, K, \mathcal{L}, \Lambda, \ldots$$

Orbifolds heteróticos: “carta a los reyes”



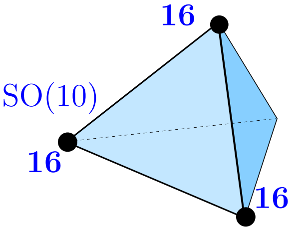
$\mathbf{16} \rightarrow$ familia completa de quarks y leptones

Orbifolds heteróticos: “carta a los reyes”



$\rightarrow$ primer reto: 3 familias de quarks y leptones

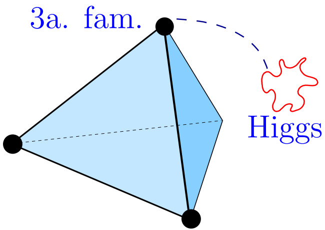
Orbifolds heteróticos: "carta a los reyes"



→ primer reto: 3 familias de quarks y leptones

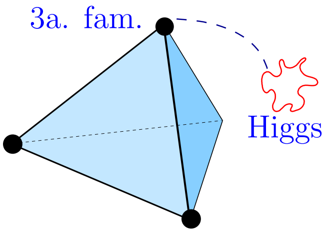
→ segundo reto: $\mathcal{G}_{4D} = \mathcal{G}_{SM}$

Orbifolds heteróticos: “carta a los reyes”



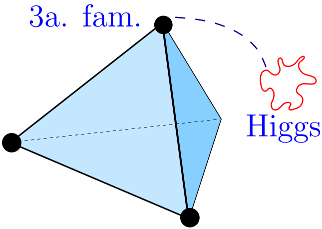
→ primer reto: 3 familias de quarks y leptones
→ segundo reto: $\mathcal{G}_{4D} = \mathcal{G}_{SM}$
→ tercer reto: quark top pesado

Orbifolds heteróticos: "carta a los reyes"



$\rightarrow$ posible en cuerdas?

Minilandscape: $\mathbb{Z}_6$–II



- Construir **todos** los orbifolds $\mathbb{Z}_6$–II aceptables (no anomalías)
- Elegir los que tengan grupos locales $\mathrm{SO}(10)$
- Elegir los que tengan spinores $\mathbf{16}$ locales
- Elegir los que tengan $\mathcal{G}_{SM}$ in 4D
- Elegir los que tengan 3 familias
- Elegir los que tengan dobletes de Higgs
- Elegir los que tengan top pesado
- Elegir los que no tengan materia exótica

Minilandscape

Minilandscape: resultados

☺ 10^7 orbifolds $\mathbb{Z}_6$–II aceptables $\to$ “parches fértiles”

- ~ 300 “MSSM”
- sin partículas exóticas
- unificación $\mathcal{G}_{SM} \subset \mathrm{SO}(10)$
- top pesado
- $m_{3/2}$ $\sim$TeV
- seesaw
- “texturas” no triviales
- paridad R
- doublet-triplet splitting
- axion QCD

Minilandscape: resultados

☺ 10^7 orbifolds $\mathbb{Z}_6$–II aceptables $\rightarrow$ "parches fértiles"

- ~ 300 "MSSM"
- sin partículas exóticas
- unificación $\mathcal{G}_{SM} \subset \mathrm{SO}(10)$
- top pesado
- $m_{3/2}$ $\sim$TeV
- seesaw
- "texturas" no triviales
- paridad R
- doublet-triplet splitting
- axion QCD

requerido

Minilandscape: resultados

☺ 10^7 orbifolds $\mathbb{Z}_6$–II aceptables $\rightarrow$ "parches fértiles"

- ~ 300 "MSSM"
- sin partículas exóticas
- unificación $\mathcal{G}_{SM} \subset \mathrm{SO}(10)$
- top pesado

requerido

- $m_{3/2}$ $\sim$TeV
- seesaw
- "texturas" no triviales
- paridad R
- doublet-triplet splitting
- axion QCD

gratis !! ☺

Ejemplo

Minilandscape: un Ejemplo

Input:

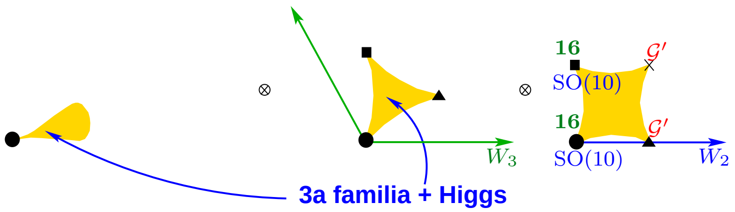
- Shift $V^{\mathrm{SO}(10),1}$
- líneas de Wilson W_2, W_3

  $W_2 = (\frac{1}{4}, -\frac{1}{4}, -\frac{1}{4}, -\frac{1}{4}, -\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})\ (1, -1, -\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, -\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, \frac{3}{2})$

  $W_3 = (-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})\ (\frac{10}{3}, 0, -6, -\frac{7}{3}, -\frac{4}{3}, -5, -3, 3)$
- "reglas de selección" para los acoplamientos

Output:

- $\mathcal{G}_{4D} = \mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B\text{–}L} \times [\mathrm{SO}(8) \times \mathrm{SU}(2) \times \mathrm{U}(1)^6]$



Minilandscape: un Ejemplo

3 familias (número neto)					
3	$(\mathbf{3},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,1/3)}$	q_i			
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-2/3,-1/3)}$	$\bar{u}_i$			
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1,1)}$	$\bar{e}_i$			
3+1	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,-1/3)}$	$\bar{d}_i$	1	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,1/3)}$	d_i
3+1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,-1)}$	ℓ_i	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,1)}$	$\bar{\ell}_i$
Higgses					
1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,0)}$	h_d	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,0)}$	h_u
Singuletes del SM					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,\pm 2)}$	χ_i	18	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,0)}$	s_i^0
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	h_i	5	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,0)}$	w_i
15	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,1)}$	$\bar{n}_i$	12	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,-1)}$	n_i
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,1)}$	$\bar{\eta}_i$	3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,-1)}$	η_i
Exóticos					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	y_i	4	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,*)}$	m_i
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(1/2,1)}$	x_i^+	2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(-1/2,-1)}$	x_i^-
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,2/3)}$	$\bar{\delta}_i$	3	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,-2/3)}$	δ_i
4	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/6,*)}$	$\bar{v}_i$	4	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,*)}$	v_i
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,*)}$	s_i^+	20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,*)}$	s_i^-
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,-1/2)}$	f_i	2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,1/2)}$	$\bar{f}_i$

Lebedev, Nilles, Raby, S.R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2007)

Minilandscape: un Ejemplo

3 familias (número neto)					
3	$(\mathbf{3},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,1/3)}$	q_i			
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-2/3,-1/3)}$	$\bar{u}_i$			
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1,1)}$	$\bar{e}_i$			
3+1	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,-1/3)}$	$\bar{d}_i$	1	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,1/3)}$	d_i
3+1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,-1)}$	ℓ_i	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,1)}$	$\bar{\ell}_i$
Higgses					
1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,0)}$	h_d	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,0)}$	h_u
Singuletes del SM					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,\pm 2)}$	χ_i	18	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,0)}$	s_i^0
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	h_i	5	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,0)}$	w_i
15	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,1)}$	$\bar{n}_i$	12	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,-1)}$	n_i
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,1)}$	$\bar{\eta}_i$	3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,-1)}$	η_i
Exóticos					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	y_i	4	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,*)}$	m_i
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(1/2,1)}$	x_i^+	2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(-1/2,-1)}$	x_i^-
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,2/3)}$	$\bar{\delta}_i$	3	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,-2/3)}$	δ_i
4	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/6,*)}$	$\bar{v}_i$	4	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,*)}$	v_i
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,*)}$	s_i^+	[illegible]	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,*)}$	s_i^-
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,-1/2)}$	f_i	2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,1/2)}$	$\bar{f}_i$

$X,\ \bar{X}$

Lebedev, Nilles, Raby, S.R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2007)

3 familias (número neto)					
3	$(\mathbf{3},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,1/3)}$	q_i			
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-2/3,-1/3)}$	$\bar{u}_i$			
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1,1)}$	$\bar{e}_i$			
3+1	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,-1/3)}$	$\bar{d}_i$	1	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,1/3)}$	d_i
3+1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,-1)}$	ℓ_i	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,1)}$	$\bar{\ell}_i$
Higgses					
1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,0)}$	h_d	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,0)}$	h_u
Singuletes del SM					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,\pm 2)}$	χ_i	18	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,0)}$	s_i^0
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	h_i	5	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,0)}$	w_i
15	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,1)}$			$\ldots\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,-1)}$	n_i
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2}\ldots$				η_i
2	$(\mathbf{1},\ldots$				m_i
2	$(\ldots$				$\ldots_i^-$
3	$(\ldots$				$\ldots_i$
4	$(\overline{\mathbf{3}}\ldots$				$\ldots_i$
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\ldots$				s_i^-
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1}\ldots$				$\bar{f}_i$

$\langle\chi\rangle, \langle h\rangle, \langle s\rangle \sim \mathcal{O}(M_{\mathrm{Pl}})+$ inter. de cuerdas

$\Downarrow$

$$\mathcal{G}_{4D} \longrightarrow \mathcal{G}_{SM} \times \mathbb{Z}_2^{\mathrm{Materia}} \times [\mathrm{SO}(8)]$$

&

$$M\; X\,\overline{X} \equiv \langle s\rangle^n \langle h\rangle^m \langle\chi\rangle^r X\,\overline{X}$$

Lebedev, Nilles, Raby, S.R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2007)

Minilandscape: un Ejemplo

3 familias (número neto)					
3	$(\mathbf{3},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,1/3)}$	q_i			
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-2/3,-1/3)}$	$\bar{u}_i$			
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1,1)}$	$\bar{e}_i$			
3+1	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,-1/3)}$	$\bar{d}_i$	1	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,1/3)}$	d_i
3+1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,-1)}$	ℓ_i	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,1)}$	$\bar{\ell}_i$
Higgses					
1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,0)}$	h_d	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,0)}$	h_u
Singuletes del SM					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,\pm 2)}$	χ_i	18	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,0)}$	s_i^0
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	h_i	5	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,0)}$	w_i
15	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,1)}$			$\mathbf{1})_{(0,-1)}$	n_i
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})$				η_i
2	$(\mathbf{1},$				m_i
2	(				
3	(				
4	$(\overline{\mathbf{3}}$				
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1},$				s_i^-
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})$				$\bar{f}_i$

$\langle\chi\rangle, \langle h\rangle, \langle s\rangle \sim \mathcal{O}(M_{\rm Pl}) +$ inter. de cuerdas

$$\Downarrow$$

$$\mathcal{G}_{4D} \longrightarrow \mathcal{G}_{SM} \times \mathbb{Z}_2^{\rm Materia} \times [\mathrm{SO}(8)]$$

&

$$M\ X\ \overline{X} \equiv \langle s\rangle^n \langle h\rangle^m \langle\chi\rangle^r X\ \overline{X}$$

Lebedev, Nilles, Raby, S.R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2007)

Minilandscape: un Ejemplo

3 familias (número neto)					
3	$(\mathbf{3},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/6,1/3)}$	q_i			
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-2/3,-1/3)}$	$\bar{u}_i$			
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1,1)}$	$\bar{e}_i$			
3+1	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/3,-1/3)}$	$\bar{d}_i$	1	$(\mathbf{3},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/3,1/3)}$	d_i
3+1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,-1)}$	ℓ_i	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,1)}$	$\bar{\ell}_i$
Higgses					
1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,0)}$	h_d	1	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,0)}$	h_u
Singuletes del SM					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,\pm 2)}$	χ_i	18	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,0)}$	s_i^0
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,0)}$	h_i	5	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,0)}$	w_i
15	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,1)}$	$\bar{n}_i$	12	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(0,-1)}$	n_i
3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,1)}$	$\bar{\eta}_i$	3	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{2})_{(0,-1)}$	η_i
[illegible]					
2	$(\mathbf{1},\mathbf{2};\mathbf{1},\mathbf{2})$ [illegible]				m_i
2	[illegible]				x_i^-
3	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})$ [illegible]			[illegible] $-2/3)$	δ_i
4	$(\overline{\mathbf{3}},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/6,*)}$	[illegible]	[illegible]	[illegible] $_{(1/6,*)}$	v_i
20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(1/2,*)}$	s_i^+	20	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{1},\mathbf{1})_{(-1/2,*)}$	s_i^-
2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,-1/2)}$	f_i	2	$(\mathbf{1},\mathbf{1};\mathbf{8},\mathbf{1})_{(0,1/2)}$	$\bar{f}_i$

Muchos neutrinos “derechos”

$\bar{\nu}$

con $q_{B-L} = \pm 1$

Lebedev, Nilles, Raby, S.R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2007)

see-saw

$\bar{\nu}$

ν

see-saw en el ML

- En $\mathrm{SO}(10)$ GUT: $\overline{\nu} \in \mathbf{16}$

  $\overline{\nu}$: $(\mathbf{1}, \mathbf{1})_{0,+1}$ de $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L} \subset \mathrm{SO}(10)$

- En $\mathrm{SO}(10)$ GUT: $\overline{\nu} \in \mathbf{16}$

  $\overline{\nu}$: $(\mathbf{1},\mathbf{1})_{0,+1}$ de $\mathcal{G}_{SM}\times\mathrm{U}(1)_{B-L} \subset \mathrm{SO}(10)$
- B-L identificada al restringir:
  1. q_{B-L}(SM) $\stackrel{!}{=}$ estándar
  2. materia $\stackrel{!}{=}$ 3 gen. con grupo $\mathcal{G}_{SM}\times\mathrm{U}(1)_{B-L}$

see-saw en el ML

- En $\mathrm{SO}(10)$ GUT: $\overline{\nu} \in \mathbf{16}$
  $$\overline{\nu} : (\mathbf{1},\mathbf{1})_{0,+1} \text{ de } \mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L} \subset \mathrm{SO}(10)$$
- B-L identificada al restringir:
  1. $q_{B-L}(\mathrm{SM}) \stackrel{!}{=}$ estándar
  2. materia $\stackrel{!}{=}$ 3 gen. con grupo $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L}$
- Lebedev, Nilles, Raby, R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2006)
  Romper B-L espont. $\langle s \rangle \neq 0$ con $3q_{B-L}(s) = 2n \quad \Rightarrow \mathbb{Z}_2^R$

see-saw en el ML

- En SO(10) GUT: $\overline{\nu} \in \mathbf{16}$

  $\overline{\nu}$: $(\mathbf{1},\mathbf{1})_{0,+1}$ de $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L} \subset \mathrm{SO}(10)$

- B-L identificada al restringir:
  1. q_{B-L}(SM) $\stackrel{!}{=}$ estándar
  2. materia $\stackrel{!}{=}$ 3 gen. con grupo $\mathcal{G}_{SM} \times$U(1)$_{B-L}$

  Lebedev, Nilles, Raby, R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2006)

- $\langle s_{q_{B-L}=\pm 2} \rangle \neq 0$ $\Rightarrow$

En el ML

U(1)$_{B-L} \to \mathbb{Z}_2^R$

"Paridad de materia"

$(-1)^{3q_{B-L}}$

see-saw en el ML

- En $\mathrm{SO}(10)$ GUT: $\overline{\nu} \in \mathbf{16}$

  $\overline{\nu}$: $(\mathbf{1},\mathbf{1})_{0,+1}$ de $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L} \subset \mathrm{SO}(10)$
- B-L identificada al restringir:
  1. $q_{B-L}(\text{SM}) \stackrel{!}{=}$ estándar
  2. materia $\stackrel{!}{=}$ 3 gen. con grupo $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L}$

Lebedev, Nilles, Raby, R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2006)

- $\langle s_{q_{B-L}=\pm 2} \rangle \neq 0 \quad \Rightarrow$

En el ML

$\mathrm{U}(1)_{B-L} \to \mathbb{Z}_2^R$

- $\bar{\nu}$: singuletes SM con $q_{B-L} = \pm 1$ *hay muchos*

- En $\mathrm{SO}(10)$ GUT: $\overline{\nu} \in \mathbf{16}$

  $\overline{\nu}$: $(\mathbf{1}, \mathbf{1})_{0,+1}$ de $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L} \subset \mathrm{SO}(10)$
- B-L identificada al restringir:
  1. $q_{B-L}(\mathrm{SM}) \stackrel{!}{=}$ estándar
  2. materia $\stackrel{!}{=}$ 3 gen. con grupo $\mathcal{G}_{SM} \times \mathrm{U}(1)_{B-L}$

Lebedev, Nilles, Raby, R-S., Ratz, Vaudrevange, Wingerter (2006)

- $\langle s_{q_{B-L}=\pm 2} \rangle \neq 0 \quad \Rightarrow$

En el ML

$\mathrm{U}(1)_{B-L} \to \mathbb{Z}_2^R$

- $\bar{\nu}$: singuletes SM con $q_{B-L} = \pm 1$ *hay muchos*
- Acoplamientos de Yukawa nacen de la teoría !

$\overline{\mathbf{126}}, \mathbf{210}, \ldots$ no necesarias!

masas de Majorana: $\bar{\nu}\,\bar{\nu}$ (singuletes)

Ejemplo

En un modelo específico

$$21\ \bar{\nu}^{+1} + 18\ \bar{\nu}^{-1}$$

$$W_{\text{see-saw}} \ = \ M^{ij}\,\bar{\nu}_i\,\bar{\nu}_j + {Y_\nu}^{ij}\,\phi_u\,\ell_i\,\bar{\nu}_j$$

Ejemplo

En un modelo específico

$$21\ \bar{\nu}^{+1} + 18\ \bar{\nu}^{-1}$$

$$W_{\text{see-saw}} = M^{ij}\,\bar{\nu}_i\,\bar{\nu}_j + {Y_\nu}^{ij}\,\phi_u\,\ell_i\,\bar{\nu}_j$$

- $m_{\nu_L} \sim v^2\, Y_\nu\, M^{-1}\, {Y_\nu}^T$

$$\sim \frac{v^2}{M_{see-saw}} \begin{pmatrix} 1 & s & s \\ s & s^2 & s^2 \\ s & s^2 & s^2 \end{pmatrix}$$

$s = \mathcal{O}(0.1)$

$M_{see-saw} \sim 0.1\, s^5\, M_S \sim 10^{14} GeV$

$\Rightarrow\ m_{\nu_L} \sim 0.1\, eV\ \checkmark$

Comparar con $\quad m_{\nu_L} \approx 10^{-3}$ de GUT SO(10) y $\sqrt{\Delta m^2_{atm}} \sim 0.04 eV$

Ejemplo

En un modelo específico

$$21\ \bar\nu^{+1} + 18\ \bar\nu^{-1}$$

$$W_{\text{see-saw}} = M^{ij}\,\bar\nu_i\,\bar\nu_j + Y_\nu{}^{ij}\,\phi_u\,\ell_i\,\bar\nu_j$$

- $m_{\nu_L} \sim v^2\, Y_\nu\, M^{-1}\, Y_\nu{}^T$

$$\sim \frac{v^2}{M_{see-saw}} \begin{pmatrix} 1 & s & s \\ s & s^2 & s^2 \\ s & s^2 & s^2 \end{pmatrix}$$

$$M_{see-saw} \sim 0.1\, s^5\, M_S \sim 10^{14} GeV$$
$$\Rightarrow\ m_{\nu_L} \sim 0.1\, eV\ \checkmark$$

Comparar con $m_{\nu_L} \approx 10^{-3}$ de GUT $\mathrm{SO}(10)$ y $\sqrt{\Delta m^2_{atm}} \sim 0.04eV$

- aumentada $m_{\nu_L} \propto \#\bar\nu \sim \mathcal{O}(50)$

Otras texturas en un ejemplo

Acoplamientos de Yukawa pueden ser calculados explícitamente:

$$Y_u = \begin{pmatrix} 0 & 0 & s^8 \\ 0 & 0 & s^8 \\ s^5 & s^5 & 1 \end{pmatrix}$$

$$Y_d = \begin{pmatrix} 1 & s^3 & 0 \\ 1 & s^3 & 0 \\ s & s^4 & s^6 \end{pmatrix}$$

$$Y_e = \begin{pmatrix} 1 & 1 & s \\ s & s & s^2 \\ 0 & 0 & s^6 \end{pmatrix}$$

No viables exp., pero es un inicio!

La moraleja...

- fenomenología de cuerdas se acerca (lentamente) a preguntas interesantes☺
- primeros modelos con propiedades prometedoras (MSSM y NMSSM)☺
- simetría $\mathbb{Z}_2^R \rightarrow$ protón estable, seesaw, LSP,... ☺
- acoplamientos calculables ☺
- simetrías R $+\ldots$ provienen de cuerdas (no *ad hoc*) ☺

Lo que falta...

- parámetros "libres" $\rightarrow$ moduli stabilization (en proceso)
- explicación vacío de Sitter (en proceso)
- inflación (en proceso)
- simetrías de sabor (en proceso)
- singularidades en espacio compacto $\rightarrow$ inconsistencias grav.??

$\vdots$

- predicciones para el LHC

El NMSSM

Por qué el NMSSM ?

- El problema μ

$$\mu H_u H_d \subset W$$

$$\lambda S H_u H_d \subset W_{\text{NMSSM}} \qquad \rightarrow \qquad \mu = \lambda \langle S \rangle$$

Por qué el NMSSM ?

- El problema μ

$$\mu H_u H_d \subset W$$

$$\lambda S H_u H_d \subset W_{\text{NMSSM}} \qquad \rightarrow \qquad \mu = \lambda \langle S \rangle$$

- El problema de fine-tuning / pequeña jerarquía:

  Predicción SUSY (tree level) $m_h \leq m_Z$ vs. límite LEP

  (MS)SM $\quad m_h > 114$ GeV $\quad \rightarrow \widetilde{q}$ muy masivos

  gran fine-tuning ☹

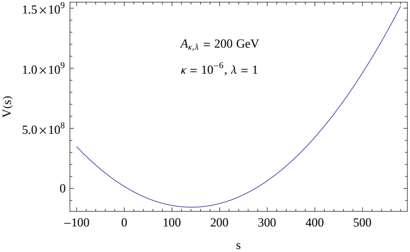
  NMSSM $\quad m_h > 90$ GeV $\quad \rightarrow \widetilde{q}$ "ligeros"

  poco / cero fine-tuning ☺

MSSM $+$ singulete S, tal que

$$W = W_{MSSM} + \lambda S H_u H_d + \frac{1}{3}\kappa S^3$$

E.g. en el límite PQ (ligeramente) roto ($\kappa \ll 1$)



$$\rightarrow \quad \mu = \lambda\langle s\rangle \gtrsim 100 \text{ GeV}$$

NMSSM: el límite PQ

La simetría $\mathrm{U}(1)_{PQ}$

$$W_{NMSSM} = \lambda S H_u H_d \quad \Rightarrow \quad H_{u,d} \to e^{\mathrm{i}\alpha} H_{u,d},\ S \to e^{-2\mathrm{i}\alpha} S$$

El rompimiento espontaneo de $\mathrm{U}(1)_{PQ}$ $\to$ escalar CP-impar:

$$\to \qquad a_{\mathrm{PQ}} = \sin 2\beta(a\,\mathrm{Im}\,H_u + b\,\mathrm{Im}\,H_d) + c\,\mathrm{Im}\,S$$

Más importante

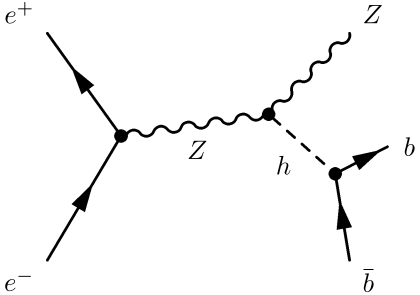
$$Br(h \to 2\ a_{\mathrm{PQ}}) \gg Br(h \to b\bar{b})$$

Dobrescu, Landsberg, Matchev (2001)

LEP menos sensible a $h \to 2\ a_{\mathrm{PQ}}$

$\Rightarrow$ límite se reduce: $m_h > 90$ GeV ✓

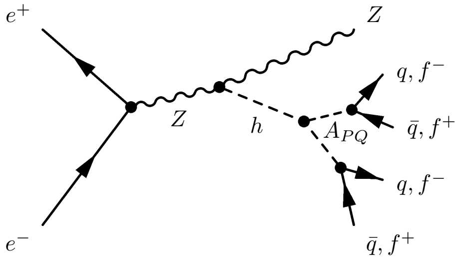
En el (MS)SM:



límite LEP: $m_h > 114$ GeV

NMSSM: el límite PQ

En el NMSSM:



límite LEP: $m_h > 105$ GeV para τ's

$m_h > 90$ GeV para quarks ligeros

NMSSMs heteróticos en el ML

En órbifolds heteróticos

- SM singulete S sin masa
- $\lambda S\, H_u\, H_d$, con $\lambda \sim \mathcal{O}(1)$
- término μ “normal” *altamente* suprimido
- S cargado bajo otros grupos (“ocultos”)

$\Rightarrow \quad \lambda = 1 + \mathcal{O}(0.1)^n \sim \mathcal{O}(1), \qquad \kappa = \mathcal{O}(0.1)^m \ll 1$

NMSSMs heteróticos en el ML

En órbifolds heteróticos

- SM singulete S sin masa
- $\lambda S\, H_u\, H_d$, con $\lambda \sim \mathcal{O}(1)$
- término μ "normal" *altamente* suprimido
- S cargado bajo otros grupos ("ocultos")

$\Rightarrow \quad \lambda = 1 + \mathcal{O}(0.1)^n \sim \mathcal{O}(1), \qquad \kappa = \mathcal{O}(0.1)^m \ll 1$

En ML, típicamente límite PQ

$\langle s \rangle \sim \mathcal{O}(0.1)$ fijo demandando $D = 0$

$\lambda \sim 1, \;\; \kappa \sim 10^{-6} \;\; \rightarrow$ límite con $m_{a_{PQ}} \sim 10^2$ MeV – GeV ☺

$\rightarrow$ resuelve el problema de fine-tuning & problema μ en el ML

$\rightarrow$ evade/se ajusta a límite de LEP