Simetrías modulares de sabor y teoría de cuerdas

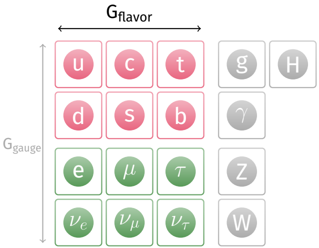
colaboradores: S. Ramos–Sánchez, P.K.S. Vaudrevange, H.P. Nilles, A. Trautner, and M. Kade

Alexander Baur

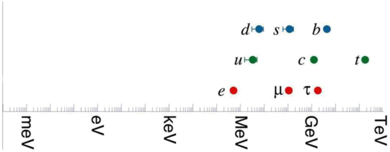
IF-UNAM & TUM

Más allá del Modelo Estándar y Astropartículas – 16.03.2022

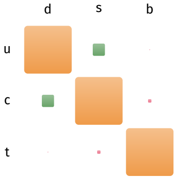
Motivación



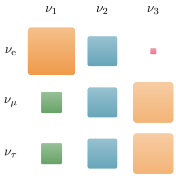
Modelo Estandar



Masas de fermiones



CKM



PMNS

TEORÍA DE GRUPOS

- Teoría invariante sobre grupo modular $\Gamma \simeq \mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z})$
- Campos transformen trivialmente bajo $\Gamma(N) \subset \Gamma$

$\rightarrow$ Simetría modular finita $\Gamma_N = {}^{\Gamma}/_{\Gamma(N)}$.

$N \leq 5:$ Grupos geométricos simples

$N > 5:$ Literatura matemática

¿Qué otros subgrupos normales de $\mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z})$ existen?

Simetría ecléctica: $G^{\mathrm{ecl}} = G^{\mathrm{mod}} \ltimes G^{\mathrm{trad}}$

2001.01736

Teoría de formas modulares

$\mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z}) \quad \Rightarrow$ formas modulares de pesos pares **1706.08749**

Teoría de formas modulares

$\mathrm{PSl}(2, \mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos pares	**1706.08749**
$\mathrm{Sl}(2, \mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos impares	**1907.01488**

Teoría de formas modulares

$\mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos pares	**1706.08749**
$\mathrm{Sl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos impares	**1907.01488**
$\tilde{\mathrm{Sl}}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos racionales	**2007.13706**

Teoría de formas modulares

$\mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos pares	**1706.08749**
$\mathrm{Sl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos impares	**1907.01488**
$\tilde{\mathrm{Sl}}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos racionales	**2007.13706**
$\mathrm{Gl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	transformación de CP	**1901.03251 & 1905.11970**

Teoría de formas modulares

$\mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos pares	**1706.08749**
$\mathrm{Sl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos impares	**1907.01488**
$\tilde{\mathrm{Sl}}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos racionales	**2007.13706**
$\mathrm{Gl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	transformación de CP	**1901.03251 & 1905.11970**
$\mathrm{Sp}(4,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	multiple moduli	**2010.07952 & 2012.09586**

Teoría de formas modulares

$\mathrm{PSl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos pares	**1706.08749**
$\mathrm{Sl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos impares	**1907.01488**
$\tilde{\mathrm{S}}\mathrm{l}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	formas modulares de pesos racionales	**2007.13706**
$\mathrm{Gl}(2,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	transformación de CP	**1901.03251 & 1905.11970**
$\mathrm{Sp}(4,\mathbb{Z})$	$\Rightarrow$	multiple moduli	**2010.07952 & 2012.09586**
???	$\Rightarrow$	formas modulares no holomorfas	

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Input

$\mathrm{Re}(\tau)$	$\mathrm{Im}(\tau)$
$\langle\varphi_\mathrm{e}\rangle_1$	$\langle\varphi_\mathrm{e}\rangle_2$
$\langle\varphi_\mathrm{D}\rangle_1$	$\langle\varphi_\mathrm{D}\rangle_2$
Λ_e	Λ_ν

$\rightarrow$

Code

Calculate masses and PMNS matrix

$\rightarrow$

Observables

δm^2	Δm^2
m_e	m_μ
m_τ	δ_CP
ϑ_{12}	ϑ_{13}
ϑ_{23}	$m_{\beta\beta}$
$\sum m_i$	m_1
m_2	m_3
α_1	α_2

compare

Experiment

$$\chi^2 = \sum \frac{(o_{i,\mathrm{pred}} - o_{i,\mathrm{exp}})^2}{\sigma_i^2}$$

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Input

$\mathrm{Re}(\tau)$	$\mathrm{Im}(\tau)$
$\langle\varphi_{\mathrm{e}}\rangle_1$	$\langle\varphi_{\mathrm{e}}\rangle_2$
$\langle\varphi_{\mathrm{D}}\rangle_1$	$\langle\varphi_{\mathrm{D}}\rangle_2$
Λ_{e}	Λ_ν

→

Code

Calculate masses and PMNS matrix

→

Observables

δm^2	Δm^2
m_{e}	m_μ
m_τ	δ_{CP}
ϑ_{12}	ϑ_{13}
ϑ_{23}	$m_{\beta\beta}$
$\sum m_i$	m_1
m_2	m_3
α_1	α_2

compare ↔ Experiment

$$\chi^2 = \sum \frac{(o_{i,\mathrm{pred}} - o_{i,\mathrm{exp}})^2}{\sigma_i^2}$$

← Choose new input ↑

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Input → Code → Observables

Input

$\mathrm{Re}(\tau)$	$\mathrm{Im}(\tau)$
$\langle\varphi_e\rangle_1$	$\langle\varphi_e\rangle_2$
$\langle\varphi_D\rangle_1$	$\langle\varphi_D\rangle_2$
Λ_e	Λ_ν

Code

Calculate masses and PMNS matrix

Choose new input

Observables

δm^2	Δm^2
m_e	m_μ
m_τ	δ_{CP}
ϑ_{12}	ϑ_{13}
ϑ_{23}	$m_{\beta\beta}$
$\sum m_i$	m_1
m_2	m_3
α_1	α_2

compare

Experiment

$$\chi^2 = \sum \frac{(o_{i,\text{pred}} - o_{i,\text{exp}})^2}{\sigma_i^2}$$

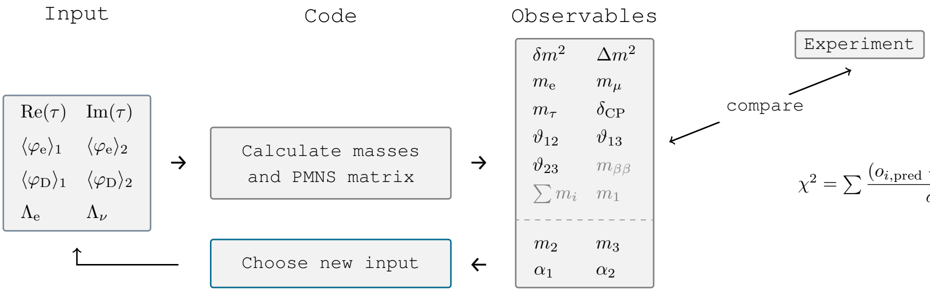
Enfoques actuales:

Random scan

Minuit

python-scipy $\left\{\begin{array}{l}\text{Levenberg-Marquardt}\\ \text{Nelder-Mead}\\ \text{Differential-Evolution}\\ \text{Powell}\\ \text{Cobyla}\\ \vdots\\ \text{Markov Chain Monte Carlo}\end{array}\right.$

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES



$$\chi^2 = \sum \frac{(o_{i,\mathrm{pred}} - o_{i,\mathrm{exp}})^2}{\sigma_i^2}$$

Enfoques actuales:

Random scan

Minuit

python-scipy
- Levenberg-Marquardt
- Nelder-Mead
- Differential-Evolution
- Powell
- Cobyla
- ⋮
- Markov Chain Monte Carlo

Enfoques futuros:

Generic algorithms?

Reinforcement learning?

Herramientas de Teoría de Cuerdas

- Una teoría efectiva de baja energía de una teoría de cuerdas contiene muchas simetrías
- De qué simetrías se trata depende en gran medida de la compactificación
- Orbifolios abelianos heteróticos pueden producir simetrías modulares en el target space

Herramientas de Teoría de Cuerdas

- Una teoría efectiva de baja energía de una teoría de cuerdas contiene muchas simetrías
- De qué simetrías se trata depende en gran medida de la compactificación
- Orbifolios abelianos heteróticos pueden producir simetrías modulares en el target space

Clasificación:

$\mathbb{T}^2/\mathbb{Z}_3$

flavor symmetry	
traditional	modular
$\Delta(54)$	T'
$\mathbf{3}$	$\mathbf{2}' \oplus \mathbf{1}$

$\mathbb{T}^2/\mathbb{Z}_2$

flavor symmetry	
traditional	modular
$\dfrac{D_8 \times D_8}{\mathbb{Z}_2}$	$(S_3 \times S_3) \rtimes \mathbb{Z}_4$
$\mathbf{4}$	$\mathbf{2} \oplus \mathbf{1} \oplus \mathbf{1}$

$\mathbb{T}^2/\mathbb{Z}_4$ & $\mathbb{T}^2/\mathbb{Z}_6$

trabajo en curso

Herramientas de Teoría de Cuerdas

Las compactificaciones realistas suelen tener campos de fondo no triviales en las dimensiones gauge

- Un campo de fondo $->$ El campo se realiza como un módulo del grupo modular Siegel $\mathrm{Sp}(4, \mathbb{Z})$
- Múltiples campos de fondo $->$???

Otros preguntas:

- ¿Pueden otras compactificaciones, por ejemplo Calabi Yau, proporcionar simetrías modulares?
- ¿Salen simetrías modulares de otros tipos de teorías de cuerdas?

CONCLUSIONES

- Las simetrías modulares son una solución atractiva al reto del sabor.
- Todavía hay muchas direcciones en las que se puede investigar.
- Se pueden aplicar varias herramientas para estudiar las simetrías modulares de sabor:
  - Teoría de grupos
  - Teoría de formas modulares
  - Herramientas computacionales
  - Teoría de cuerdas
  - ...