

Daniel E. LOPEZ-Fogliani, 18/4/2024, Buenos Aires

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



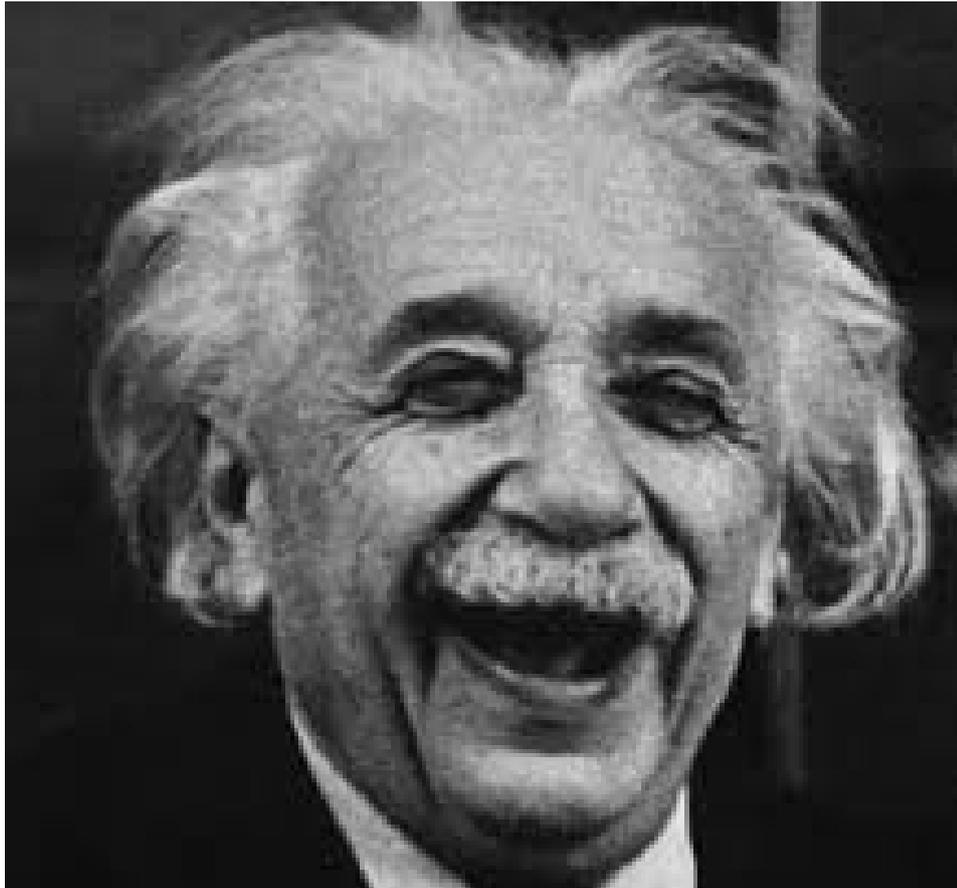
***Partículas e interacciones fundamentales:
¿por qué supersimetría?***

Astroparticle and Particle Physics Group

Coloquio DF, FCEyN UBA, ciudad de Buenos Aires, 18 de Abril de 2024

$$\hbar \approx \frac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34} \text{ Kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$c \approx 2.998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



Nobel de física 1921

Fotón



$$E = h \nu = \hbar \omega$$

$$\frac{E}{c} = P \quad c = \lambda \nu$$

$$G \approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\hbar \approx \frac{h}{2\pi} = 1.055 \times 10^{-34} \text{ Kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$c \approx 2.998 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Escala Fundamental: Escala de Planck

$$E_{\text{Planck}} = M_{\text{Planck}} c^2 = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 2.17 \times 10^{-2} \text{ mg } c^2$$

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

$$t_{\text{Planck}} = \frac{l_{\text{Planck}}}{c} \approx 5 \times 10^{-44} \text{ s}$$

Escala Fundamental: Escala de Planck

$$\hbar = c = 1 \quad E_{\text{Planck}}^2 = M_{\text{Planck}}^2 = G^{-1} \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

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

$$E_{\text{Planck}} = M_{\text{Planck}}$$

Mayor masa implica una menor longitud de onda compton

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

Longitud de onda compton reducida

Cuántica

Relatividad General

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

Radio de Schwarzschild

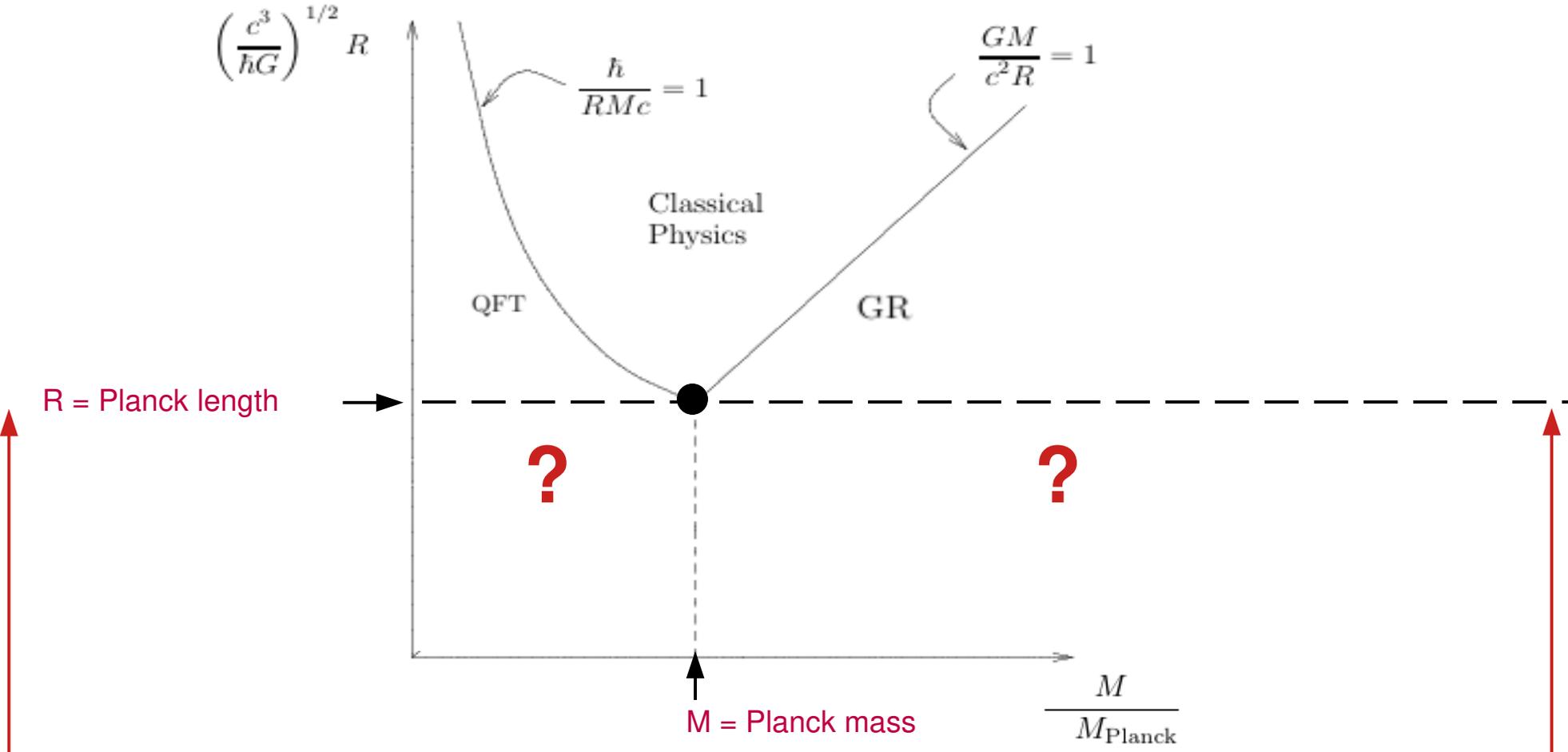
Mayor masa implica un mayor radio de schwarzschild

Longitud de Planck

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

A esta escala no sabemos que sucede

Figura esquemática basada en una figura del antiguo artículo de Townsend gr-qc/9707012



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

Noción de campos-partículas

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

Las partículas quedan descritas por la excitación de campos cuánticos, interactúan puntualmente.

Teoría cuántica de campos:

Teorías efectivas y Teorías renormalizables

Detectamos interacciones con energías menores que la energía de Planck

- Gravedad la tratamos en forma efectiva con interacciones suprimidas por la escala de Planck.
- La descripción campos-partículas podría valer hasta la experimentalmente inaccesible escala de Planck.

Notar que: El LHC explora energías 15 ordenes de magnitud menor que la energía de Planck!!!

Campos-partículas (teoría cuántica de campos):

La descripción falla a la escala de Planck; no es un problema porque es inaccesible experimentalmente.

Lo podemos pensar del otro lado con la materia, describe la energía oscura del universo. Por observaciones a escala cosmológica se sabe pequeña y positiva.

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

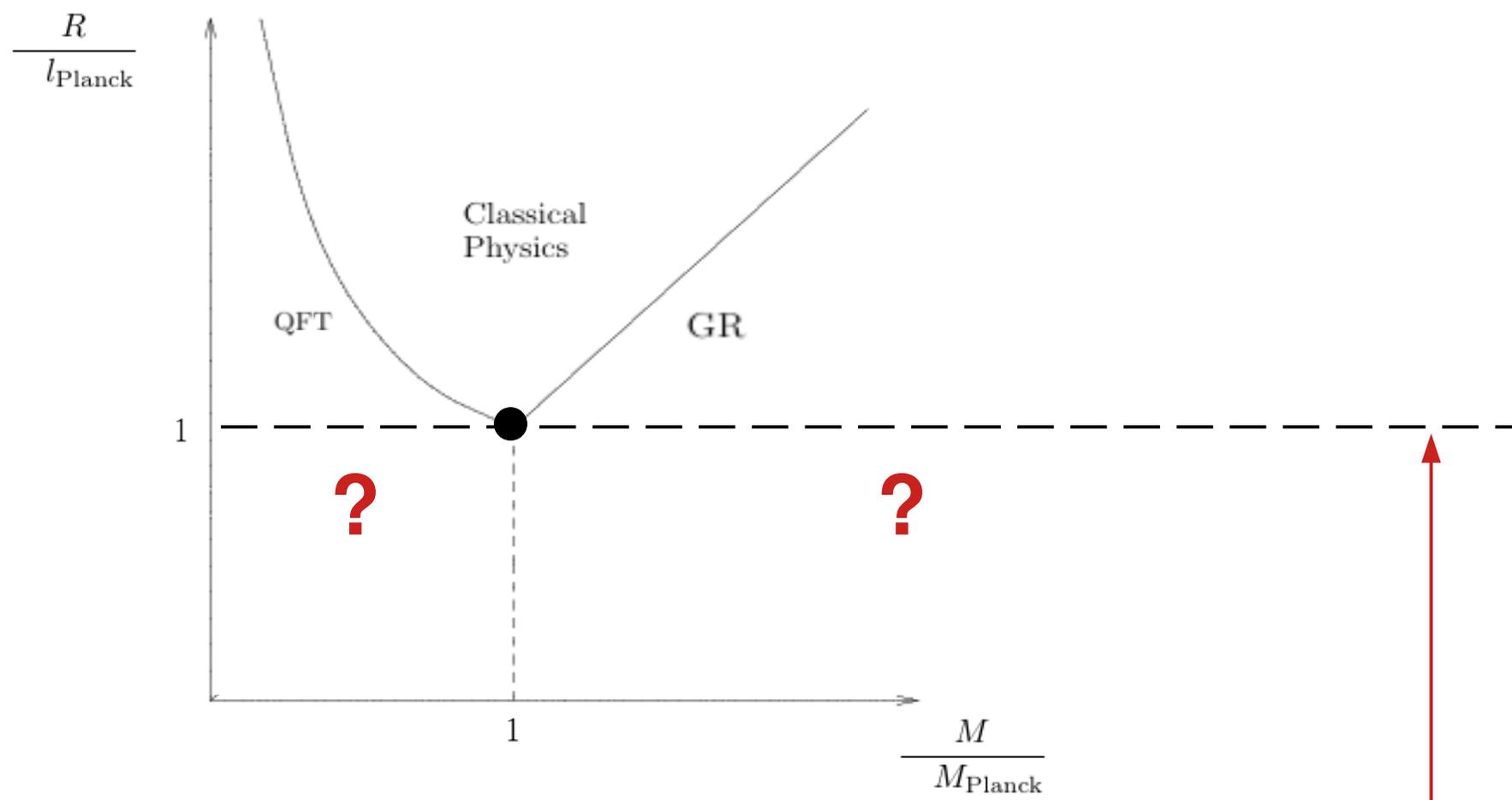
Signatura (- + + +)

Lo fija la física de partículas

Podríamos dar el Lagrangiano

$$\hbar = c = 1$$

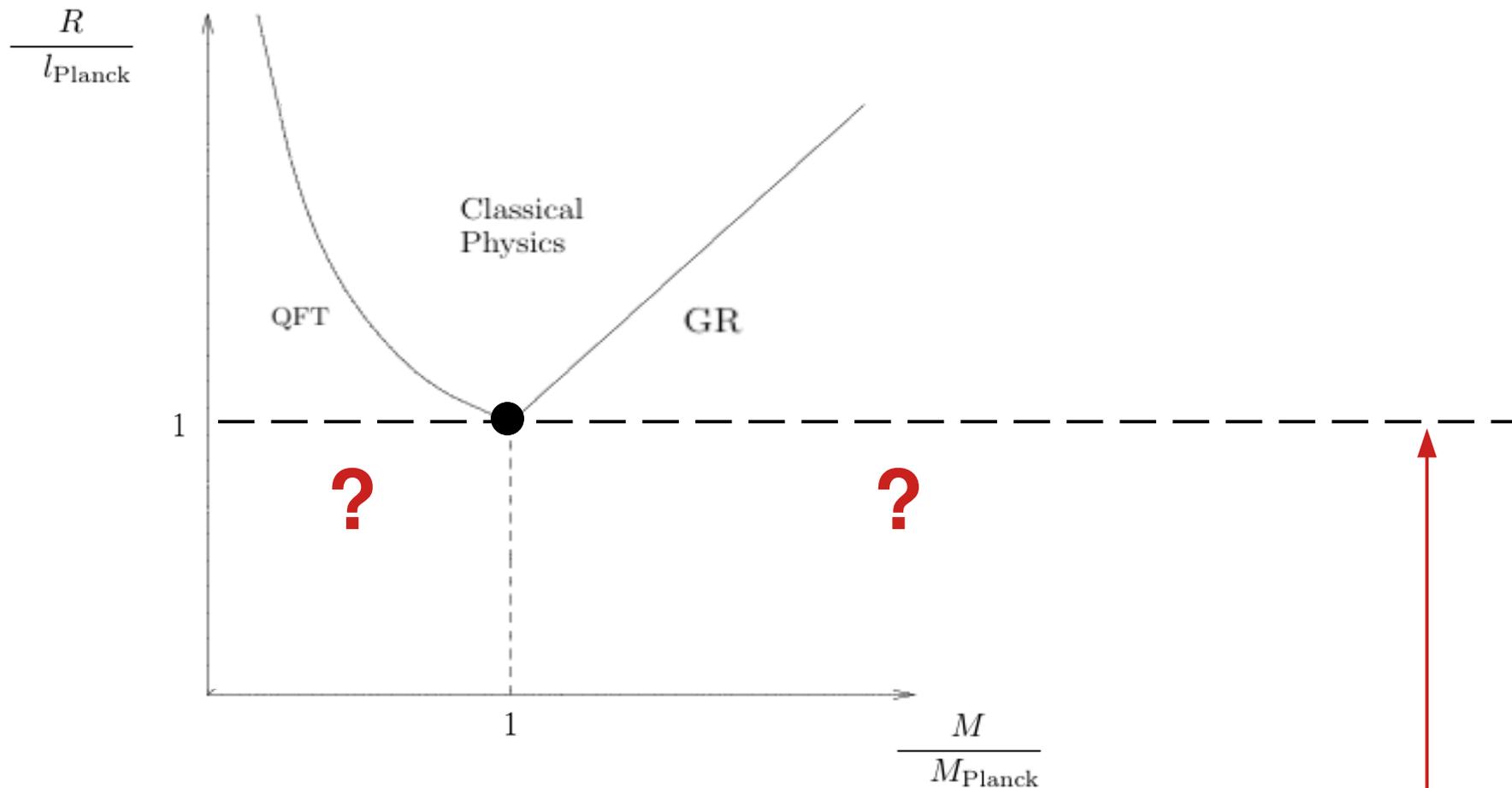
$$M_{\text{Planck}} = \frac{1}{l_{\text{Planck}}} = \frac{1}{t_{\text{Planck}}} \approx 1.221 \times 10^{19} \text{ GeV}$$



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

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

Podríamos dar el Lagrangiano

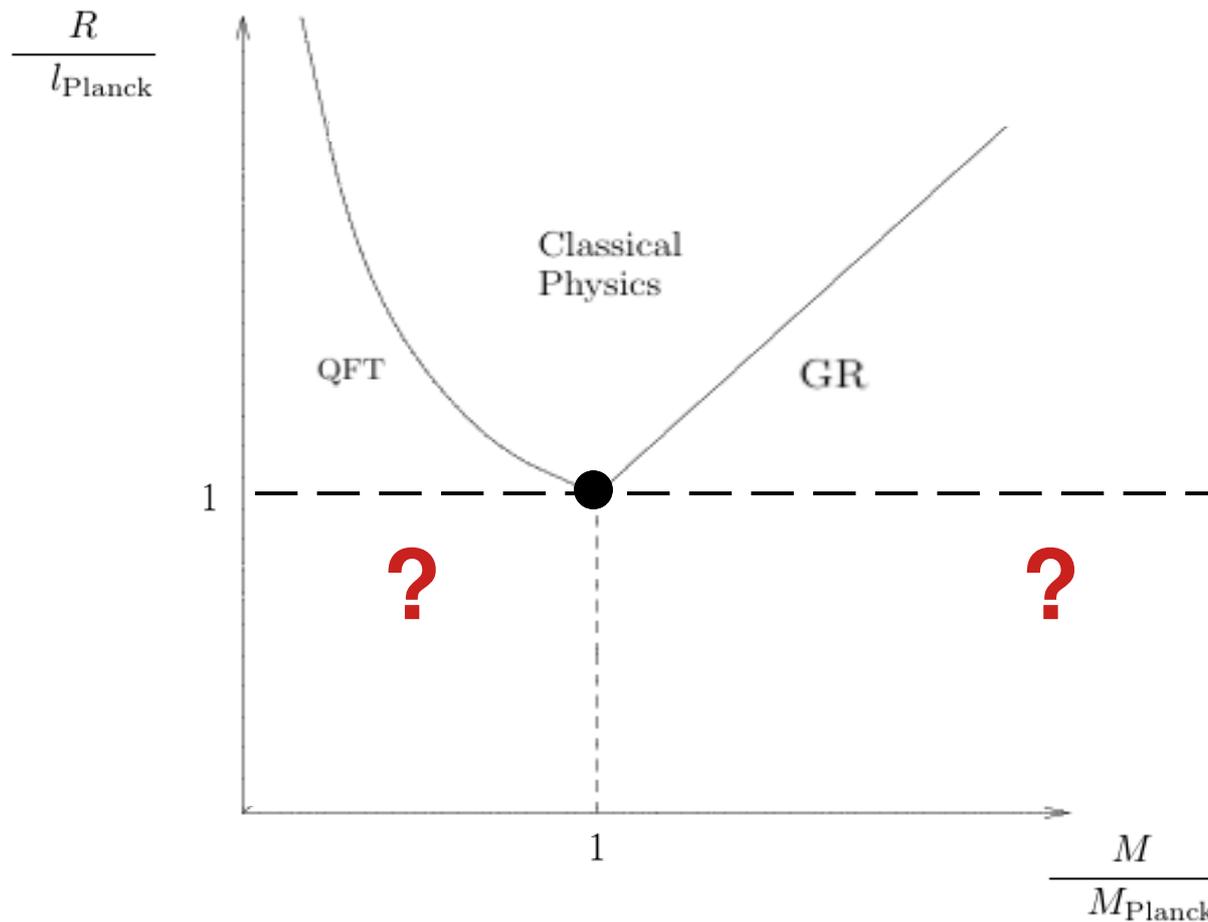


La gravedad no puede tratarse en forma efectiva por debajo de la longitud de Planck. Desconocemos la descripción.

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

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.

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?

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

$$\mathcal{L} = ?$$

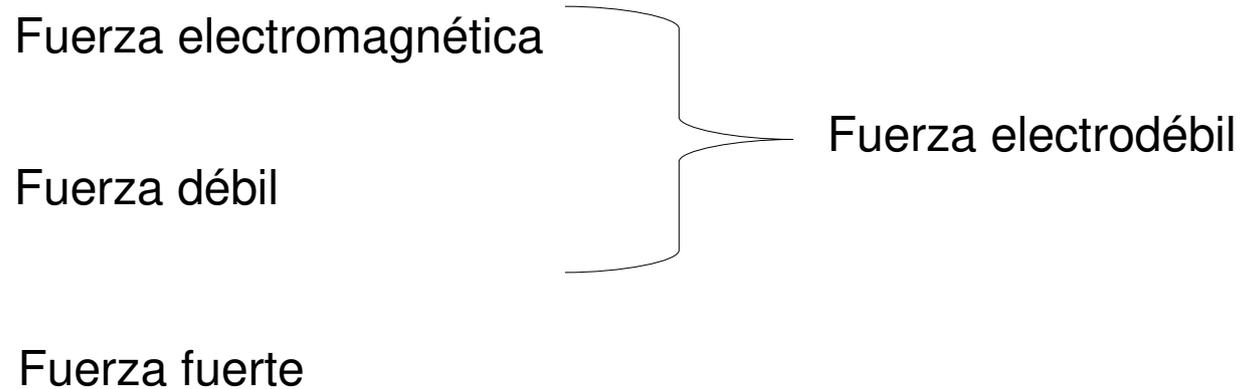
¿Cuál es el modelo/teoría que describe la física de partículas?

Buscamos el más simple posible.

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

Trabajaremos en espacio-tiempo plano, métrica de Minkowski

Comenzando con QED, construiremos el **modelo estándar** y discutiremos sus **problemas teóricos**



Daremos **motivaciones teóricas** para **supersimetría**

Discutiremos las **motivaciones experimentales** de física más allá del modelo estándar

Las partículas quedan descritas por la excitación de campos cuánticos

Densidad Lagrangiana $\longrightarrow [\mathcal{L}] = E^4$

Campo Bosónico $\longrightarrow [A^\mu] = E$

Campo Fermiónico $\longrightarrow [\chi_L] = [\chi_R] = [\psi] = E^{3/2}$

QED: Electrodinámica Cuántica

Fermiones (Spin $\frac{1}{2}$)

Fotones (Spin 1)

Para **Dirac** era evidente que **Paridad se conservaba** en la naturaleza (no había evidencia de lo contrario).

Esto tiene una consecuencia importante:
debemos trabajar con **espinor** ψ que **no posee quiralidad definida** y para el cuál la **masa** sería **propiedad fundamental** de la representación.

Es **Weyl** quién introduce los **espinores quirales**, que en principio tendrían masa cero,
 χ_L , χ_R

Se necesitan **dos espinores de Weyl** para formar un **espinor de Dirac**.

La masa puede verse como la interacción entre dos espinores con quiralidad

En la década de 1950 aparece evidencia clara que paridad no se conserva, como veremos pensar a la masa como una interacción será más apropiado.

Interacciones

Acoples sin dimensiones en el Lagrangiano

Un Bosón y dos Fermiones ($1 + 1.5 + 1.5 = 4$)

Masa para los Fermiones ($1.5 + 1.5 = 3$)

Introduciendo una escala nueva, la masa del e^-

Acoples con dimensiones de potencias negativas de la energía.

Son términos NO renormalizables

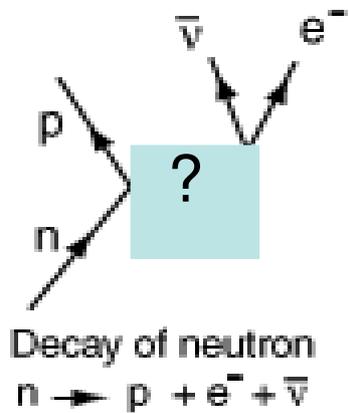
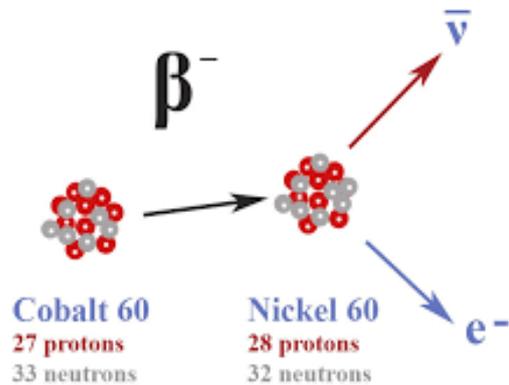
- Los términos con acoplos con dimensión de potencias negativas de la energía van con la escala Λ_{uv} a la que deja de valer la descripción. Podemos interpretar que renormalizar es tender a infinito la escala en que falla la teoría, Λ_{uv} .
- La teoría es renormalizable, $\Lambda_{uv} \rightarrow \infty$.
- **QED:** La masa del electrón tiene correcciones pero no se ve arrastrada por la escala Λ_{uv}
Las correcciones se comportan bien:
NO HAY PROBLEMAS DE JERARQUÍAS

QED: Electrodinámica Cuántica

La simetría gauge hace que los Fotones (bosones espín 1) no tengan masa

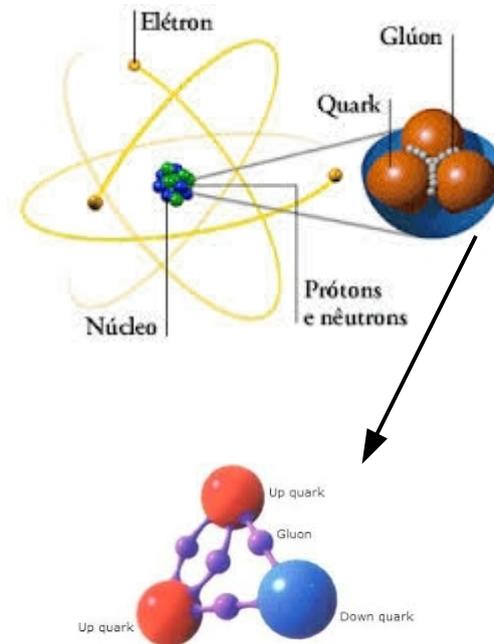
Masa para los fermiones, interacción entre fermiones con quiralidad definida (levógiros y dextrógiros).

Fuerza Debil



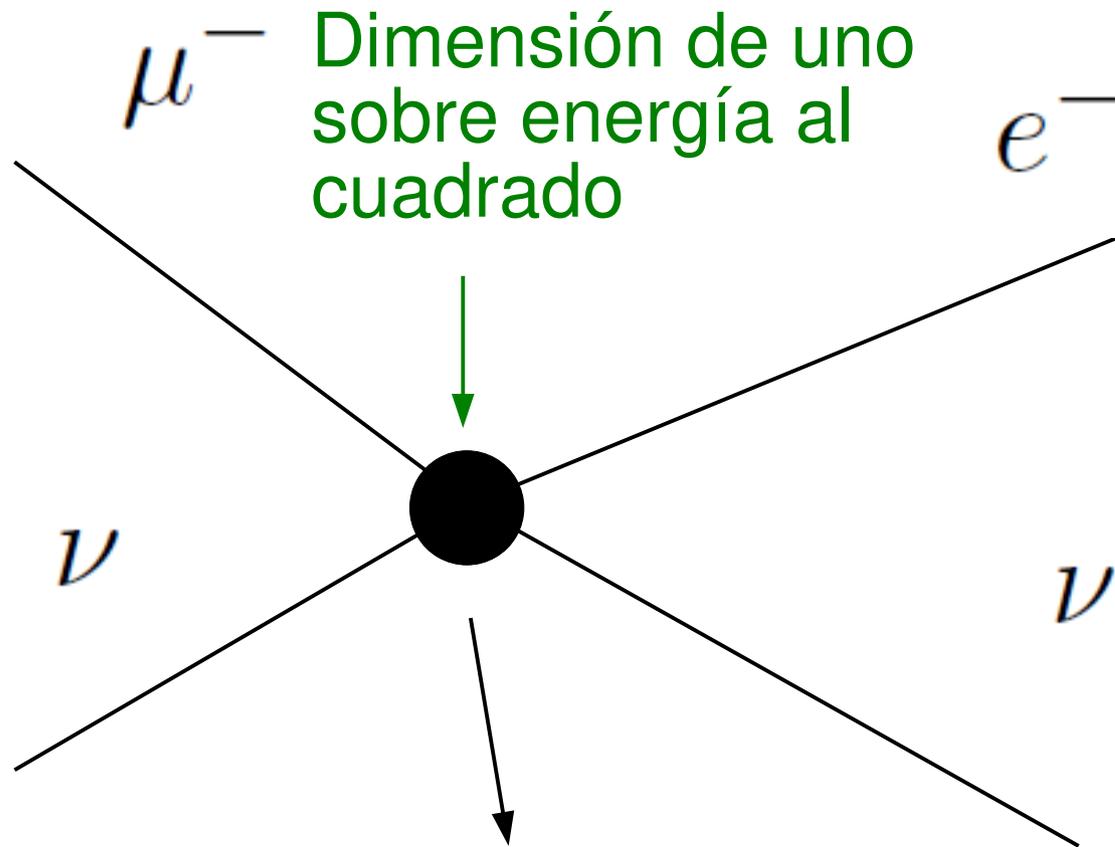
$$G_F, [G_F] = E^{-2}$$

Fuerza Fuerte



La fuerza nuclear tiene su origen en una fuerza que mantiene unidos los quarks que llamamos fuerza fuerte.

Fuerza debil: interacción de FERMI



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

La interacción es no renormalizable, se obtiene

$$G_F \approx 1.16 \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}.$$

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

Hoy sabemos que esto se debe a que a la escala electrodébil, escala EW, aparece la dinámica de las partículas Z y W^\pm

La descripción de la interacción débil es válida hasta la escala de la masa del W más allá de esa escala necesitamos describir la interacción electrodébil (EW)

Modelo Estándar (SM)

Modelo Estándar (SM)

QCD: fuerza fuerte

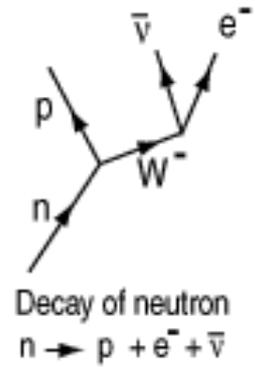
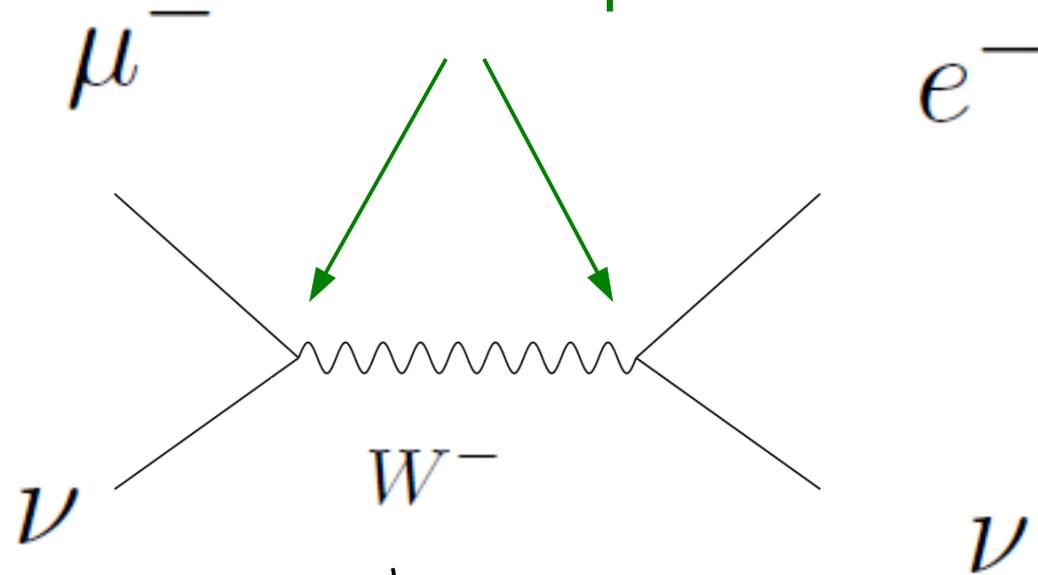
fuerza electrodébil

$$SU(3)_C \times \overbrace{SU(2)_L \times U(1)_Y}$$

$$\mathfrak{g}, W^1, W^2, W^3, B \longrightarrow \mathfrak{g}, \gamma, \underbrace{Z^0, W^\pm}_{\text{masivos}}$$

masivos

Los acoplos 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.

Mecanismo de Brout-Englert-Higgs

Propuesto a principios de la década de 1960, premio nobel 2013.

Partícula de Higgs: partícula de espín cero, sin carga (CP par)

Si hay un Bosón de espín cero que tiene energía en el vacío esto generará las masas!!!!

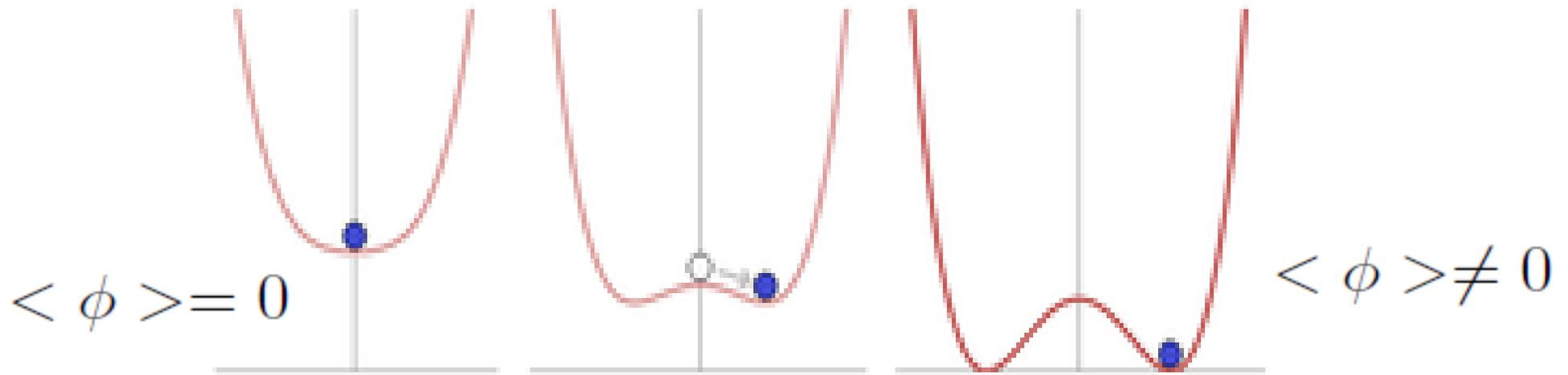
$$C_1 \phi \chi_L \chi_R \rightarrow C_1 \langle \phi \rangle \chi_L \chi_R \rightarrow m \equiv C_1 \langle \phi \rangle$$

Acoplo sin dimensiones

masa

¿Como hacer que el campo tenga una energía en el vacío?

Con un vacío NO trivial



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

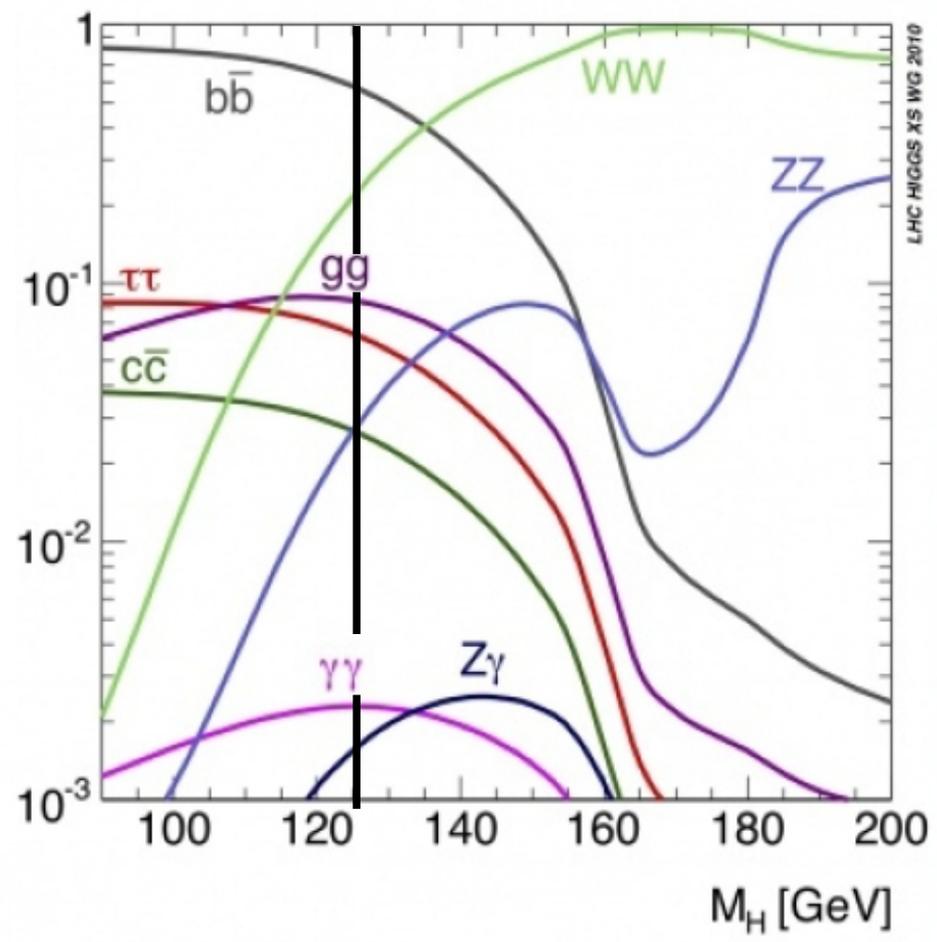
	I	II	III	
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}$	$\approx 1.3 \text{ GeV}$	$\approx 173 \text{ GeV}$	0
charge	$+2/3$	$+2/3$	$+2/3$	0
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	u up	c charm	t top	g gluon
				$\approx 125 \text{ GeV}$ H Higgs
	$\approx 4.7 \text{ MeV}$	$\approx 96 \text{ MeV}$	$\approx 4.2 \text{ GeV}$	0
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	d down	s strange	b bottom	γ photon
	$\approx 0.511 \text{ MeV}$	$\approx 106 \text{ MeV}$	$\approx 1.777 \text{ GeV}$	$\approx 80.4 \text{ GeV}$
	-1	-1	-1	± 1
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W 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
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z Z boson

QUARKS

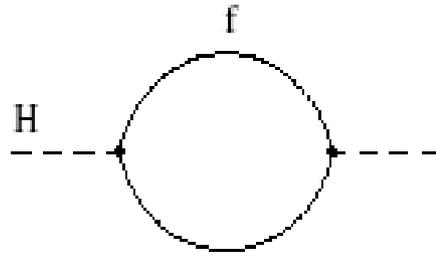
LEPTONS

GAUGE BOSONS
VECTOR BOSONS

SM Higgs



!!!! El modelo estándar posee problema de las jerarquías!!!!



Correcciones cuánticas a la (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

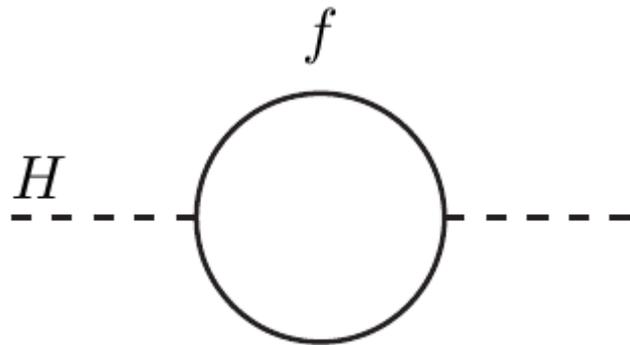
Opciones frente al problema de las jerarquías:

- El problema no existe (la interpretación es incorrecta)
Es difícil aceptar esta postura
- Modelos donde el Higgs no es fundamental
→ Technicolor y variantes.
- Modelos donde los bosones de espín cero sepan sobre quiralidad, y por lo tanto sean bien comportados como los fermiones.
→ **supersimetría**

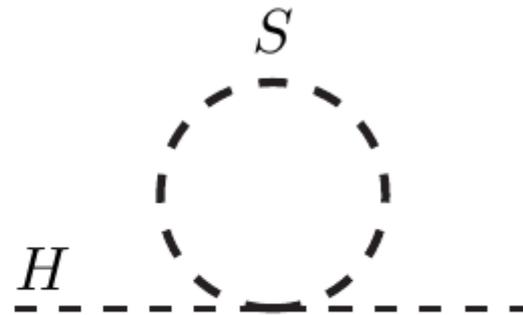
Supersimetría (SUSY)

Supersimetría (SUSY)

→ Relaciona Fermiones y Bosones: Supercampos



Contribución fermión de Dirac



Contribución de un campo escalar complejo

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

$$\Delta m_H^2 = \frac{\lambda_S}{16\pi^2} \Lambda_{UV}^2 + \dots$$

En supersimetría hay dos campos escalares complejos asociados a un fermión de Dirac (dos Weyl). Además la supersimetría implica que se cumple:

$$\lambda_S = |\lambda_f|^2$$

Se cancelan exactamente los diagramas, NO HAY PROBLEMA DE JERARQUÍAS

Supersimetría (SUSY)

- Relaciona Fermiones y Bosones: Supercampos
- Álgebra supersimétrica es la extensión del álgebra de Poincare
supercampos quirales y supercampos gauge

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

Supersimetría (SUSY)

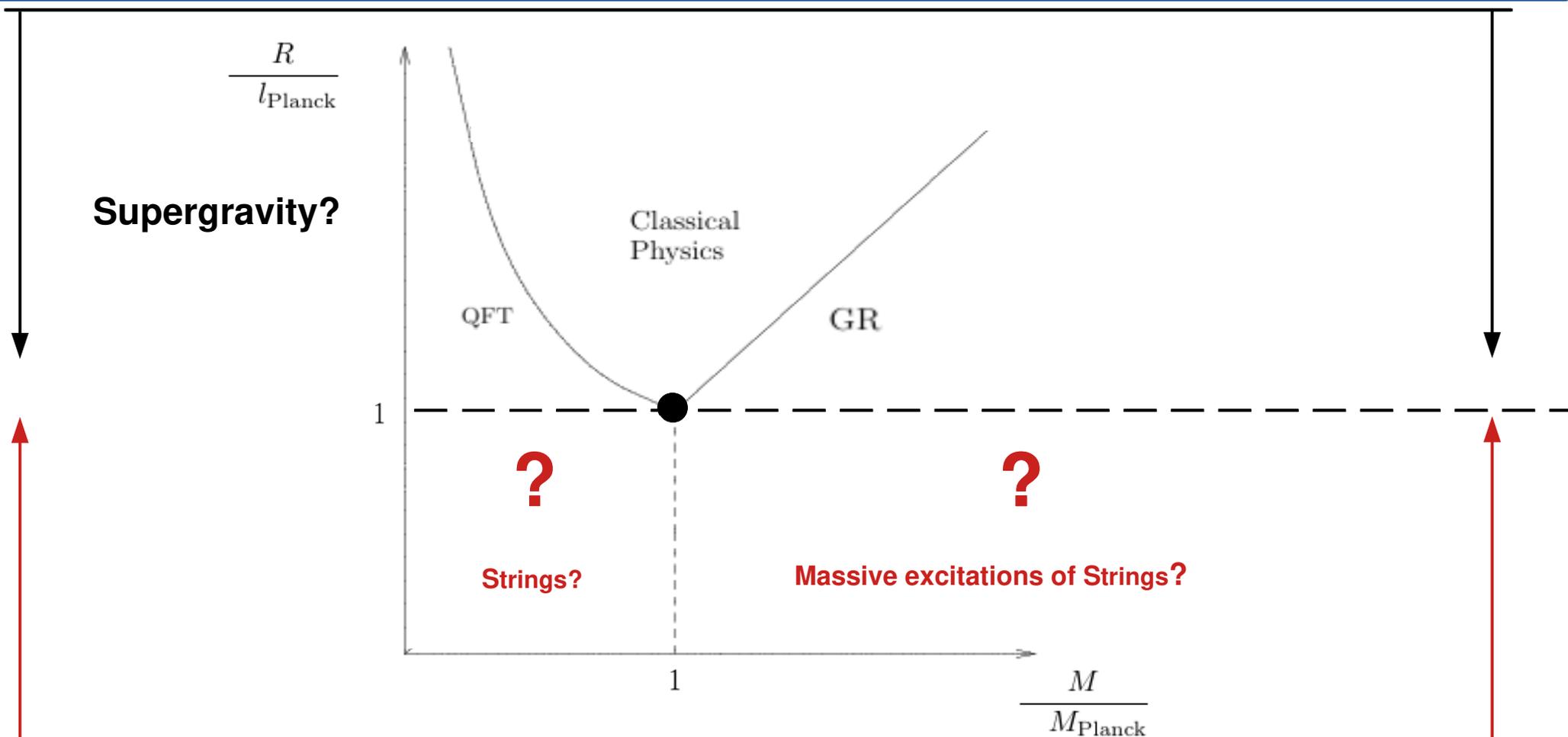
- Relaciona Fermiones y Bosones: Supercampos
- Álgebra supersimétrica es la extensión del álgebra de Poincare
supercampos quirales y supercampos gauge
- Solución al Problema de las jerarquías
- Supersimetría rota mediante términos soft
puede ser la única escala en el modelo renormalizable

Supergravedad: supersimetría local. Los términos soft tienen origen en ruptura espontanea
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.

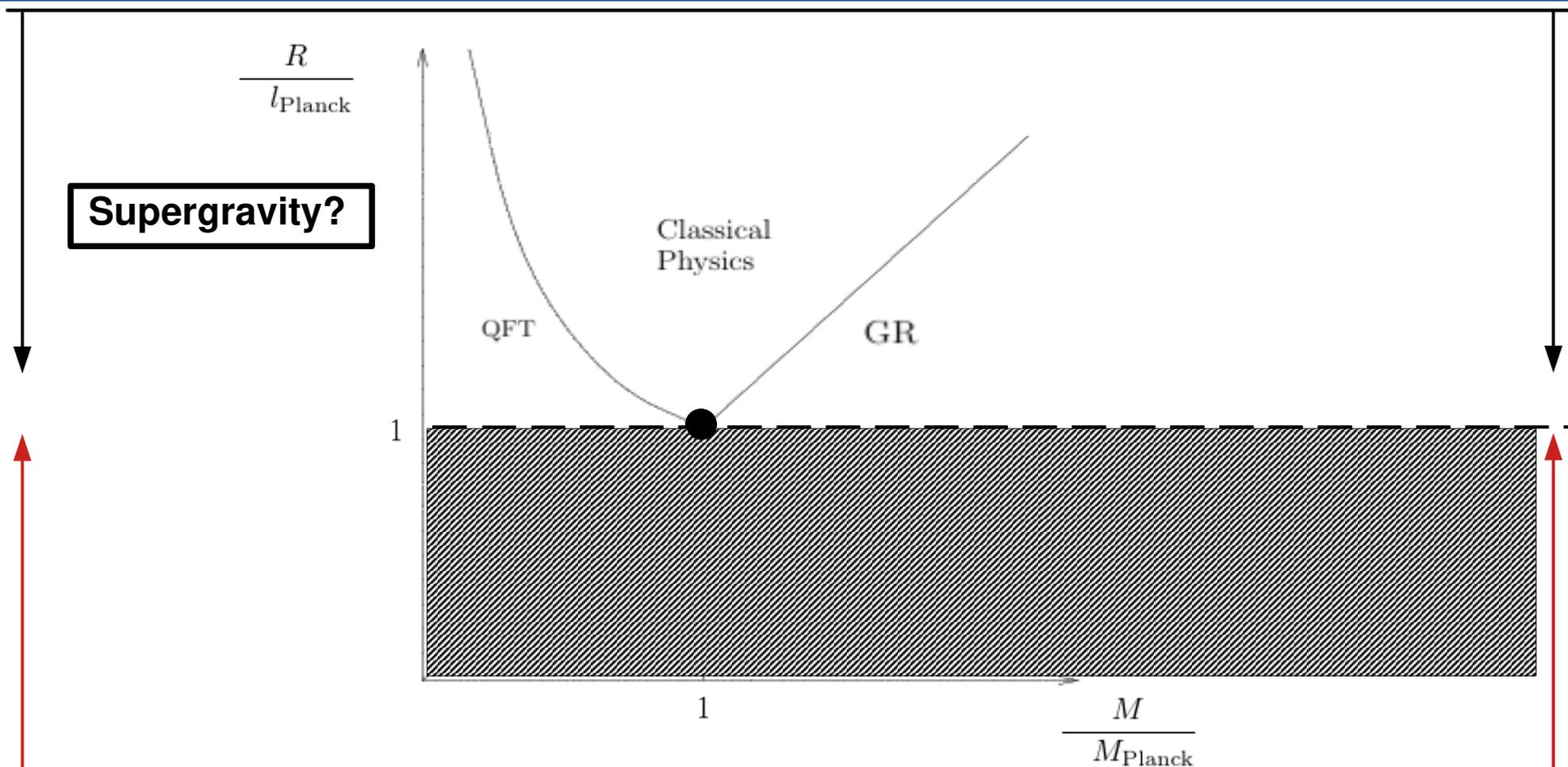


La gravedad no puede tratarse en forma efectiva por debajo de la longitud de Planck. Desconocemos la descripción.

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

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.

Supersimetría (SUSY)

- Solución al Problema de las jerarquías del modelo estándar
- Supersimetría rota mediante términos soft
Puede ser la única escala en el modelo renormalizable

¿En cuanto a la fenomenología que podemos decir?

¿Tenemos al menos algún indicio que estas ideas son correctas?

¿Hay motivación experimental para ir más allá del modelo estándar?

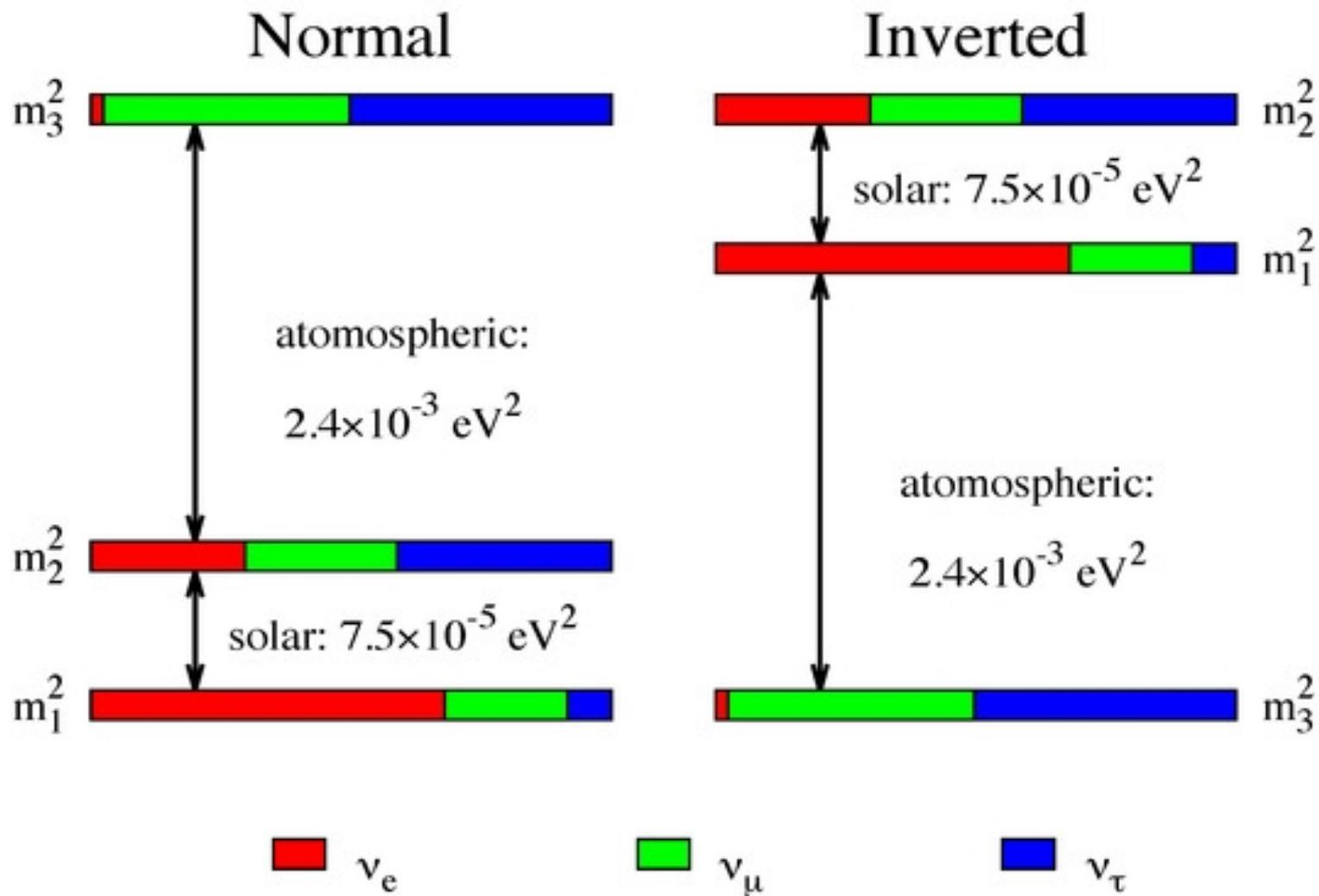
Física de neutrinos

Super-Kamiokande 1998

Los Neutrinos poseen masa y se mezclan fuertemente entre si

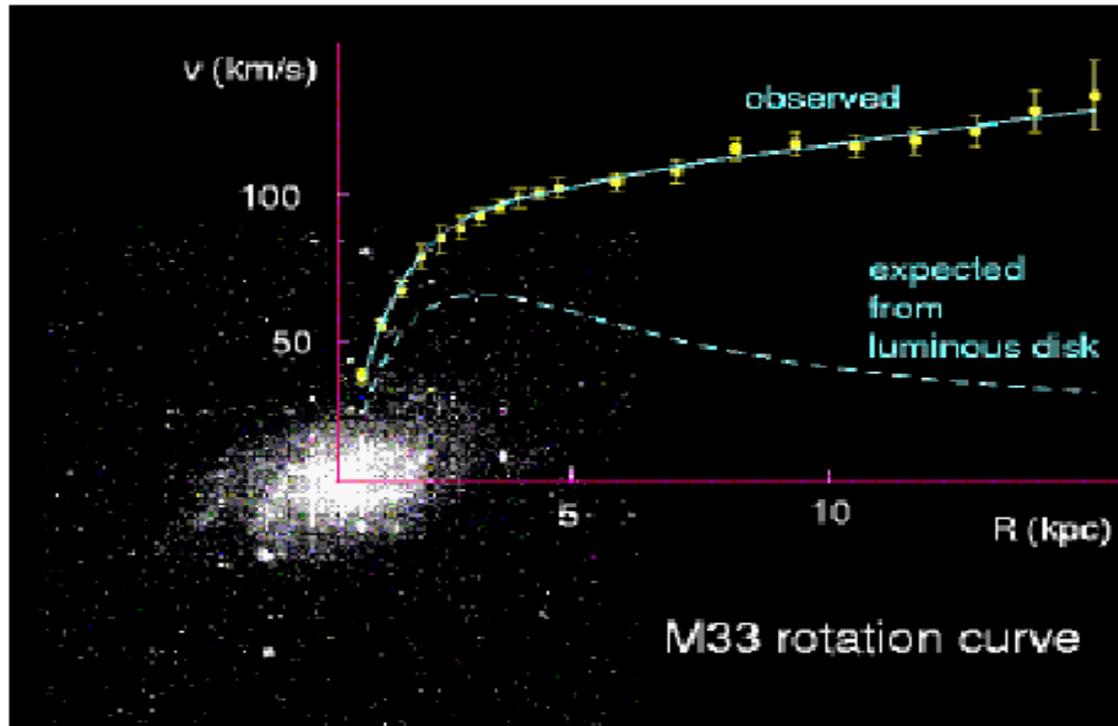
Área muy activa, el sector de neutrinos esta muy estudiado

Esquema para los neutrinos:



El modelo estándar puede ser modificado de forma tal que solo se agregue masa a los neutrinos

Materia Oscura



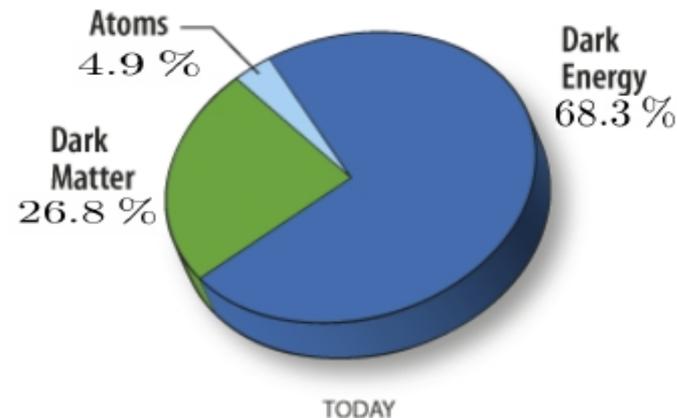
Esperado

$$v = \sqrt{\frac{GM_{\text{vis}}}{R}} \sim \frac{1}{\sqrt{R}}$$

Observado

$$v \sim \text{cte}$$

Materia oscura postulada en 1933 por Zwicky



WMAP

La materia oscura podría interactuar
solo en forma gravitatoria

En cuyo caso podríamos dejar el
modelo estándar como esta ...

Pero tengamos en cuenta que no
tenemos ningún candidato en el
modelo estándar

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

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

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

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

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.



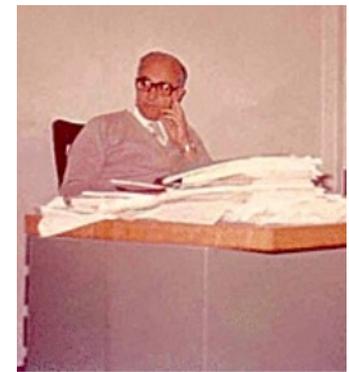
Bollini, fallece en 2009,
tres años antes del
descubrimiento del Higgs

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.

...

Observación: Según PDG de 1996 $m_h > 58.4$ GeV

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

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

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

Incluyendo indicios, aunque no estén confirmados

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

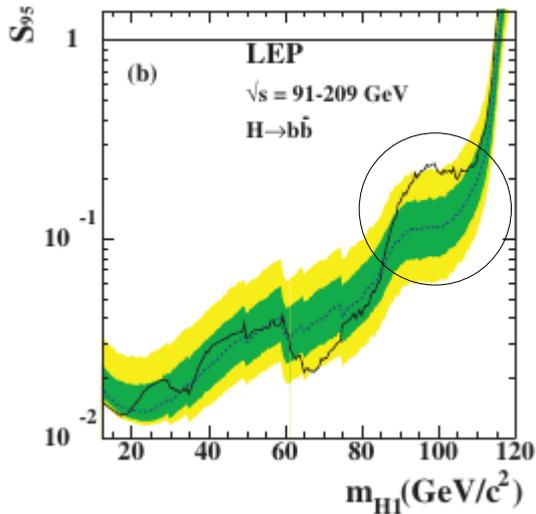
Muy breve resumen de situación a principio de 2024

- **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 en antiguo LEP)
Masa ≈ 95 GeV**

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_χ hypotheses is performed in the range 66 to 110 GeV.

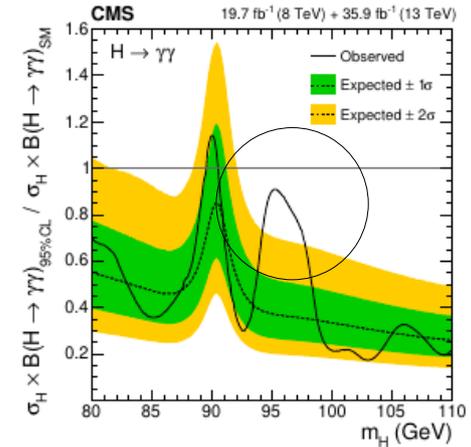
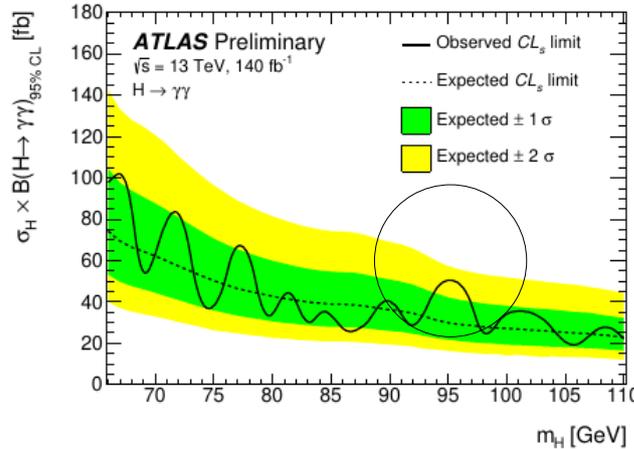


Figure 6: Expected and observed exclusion limits (95% CL_s in the asymptotic approximation) on the product of the production cross section and branching fraction into two photons for an additional Higgs boson, relative to the expected SM-like value, from the analysis of the 8 and 13 TeV data. The inner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

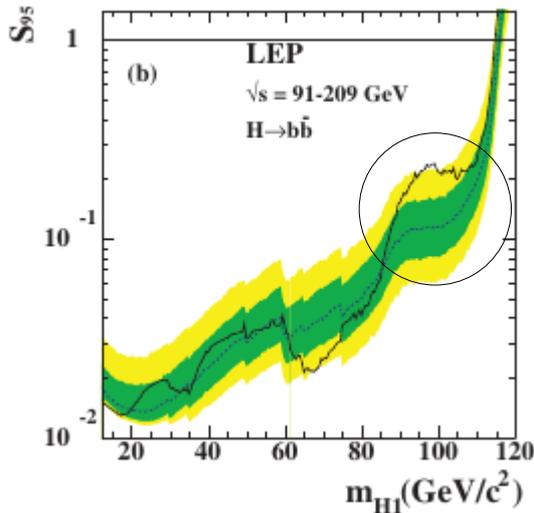
6th June 2023,

¿Higgs de aproximadamente 95 GeV? ¿se confirmará?

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_χ hypotheses is performed in the range 66 to 110 GeV.

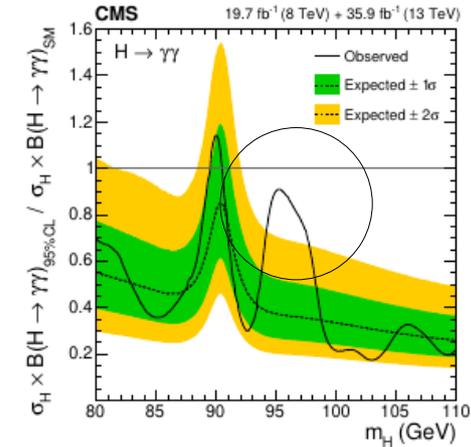
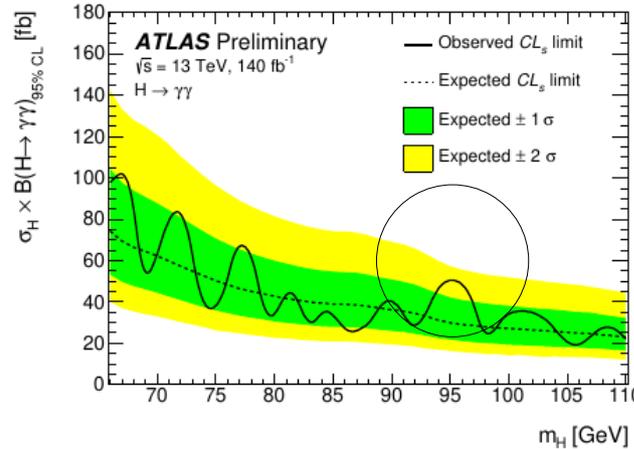


Figure 6: Expected and observed exclusion limits (95% CL_s in the asymptotic approximation) on the product of the production cross section and branching fraction into two photons for an additional Higgs boson, relative to the expected SM-like value, from the analysis of the 8 and 13 TeV data. The inner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

6th 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

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

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

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

Minimal Supersymmetric Standard Model, MSSM

No incluye física de neutrinos

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

Fuertemente restringido por detección directa de materia oscura

Posee el conocido como problema μ

Muchas de las críticas hacia supersimetría provienen de pensar en el MSSM

Incluyendo la física de neutrinos desde el principio la situación puede ser muy distinta

Solo incluyendo neutrinos dextrógiros en el espectro la situación es diferente

μ -from- ν Supersymmetric Standard Model, $\mu\nu$ SSM

Incluye física de neutrinos, se reproducen las mezclas fácilmente incluso con Yukawas diagonales para los neutrinos

$$(m_\nu)_{ij} \sim \frac{m_{D_i} m_{D_j}}{3M} (1 - 3\delta_{ij}) - \frac{(v_{iL}/\sqrt{2})(v_{jL}/\sqrt{2})}{2M}$$

Podría explicar Higgs extra de masa menor a 125 GeV (≈ 95 GeV) fácilmente

Esta libre de problema μ

Rica fenomenología que podría ser confirmada experimentalmente

Supersimetría (SUSY) Fenomenología

- Candidatos a materia oscura: posible detección directa o indirecta.
- $(g-2)_\mu$: mejor acuerdo con valor experimental.
- Flavour Physics: mejor acuerdo con valores experimentales.
- Incluyendo neutrinos dextrógiros no solo se les da masa a los neutrinos sino que queda un modelo donde la única escala puede ser la de los términos soft de ruptura de simetría y la física de neutrinos se explica con gran sencillez.
- Modelos sencillos y bien motivados como el NMSSM o el $\mu\nu$ SSM contienen un rico sector de Higgs pudiendo incluir Higgses más masivos y más ligeros que el ya detectado de 125 GeV.

RESUMEN

- ① El modelo estándar, SM, sufre del problema de las jerarquías.
- ② Los modelos supersimétricos no poseen problema de las jerarquías.
(pueden ser validos hasta la escala de Planck)
- ③ Extensiones supersimétricas simples y bien motivadas pueden explicar desviaciones observadas respecto al SM que podrían confirmarse en un futuro cercano.

¡Gracias!

Fin



Extras

The quest to discover supersymmetry at the ATLAS experiment

Two of the figures in the article (see the article for complete set of constraints):

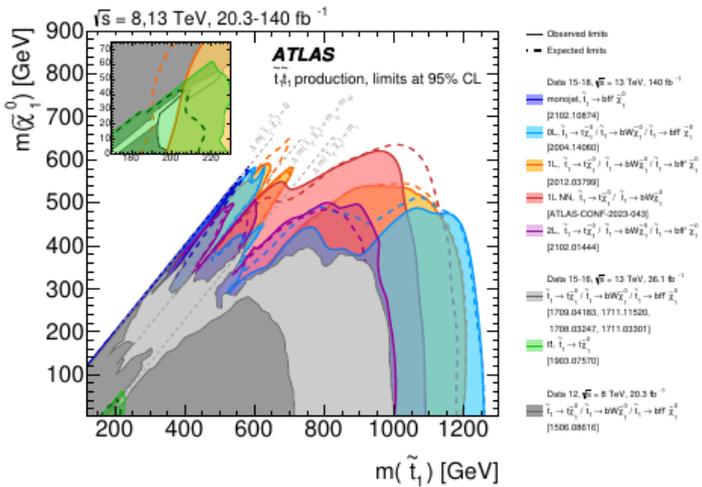


Figure 10: Summary of the dedicated ATLAS searches for top squark (stop) pair production based on pp collision data taken at $\sqrt{s} = 13$ TeV. Exclusion limits are shown in the $m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0)$ plane. The dashed and solid lines show the expected and observed limits, respectively, including all uncertainties except the theoretical signal cross-section uncertainty (PDF and scale). Three decay modes are considered separately with 100% branching fraction: $\tilde{t}_1 \rightarrow t + \tilde{\chi}_1^0$ (where the \tilde{t}_1 is mostly \tilde{t}_R), $\tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ (three-body decay for $m(\tilde{t}_1) < m(t) + m(\tilde{\chi}_1^0)$), and $\tilde{t}_1 \rightarrow ff'b\tilde{\chi}_1^0$ (four-body decay).

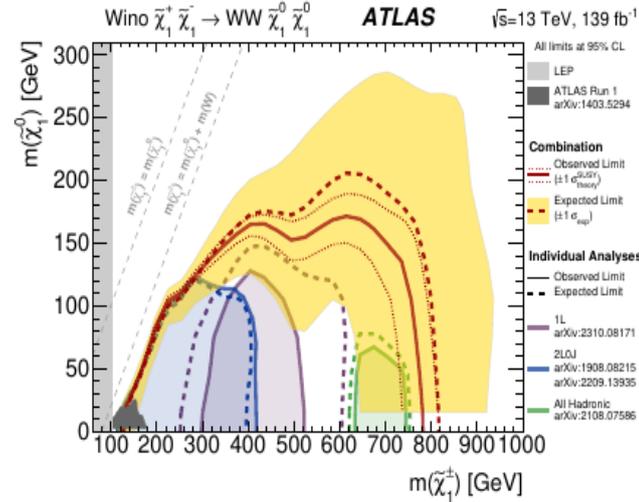


Figure 13: The exclusion limits on $\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$ production with W -boson-mediated decays, as a function of the $\tilde{\chi}_1^+$ and $\tilde{\chi}_1^0$ masses. The production cross-section is for pure-wino $\tilde{\chi}_1^+ \tilde{\chi}_1^-$.