

Mas allá del Modelo Standard.....

Luis Ibáñez



UAM-CSIC, Madrid

Curso CTIF. Madrid
Febrero 2014

Mas allá del Modelo Standard

- 1) Introducción. El M.S. Escalas de masa. Spin.
- 2) Las masas de quarks, leptones y neutrinos.
- 3) Unificación. Teorías de Gran Unificación.
- 4) El problema de la jerarquía de escalas de masa.
- 5) Supersimetría. El Higgs y Supersimetría.
- 6) Modelos compuestos. Dimensiones extra.
- 7) Gravitación Cuántica. Introducción a Teoría de Cuerdas

Introducción

SIGLO XX

DISTANCIAS SUBATÓMICAS

MECÁNICA CUÁNTICA

PARTÍCULAS ELEMENTALES

TEORÍA CUÁNTICA DE CAMPOS

RELATIVIDAD ESPECIAL

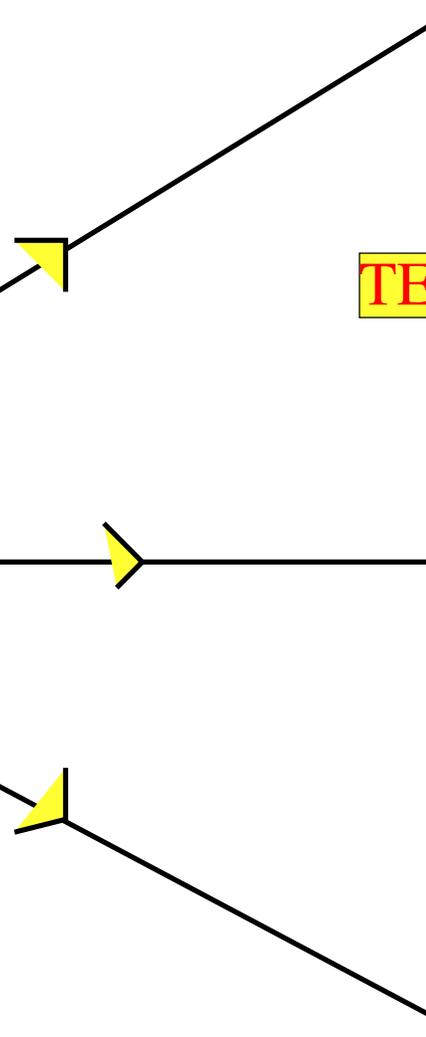
VELOCIDADES MUY GRANDES
(DEL ORDEN DE LA DE LA LUZ)

RELATIVIDAD GENERAL

4 ASTROS Y COSMOLOGÍA

SIGLO XIX

FÍSICA CLÁSICA



Mecánica Cuántica + Relatividad:

'Teoría Cuántica de Campos'

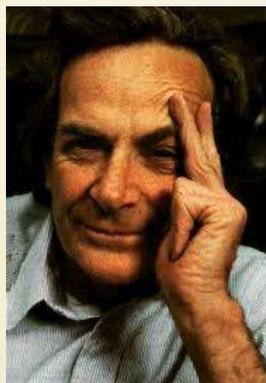
1928-1950



Pauli



Dirac



Feynman

★ Por cada tipo partícula fundamental debe de existir una antipartícula, igual pero con cargas opuestas

★
$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

1928

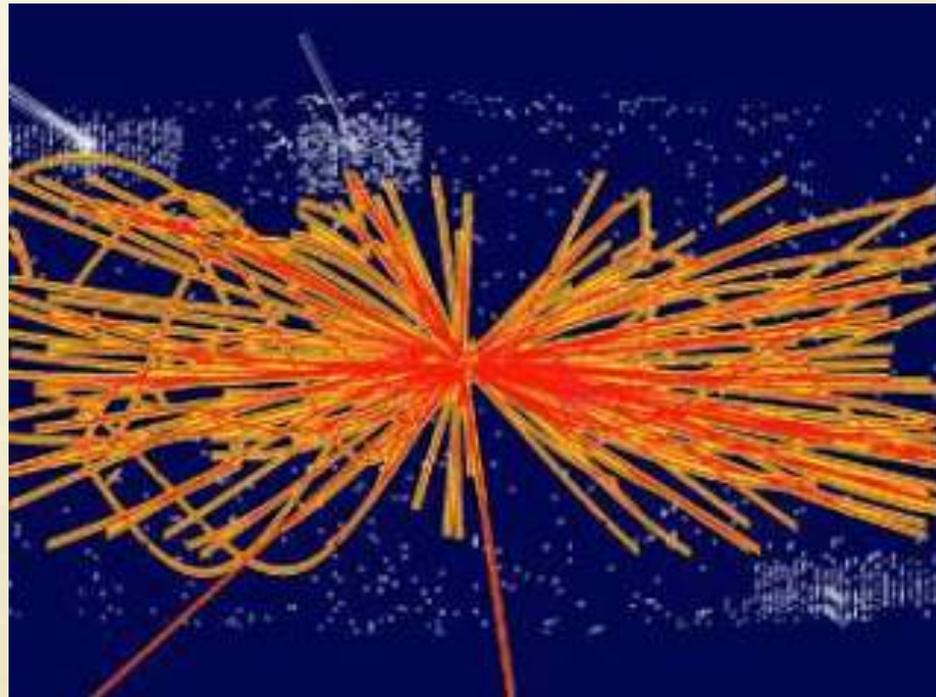
positrón 1932



Anderson

- ★ En una interacción relativista y cuántica el número de partículas no se conserva
- ★ La masa se puede convertir en energía y viceversa (p.e. reactores/bombas nucleares)

Choque p+p
en el LHC
(CERN):



$p + p \rightarrow \text{muchas partículas}$

C



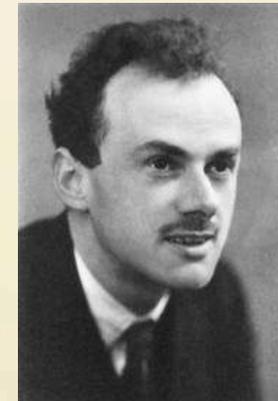
Mecanica Clásica N.R.



Mecanica Cuántica N.R.



Mecanica C. Relativista

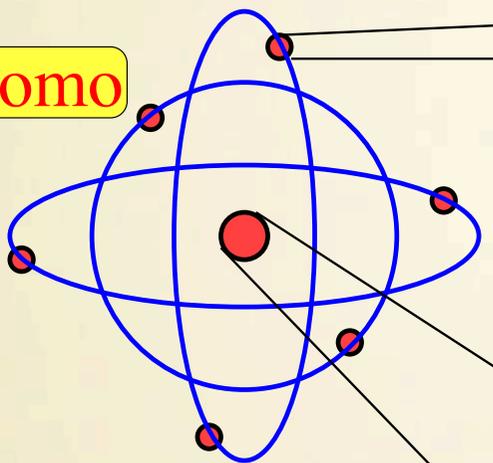


Teoria Cuántica de Campos

\hbar

De la T.C. de C. se obtienen las otras como limites...

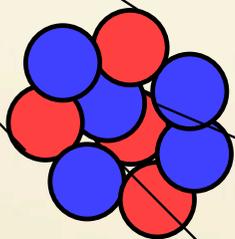
Átomo



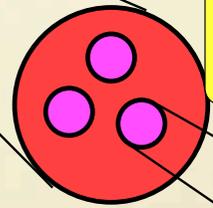
Electrón



Nucleo



Protón
Neutrón



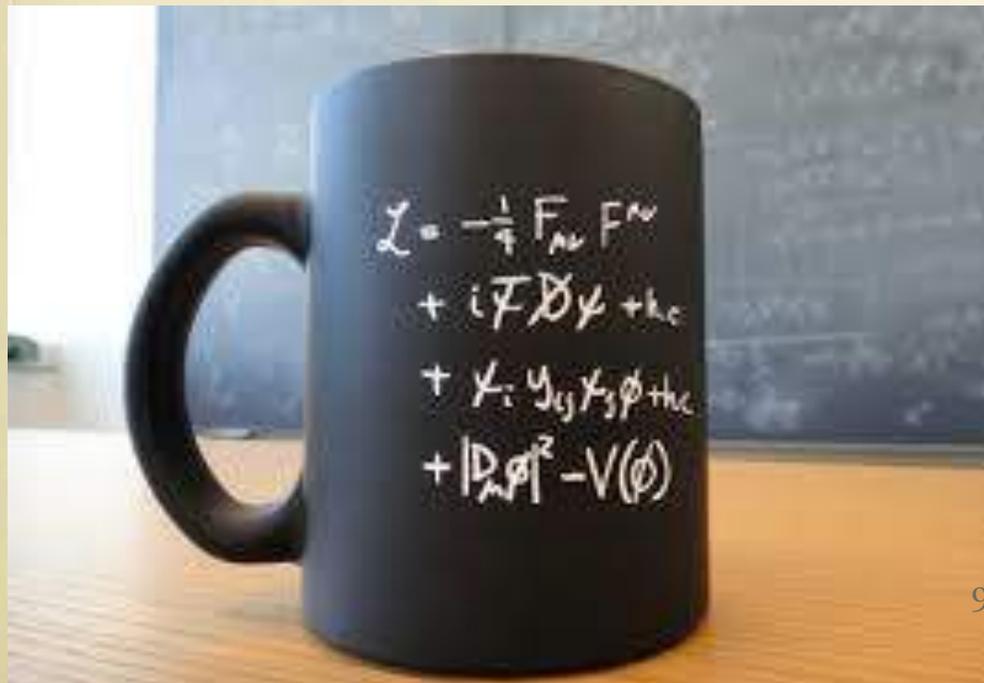
Quark



1950-1975

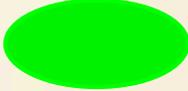
EL Modelo Estándar de La Física de Partículas

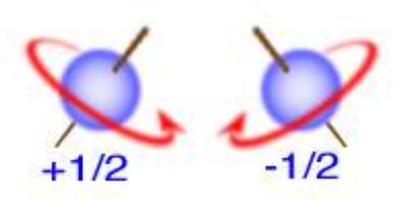
Es la Teoría Cuántica de Campos que describe 3 de las 4 interacciones fundamentales de la Naturaleza



(El Lagrangiano del
Modelo Estándar en
una taza del CERN...)

	QUARKS	LEPTONES
MATERIA USUAL	 	 
	 	 
MATERIA EXISTENTE	 	 
	 	 
A ALTAS ENERGIAS	 	 
	 	 

BOSONES INTERMEDIARIOS
<p>Fuerza Nuclear</p>  
<p>Fuerza Débil</p>  
<p>Electromagnética</p>  



Fermiones
'Spin'=1/2

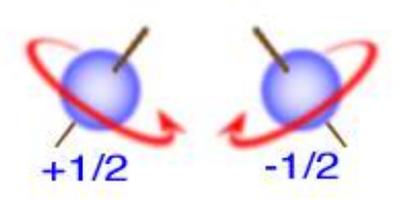
Bosones
'Spin'=1,0

	QUARKS	LEPTONES
MATERIA USUAL	 	 
	 	 
MATERIA EXISTENTE	 	 
	 	 
A ALTAS ENERGIAS	 	 
	 	 

BOSONES INTERMEDIARIOS
<p>Fuerza Nuclear</p>  
<p>Fuerza Débil</p>  
<p>Electromagnética</p>  

Nuevo invitado:

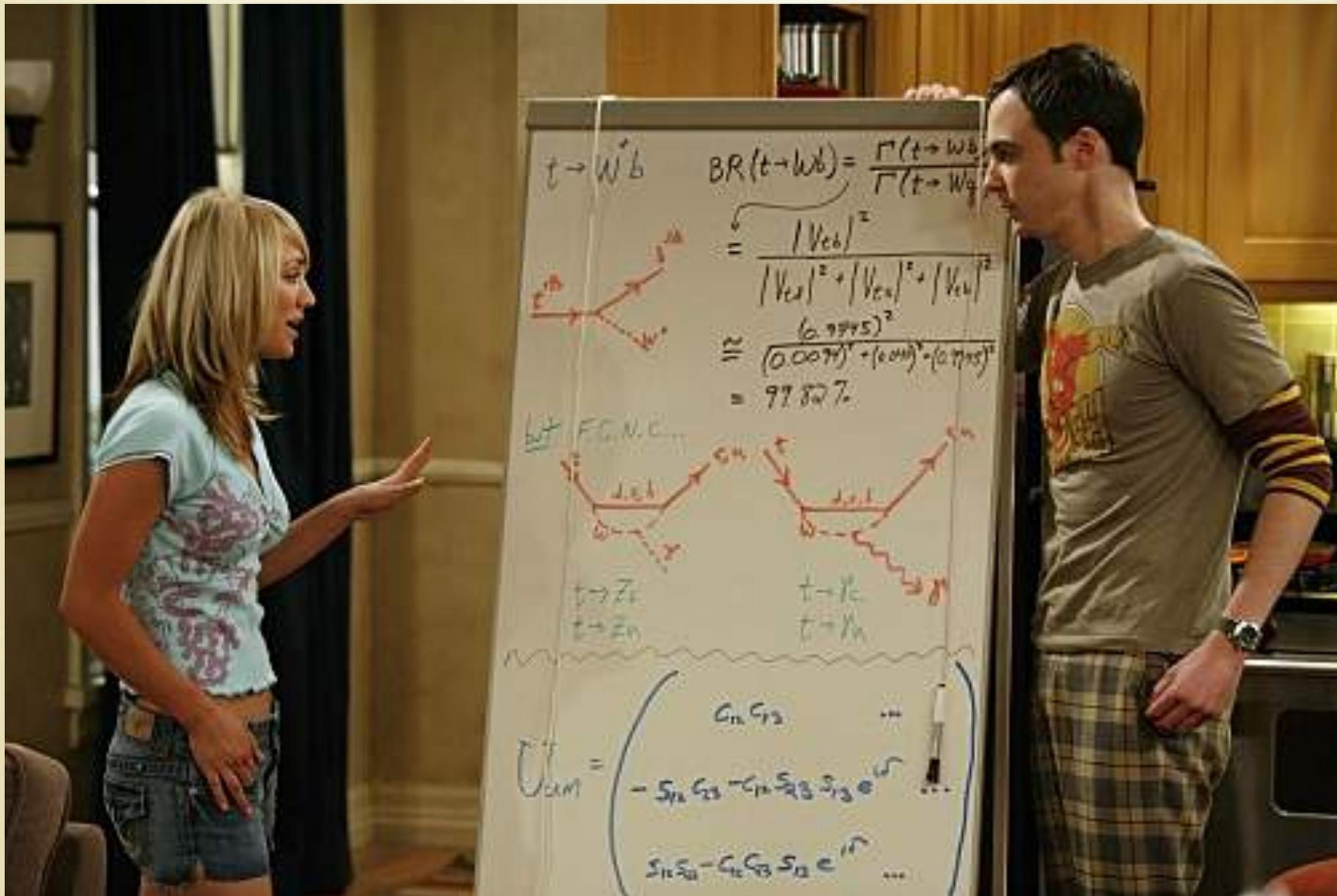
H_{Higgs}



Fermiones
'Spin'=1/2

Bosones
'Spin'=1,0

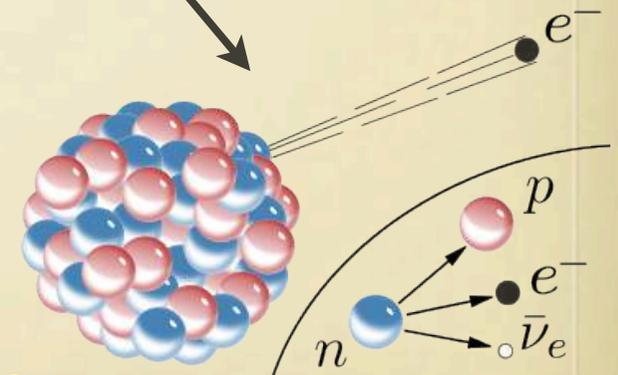
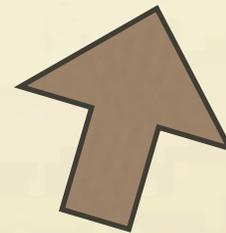
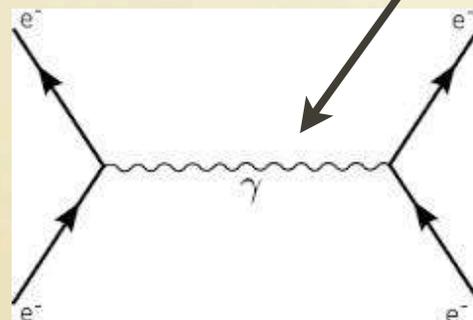
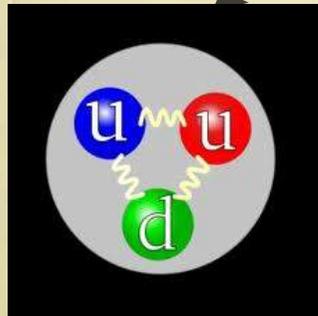
Solo p^+ , (n) , e^- , ν , γ , g son estables



$$t \rightarrow b^{12} + W$$

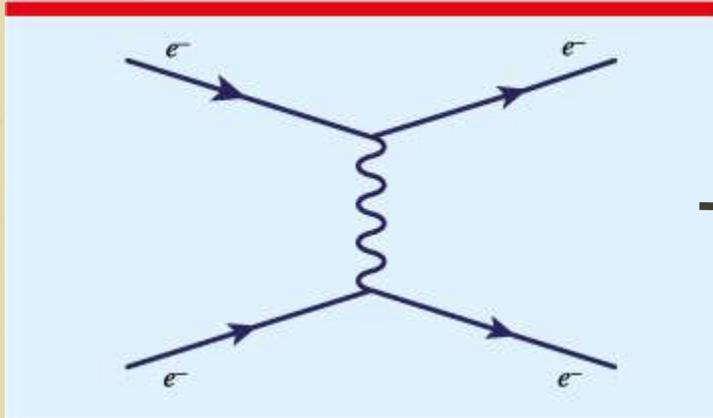
LAS 4 INTERACCIONES FUNDAMENTALES

Tipo de Fuerza	Intensidad	Partícula Mediadora	Importante en :
Nuclear Fuerte	~ 1	Gluón	Nucleo atómico
Electromagnética	$\sim \frac{1}{1000}$	Fotón	Corteza atómica
Débil	$\sim \frac{1}{100000}$	Z^0, W^+, W^- <i>(estos 3 tienen masa)</i>	Radiactividad Beta
(Gravitación)	$\sim 10^{-38}$	Gravitón	(Astros)



'BOSONES INTERMEDIARIOS'

Las simetrías 'gauge' de Modelo Standard

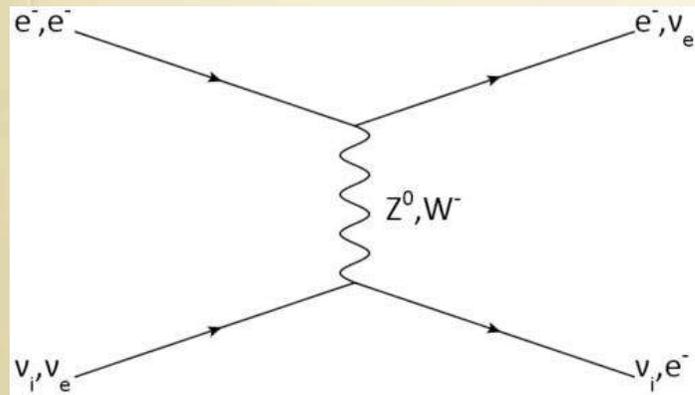


Carga eléctrica

Simetría

$U(1)$

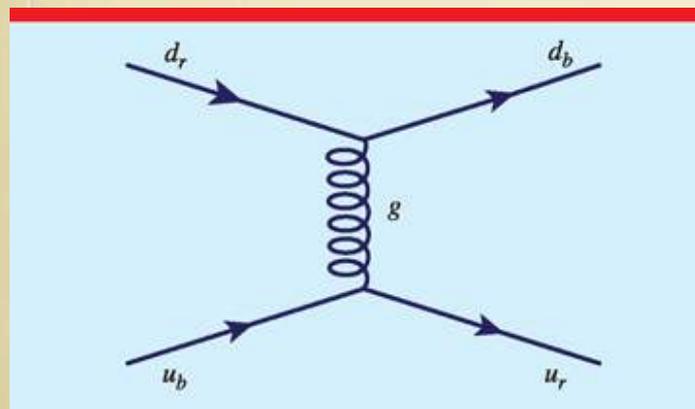
$N = 1$ *foton*



Carga Débil

$SU(2)$

$N^2 - 1 = 3$ *bosones*



Carga de color

$SU(3)$

$N^2 - 1 = 8$ *gluones*

SU(2)

3 dobletes de quarks

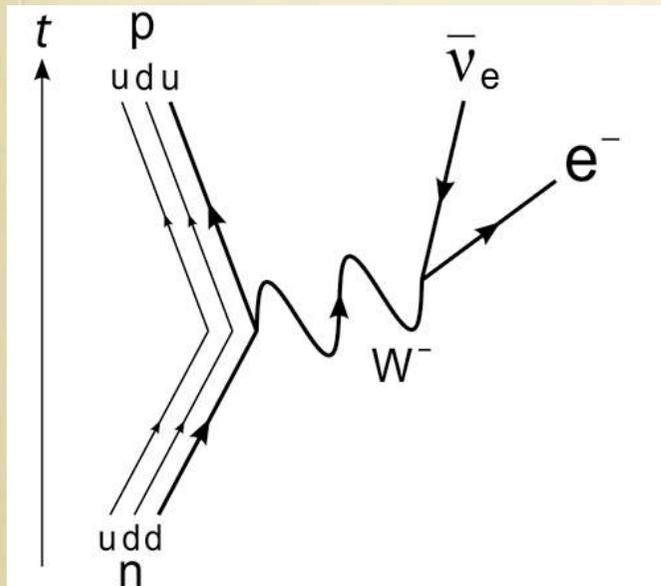
3 dobletes de leptones

THE STANDARD MODEL

	Fermions			Bosons	
Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	γ photon	Force carriers
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom	<i>Z</i> Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	<i>W</i> W boson	
	<i>e</i> electron	μ muon	τ tau	<i>g</i> gluon	

*Yet to be confirmed

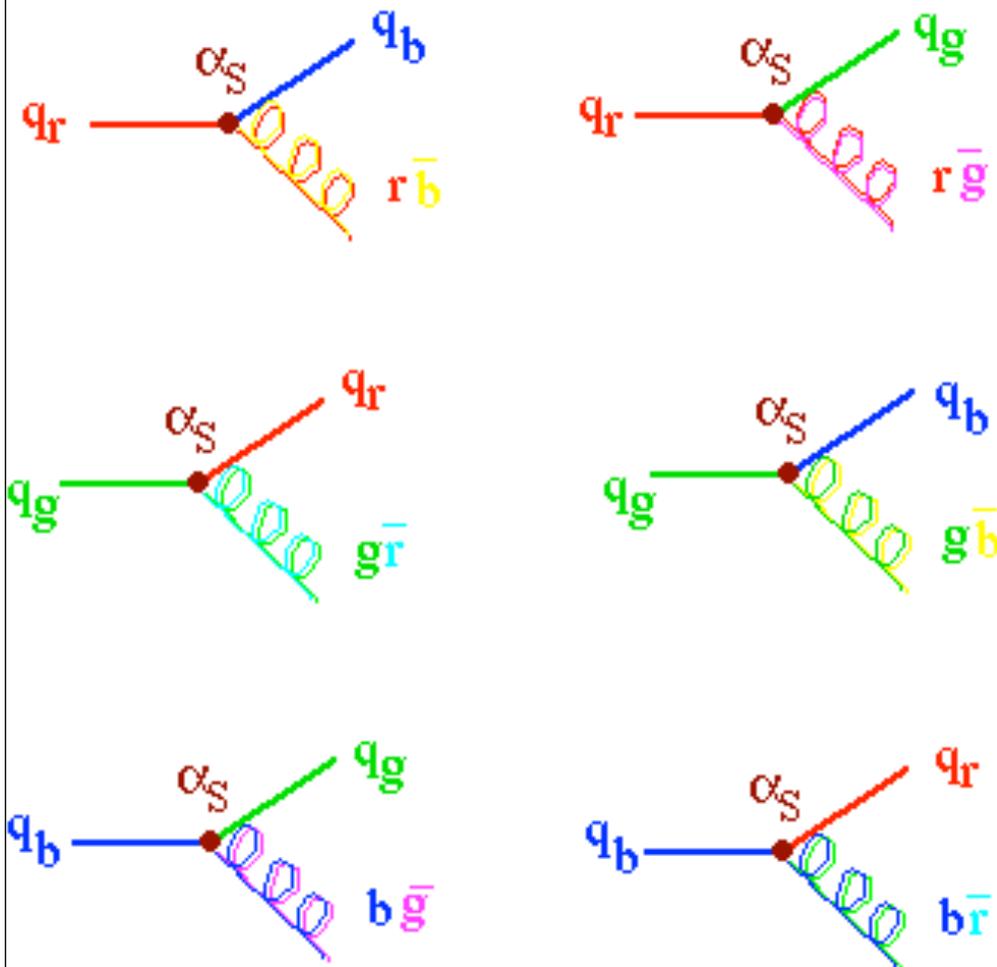
Source: AAAS



Los W conectan miembros de dobletes

SU(3)

Hay 3 tipos de color para cada quark



Particle Spectrum-1995

	+2/3			-1/3			-1	0
I	u	u	u	d	d	d	e	ν_e
II	c	c	c	s	s	s		ν_μ
III	top	top	top	b	b	b	τ	ν_τ
0	g	g	g	g	g	g	g	g
				γ	Z	W	H	
				0	0	-1	0	

Los 8 gluones conectan quarks de diferente color

El origen de la masa de las partículas elementales

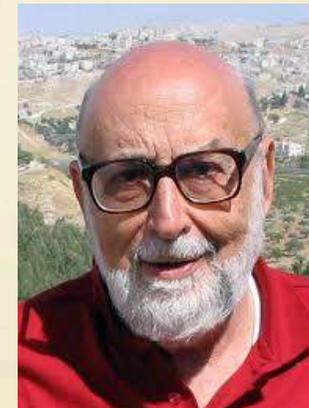
El MS predice la existencia de una nueva partícula:

El Bosón de Higgs

1964



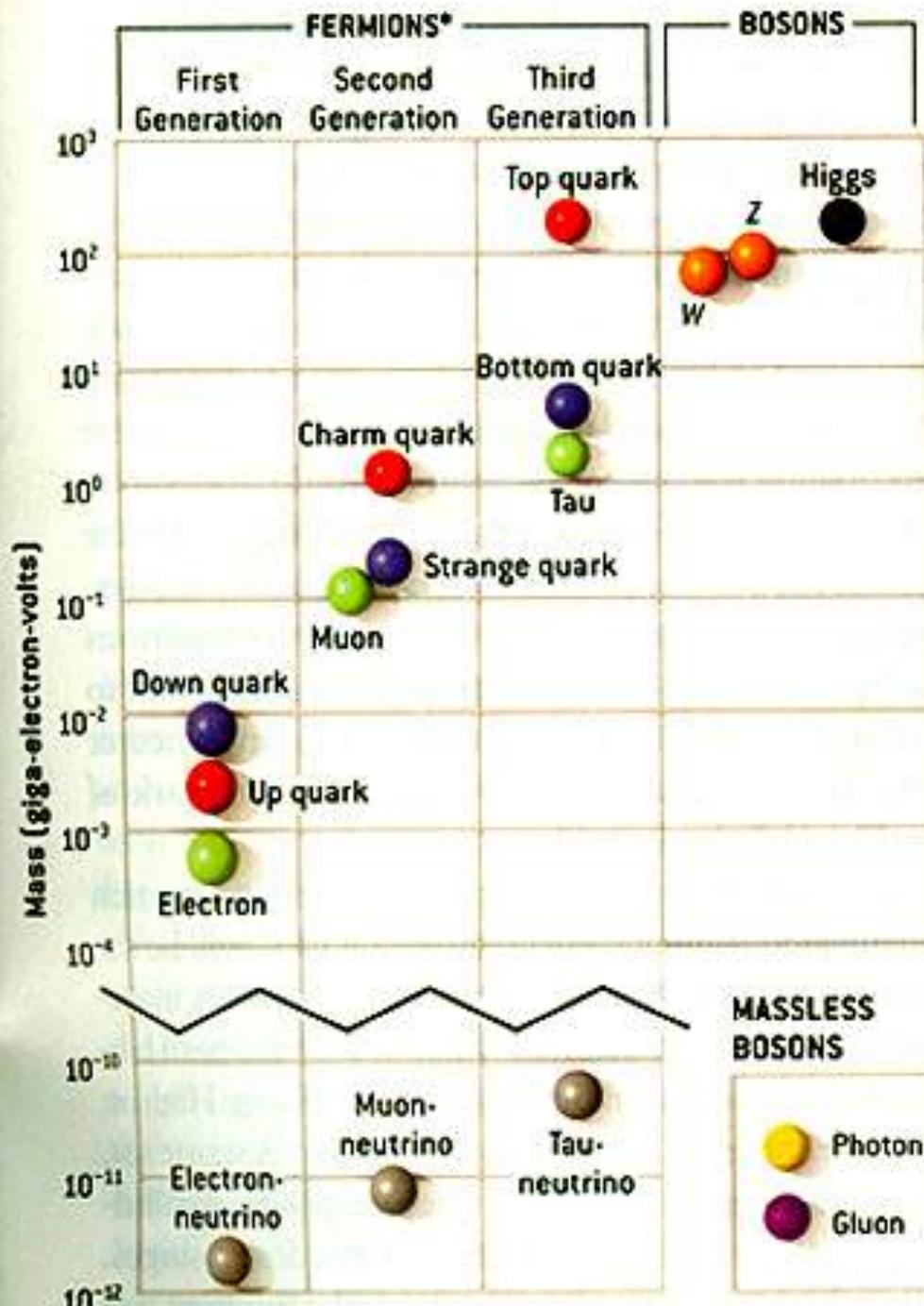
Higgs



Englert

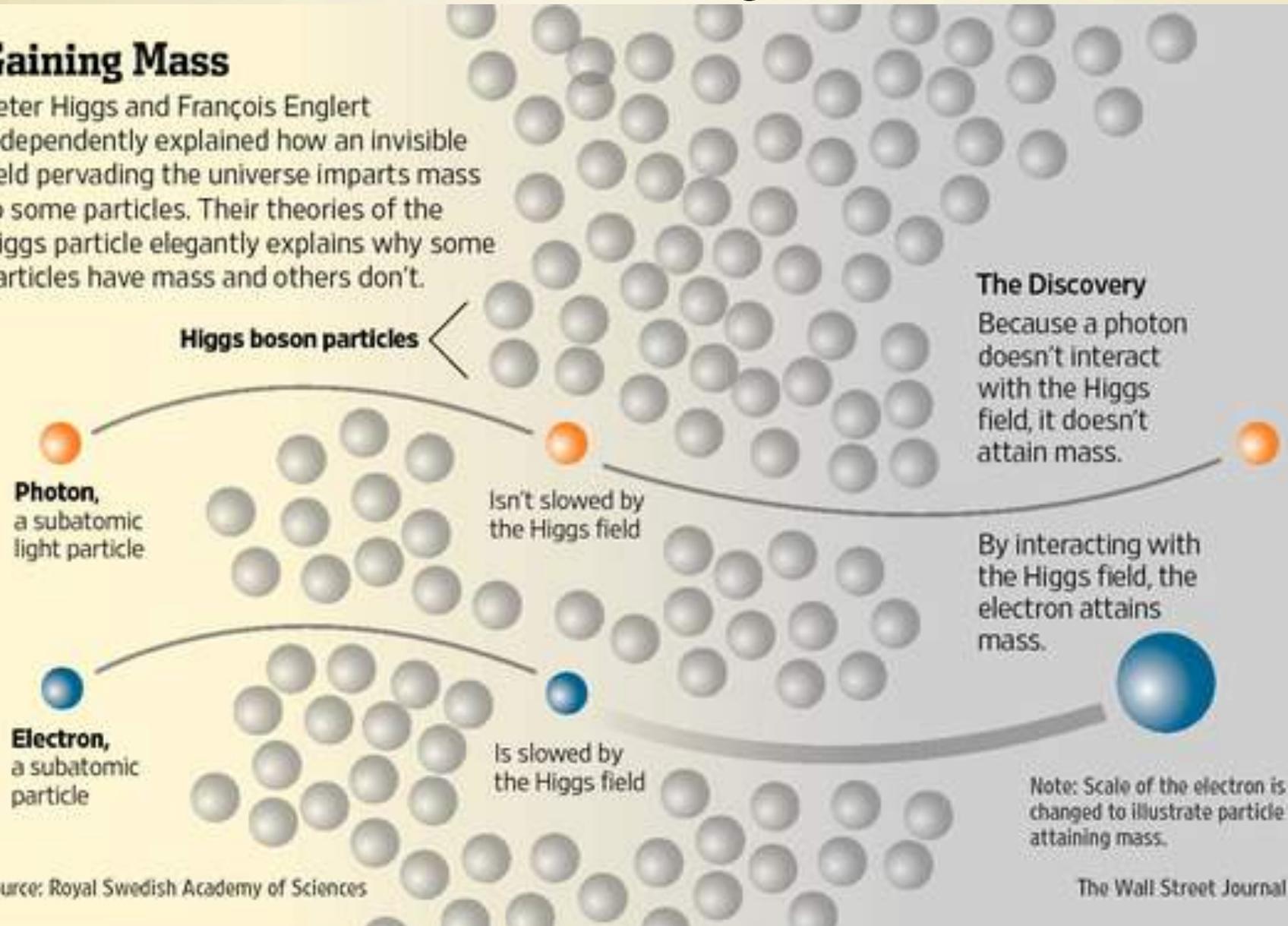


Brout



Gaining Mass

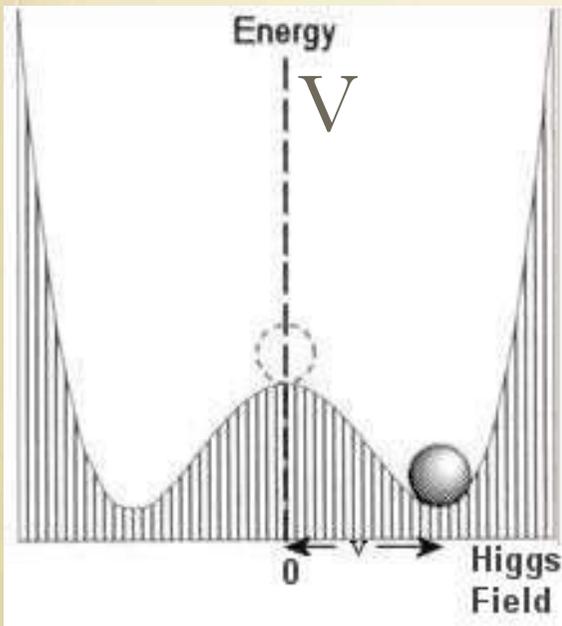
Peter Higgs and François Englert independently explained how an invisible field pervading the universe imparts mass to some particles. Their theories of the Higgs particle elegantly explains why some particles have mass and others don't.



El campo de Higgs llena el espacio y
'frena' a las partículas dandoles masa¹⁸

Existe un potencial $V(H)$ que determina cuanto vale el campo de Higgs que permea todo el espacio

$$V(H) = -m^2|H|^2 + \lambda|H|^4$$

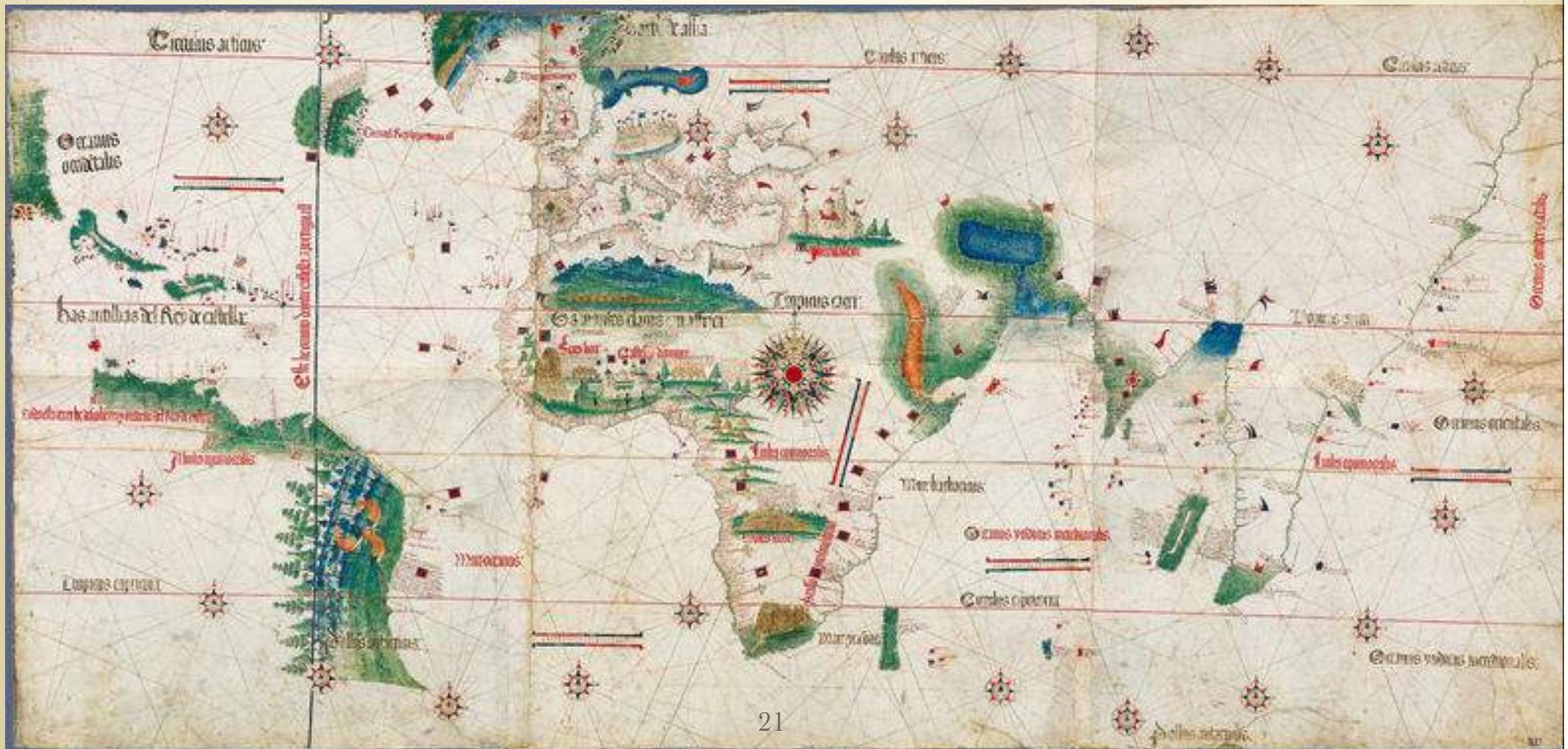


$$H_{min}^2 = \frac{m^2}{2\lambda} = (240 \text{ GeV})^2$$

$$\text{Masa}(W, Z^0, q, l, \dots) \propto H_{min}$$

$$M_{Higgs}^2 = \frac{H_{min}^2}{2\lambda}$$

Mas allá del Modelo Standard....





Muchas cosas por entender todavía:

- ¿Por qué las masas de las partículas son las que son?
- ¿Por que hay 4 interacciones fundamentales y no mas o menos?
- ¿Por qué unas son mas fuertes que otras?
- ¿Por que hay 3 generaciones de quarks y leptones?
- No existe una version cuántica de la gravitación...
- ¿Que es la materia y la energía oscura?
- ¿Por que 3+1 dimensiones?

Sobre unidades y masa:

En Física existen 3 dimensiones fundamentales:

$$L(\text{m.}), M(\text{gr.}), T(\text{seg})$$

Unidades **naturales** para partículas elementales:
unidades para la acción ($L \times M / T$) y la velocidad (L / T)

$$\hbar = 1 ; c = 1$$

La masa se mide en unidades de energía:

$$\textit{Einstein} : E = mc^2 \rightarrow E = m$$

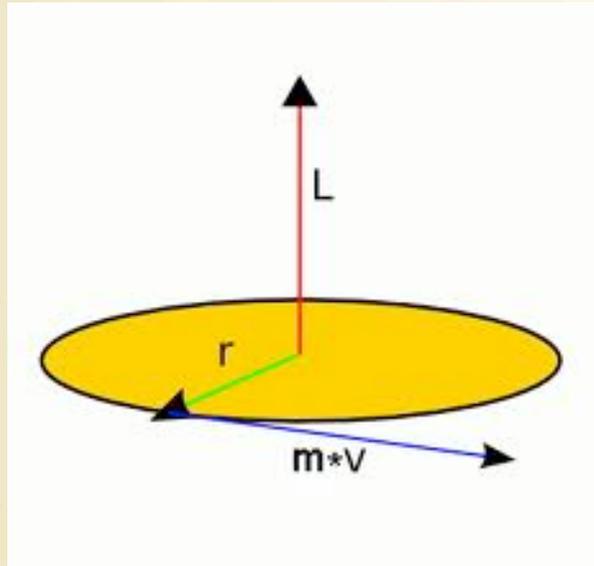
Unidades de energía: eV = electron-voltio

Measurement	Unit	SI value of unit
Energy	eV	$1.602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19}$ J
Mass	eV/c ²	$1.782\ 662 \times 10^{-36}$ kg
Momentum	eV/c	$5.344\ 286 \times 10^{-28}$ kg·m/s
Temperature	eV/k _B	11 604.505(20) K
Time	\hbar /eV	$6.582\ 119 \times 10^{-16}$ s
Distance	$\hbar c$ /eV	$1.973\ 27 \times 10^{-7}$ m

$$MeV = 10^6 eV ; GeV = 10^9 eV$$

$$TeV = 10^3 GeV = 10^{12} eV$$

Momento angular y Spin

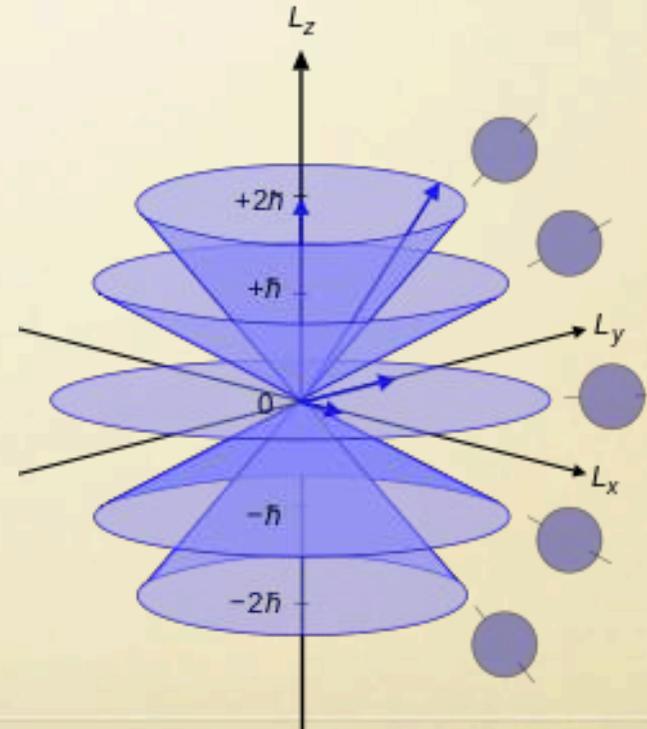


$$\vec{L} = m\vec{r} \times \vec{v}$$

(cuando $\vec{v} = 0$ no hay \vec{L})

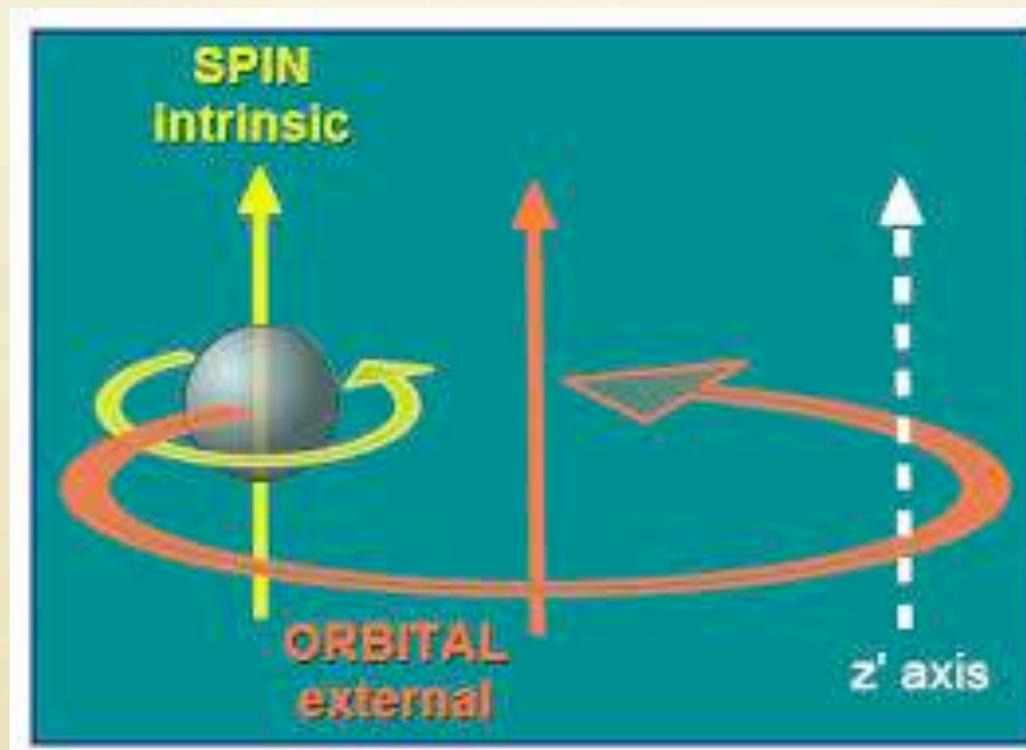
Mecánica Cuántica:

*Momento angular
es un múltiplo de \hbar :*

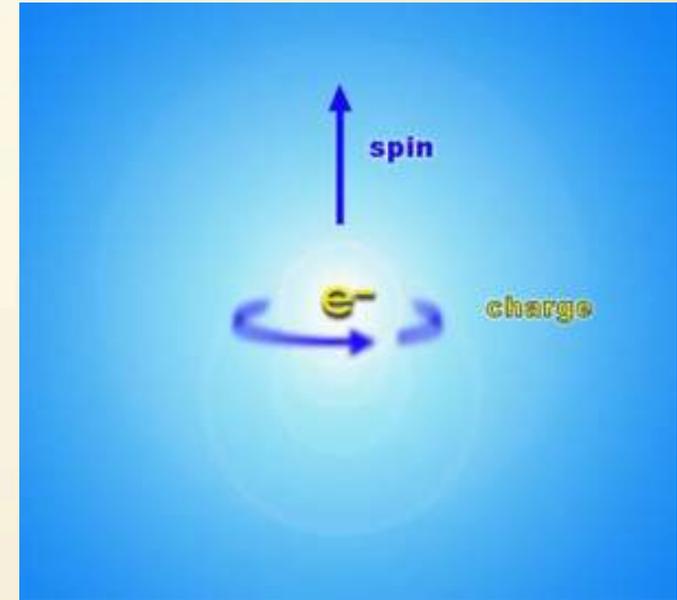
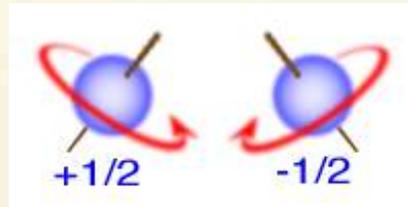
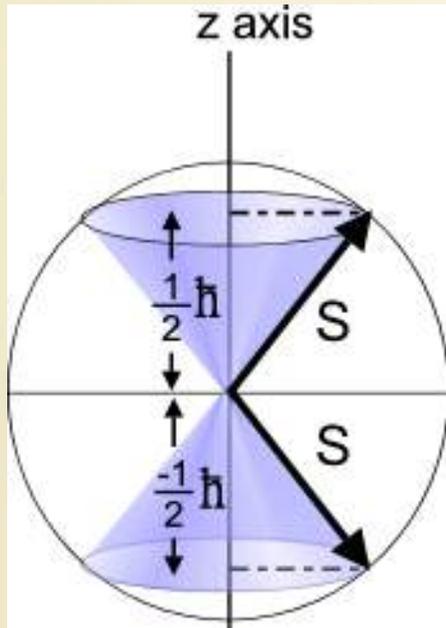


Mec. Cuántica: Algunas partículas tienen momento angular incluso en reposo:

Spin

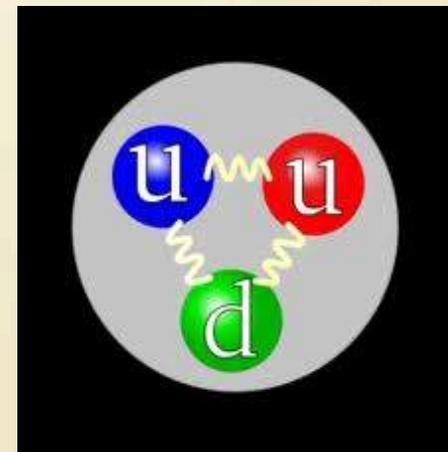


Los quarks y leptones tienen Spin 1/2



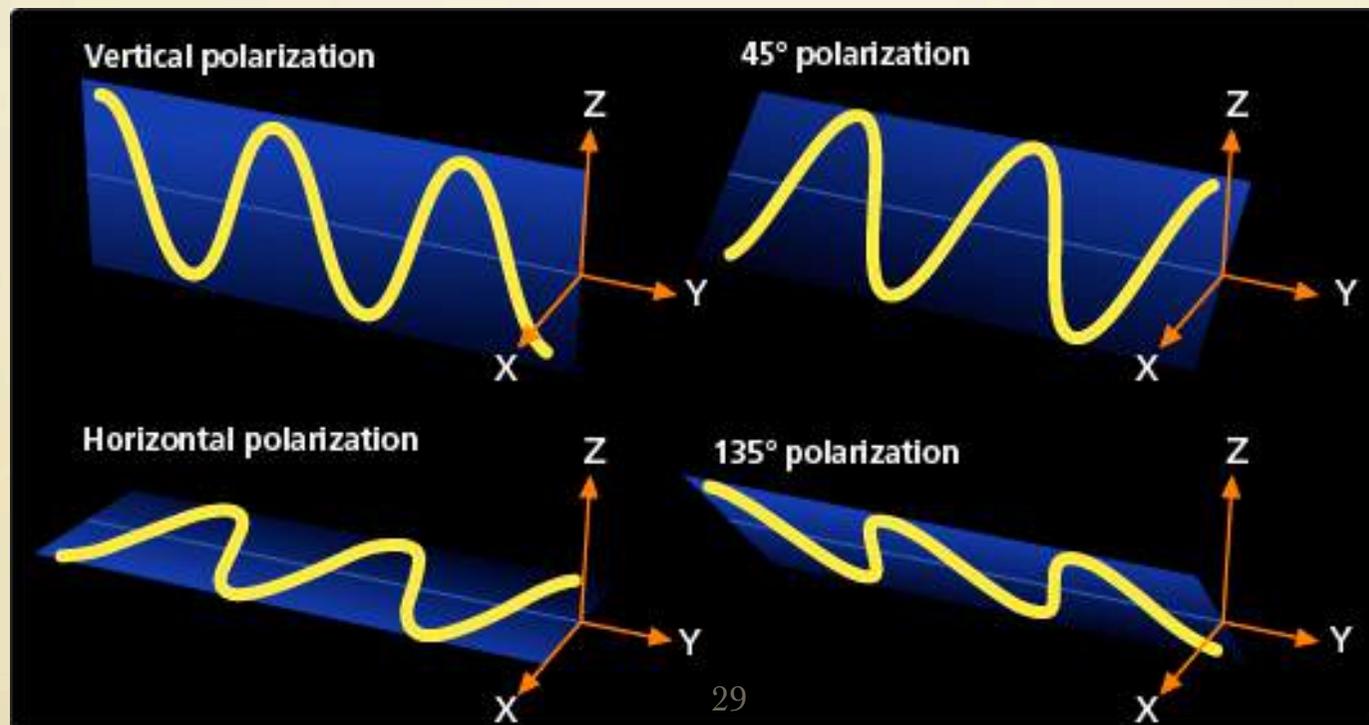
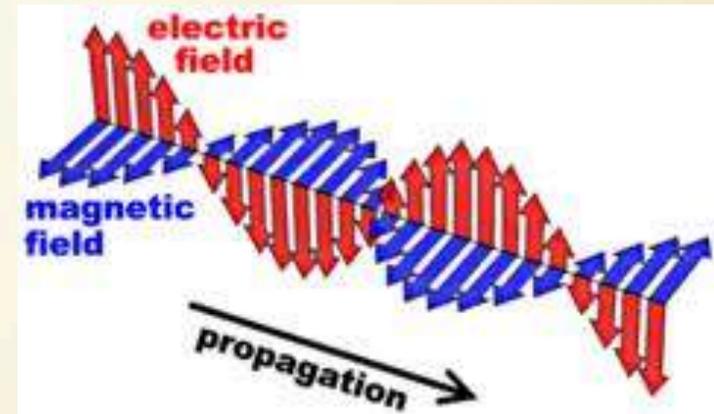
Protón y Neutrón también:

La materia está
compuesta por
partículas de Spin=1/2

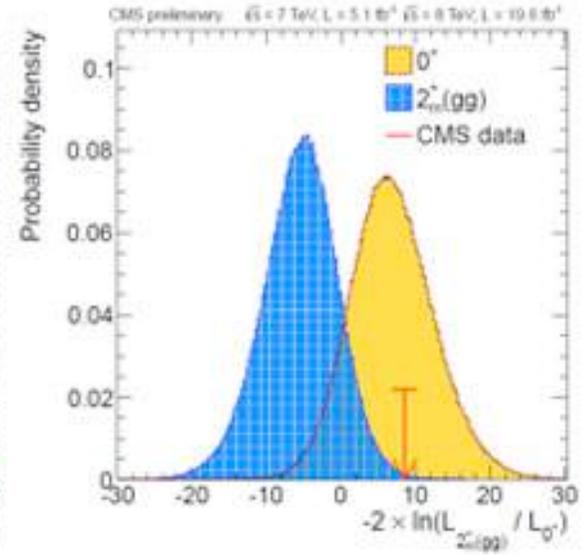
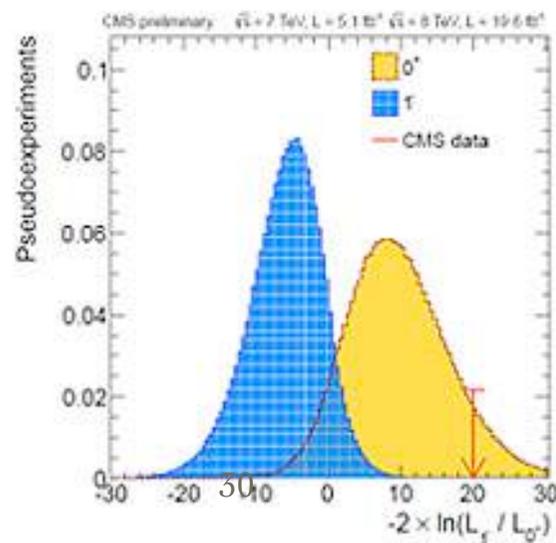
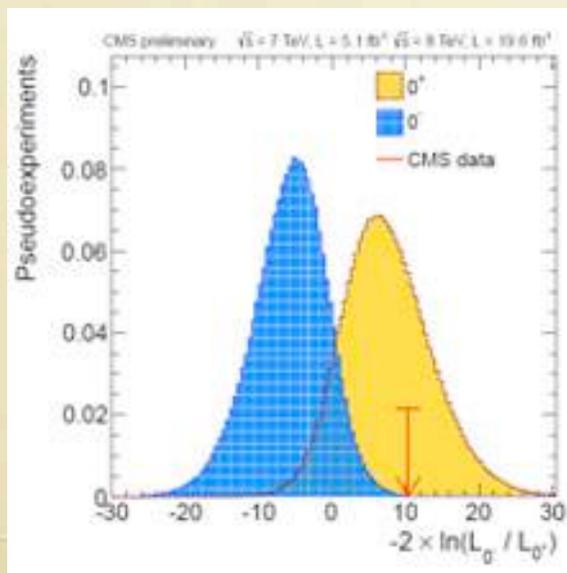
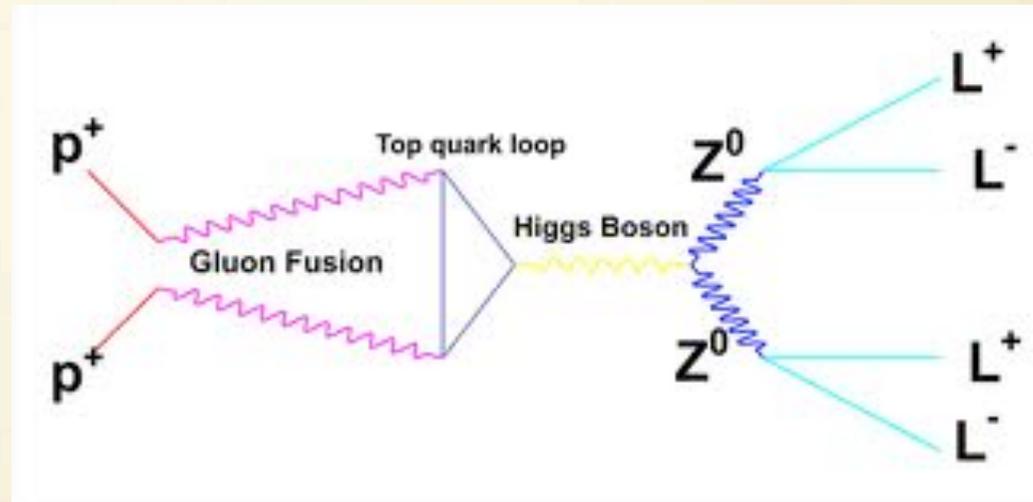
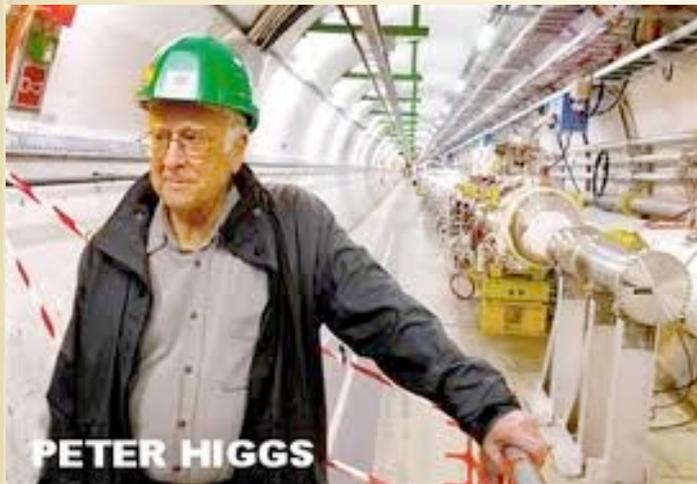


Los bosones gauge tienen Spin 1

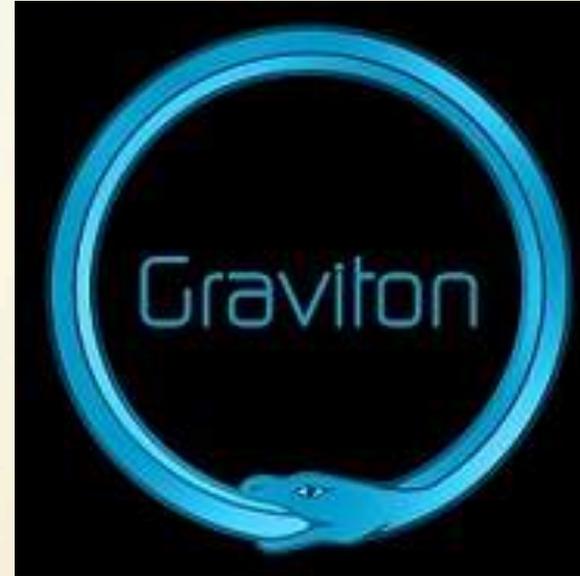
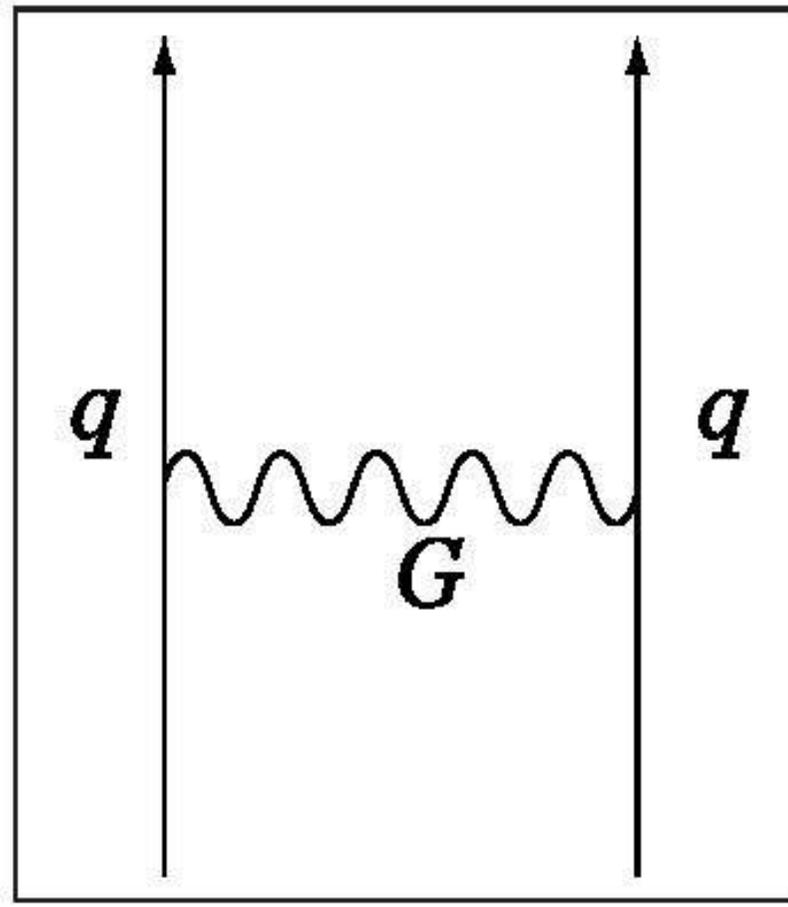
Fotón: Polarización = Spin



El boson de Higgs tiene Spin 0



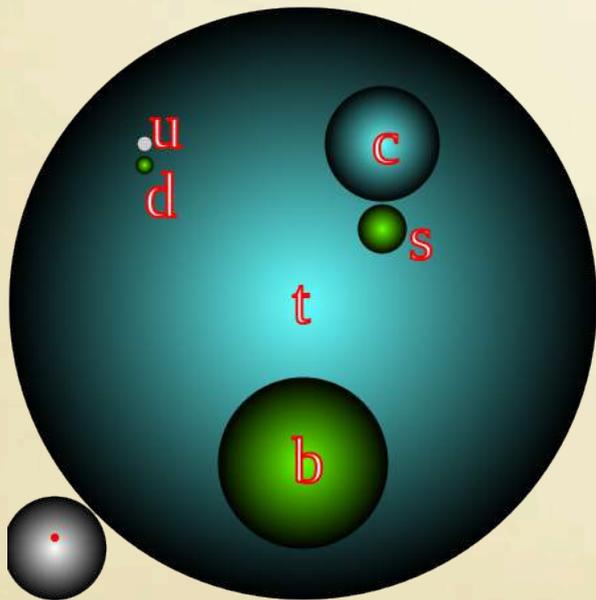
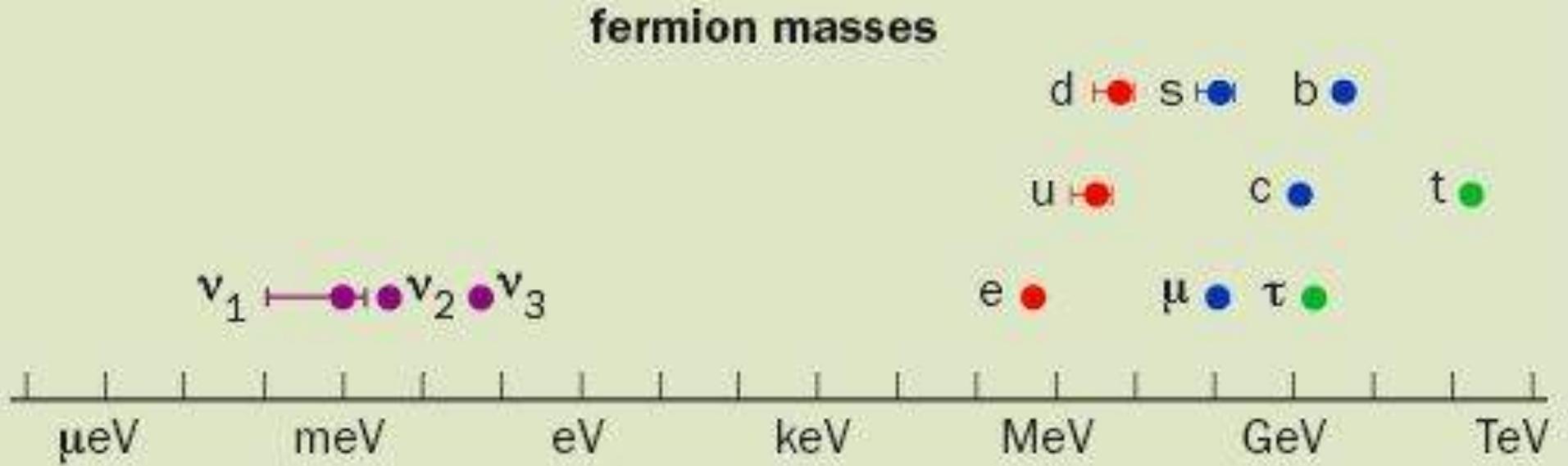
El mediador de la gravitación:



metrica $g_{\mu\nu}$ \rightarrow Spin 2

El problema de las
masas de quarks y
leptones....

★ Por qué las masas de quarks y leptones son las que son?



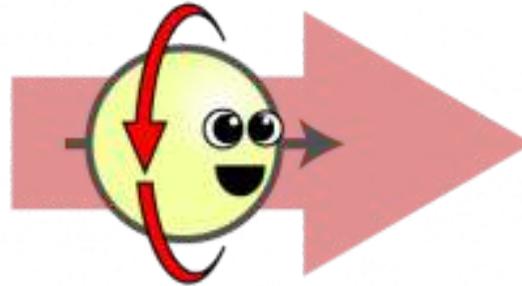
$$m_{top} = 172 \text{ GeV}$$

$$m_{electron} = 0.00056 \text{ GeV}$$

$$m_{Higgs} = 126 \text{ GeV} \text{ ?}$$

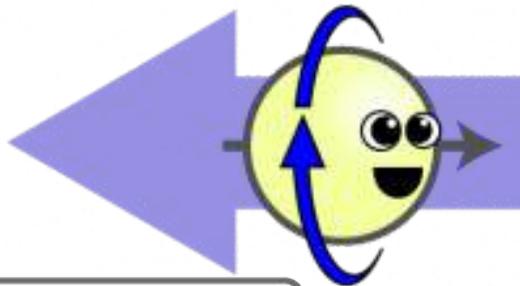
(Casi) Todos los fermiones de $\text{spin}=1/2$ tienen 2 posibilidades:

Right (destrógiros)

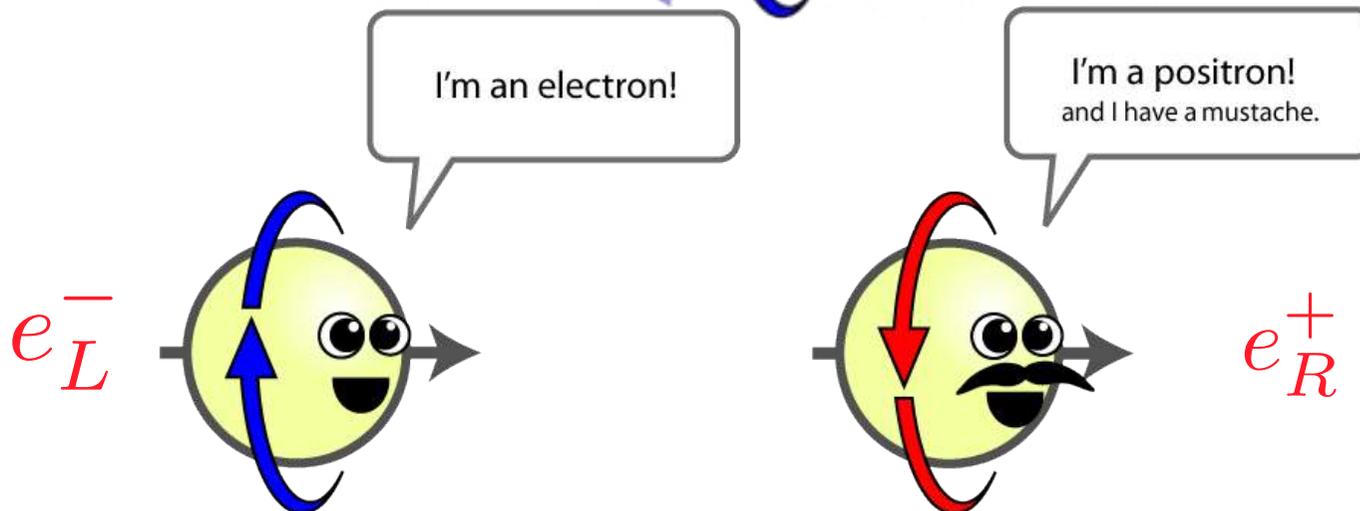


*Spin y velocidad
misma direccion*

Left (levógiros)

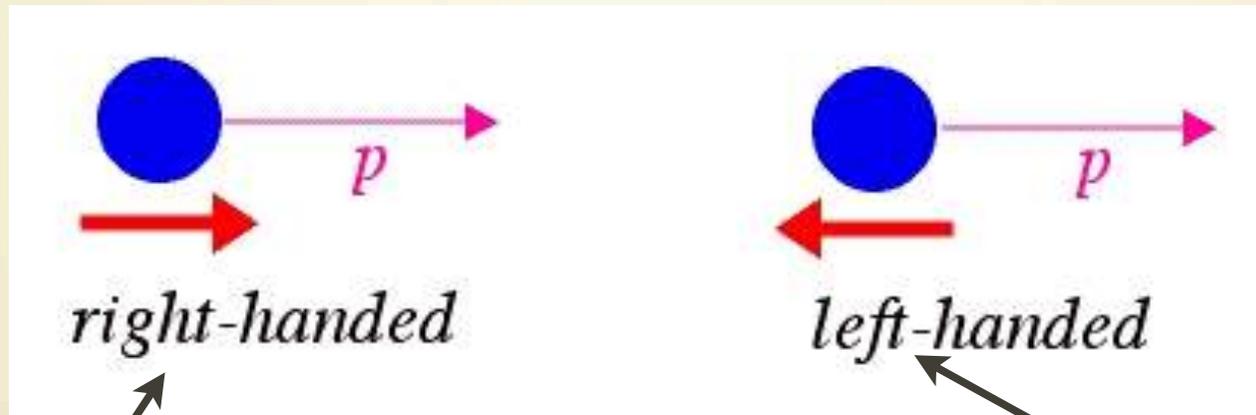


*Spin y velocidad
direcciones opuestas*

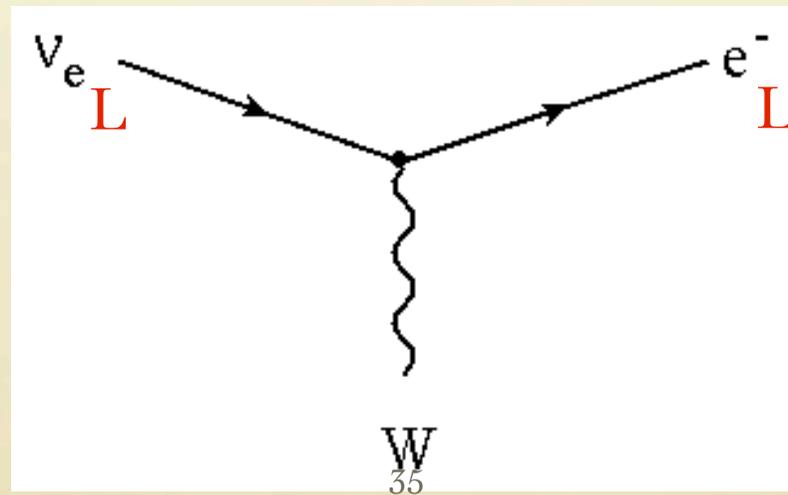


QUIRALIDAD

Propiedad muy particular del MS:

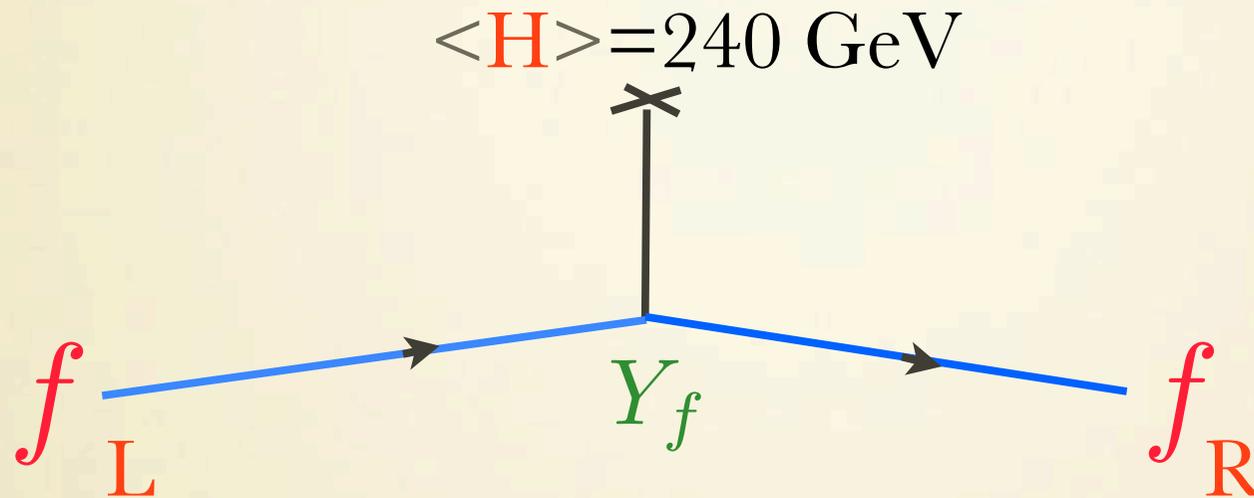


NO tienen
interacción
Débil
SU(2)



SI tienen
interacción
Débil
SU(2)

Un término de masa combina Left y Right



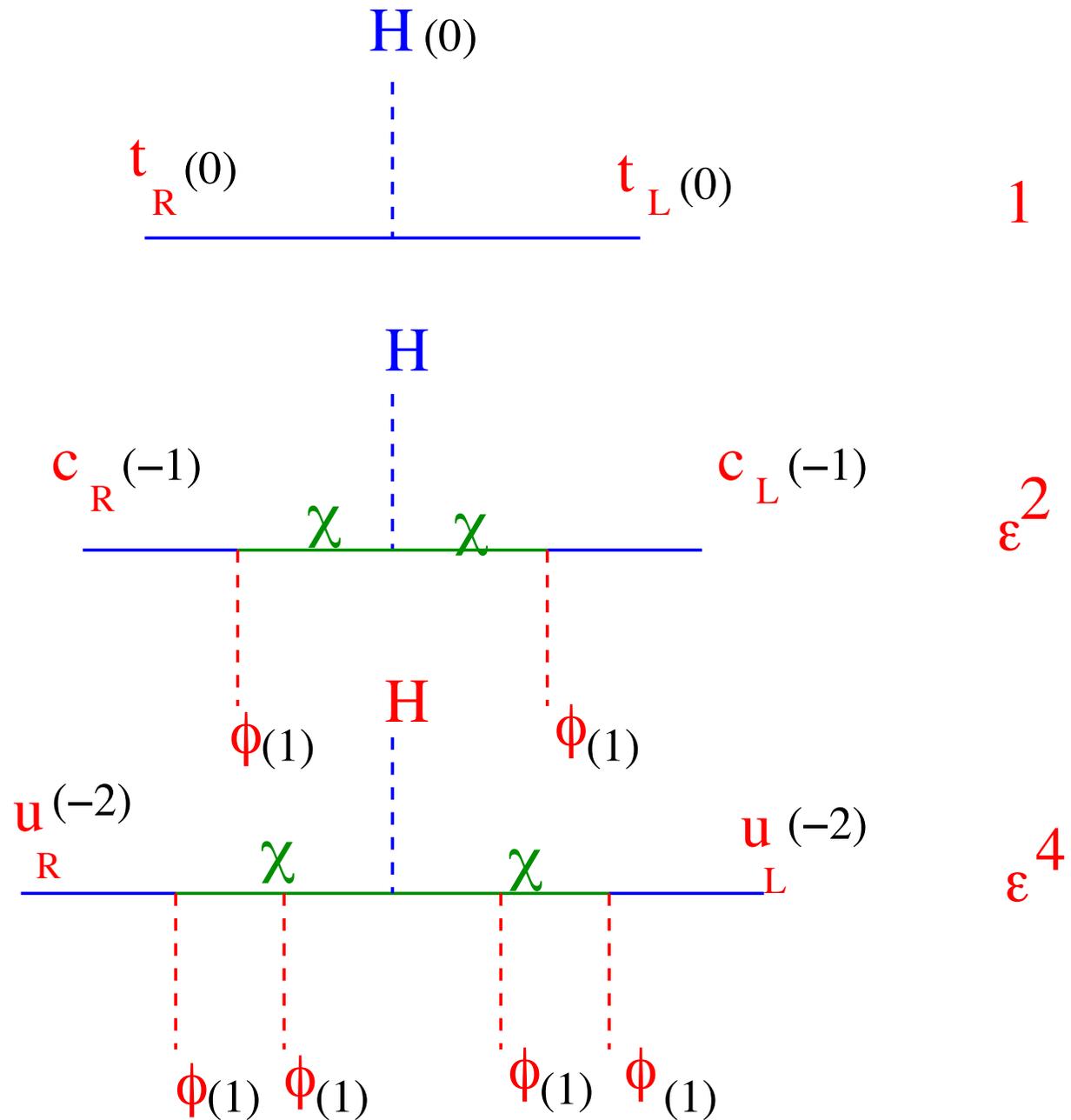
$$m_f = Y_f \langle H \rangle$$

¡Sin Higgs no hay masa para los fermiones!

Y_f no predicho por la teoría....

"acoplos de Yukawa"

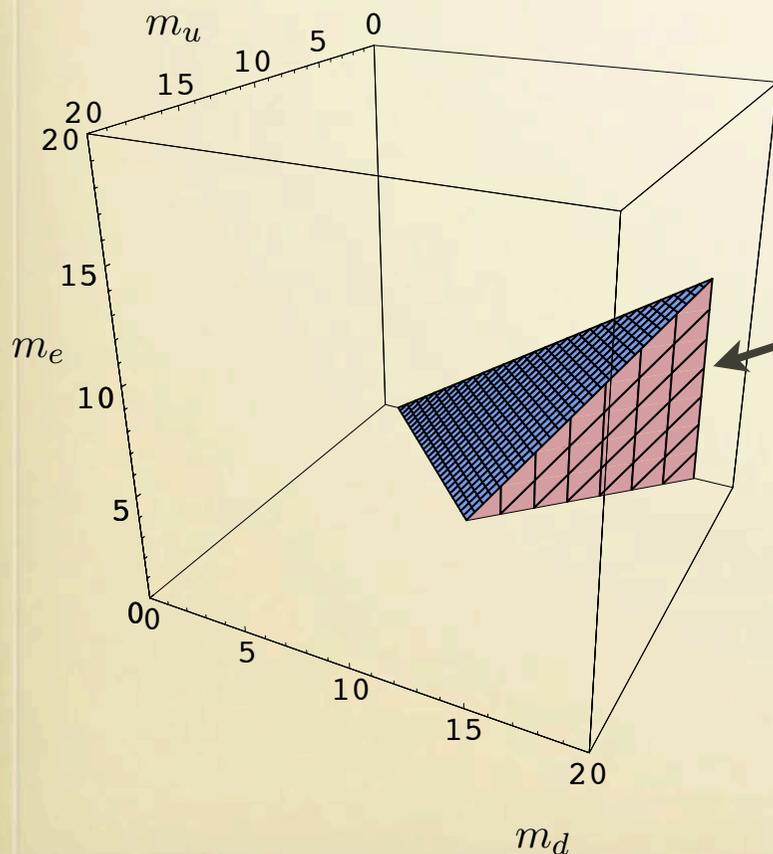
Ejemplo de modelo: mas simetrías y mas Higgses...



Quizá los valores concretos de la masa de las partículas mas ligeras tenga un origen ‘antrópico’

$$m_d - m_u - 1.67m_e \geq 0.83 \text{ MeV} : \textit{proton sea estable}$$

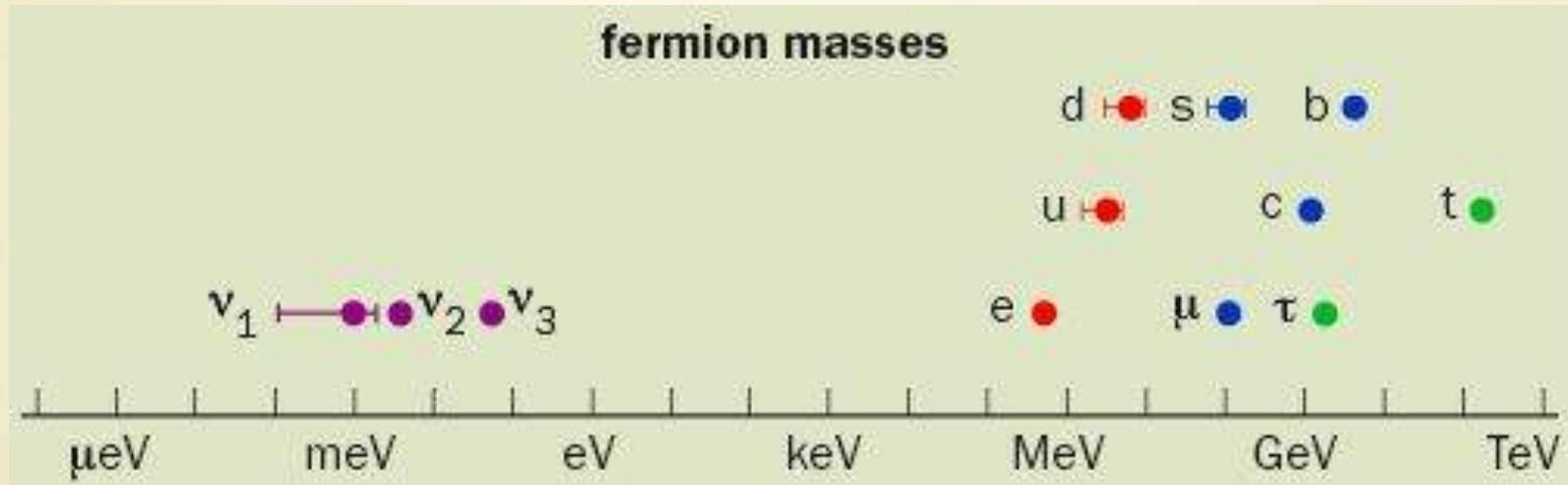
$$m_u + m_d \leq 18 \text{ MeV} : \textit{nucleos mas alla del Hidrogeno sean estables}$$



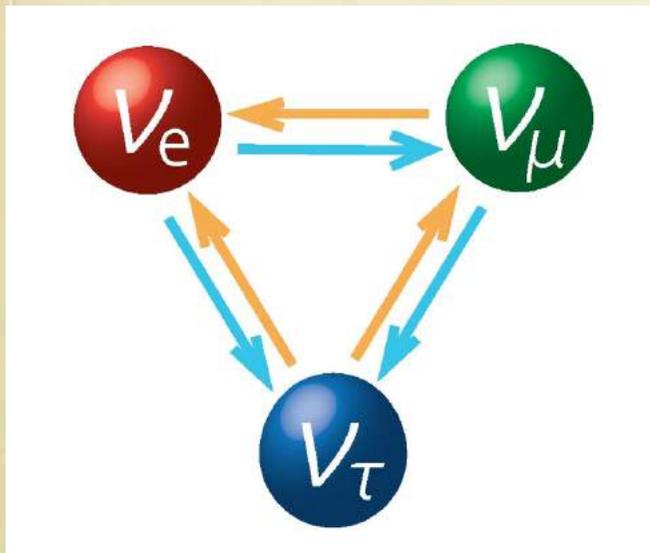
Región
consistente

Solo universos con esas
caracteristicas serían viables...

Masas de los neutrinos



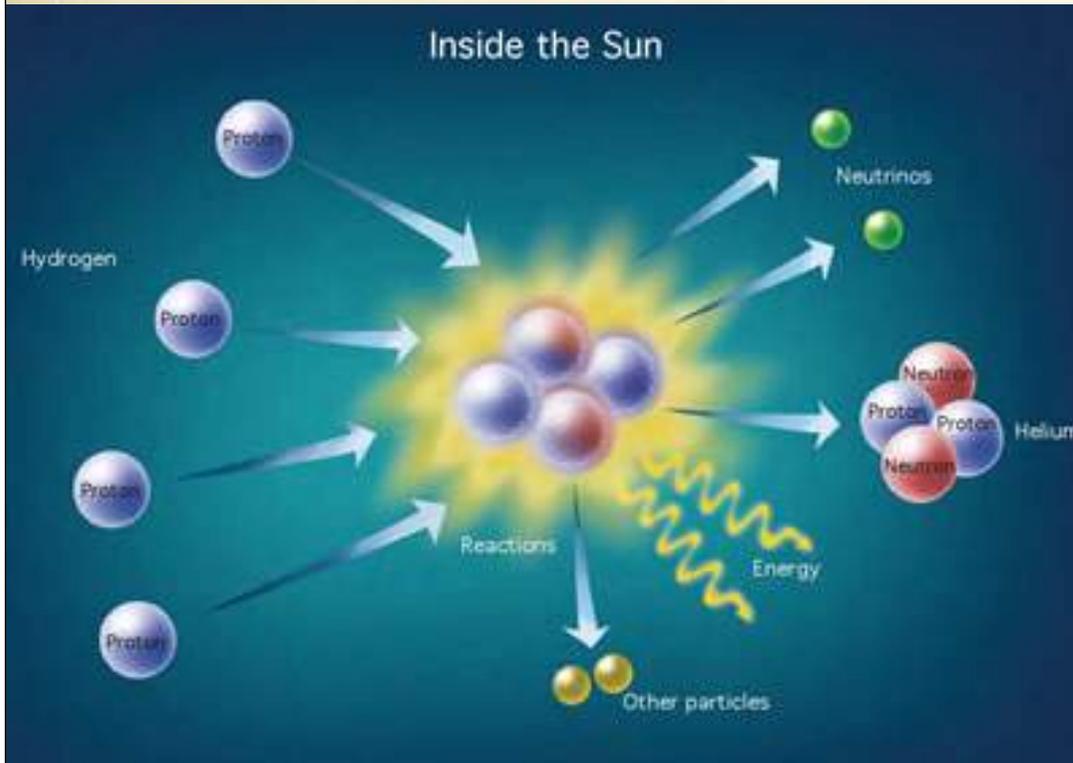
No son como los demas leptones y quarks: son **neutros**



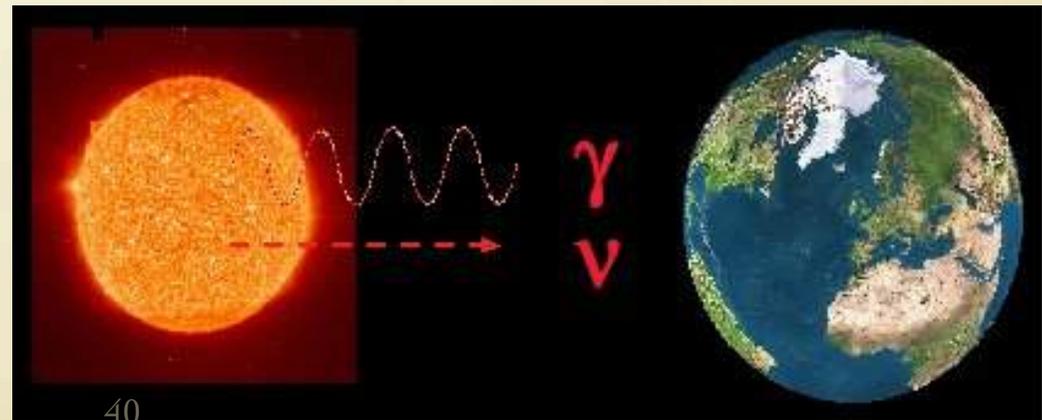
Solo tienen interacción Débil
(son Left) y son **muy penetrantes**

**Pueden oscilar en vuelo
entre una variedad y otra**

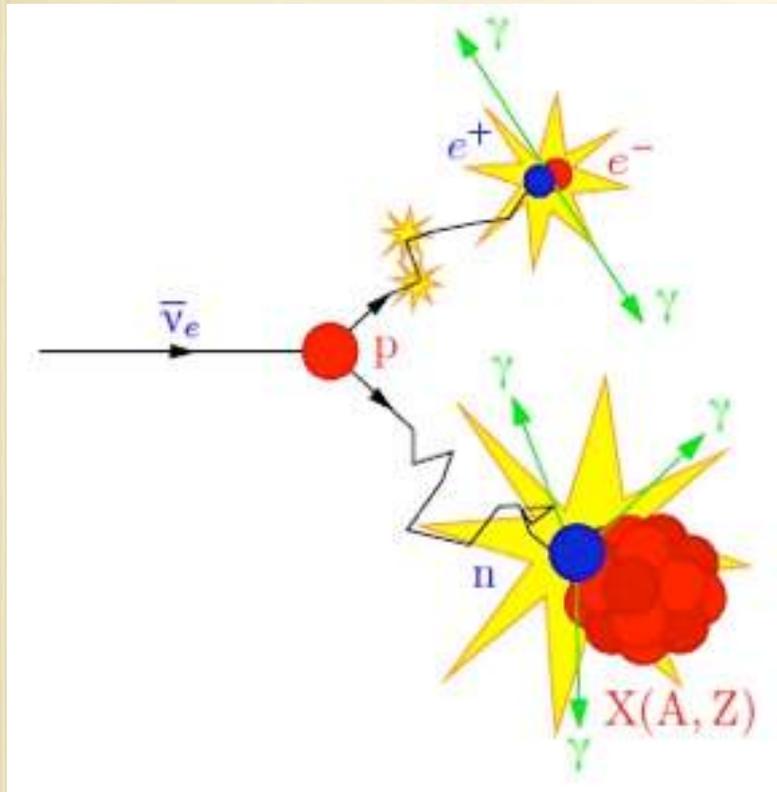
por ejemplo, viajando desde el Sol a la tierra.....



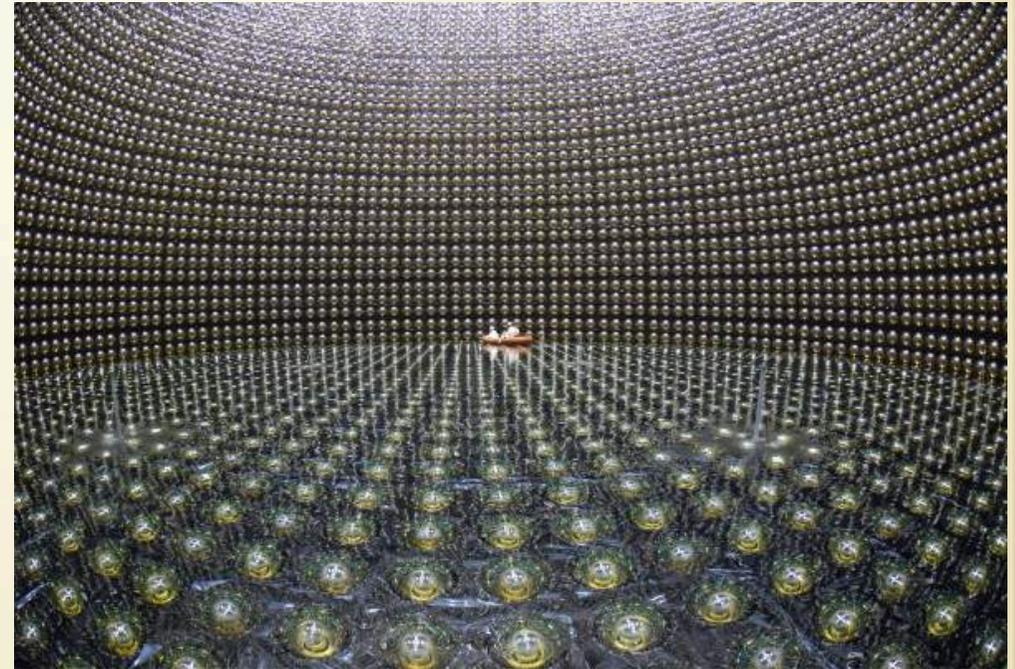
Reacciones de fusión
producen luz pero también
neutrinos...



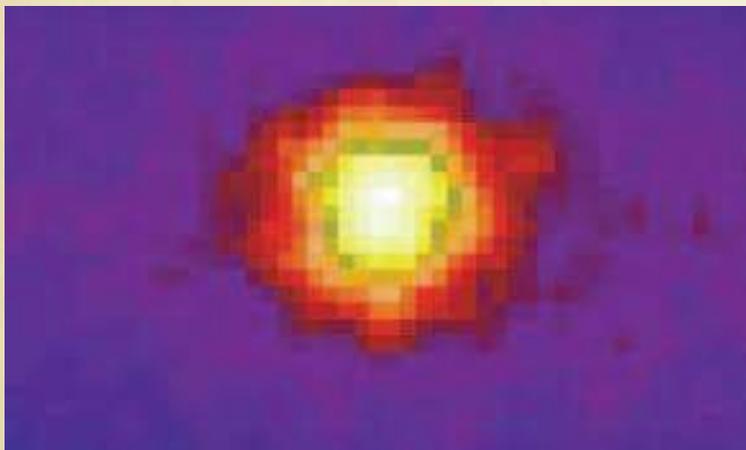
Se detectan en la Tierra...



Chocan con protones y al final producen radiación gamma detectable

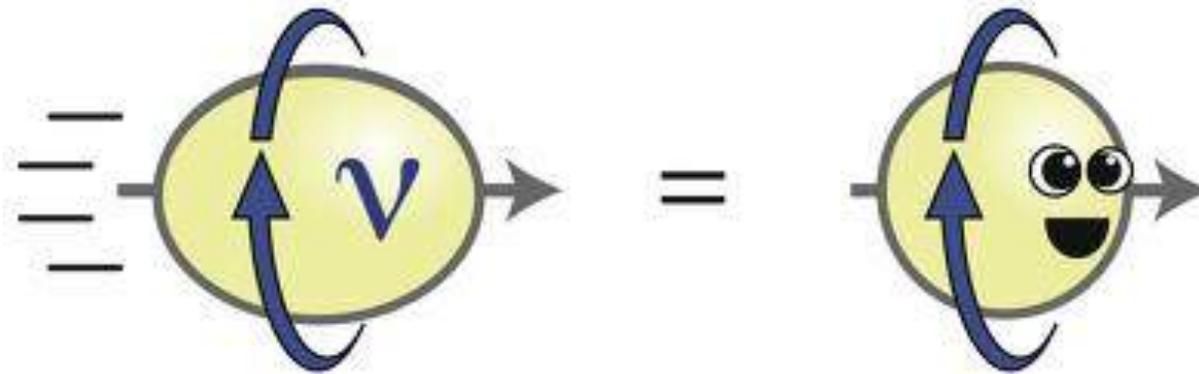


p.e en Superkamiokande

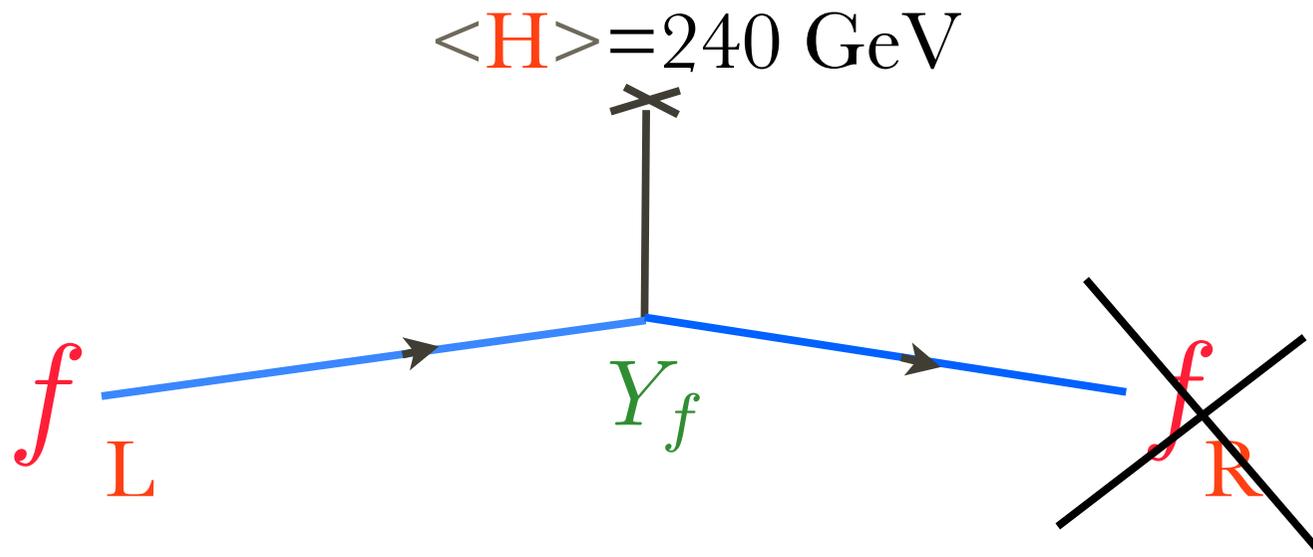


El Sol visto con Neutrinos al otro lado de la Tierra

¿Por qué son los neutrinos tan ligeros?



En el MS solo tienen componente 'left'

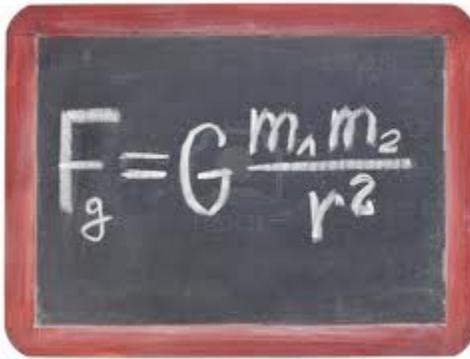


!No tienen masa en el Modelo Standard;

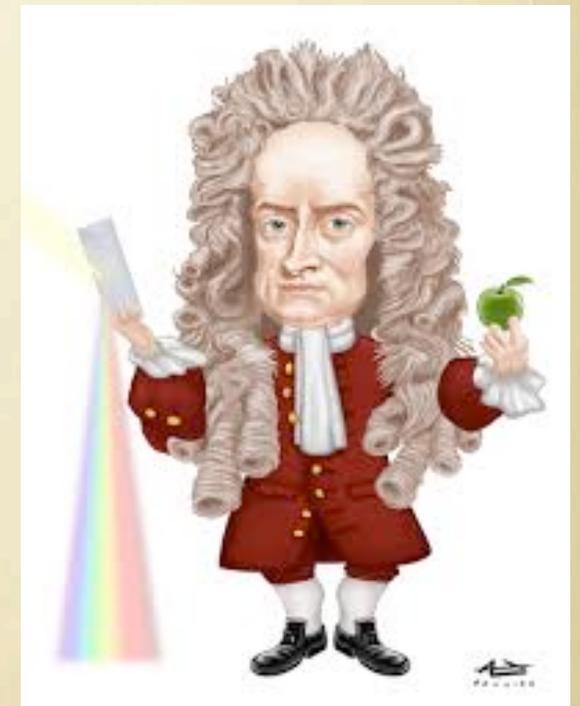


UNIFICACIÓN DE FUERZAS

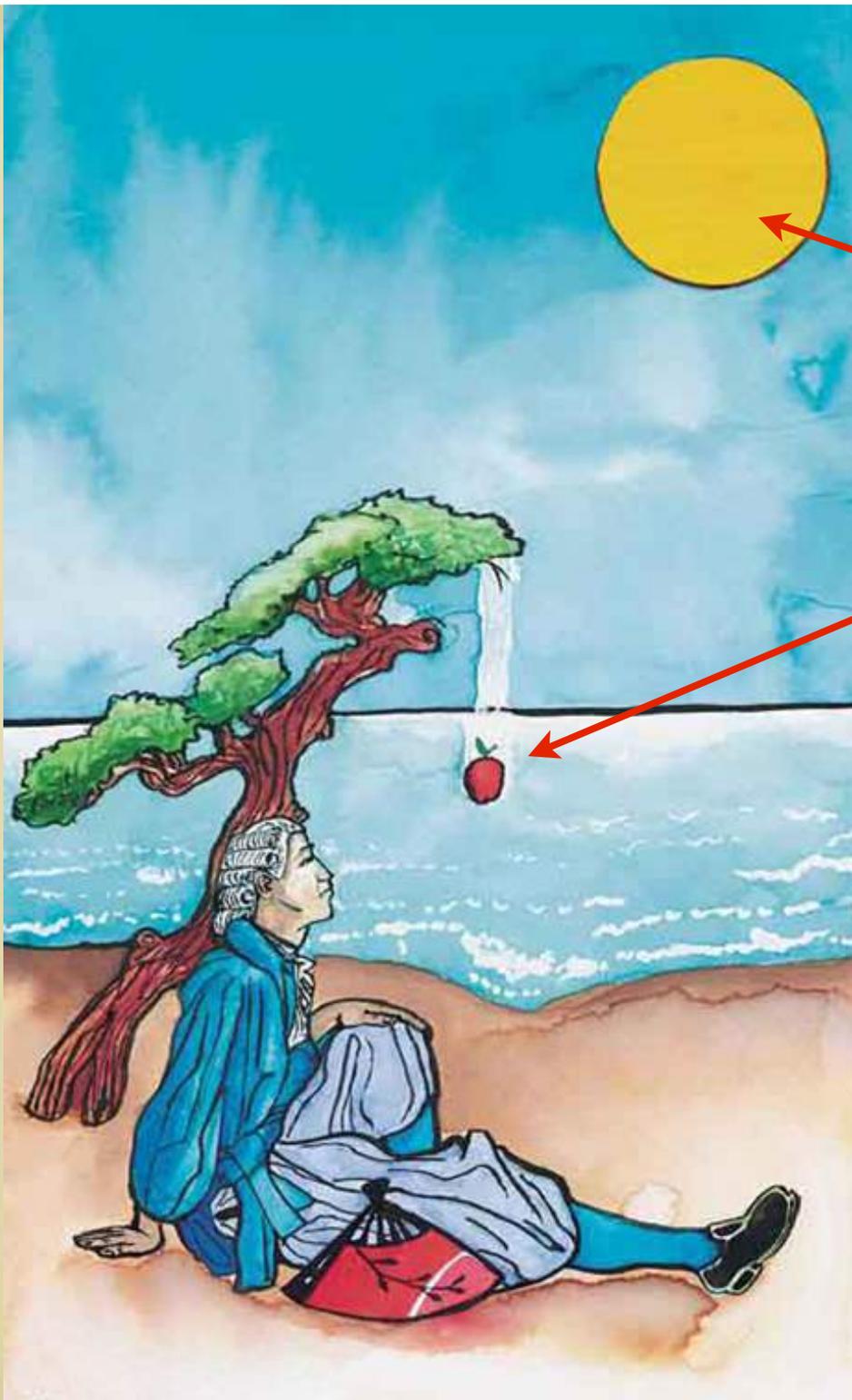
Primera Unificación


$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Gravitación Universal



Isaac Newton





Coulomb



Ampere

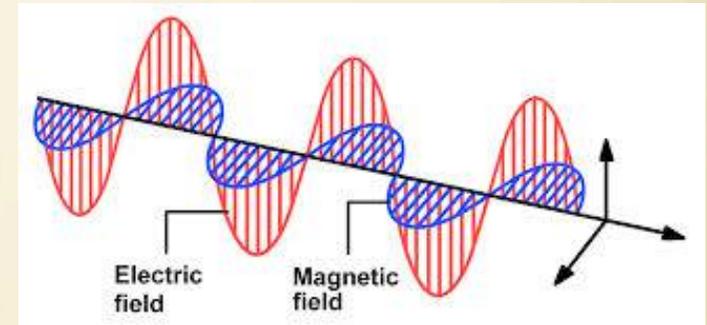


Faraday

Noción de 'campo de fuerzas'

$$\mathbf{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$



Luz = Radiación electromagnética



J.C. Maxwell

1865

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

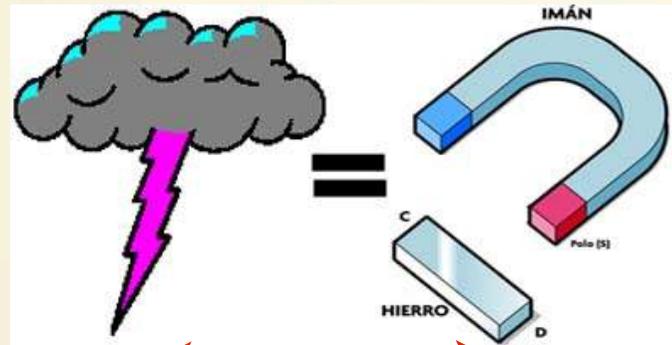
$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

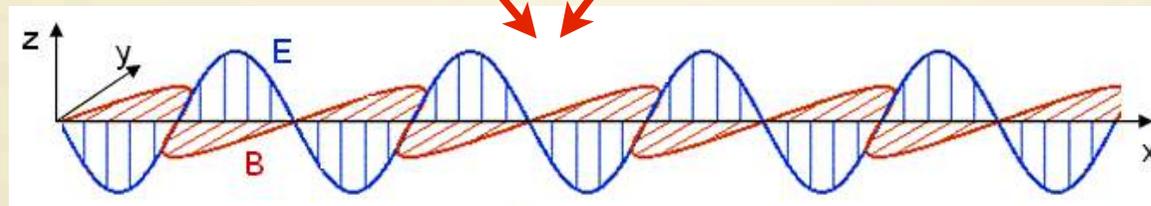
Unificación triple

1865

Electricidad



Magnetismo



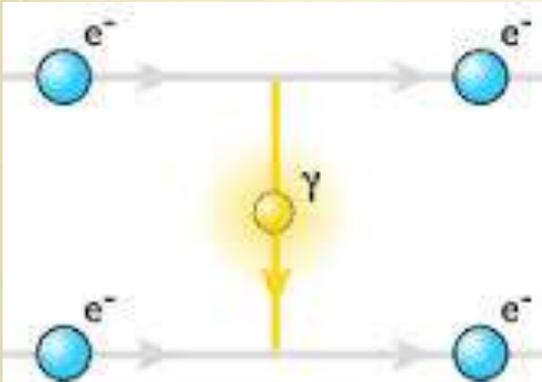
Luz

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

Una de las ecuaciones
mas bellas de la Física

Teorías de Gran Unificación

'Acoplos': la intensidad de las interacciones



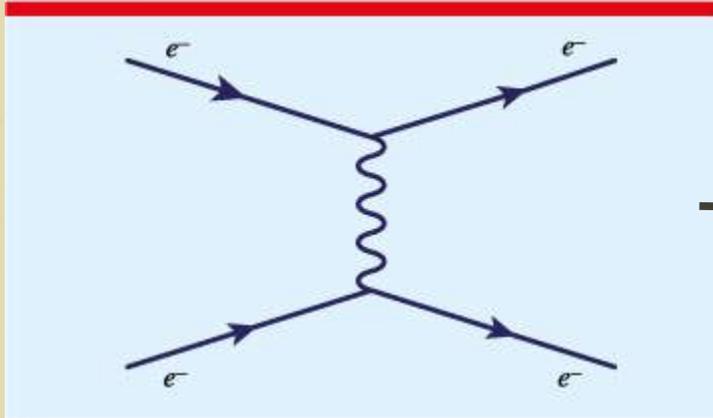
Ley de Coulomb para 2 electrones :

$$V(r) = -\frac{e^2}{r} \equiv -\frac{\alpha_{em}\hbar c}{r}$$

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{\hbar c} \simeq \frac{1}{137}, \text{ adimensional!}$$

Mide la intensidad de las interacciones electro-
magnéticas

Las simetrías 'gauge' de Modelo Standard



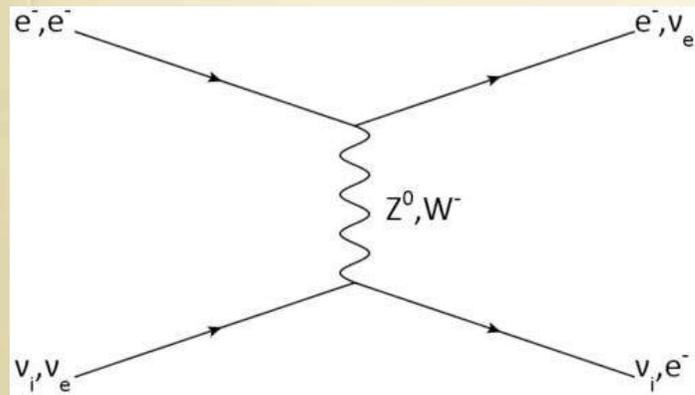
Carga eléctrica

α_{em}

Simetría

$U(1)$

$N = 1$ *foton*

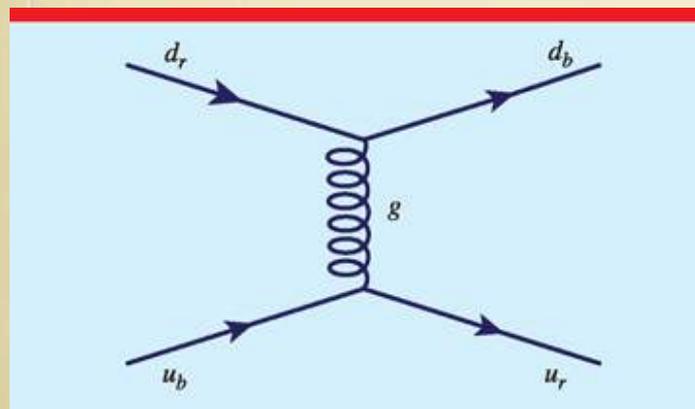


Carga Débil

α_{debil}

$SU(2)$

$N^2 - 1 = 3$ *bosones*



Carga de color

α_{fuerte}

$SU(3)$

$N^2 - 1 = 8$ *gluones*

Existen 3 : α_{em} , α_{debil} , α_{fuerte}

Experimentalmente:

$$\alpha_{em} \simeq \frac{1}{137} ; \alpha_{debil} \simeq \frac{1}{24} ; \alpha_{fuerte} \simeq \frac{1}{8}$$

(¡independientemente del sistema de unidades!



A. Edington: ¿está el número 1/137 asociado a alguna propiedad fundamental?



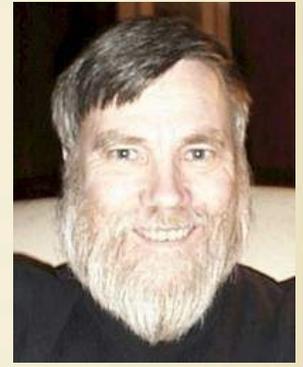
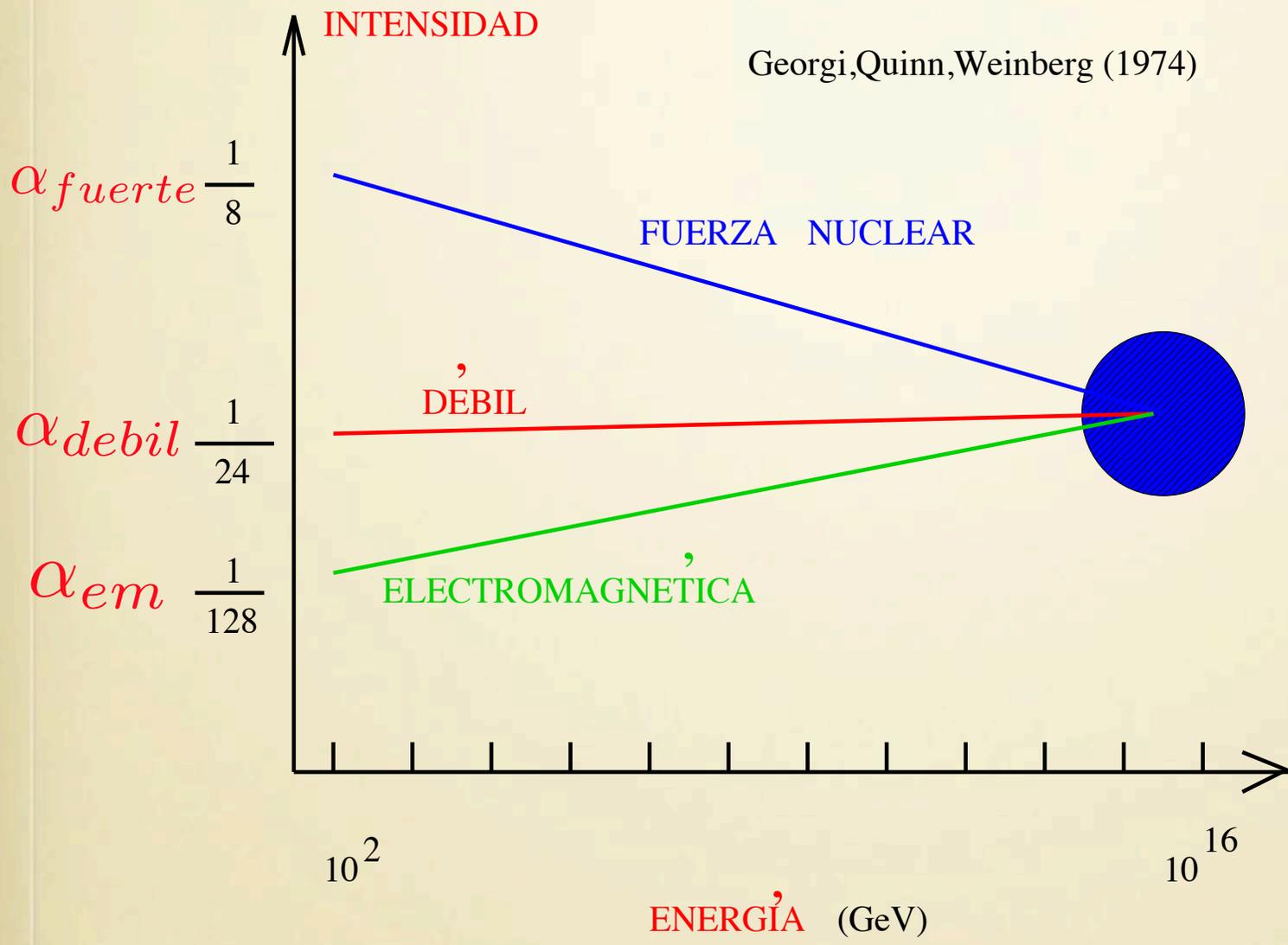
Por qué hay 4 interacciones fundamentales?



Por qué tienen intensidades tan diferentes?

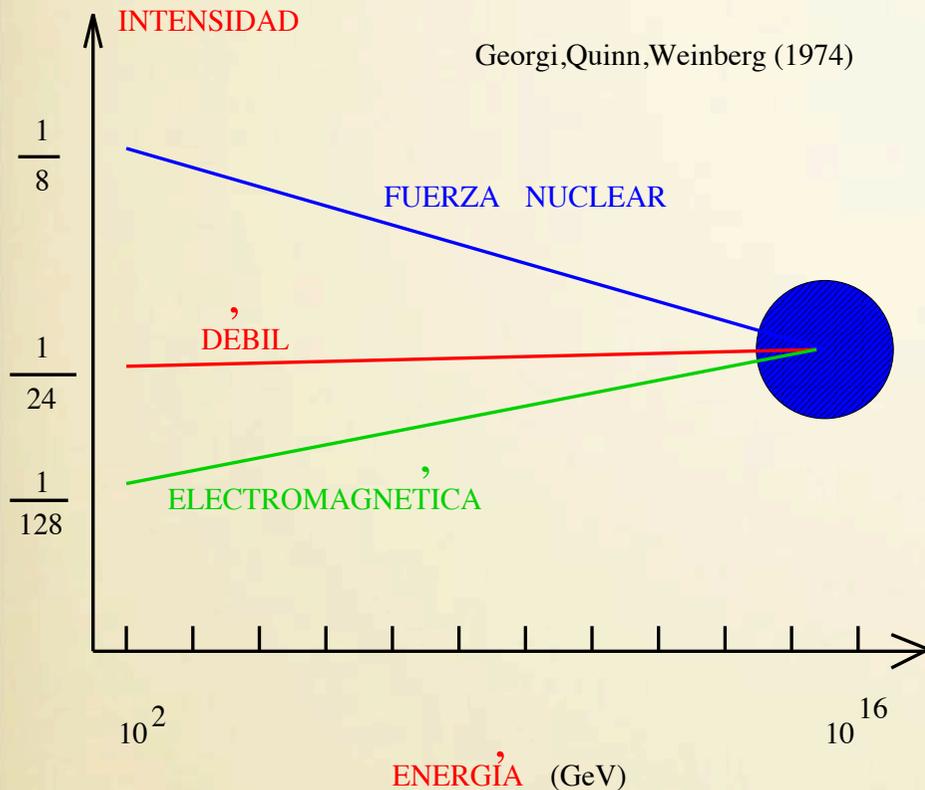
T.C. de Campos: intensidad depende de la energía a la que se mide

Georgi,Quinn,Weinberg (1974)



ZONA ACCESIBLE A ACELERADORES

$$\frac{1}{\alpha_i(q^2)} = \frac{1}{\alpha_i(\mu^2)} + \frac{b_i}{2\pi} \log\left(\frac{\mu^2}{q^2}\right) ; i = 1, 2, 3$$



Sugiere una
unificación
a energías
enormes

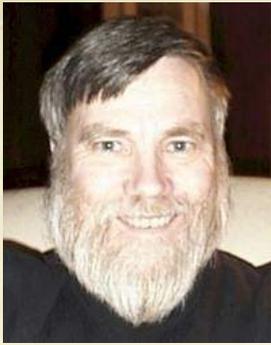
$$M_X = 10^{15} \text{ GeV}$$



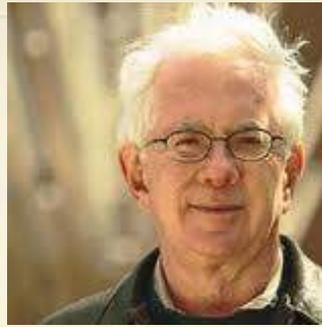
ZONA ACCESIBLE A ACELERADORES



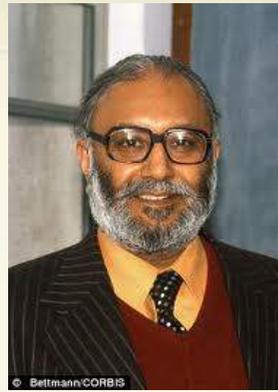
Que unificación?



Georgi



Glashow



Salam

$$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$



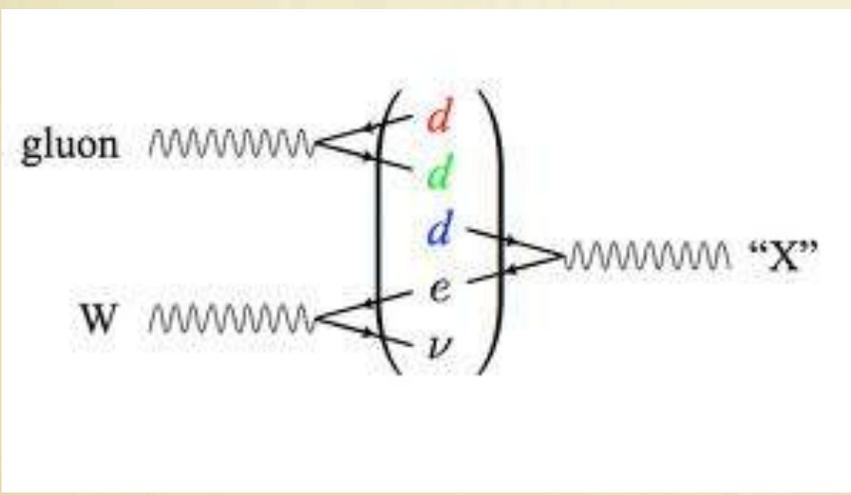
$$SU(5)$$

‘Teorías de Gran Unificación’

$$5^2 - 1 = 24 \text{ bosones gauge :}$$

Quarks y leptones de cada generación unificados

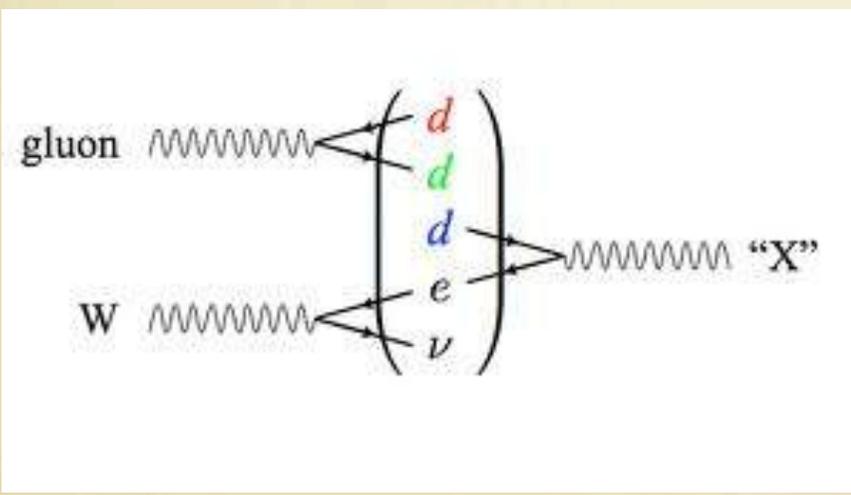
$$\bar{5} = \begin{pmatrix} d_1^c \\ d_2^c \\ d_3^c \\ e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} ; 10 = \begin{pmatrix} 0 & u_3^c & u_2^c & u_1 & d_1 \\ & 0 & u_1^c & u_2 & d_2 \\ & & 0 & u_3 & d_3 \\ & & & 0 & e^+ \\ & & & & 0 \end{pmatrix}$$



Mezclan quarks y leptones

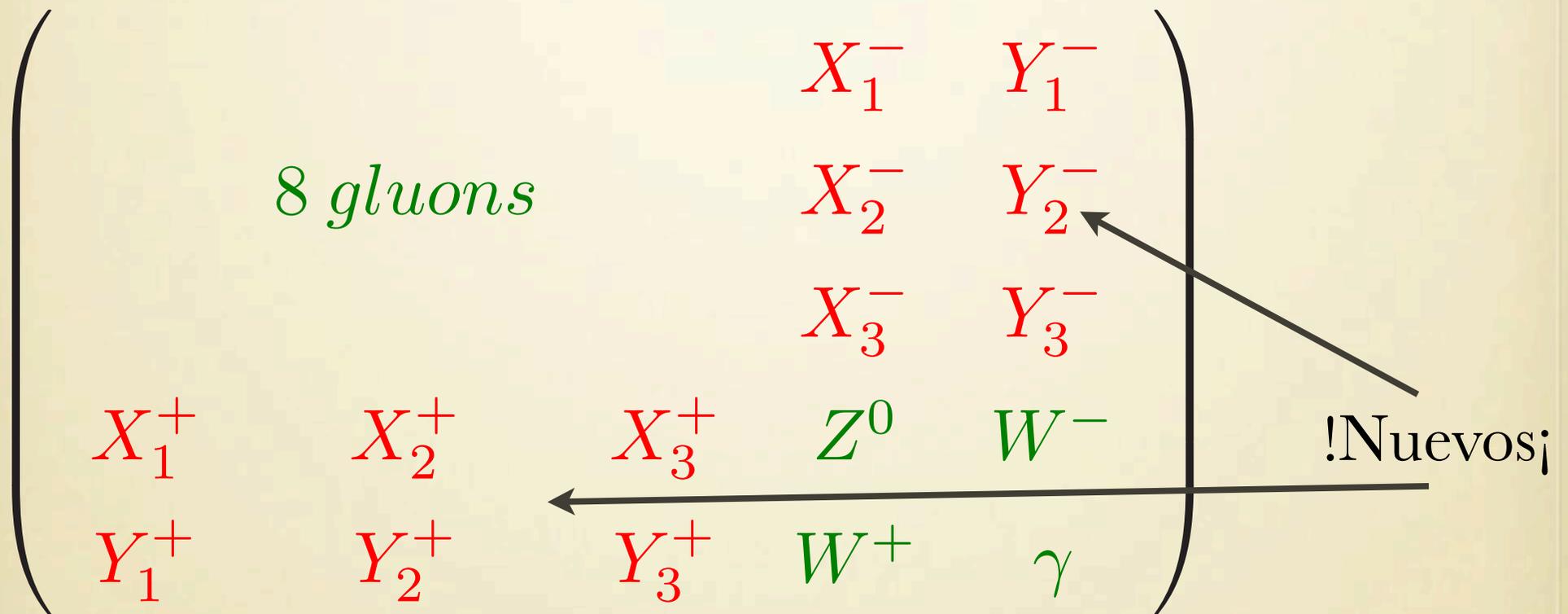
Quarks y leptones de cada generación unificados

$$\begin{array}{c}
 \text{SU}(3) \\
 \updownarrow \\
 \bar{5} = \\
 \downarrow \\
 \text{SU}(2)
 \end{array}
 \left(\begin{array}{c}
 d_1^c \\
 d_2^c \\
 d_3^c \\
 e^- \\
 \nu_e
 \end{array} \right)
 ; \quad
 10 =
 \left(\begin{array}{ccccc}
 0 & u_3^c & u_2^c & u_1 & d_1 \\
 & 0 & u_1^c & u_2 & d_2 \\
 & & 0 & u_3 & d_3 \\
 & & & 0 & e^+ \\
 & & & & 0
 \end{array} \right)$$



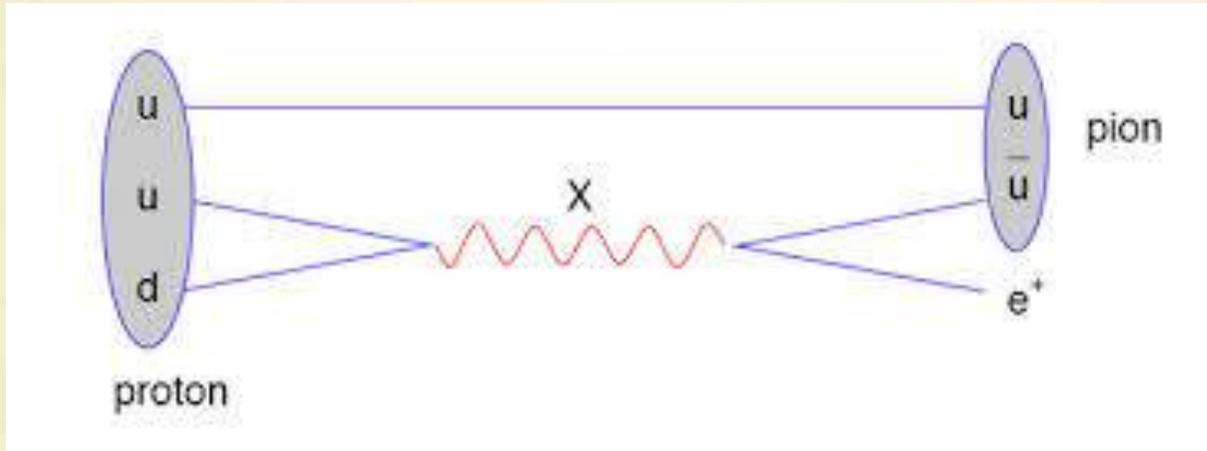
Mezclan quarks y leptones

$$5^2 - 1 = 24 \text{ bosones gauge :}$$



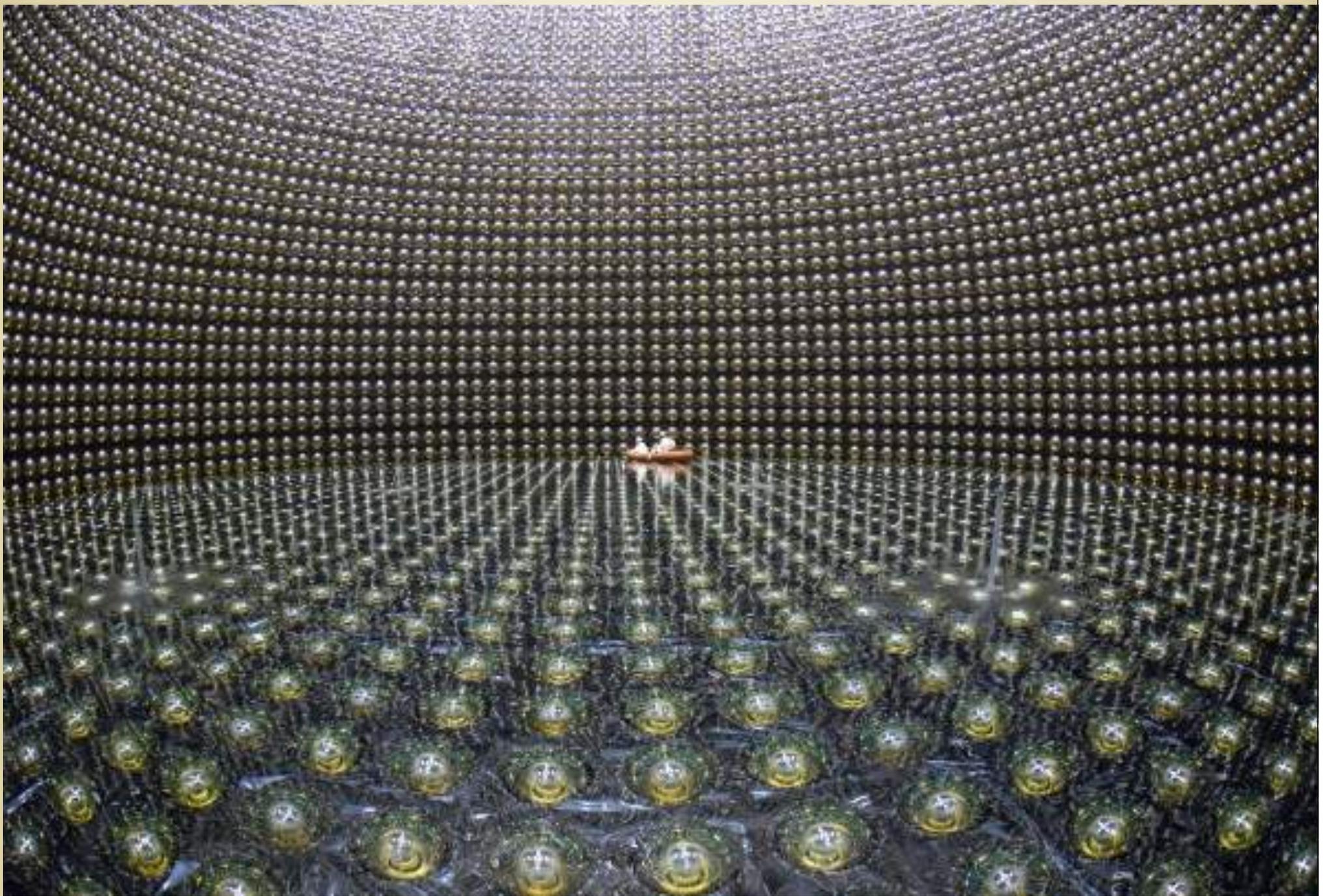
$$M_{X,Y} = 10^{15} \text{ GeV}$$

Los protones (y átomos) no son eternos!!

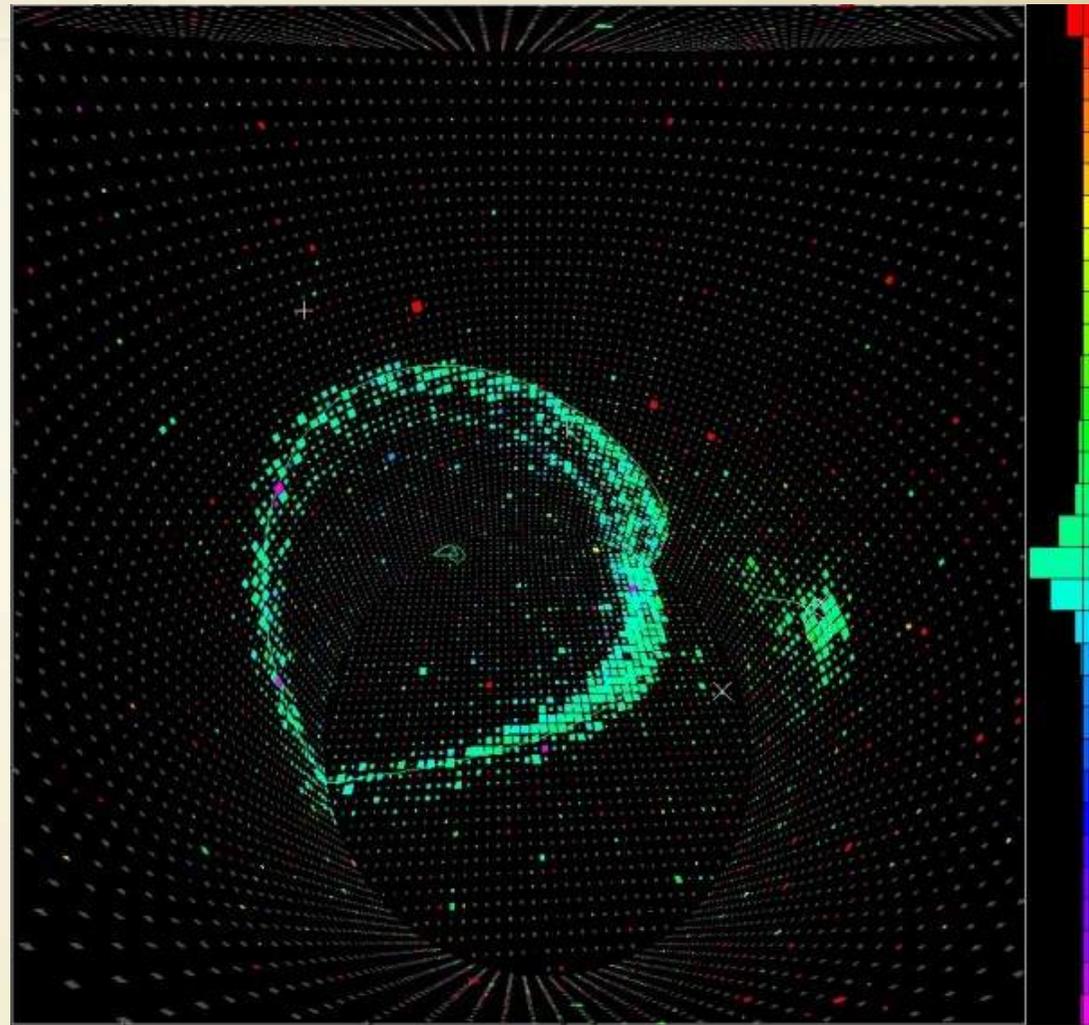
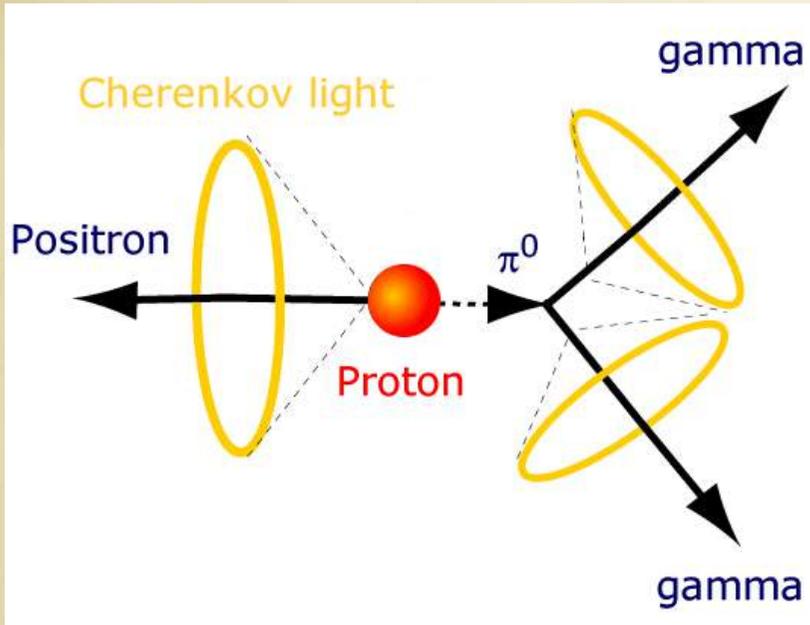


Vida media del proton : 10^{29} años

*Medible : basta con observar a
 10^{29} protones y esperar un año*



Super-Kamiokande, Japón



$$\tau_P \propto \frac{M_X^4}{m_P^5}$$

$$\tau(P \rightarrow e^+ \pi^0) = 4 \times 10^{29 \pm 0.7} \text{ años} \quad \text{SU(5)}$$

$$\tau(P \rightarrow e^+ \pi^0) > 5.4 \times 10^{33} \text{ años} \quad \text{Experimento}$$

...pero hay predicciones muy exitosas...

$$\begin{pmatrix} d_1^c \\ d_2^c \\ d_3^c \\ e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \rightarrow Q_{em} = \begin{pmatrix} Q(d^c) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q(d^c) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q(d^c) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q(e^-) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

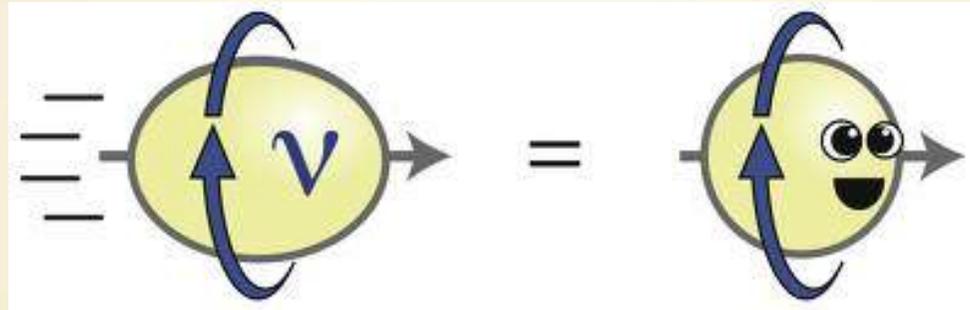
$$\rightarrow Q(d) = \frac{1}{3} Q(e^-) \quad \rightarrow Q_{proton} = - Q_{electron}$$

Fundamental para entender la estructura de los átomos

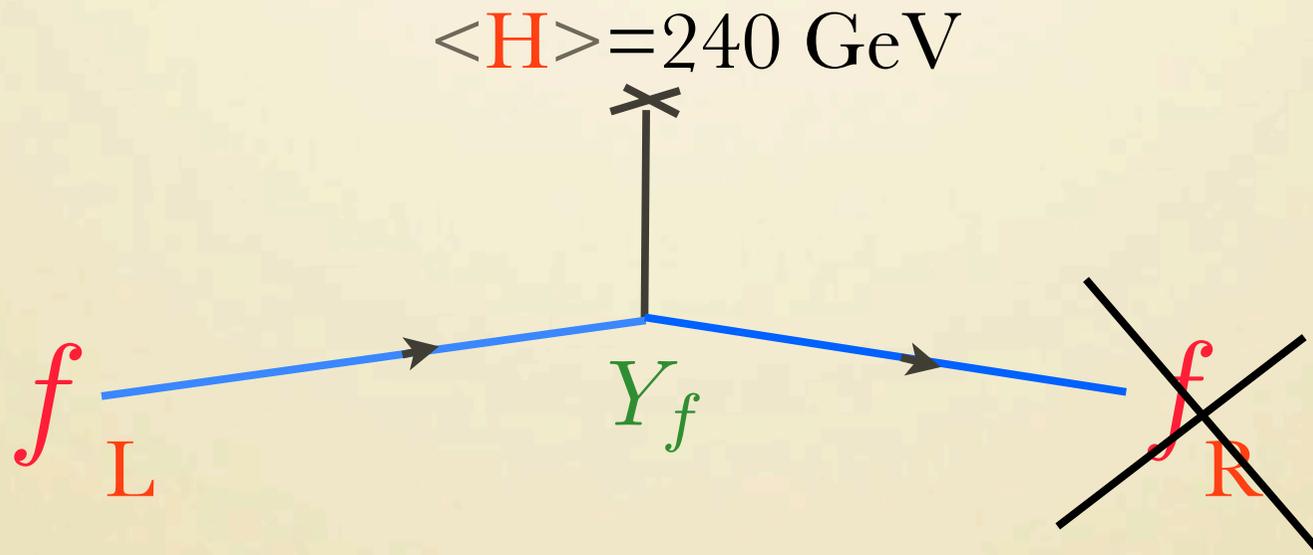
SU(5) también explica por que $\alpha_{em}, \alpha_{debil}, \alpha_{fuerte}$ parecen unificarse..

Masas para los neutrinos....

Recordemos:

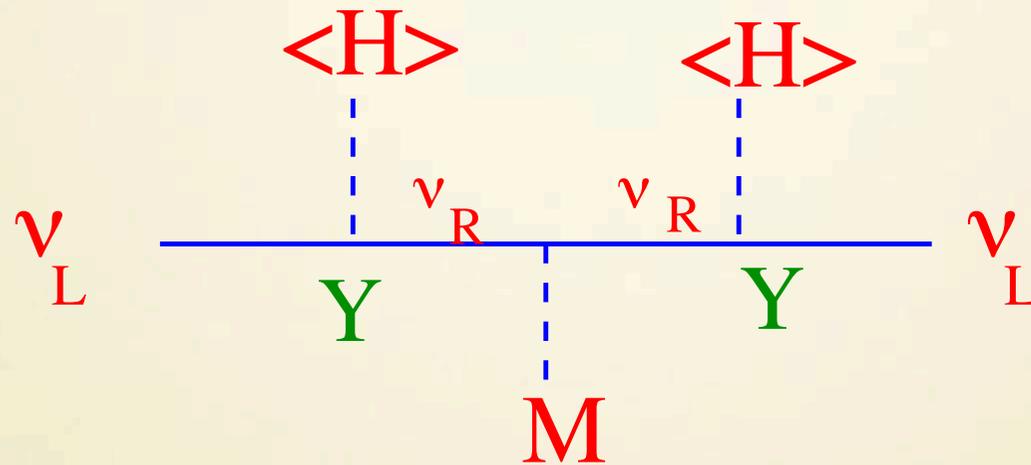


En el MS solo tienen componente 'left'



!No tienen masa en el Modelo Standard;

Las T.G.U. predicen la existencia de neutrinos 'Right' y 'Left'



$$M_\nu \simeq \frac{\langle H \rangle^2}{M_X} \simeq \frac{(240)^2}{10^{15}} \text{ GeV} \simeq 0.1 \text{ eV}$$

Correcto orden de magnitud

Explica por qué los neutrinos tienen una masa muy pequeña

El problema de las
escalas de masa....

La escala de la gravitación cuántica

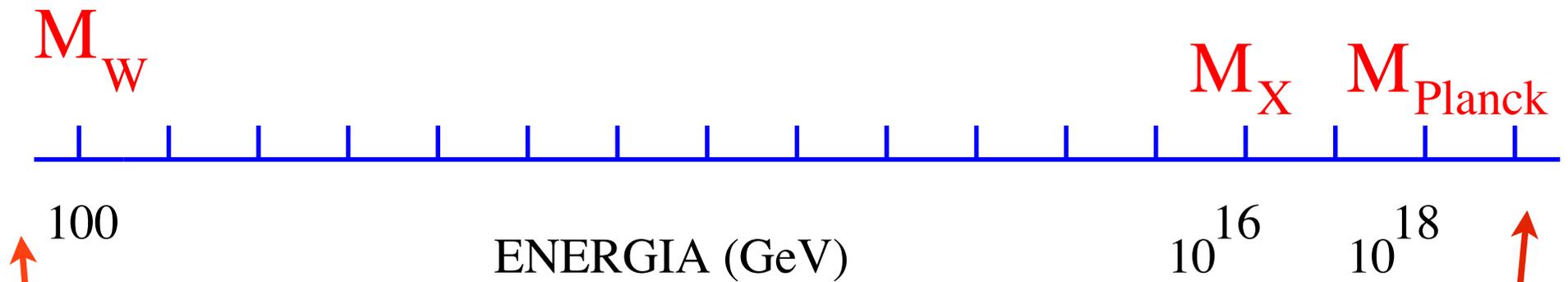


Con G_{Newton} , \hbar y c
se puede formar una cantidad
con dimensiones de masa :

$$M_{Planck} = \sqrt{\frac{\hbar c}{8\pi G_N}} = 4.3 \times 10^{18} \text{ GeV}$$

Escala a la que la gravitación cuántica no puede ignorarse...

Escalas de masa : M_{Higgs} , M_X , M_{Planck}
 10^2 , 10^{16} , 10^{18} GeV



Escala
Electrodébil

Escala
Gran Unificación

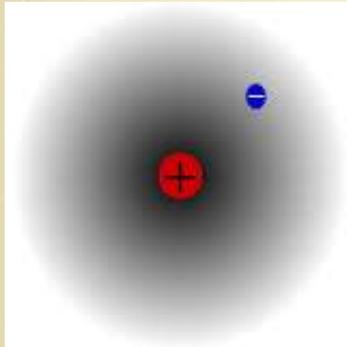
Escala
de Planck

¿Quizá están relacionadas?

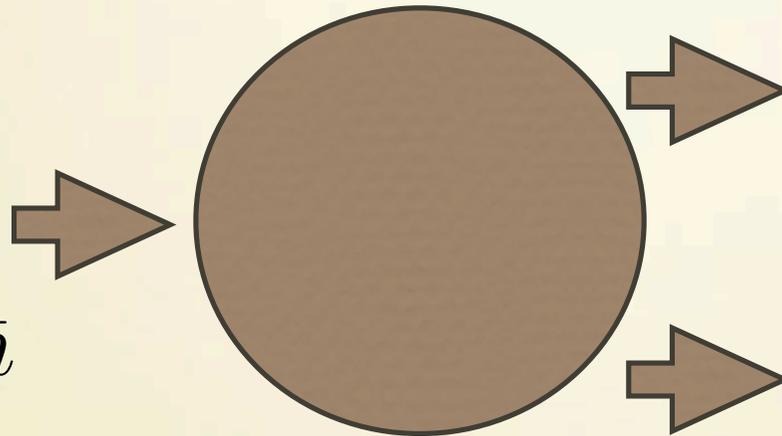
¿Por qué tal enorme separación de escalas de masa?
¿Es posible mantener esa separación dentro de la teoría?

En Física normalmente no hay 'ajustes finos'

Ejemplo: Radio del átomo de Hidrógeno

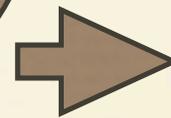


e , m_e , \hbar



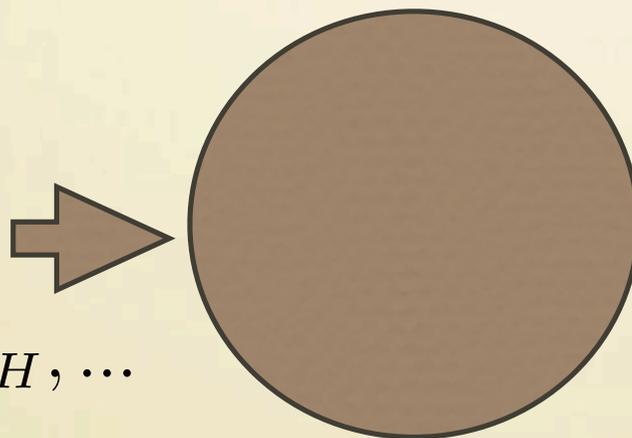
$$Radio \simeq \frac{\hbar^2}{m_e e^2}$$

Estimación magnitud



$$Radio = \frac{3}{2} \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 5 \times 10^{-9} cm$$

Cálculo completo en M.C.

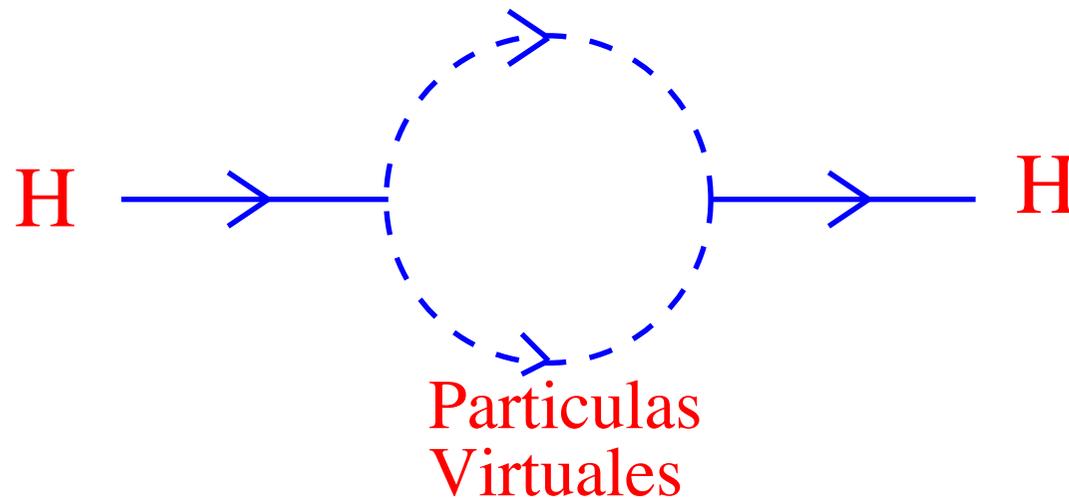


M_X , M_P , M_H , ...

$$M_{Higgs} \simeq M_X \simeq 10^{16} GeV$$

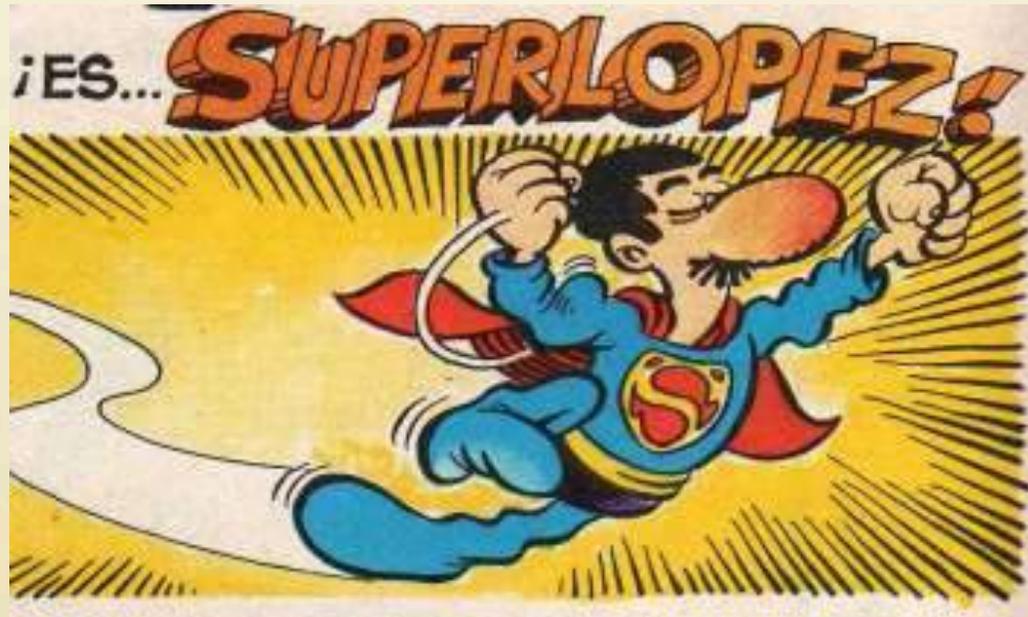
Experimentalmente : 126 GeV !!

- La **escala electrodébil** M_W depende directamente de la **masa** m_H del ' boson de Higgs'.
- En el Modelo Standard un valor no nulo del **campo del bosón de Higgs** $\langle H \rangle \neq 0$ es el origen de todas las masas de las partículas elementales.
- La masa del boson de Higgs m_H es **inestable bajo efectos cuánticos**:



$$m_{Higgs}^2 \sim \alpha M_X^2$$

La Supersimetría

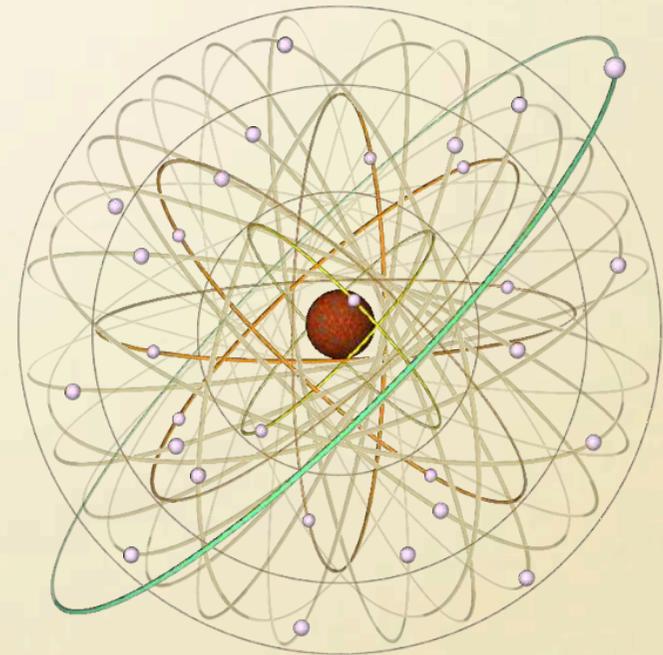
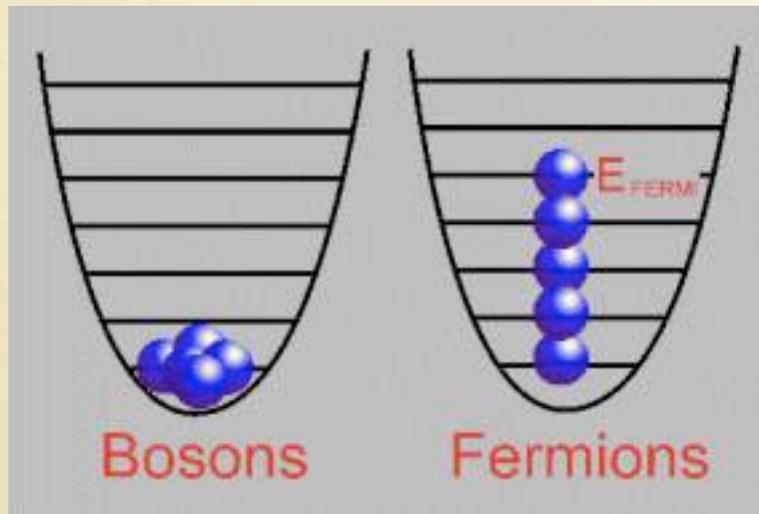


Spin semi-entero: FERMIONES

No puedes colocar mas de 2 iguales en el mismo sitio

Spin entero: BOSONES

Puedes colocar cuantos quieras en el mismo sitio

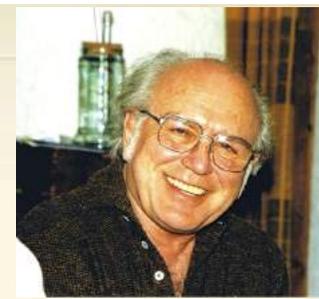


Carácter fermionico da lugar a la variedad y estabilidad⁷⁰ atómicas

Wess



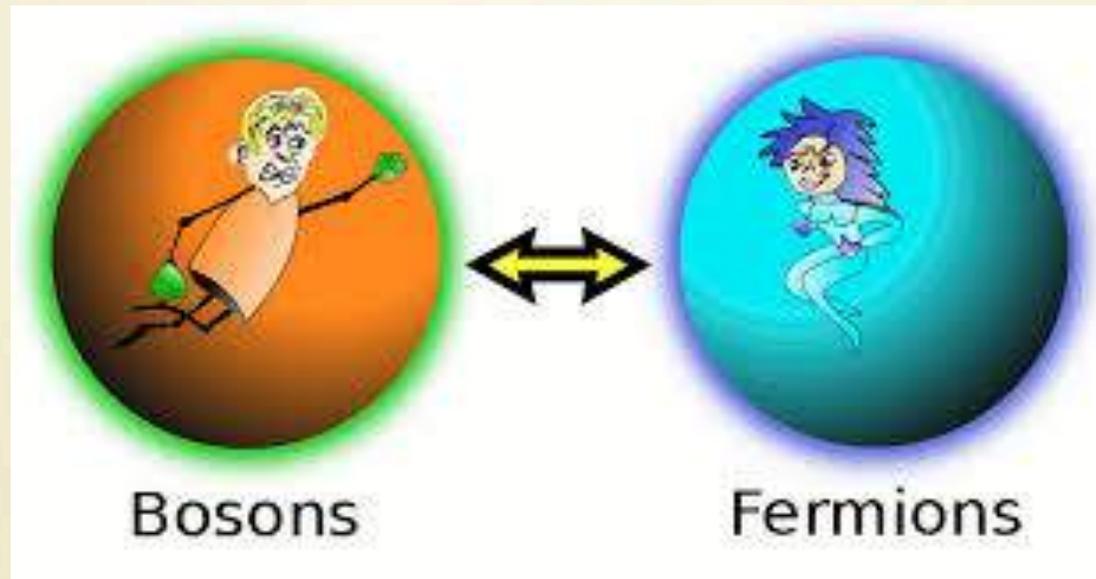
Super
Simetria



Zumino

1974

Simetría bajo el intercambio fermión-bosón



$$\phi_0 \longleftrightarrow \psi_{1/2}$$

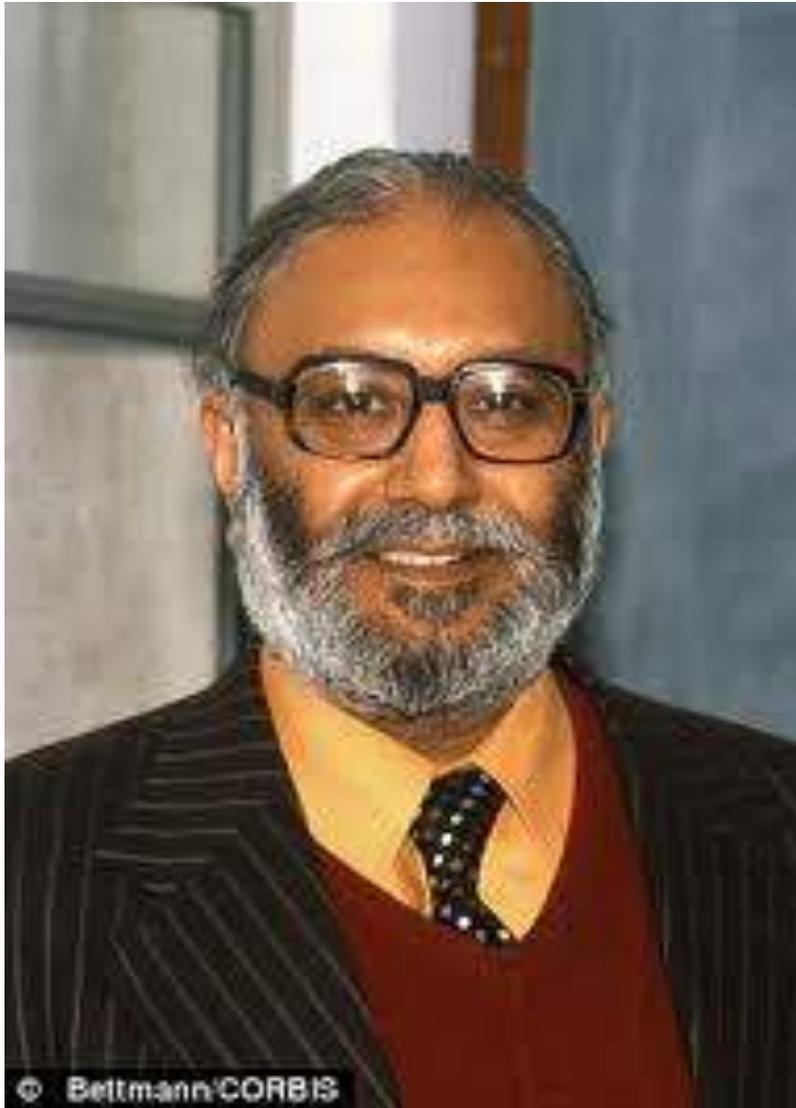
$$A_1^\mu \longleftrightarrow \lambda_{1/2}$$

Para cada partícula conocida debe de existir
una compañera supersimétrica (SUSY)

Compañeros SUSY del Modelo Standard

	<i>quark</i> q	\longleftrightarrow	<i>s - quark</i> \tilde{q}	$s = 0$
Spin 1/2	<i>lepton</i> l	\longleftrightarrow	<i>s - lepton</i> \tilde{q}	$s = 0$
	<i>neutrino</i> ν	\longleftrightarrow	<i>s - neutrino</i> $\tilde{\nu}$	$s = 0$
	<i>fotón</i> γ	\longleftrightarrow	<i>fotino</i> $\tilde{\gamma}$	$s = 1/2$
Spin 1	<i>Bosón</i> W	\longleftrightarrow	<i>wino</i> \tilde{W}	$s = 1/2$
	<i>gluón</i> g	\longleftrightarrow	<i>gluino</i> \tilde{g}	$s = 1/2$
Spin 0	<i>Higgs</i> H	\longleftrightarrow	<i>Higgsino</i> \tilde{H}	$s = 1/2$

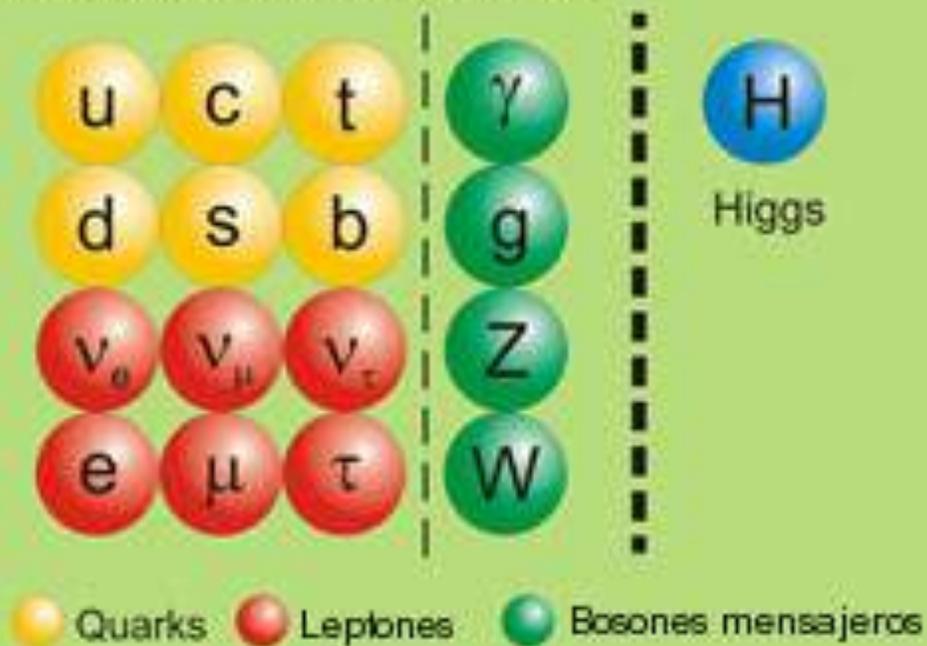
MSSM: Minimal Supersymmetric Standard Model



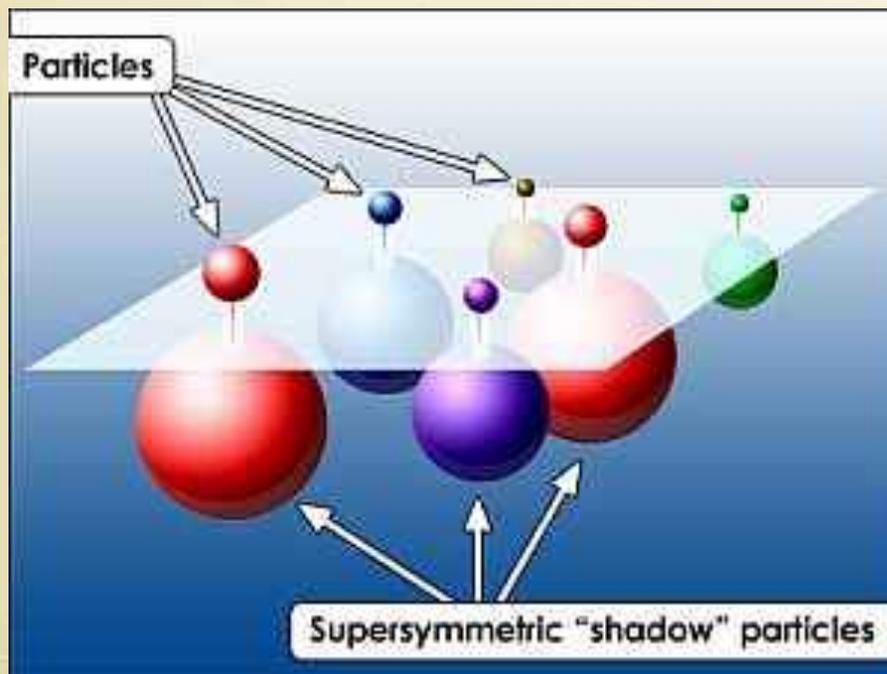
Abdus Salam

“No hay que economizar
en el número de partículas.
En lo que hay que ser económico
es en el número de Principios
Físicos”

Partículas del modelo estándar



Partículas supersimétricas

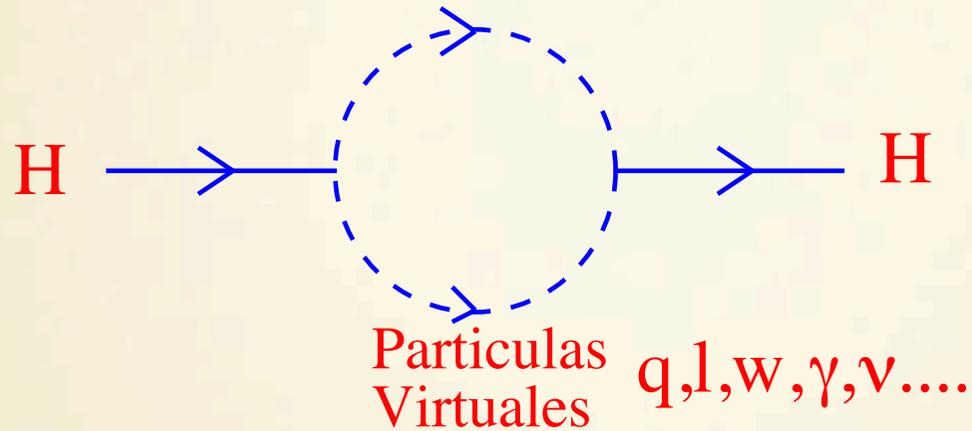


La Supersimetría debe de estar rota, pues no vemos compañeras SUSY en la vida diaria..

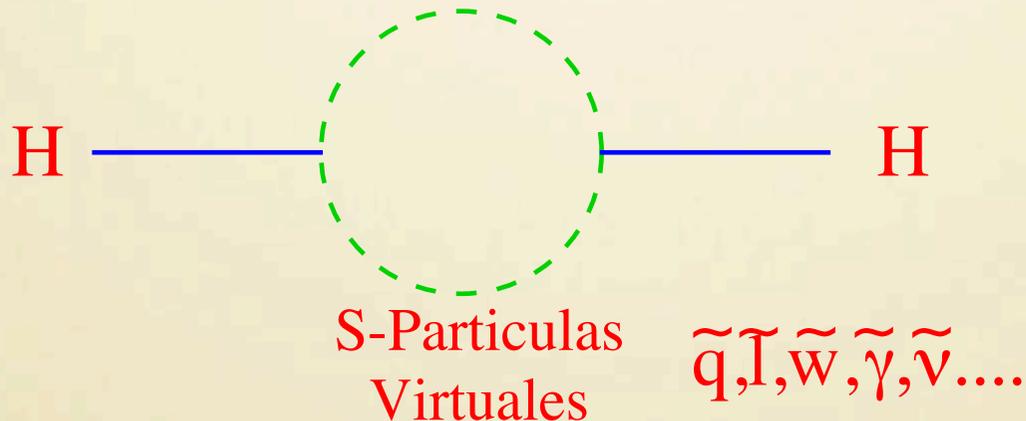
$$M_{SUSY} \gg m_{proton}$$

Algunas Propiedades de la Supersimetría

1) La Supersimetría estabiliza la masa del Higgs:



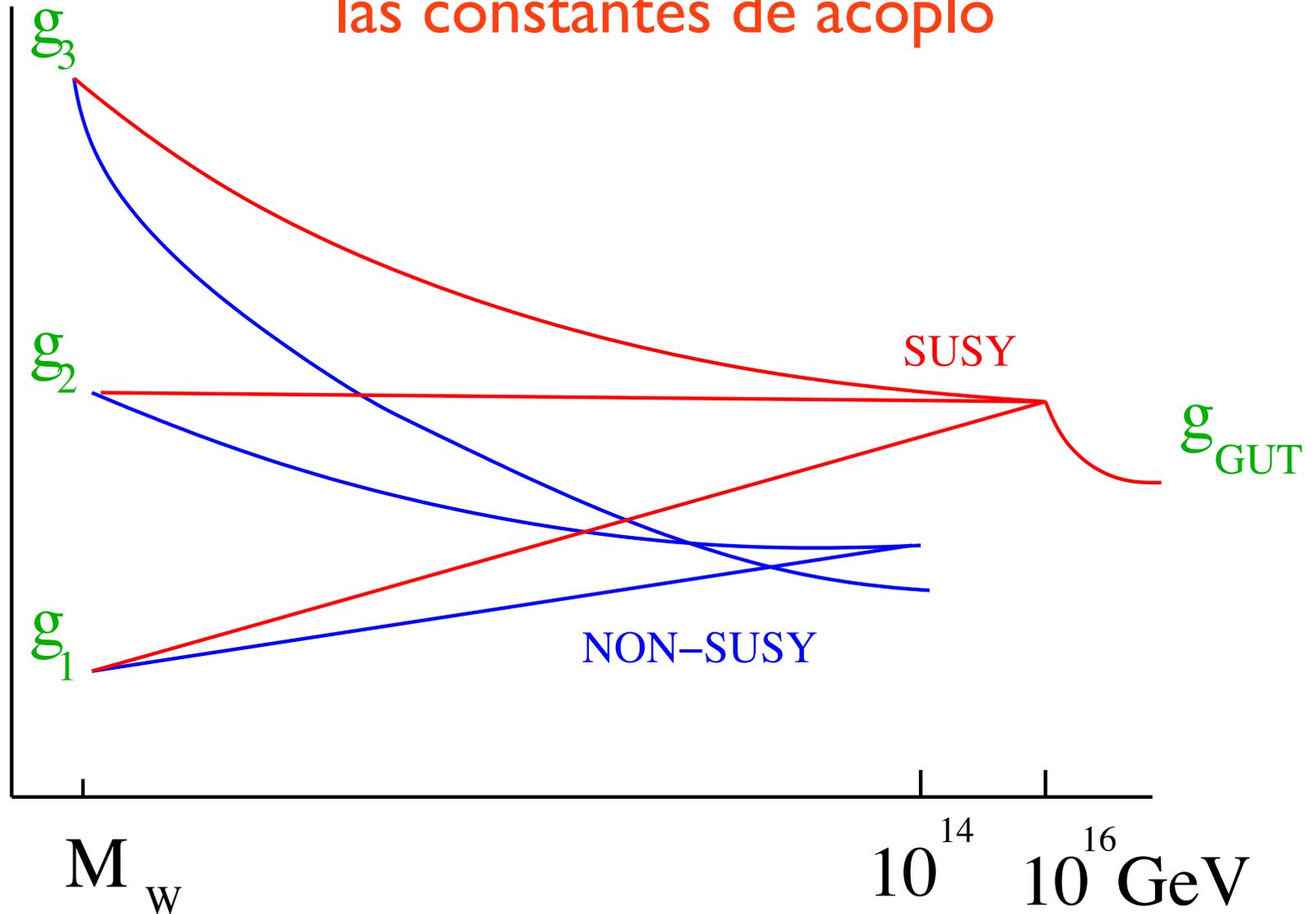
$$+ = 0$$



$$M_{Higgs} \simeq M_{SUSY} \ll M_{Planck}$$

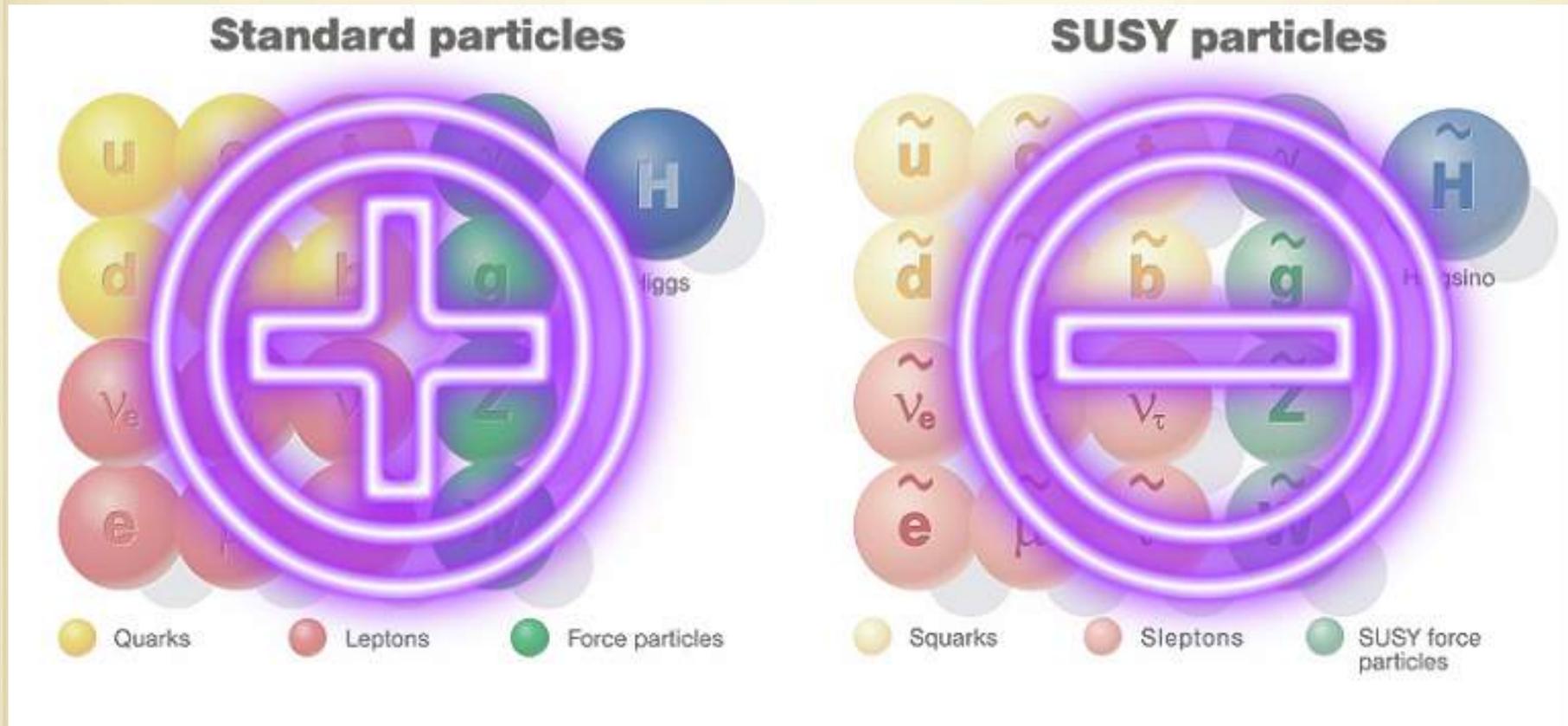
2)

SUSY mejora sustancialmente la unificación de las constantes de acoplo



$$M_X^{\text{SUSY}} = 10^{16} \text{ GeV}$$

Paridad-R: Una simetría discreta



En todo proceso el producto de las R-cargas de todas las partículas permanece invariante

3) Una nueva partícula estable: **protón, electrón** y el : **NEUTRALINO**

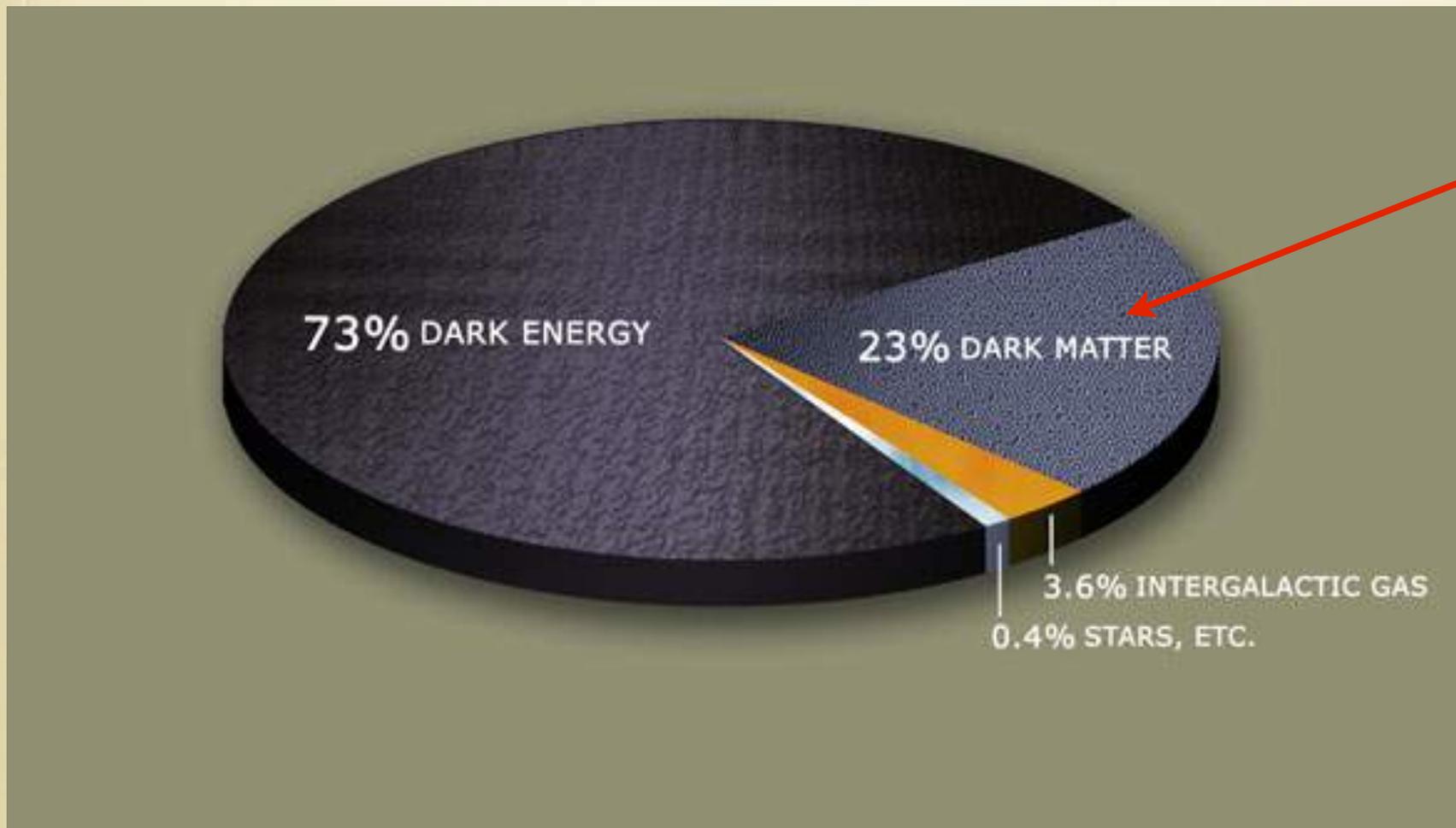
$$\chi^0 = a\tilde{\gamma} + b\tilde{Z}_0 + c\tilde{H}_0$$

Es la partícula SUSY **mas ligera**, mezcla de gauginos y Higgsinos neutros

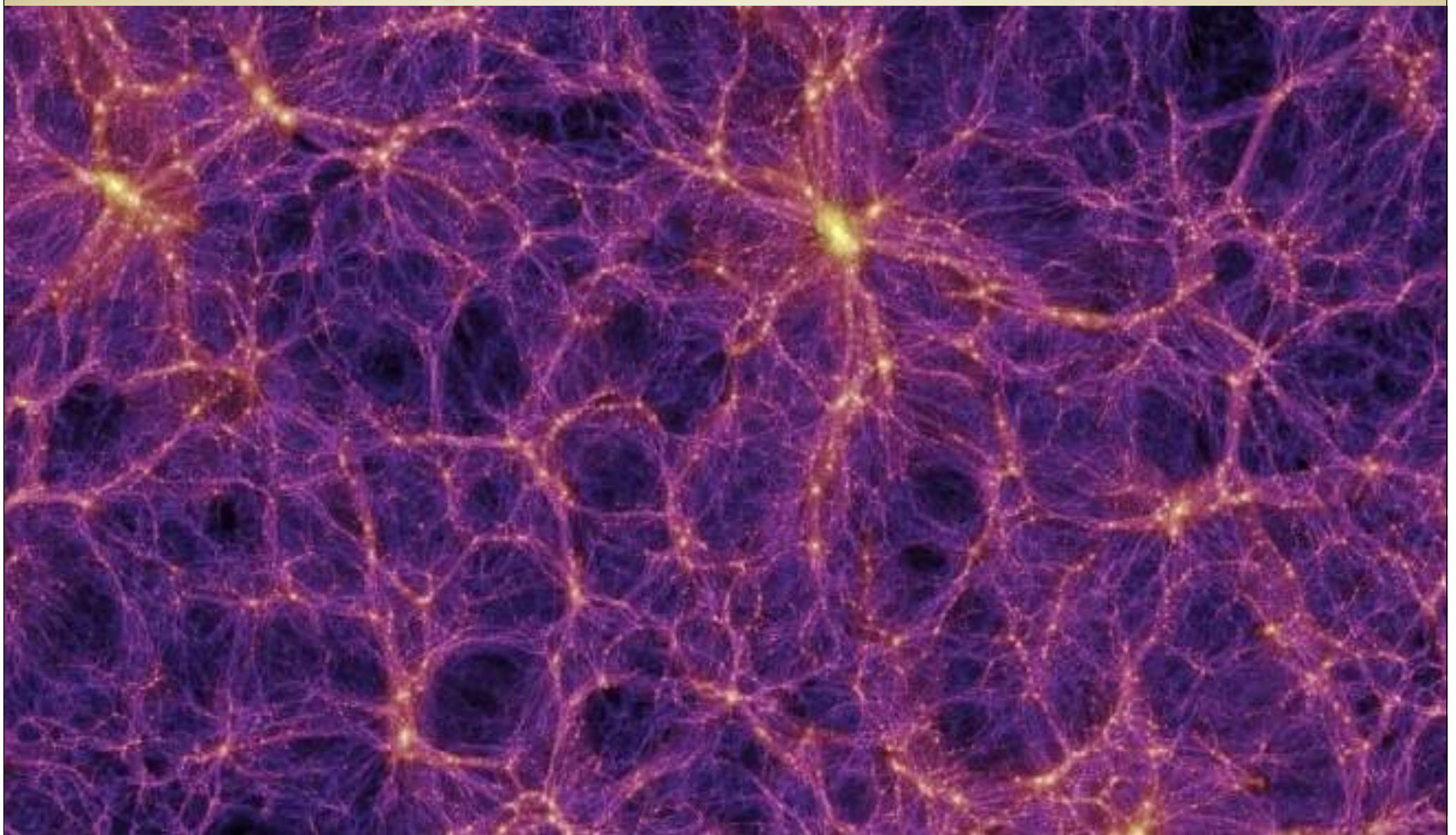
Es estable: no se puede desintegrar a ninguna partícula del MS, pues tiene carga-R (-) y cualquier conjunto de partículas del MS tiene carga-R (+)

$$\begin{array}{ccc} \chi^0 & \not\rightarrow & q, l, \nu \\ \text{R}(-) & & \text{R}(+) \end{array}$$

El Neutralino es un candidato natural como
constituyente de la materia oscura del universo:



Neutro, masa adecuada e interacciones débiles....

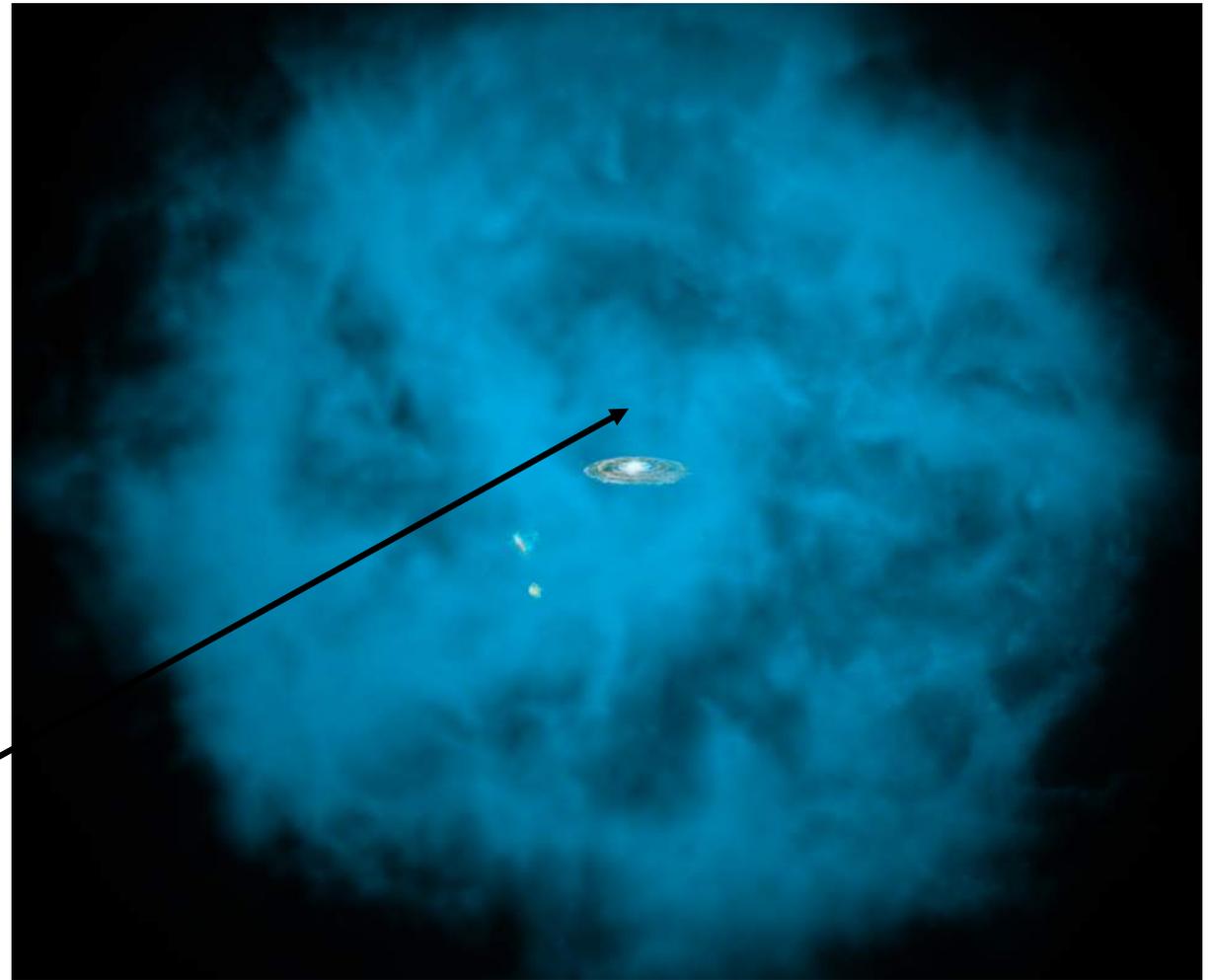
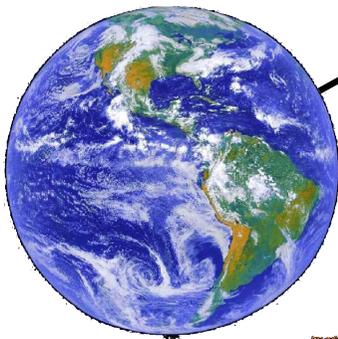


Supersimetría y la materia oscura.....

Las galaxias están rodeadas de un "halo" aproximadamente esférico de materia oscura

La materia oscura es responsable del **90%** de la masa de la galaxia.

Hay mucha más materia oscura que materia ordinaria (luminosa)



... Y nosotros estamos en medio de ella!

BÚSQUEDAS DIRECTAS

Partículas de materia oscura “cruzan” a través de la Tierra (y a través nuestro) constantemente.

Usando medidas de la velocidad de rotación podemos calcular la densidad de materia oscura en la Via Láctea

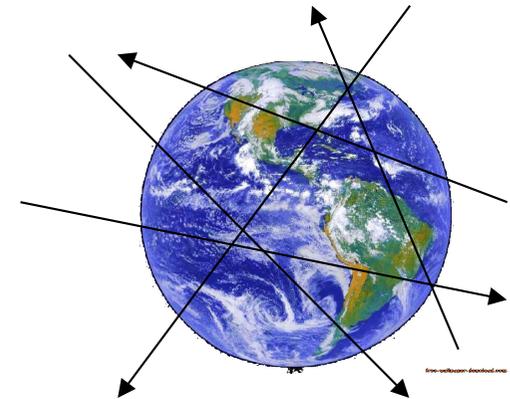
$$\rho_{\text{Dark Matter}} = 5 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$$

Las partículas de materia oscura tienen una velocidad media de

$$v = 300 \text{ km s}^{-1}$$

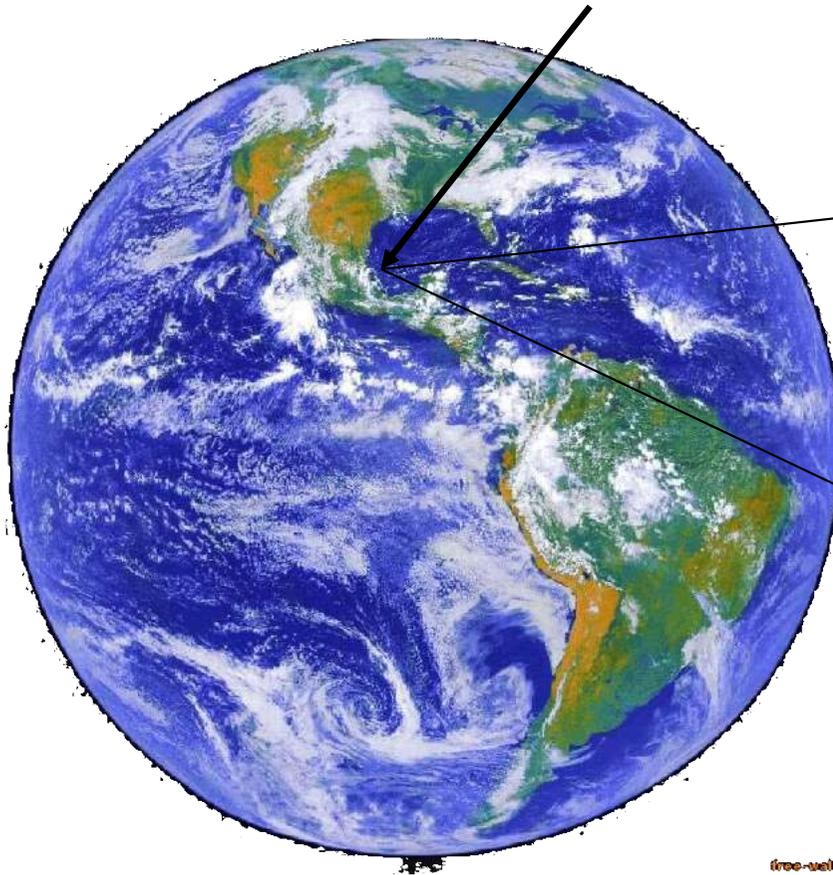
¡Aproximadamente unas **10 000 000 000** partículas de materia oscura nos han atravesado (a cada uno) durante esta charla!

Pero no las notamos....

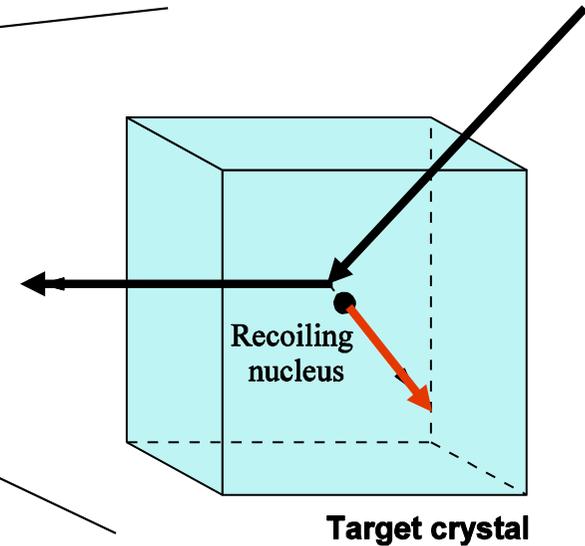


BÚSQUEDAS DIRECTAS

Podemos emplear **detectores muy sensibles** para buscar estas partículas

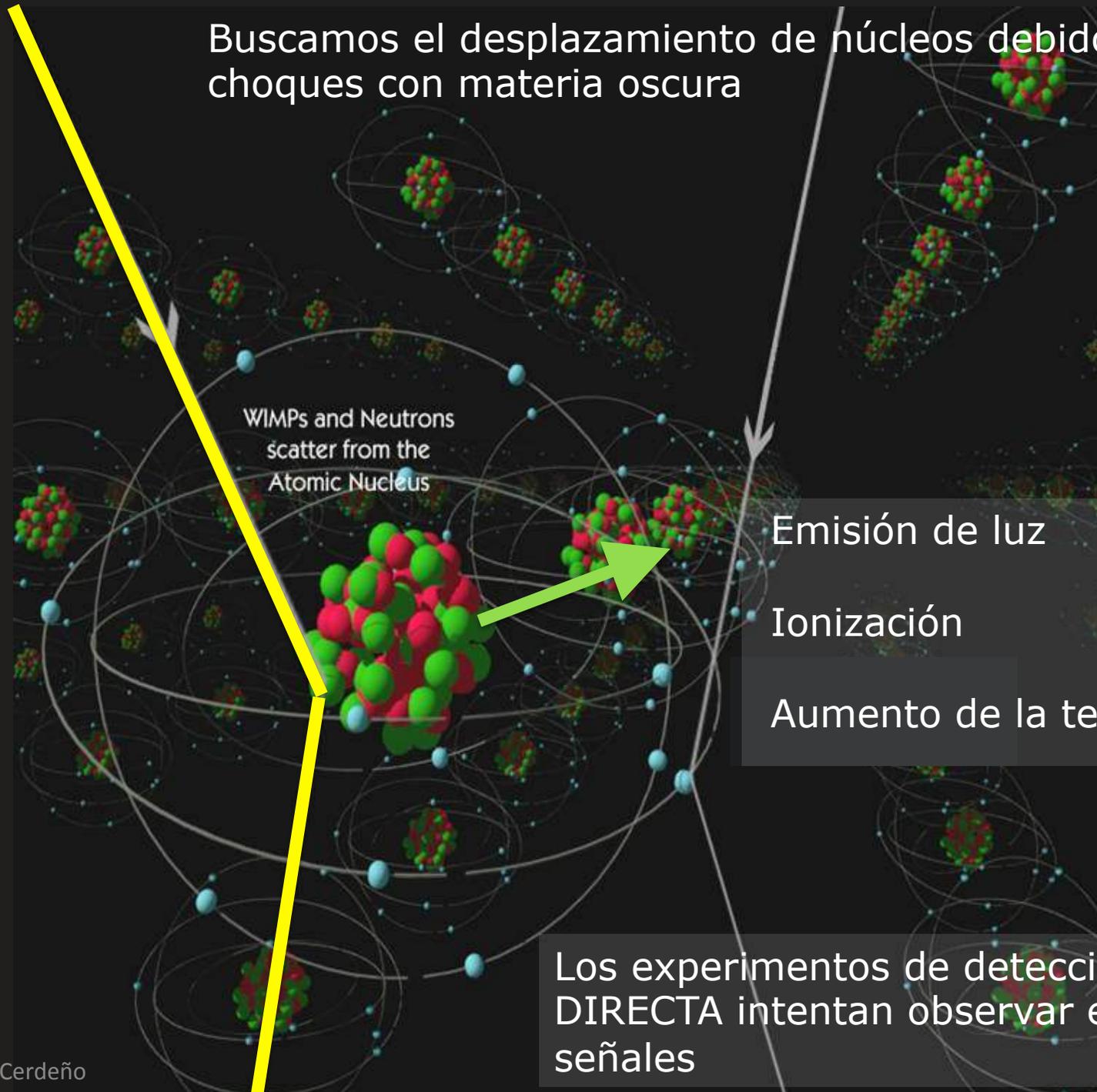


La partícula de materia oscura entra en el detector...



Choca con un núcleo y lo **desplaza**

Buscamos el desplazamiento de núcleos debido a choques con materia oscura



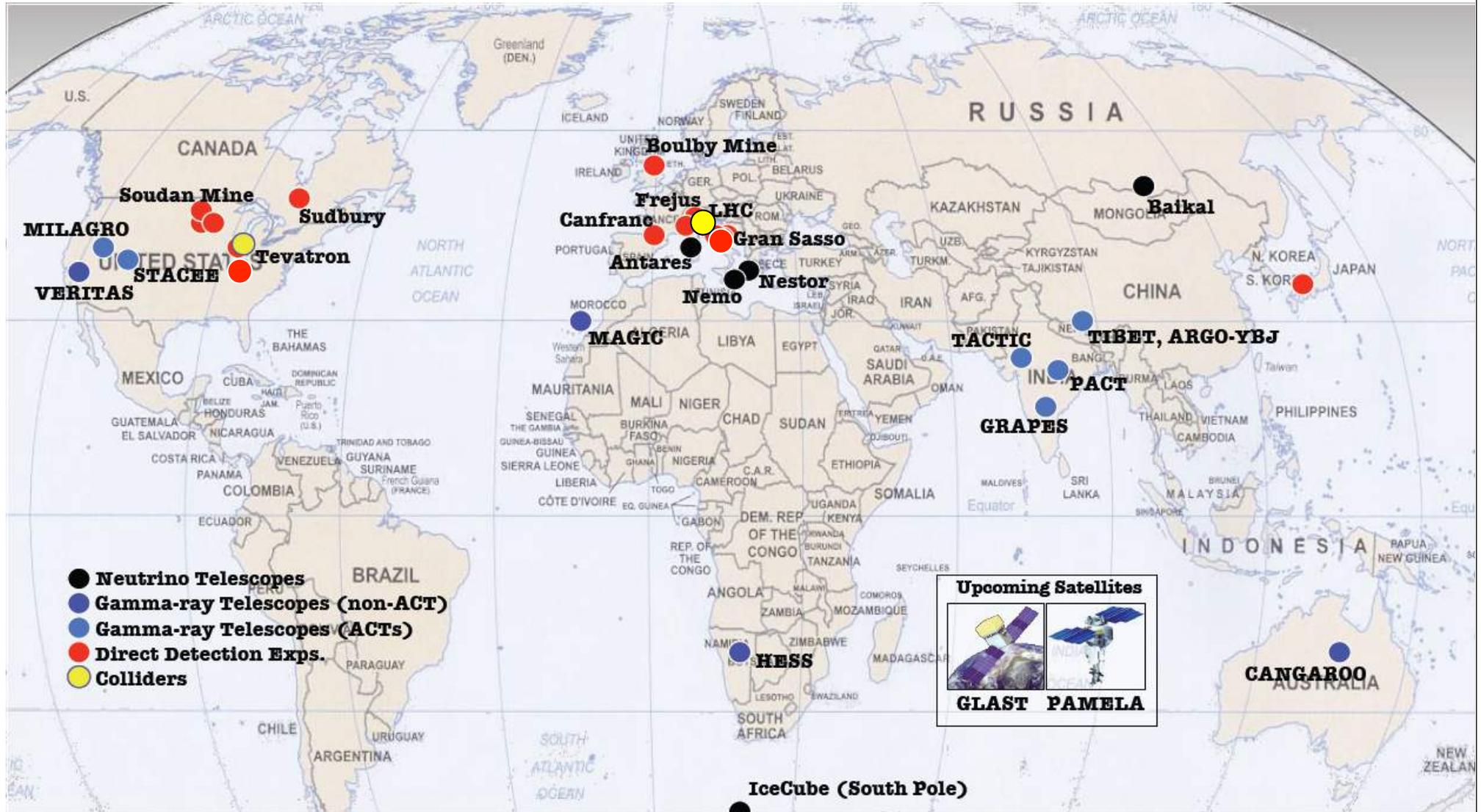
Emisión de luz

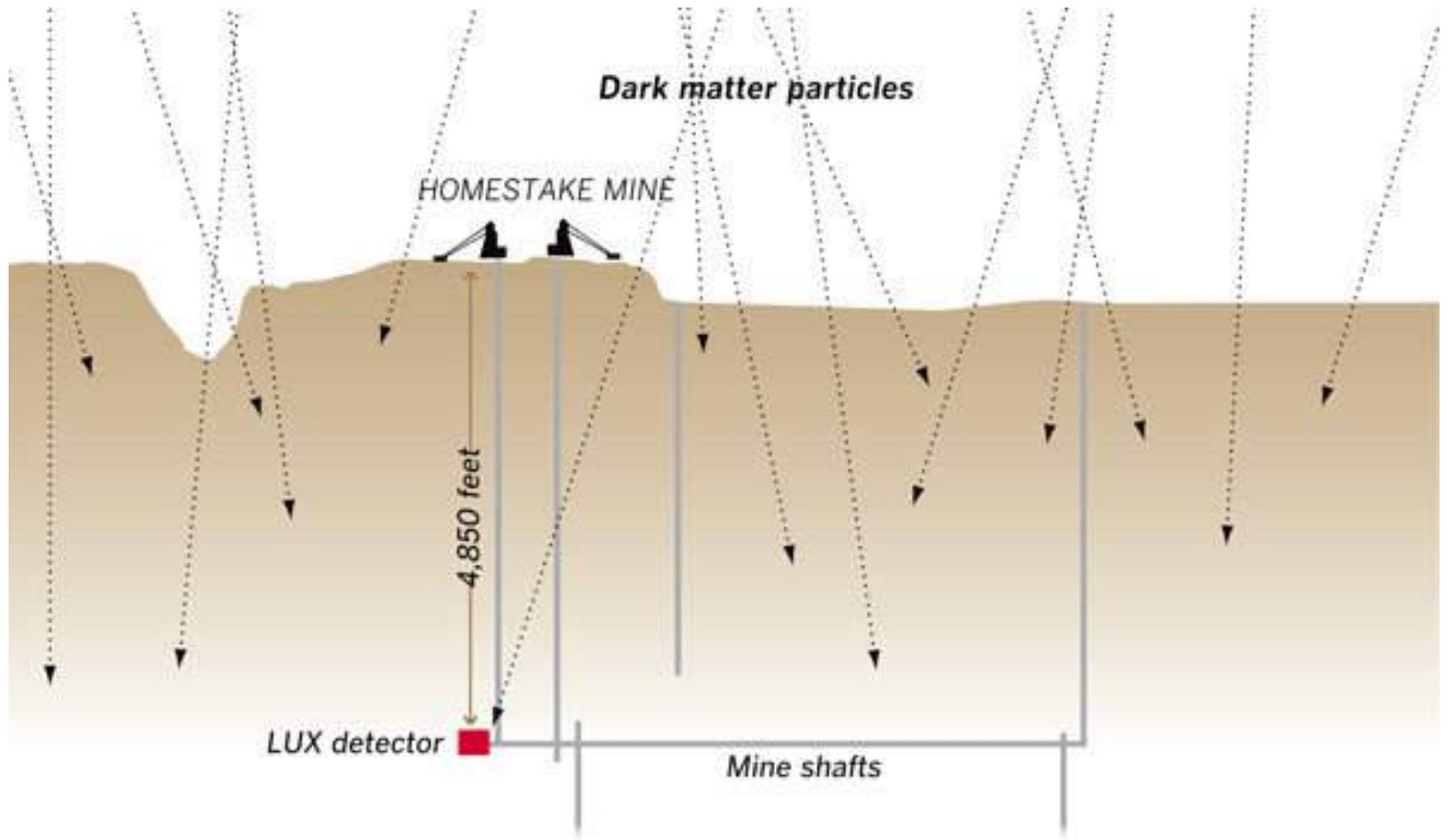
Ionización

Aumento de la temperatura

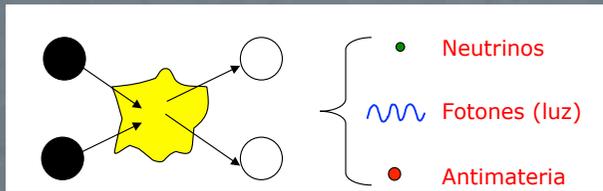
Los experimentos de detección DIRECTA intentan observar estas señales

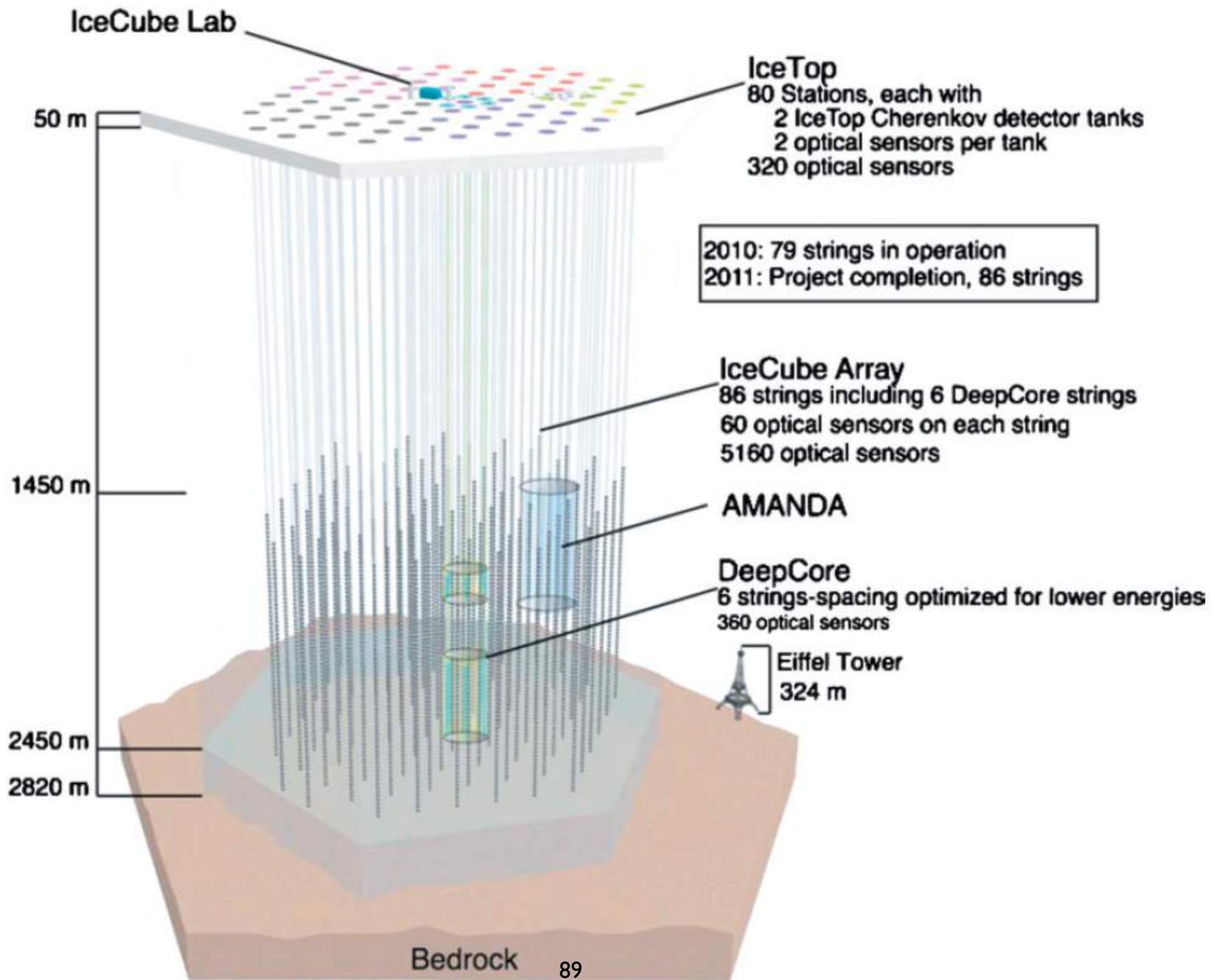
Experimentos de materia oscura alrededor del mundo

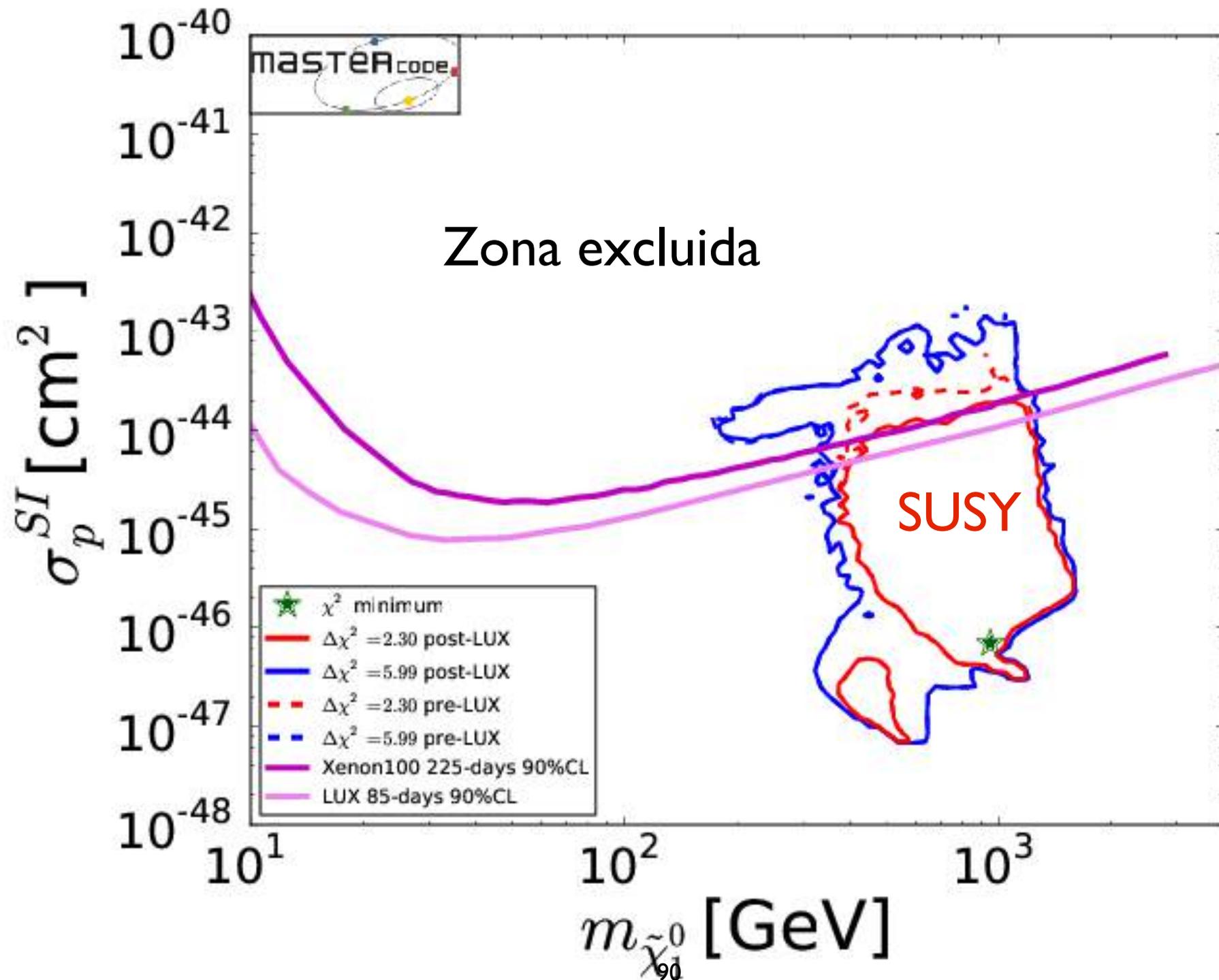




Otro ejemplo es ICECUBE, en la Antártida (a varios kilómetros bajo el hielo del polo sur)

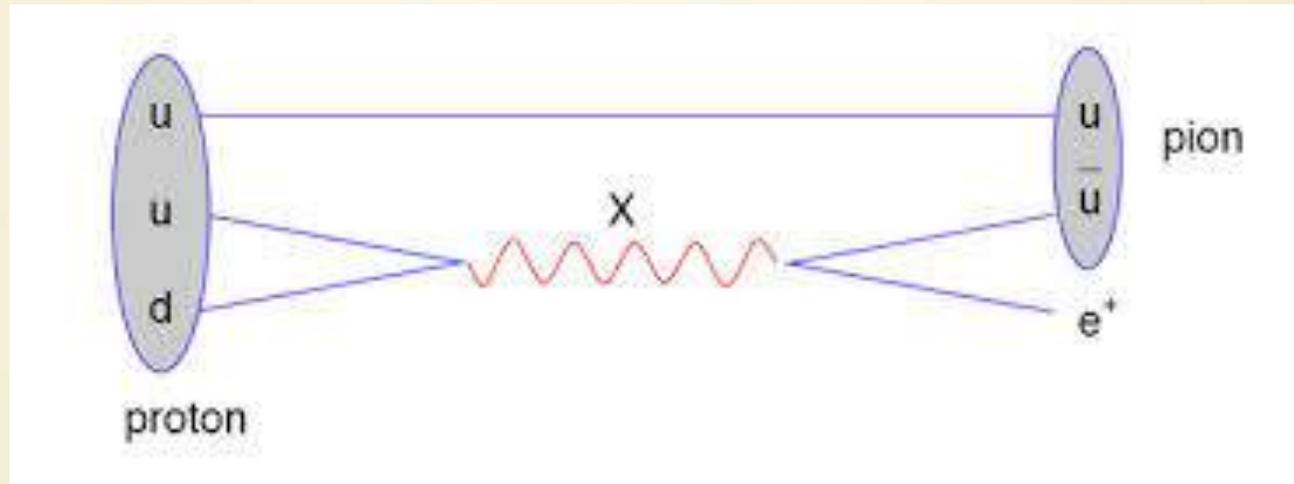






4) Explica porqué el protón es mas estable de lo pensado

SU(5)



$$\tau_P \propto \frac{M_X^4}{m_P^5} \quad \begin{aligned} M_X^{no-SUSY} &= 10^{15} \text{ GeV} \\ M_X^{SUSY} &= 10^{16} \text{ GeV} \end{aligned}$$

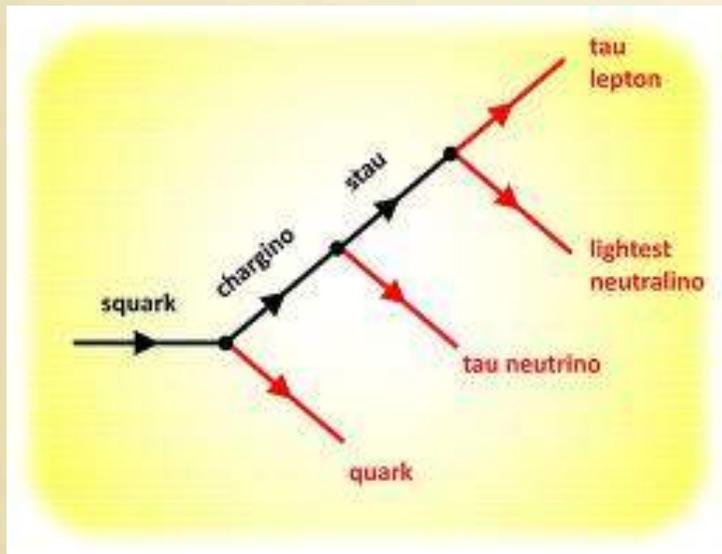
$$\longrightarrow \tau(P \rightarrow e^+ \pi^0) > 10^{34} \text{ años}$$

Búsqueda experimental de partículas SUSY

Uno esperaría: $m_{\tilde{q}}, m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{l}} \dots \simeq 0.1 - 1 \text{ TeV}$

Nos permitiría entender por qué

$$m_{Higgs}, m_{Z^0}, m_{W^\pm} \simeq 0.1 \text{ TeV}$$



Las partículas SUSY son inestables:

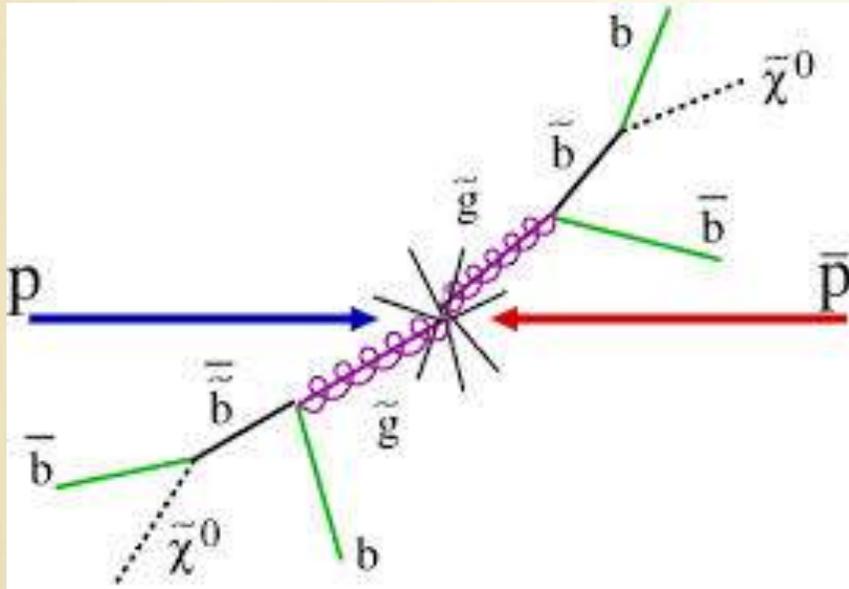
$$\tilde{q} \rightarrow (q, l, \dots) + \chi^0$$

R(-)

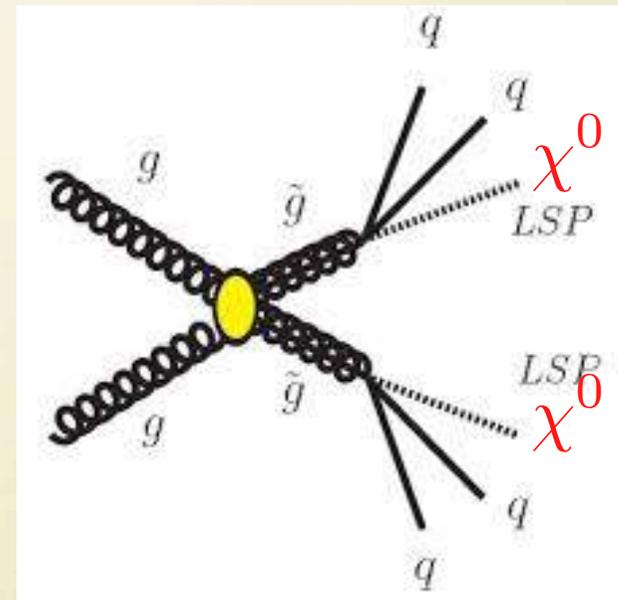
R(+)

R(-)

Las partículas SUSY se producen solo a pares:



$$p + p \longrightarrow \tilde{g}\tilde{g} + X$$



Al final siempre hay
un par de
neutralinos



Invisibles para los detectores

93

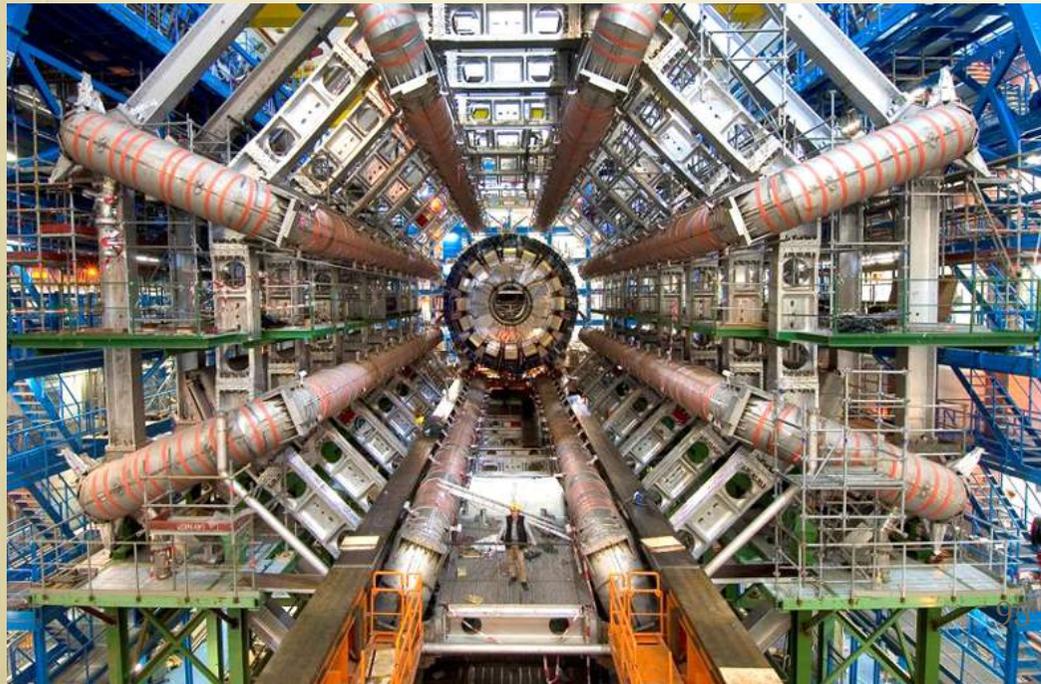
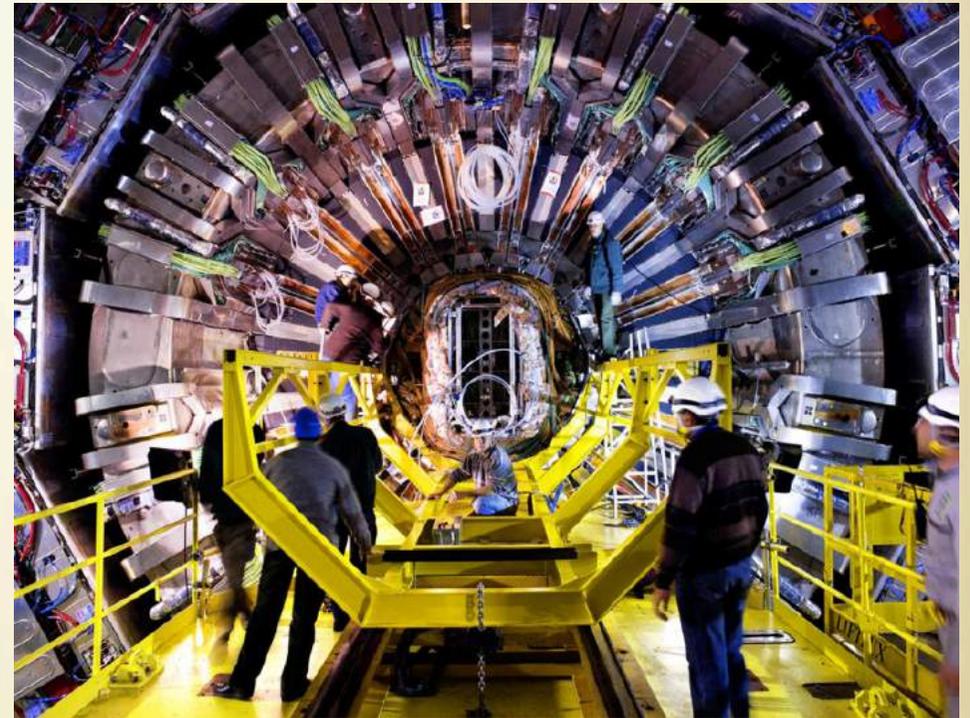
(Aparente) violación
conservación energía





8 TeV

CMS



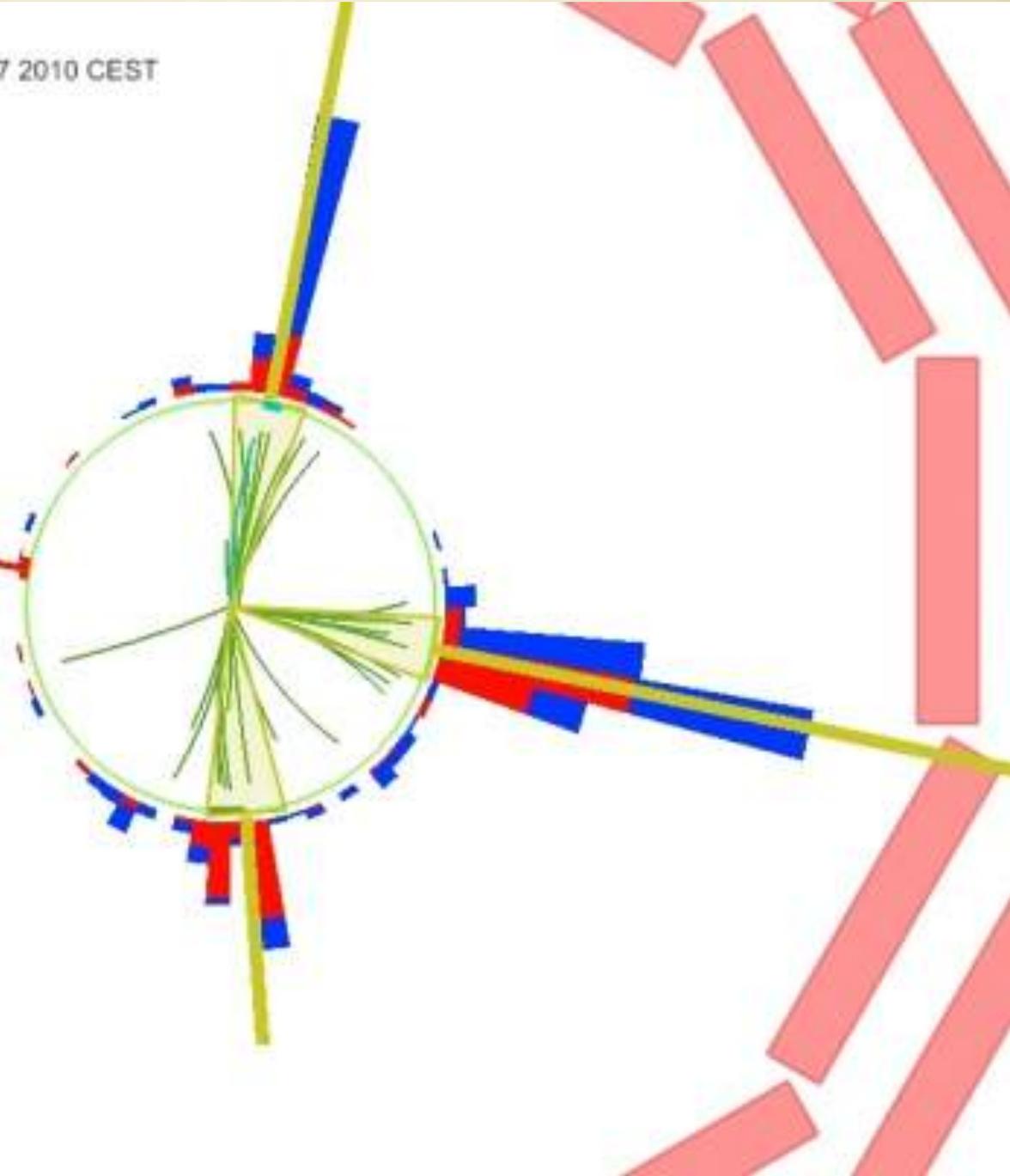
Atlas

13 TeV en
2015

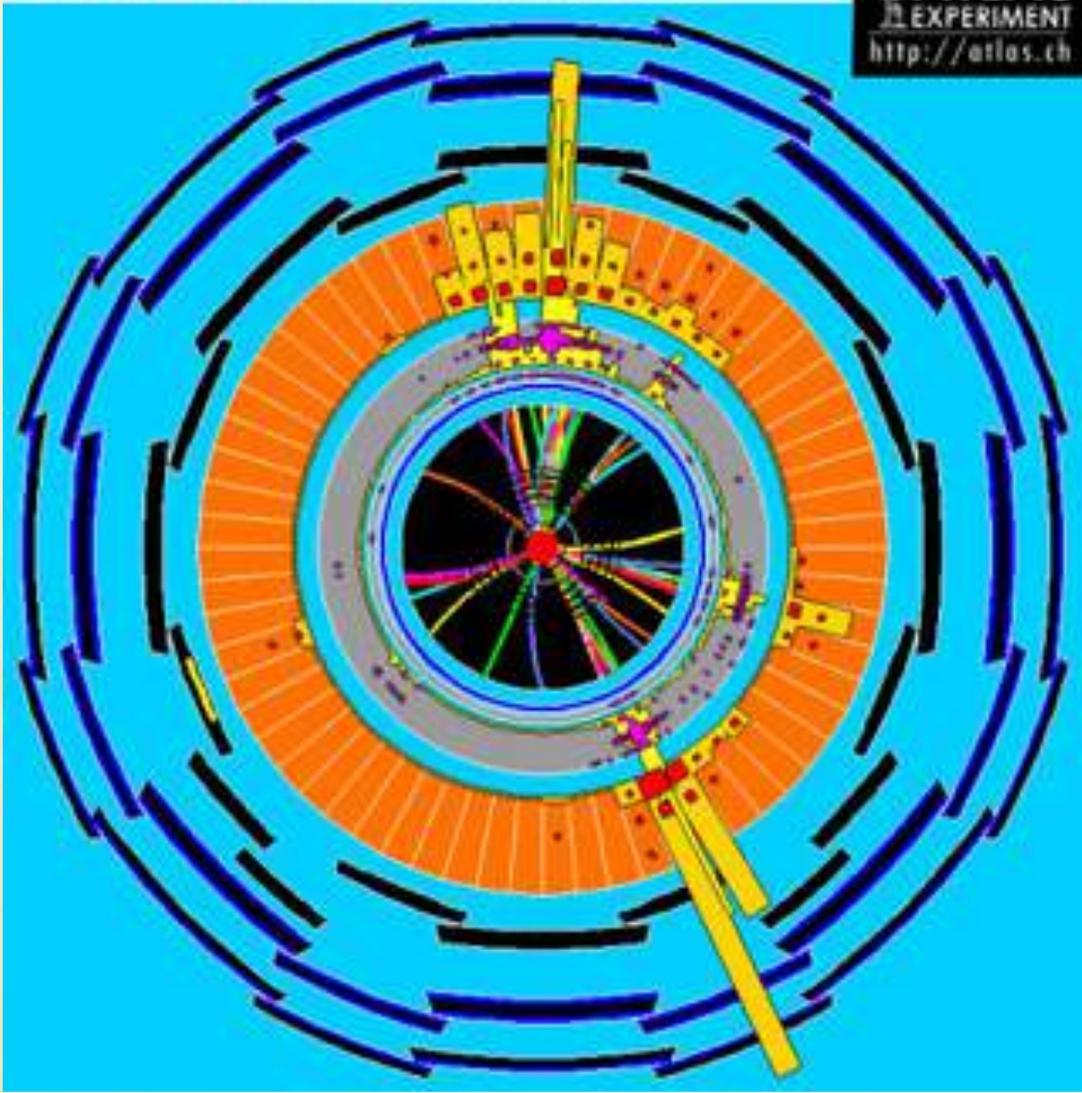


CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Oct 26 19:50:37 2010 CEST
Run/Event: 149058 / 76943429
Lumi section: 64

Falta energía
en esta dirección

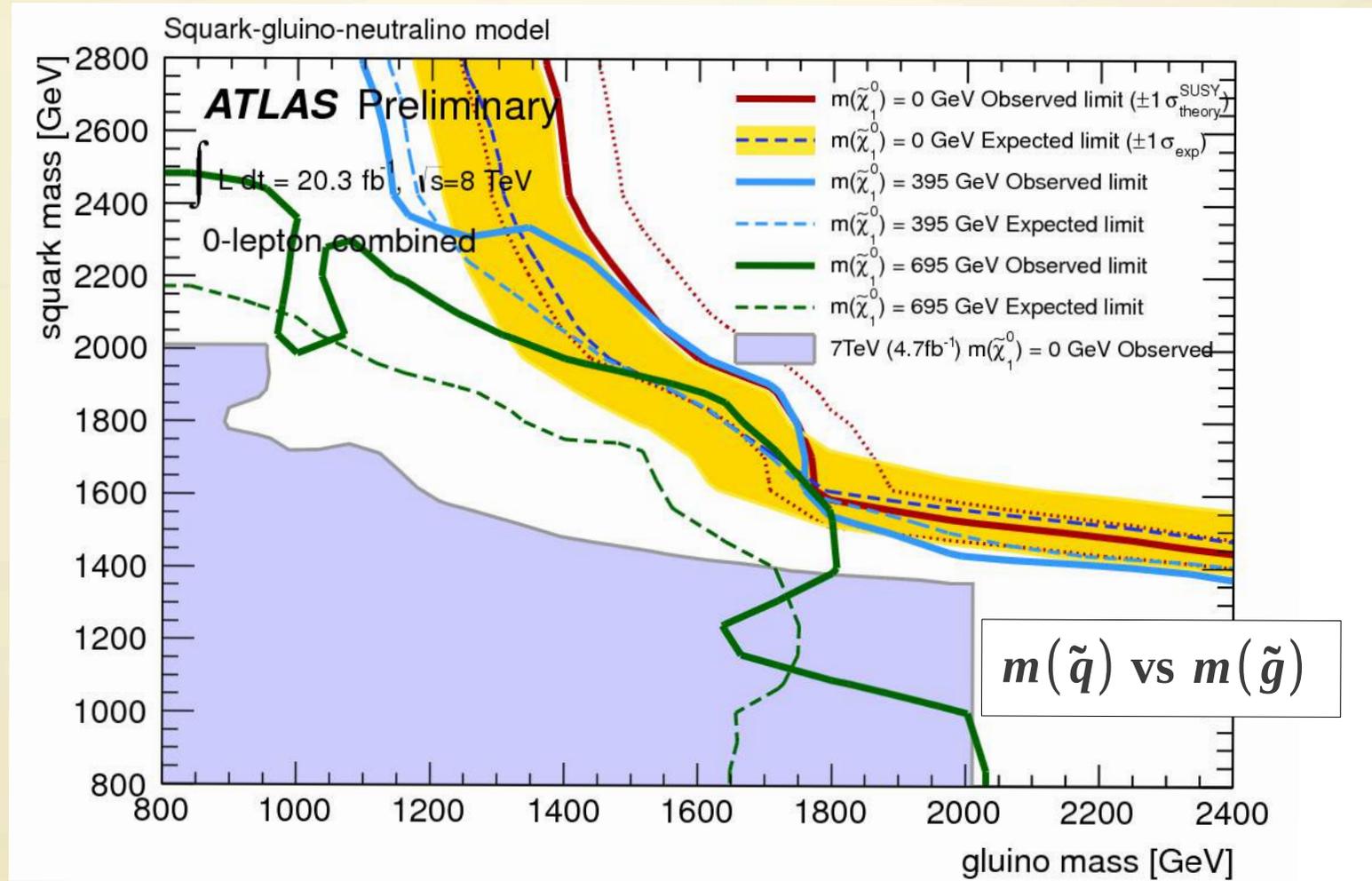


se detectarían indirectamente



No hay traza de Supersimetría en el LHC hasta el momento...

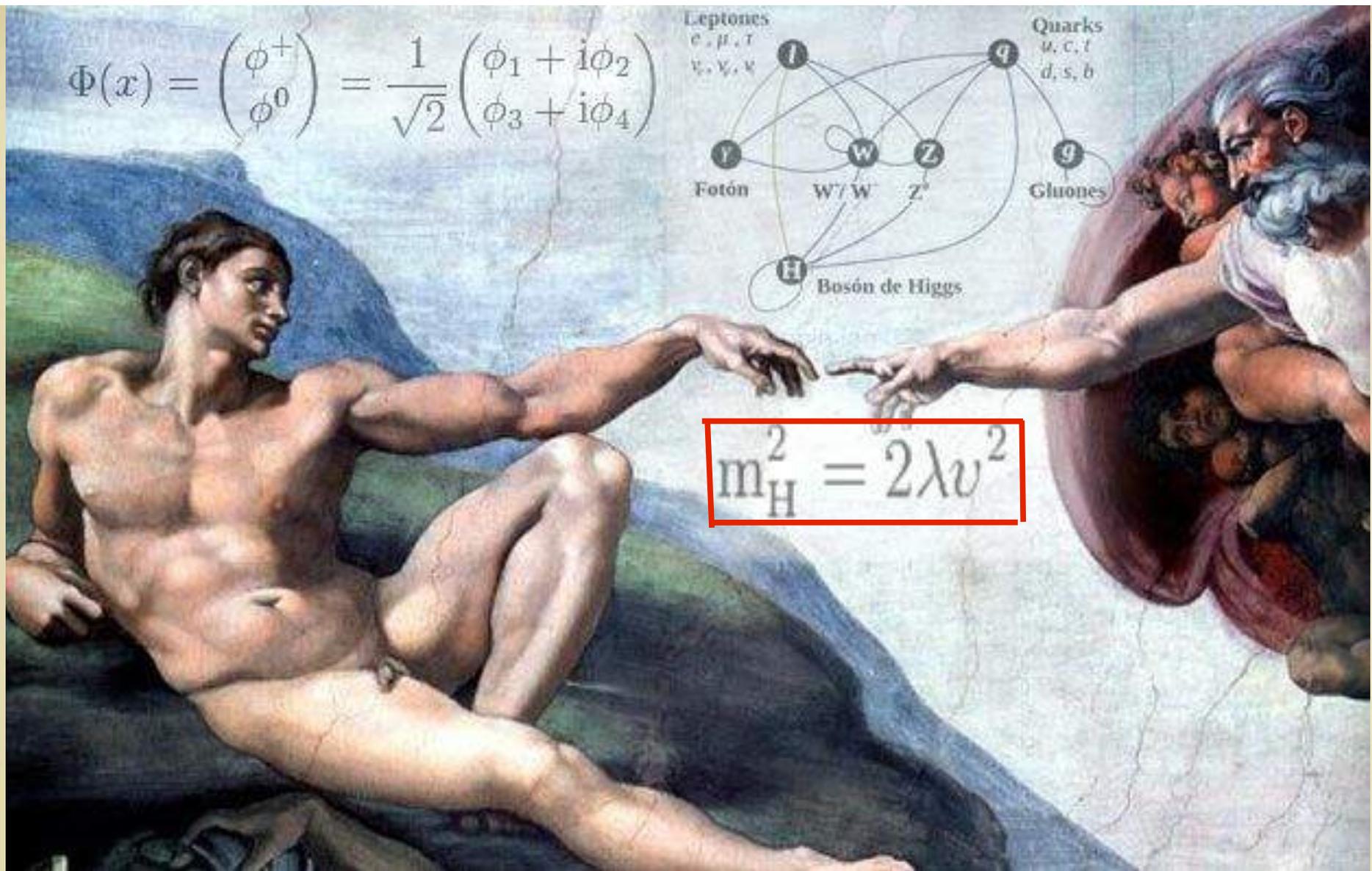
2013:



Masas de Squarks y gluinos $> 1700 \text{ GeV}$!



Hay que esperar al proximo ``run'' del LHC (2015)
con energía de 13 TeV

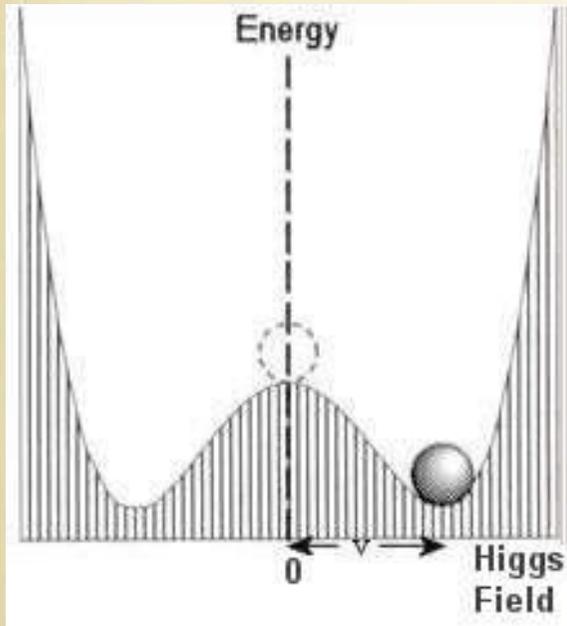


$$v = H_{min} = 240 \text{ GeV}$$

$$\lambda \simeq 0.01 - 2$$

Recordemos:

$$V(H) = -m^2|H|^2 + \lambda|H|^4$$



$$H_{min}^2 = \frac{m^2}{2\lambda} = (240 \text{ GeV})^2$$

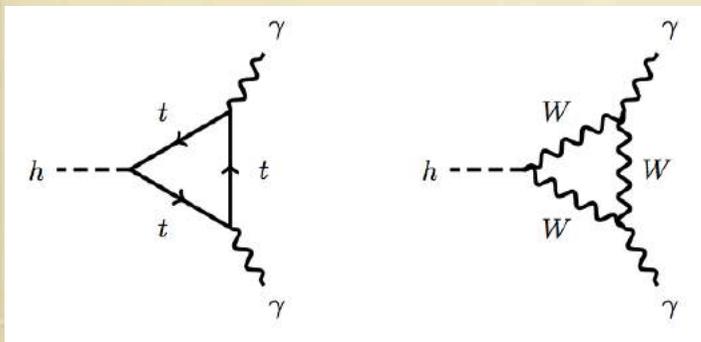
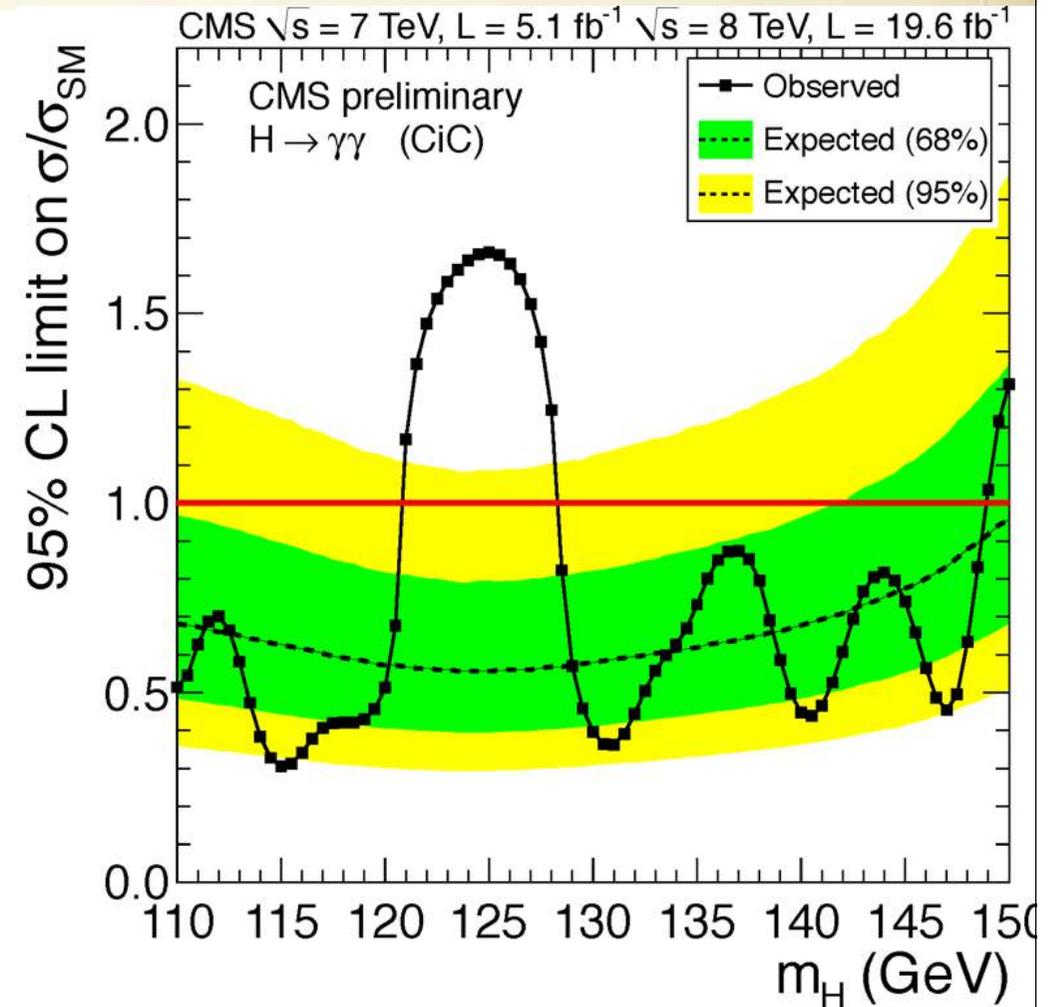
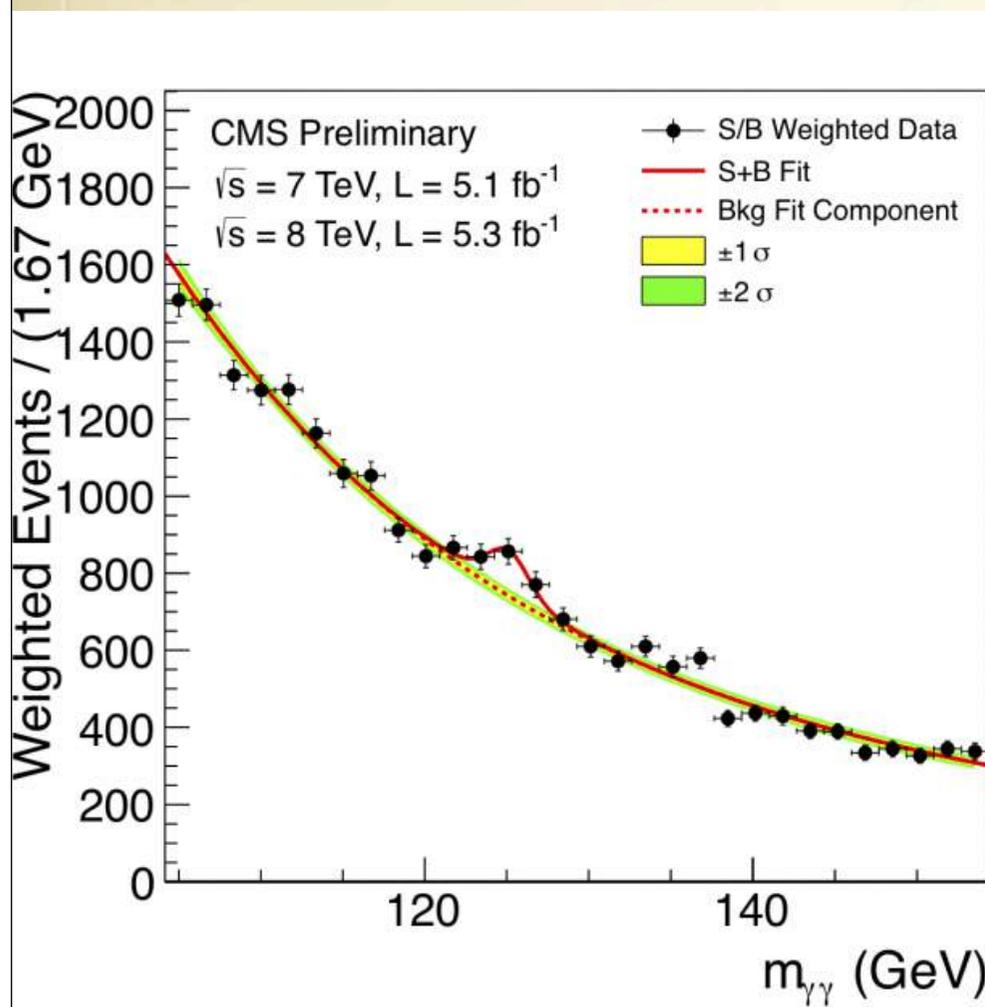
$$M_{Higgs}^2 = 2\lambda H_{min}^2$$

Antes de 2012:

$$m_{Higgs} \simeq 20 - 1000 \text{ GeV}$$

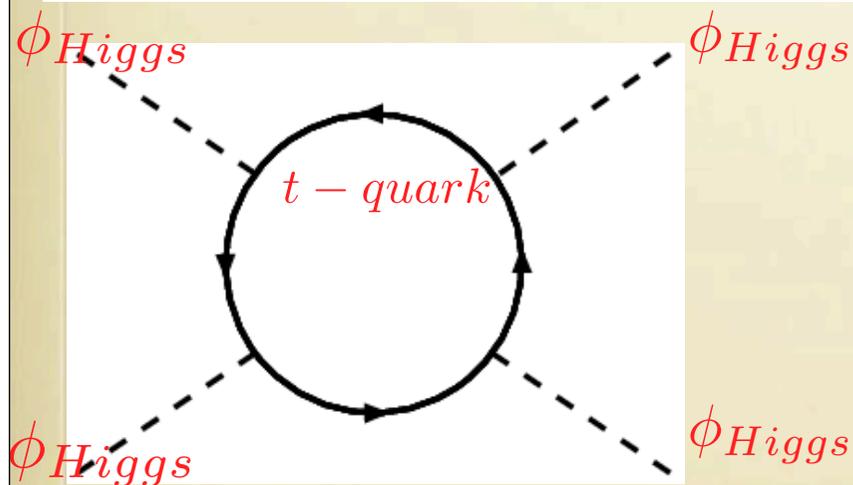
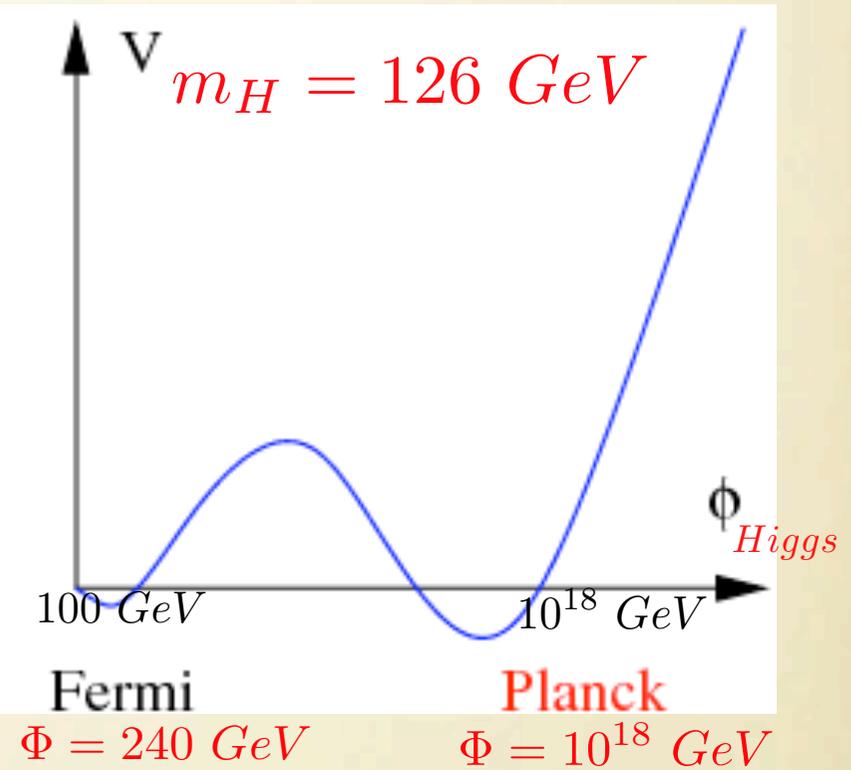
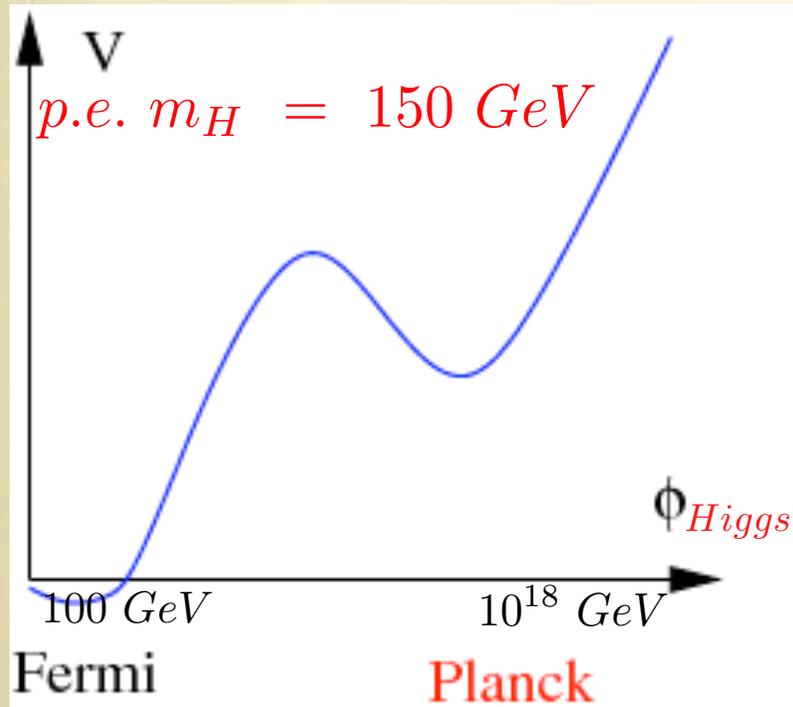
para $\lambda \simeq 0.01 - 2$

CERN, 4 de Julio de 2012



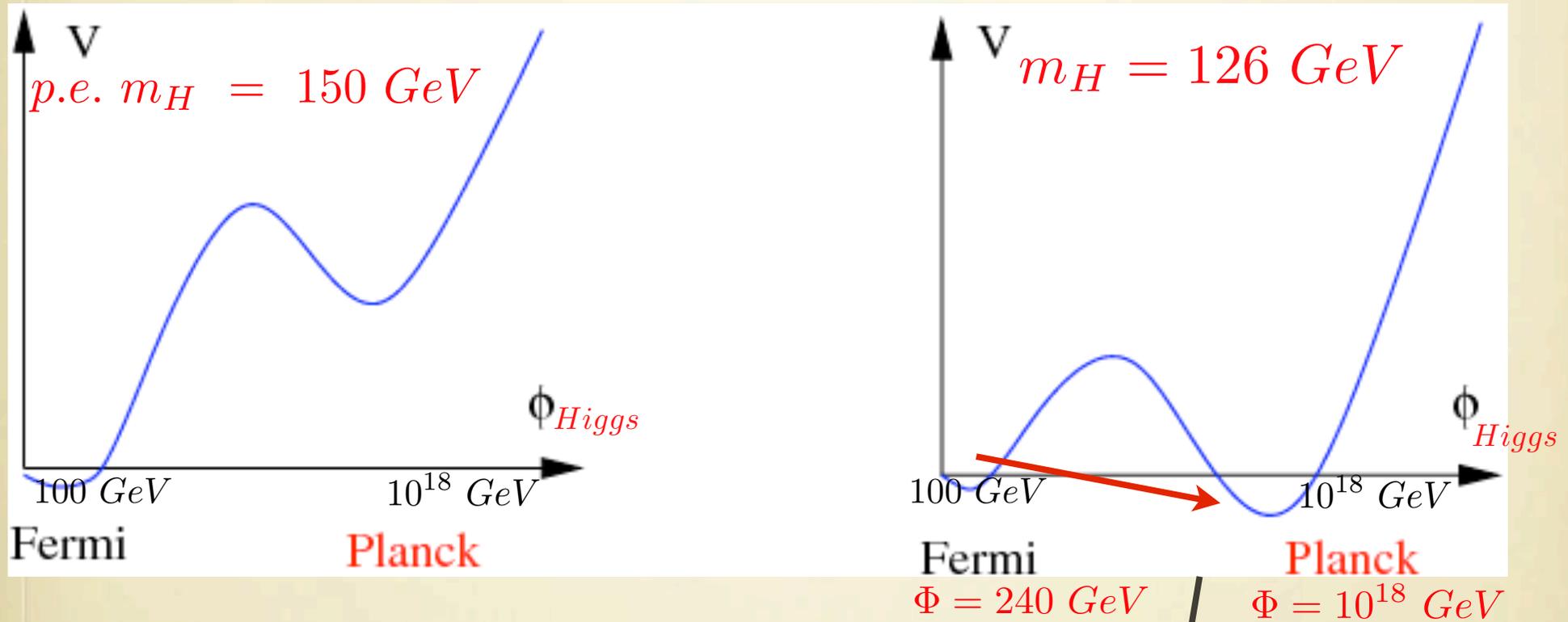
$$m_{Higgs} = 126 \text{ GeV}$$

El valor del campo de Higgs determinado por un potencial V



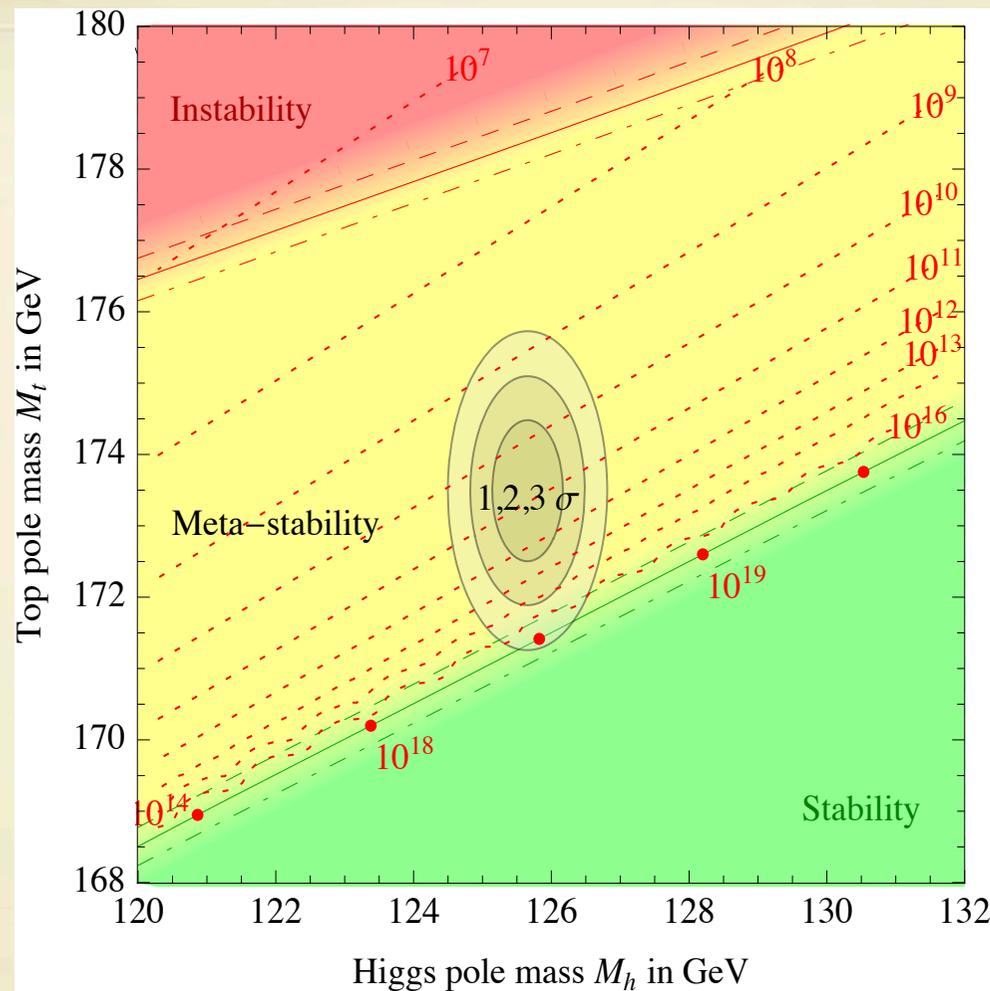
Esta corrección crea el segundo mínimo..

El valor del campo de Higgs determinado por un potencial V



Estamos en un universo
metaestable....





El universo no es estable, puede empezar a percolar en cualquier momento.....

No es una perspectiva agradable....

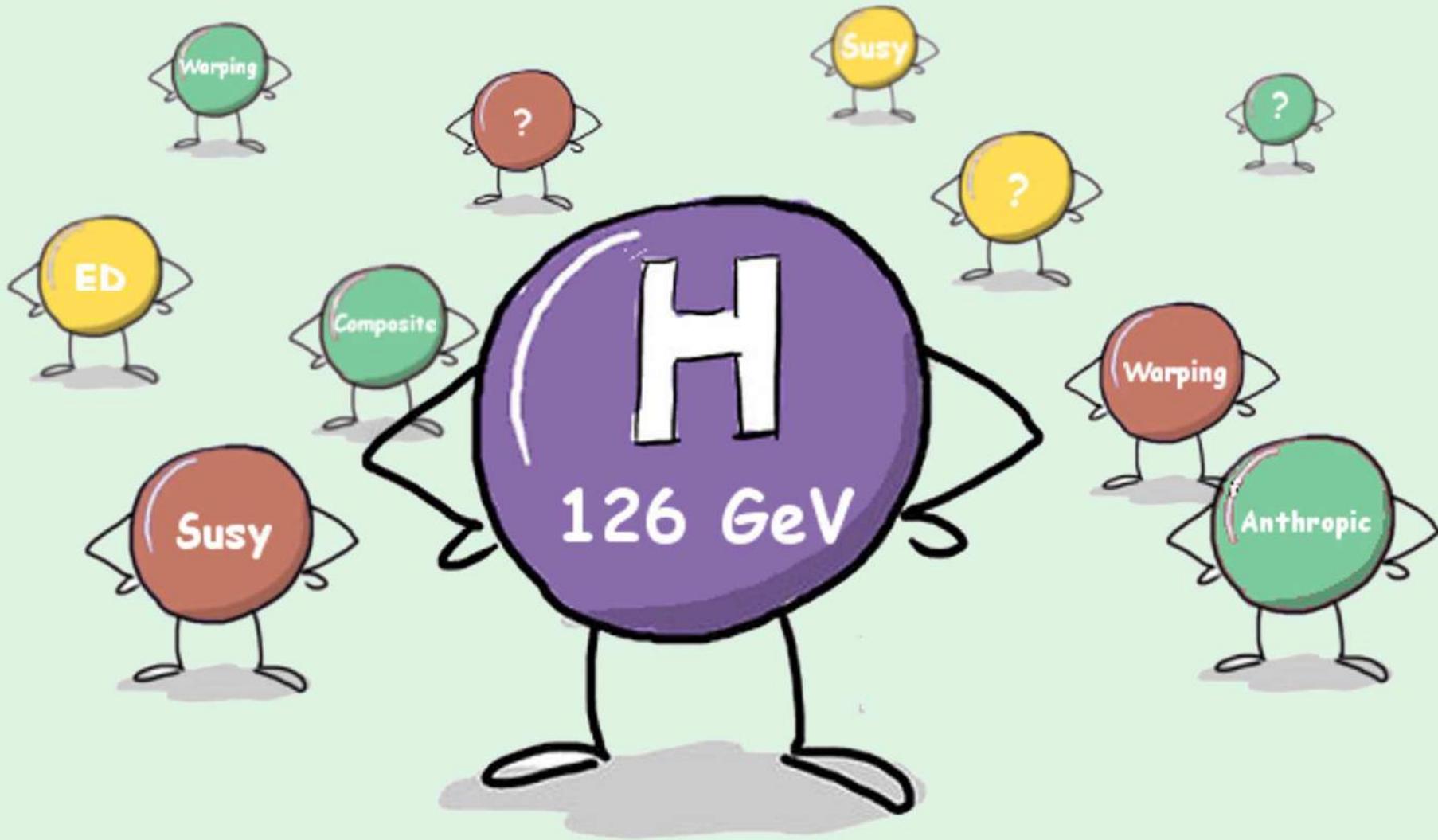
Abracurcix....



...pero eso no va a ocurrir mañana...



Por qué el Higgs pesa 126 GeV?





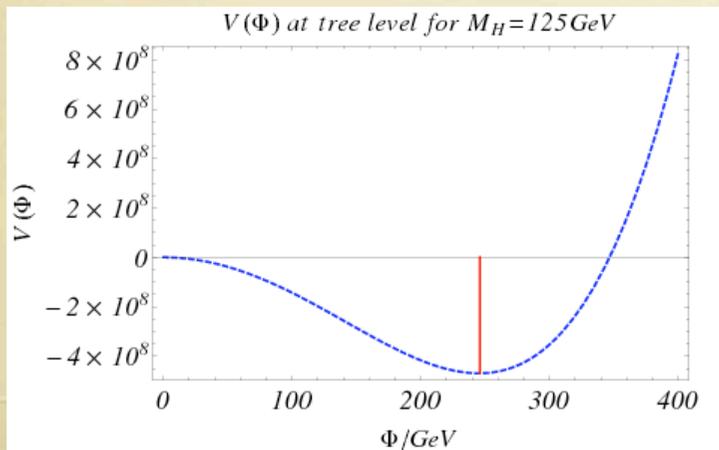
¿Que dice supersimetría
sobre el Higgs?

Una predicción exitosa:

$$m_{Higgs}^2 \simeq M_{Z^0}^2 + \frac{m_t^4}{M_W^2} \log\left(\frac{m_{SUSY}^2}{m_t^2}\right) < (130 \text{ GeV})^2$$

★ Para obtener **126 GeV** se necesita partículas SUSY muy pesadas: **5 TeV** por lo menos. Es **consistente** con que no se haya encontrado SUSY todavía en el LHC

★ **!No hay problemas de inestabilidad;**



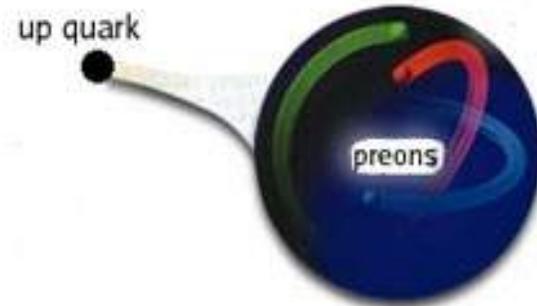
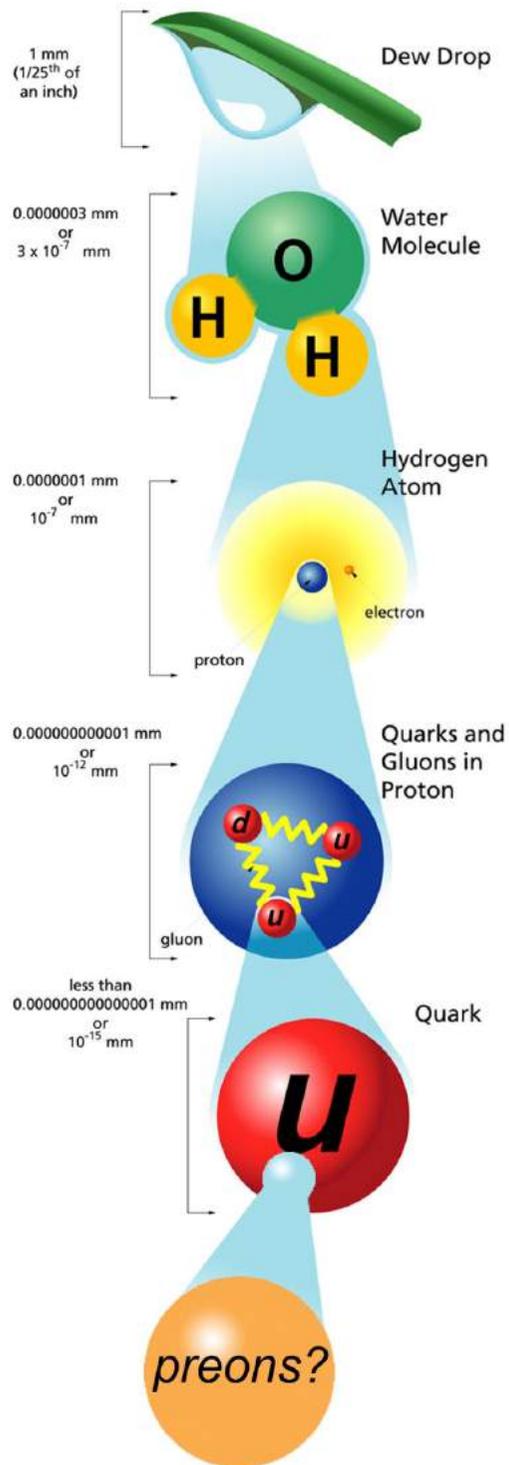
Hay un solo mínimo

¿Que hemos aprendido de momento?

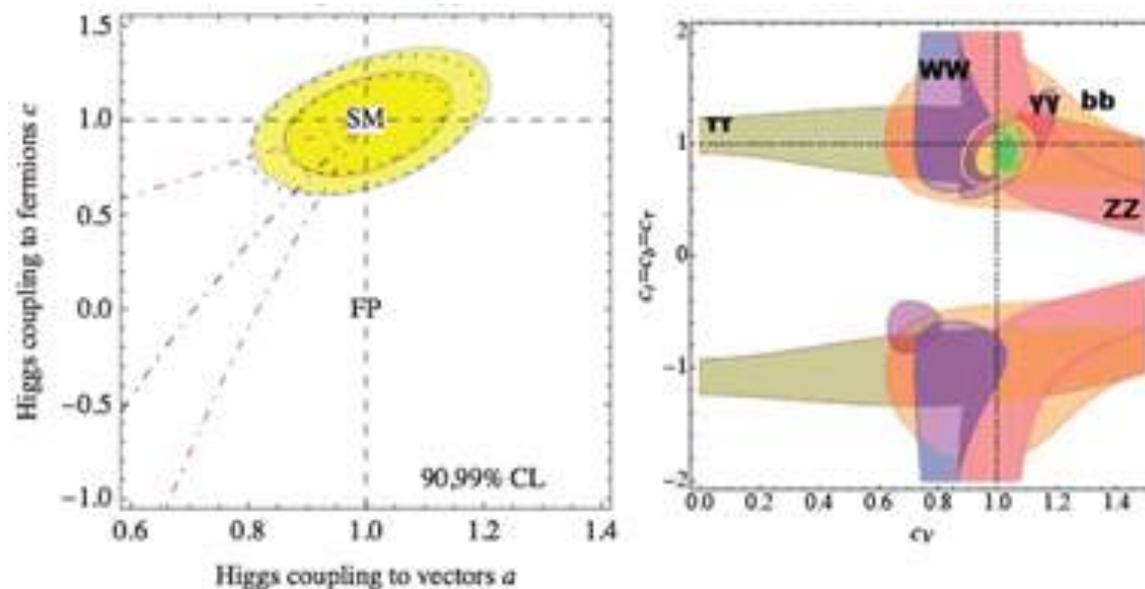
- Hay indicios de una **unificación** de las interacciones Débiles, Electromagnéticas y Fuertes.
- Ello explicaría: las diversas **magnitudes** de dichas interacciones y la **cuantización de la carga**.
- Hay dos grandes escalas en la Física separadas por 14 ordenes de magnitud. La **supersimetría** puede explicar esas diferentes escalas.
- La supersimetría remedia algunas debilidades de la unificación y predice la existencia de un **candidato a materia oscura**. Puede explicar también la **estabilidad** del potencial de Higgs.
- La búsqueda de SUSY y materia oscura prosigue en el LHC y en detectores de materia oscura.

Pero todavía quedan muchas preguntas sin respuesta.....

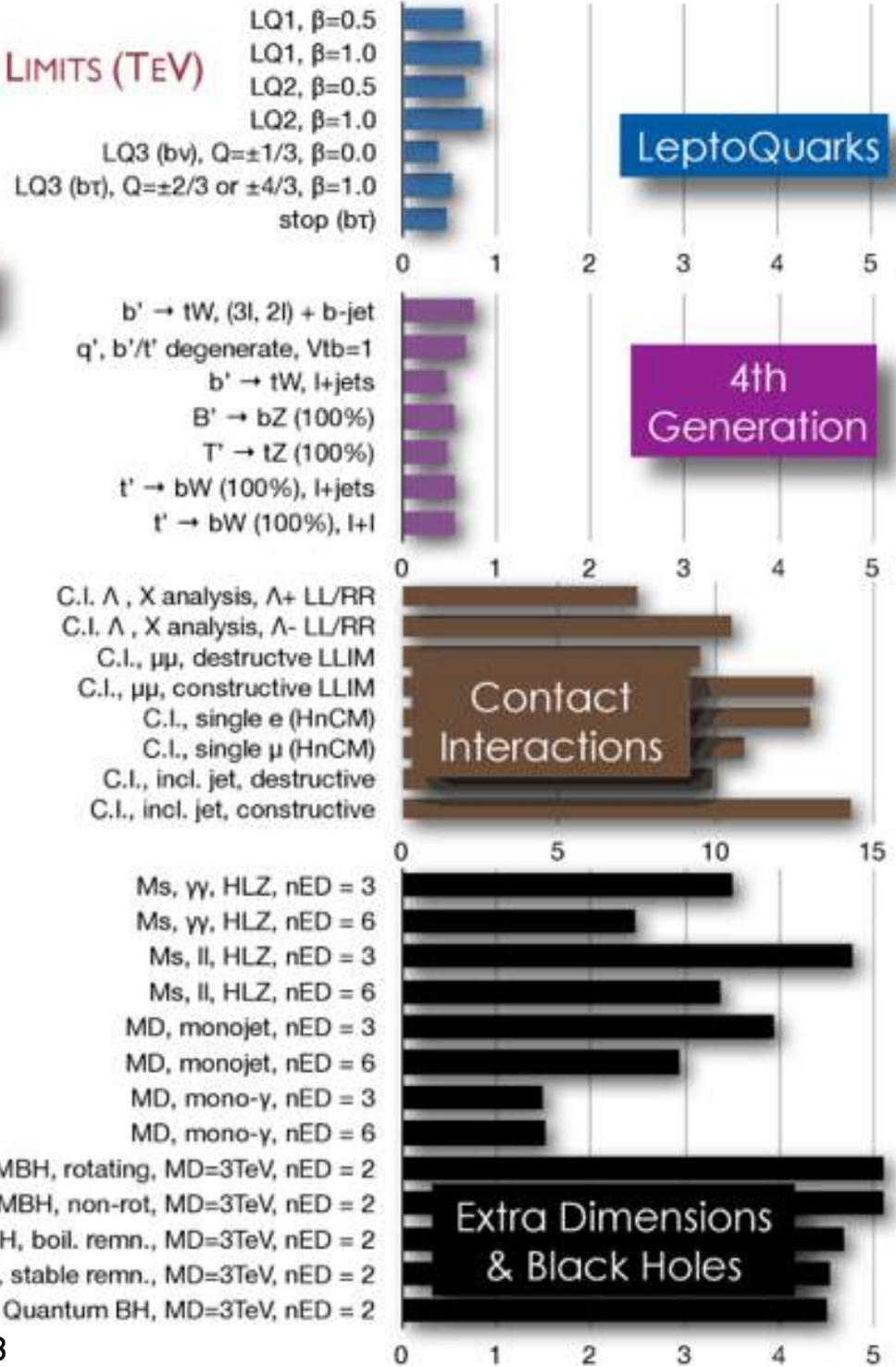
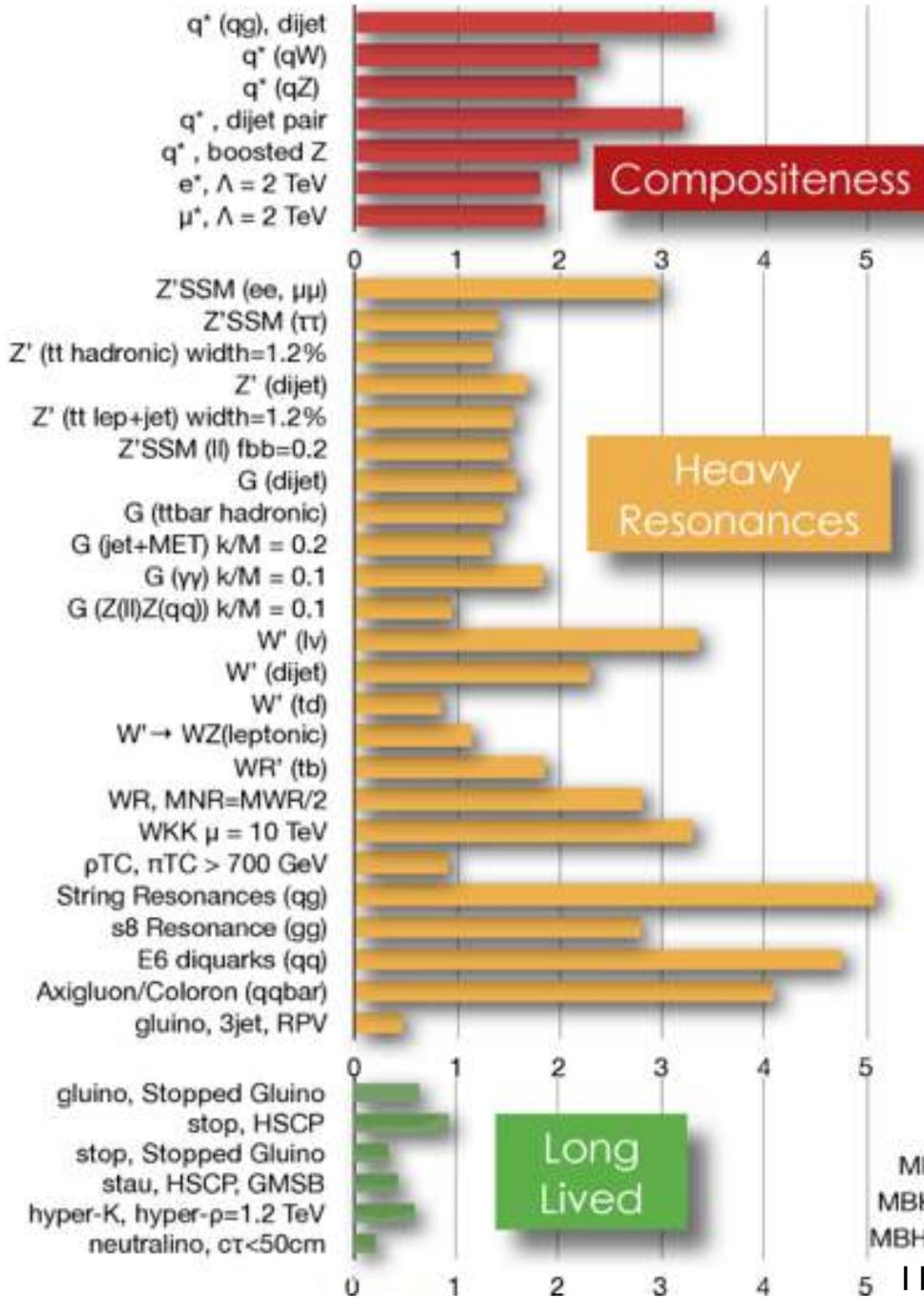
¿Y si los quarks y leptones fueran compuestos?



- No ha sido posible encontrar hasta hoy un modelo con quarks y leptones compuestos de “preones” consistente con los datos
- Existen modelos donde el Higgs es compuesto (Technicolor). Pero predicen una masa para el Higgs bastante mayor que 126 GeV
- También predicen desviaciones de los acoplos del Higgs no observadas

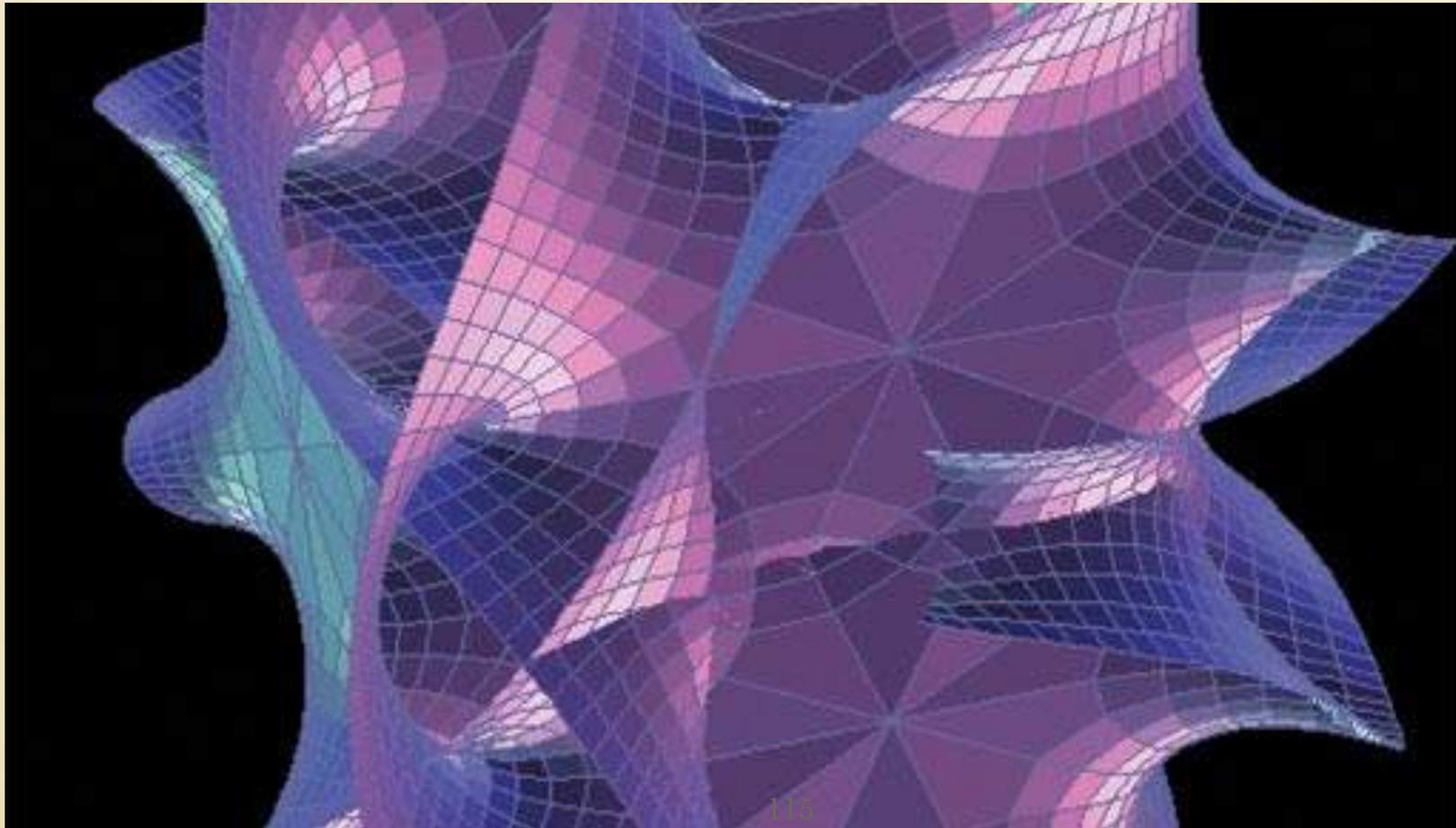


CMS EXOTICA 95% CL EXCLUSION LIMITS (TeV)

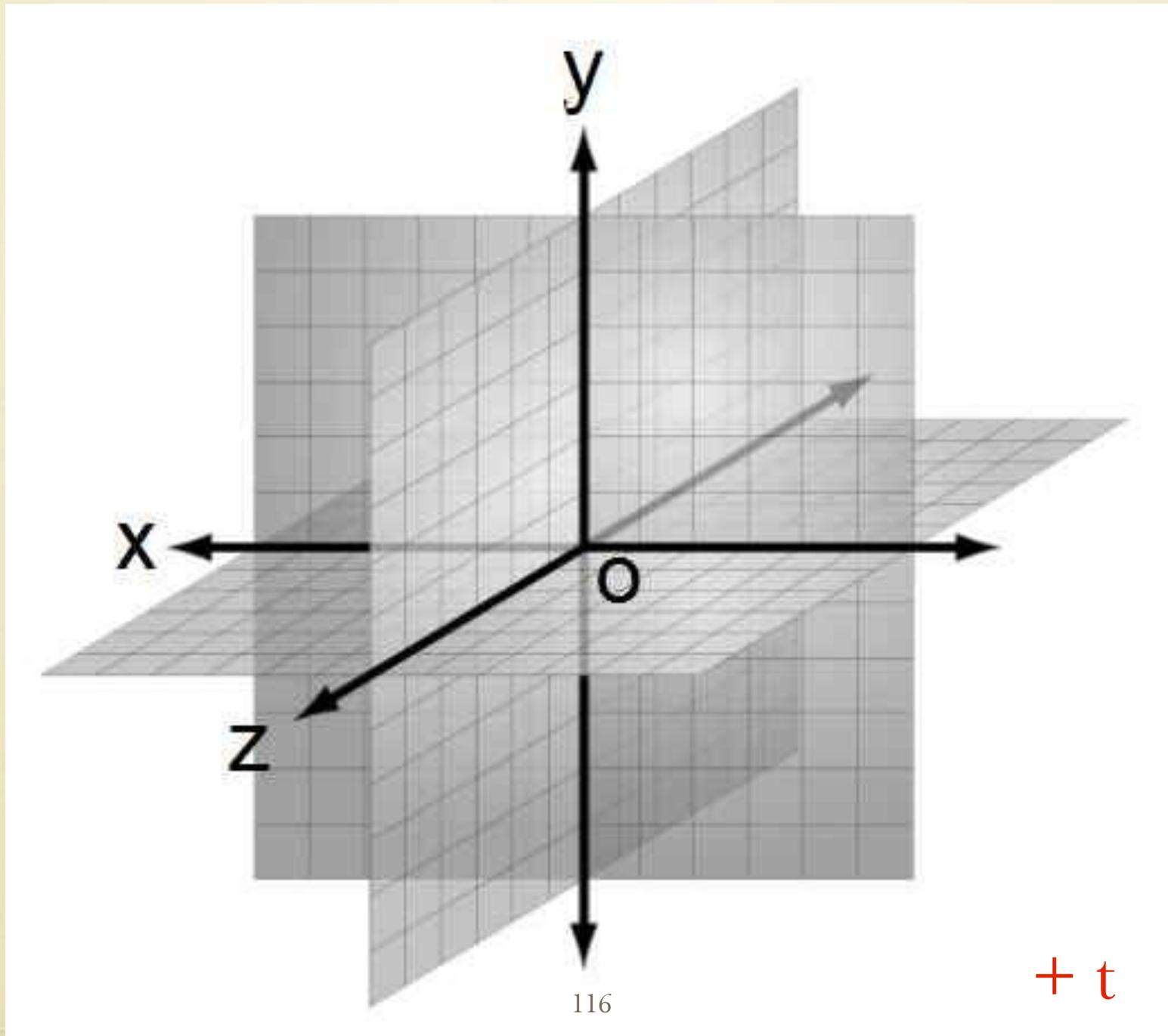


- ¿Por qué las masas de las partículas son las que son?
- ¿Por que hay 3 generaciones de quarks y leptones?
- No existe una version cuántica de la gravitación...
-
- ¿Por qué hay 3 + 1 dimensiones?
- ¿Por qué la constante cosmologica es tan pequeña?

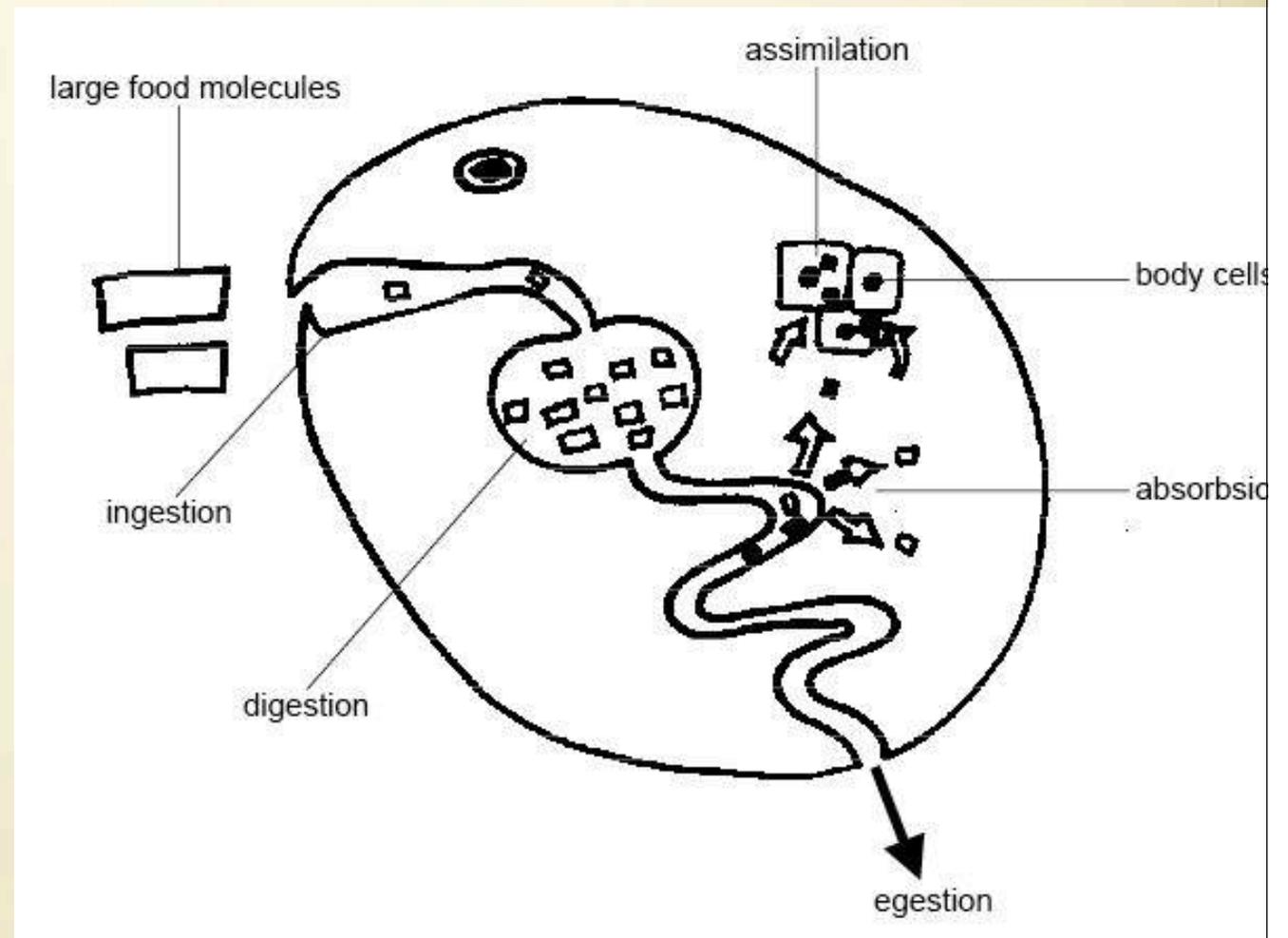
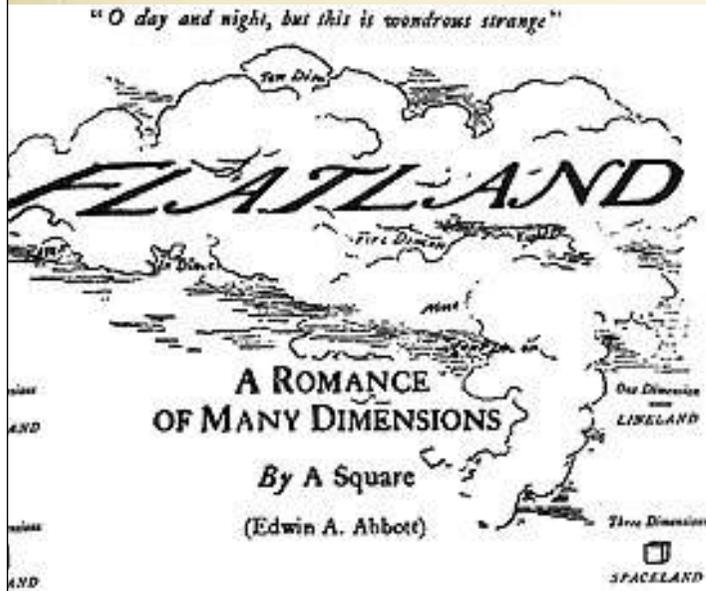
Dímenesiones extra....



Vivimos en 3+1 dimensiones



Vivir en 2 dimensiones sería difícil.....



! Nos partiríamos en 2 trozos ;



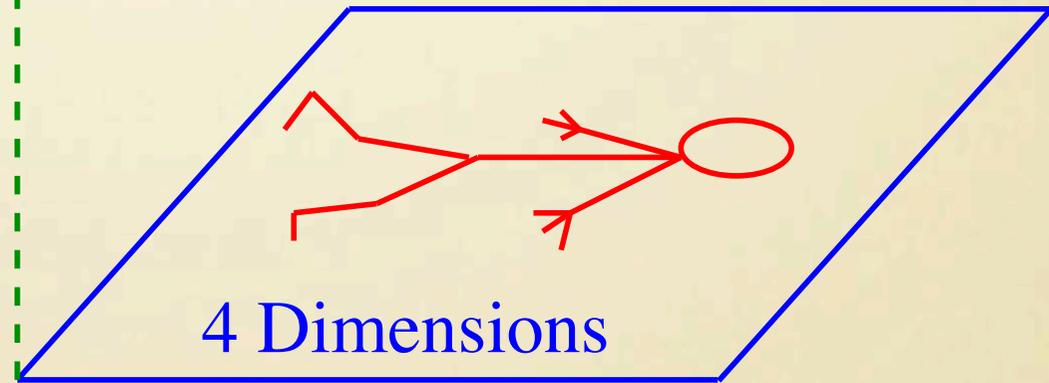
Mas de tres dimensiones...

Concepto natural
en Matemáticas..

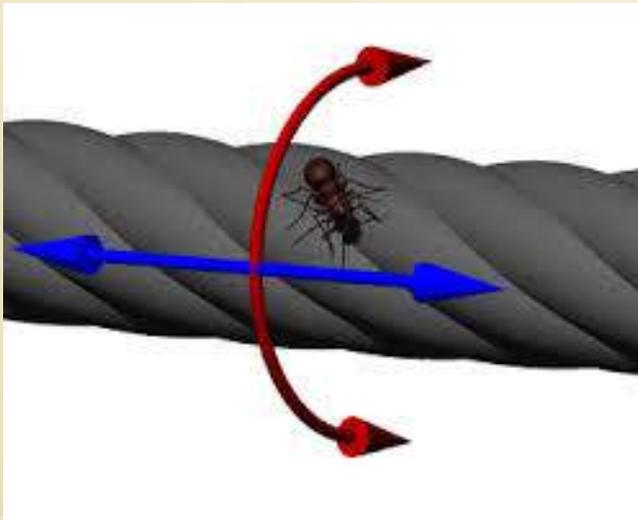
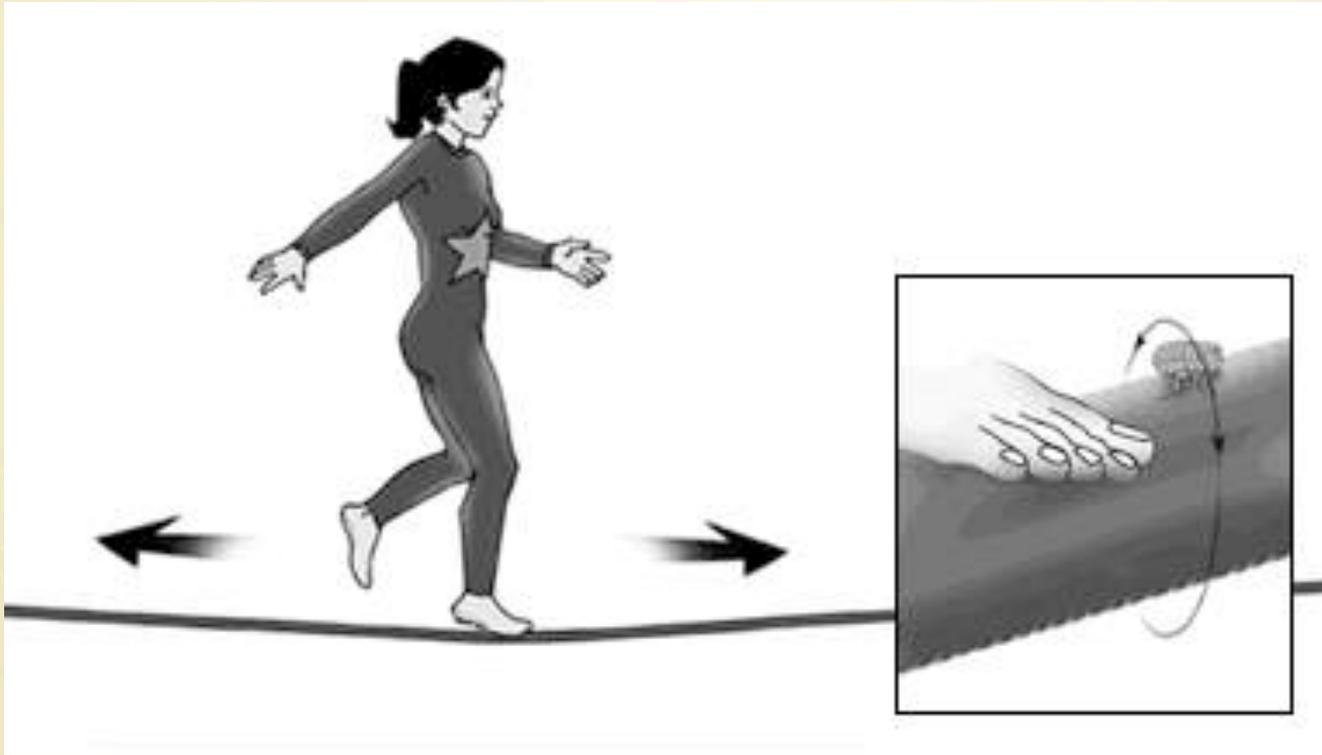
$$X_1, X_2, X_3 \rightarrow X_1, X_2, \dots, X_n$$

¿Pueden existir
mas de 3 dimensiones en
Física?

Extra Dimensions



A distancia la soga parece tener solo una dimension...



....la hormiga ve que en realidad tiene dos...

¿Nos puede estar ocurriendo lo mismo?

1921-1926

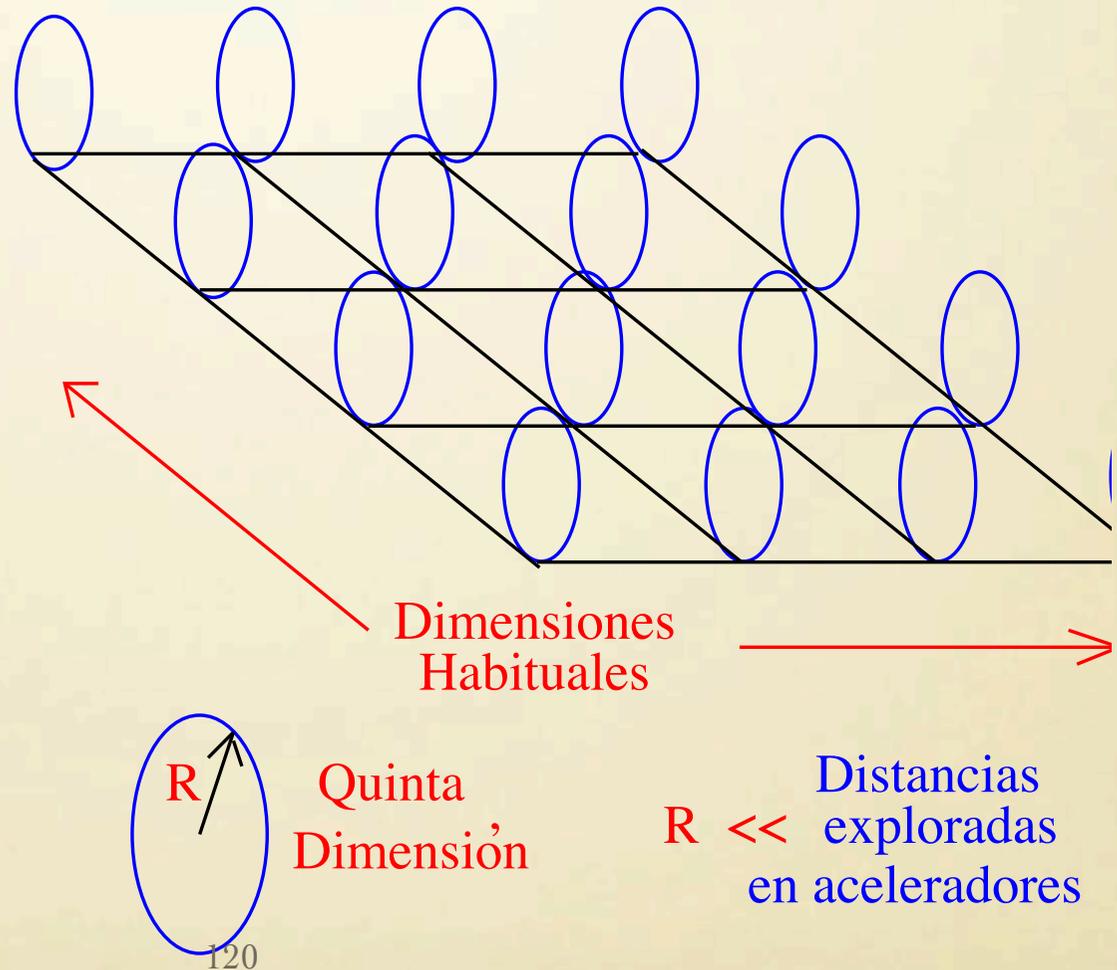


Kaluza

Klein

Proponen la existencia de una quinta dimensión

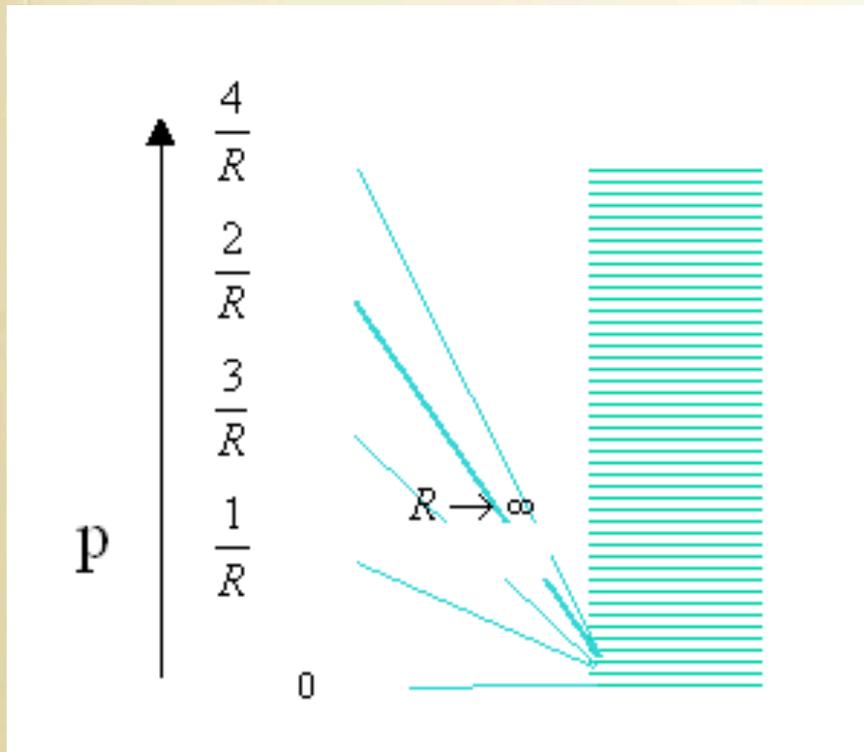
Quinta dimensión tiene tamaño diminuto⁷⁷.



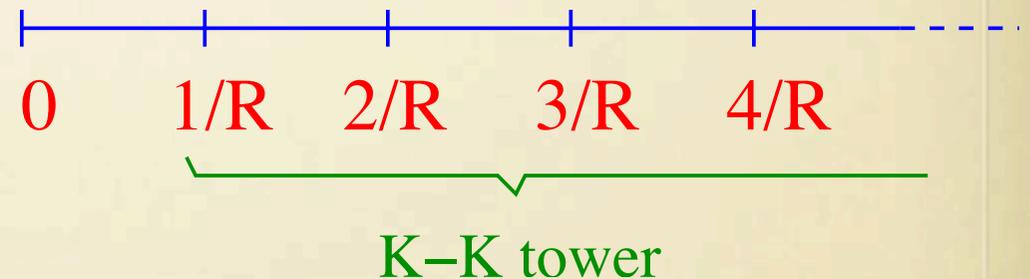
Para cada partícula habitual

Una torre de infinitas copias KK
muy masivas:

$$m_n^2 = \frac{n^2}{R^2} ; n = 1, 2, 3..$$



Masses



Cuando $R \rightarrow$ infinito veremos una
quinta dimension abierta...

La motivación de Kaluza y Klein era el sueño de Einstein:
la búsqueda de una **teoría unificada de gravitación y E-M**

4+1 Dim:

$$G_{MN}^0 = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu}(x)e^{\sigma/\sqrt{3}} + A_\mu A_\nu & e^{-2\sigma/\sqrt{3}} A_\mu(x) \\ e^{-2\sigma/\sqrt{3}} A_\mu & e^{-2\sigma(x)/\sqrt{3}} \end{pmatrix}$$

$M = (\mu, 4), \mu = 0, 1, 2, 3$

$$G_{\mu\nu}^0 \rightarrow g_{\mu\nu}$$

$$G_{\mu 4}^0 \rightarrow A_\mu$$

$$G_{44}^0 \rightarrow \sigma$$

Unificados
Gravitación y EM....

Se obtiene la relación:

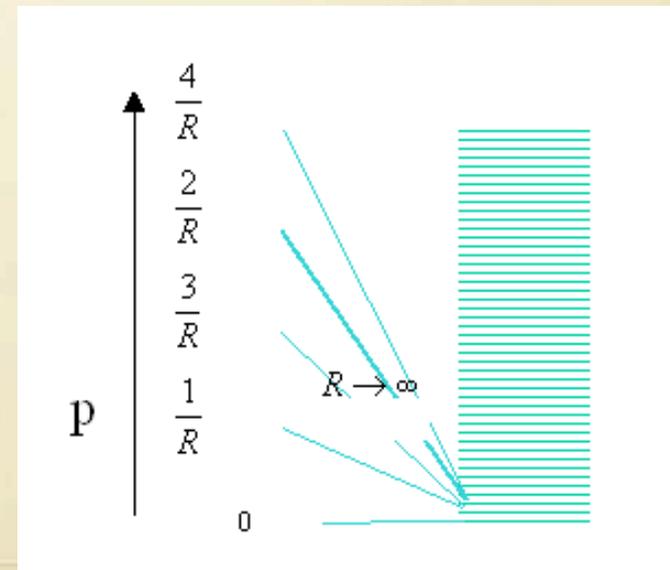
$$M_{Planck}^2 = M_4^3 R$$

$M_4 =$ *escala de la gravitacion en 4 dim*

- ★ Idea: uno podría entender por que M_{Planck} es tan grande, incluso si fuera $M_4 \simeq 1 TeV$.
Basta con **tomar R muy grande....**

★ **No funciona:**

Ya tendríamos que haber observado las réplicas KK del MS...



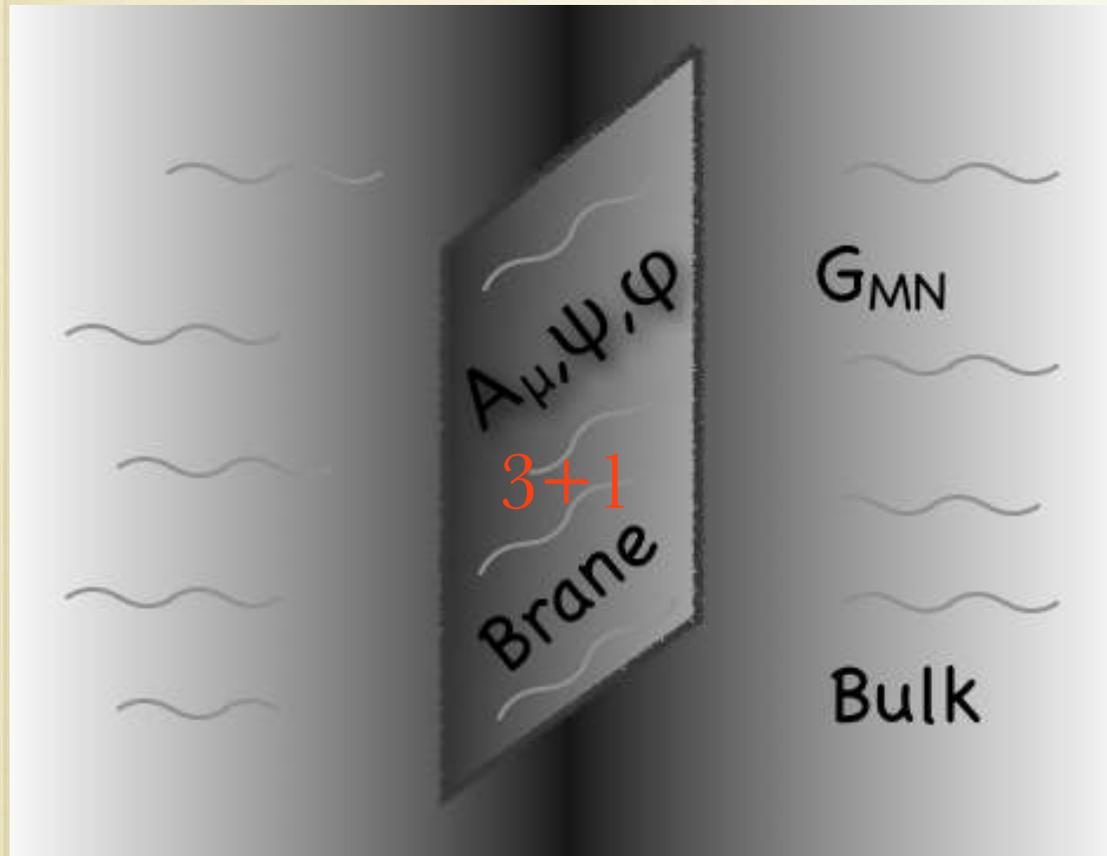
Recientemente se ha visto sin embargo que la idea es viable si hay mas dimensiones extra:



Dimopoulos, Arkani-Hamed, Dvali

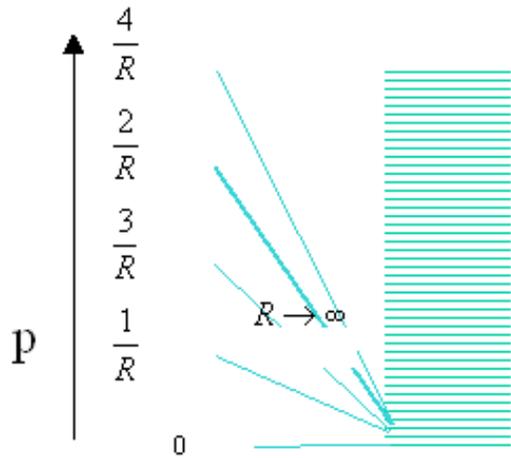
1998

Partículas del MS
están atrapadas
en una 'brana' de
3+1 dimensiones:
no tienen réplicas KK



Los **gravitones** si que viven en dimensiones extra y
tienen réplicas KK

El limite de R muy grande sería compatible con el experimento, las copias de KK de los gravitones interactúan muy debilmente, solo gravitacionalmente



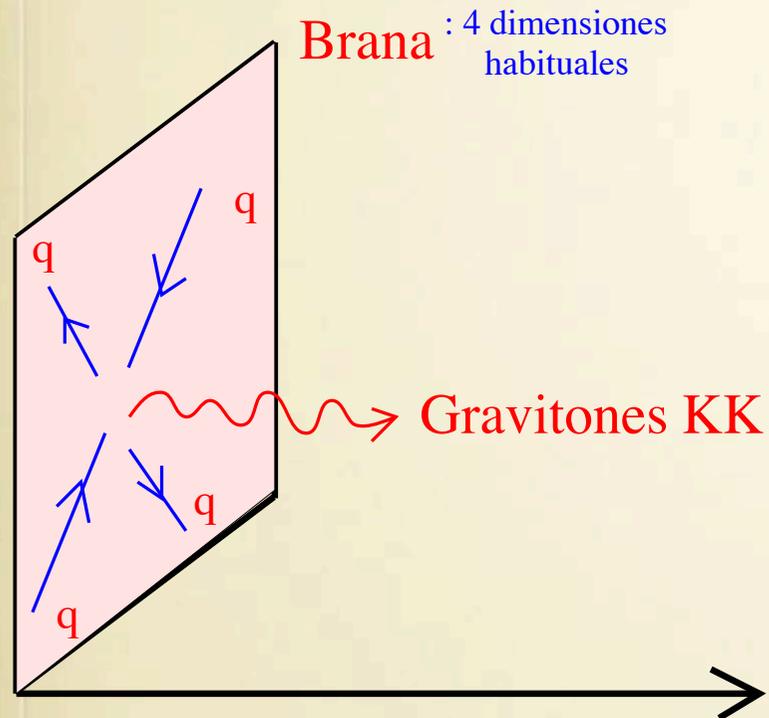
Las copias KK del gravitón pueden ser muy ligeras
 n = número de dimensiones extra

n	1	2	3	...	7
R	10^8 Km	0.1 mm	10^{-6} mm	...	10^{-12} mm
R^{-1}	10^{-18} eV	10^{-3} eV	100 eV	...	100 MeV

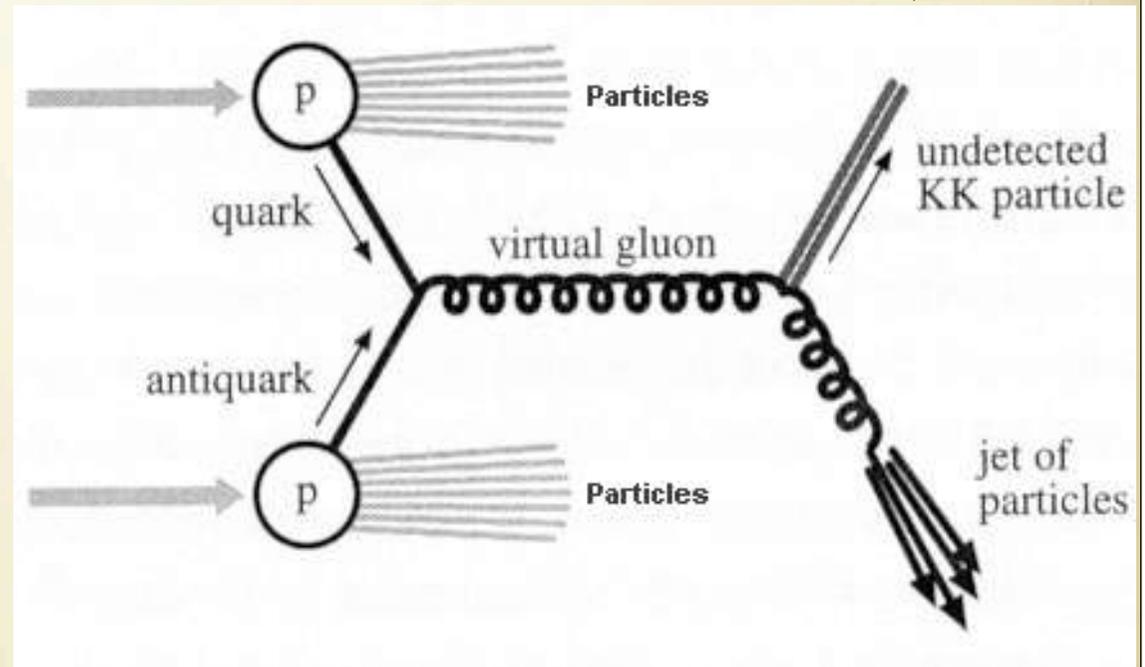
(descartado)

Masa de las copias KK del gravitón

Búsqueda de dimensiones extra en el LHC del CERN

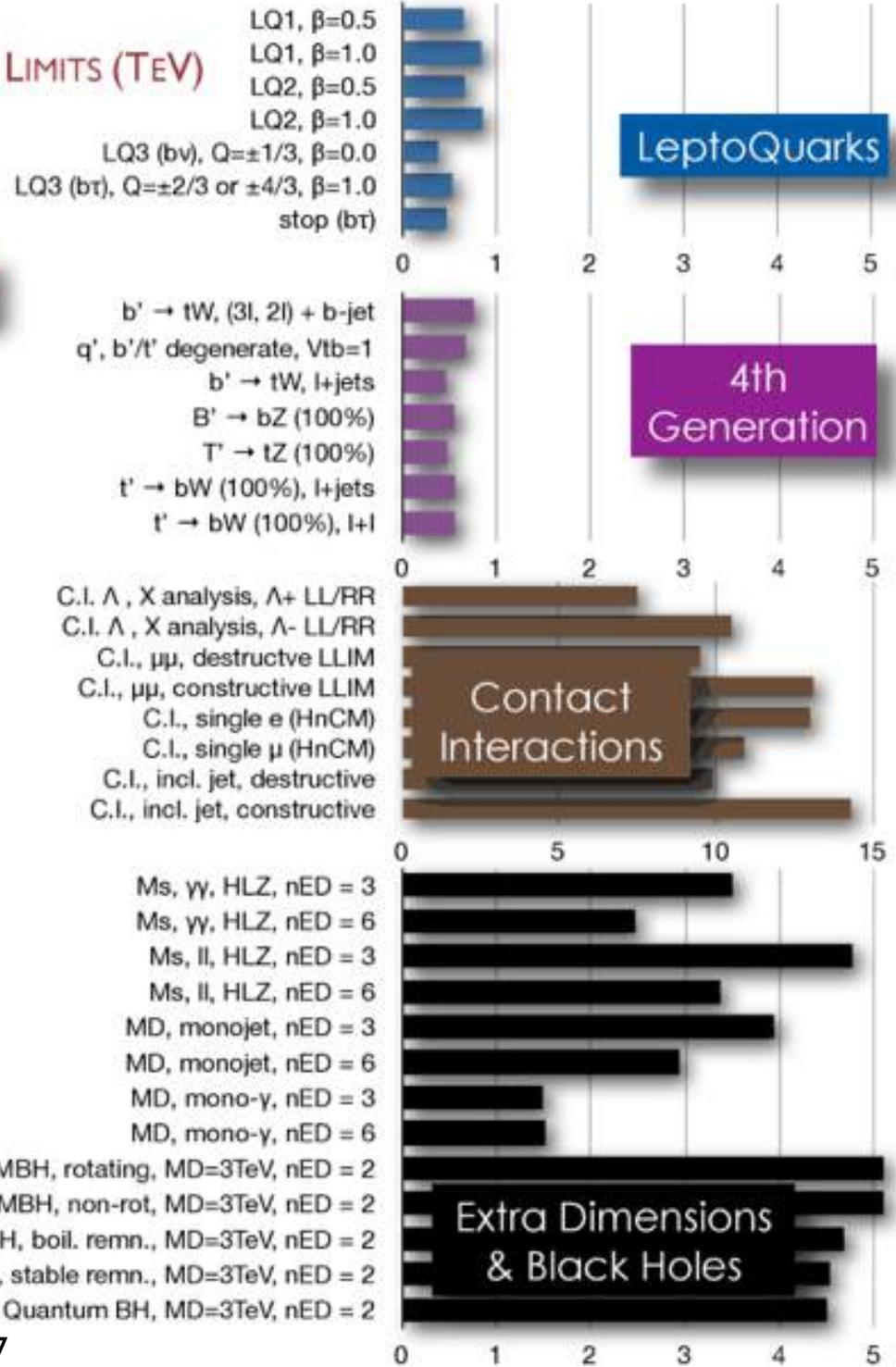
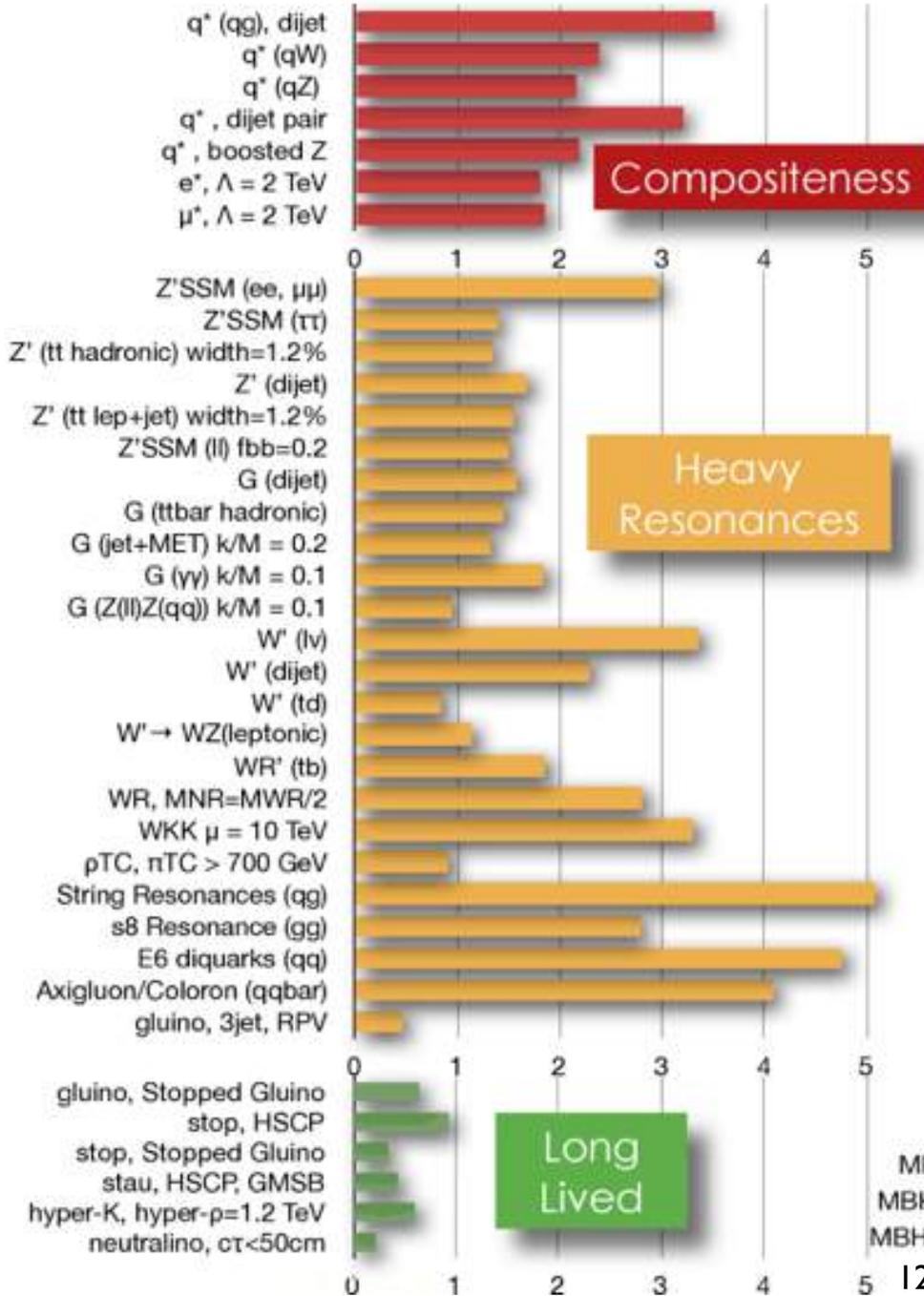


Réplica KK del gravitón



En el LHC se observaría de nuevo como (aparente) violación de la conservación de la energía

CMS EXOTICA 95% CL EXCLUSION LIMITS (TeV)

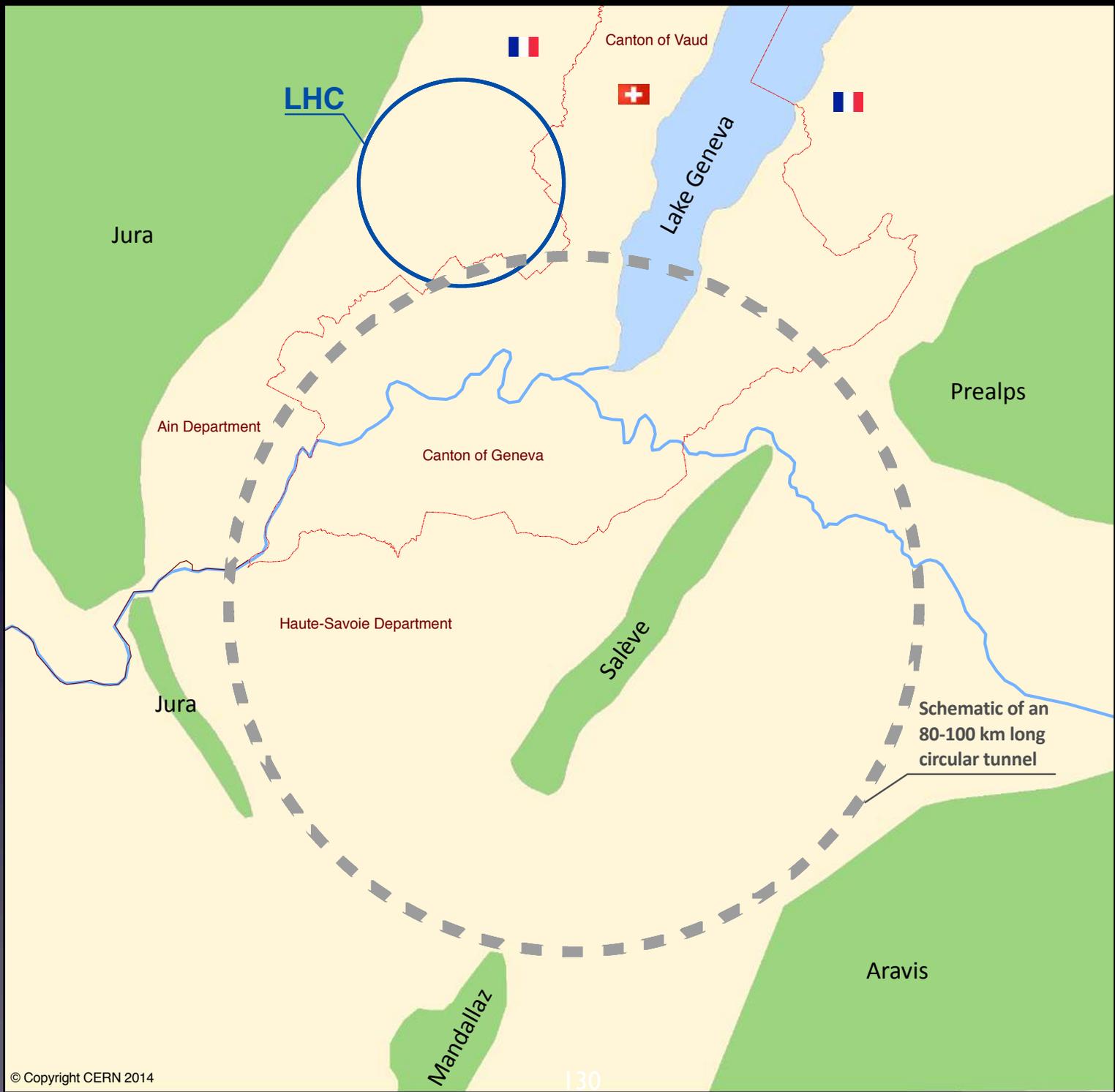






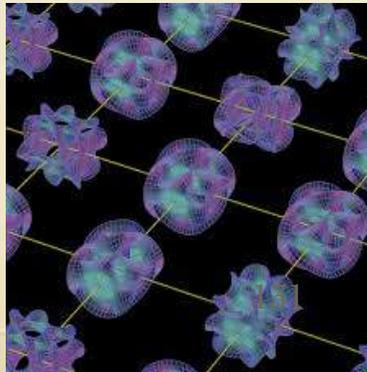
Comienzo construcción: 2020

Colisiones: 2030

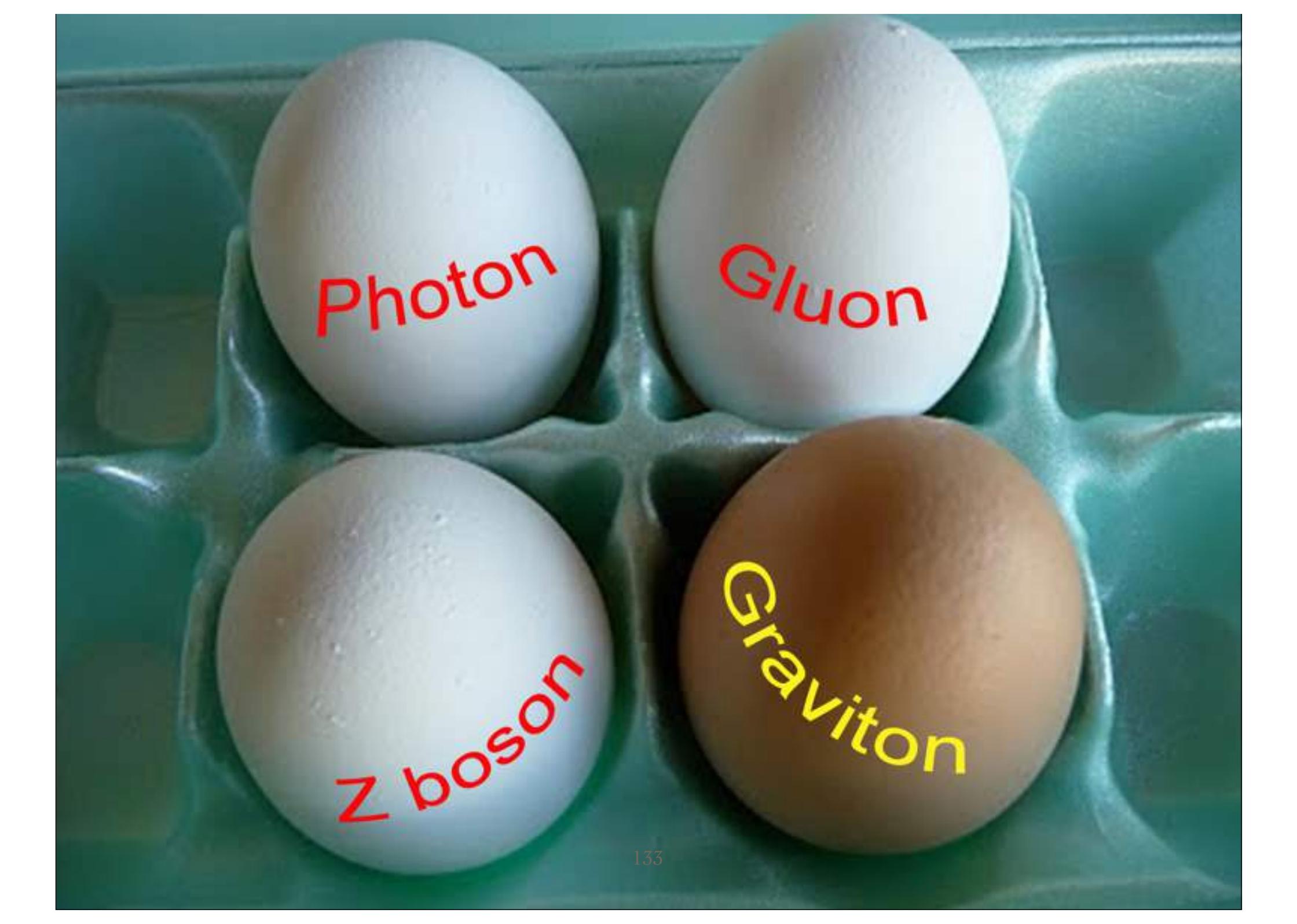


Resumen:

- Pueden existir dimensiones extra mas allá de las habituales
- Las dimensiones extra pueden ser relativamente grandes (mm.) si solo afectan a la gravitación.
- De momento el LHC no ha visto signos de dimensiones extra grandes.
- Veremos sin embargo que la existencia de dimensiones extra es un ingrediente fundamental de la Teoría de Cuerdas
- Son de hecho 6 dimensiones extra, típicamente muy, muy pequeñas.



El reto de la Gravitación Cuántica

A photograph of four eggs in a light blue egg carton. The eggs are arranged in a 2x2 grid. The top-left egg is white and labeled 'Photon' in red. The top-right egg is white and labeled 'Gluon' in red. The bottom-left egg is white and labeled 'Z boson' in red. The bottom-right egg is brown and labeled 'Graviton' in yellow. The carton is slightly open, and the eggs are nestled in their respective compartments.

Photon

Gluon

Z boson

Graviton



No tenemos todavía una Teoría Cuántica de la Gravitación completa



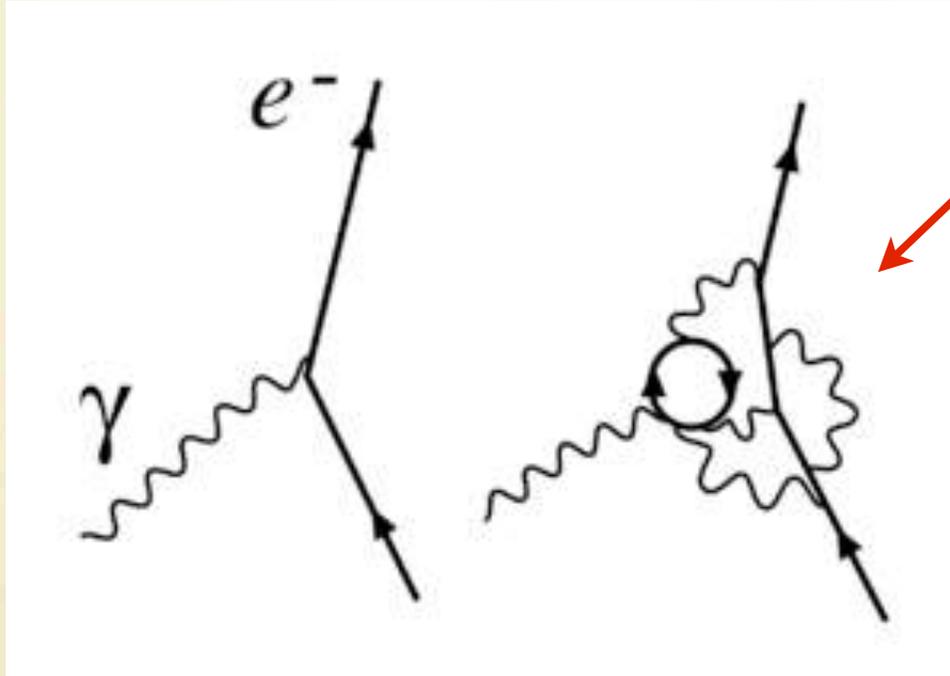
Aplicando las recetas de la Teoría Cuántica de Campos se llega a **inconsistencias matemáticas**. La Teoría es **`no-renormalizable`**



Muchos físicos piensan que hay **que abandonar la idea de que las partículas elementales son puntuales**

Renormalización

p.e.

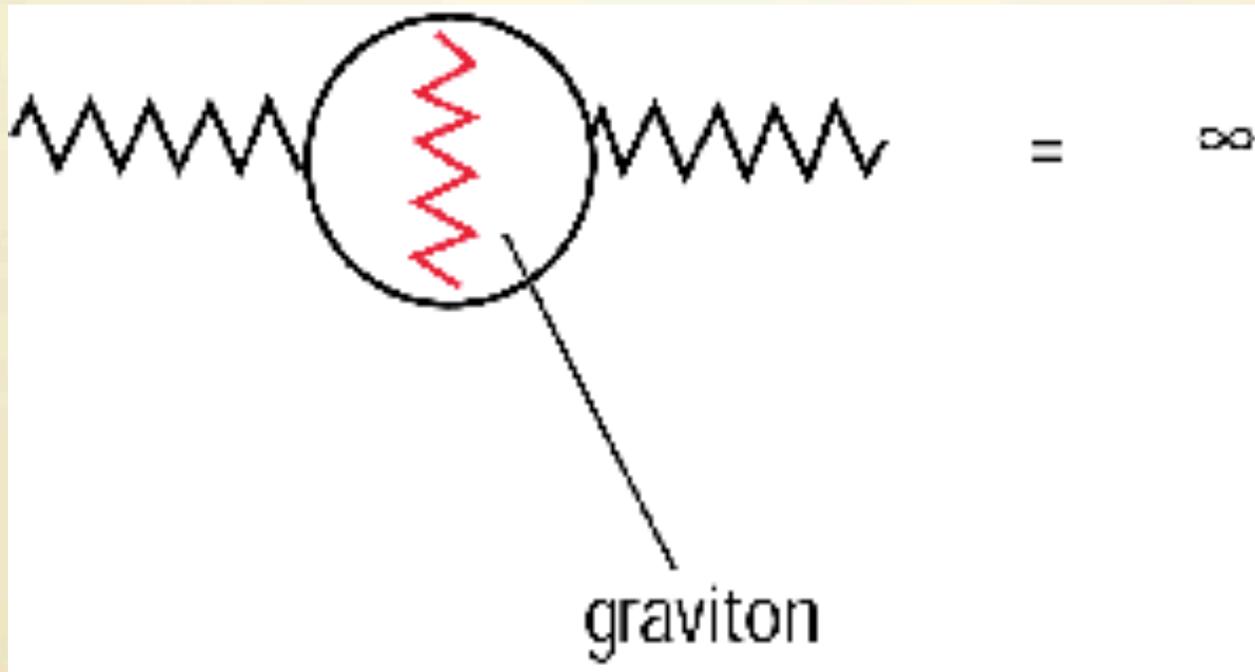


Correcciones
cuánticas
infinitas

Se pueden
reabsorber en
una redefinición
de α_{em}

La Teoría de Campos de las interacciones
E.M., Débiles y Fuertes son **renormalizables**

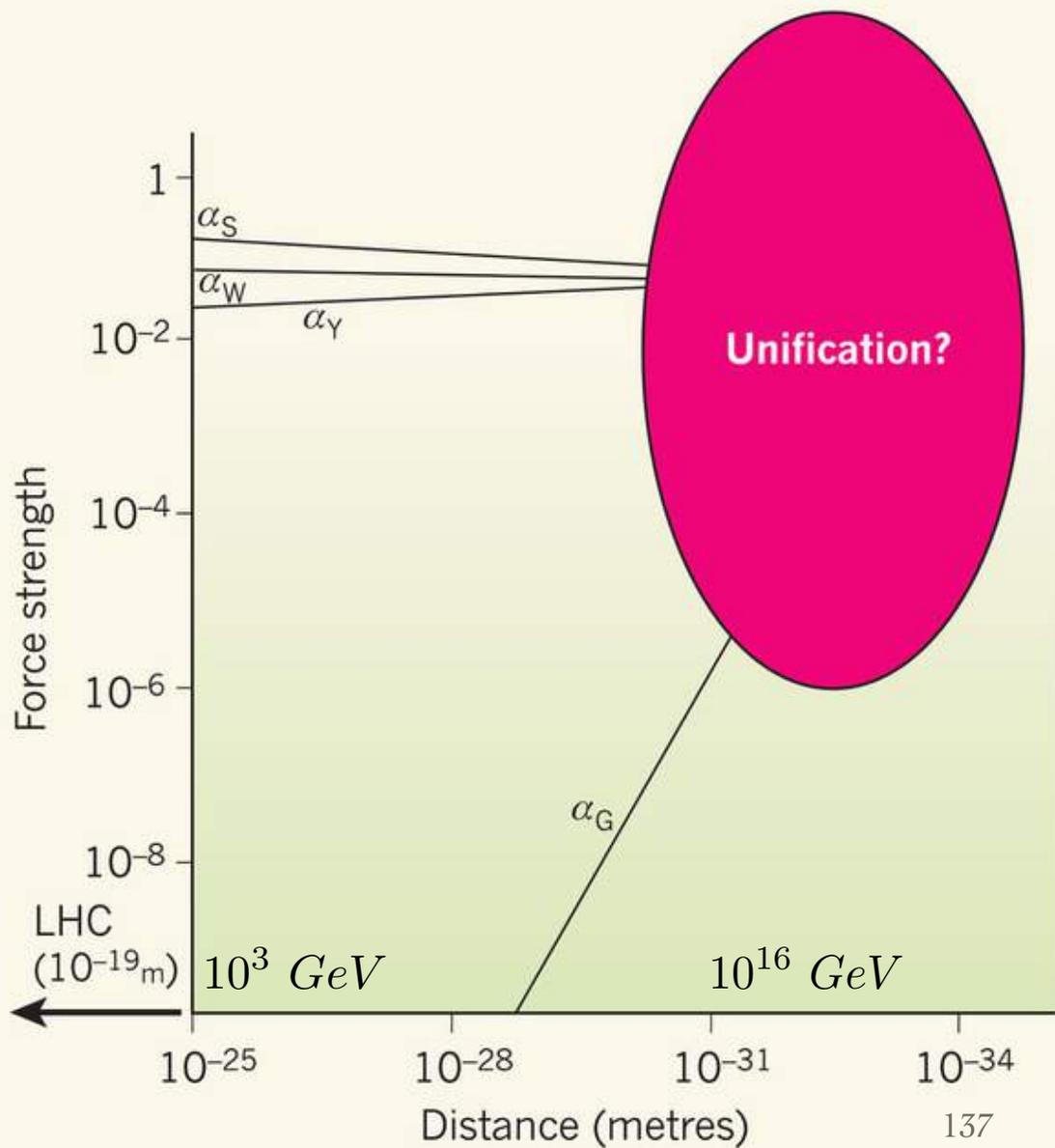
La Teoría Cuántica de Campos gravitacionales lleva a divergencias insalvables



La Teoría no es **renormalizable**.

No se puede interpretar estos infinitos en terminos de una redefinición de acoplos

La intensidad de la fuerza gravitatoria se comporta de manera diferente a las otras tres



(unidades $\hbar = c = 1$)

Coulomb:

$$V = \frac{4\pi\alpha_i}{r}, \quad i = 1, 2, 3$$

Newton:

$$V = \frac{4\pi\alpha_{grav}}{r},$$

$$\alpha_{grav} = \frac{E^2}{M_{Planck}^2}$$

La Teoría de Cuerdas y la unificación de las Interacciones...

(breve pre-introducción)

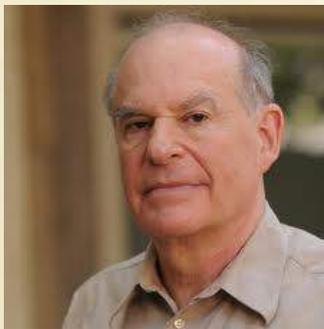




1968-1985-1995-1997-....(en construcción)



Veneziano



Schwarz



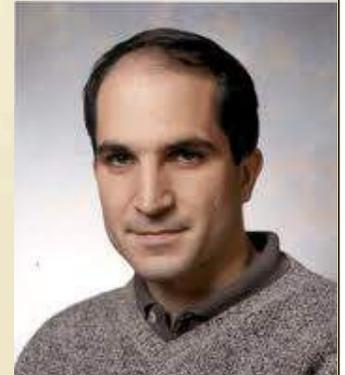
Green



Gross

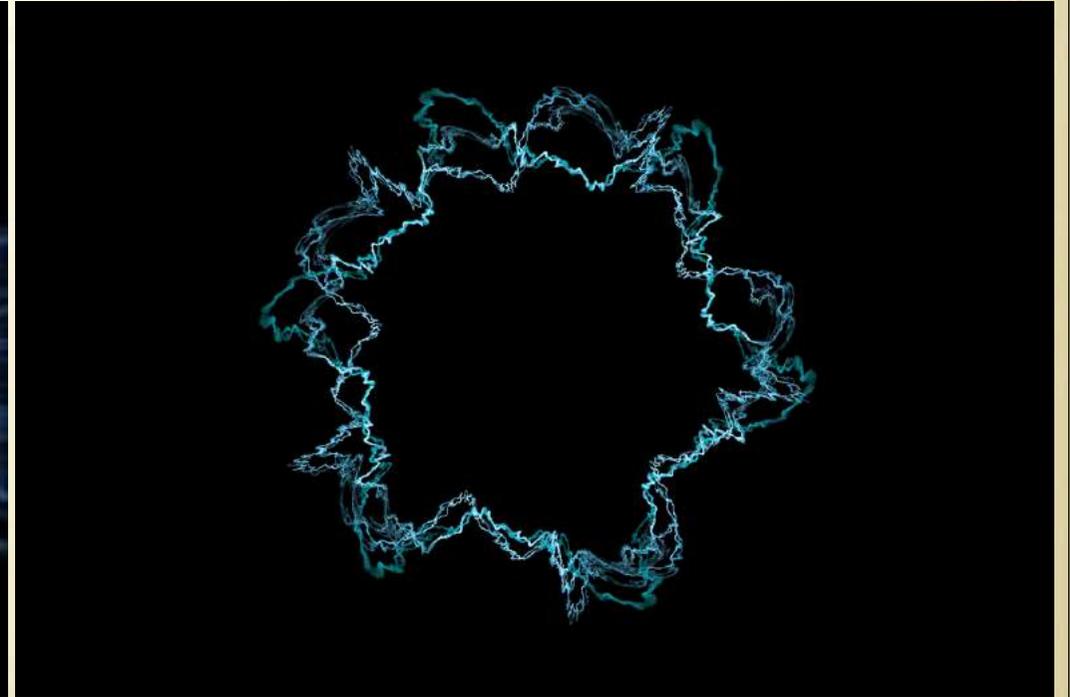
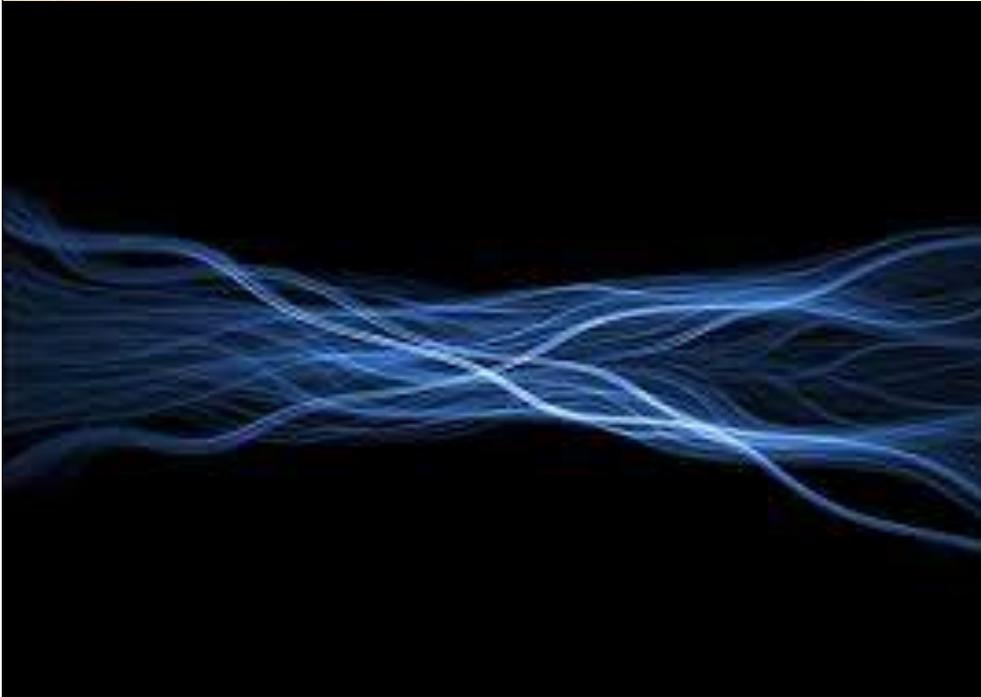


Witten

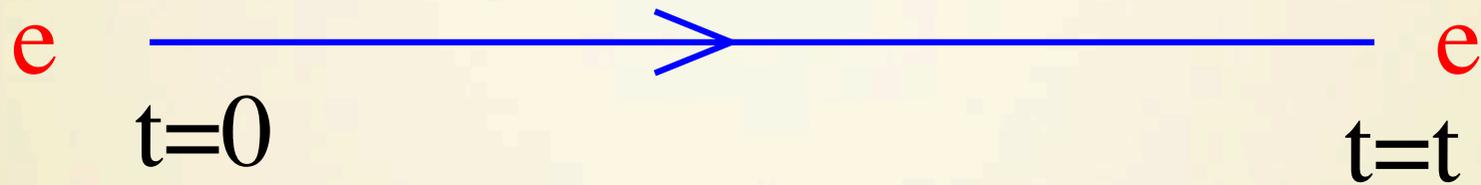


Maldacena

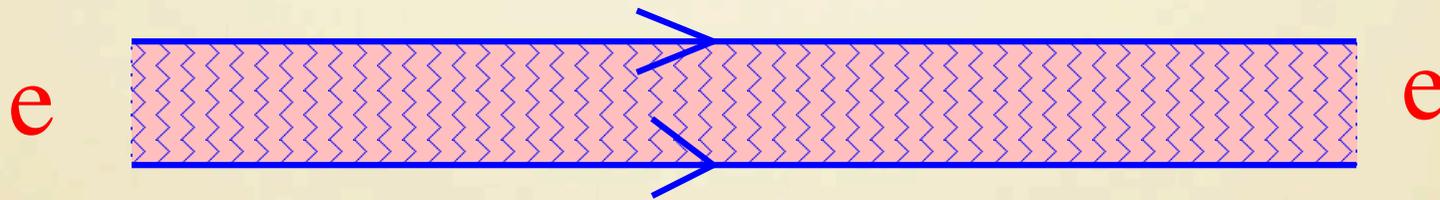
A muy altas energías, donde la unificación de las 4 interacciones ocurre, las partículas NO son puntuales, si no que tienen estructura de CUERDA



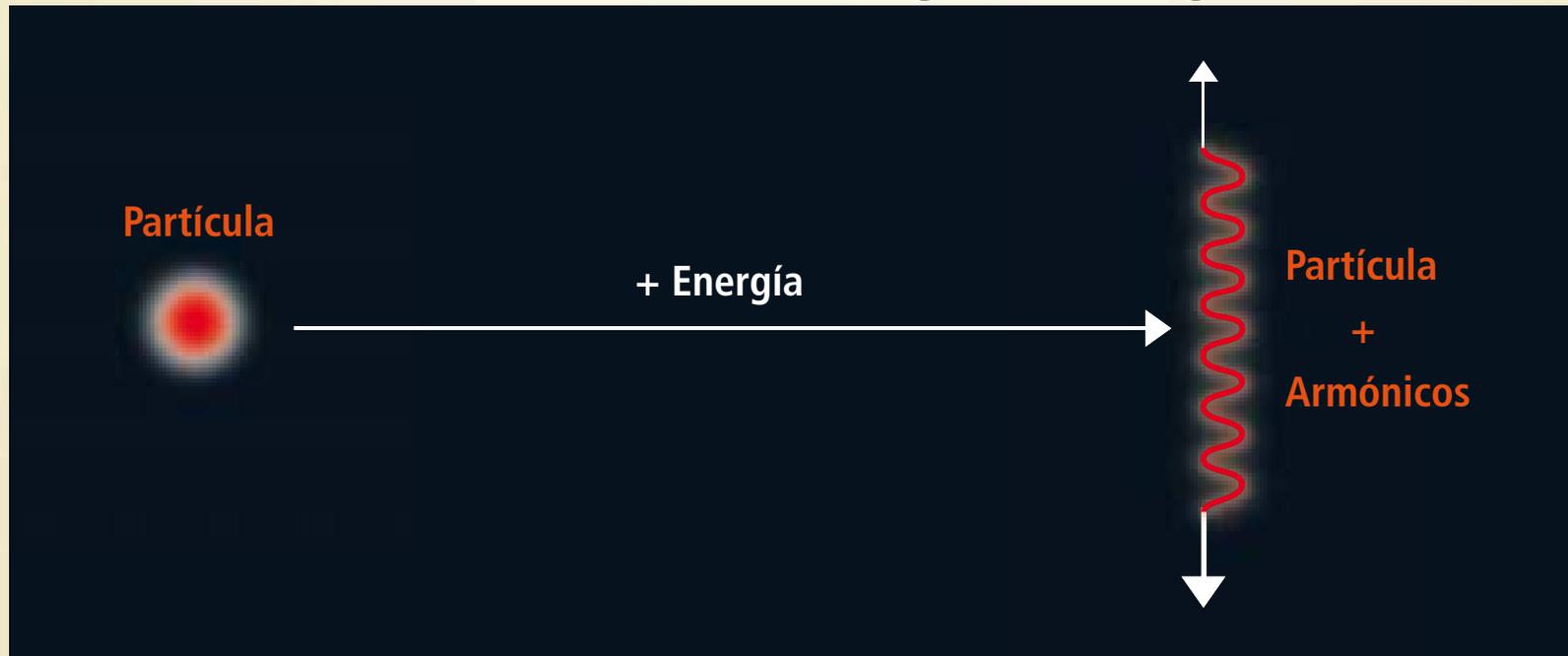
Particula en movimiento



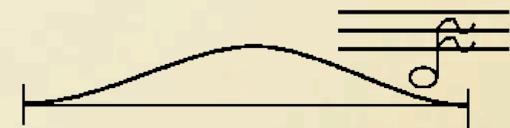
Cuerda en movimiento



Para 'estirar' los extremos de la cuerda y **ver la estructura extensa de una partícula** se necesitaría una gran energía:



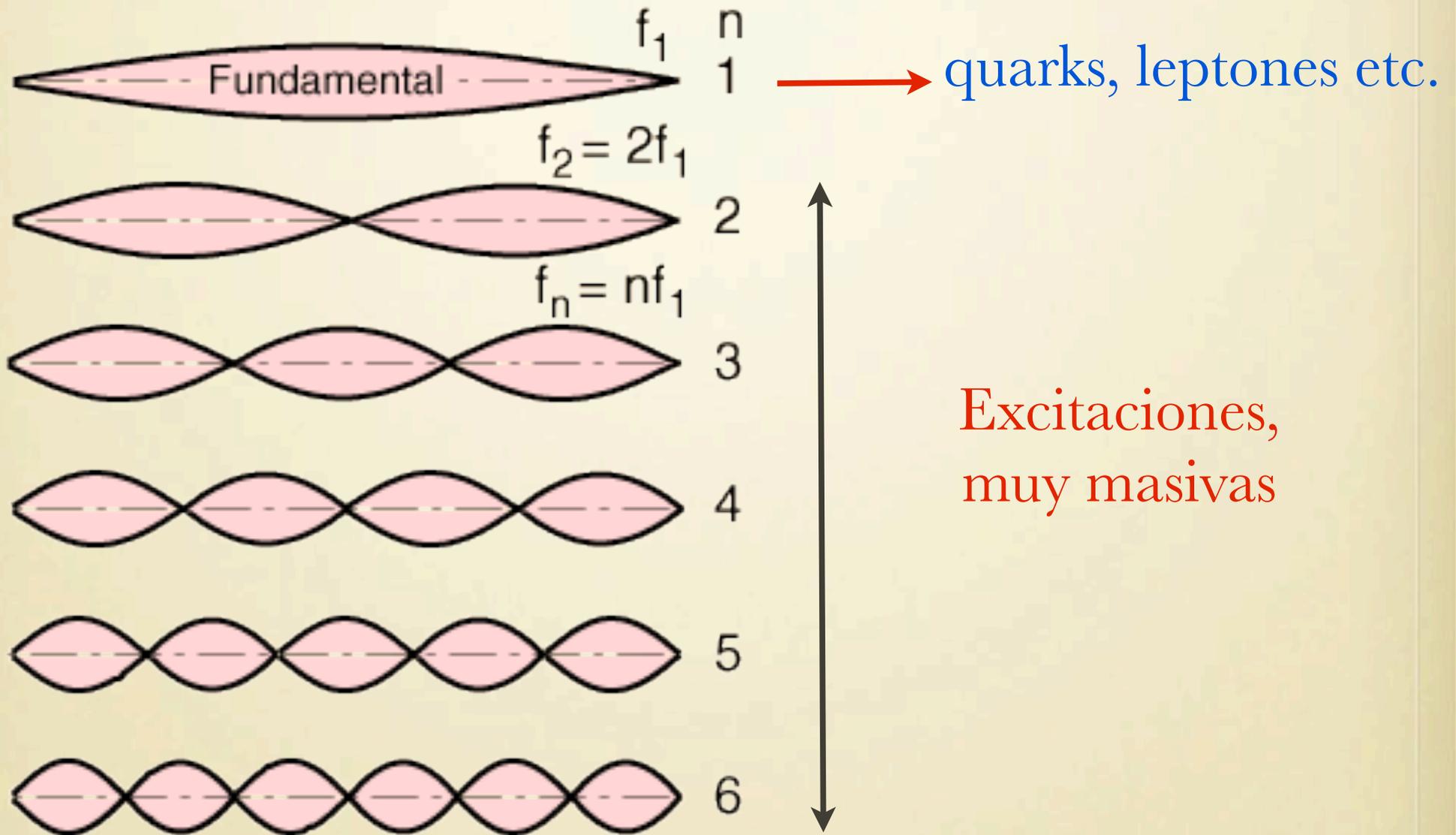
- Las **partículas observadas** corresponden a los **modos de vibración mas ligeros de la cuerda** .



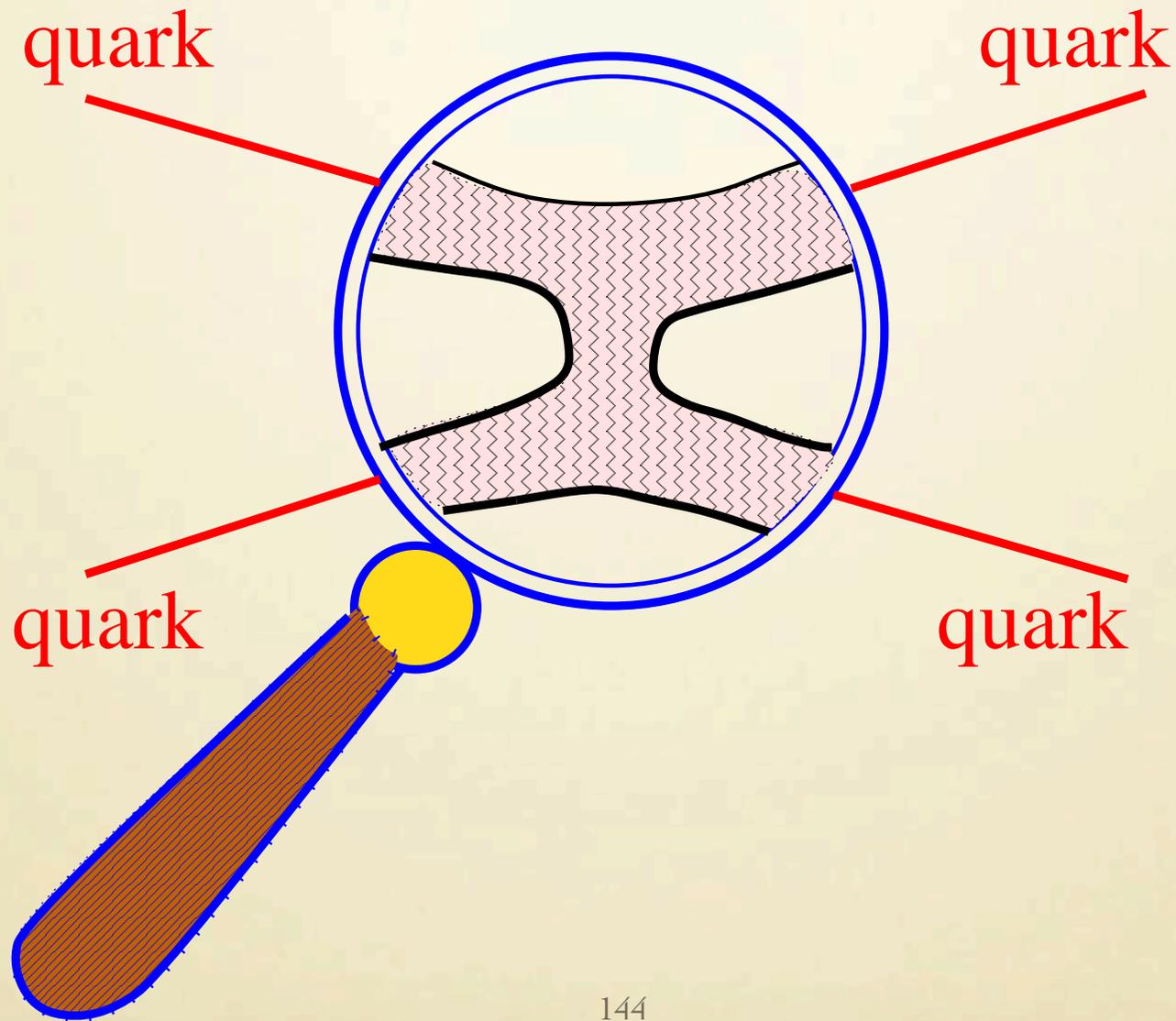
- Hay una **total unificación: todas las partículas son diferentes 'notas' de un solo 'instrumento': la cuerda**



Análogo a los harmónicos de un instrumento de cuerda

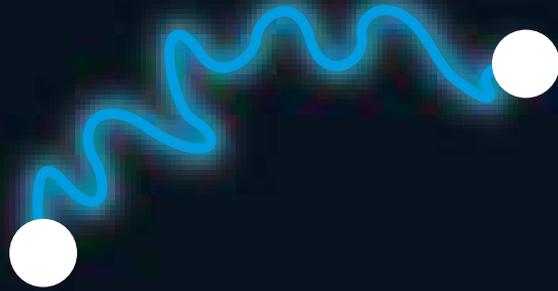


Si suministráramos una enorme cantidad de energía a una partícula elemental revelaríamos su estructura de cuerda



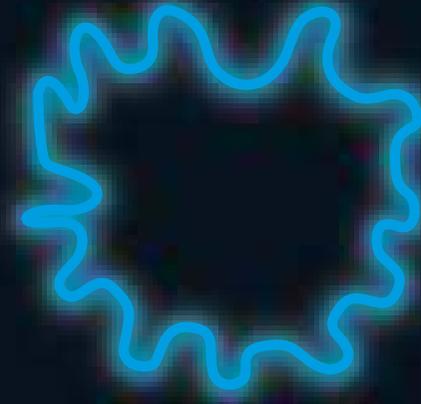
Dos tipos de cuerdas

Cuerdas abiertas



Quarks, leptones,
gluones, W, Z, fotón

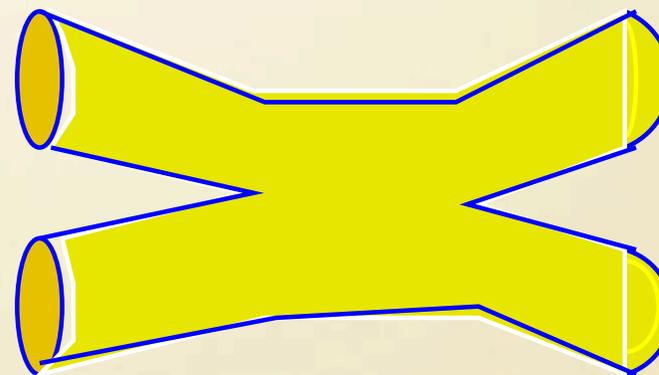
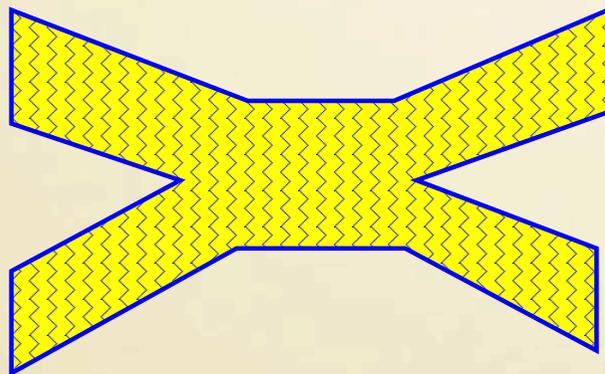
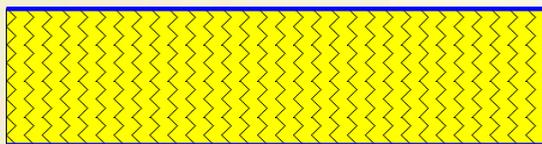
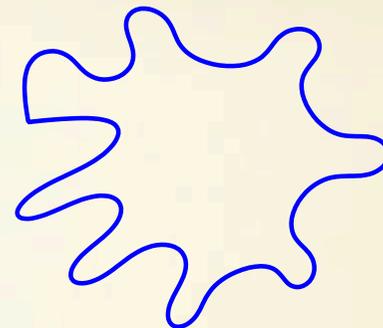
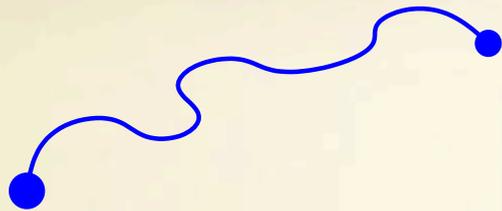
Cuerdas cerradas



Gravitón

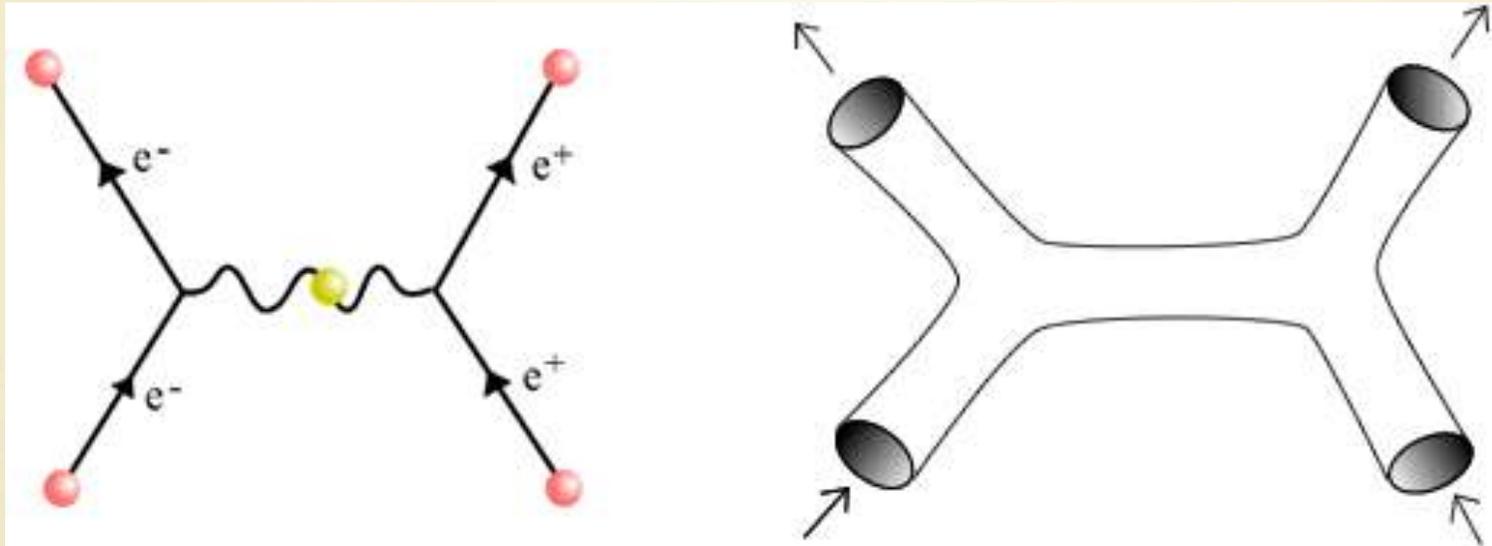
★ La Teoría de Cuerdas exige la existencia de la gravitación

La existencia de la gravitación es una predicción de la Teoría de Cuerdas



Interacciones = Fusión de cuerdas

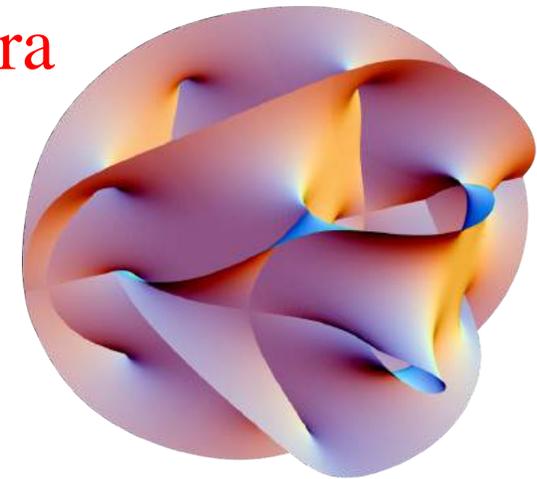
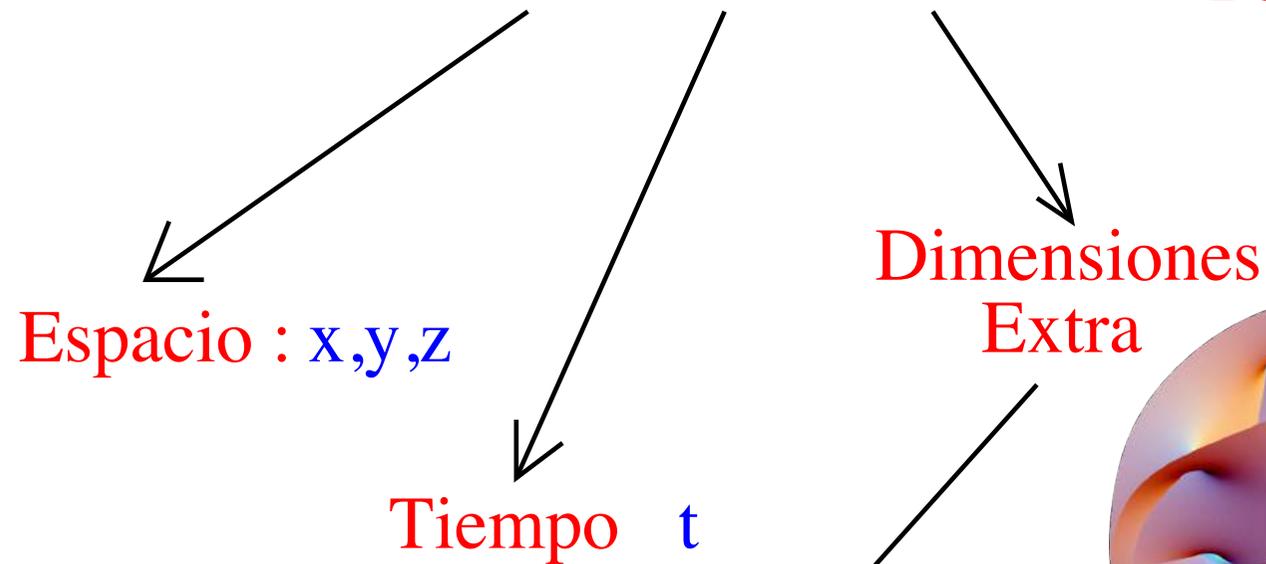
Las interacciones no tienen lugar en un punto,
sino en una **zona extensa**



- El caracter extenso de la cuerdas hace que **desaparezcan los infinitos** al combinar gravitación y mecánica cuántica : **La teoría es finita** .
- Las (super)cuerdas son las primeras teorías encontradas que **compatibilizan mecánica cuántica y gravitación**.

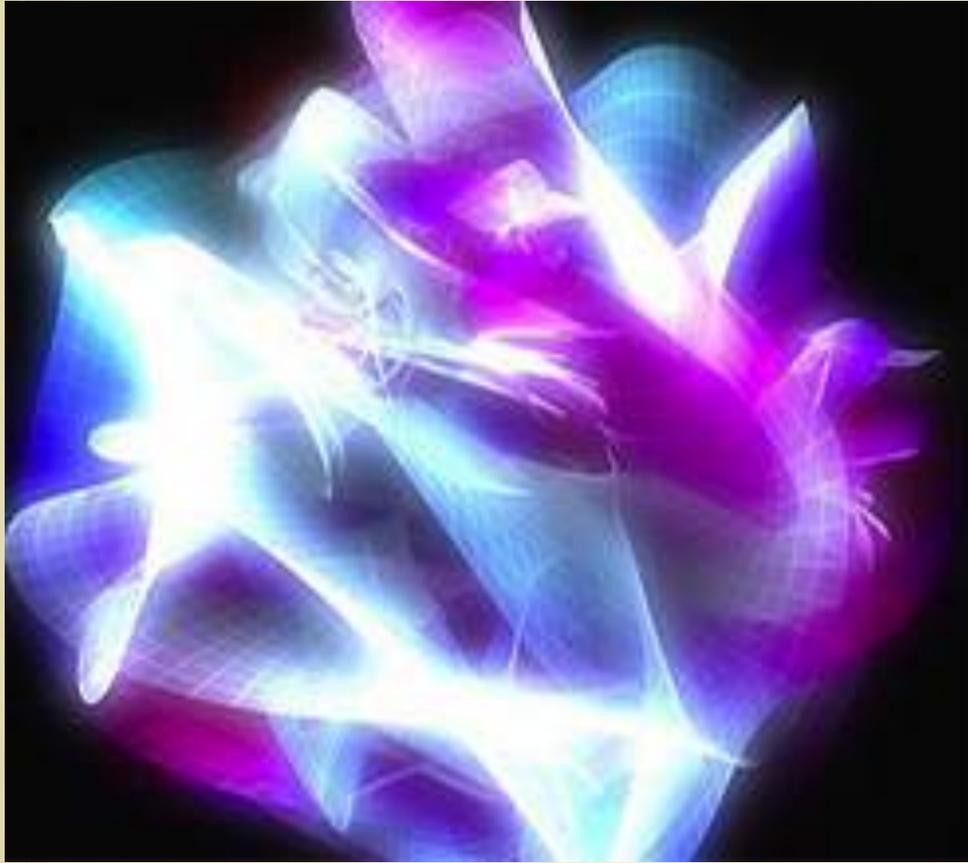
- Las teorías de cuerdas que son **consistentes** tienen de nuevo la propiedad de **supersimetría**: → **Supercuerdas** .
- Se definen de forma natural con **dimensiones espaciales extra**:

$$\text{Dimensiones : } 3 + 1 + 6 = 10$$



Tamaño tan pequeño que son indetectables a bajas energías

6 Dimensiones extra



Puede explicar por qué hay **varias generaciones** de fermiones

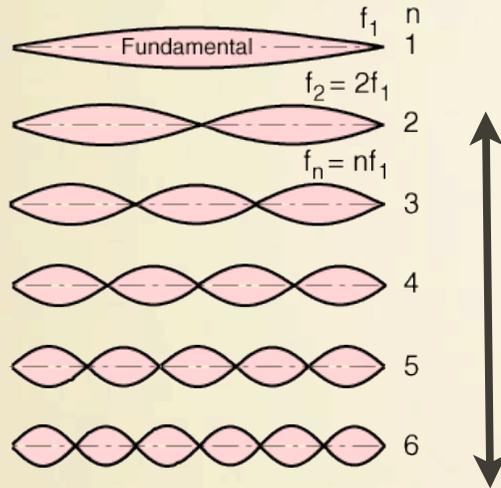
Determina p.e. la estructura de la **masa de leptones y quarks**

Hay soluciones que dan lugar a una **estructura muy, similar al MS**

6 dimensiones extra están 'compactificadas'

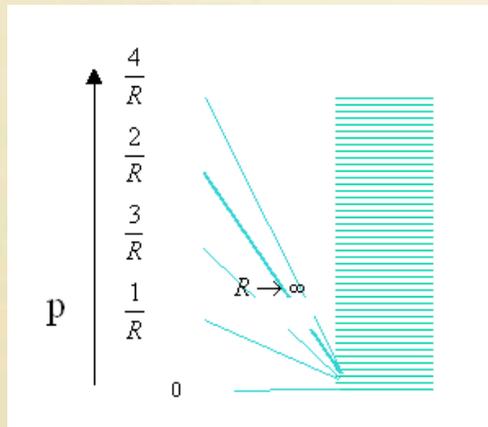


Hay dos tipos de partículas supermasivas:



Excitaciones de la cuerda

$$Masa = M_{cuerda}$$



Réplicas KK de las 6 dimensiones extra

$$Masa = M_{KK}$$

Relacionadas con la escala de la gravitación

$$M_{Planck} = \frac{M_{cuerda}^4}{M_{KK}^3}$$

Epílogo

- La Teoría de Cuerdas reúne todos los requisitos para ser la buscada Teoría Unificada de todas las interacciones.
- Incluye dentro de si ideas como la Unificación, Supersimetría, Dimensiones extra,...
- Es la única candidata a Teoría Cuántica de la Gravitación.



¡Fernando Marchesano y Angel Uranga os contarán mucho mas!



¡Gracias!