

***Daniel E. LOPEZ-Fogliani, 5/8/2024, Buenos Aires***

**Investigador independiente CONICET, en IFIBA/DF UBA  
Profesor protitular (Profesor asociado, regular, simple) en UCA**



<http://apgroup.df.uba.ar>

*Astroparticle and  
Particle Physics Group*

***Partículas e interacciones fundamentales***

**Día del DF, FCEyN UBA, biblioteca nacional, ciudad de Buenos Aires, 5 de Agosto de 2024**

## Índice de la charla

**Introducción a física de altas energías:** partículas e interacciones fundamentales

**Algunos aportes y trabajos del grupo:** Astroparticle and particle Physics Group

[ Grupo teórico, dedicado a la fenomenología, especializado en nueva física ]

Incluiré una idea de las restricciones experimentales actuales

## Tres conceptos Importantes

**Los campos están definidos en todo punto del espacio-tiempo.**

**Las partículas quedan descritas por excitaciones cuánticas de los campos.**

**Las interacciones son locales.**

Objeto con masa (energía) estudiado a distintas escalas:

Mayor masa implica una menor longitud de onda compton

$$\lambda_c = \frac{\hbar}{M c}$$

Longitud de onda compton reducida

Cuántica

Relatividad General

$$r_{Schw} = \frac{2 G M}{c^2} \sim \frac{G M}{c^2}$$

Radio de Schwarzschild

Mayor masa implica un mayor radio de schwarzschild

Longitud de Planck

$$l_{Planck} = \frac{\hbar}{M_{Planck} c} = \sqrt{\frac{G \hbar}{c^3}}$$

A esta escala no sabemos que sucede

$$l_{Planck} = \frac{\hbar}{M_{Pl} c} \approx 1.6 \times 10^{-33} cm$$

Unidades naturales

$$M_{Planck} = E_{Planck} = \frac{1}{l_{Planck}} = \frac{1}{t_{Planck}} \approx 1.221 \times 10^{19} GeV$$

$$m \approx 5.07 \times 10^{15} GeV^{-1}$$

$$s \approx 1.52 \times 10^{24} GeV^{-1}$$

$$Kg \approx 5.61 \times 10^{26} GeV$$

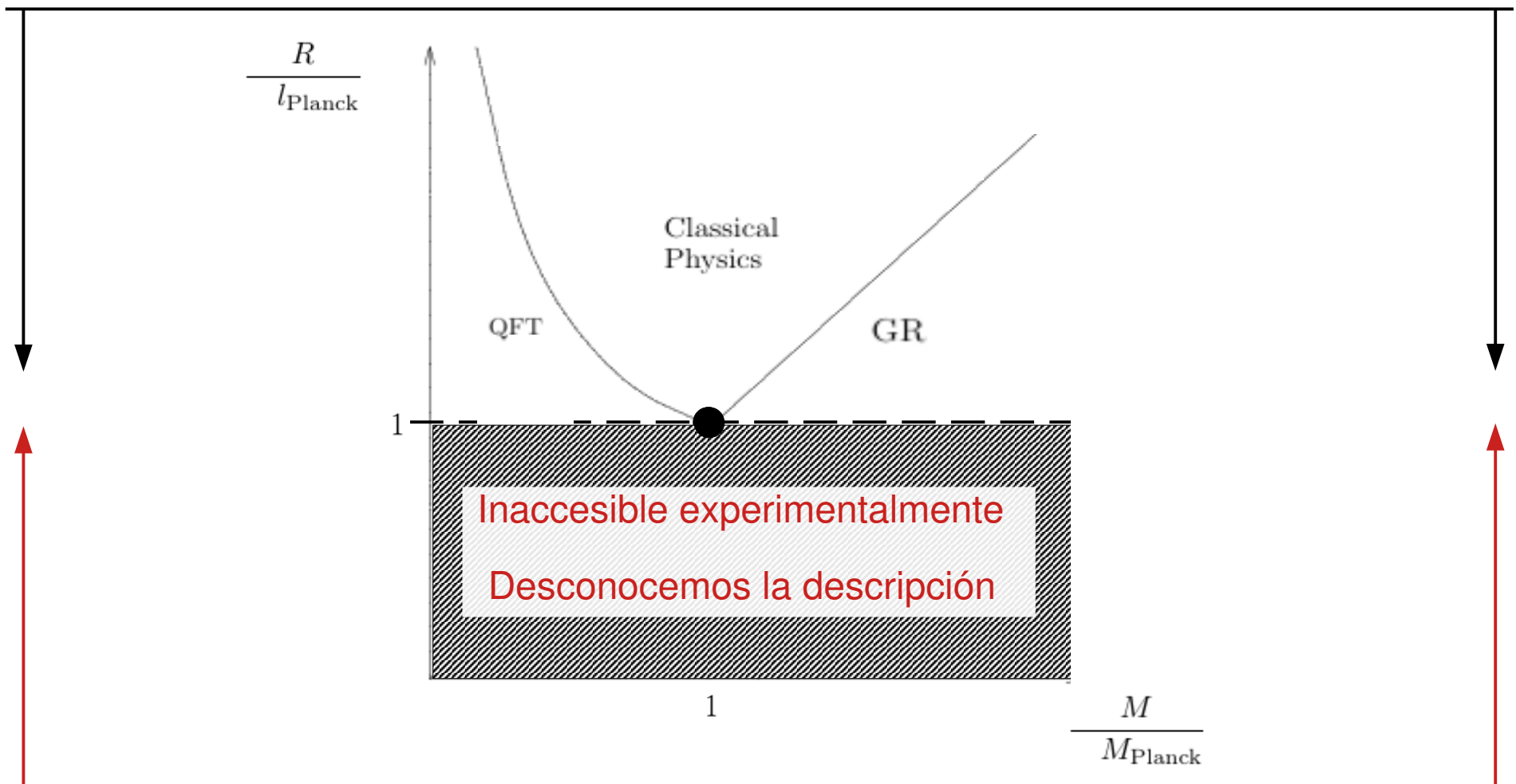
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{M_{\text{Planck}}^2} T_{\mu\nu} + \dots$$

Podríamos dar el Lagrangiano

Lo fija la física de partículas

Incluyendo la gravedad: **Teoría cuántica efectiva de campos** (gravedad no renormalizable)

Expansión en potencias negativas de la energía de Planck, descripción válida hasta la escala de Planck pero no más allá.



La gravedad no puede tratarse en forma efectiva por debajo de la longitud de Planck. Desconocemos la descripción.

*Desde el punto de vista fenomenológico tenemos una descripción completa de las partículas e interacciones fundamentales con teoría cuántica de campos.*

La cuestión importante es:

$$T_{\mu\nu} = ?$$

o

$$\mathcal{L} = ?$$

¿Cuál es el modelo/teoría que describe la física de partículas?

Es deseable que “se comporte bien” al interpretarlo como válido hasta la escala de Planck

Buscamos el más simple posible

¿Es el modelo estándar?

Trabajaremos en espacio-tiempo plano, métrica de Minkowski

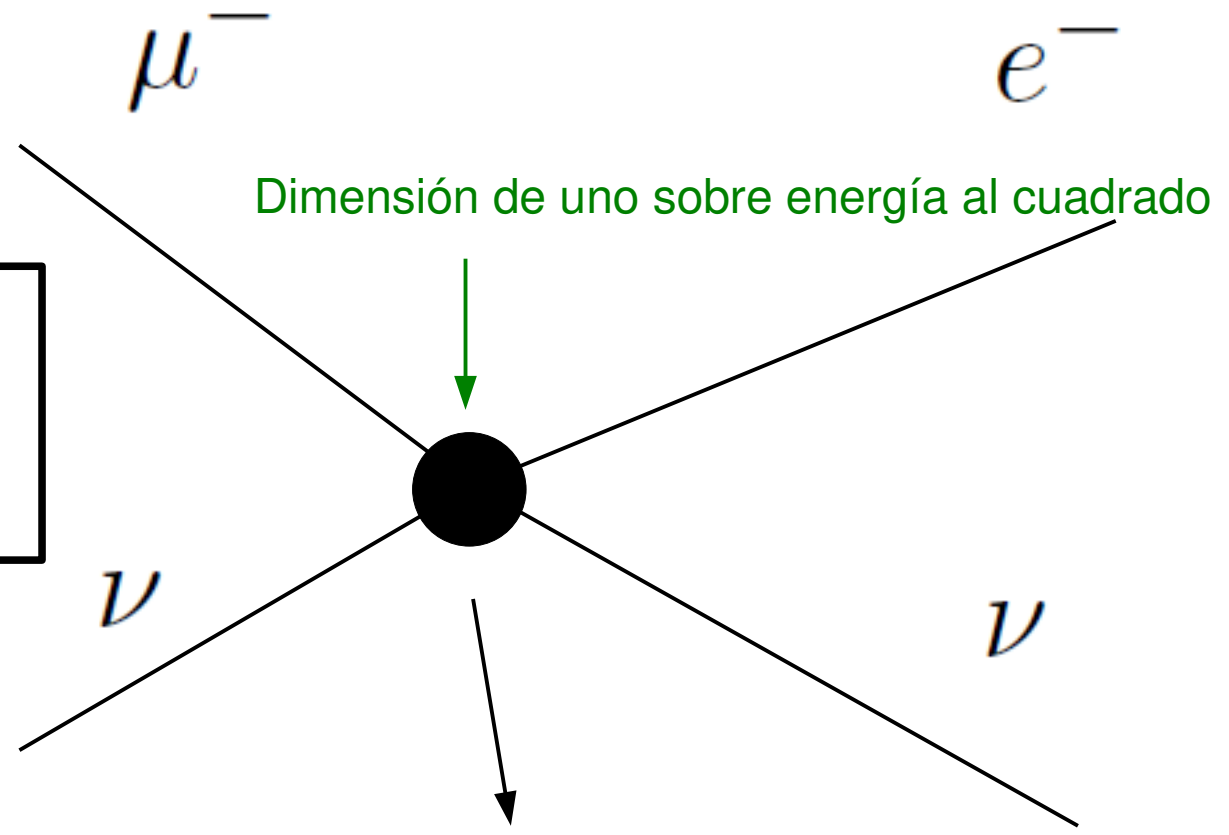
Discutamos un poco la teoría cuántica de campos y la descripción de la física

**Teorías efectivas y Teorías renormalizables**

# Teoría efectiva

Interacción débil: interacción de FERMI (Década 1930)

No renormalizable  
Valida hasta la escala electrodébil  
pero no más allá



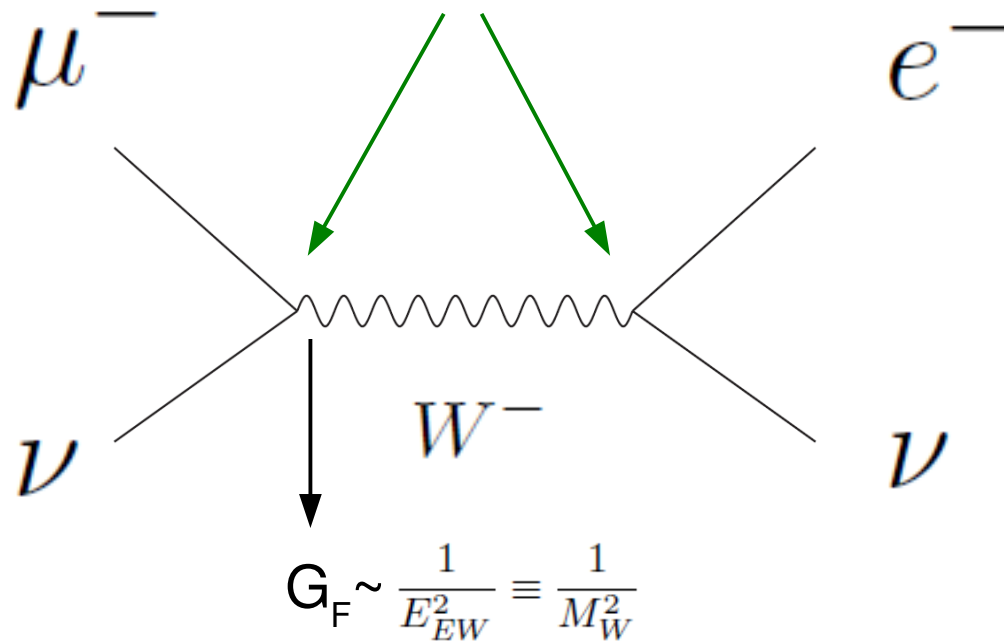
$$G_F \approx 1.16 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2} \sim \frac{1}{E_{EW}^2} \equiv \frac{1}{M_W^2}$$



# Teoría renormalizable

## Interacción electrodébil

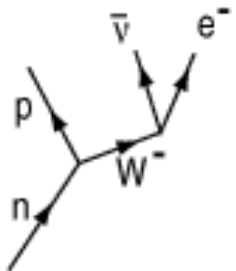
Los acoples NO tienen dimensiones



$$G_F \sim \frac{1}{E_{EW}^2} \equiv \frac{1}{M_W^2}$$

La interacción de Fermi, es la interacción mediada por el W vista con muy poca energía.

Podemos explorar experimentalmente escalas de energía más allá de la escala electrodébil y la física sigue estando descrita por una teoría cuántica de campo



Decay of neutron  
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

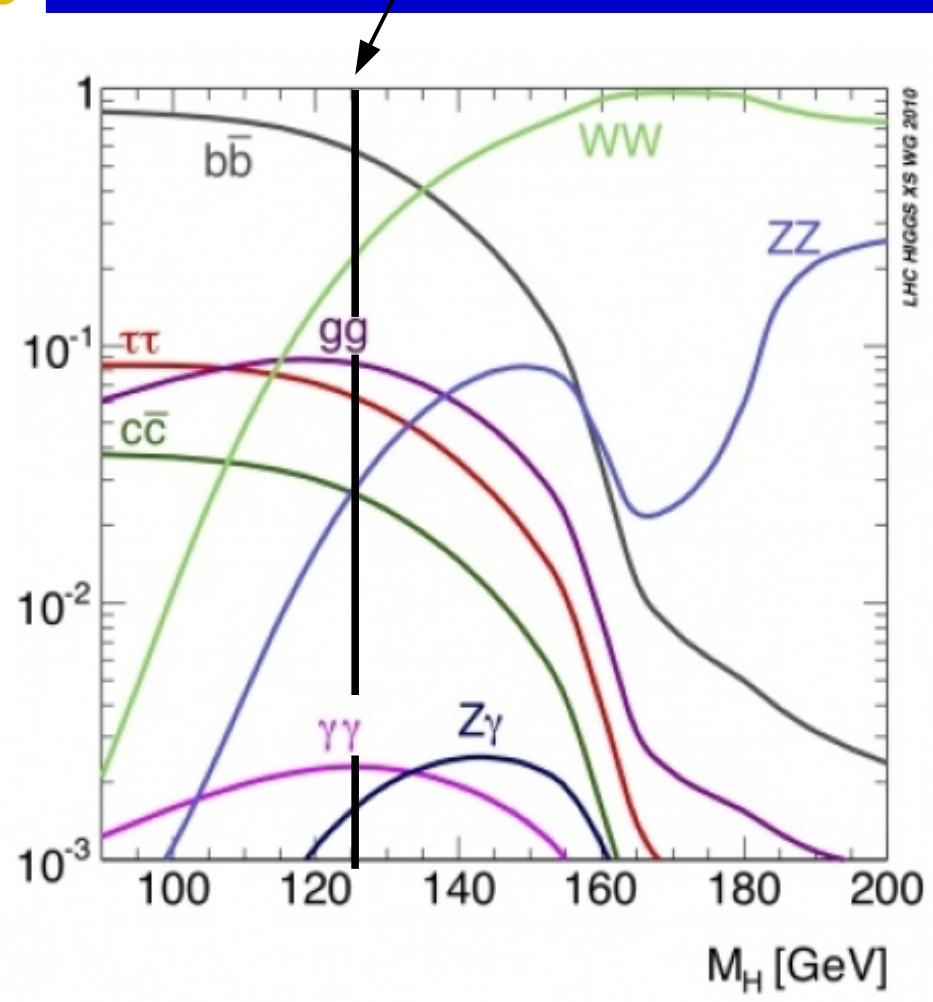
three generations of matter (fermions)      interactions / forces (bosons)

	I	II	III	
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}$	$\approx 1.3 \text{ GeV}$	$\approx 173 \text{ GeV}$	0
charge	$+2/3$	$+2/3$	$+2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>u</b>	<b>c</b>	<b>t</b>	<b>g</b>
	up	charm	top	gluon
				$\approx 125 \text{ GeV}$
				<b>H</b>
				Higgs
QUARKS	$\approx 4.7 \text{ MeV}$	$\approx 96 \text{ MeV}$	$\approx 4.2 \text{ GeV}$	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>d</b>	<b>s</b>	<b>b</b>	<b><math>\gamma</math></b>
	down	strange	bottom	photon
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}$	$\approx 106 \text{ MeV}$	$\approx 1.777 \text{ GeV}$	$\approx 80.4 \text{ GeV}$
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b>e</b>	<b><math>\mu</math></b>	<b><math>\tau</math></b>	<b>W</b>
	electron	muon	tau	W boson
	$< 1.0 \text{ eV}$	$< 0.17 \text{ eV}$	$< 18.2 \text{ MeV}$	$\approx 91.2 \text{ GeV}$
	0	0	0	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	<b><math>\nu_e</math></b>	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b><math>\nu_\tau</math></b>	<b>Z</b>
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z boson
				<b>GAUGE BOSONS</b>
				<b>VECTOR BOSONS</b>

**El modelo estándar: es renormalizable,** la escala a la que deja de valer el modelo puede extenderse hasta infinito.

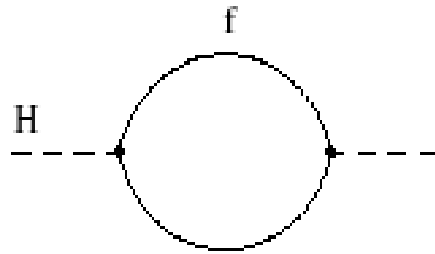
Al incluir la gravedad tendremos una teoría efectiva, más allá de la escala de Planck la física NO queda descrita por una teoría cuántica de campos (interacciones locales)

# SM Higgs



¿El modelo estándar, SM, es válido hasta la escala de Planck?

¡El modelo estándar posee problema de las jerarquías!



Correcciones cuánticas a la  $(\text{masa})^2$  del Higgs

$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV}^2 + \dots$$

Esto estropea la interpretación, más allá que al renormalizar fijemos la masa del Higgs al valor experimentalmente observado

La masa del Higgs se ve arrastrada por la escala del cutoff

# Opciones frente al problema de las jerarquías

El problema no existe: la interpretación es incorrecta

Es difícil aceptar esta postura .....

## Física más allá del modelo estándar

Notaremos desviaciones del modelo estándar a una escala no muy alejada de la electrodébil  
Intensa búsqueda en el LHC

# Opciones frente al problema de las jerarquías

El problema no existe: la interpretación es incorrecta

Es difícil aceptar esta postura .....

## Física más allá del modelo estándar

Notaremos desviaciones del modelo estándar a una escala no muy alejada de la electrodébil  
Intensa búsqueda en el LHC

- Modelos donde los bosones de espín cero sepan sobre quiralidad, y por lo tanto sean bien comportados como los fermiones.
  - **supersimetría**
- Modelos donde el Higgs no es fundamental
  - Technicolor y variantes.
- Otras ideas: deben reproducir todas las observaciones experimentales

# Supersimetría (SUSY)

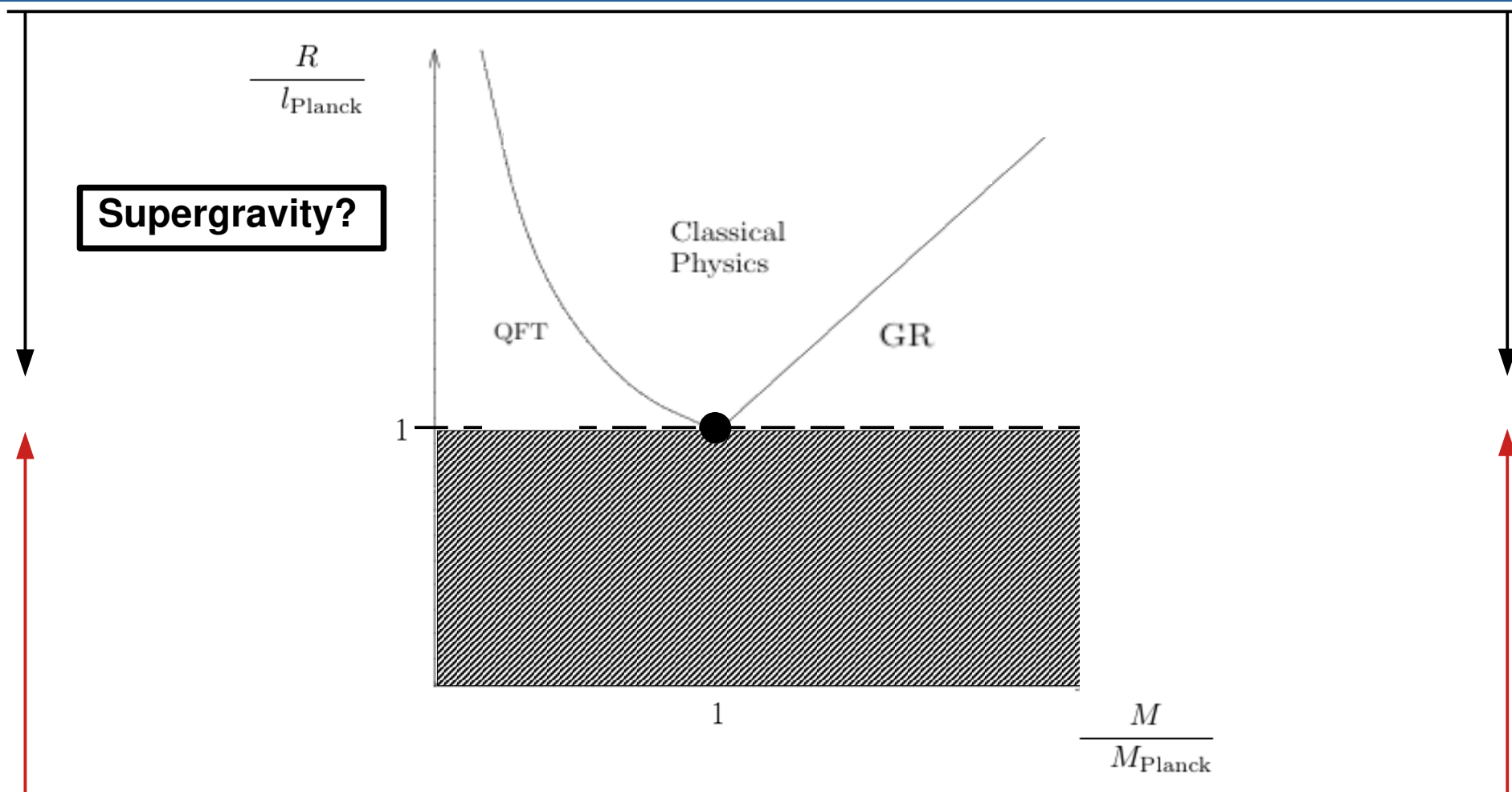
- Relaciona Fermiones y Bosones: Supercampos
- Álgebra supersimétrica es la extensión del álgebra de Poincare  
supercampos quirales y supercampos gauge
- Solución al Problema de las jerarquías
- Supersimetría rota mediante términos soft  
puede ser la única escala en el modelo renormalizable

**Supergravedad:** supersimetría local. Los términos soft tienen origen en ruptura espontánea  
Incluye la gravedad. Valida hasta la escala de Planck, no renormalizable.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{M_{\text{Planck}}^2}T_{\mu\nu} + \dots$$

Podríamos dar el Lagrangiano

Incluyendo la gravedad: **Teoría cuántica efectiva de campos** (gravedad no renormalizable)  
 Expansión en potencias negativas de la energía de Planck, descripción válida hasta la escala de Planck pero no más allá.



La gravedad no puede tratarse en forma efectiva por debajo de la longitud de Planck. Desconocemos la descripción.

# Debemos fijar un modelo concreto en el contexto de supersimetría

## Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM

La extensión mínima del modelo estándar, posee una fenomenología particular con predicciones de física más allá del modelo estándar

Names		spin 0	spin 1/2	$SU(3)_C, SU(2)_L, U(1)_Y$
squarks, quarks ( $\times 3$ families)	$Q$	$(\tilde{u}_L \ \tilde{d}_L)$	$(u_L \ d_L)$	$(\mathbf{3}, \mathbf{2}, \frac{1}{6})$
	$\bar{u}$	$\tilde{u}_R^*$	$u_R^\dagger$	$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, -\frac{2}{3})$
	$\bar{d}$	$\tilde{d}_R^*$	$d_R^\dagger$	$(\bar{\mathbf{3}}, \mathbf{1}, \frac{1}{3})$
sleptons, leptons ( $\times 3$ families)	$L$	$(\tilde{\nu} \ \tilde{e}_L)$	$(\nu \ e_L)$	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -\frac{1}{2})$
	$\bar{e}$	$\tilde{e}_R^*$	$e_R^\dagger$	$(\mathbf{1}, \mathbf{1}, 1)$
Higgs, higgsinos	$H_u$	$(H_u^+ \ H_u^0)$	$(\tilde{H}_u^+ \ \tilde{H}_u^0)$	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, +\frac{1}{2})$
	$H_d$	$(H_d^0 \ H_d^-)$	$(\tilde{H}_d^0 \ \tilde{H}_d^-)$	$(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -\frac{1}{2})$



En este punto uno podría estar pensando pero ....  
**¿se ha visto supersimetría? ¿no será que no existe?**

Mantengamos la calma, **apelemos a la enseñanza de la historia**

En este punto uno podría estar pensando pero ....  
**¿se ha visto supersimetría? ¿no será que no existe?**

Mantengamos la calma, **apelemos a la enseñanza de la historia**

El Higgs se ha detectado recién en 2012 ( $m_h \approx 125 \text{ GeV}$ )

**¿Hubo dudas sobre la existencia de la partícula de Higgs?**

Apelemos a figuras locales, en el ámbito de física de partículas

Giambiagi y Bollini: propusieron la regularización dimensional a principio de la década de 1970, una importante contribución al entendimiento matemático de la teoría cuántica de campos.



Bollini, fallece en 2009,  
tres años antes del  
descubrimiento del Higgs

Giambiagi, fallece en  
Enero de 1996,  
16 años antes del  
descubrimiento del  
Higgs.

LEP a principios de la década del  
2000 para un Higgs del modelo  
estándar imponía que la masa  
debía ser mayor a 114 GeV

hep-th/9607022

# Is the Higgs a visible particle ?



Aparece en arXiv en Julio 1996

Giambiagi ya había fallecido

Publicado en 1997  
en Nuovo Cimento A

C.G. Bollini, M.C. Rocca

Departamento de Física, Fac. de Ciencias Exactas,  
Universidad Nacional de La Plata.  
C.C. 67 (1900) La Plata. Argentina

August 1, 1995 → *Tomemos esta fecha como referencia*  
1995: año de la detección del quark top en Tevatron

## Abstract

We suggest that the Higgs might be unobservable as a free particle, due to its origin at a symmetry breaking mechanism.

The standard model is kept intact, only the definition of the vacuum for the Higgs is changed. With the new (natural) definition, the Higgs propagator is half advanced and half retarded. This Green function is compatible with the absence of free particles. PACS numbers: 10.11.11.10.Jj 12.12.15-y 12.15.Cc

## 4 Discussion

The negative outcome of the latest experiments on the Higgs, suggests that at least the scalar sector of the standard model may need some revision.

...

In practice, our suggestion means that the amplitude for any electroweak process is to be evaluated as usual. No Higgs will ever appear in external legs.

...

**Carlos G. Bollini en 1995** ante la falta de evidencia experimental del bosón de Higgs **plantea una alternativa con un Higgs indetectable** en arXiv: hep-th/9607022

**En 2012 la partícula de Higgs fue detectada**

17 años después de su propuesta de Higgs indetectable motivada por la falta de evidencia experimental de su momento (3 años después de su fallecimiento)

Curiosidad: Stephen Hawking apostó (y perdió) 100 dolares a Gordon Kane que el Higgs nunca sería descubierto

**Volviendo a nuestros días: Higgs detectado y búsqueda de supersimetría (más allá del SM)**

**Más allá que se planteen alternativas y dudas**

**Supersimetría es unas de las ideas mejor motivadas**

**Señales de nueva física motivadas por supersimetría podrían confirmarse en un futuro cercano**

## Física más allá del modelo estándar

- Es un buen momento para generar nuevas ideas, pero es un error descartar buenas ideas ya existentes antes de tiempo sin la evidencia experimental adecuada para tal efecto.
- Es necesario generar ideas nuevas para búsquedas en experimentos (como LHC):
  - Las ideas mejor motivadas teóricamente son una buena fuente de inspiración para análisis en el LHC y otros experimentos.
  - Restricciones experimentales motivadas por un modelo pueden luego ser aplicadas a propuestas teóricas muy diferentes.
  - Nuevas ideas deben tener en cuenta todas las restricciones experimentales aplicables a dicho modelo.

# ¿Hay motivación experimental de física más allá del modelo estándar?

Muy breve resumen de situación a principio de 2024

- **¡Neutrinos poseen masa cero en el SM !**
- **¡Materia Oscura, no hay candidato en el SM!**
- **$(g-2)_\mu$  Hay discrepancia, pero la gran dificultad del cálculo en el modelo estándar hace que no haya consenso sobre el resultado teórico.**
- **Flavour Physics: Hay procesos que poseen discrepancias con valores experimentales, pero nada concluyente.**
- **Posibles Indicios de Higgses ligeros en LHC (y antiguo LEP) Masa  $\approx 95$  GeV**

Los dos modelos más simples y populares del siglo XX

*Propuestos con anterioridad al descubrimiento de masa para los neutrinos en 1998*

*Conservan paridad-R implicando que la partícula supersimétrica más ligera es estable*

*A principios del siglo XXI se esperaba detectar directamente esa partícula como materia oscura*

## Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM:

Propuesta original: Dimopoulos & H. Georgi (1981) *Nucl. Phys. B*

Posee el conocido como problema  $\mu$  (problema de naturalidad)

No incluye física de neutrinos (al igual que en el SM debe agregarse)

Fuertemente restringido por detección directa de materia oscura

Las versiones más minimalistas fuertes restricciones de aceleradores (LHC)

No sería posible explicar un nuevo Higgs con masa menor a 125 GeV

**Muchas de las críticas hacia supersimetría provienen de pensar en el MSSM**  
(la mayoría en versiones muy minimalistas de este como el CMSSM)

## Next to Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM:

Propuesta original: Fayet (1975) *Nucl. Phys. B*

No posee el conocido como problema  $\mu$  (problema de naturalidad)

No incluye física de neutrinos (al igual que en el SM y el MSSM debe agregarse)

Cierta flexibilidad para escapar las restricciones en detección directa de materia oscura

Más espacio de parámetros libre de restricciones de aceleradores (LHC)

Sector de Higgs más rico. Puede contener un Higgs con masa menor a 125 GeV

**Algunos de nuestros aportes e ideas al área**



Una de nuestras líneas de investigación más importante esta relacionado con un modelo alternativo propuesto en la primera década del siglo XXI

## $\mu$ -from- $\nu$ Supersymmetric Standard Model, $\mu\nu$ SSM:

D. E. L-F en colaboración con C Muñoz: [La propuesta] PRL 2006, [arXiv:hep-ph/0508297 [hep-ph]]  
[Un review reciente y corto], EPJ ST (2020) [arXiv:2009.01380 [hep-ph]]

*La idea es construir el modelo SUSY más simple posible incluyendo neutrinos dextrógiros*

Una de nuestras líneas de investigación más importante esta relacionado con un modelo alternativo propuesto en la primera década del siglo XXI

## $\mu$ -from- $\nu$ Supersymmetric Standard Model, $\mu\nu$ SSM:

D. E. L-F en colaboración con C Muñoz: [La propuesta] PRL 2006, [arXiv:hep-ph/0508297 [hep-ph]]  
[Un review reciente y corto], EPJ ST (2020) [arXiv:2009.01380 [hep-ph]]

*La idea es construir el modelo SUSY más simple posible incluyendo neutrinos dextrógiros*

No conserva paridad-R a diferencia de los mencionados MSSM y NMSSM

**Incluye física de neutrinos:** se reproducen las mezclas fácilmente incluso con Yukawas diagonales para los neutrinos, permitiendo entender porque las masas del sector e quarks y neutrinos son tan diferentes

$$(m_\nu)_{ij} \sim \frac{m_{\mathcal{D}_i} m_{\mathcal{D}_j}}{3\mathcal{M}} (1 - 3\delta_{ij}) - \frac{(v_{iL}/\sqrt{2})(v_{jL}/\sqrt{2})}{2M}$$

**Esta libre de problema- $\mu$**

Una de nuestras líneas de investigación más importante esta relacionado con un modelo alternativo propuesto en la primera década del siglo XXI

## $\mu$ -from- $\nu$ Supersymmetric Standard Model, $\mu\nu$ SSM:

D. E. L-F en colaboración con C Muñoz: [La propuesta] PRL 2006, [arXiv:hep-ph/0508297 [hep-ph]]  
[Un review reciente y corto], EPJ ST (2020) [arXiv:2009.01380 [hep-ph]]

*La idea es construir el modelo SUSY más simple posible incluyendo neutrinos dextrógiros*

No conserva paridad-R a diferencia de los mencionados MSSM y NMSSM

**Incluye física de neutrinos:** se reproducen las mezclas fácilmente incluso con Yukawas diagonales para los neutrinos, permitiendo entender porque las masas del sector e quarks y neutrinos son tan diferentes

$$(m_\nu)_{ij} \sim \frac{m_{\mathcal{D}_i} m_{\mathcal{D}_j}}{3\mathcal{M}} (1 - 3\delta_{ij}) - \frac{(v_{iL}/\sqrt{2})(v_{jL}/\sqrt{2})}{2M}$$

**Esta libre de problema- $\mu$**

Rica fenomenología que podría ser confirmada experimentalmente

Amplio sector de Higgs con interesante fenomenología

Podría explicar Higgs extra de masa menor a 125 GeV ( $\approx 95$  GeV) fácilmente

Además interesantes extensiones con fenomenología particular ( $Z'$ , vector-like quarks, more)

## $\mu\nu$ SSM y materia oscura (algunos trabajos recientes)

D. E. L-F and C. Munoz, ``*Proposal for a Supersymmetric Standard Model*,'' Phys. Rev. Lett. **97** (2006), 041801 [arXiv:hep-ph/0508297 [hep-ph]].

G. A. Gomez-Vargas, D. E. Lopez-Fogliani, C. Munoz, A. D. Perez, "MeV-GeV  $\gamma$ -ray telescopes probing **axino** LSP/gravitino NLSP as dark matter in the  $\mu\nu$ SSM", JCAP 01 (2020) 058 [arXiv:1911.03191 [hep-ph]];

G. A. Gomez-Vargas, D. E. Lopez-Fogliani, C. Muñoz, A. D. Perez, "MeV-GeV  $\gamma$ -ray telescopes probing **gravitino** LSP with coexisting axino as NLSP dark matter in the  $\mu\nu$ SSM", Astropart. Phys. 125 (2021) 102506, [arXiv:1911.08550 [hep-ph]];

P. Knees, D. E. López-Fogliani and C. Muñoz, "Phenomenological implications of **sterile neutrinos** in the  $\mu\nu$ SSM and dark matter", Astropart. Phys. 151 (2023), 102865 [arXiv:2207.10689 [hep-ph]].

## Citas de Fermi-LAT

A. Albert *et al.* [Fermi-LAT], ``*Search for 100 MeV to 10 GeV  $\gamma$ -ray lines in the Fermi-LAT data and implications for gravitino dark matter in  $\mu\nu$ SSM*,'' JCAP 10 (2014), 023 [arXiv:1406.3430 [astro-ph.HE]].

A. Albert [Fermi-LAT], ``*Search for Gamma-Ray Spectral Lines with the Fermi Large Area Telescope and Status of the 135 GeV Feature*,'' Frascati Phys. Ser. **58** (2014), 67

## $\mu\nu$ SSM y física de aceleradores (algunos trabajos recientes)

D. E. L-F and C. Muñoz, ``*Proposal for a Supersymmetric Standard Model*,'' Phys. Rev. Lett. **97** (2006), 041801 [arXiv:hep-ph/0508297 [hep-ph]].

Iñaki Lara, Daniel E. López-Fogliani, Carlos Muñoz, "**Electroweak superpartners** scrutinized at the LHC in events with multi-leptons", Phys. Lett. B790 (2019) 176-183 [arXiv:1810.12455 [hep-ph]].

Essodjolo Kpatcha, Iñaki Lara, Daniel E. López-Fogliani, Carlos Muñoz, "Sampling the  $\mu\nu$ SSM for **displaced decays** of the tau left **sneutrino LSP** at the LHC", Eur. Phys. J. C79 (2019) no.11 934 [arXiv:1907.02092 [hep-ph]].

E. Kpatcha, I. Lara, D. E. López-Fogliani, C. Muñoz, N. Nagata and H. Otono, "Searching for **stop** LSP at the LHC," Eur. Phys. J. C 82 (2022) no.3, 261 [arXiv:2111.13212 [hep-ph]].

P. Knees, E. Kpatcha, I. Lara, D. E. Lopez-Fogliani and C. Muñoz, "Searching for **sbottom** LSP at the LHC," Eur. Phys. J. C 84 (2024) no.1, 104, [arXiv:2309.06456 [hep-ph]].

## Citas de ATLAS (LHC)

[ATLAS], ``**Reinterpretation of electroweak supersymmetry searches** with final states containing taus in models of variable  $R$ -parity-violating coupling strength," ATL-PHYS-PUB-2024-007, **2024**.

G. Aad *et al.* [ATLAS], ``*Search for pairs of muons with **small displacements** in pp collisions at  $s=13$  TeV with the ATLAS detector*,'' Phys. Lett. B **846** (2023), [arXiv:2305.02005 [hep-ex]].

[ATLAS], ``**Search for  $R$ -parity violating supersymmetry** in a final state containing leptons and many jets with the ATLAS experiment using  $\sqrt{s} = 13$  TeV proton-proton collision data," ATLAS-CONF-2021-007.

# Extensiones del $\mu$ SSM en el LHC (algunos trabajos recientes)

D. E. L-F and C. Munoz, "On a **reinterpretation of the Higgs field in supersymmetry** and a proposal for new quarks," Phys. Lett. B **771** (2017), 136-141 [arXiv:1701.02652 [hep-ph]].

Supercampos: Contienen Bosones y Fermiones

$$L_i = \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_i \end{pmatrix},$$

$$\begin{matrix} e_i^c \\ \boxed{\nu_i^c} \end{matrix},$$

$$L_4 = \begin{pmatrix} \nu_4 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_d^0 \\ H_d^- \end{pmatrix} = H_d,$$

$$L_4^c = \begin{pmatrix} e_4^c \\ \nu_4^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix} = H_u,$$

$$Q_i = \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix},$$

$$\begin{matrix} d_i^c \\ u_i^c \end{matrix},$$

Re-interpretación del espectro del  $\mu$ SSM que nos lleva a proponer una extensión con nuevos quarks (vector-like)

# Extensiones del $\mu\nu$ SSM en el LHC (algunos trabajos recientes)

D. E. L-F and C. Muñoz, "On a **reinterpretation of the Higgs field in supersymmetry and a proposal for new quarks**," Phys. Lett. B **771** (2017), 136-141 [arXiv:1701.02652 [hep-ph]].

Supercampos: Contienen Bosones y Fermiones

$$L_i = \begin{pmatrix} \nu_i \\ e_i \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} e_i^c \\ \nu_i^c \end{matrix}, \quad L_4 = \begin{pmatrix} \nu_4 \\ e_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_d^0 \\ H_d^- \end{pmatrix} = H_d, \quad L_4^c = \begin{pmatrix} e_4^c \\ \nu_4^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix} = H_u,$$

$$Q_i = \begin{pmatrix} u_i \\ d_i \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} d_i^c \\ u_i^c \end{matrix}, \quad Q_4 = \begin{pmatrix} u_4 \\ d_4 \end{pmatrix}, \quad Q_4^c = \begin{pmatrix} d_4^c \\ u_4^c \end{pmatrix}$$

J. A. Aguilar-Saavedra, D. E. L-F and C. Muñoz, "Novel signatures for **vector-like quarks**," JHEP **06** (2017), 095 [arXiv:1705.02526 [hep-ph]];

J. A. Aguilar-Saavedra, I. Lara, D. E. L-F and C. Muñoz, "U(1)' extensions of the  $\mu\nu$ SSM," Eur. Phys. J. C **81** (2021) no.5, 443 arXiv:2101.05565 [hep-ph]];

J. A. Aguilar-Saavedra, D. E. L-F, C. Muñoz and M. Pierre, "WIMP dark matter in the  $\mu\nu$ SSM", JCAP **05** (2022) 05, 004 [arXiv:2111.07091 [hep-ph]];

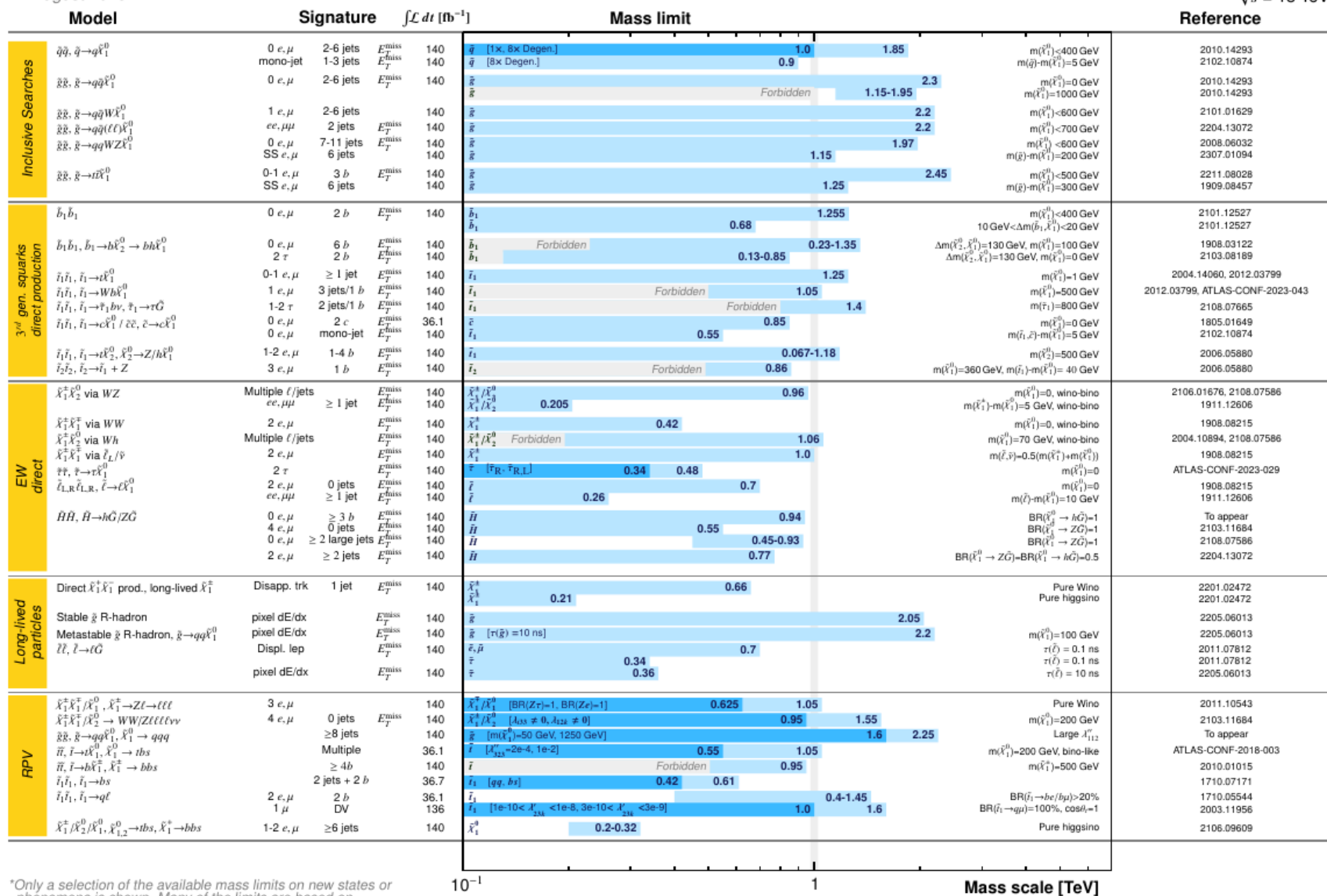
## Citas de CMS

A. Hayrapetyan *et al.* [CMS], "Review of searches for **vector-like quarks**, vector-like leptons, and heavy neutral leptons in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV at the CMS experiment," [arXiv:2405.17605 [hep-ex]] **2024**.

### ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

August 2023

ATLAS Preliminary  
 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$



\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

**Figure 89.14:** Overview of the current landscape of SUSY searches at the LHC (updated on August 2023). The plot shows exclusion mass limits of ATLAS for different searches and interpretation assumptions. The corresponding results of the CMS experiment are similar.



# Conclusiones

El modelo estándar, SM, sufre del problema de las jerarquías.

**Supersimetría soluciona el problema de las jerarquías del SM**

(las extensiones SUSY pueden ser validos hasta la escala de Planck)

**Extensiones supersimétricas simples y bien motivadas** pueden explicar desviaciones observadas respecto al SM que podrían confirmarse en un futuro cercano. **Alternativas al MSSM como el  $\mu\nu$ SSM pueden ser la clave para encontrar nueva física y motivar nuevos análisis en LHC.**

A pesar que han pasado más de 50 años desde su propuesta, supersimetría sigue siendo de los mejores contextos para física más allá del modelo estándar.

*Física más allá del modelo estándar es una área muy activa y es probable que haya mucho por descubrir en un futuro no muy lejano*

## Gracias biblioteca nacional (auditorio J. L. Borges)



**Temí que no quedara una sola cosa capaz de sorprenderme**

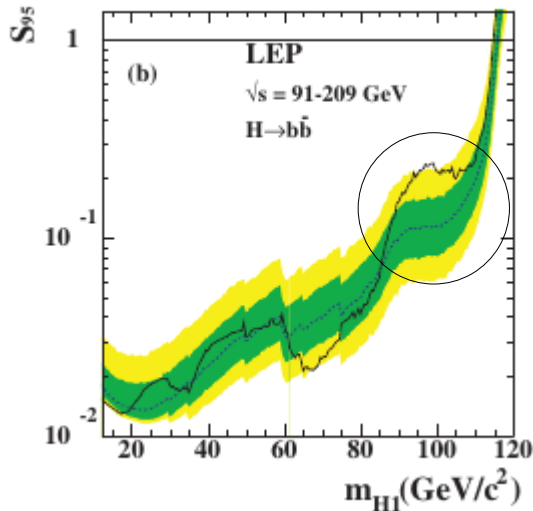
Aleph: El lugar donde están, sin confundirse, todos los lugares del orbe, vistos desde todos los ángulos

**Extras**

# Curioso posible indicio de física más allá del modelo estándar

escalar con masa entre 90 y 100 GeV, en LEP y LHC

CERN-PH-EP/2006-001



LHC Seminar

Chiara Arcangeletti

CMS-HIG-17-013

A scan over different  $m_\chi$  hypotheses is performed in the range 66 to 110 GeV.

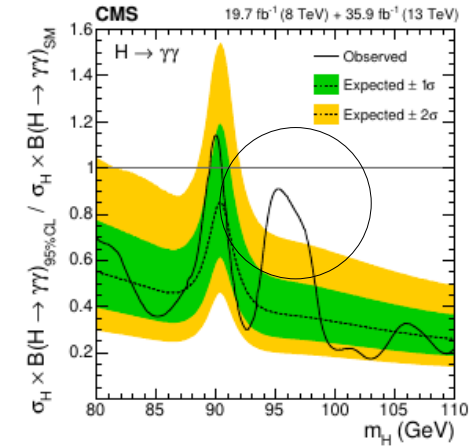
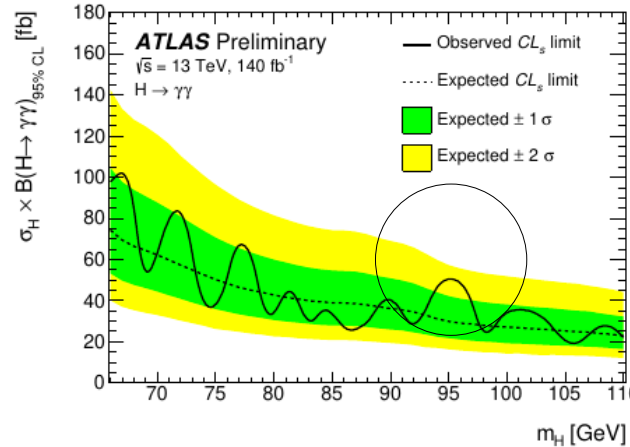


Figure 6: Expected and observed exclusion limits (95%  $CL_s$  in the asymptotic approximation) on the product of the production cross section and branching fraction into two photons for an additional Higgs boson, relative to the expected SM-like value, from the analysis of the 8 and 13 TeV data. The inner and outer bands indicate the regions containing the distribution of limits located within  $\pm 1$  and  $2\sigma$ , respectively, of the expectation under the background-only hypothesis.

6<sup>th</sup> June 2023,

¿Higgs de aproximadamente 95 GeV? ¿se confirmará?

Modelos supersimétricos más simples, donde la única escala a bajas energías puede ser la de los términos de ruptura soft de supersimetría, pueden explicar muy fácilmente una partícula de esas características, dado su rico sector de Higgs.

Las dos opciones más simples, cada una con una fenomenología muy distinta:

**NMSSM:** Higgs singlete gauge

**$\mu\nu$ SSM:** La partícula sería realmente el compañero supersimétrico del neutrino dextrógiro parte del sector de Higgs

$$m_{\tilde{\nu}_R^c}^2 \sim m_{\nu_R}^2 - \frac{m_{\tilde{\nu}_R^c}^2}{3}$$

$$m_{\tilde{\nu}_R^c}^2 \sim -\frac{3}{2} A^k m_{\nu_R}$$

$$m_{\nu_R} \sim 2\kappa \frac{v_R}{\sqrt{2}}$$