

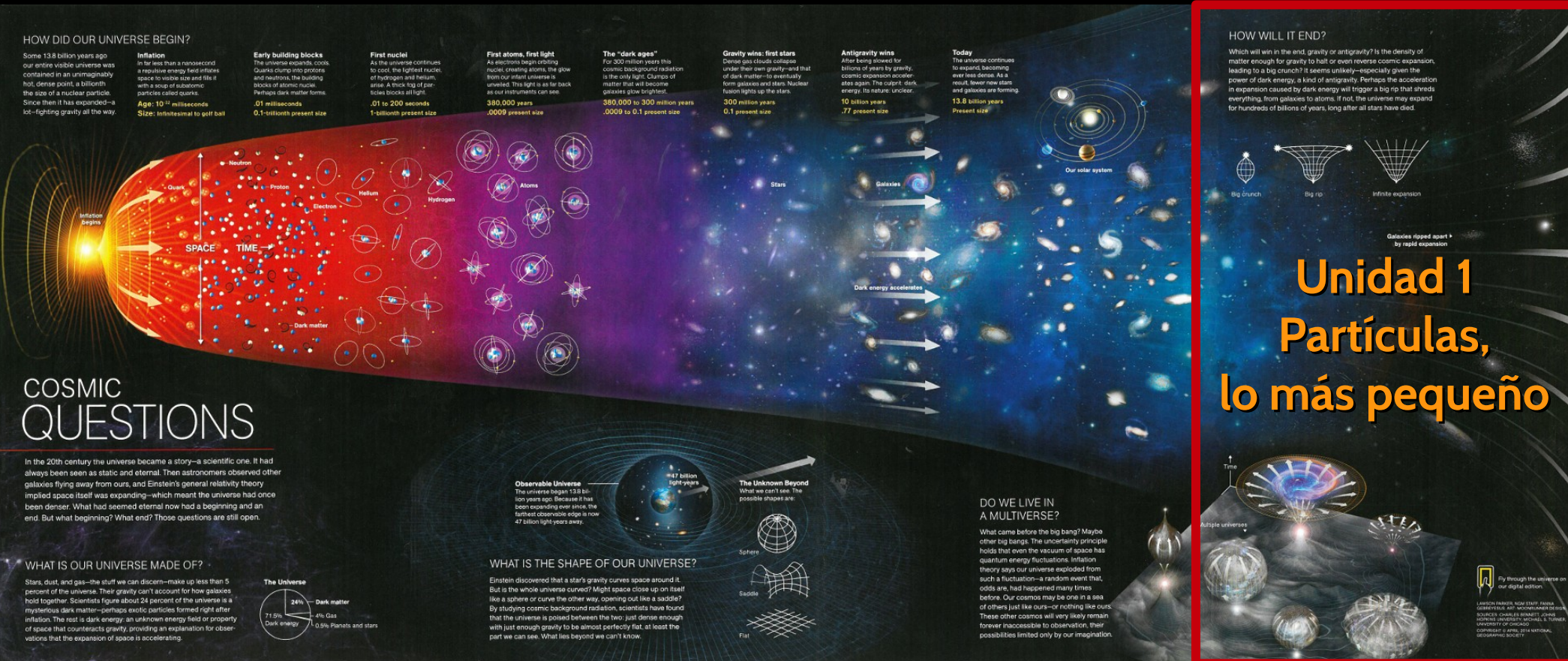
# Universidad Nacional de Río Negro

## Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2021

- **Unidad**      01 – El modelo estándar
- **Clase**        U01 C04 - 04/16
- **Fecha**        25 Ago 2021
- **Cont**          El modelo estándar
- **Cátedra**      Asorey



# Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio





# U1: Partículas, lo más pequeño

## 4 encuentros, del 04/Ago al 25/Ago

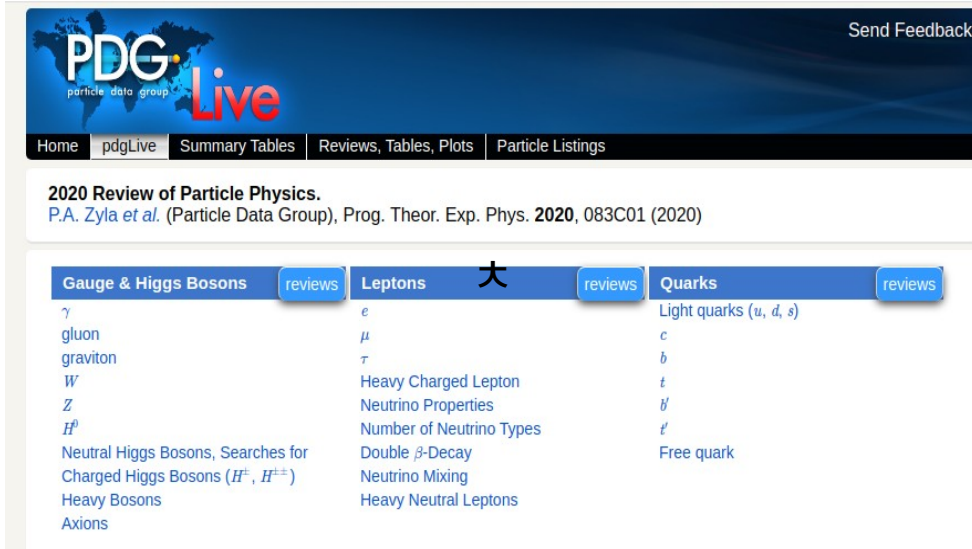
- **Dinámica Relativista.**
- **Física de partículas**
  - Partículas fundamentales: leptones, hadrones, **bosones mensajeros**
- **El modelo estándar**
  - Interacciones fundamentales
  - Simetrías y leyes de conservación
- **Trabajo unidad → fecha máxima de entrega 12/Nov**



**ATLAS**  
EXPERIMENT  
Candidate Event:  
 $pp \rightarrow H(\rightarrow b\bar{b}) + W(\rightarrow \mu\nu)$   
Run: 338712 Event: 335908183  
2017-10-19 23:31:18 CEST



# Particle Data Group (pdg)



The screenshot shows the PDG Live website. At the top is a navigation bar with links: Home, pdgLive, Summary Tables, Reviews, Tables, Plots, and Particle Listings. Below this is a section titled "2020 Review of Particle Physics" by P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020). The main content area is divided into three columns: Gauge & Higgs Bosons, Leptons, and Quarks. Each column has a "reviews" button. The Leptons column is currently selected, showing a list of topics including  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ , Heavy Charged Lepton, Neutrino Properties, Number of Neutrino Types, Double  $\beta$ -Decay, Neutrino Mixing, and Heavy Neutral Leptons.

PDG Live

Home | pdgLive | Summary Tables | Reviews, Tables, Plots | Particle Listings

2020 Review of Particle Physics.  
P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020)

Gauge & Higgs Bosons	Leptons	Quarks
$\gamma$	$e$	Light quarks ( $u, d, s$ )
gluon	$\mu$	$c$
graviton	$\tau$	$b$
$W$	Heavy Charged Lepton	$t$
$Z$	Neutrino Properties	$b'$
$H^0$	Number of Neutrino Types	$t'$
Neutral Higgs Bosons, Searches for	Double $\beta$ -Decay	Free quark
Charged Higgs Bosons ( $H^\pm, H^{\pm\pm}$ )	Neutrino Mixing	
Heavy Bosons	Heavy Neutral Leptons	
Axions		



- Review of particle physics → todo lo que usted siempre quizo saber de física de partículas.
- Disponible en línea en <https://pdglive.lbl.gov/>
- Versión “booklet” (tambien app en play store → pdg)
- Se puede pedir la versión impresa del booklet cada dos años

- Los quarks son partículas elementales, sin estructura interna, de espín  $\frac{1}{2}$  (fermiones) y carga fraccionaria ( $q < 1e$ )
- **Los hadrones están compuestos por quarks**
  - **Bariones  $\rightarrow$  3 quarks ( $qqq$ )**
  - **Antibariones  $\rightarrow$  3 antiquarks ( $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ )**
  - **Mesones  $\rightarrow$  quark + antiquark ( $q\bar{q}$ )**
  - **Bariones exóticos  $\rightarrow$  tetraquarks, pentaquarks (medido 2017)**
  - Primera propuesta: 2 quarks  $\rightarrow$  **up; down**

# Entonces los nucleones

$$p = \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} \quad n = \begin{pmatrix} u \\ d \\ d \end{pmatrix}$$

$$(p)_q = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = +1$$

$$(p)_{NB} = +\frac{1}{3} \times 3 = +1$$

$$(n)_q = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$$

$$(n)_{NB} = +\frac{1}{3} \times 3 = +1$$

$$\bar{p} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{u} \\ \bar{d} \end{pmatrix} \quad \bar{n} = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ \bar{d} \\ \bar{d} \end{pmatrix}$$

$$(\bar{p})_q = -\frac{2}{3} - \frac{2}{3} + \frac{1}{3} = -1$$

$$(\bar{p})_{NB} = -\frac{1}{3} \times 3 = -1$$

$$(\bar{n})_q = -\frac{2}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3} = 0$$

$$(\bar{n})_{NB} = -\frac{1}{3} \times 3 = -1$$



# Otros bariones y mesones:

- Bariones  $\Delta$ :

$$\Delta^{++} = \begin{pmatrix} u \\ u \\ u \end{pmatrix} \quad \Delta^{+} = \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} \quad \Delta^{0} = \begin{pmatrix} u \\ d \\ d \end{pmatrix} \quad \Delta^{-} = \begin{pmatrix} d \\ d \\ d \end{pmatrix}$$

- Mesones  $\pi$ :

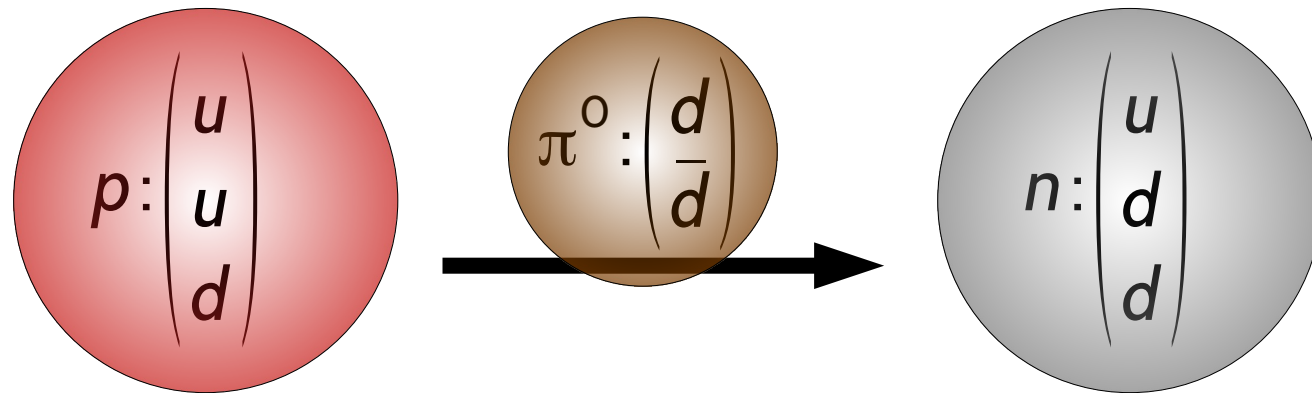
$$\pi^{+} = \begin{pmatrix} u \\ \bar{d} \end{pmatrix} \quad \pi^{-} = \begin{pmatrix} d \\ \bar{u} \end{pmatrix}$$

$$\pi^{0} = \begin{pmatrix} u \\ \bar{u} \end{pmatrix} \quad \text{ó} \quad \pi^{0} = \begin{pmatrix} d \\ \bar{d} \end{pmatrix}$$



# Hasta aquí, empezamos a entender algo

- Interacción de Yukawa



- Y algo del beta:  $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$  es en realidad  $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$  (la carga se conserva: inicial:  $-1/3$ ; final:  $+2/3 - 1 = -1/3$ )





A horizontal banner image. The left side shows a red, glowing sphere with concentric circles and arrows, representing the early universe or cosmic background radiation. The right side shows a blue, starry space with galaxies and arrows pointing towards the right, representing the expansion of the universe.

Pero no todo:

- Seguimos convirtiendo “hadrones” en “leptones”
- No resolvimos lo de la carga fuerte, sólo encontramos un mecanismo
- En 1947 se encuentra una barión,  $\Lambda^0$ , con un tiempo de vida media de  $10^{-10}$  s ( $\gg \sim 10^{-23}$  s observados en bariones)
- A este comportamiento “extraño” se lo llamó **extrañeza** y se supuso que había una ley de conservación asociada
- Luego, con el modelo de los quarks, se asignó un nuevo tipo de quark: **s**

$$\Lambda^0 = (u d s)$$

# Extraño y encanto



- quark s (strange)
  - Masa: 93 MeV (\*)
  - Espín: 1/2
  - Carga: -1/3
  - Número bariónico: +1/3
  - Extrañeza: -1



- quark c (charm)
  - Masa: 1,27 GeV (\*)
  - Espín: 1/2
  - Carga: +2/3
  - Número bariónico: +1/3
  - Encanto: +1



# Y ahora aparecen un montón de combinaciones

- Mesones extraños: Kaones (mesones K),  $\tau \sim 10^{-8} \text{ s}$

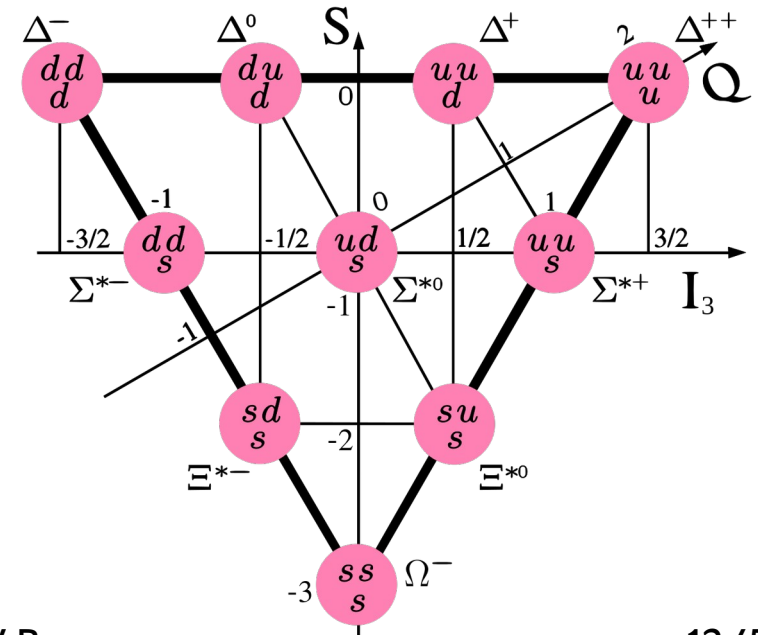
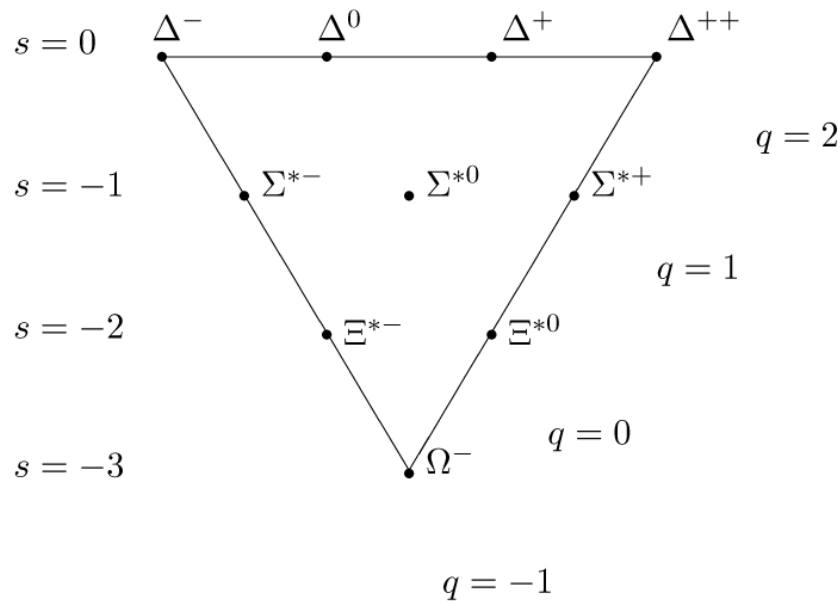
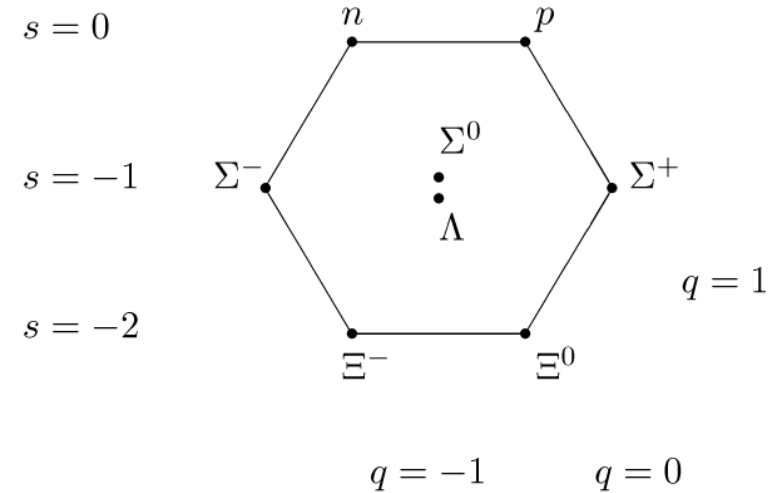
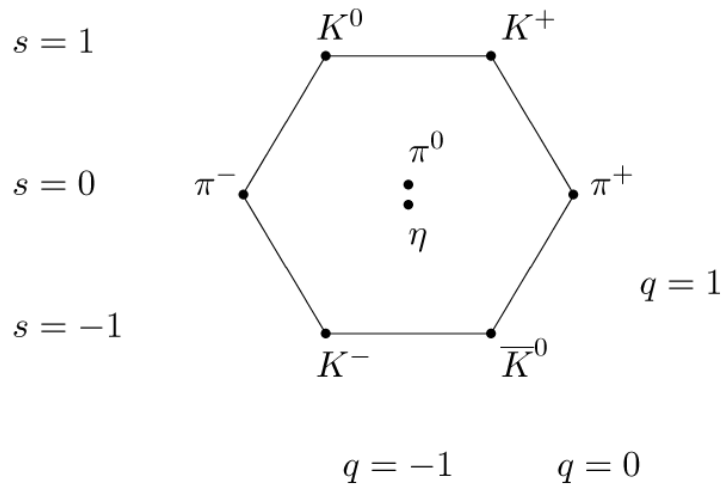
$$K^+ = \begin{pmatrix} u \\ \bar{s} \end{pmatrix} \quad K^- = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ s \end{pmatrix} \quad K^0 = \begin{pmatrix} d \\ \bar{s} \end{pmatrix} \quad \bar{K}^0 = \begin{pmatrix} \bar{d} \\ s \end{pmatrix}$$

- Bariones extraños: Sigmas ( $\Sigma$ )

$$\Sigma^+ = \begin{pmatrix} u \\ u \\ s \end{pmatrix} \quad \Sigma^0 = \begin{pmatrix} u \\ d \\ s \end{pmatrix} \quad \Sigma^- = \begin{pmatrix} d \\ d \\ s \end{pmatrix}$$



# Y además con los aceleradores...

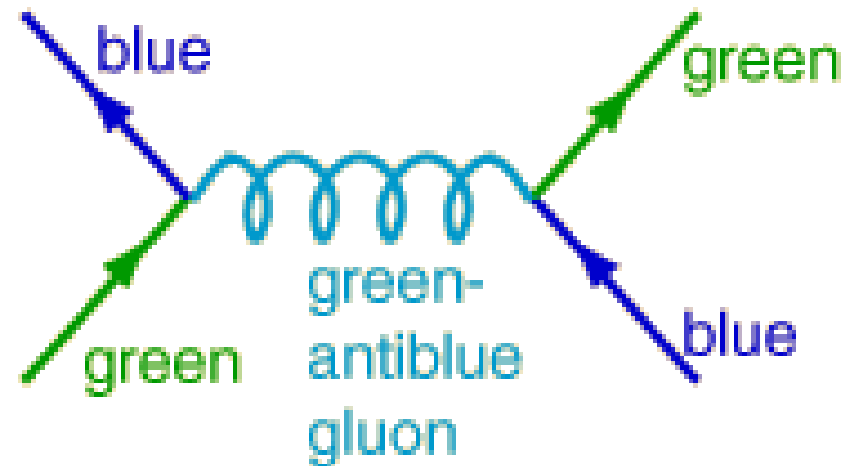




- Pensemos en el barión  $\Delta^{++} = (u u u)$  o el barión  $\Delta^{-} = (d d d)$
- Los quarks son fermiones
  - ¿Qué pasa con el principio de exclusión de Pauli?
- → **nuevo número cuántico con tres valores posibles**
- Este valor no es “visible” desde el exterior → las combinaciones de quarks son “neutras”
  - Bariones: tres quarks → tres valores posibles
  - Mesones: quark-antiquark → valores opuestos → suma 0
- **$r + g + b = \text{blanco}$  ó  $r \langle r \rangle = g \langle g \rangle = b \langle b \rangle = \text{blanco}$**

# Los mediadores de color

- El gluón (pegamento) es el mediador de la fuerza fuerte
- Los gluones son bicolores: portan un color y un anticolor
- Hay 8 combinaciones independientes posibles
- Un quark de un color intercambia un gluón con otro quark (interacción fuerte) y cambia de color



Feynman diagram for an interaction between quarks generated by a gluon.



# La foto de la familia hasta aquí

	I Gen	II Gen	
masa →	2,4 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>γ</b> Foton
	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>g</b> Gluon
masa →	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	
carga →	0	0	
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
nombre →	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	<b>e</b> Electrón	<b>μ</b> Muón	

Con ustedes, los  
**Quarks y gluones**  
(Three quarks for Muster Mark!)

# Intercambio de color como interacción fuerte

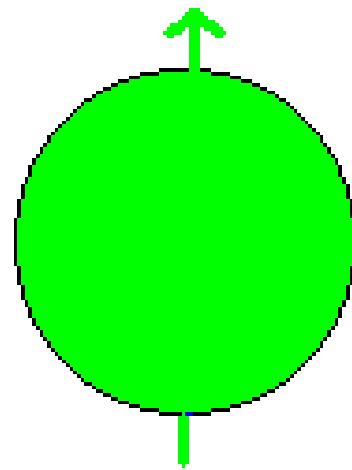
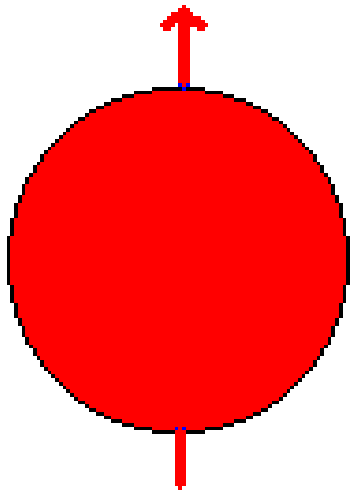
- La interacción se produce mediante el intercambio de gluones para intercambiar los colores de los quarks respectivos
- Los estados finales se presentan como combinaciones de los tres colores y sus anticolores

$$\frac{(r \bar{r} + b \bar{b} + g \bar{g})}{\sqrt{3}}$$


- Es decir, hay igual probabilidad de medir cada uno de esos pares



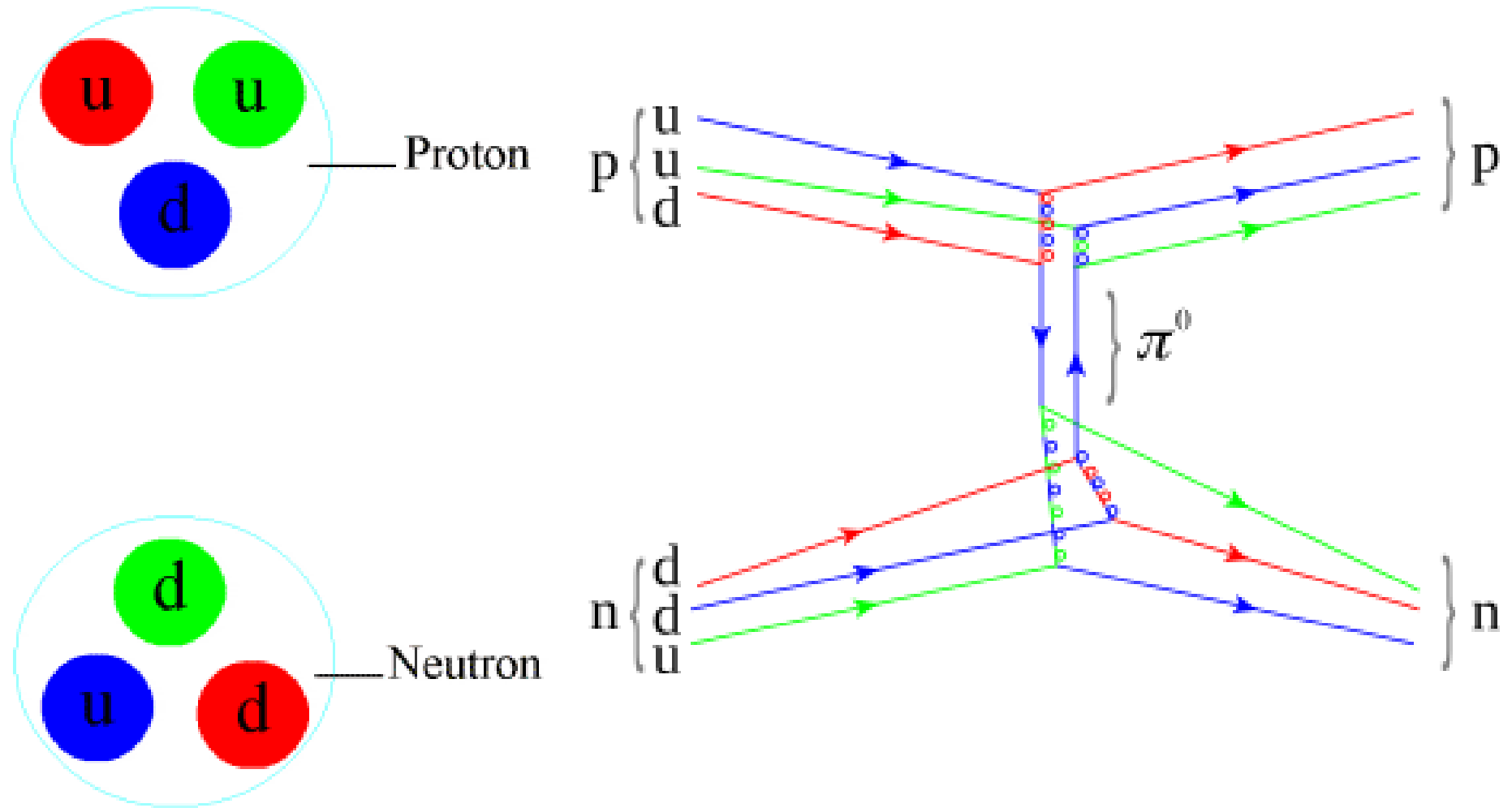
# Intercambio de color como interacción fuerte



# Intercambio de color como interacción fuerte

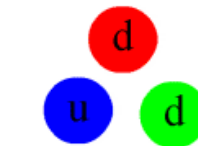
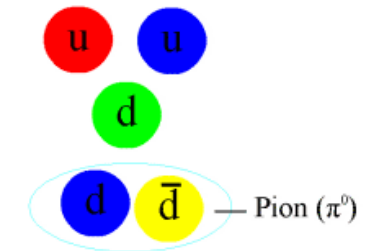
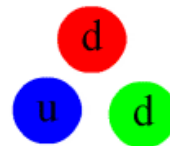
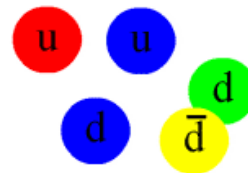
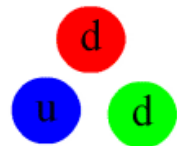
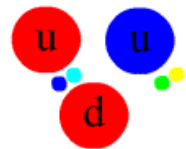
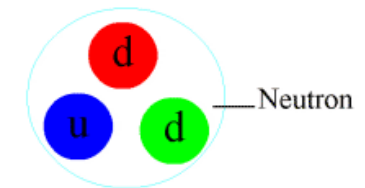
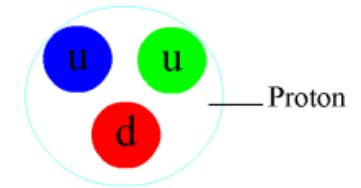
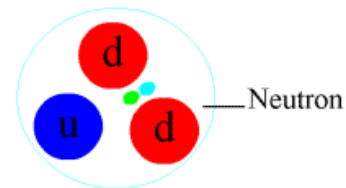
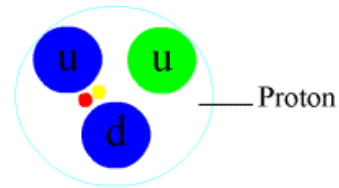
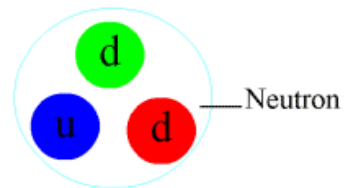
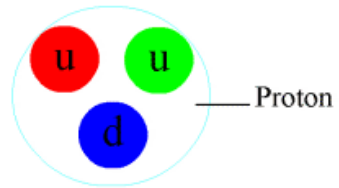
- Sea en un barión un par de quarks:  $u d$
- El quark  $u$  emite un gluón rojo (su color) y antiverde (el anticolor del otro) Queda verde:  $u \Rightarrow d$   

- El quark  $d$  recibe antiverde y rojo, queda rojo:  $u d$
- El resultado final es el intercambio de carga de color de ambos quarks:  $u d$

# Consideremos el intercambio de Yukawa desde la perspectiva del intercambio de gluones

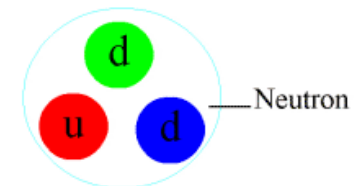
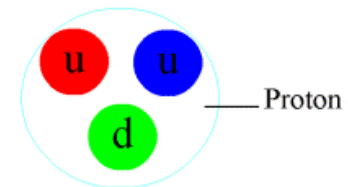
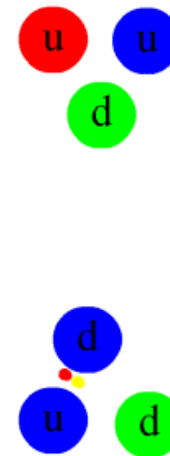
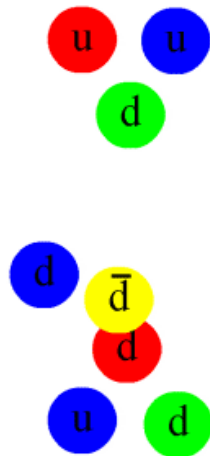




# Interacción de Yukawa con piones cargados



# Interacción de Yukawa con piones cargados





# ¿Y el decaimiento $\beta^-$ ?

- Recordemos:  $n \rightarrow p^+ e^- \bar{\nu}_e$   
 $(udd) \rightarrow (udu) e^- \bar{\nu}_e$   
 $d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$
- Este proceso es diferente a los que hemos visto:
  - La interacción EM no cambia las cargas ni los sabores
  - La interacción fuerte sólo interactúa con los quarks intercambiando su color
  - **Aquí vemos un cambio de sabor**
    - un quark  $d$  cambió de **sabor** a un quark  $u$ .





# ¿Y el decaimiento del $\mu^-$ ?

- Recordemos:

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

- Como antes:
  - La interacción EM no cambia las cargas ni los sabores
  - Son todos leptones, no hay interacción fuerte
  - **Y nuevamente vemos un cambio de sabor**
    - un leptón  $\mu^-$  cambió de **sabor** a un leptón  $e^-$
    - el resto es por conservación de los números leptónicos



# ¿Y el decaimiento<sup>-</sup> del $\pi^-$ ?

- Recordemos:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

$$\begin{pmatrix} d \\ \bar{u} \end{pmatrix} \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

- Como antes:
  - La interacción EM no cambia las cargas ni los sabores
  - En el miembro derecho son todos leptones, no hay interacción fuerte
  - **Y nuevamente vemos un cambio de sabor:**
    - Dos quarks cambian por dos leptones



# La interacción débil

- Cuarta interacción fundamental (+QED, QCD, Grav)
- Hay dos tipos de mediadores de la interacción débil:
  - **Cargados:  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $\tau \sim 10^{-24}$  s;**
  - **Neutros:  $Z^0$**
- Responsable de
  - **Cambios de sabor entre partículas del mismo tipo**
  - **Conexión entre quarks y leptones**
- Interacciones de corriente cargada implica cambio de carga eléctrica en emisores y receptores
- Mediadores muy masivos  $\rightarrow$  corto alcance, interacción muy débil (QED  $\sim 0.01$ ; QCD  $\sim 1$ ; EWT  $\sim 10^{-7}$ )



# Mediadores débiles: Bosones $W^+$ , $W^-$ y $Z^0$

- Bosones  $W^\pm$

- Masa: 80,38 GeV
- Espín: 1
- Carga:  $\pm 1$
- Color: 0
- Vida media:  $\sim 10^{-25}$  s



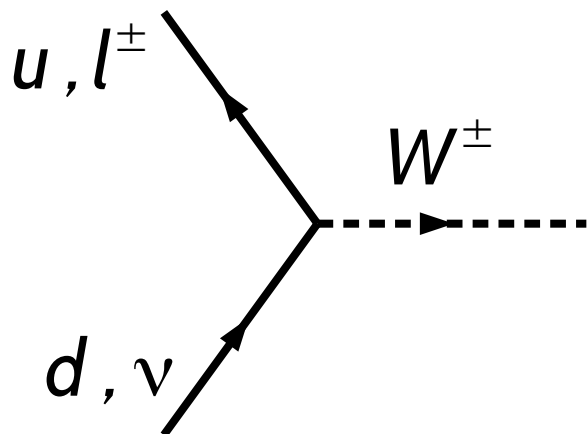
- Boson  $Z^0$

- Masa: 91,18 GeV
- Espín: 1
- Carga: 0
- Color: 0
- Vida media:  $\sim 10^{-25}$  s



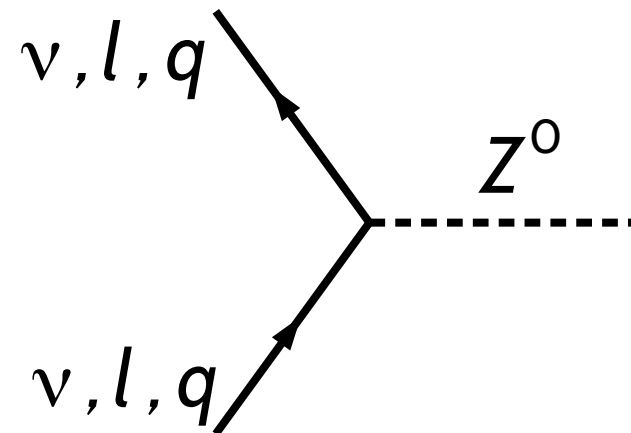
- Corriente cargada

- Interacciones que implican cambio de carga entre sabores o tipos (fermiones)
- Tienen carga eléctrica, se acoplan con los fotones
- Admite cambios de masa

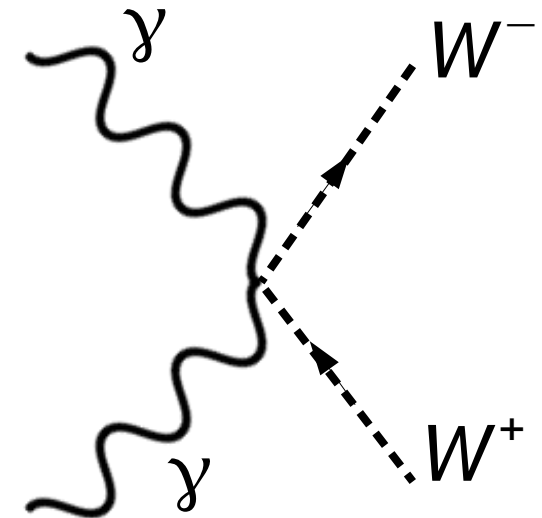
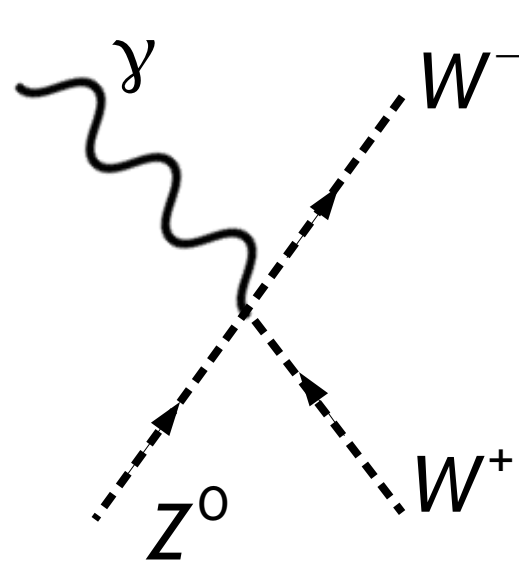
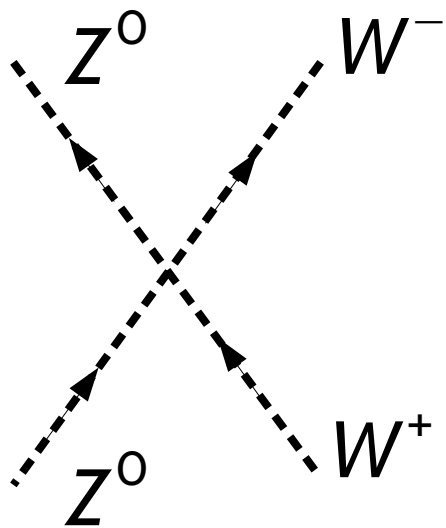
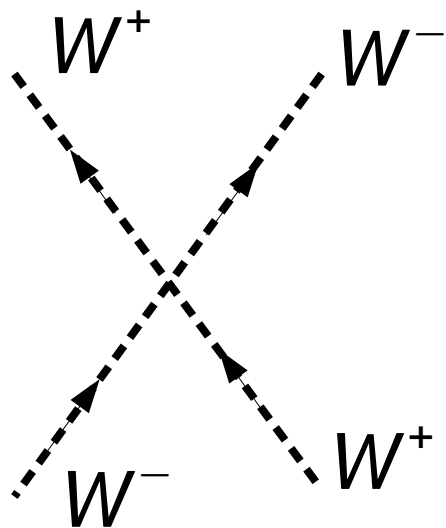
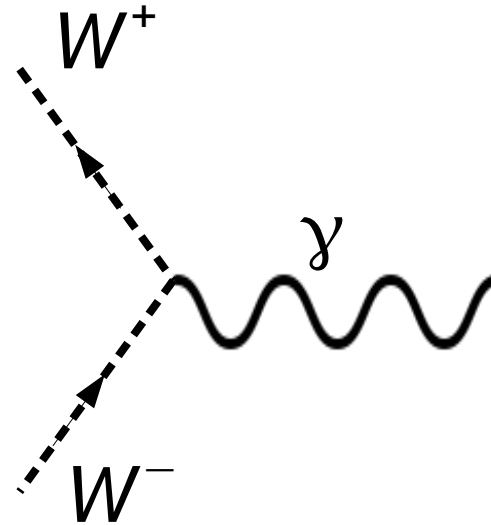
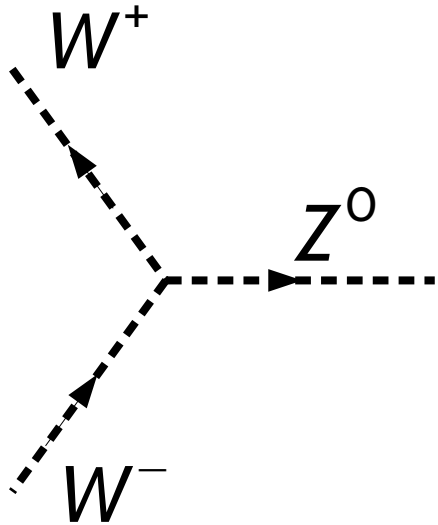


- Corriente neutra

- Todos los fermiones se acoplan con el bosón  $Z^0$
- No hay cambio de carga
- Son responsables de las interacciones de los neutrinos con la materia



# Vértices débiles autointeracturantes



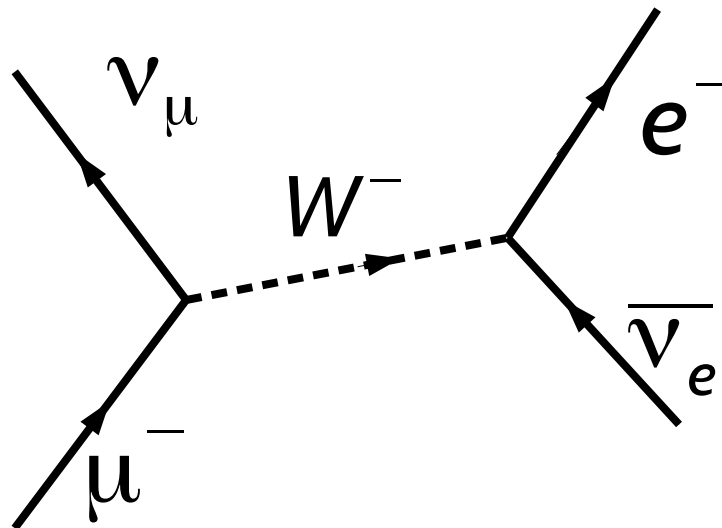


# Decaimiento del muón

- Proceso electrodébil de corriente cargada

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

- Un muón se acopla con un bosón  $W^-$  y emite un neutrino muónico
- El bosón  $W^-$  decae en electrón y un antineutrino electrónico

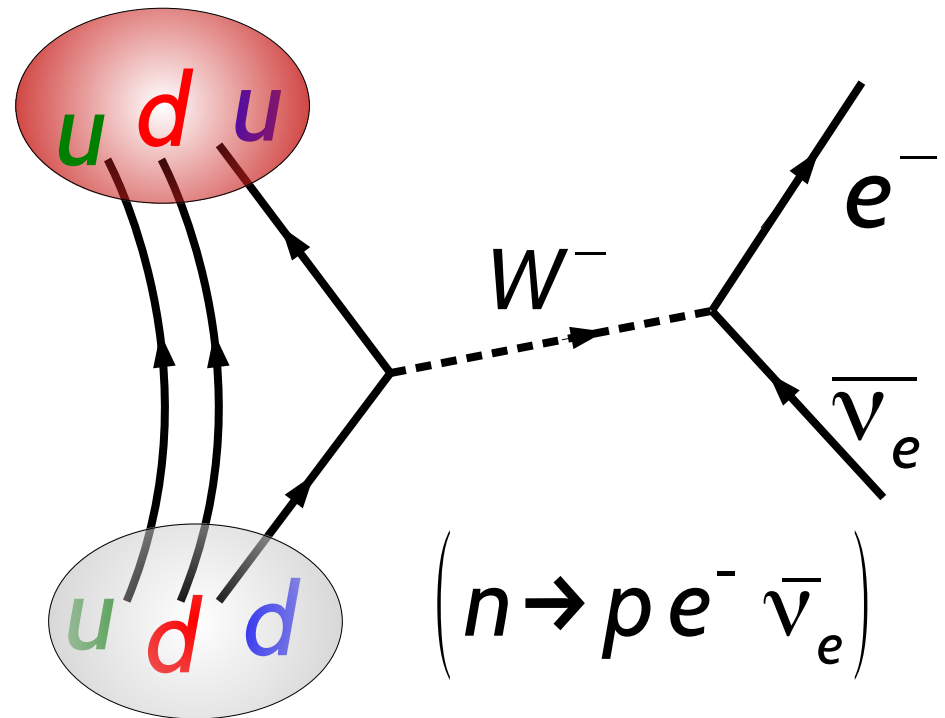


# Decaimiento beta (al fin!)

- Proceso electrodébil de corriente cargada

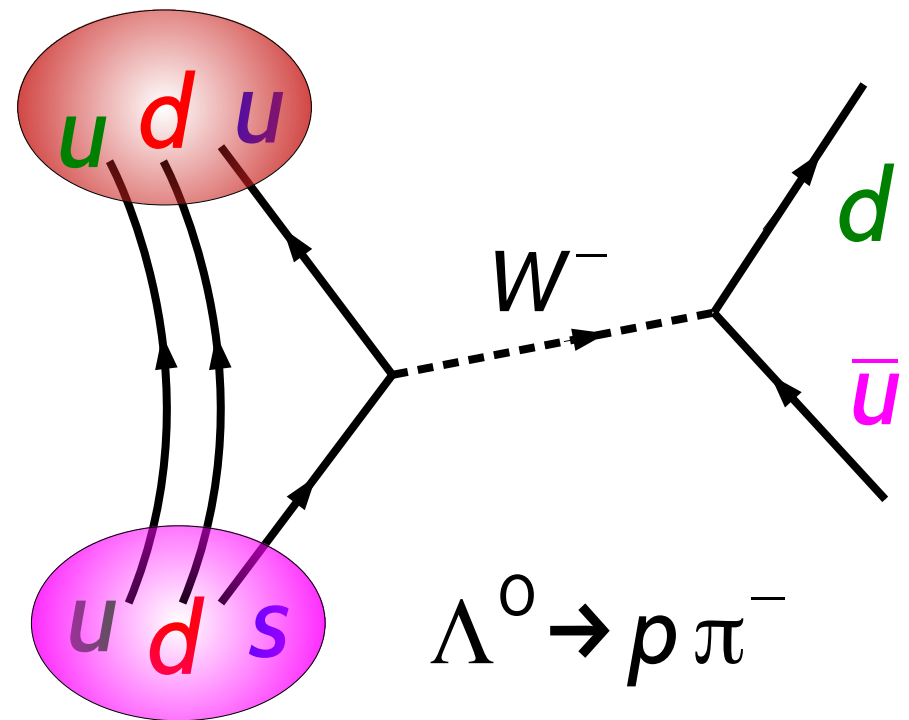
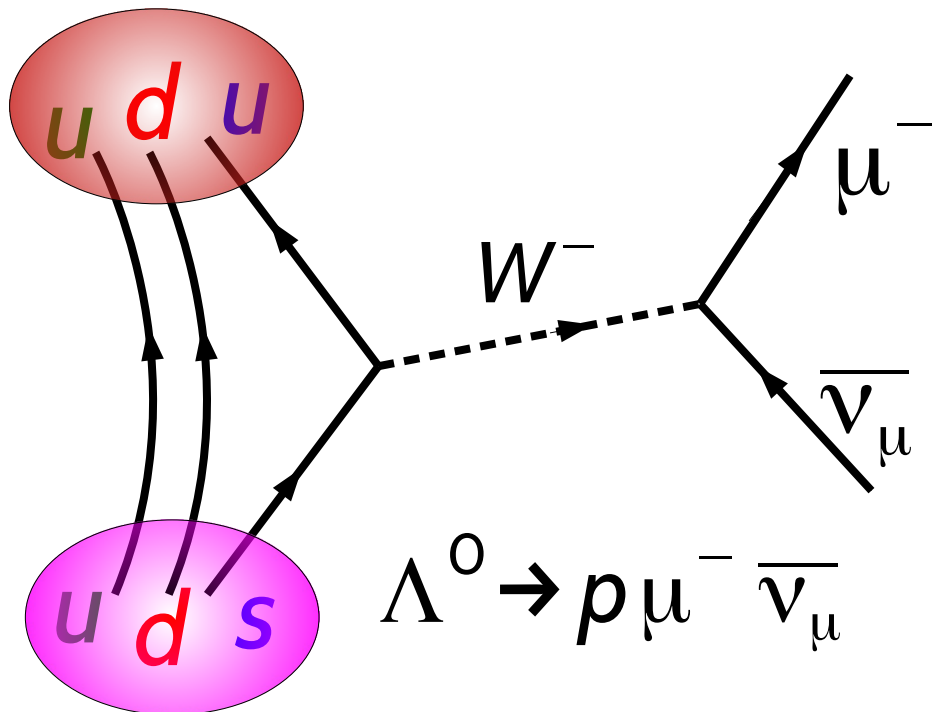
$$\left( n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \right) \quad d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$$

- Un quark  $d$  se acopla con un bosón  $W^-$  y se emite un quark  $u$ . (notar que el color no cambia)
- El  $W^-$  decae



# Decaimiento extraño $\Lambda^0$

- Proceso electrodébil de corriente cargada. Dos posibles  
 $\Lambda^0 \rightarrow p \mu^- \bar{\nu}_\mu : s \rightarrow u \quad \mu^- \bar{\nu}_\mu$        $\Lambda^0 \rightarrow p \pi^- : s \rightarrow u \quad (\bar{u} d)$



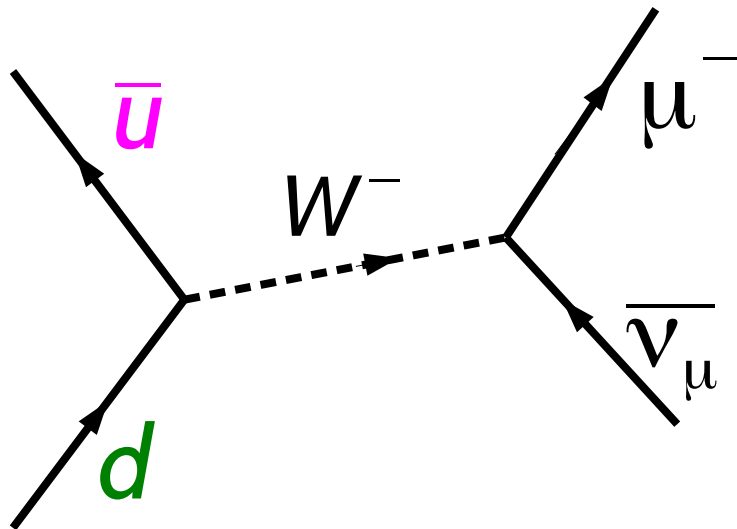


# Decaimiento del pión cargado

- Proceso electrodébil de corriente cargada

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

- Un quark  $d$  interactúa débilmente y se aniquilan emitiendo un bosón  $W^-$
- El  $W^-$  decae en un par electron – antineutrino



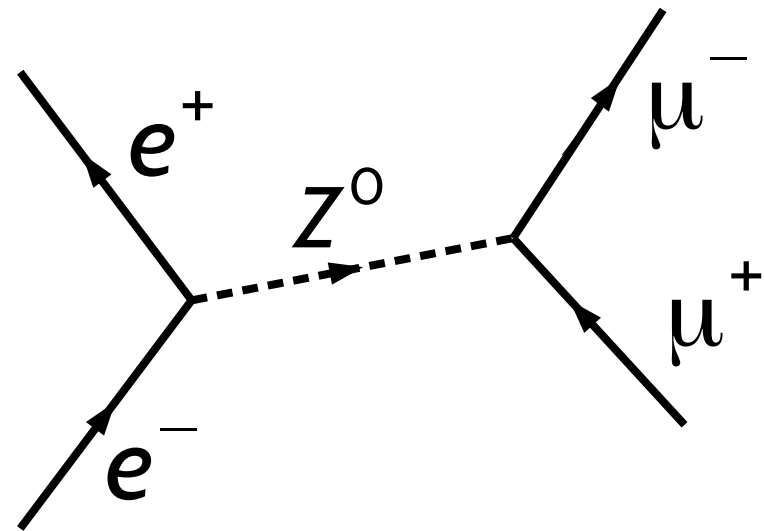
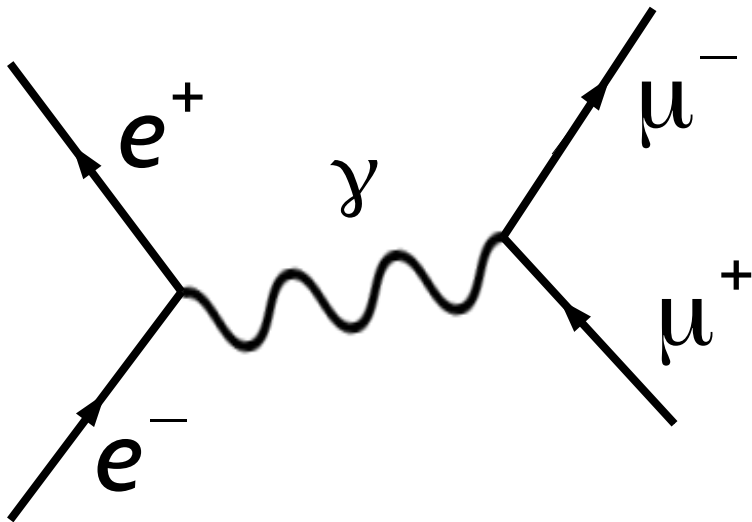
$$\begin{pmatrix} d \\ \bar{u} \end{pmatrix} \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

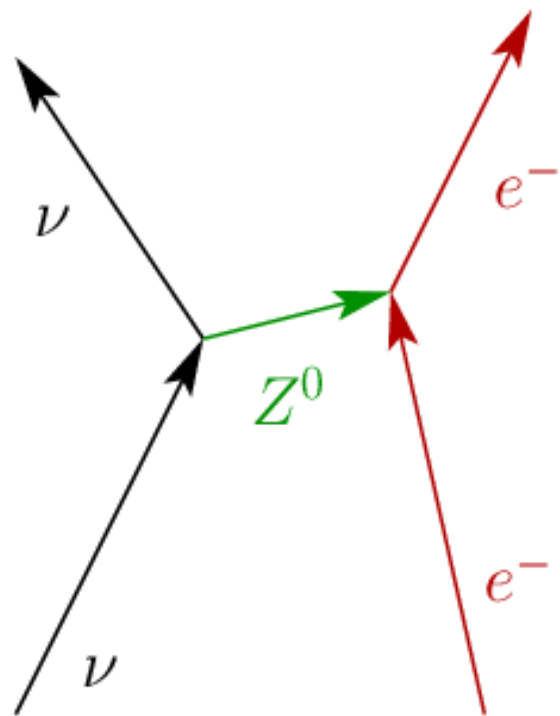
# Interacciones débiles de corriente neutra

- Imaginemos la aniquilación – creación de un par, p ej:

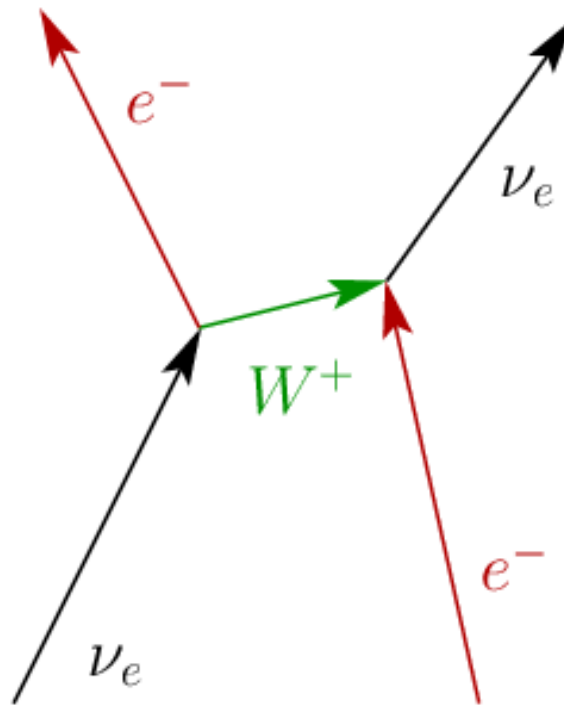
$$e^- e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+$$

- Dos formas posibles: Electromagnética o débil

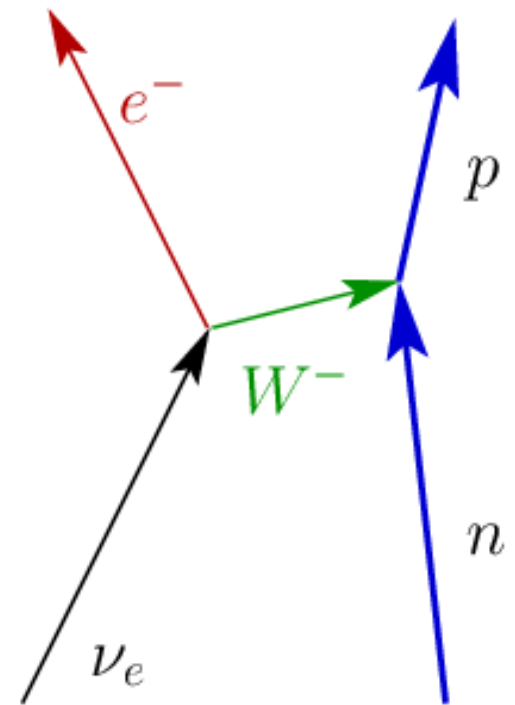




Neutral current



Charged current





# La foto de la familia hasta aquí

	I Gen	II Gen	
masa →	2,4 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>γ</b> Foton
	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>g</b> Gluon
masa →	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>
carga →	0	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	<b>Z<sup>0</sup></b> Boson Z
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> Electrón	<b>μ</b> Muón	<b>W<sup>±</sup></b> Boson W

Bosones de gauge

Con ustedes, los

**Bosones de Gauge**

(calibre, mediadores de interacciones fundamentales)

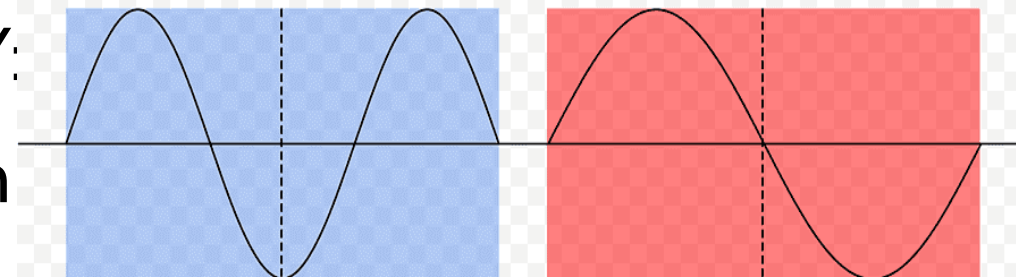
- El operador de Paridad transforma a un objeto en su imagen especular:  $\wp \Psi(\mathbf{x}) = P \Psi(-\mathbf{x})$ ,  $P$  es una constante
- Las leyes físicas son invariantes al marco de referencia. Si aplico dos veces:

$$\wp^2 \Psi(\mathbf{x}) = \wp(\wp(\Psi(\mathbf{x}))) = P \wp(\Psi(-\mathbf{x})) = P^2 \Psi(\mathbf{x}) \rightarrow P = \pm 1$$

- Si  $P=+1 \rightarrow$  par; si  $P=-1 \rightarrow$  impar
- Aplicado a una partícula,  $\alpha$  es la paridad intrínseca o **paridad**
- Por convención, quarks y leptones cargados,  $P=+1$ .
- Neutrinos no tienen paridad. Y:

$$\wp(\text{antifermión}) = - \wp(\text{fermión})$$

$$\wp(\text{bosón}) = + \wp(\text{bosón})$$

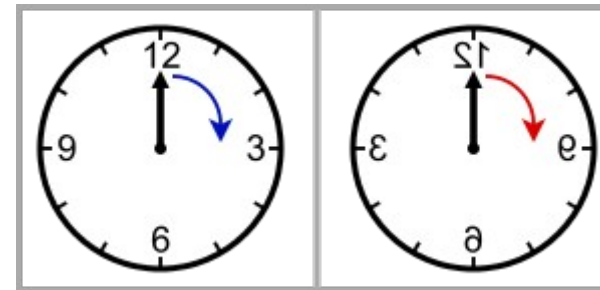
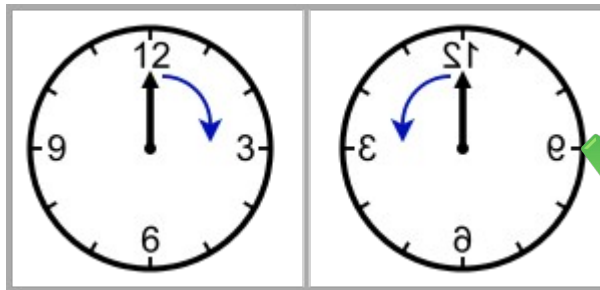


Even Wavefunction

Odd Wavefunction

# El Universo izquierdo

- En la década del '50 Yang y Lee  $\rightarrow$  las interacciones débiles no preservan la paridad



$$\begin{aligned}
 \wp \nu = ? & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \wp \nu_L = +1 \\ \wp \nu_R = ? \\ \wp \bar{\nu}_L = ? \\ \wp \bar{\nu}_R = -1 \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} \nu \rightarrow \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \\ \bar{\nu} \rightarrow \begin{pmatrix} \bar{\nu}_R \\ \bar{\nu}_L \end{pmatrix} \end{array}
 \end{aligned}$$



# Ángulo de Cabibbo

- Leptones  $(e, \mu, \nu_e, \nu_\mu)$  y quarks  $(u, d, c, s)$
- **Hipótesis:** hay autoestados que interactúan débilmente,  $d'$  y  $s'$ , que no son autoestados de masa  $d$  y  $s$ .
- $d'$  es un estado de mezcla entre  $d$  y  $s$ , y se relaciona con la probabilidad de que  $d$  y  $s$  se transformen en  $u$  (y  $s' \rightarrow c$ )

$$\begin{aligned} d' &= V_{ud} d + V_{us} s & \rightarrow & \quad d' = \cos \theta_c d + \sin \theta_c s \\ s' &= V_{cd} d + V_{cs} s & \quad s' &= -\sin \theta_c d + \cos \theta_c s \end{aligned}$$

Matriz de Cabibbo  $\theta_c$

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \end{bmatrix}$$

Ángulo de Cabibbo  $\theta_c$

$$\tan \theta_c = \frac{\sin \theta_c}{\cos \theta_c} = \frac{0.22534}{0.97427} \rightarrow \theta_c = 13.02^\circ$$





## Tercera generación

- Kobayashi y Maskawa generalizan el modelo por razones teóricas a tres generaciones de quarks.
- Proponen dos nuevos quarks (t, b)
  - top (arriba) y bottom (abajo)
- Tsai (1971) propone una nueva generación de leptones:
  - Tau y neutrino tau :  $\tau$   $\nu_\tau$

# Top y Bottom



- quark t (top)
  - Masa: 172.76 GeV (\*)
  - Espín: 1/2
  - Carga: +2/3
  - Número bariónico: +1/3
  - Número top: +1



- Quark b (bottom)
  - Masa: 4,18 GeV (\*)
  - Espín: 1/2
  - Carga: -1/3
  - Número bariónico: +1/3
  - Número bottom: -1

# Tau y neutrino

- $\tau$  (tau)

- Masa: 1,777 GeV
- Espín: 1/2
- Carga: -1
- Número leptónico: +1
- Número leptónico tau: +1
- Vida media:  $2.9 \times 10^{-13}$  s



- $\nu_{\tau}$  (neutrino tau)

- Masa:  $>0$
- Espín: 1/2
- Carga: 0
- Número leptónico: +1
- Número leptónico tau: +1







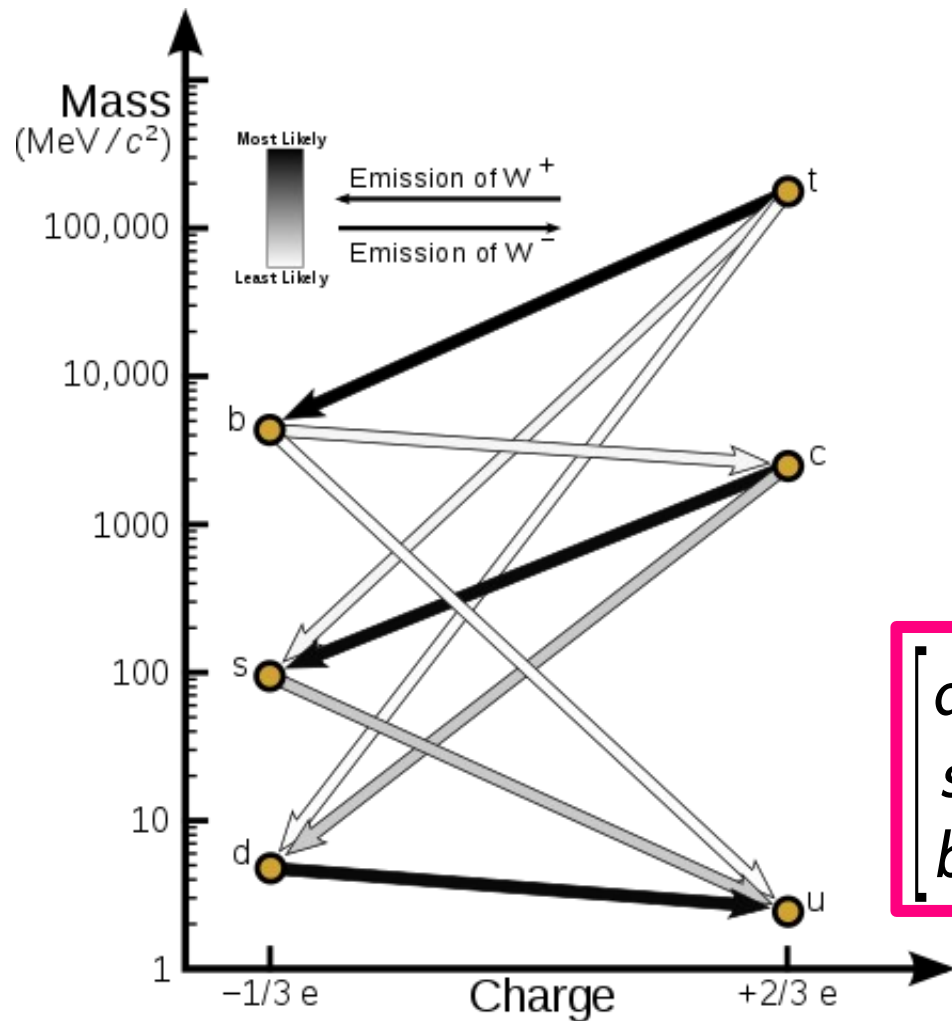
Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III	
masa →	2,4 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	171,2 GeV/c <sup>2</sup>	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Foton
	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon
masa →	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	<15,5 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>
carga →	0	0	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	<b>ν<sub>τ</sub></b> Neutrino tauónico	<b>Z<sup>0</sup></b> Boson Z
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> Electrón	<b>μ</b> Muón	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> Boson W

Bosones de gauge



# Matriz CKM: Cabibbo-Kobayashi-Maskawa



## Matriz CKM

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9743 & 0.2253 & 0.0035 \\ 0.2252 & 0.9734 & 0.0412 \\ 0.0087 & 0.0404 & 0.9991 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \\ b \end{bmatrix}$$

# La foto de la familia hasta aquí

Tres generaciones de la materia (fermiones)

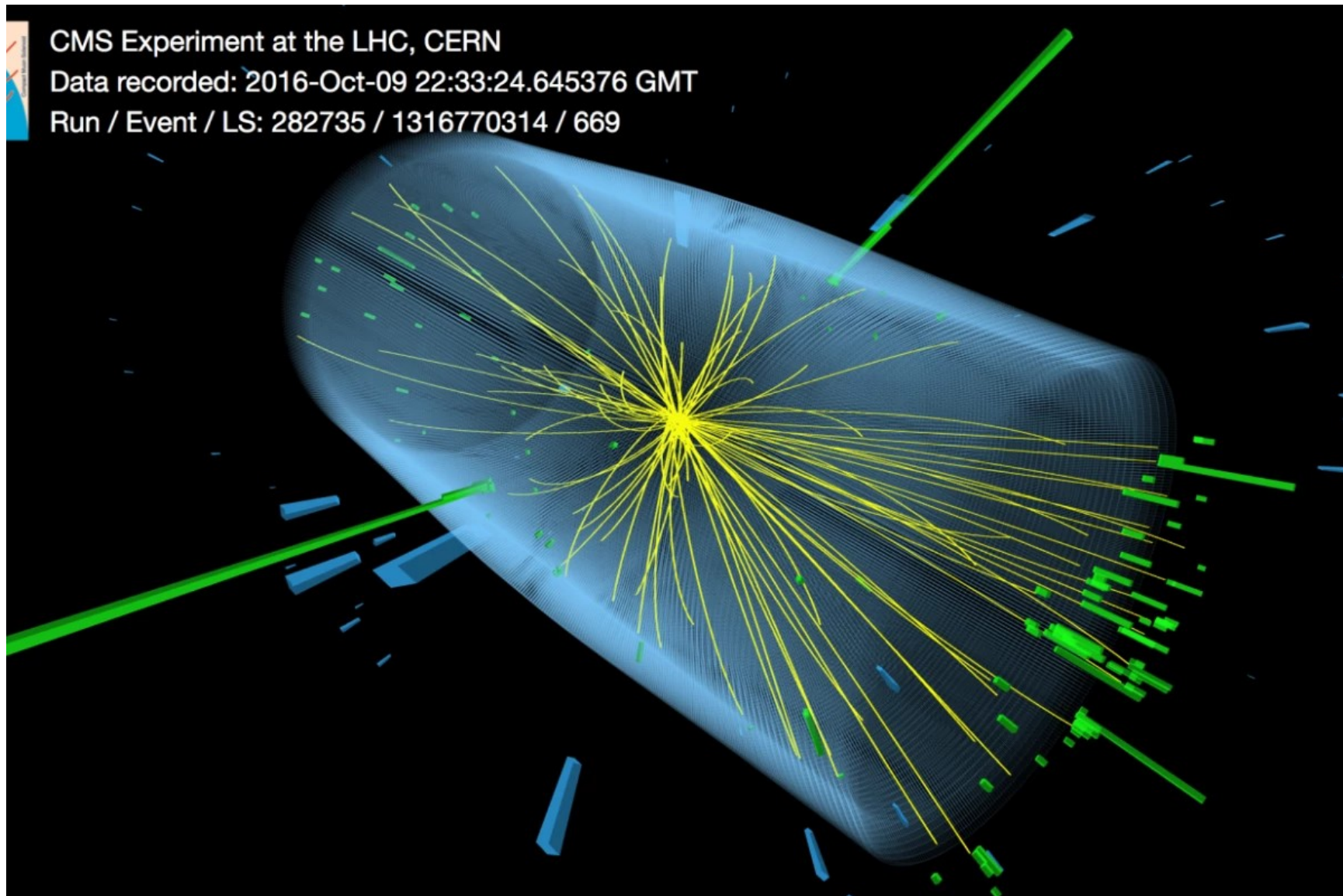
	I	II	III	
masa →	2,4 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	171,2 GeV/c <sup>2</sup>	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Foton
Quark	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon
masa →	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	<15,5 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>
carga →	0	0	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	<b>ν<sub>τ</sub></b> Neutrino tauónico	<b>Z<sup>0</sup></b> Boson Z
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> Electrón	<b>μ</b> Muón	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> Boson W

Bosones de gauge

– Jerarquía de masa →



# El bosón de Higgs → la masa





# El vacío está lleno de un campo escalar





**Las partículas interactúan con ese campo:  
a mayor interacción  $\rightarrow$  más masa (efectiva)**





# El campo de Higgs autointeractúa...





# El bosón de Higgs tiene masa





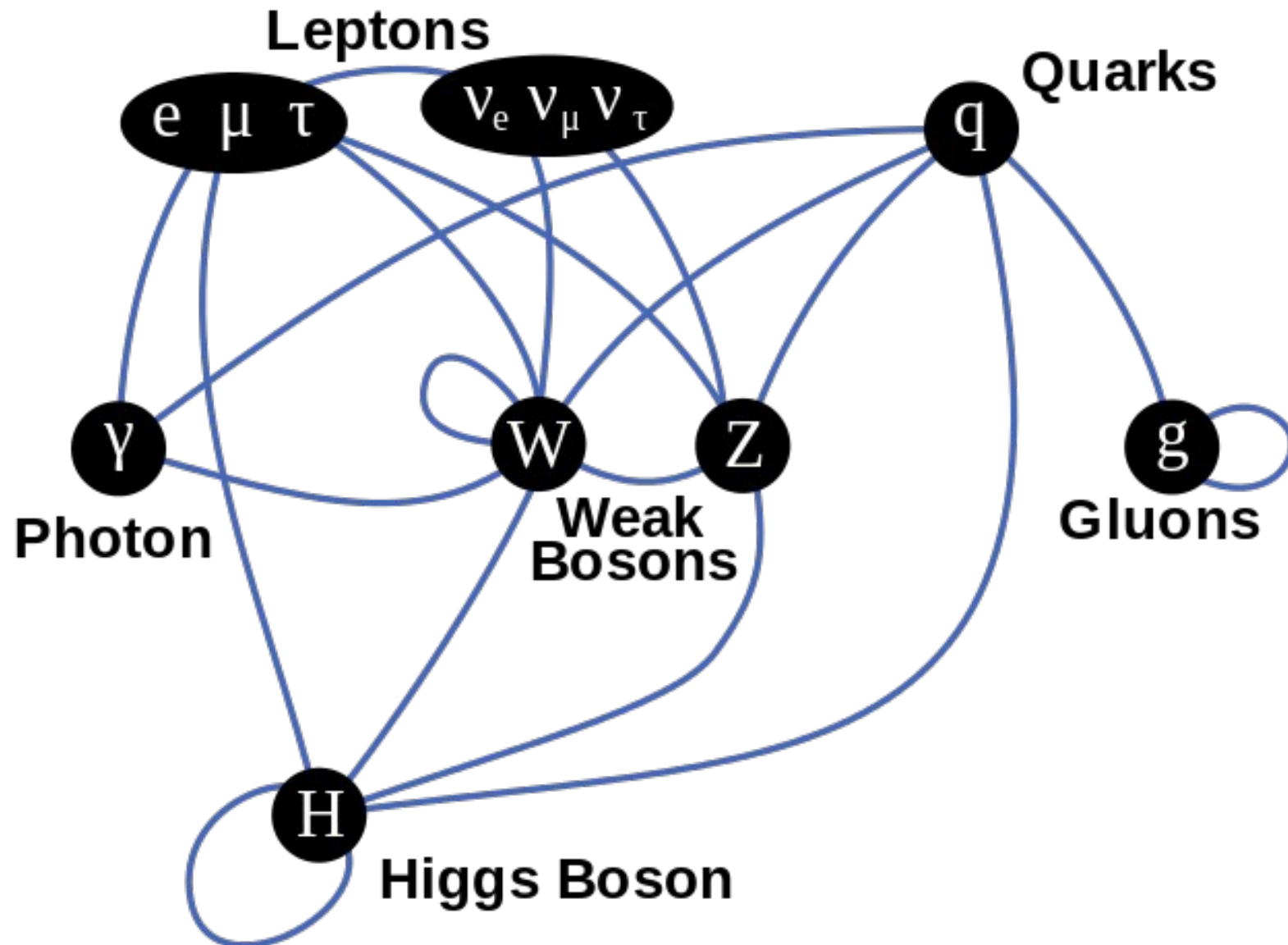
# El bosón de Higgs



- $H^0$  (bosón de Higgs)
  - $m = 125,10 \text{ GeV}/c^2$
  - espín: 0
  - Carga eléctrica: 0
  - Color: 0
  - Vida media:  $1,56 \times 10^{-22} \text{ s}$
  - Coeficientes de Yukawa
    - Interacción con partículas masivas

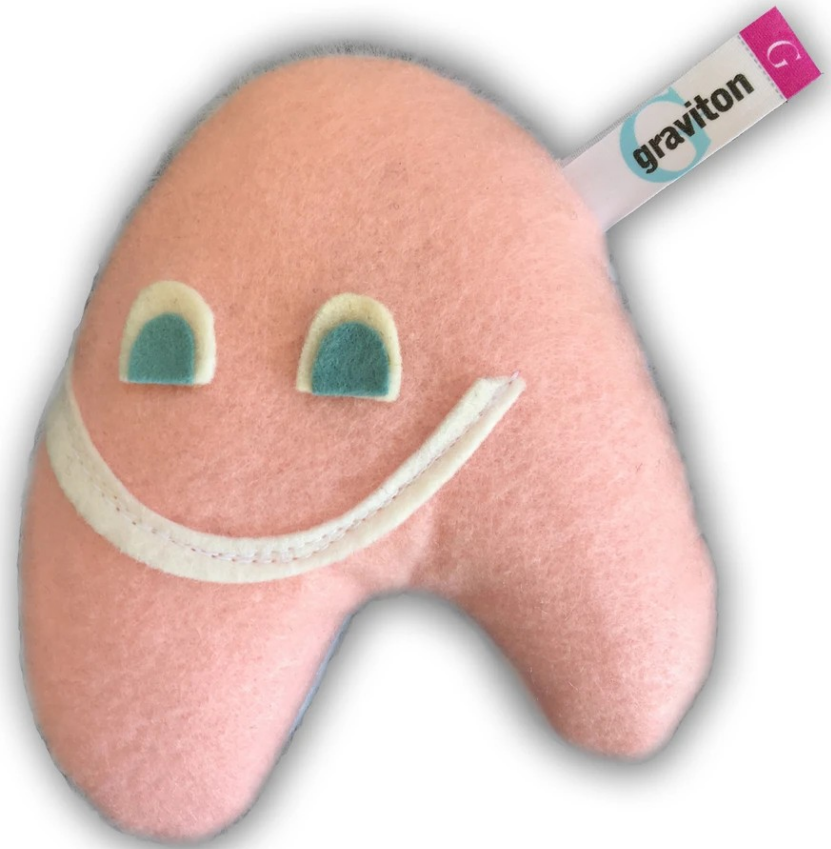


# El modelo estándar y sus interacciones



# Gravitón → bosón mediador de la gravedad (volvemos en la U03)

- G (Gravitón)
  - $m = 0$
  - espín: 2
  - Carga eléctrica: 0
  - Color: 0
  - Vida media: estable
  - Teorizada: 1930
  - Observada: ¿?



# El modelo estándar

Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III		
masa →	2,4 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	171,2 GeV/c <sup>2</sup>	0	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	2
nombre →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> Foton	<b>G</b> Graviton
Quark	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	0	? GeV/c <sup>2</sup>
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> Gluon	<b>H</b> Boson Higgs
masa →	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	<15,5 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>	
carga →	0	0	0	0	
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
nombre →	<b>ν<sub>e</sub></b> Neutrino electrónico	<b>ν<sub>μ</sub></b> Neutrino muónico	<b>ν<sub>τ</sub></b> Neutrino tauónico	<b>Z<sup>0</sup></b> Boson Z	
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	<b>e</b> Electrón	<b>μ</b> Muón	<b>τ</b> Tau	<b>W<sup>±</sup></b> Boson W	

Bosones de gauge