

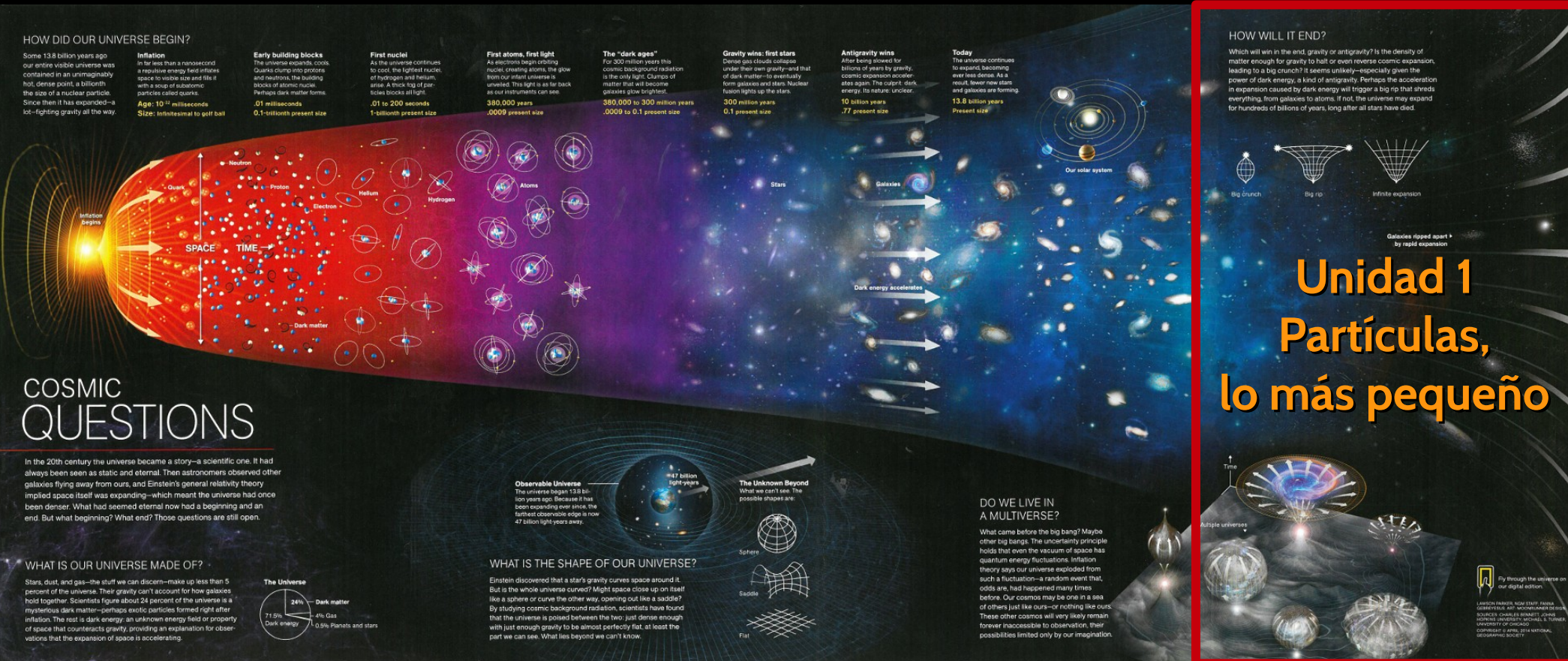
Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2020

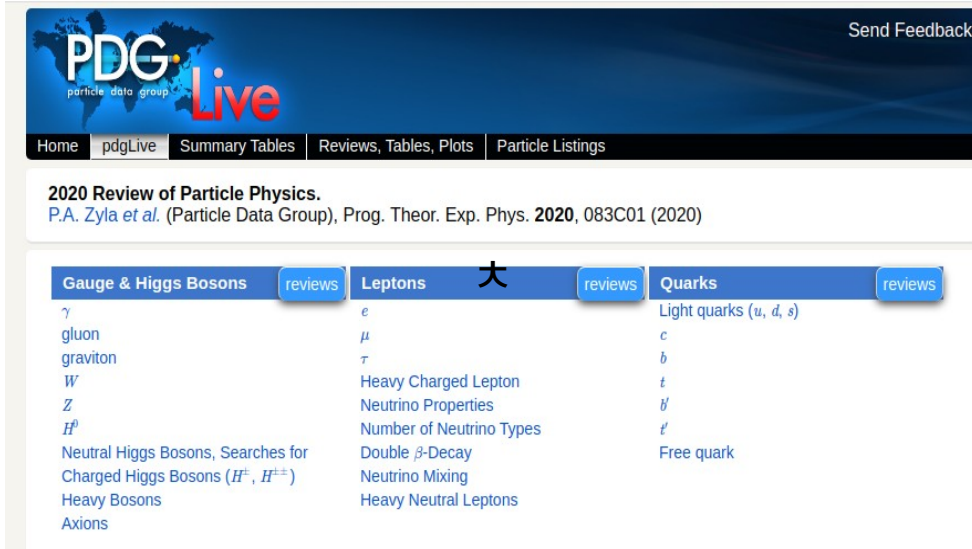
- **Unidad** 01 – El modelo estándar
- **Clase** U01 C04 - 4/16
- **Fecha** 26 Ago 2020
- **Cont** El modelo estándar
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-ipac/>



Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio



Particle Data Group (pdg)



The screenshot shows the PDG Live website. At the top is a navigation bar with 'Home', 'pdgLive', 'Summary Tables', 'Reviews, Tables, Plots', and 'Particle Listings'. Below this is a section for the '2020 Review of Particle Physics' by P.A. Zyla et al. The main content area features three tabs: 'Gauge & Higgs Bosons', 'Leptons', and 'Quarks'. The 'Leptons' tab is currently selected, showing a list of particles and their properties. A large Japanese character '大' (read as 'dai') is placed between the 'Leptons' and 'Quarks' tabs.

Gauge & Higgs Bosons	Leptons	Quarks
γ	e	Light quarks (u, d, s)
gluon	μ	c
graviton	τ	b
W	Heavy Charged Lepton	t
Z	Neutrino Properties	b'
H^0	Number of Neutrino Types	t'
Neutral Higgs Bosons, Searches for	Double β -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



Hadrones, bariones y número bariónico

- Las partículas que interactúan fuertemente (tienen carga “fuerte”) se denominan **hadrones**

Sin interacción fuerte

Leptones

(leptón → liviano, delicado)

Con interacción fuerte

Hadrones

(hadrón → fuerte, denso)

Bariones

(barión → pesado)

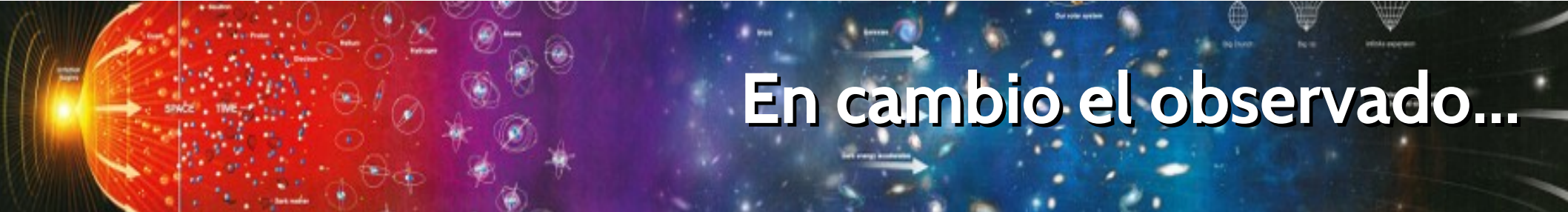
entre ellos los nucleones

Mesones

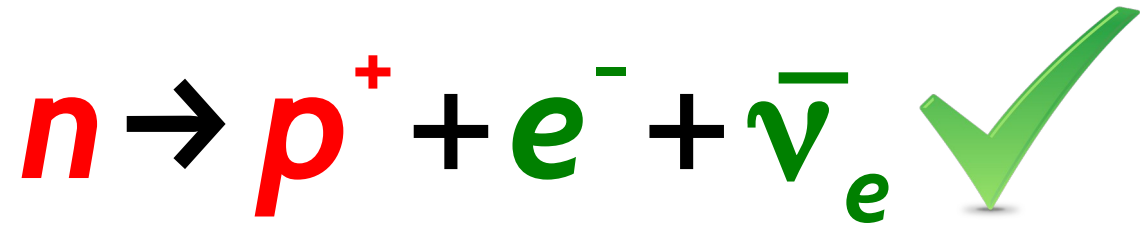
(mesón → en el medio)

Con los bariones hay una simetría (carga conservada)

Número Bariónico



En cambio el observado...



Inicial


Magnitudes partícula	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número bariónico
n	m=939,6	0	0	0	+1
p ⁺	m=938,3	+1	0	0	+1
e ⁻	m=0,511	-1	+1	+1	0
<ν _e >	m<2eV	0	-1	-1	0
Final	✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓

final

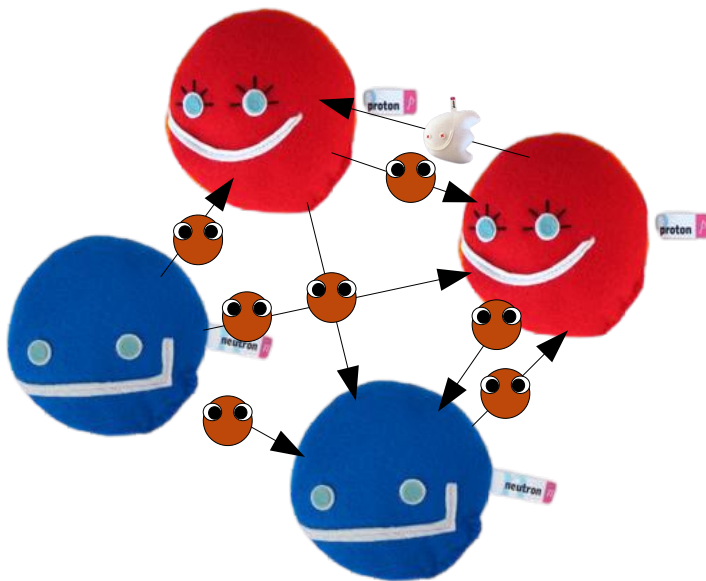
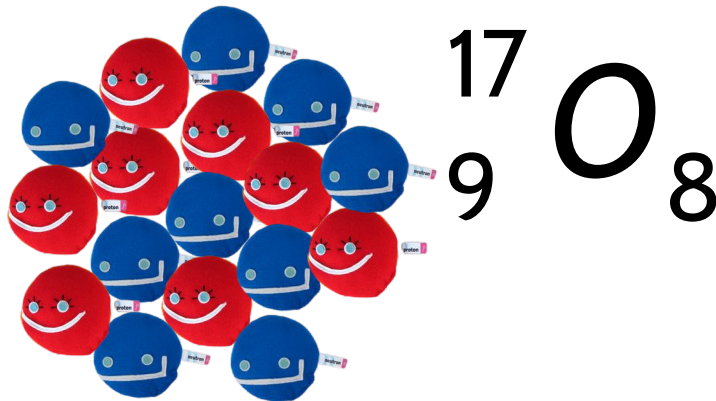


$$p \rightarrow e^+ + \nu_e$$



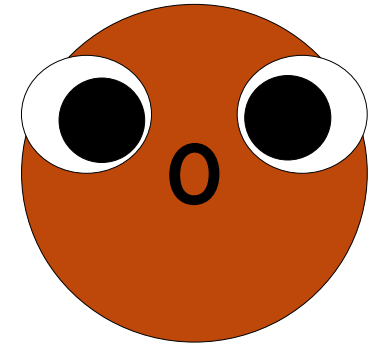
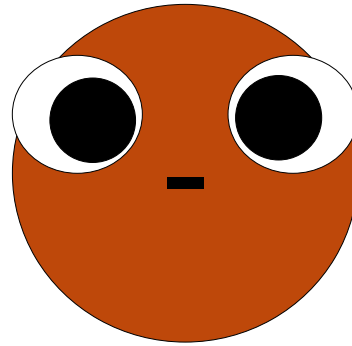
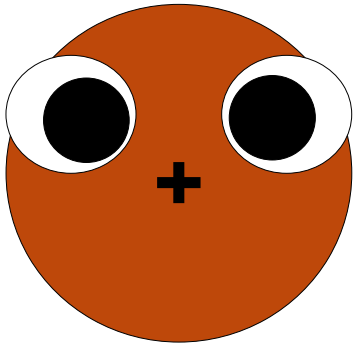
Inicial	Magnitudes partícula	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número bariónico
	p	m=938,3	+1	0	0	+1
final	e ⁺	m=0,511	+1	-1	-1	0
	<ν _e >	m<2eV	0	+1	+1	0
Final		✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 

Interacción nuclear fuerte (Yukawa)



- Efecto de carga $\sim Z^2$
- Los neutrones aportan carga fuerte sin aportar carga eléctrica.
- Yukawa (1935) predice la existencia de “**mesones**” como **portadores de la fuerza fuerte nuclear**
- La masa de dicha partícula debiera ser $m \sim 100 \text{ MeV}/c^2$

Piones: π^+ π^- π^0



- Pión+, π^+
 - Masa: $139,6 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $\frac{1}{2}$
 - Carga eléctrica: +1
 - Número bariónico: 0
 - Vida media: 26 ns
- Pión-, π^-
 - Masa: $139,6 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $\frac{1}{2}$
 - Carga eléctrica: -1
 - Número bariónico: 0
 - Vida media: 26 ns
- Pión neutro, π^0
 - Masa: $135,0 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $\frac{1}{2}$
 - Carga eléctrica: 0
 - Número bariónico: 0
 - Vida media: $8,4 \times 10^{-17} \text{ s}$

- 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**



Otros bariones y mesones:

- Bariones Δ :

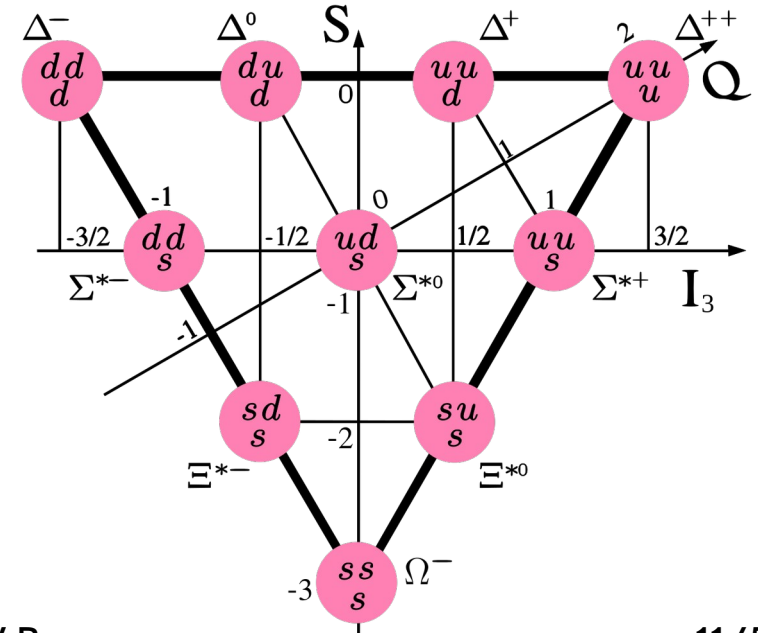
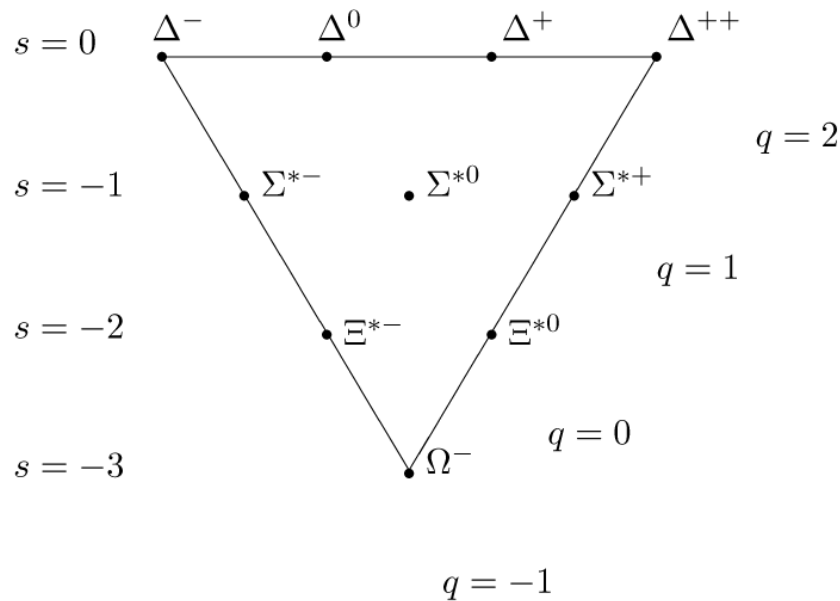
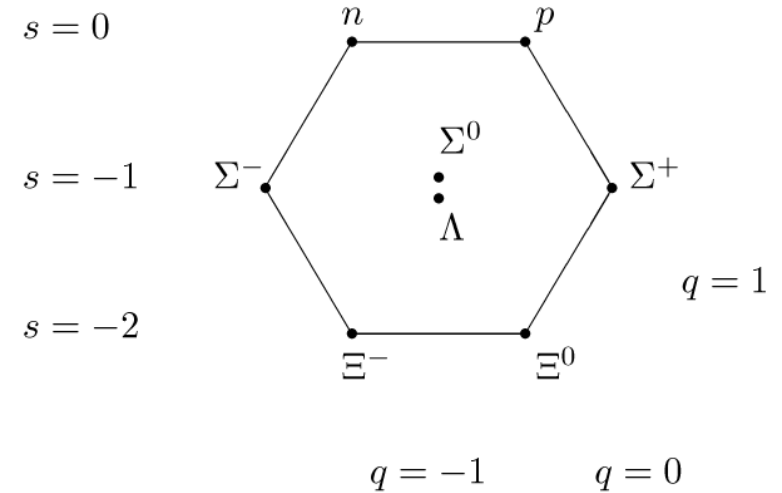
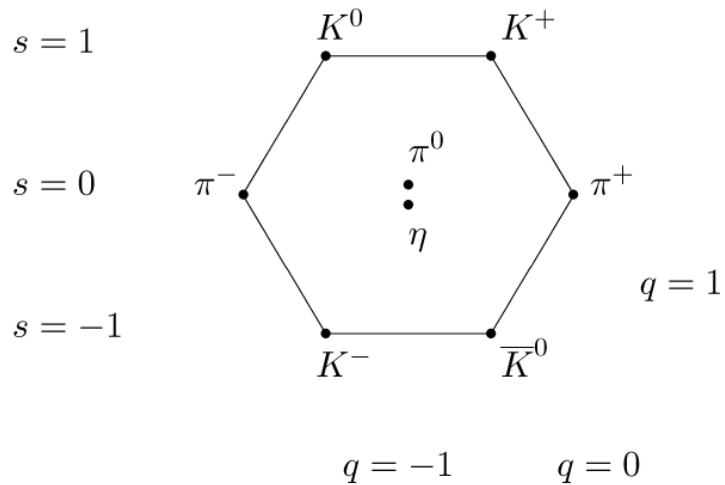
$$\Delta^{++} = \begin{pmatrix} u \\ u \\ u \end{pmatrix} \quad \Delta^{+} = \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} \quad \Delta^{0} = \begin{pmatrix} u \\ d \\ d \end{pmatrix} \quad \Delta^{-} = \begin{pmatrix} d \\ d \\ d \end{pmatrix}$$

- Mesones π :

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

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

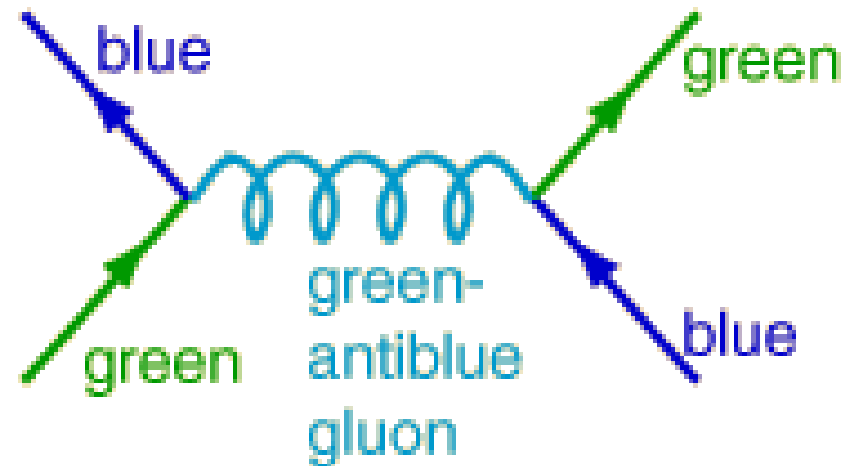
Y además con los aceleradores...



- 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 $r \langle r \rangle = g \langle g \rangle = b \langle b \rangle = \text{blanco}$

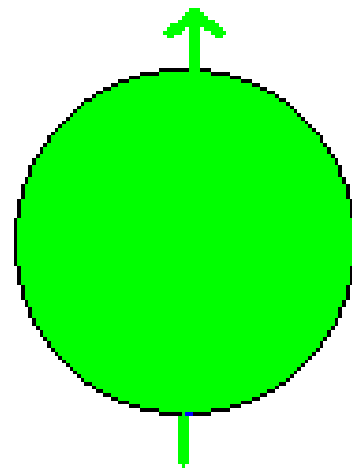
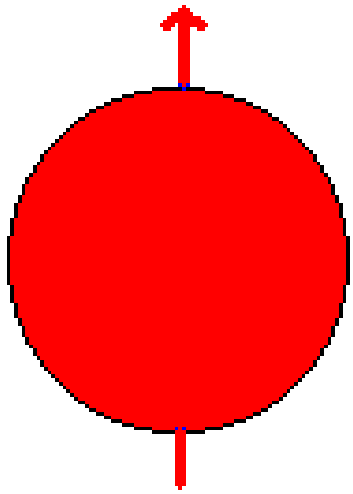
Los mediadores de color

- 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.

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: $u d$

La foto de la familia hasta aquí

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

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

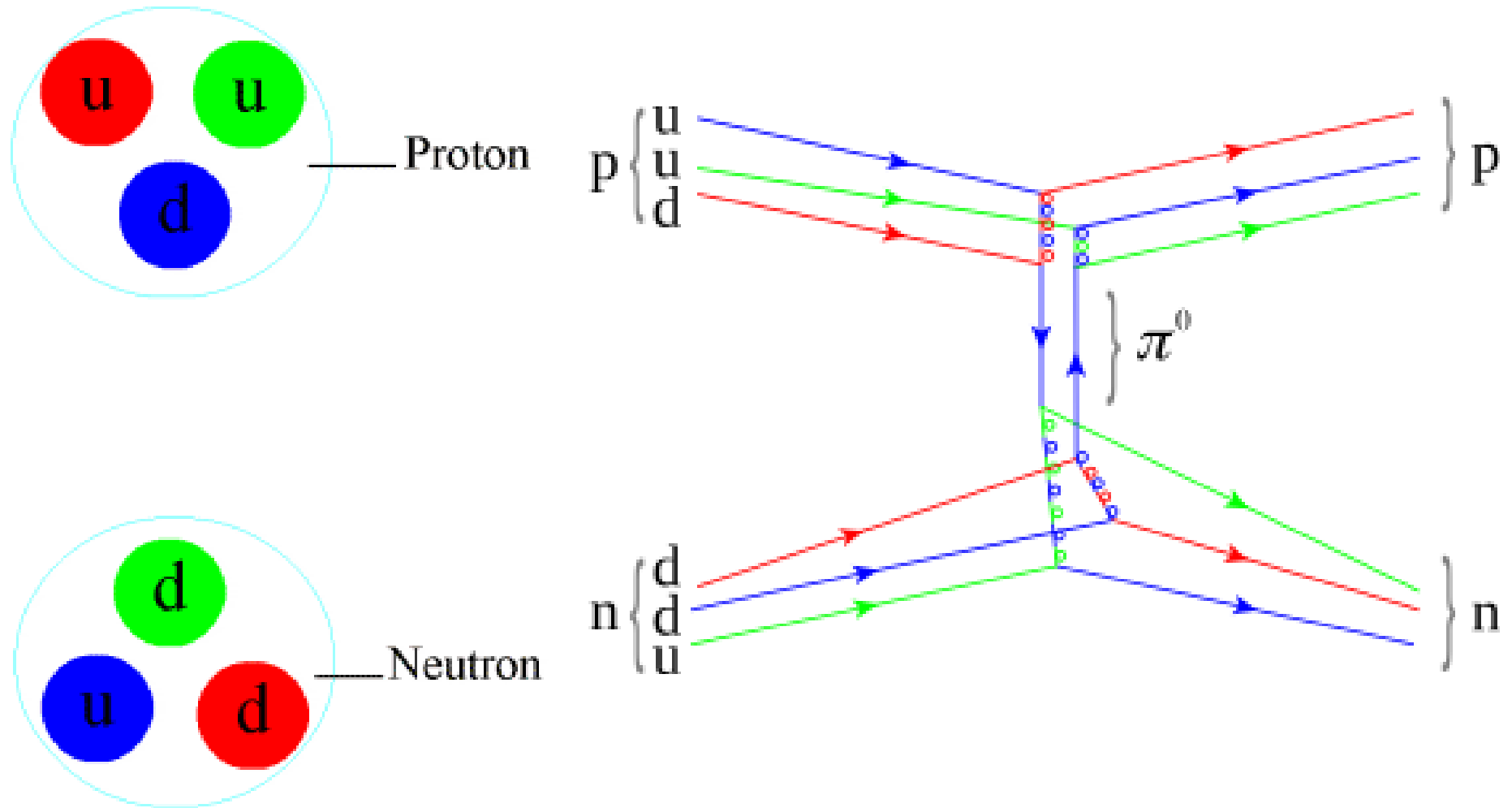
U1: Partículas, lo más pequeño

4 encuentros, del 05/Ago al 26/Ago

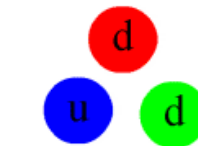
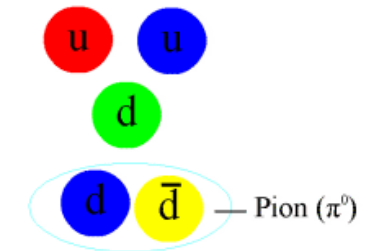
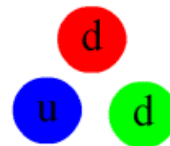
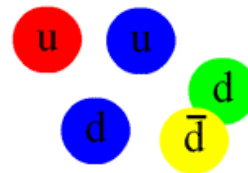
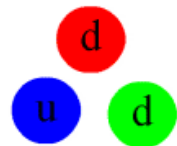
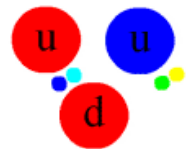
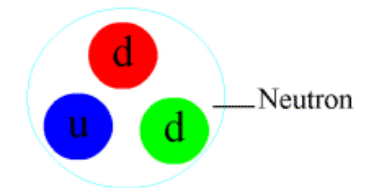
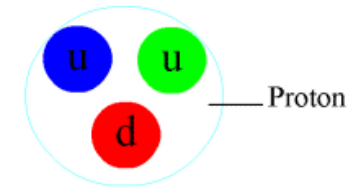
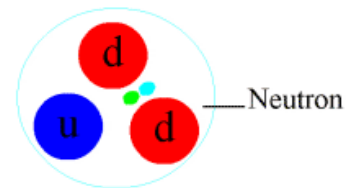
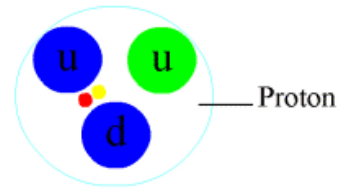
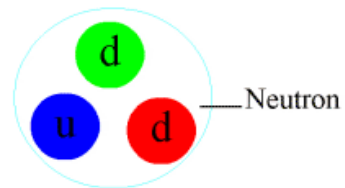
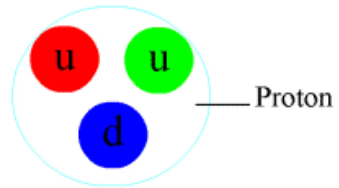
- **Dinámica Relativista.**
- **Física de partículas**
 - **Partículas fundamentales: leptones, hadrones, bosones mensajeros**
- **El modelo estándar**
 - **Interacciones fundamentales**
 - **Simetrías y leyes de conservación**
- **Trabajo de la unidad: tópicos de física de partículas.**
Entrega Viernes 04/Sep/2020



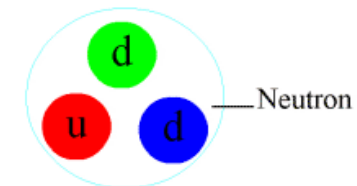
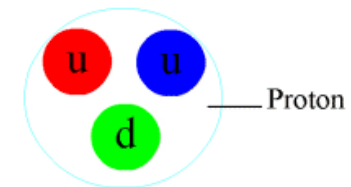
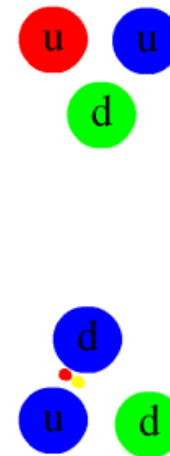
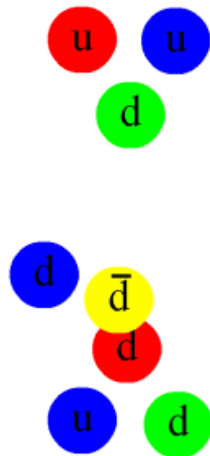
Consideremos el intercambio de Yukawa desde la perspectiva del intercambio de gluones



Interacción de Yukawa con piones cargados



Interacción de Yukawa con piones cargados





¿Y el decaimiento β^- ?

- 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 μ^- ?

- 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 μ^- cambió de **sabor** a un leptón e^-
 - el resto es por conservación de los números leptónicos



¿Y el decaimiento⁻ del π^- ?

- 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; m**
 - **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 ~ 0.01 ; QCD ~ 1 ; EWT $\sim 10^{-7}$)

- Bosones W^{\pm}

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



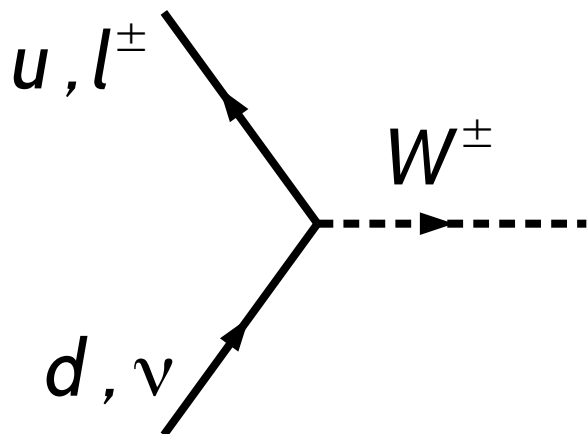
- Boson Z^0

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



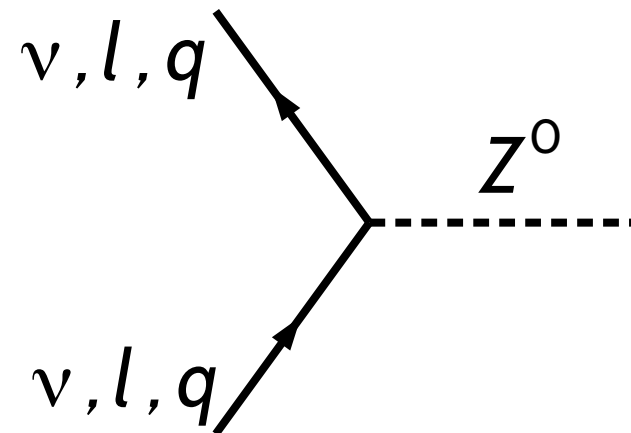
- Corriente cargada

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

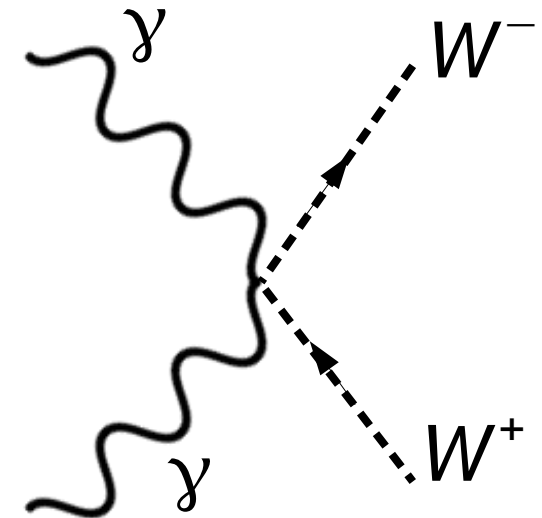
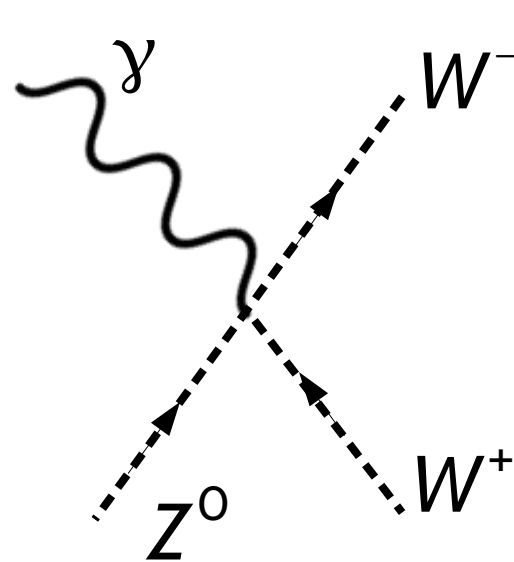
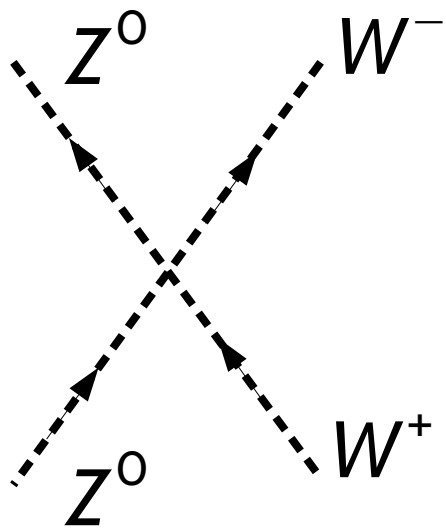
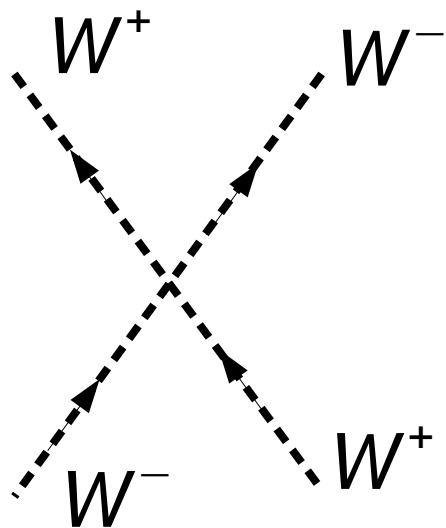
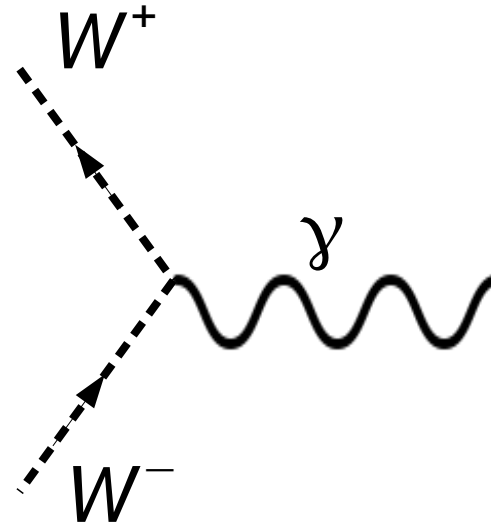
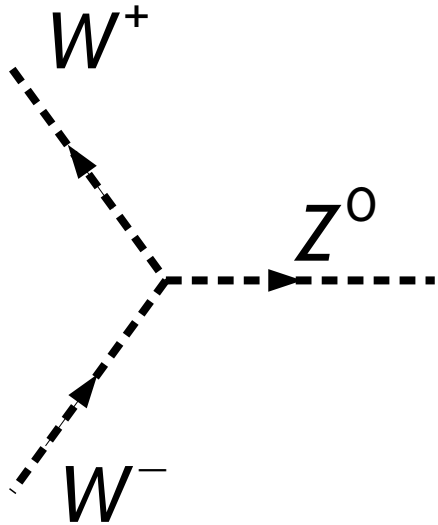


- Corriente neutra

- 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

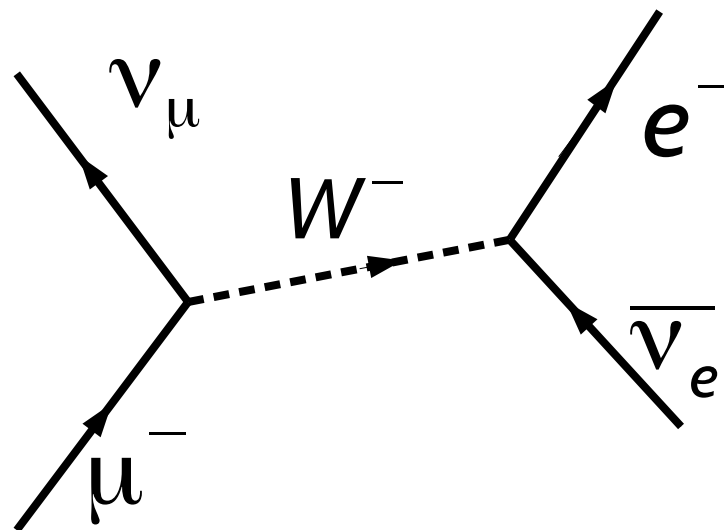


Decaimiento del muón

- 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

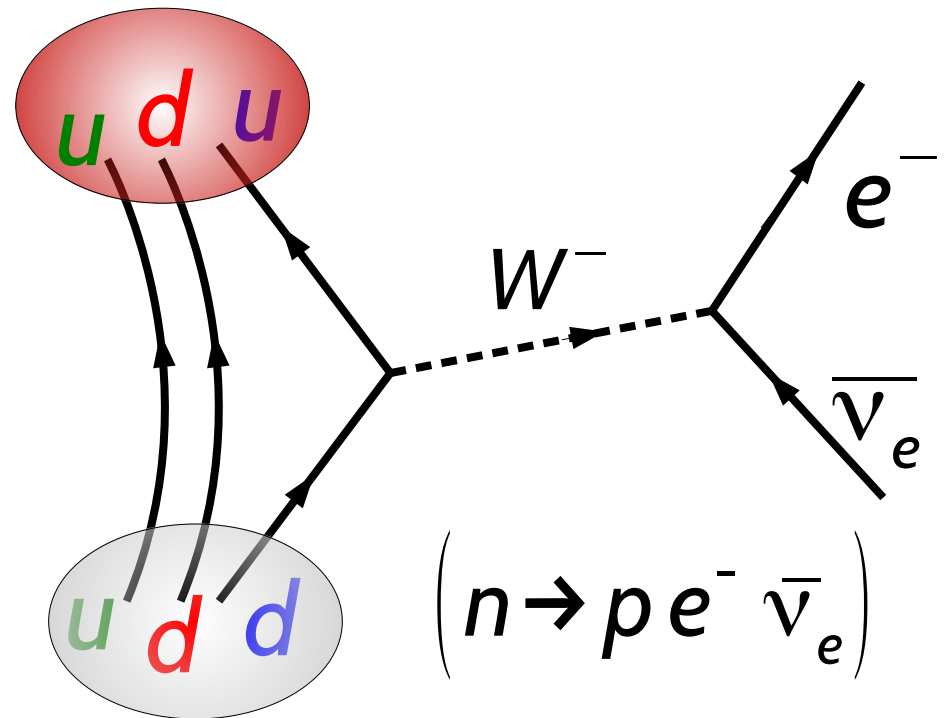


Decaimiento beta (al fin!)

- Proceso electrodébil de corriente cargada

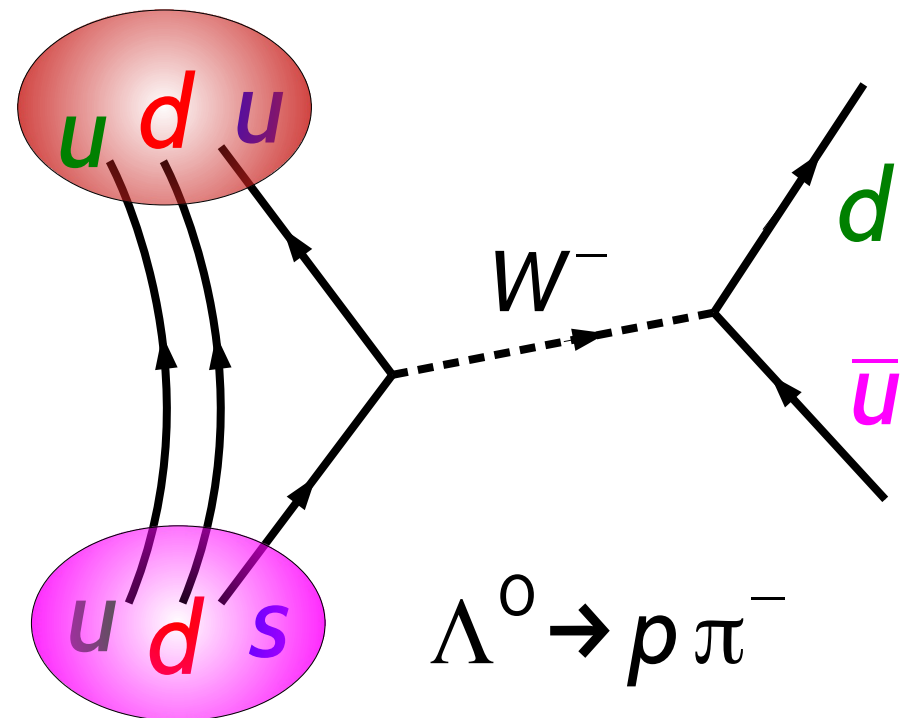
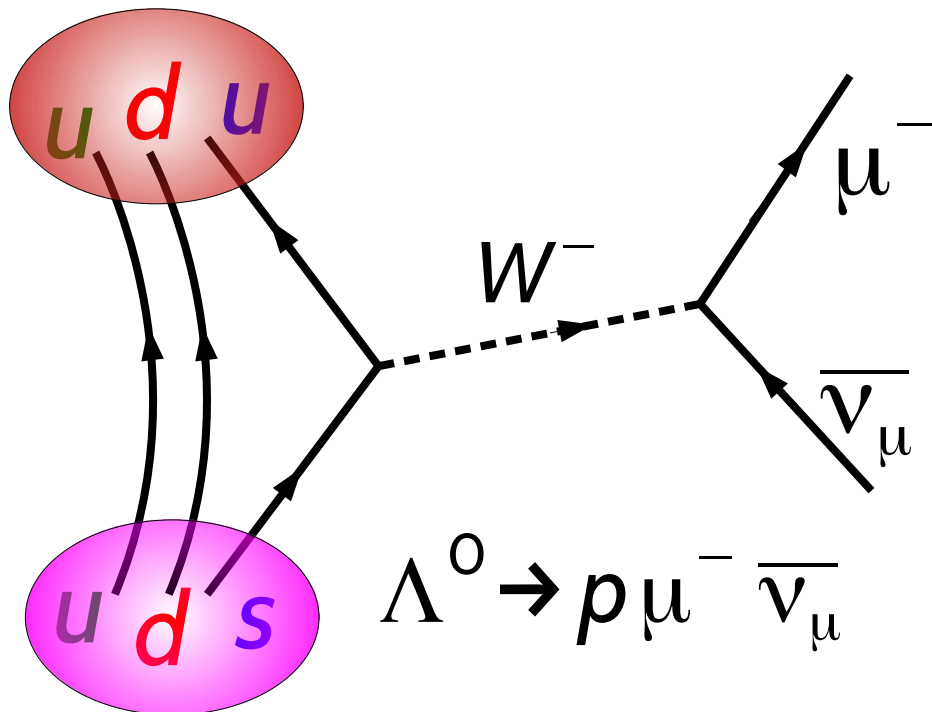
$$\left(n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e \right) \quad d \rightarrow u e^- \bar{\nu}_e$$

- 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 Λ^0

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

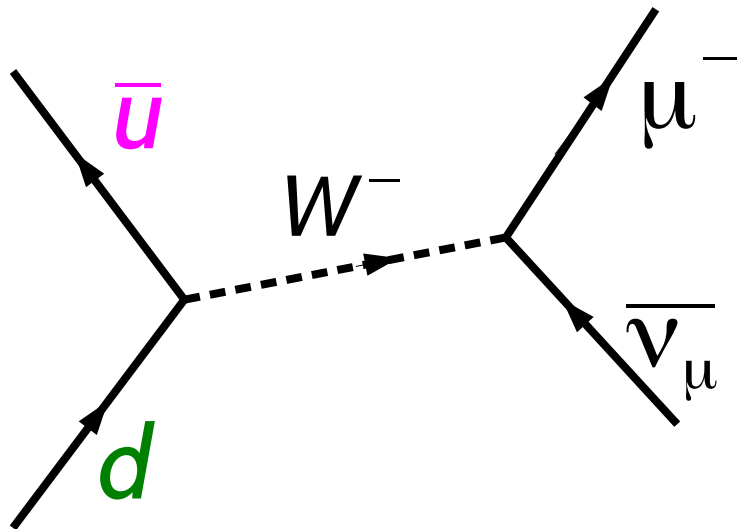


Decaimiento del pión cargado

- 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



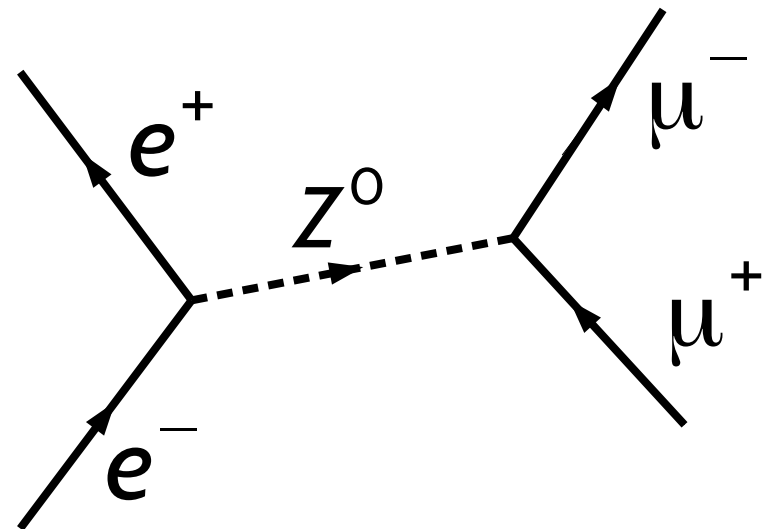
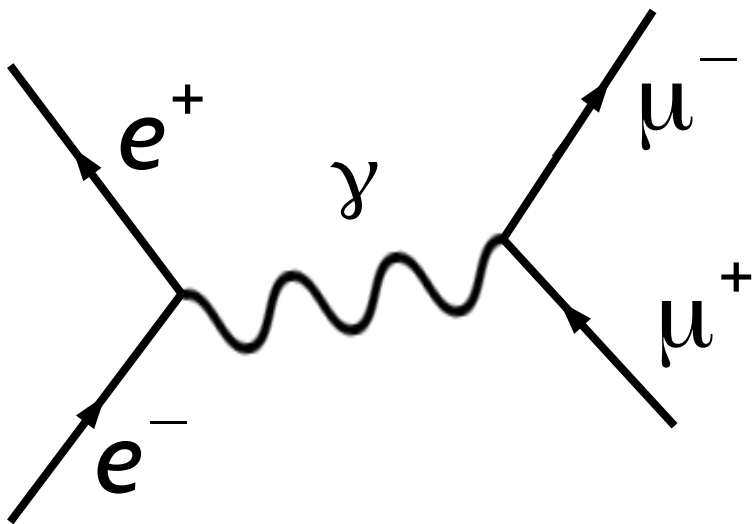
$$\begin{pmatrix} d \\ \bar{u} \end{pmatrix} \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

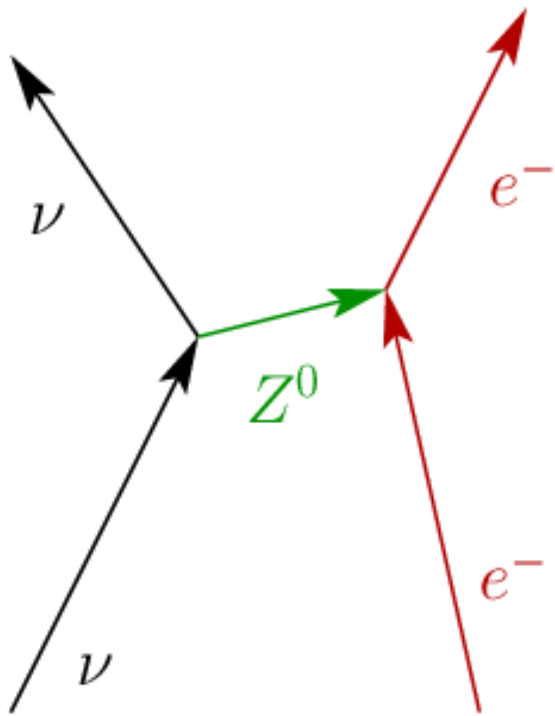
Interacciones débiles de corriente neutra

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

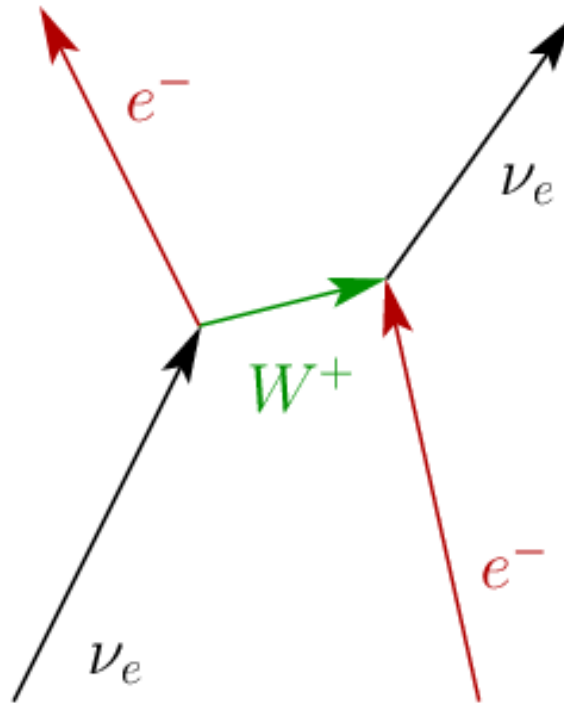
$$e^- e^+ \rightarrow \mu^- \mu^+$$

- Dos formas posibles: Electromagnética o débil

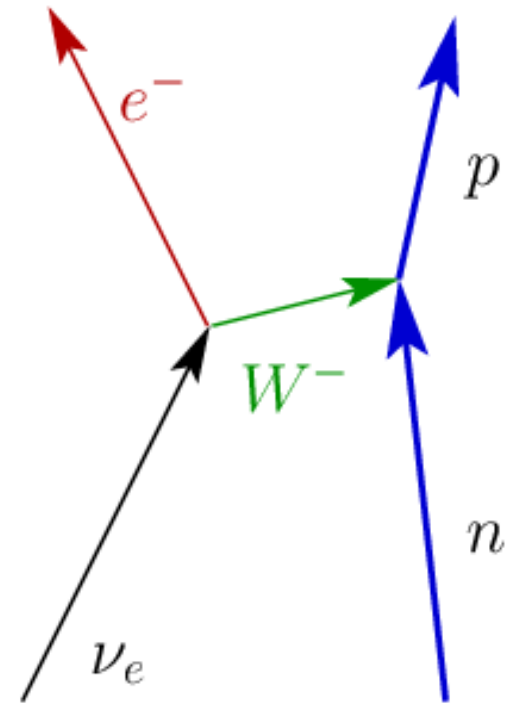




Neutral current



Charged current



La foto de la familia hasta aquí

	I Gen	II Gen	
masa →	2,4 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u up	c charm	γ Foton
			0
	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
Quark	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	g Gluon
masa →	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²
carga →	0	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico	Z⁰ Boson Z
			80,4 GeV/c ²
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	± 1
	-1	-1	1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	
	e Electrón	μ Muón	W[±] Boson W

Bosones de gauge

Con ustedes, los

Bosones de Gauge

(calibre, mediadores de interacciones fundamentales)

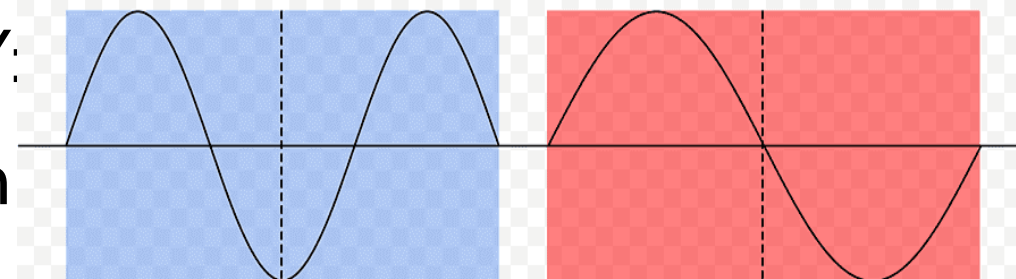
- El operador de Paridad transforma a un objeto en su imagen especular: $\wp \Psi(\mathbf{x}) = P \Psi(-\mathbf{x})$, P es una constante
- Las leyes físicas son invariantes al marco de referencia. Si aplico dos veces:

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

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

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

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

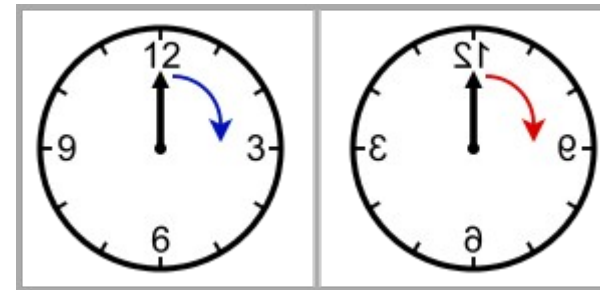
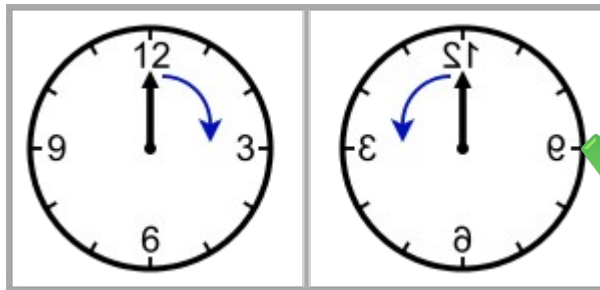


Even Wavefunction

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, μ, ν_e, ν_μ) 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 θ_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 θ_c

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



- 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 : τ ν_{τ}

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

- τ (tau)

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



- ν_τ (neutrino tau)

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





La foto de la familia hasta aquí

Con ustedes, los

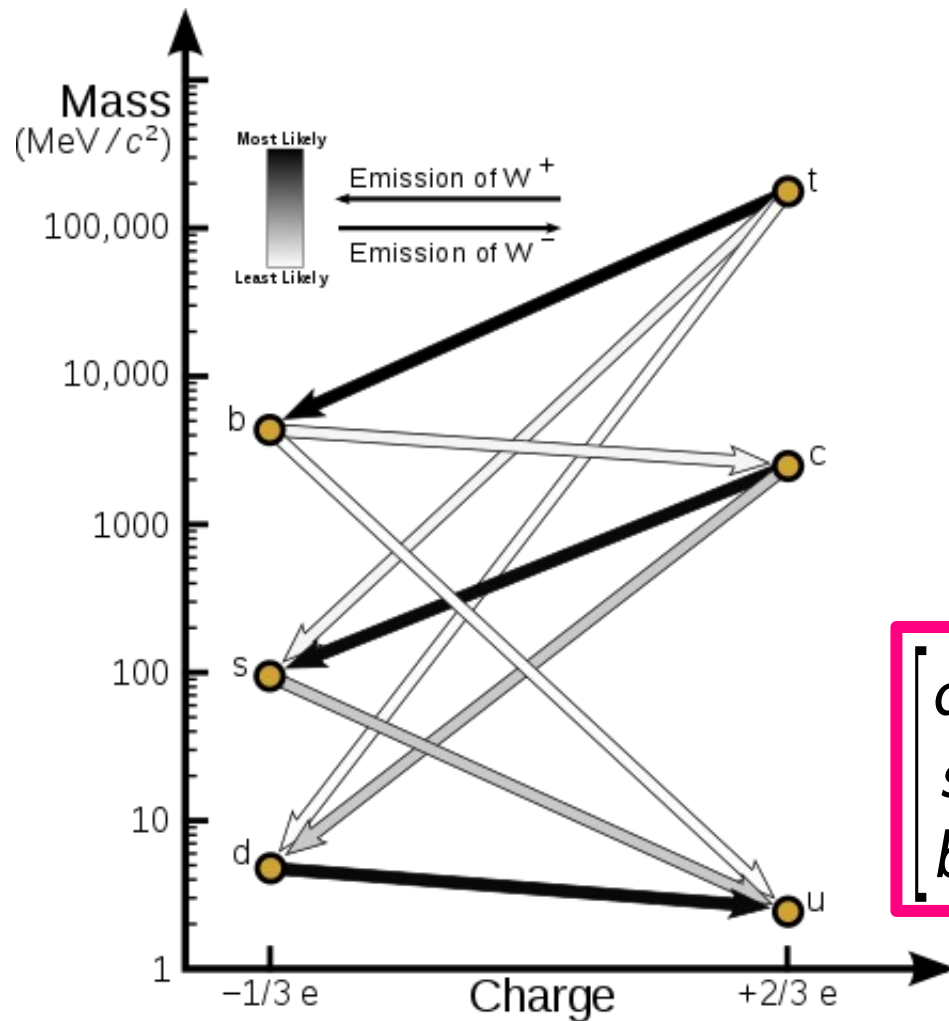
Tercera generación

Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III	
masa →	2,4 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	171,2 GeV/c ²	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u up	c charm	t top	γ Foton
	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	d down	s strange	b bottom	g Gluon
masa →	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²
carga →	0	0	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico	ν_τ Neutrino tauónico	Z⁰ Boson Z
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Electrón	μ Muón	τ Tau	W[±] 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

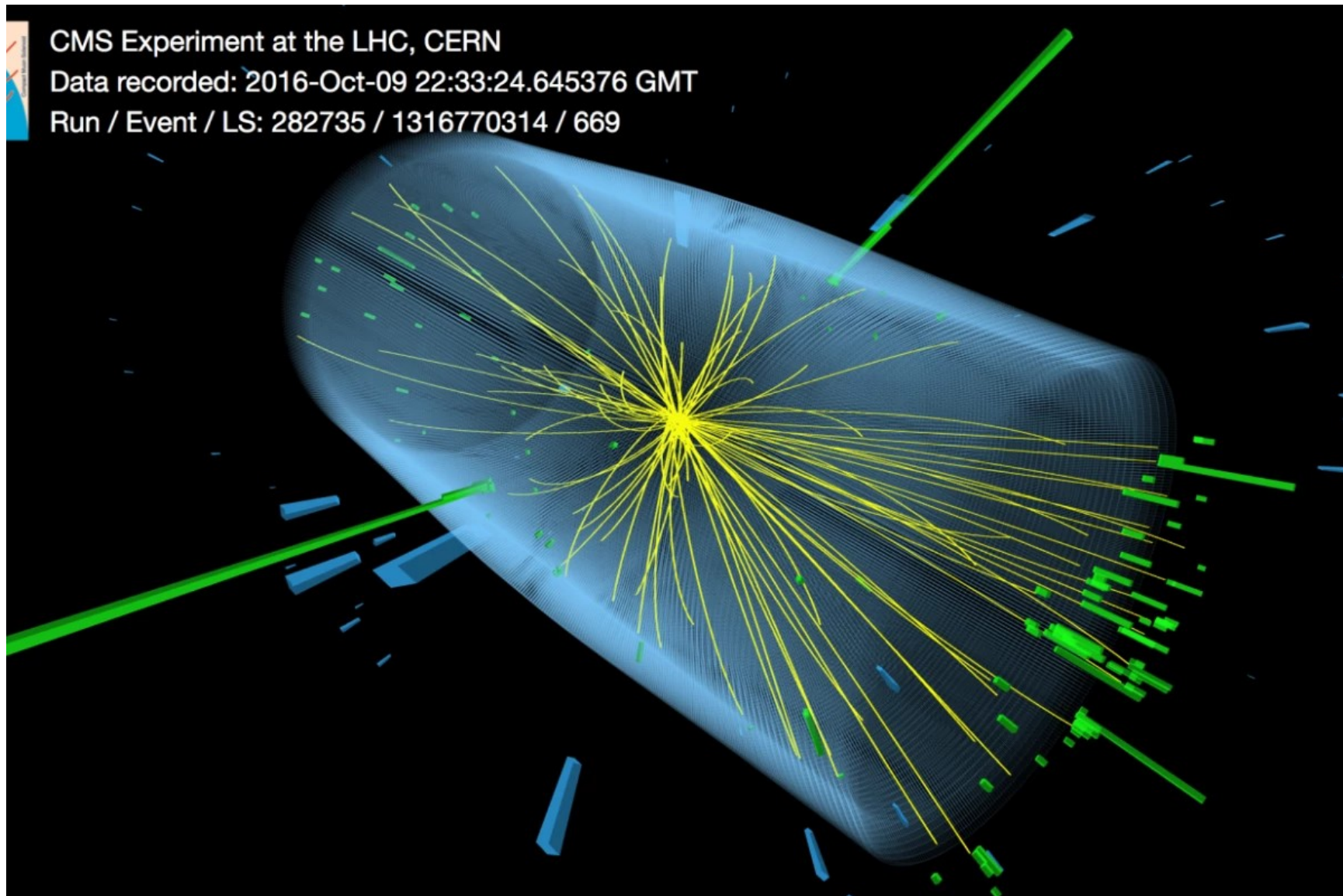
Tres generaciones de la materia (fermiones)

	I	II	III	
masa →	2,4 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	171,2 GeV/c ²	0
carga →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	u up	c charm	t top	γ Foton
	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	d down	s strange	b bottom	g Gluon
masa →	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²
carga →	0	0	0	0
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nombre →	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico	ν_τ Neutrino tauónico	Z⁰ Boson Z
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e Electrón	μ Muón	τ Tau	W[±] 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

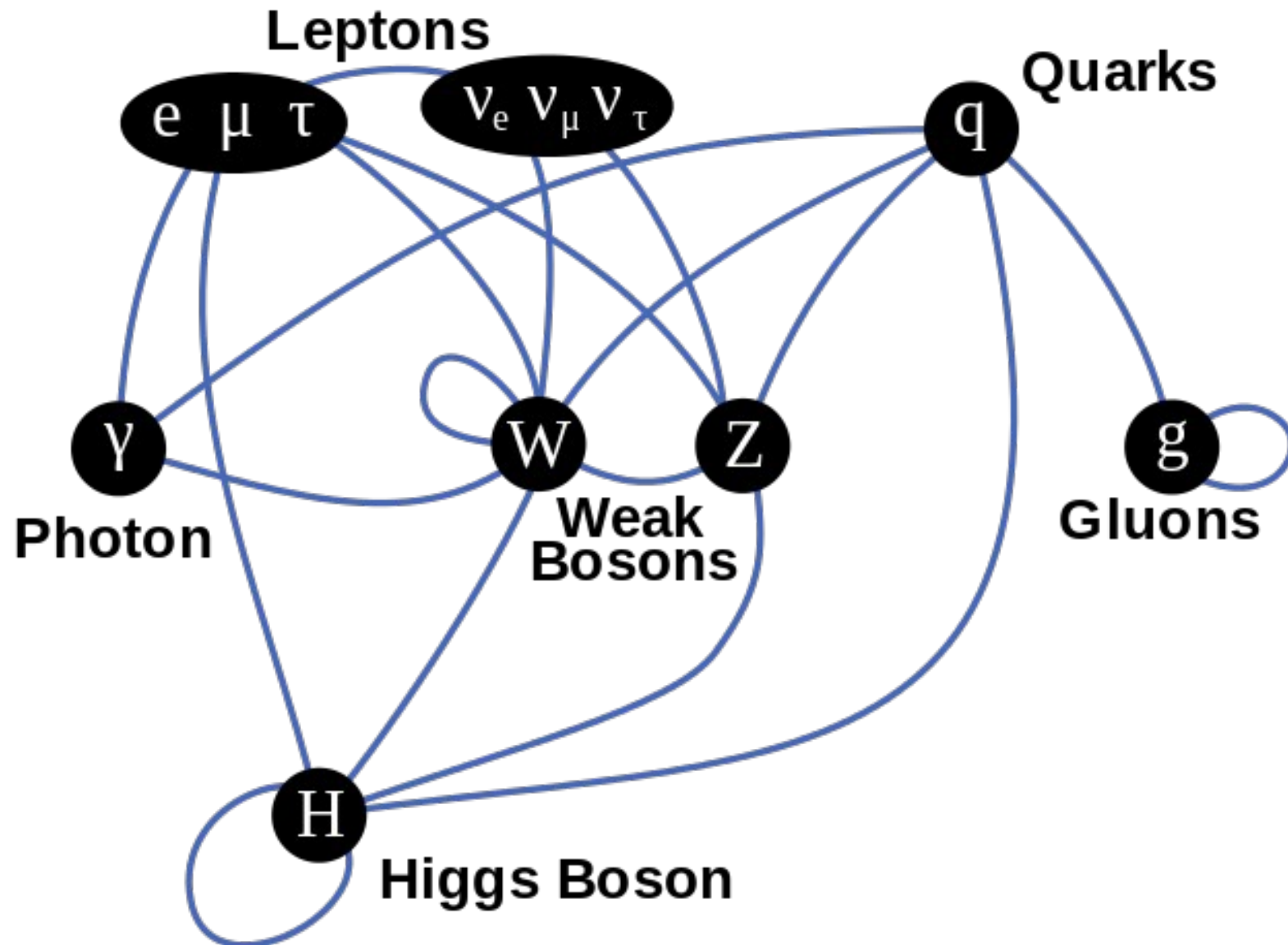


El bosón de Higgs



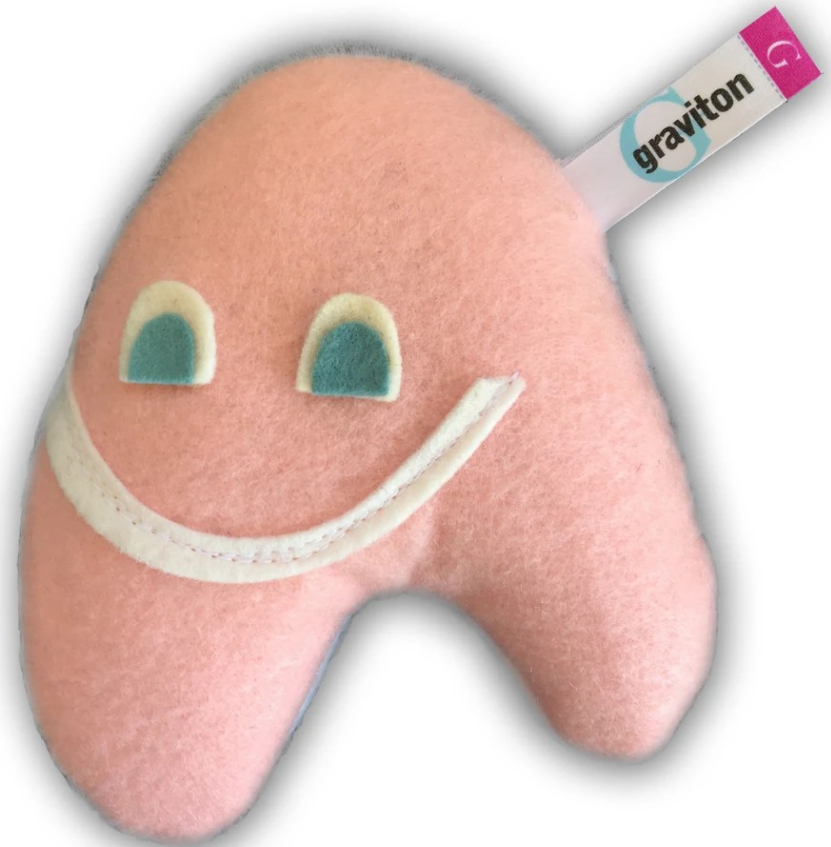
- H^0 (bosón de Higgs)
 - $m = 125,10 \text{ GeV}/c^2$
 - espín: 0
 - Carga eléctrica: 0
 - Color: 0
 - Vida media: $1,56 \times 10^{-22} \text{ s}$
 - Coeficientes de Yukawa
 - Interacción con partículas masivas

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 ²	1,27 GeV/c ²	171,2 GeV/c ²	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 →	u up	c charm	t top	γ Foton	G Graviton
Quark	4,8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4,2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	d down	s strange	b bottom	g Gluon	H Boson Higgs
masa →	<2,2 eV/c ²	<0,17 MeV/c ²	<15,5 MeV/c ²	91,2 GeV/c ²	
carga →	0	0	0	0	
espín →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
nombre →	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico	ν_τ Neutrino tauónico	Z⁰ Boson Z	
	0,511 MeV/c ²	105,7 MeV/c ²	1,777 GeV/c ²	80,4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	± 1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e Electrón	μ Muón	τ Tau	W[±] Boson W	

Bosones de gauge