

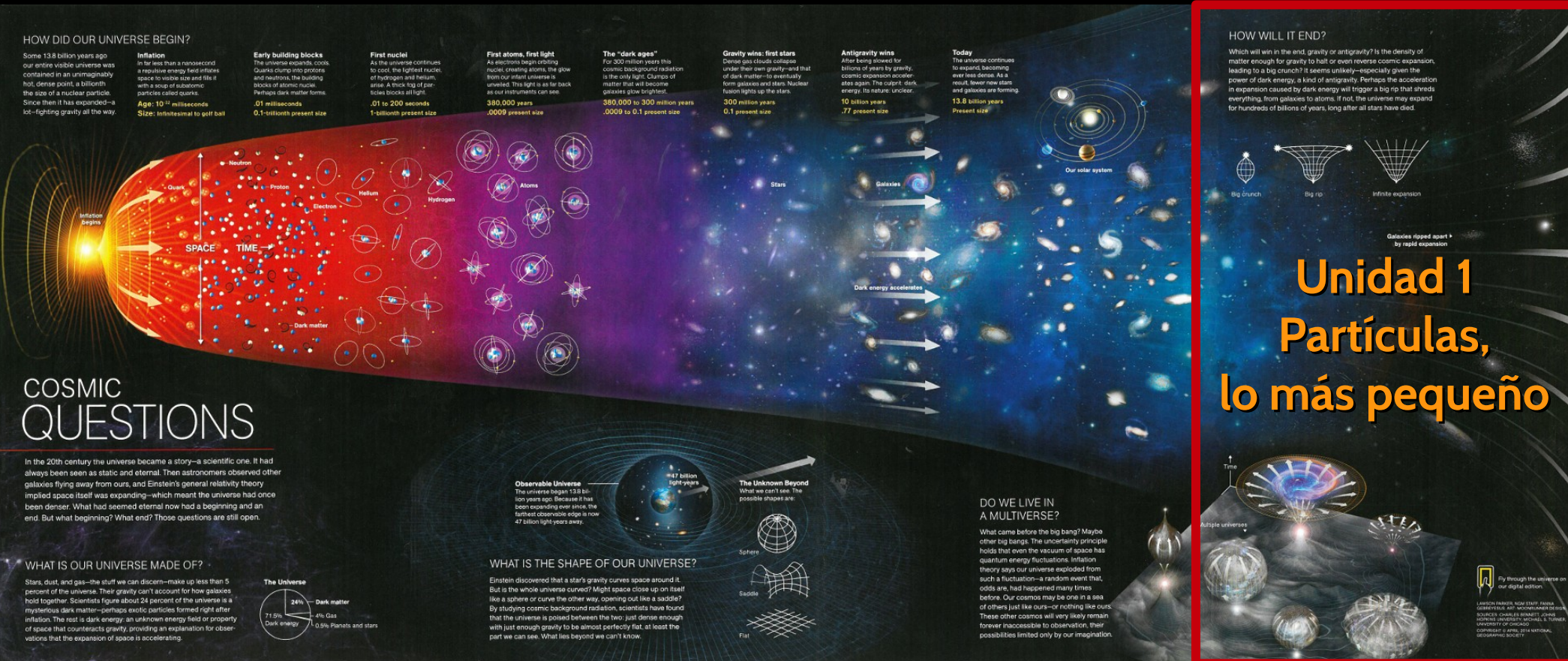
Universidad Nacional de Río Negro

Int Partículas, Astrofísica & Cosmología - 2020

- **Unidad** 01 – El modelo estándar
- **Clase** U01 C03 – 3/16
- **Fecha** 19 Ago 2020
- **Cont** Interacción fuerte
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://gitlab.com/asoreyh/unrn-ipac/>

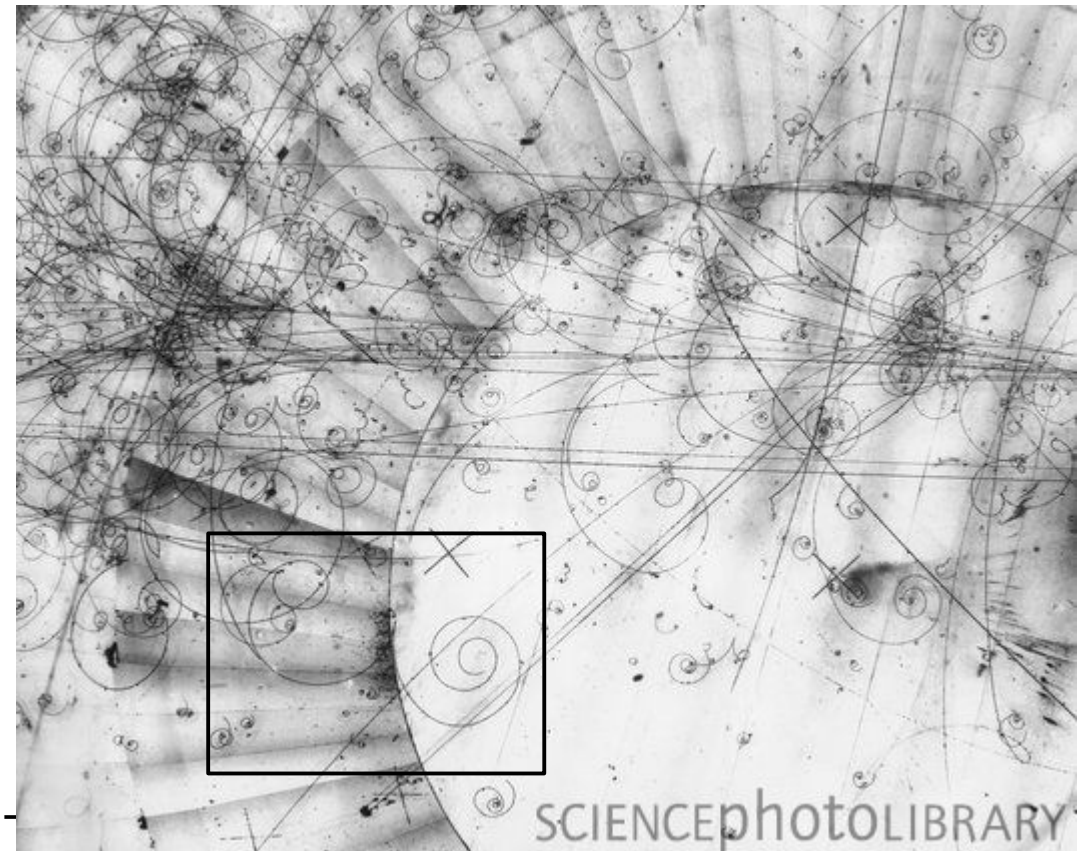
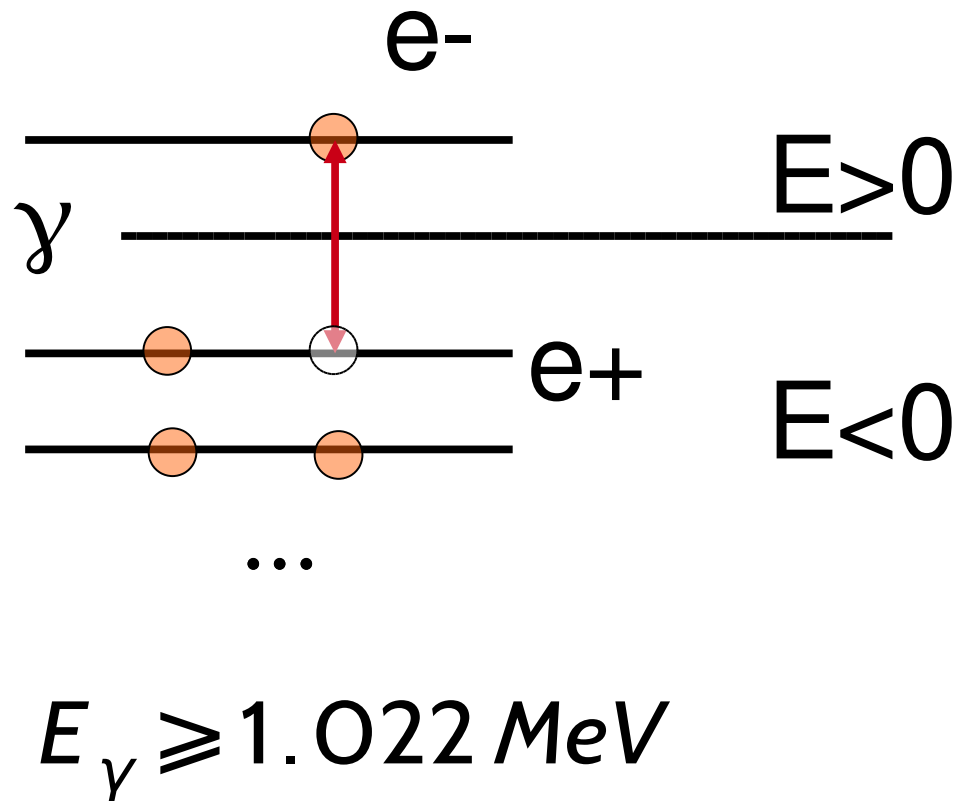


Contenidos: un viaje en el tiempo y el espacio



Materia-Antimateria

- En una interacción EM (scattering) es posible sacar un electrón del mar
- El “hueco” se ve como un electrón positivo





Anti electrón (positrón)

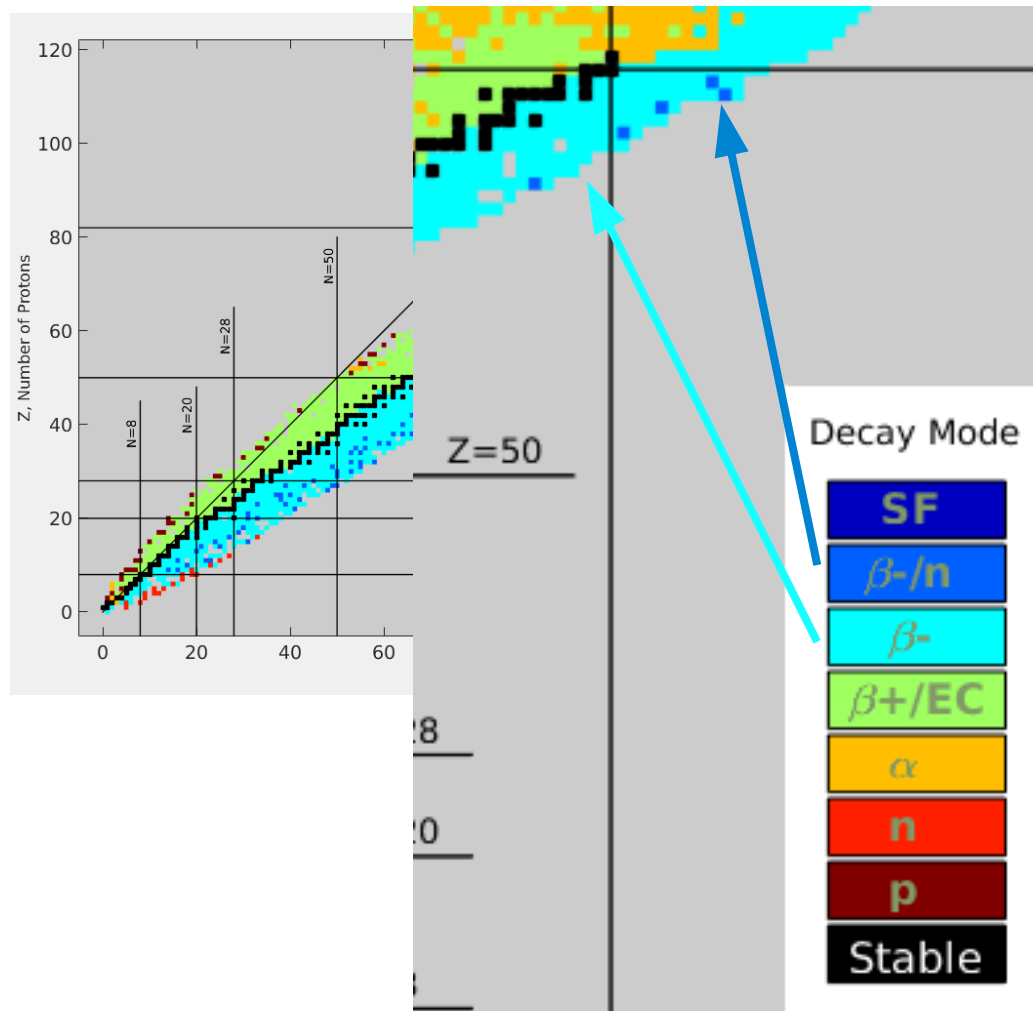
- Positrón (antielectrón), e^+
 - masa: $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $\frac{1}{2}$
 - Carga eléctrica: +1
 - Número leptónico: -1
 - Número lep. electrónico: -1
 - Vida media: infinita (estable)





Interacción fuerte

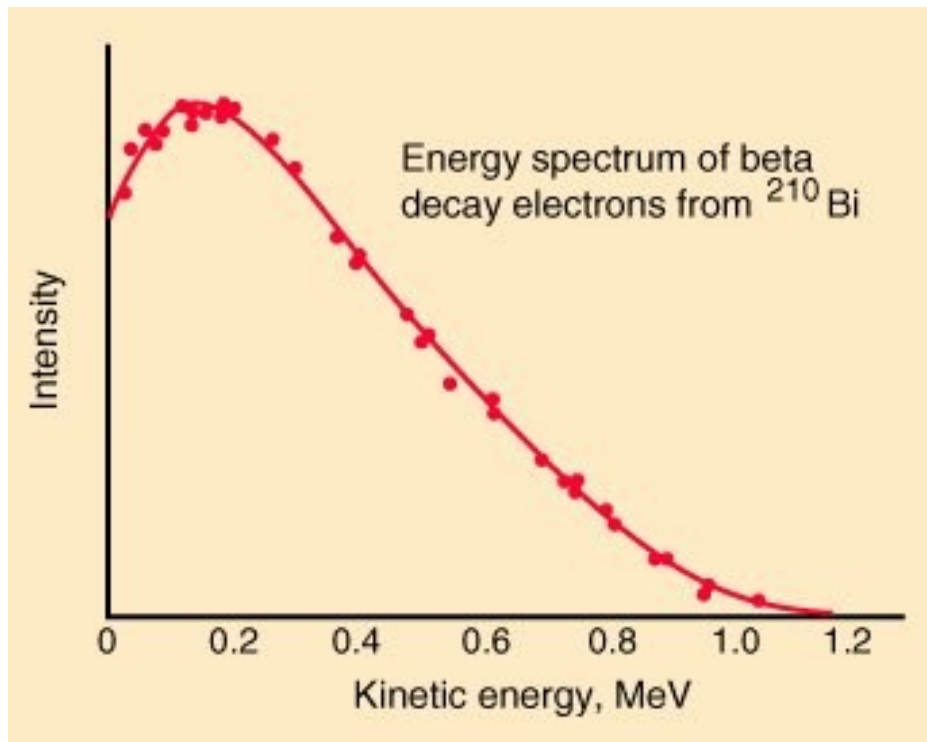
Interacción “Fuerte” (próximamente)



- Hay una proporción de estabilidad (curva negra) entre el número de neutrones y protones
- La fuerza eléctrica $\sim Z^2$
- Los neutrones no tienen carga eléctrica
- Z pequeños, $N/Z \sim 1$, luego $N > Z \rightarrow N/Z \sim 1 + \alpha A^{2/3}$
- Los neutrones aportan a la cohesión nuclear

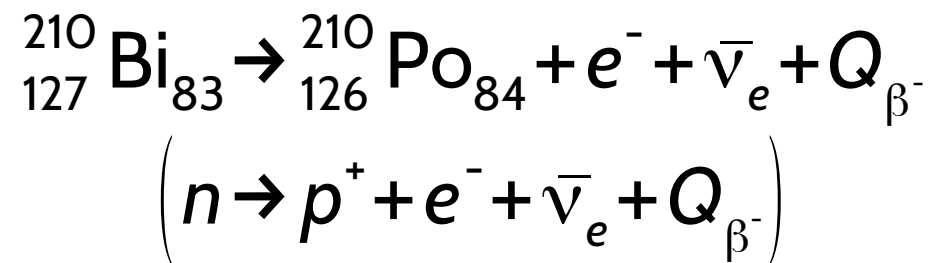


La medición



- Bohr: “La energía no se conserva”
- Pauli: La energía se conserva si existe otra partícula:
“**neutrino**”

- Decaimiento beta correcto:



$$Q = (m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e - m_{\bar{\nu}_e}) c^2$$

$$Q \approx T_e + T_{\nu}$$

- Muón (μ^-)
 - masa: $m_e = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
 - Espín: $\frac{1}{2}$
 - Carga eléctrica: -1
 - Número leptónico: +1
 - Número lep. electrónico: 0
 - Número lep. muónico: +1
 - Vida media: $2,196 \mu\text{s}$

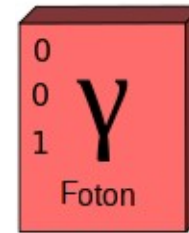


- Existen dos partículas que son muy similares: e^- y μ^-
- Tienen la misma carga eléctrica “negativa”
- Tienen espín semientero $\rightarrow s=1/2$,
 - Son fermiones y cumplen con el ppio de exclusión de Pauli
- Sólo se diferencia en su masa:
 - $m_{e^-} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ y $m_{\mu^-} = 105,6 \text{ MeV}/c^2$
- Asociados a estas, existen dos partículas eléctricamente neutras, y aparentemente sin masa:
 - neutrinos, ν_e y ν_{μ^-} .

Tenemos los primeros ladrillos

Sabor electrónico

Sabor muónico



masa—	$<2,2 \text{ eV}/c^2$	$<0,17 \text{ MeV}/c^2$
carga—	0	0
espín—	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
nombre—	ν_e Neutrino electrónico	ν_μ Neutrino muónico
	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	$105,7 \text{ MeV}/c^2$
	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	e Electrón	μ Muón

Con ustedes, los
Leptones
(leptón → liviano, delicado)



Y las primeras principios de conservación

- 1) Conservación de la energía y cantidad de movimiento,
(es una sola regla) $\rightarrow E^2 = p^2 + m^2 \leftarrow$ ¡invariante!

$$Q = \left(m_{\text{Bi}} - m_{\text{Po}} - m_e - m_{\bar{\nu}_e} \right) c^2$$

- 2) Conservación de la carga eléctrica

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$$

- 3) Conservación del número leptónico

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu} + Q_{\beta^-}$$

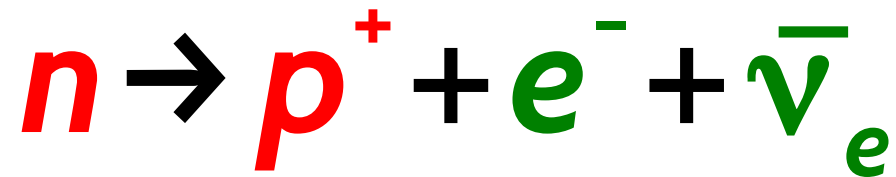
- 4) Conservación del número leptónico por sabor

$$\nu_e + n \rightarrow p^+ + e^- + Q_{\beta^-}$$

~~$$\nu_e + n \rightarrow p^+ + \mu^- + Q_{\beta^-}$$~~



Por ejemplo:



Inicial	Magnitudes	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
	partícula					
	n		0	0	0	0
final	p ⁺		+1	0	0	0
	e ⁻		-1	+1	+1	0
	<ν _e >		0	-1	-1	0
	Final	✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓

Proponer un decaimiento posible para el muón

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

Inicial

Magnitudes partícula	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número leptónico muónico
μ^-	-1	+1	0	+1
e^-	-1	+1	+1	0
$\bar{\nu}_e$	0	-1	-1	0
ν_μ	0	+1	0	+1
Final	-1 ✓	+1 ✓	0 ✓	+1 ✓

final

U1:Partículas, lo más pequeño

4 encuentros, del 05/Ago al 26/Ago

- **Dinámica Relativista.**
- **Física de partículas**
 - **Ley de Planck.**
 - **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

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



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

Nucleones: constituyentes del núcleo



- Protón

- masa: $m = 938,272 \text{ MeV}/c^2$
- Espín: $\frac{1}{2}$
- Carga eléctrica: +1
- Número bariónico: +1
- Vida media: infinita (estable)



- neutrón

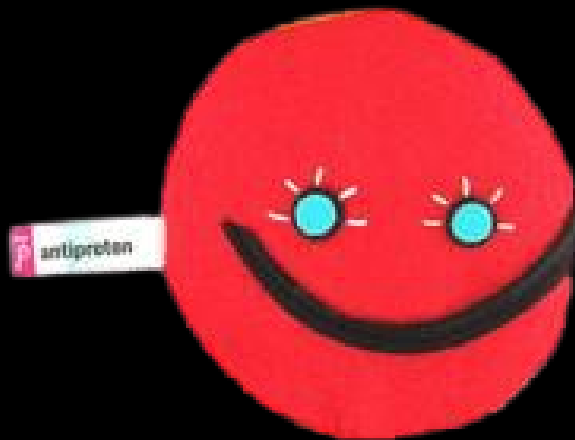
- masa: $m = 939,565 \text{ MeV}/c^2$
- Espín: $\frac{1}{2}$
- Carga eléctrica: 0
- Número bariónico: +1
- Vida media: 881,5 s



Antinucleones

- Protón

- masa: $m = 938.3 \text{ MeV}/c^2$
- Espín: $\frac{1}{2}$
- Carga eléctrica: -1
- Número bariónico: -1
- Vida media: infinita (estable)



- neutrón

- masa: $m = 939.6 \text{ MeV}/c^2$
- Espín: $\frac{1}{2}$
- Carga eléctrica: 0
- Número bariónico: -1
- Vida media: ¿881,5 s?





También podríamos haber propuesto

$$n \rightarrow e^+ + e^-$$


Inicial	Magnitudes partícula	Energía MeV	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico
	n	m=939.6	0	0	0
final	e ⁺	m=0.511	+1	-1	-1
	e ⁻	m=0.511	-1	+1	+1
	Final	✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓

Sin embargo, nunca se observó...

También podríamos haber propuesto

$$n \rightarrow e^+ + e^-$$



Inicial	Magnitudes partícula	Energía MeV	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número bariónico
	n	m=939.6	0	0	0	+1
final	e ⁺	m=0.511	+1	-1	-1	0
	e ⁻	m=0.511	-1	+1	+1	0
	Final	✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 

Sin embargo, nunca se observó...



En cambio el observado...


$$n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \quad \checkmark$$

Inicial	Magnitudes	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número bariónico
	partícula					
	n	m=939,6	0	0	0	+1
final	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 ✓

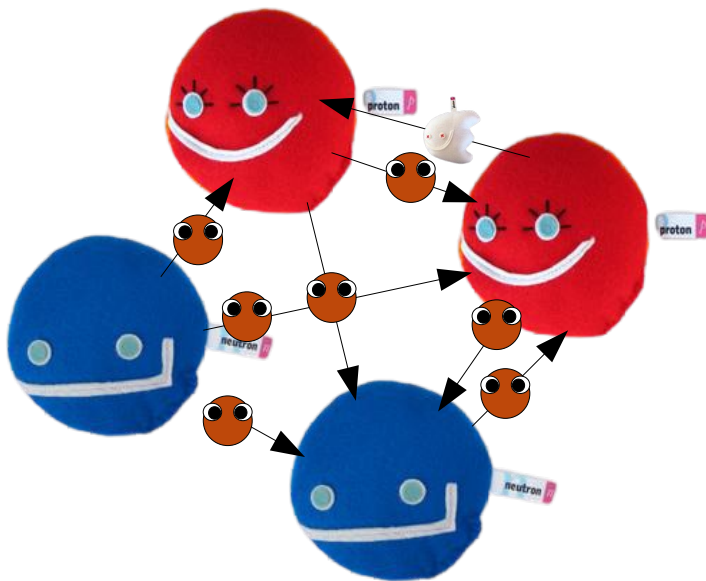
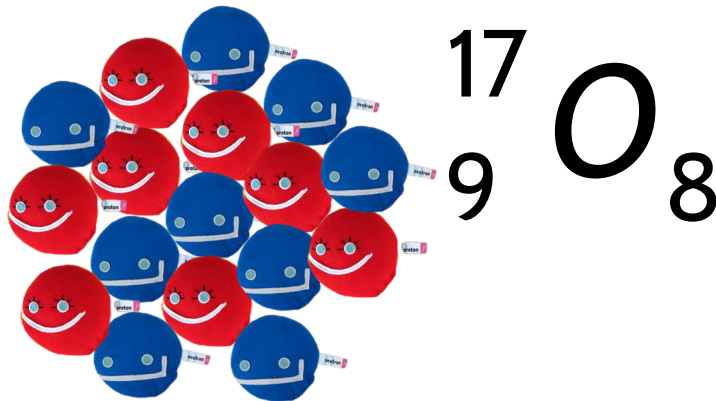


$p \rightarrow e^+ + \nu_e$



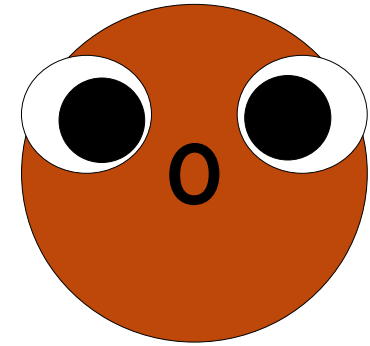
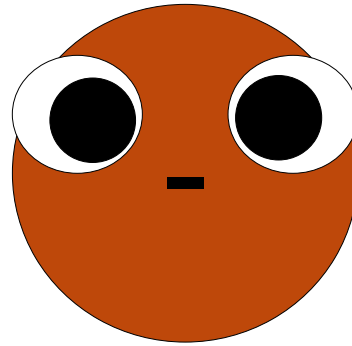
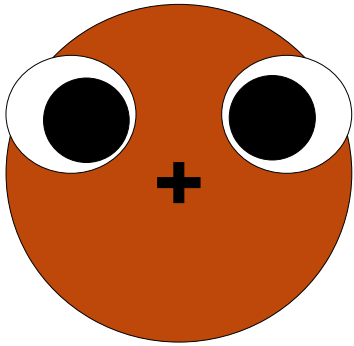
Inicial	Magnitudes partícula	Energía	Carga eléctrica	Número leptónico	Número leptónico electrónico	Número bariónico
	p	m=938,3	+1	0	0	+1
final	e ⁺	m=0,511	+1	-1	-1	0
	<ν _e >	m<2eV	0	+1	+1	0
Final		✓	0 ✓	0 ✓	0 ✓	0 

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 piones son inestables → decaimiento

Hadrones
(con carga fuerte)

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$

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

$$\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$

$$\pi^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$

fotones
(sin carga fuerte)

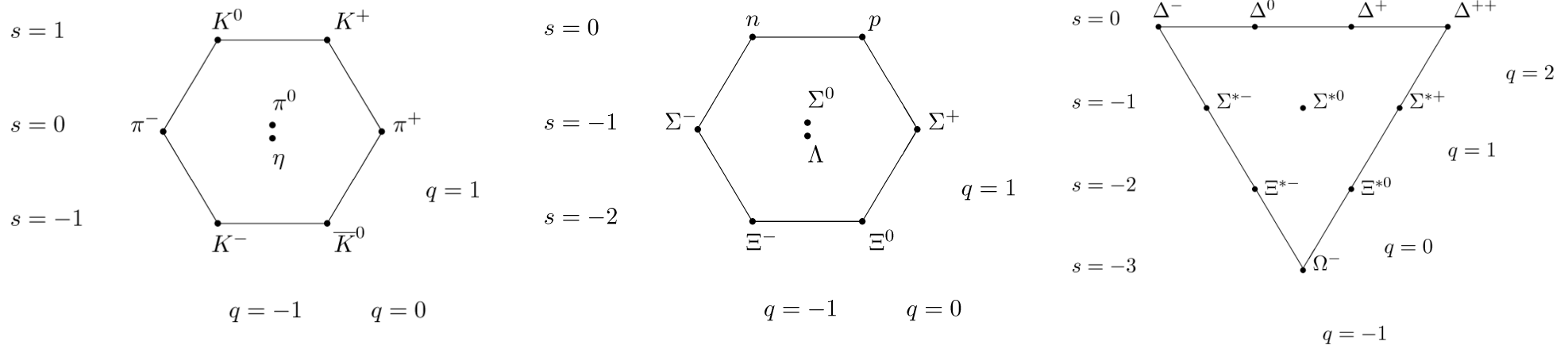
Leptones
(sin carga fuerte)



Suena razonable, pero...

- Al igual que el modelo del mar de Dirac, este modelo resuelve muchas cuestiones, pero deja planteadas más preguntas que respuestas
 - ¿Cómo se originan los piones?
 - ¿Por qué son piones y no otras partículas, como los muones o electrones?
 - ¿Como se produce el decaimiento beta?
 - ¿Cuál es el mecanismo del decaimiento del pión? ¿y del muón?
 - ¿Los hadrones (mesones y bariones) son fundamentales o hay otra capa más abajo?

Y además con los aceleradores...



- En 1961 Murray Gell-Mann y Yvual Nee'man proponen una organización para los hadrones: **el camino octuple**
- Una tabla periódica de los hadrones
 - Predicción de nuevos hadrones
 - Hoy conocemos más de 100 hadrones diferentes
 - Bariones y mesones no son elementales → **Quarks**

- 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

El modelo de los quarks



- quark u (up)
 - Masa: 2,16 MeV (*)
 - Espín: $1/2$
 - Carga: $+2/3$
 - Número bariónico: $+1/3$



- Quark d (down)
 - Masa: 4,67 MeV (*)
 - Espín: $1/2$
 - Carga: $-1/3$
 - Número bariónico: $+1/3$

(*) No hay quarks libres, por lo tanto su masa es aproximada

Antiquarks u y d

- Antiquark u

- Masa: 2,16 MeV (*)
- Espín: 1/2
- Carga: $-2/3$
- Número bariónico: $-1/3$



- Antiquark d

- Masa: 4,67 MeV (*)
- Espín: 1/2
- Carga: $+1/3$
- Número bariónico: $-1/3$



(*) No hay quarks libres, por lo tanto su masa es aproximada



Entonces los nucleones

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

- Para el protón: $q = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$; $NB = (+1/3) \times 3 = +1$
- Para el neutrón: $q = 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$; $NB = (+1/3) \times 3 = +1$

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

- Para el antiprotón: $q = -2/3 - 2/3 + 1/3 = -1$; $NB = (-1/3) \times 3 = -1$
- Para el neutrón: $q = -2/3 + 1/3 + 1/3 = 0$; $NB = (-1/3) \times 3 = -1$



Otros bariones y mesones:

- Bariones Δ :

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

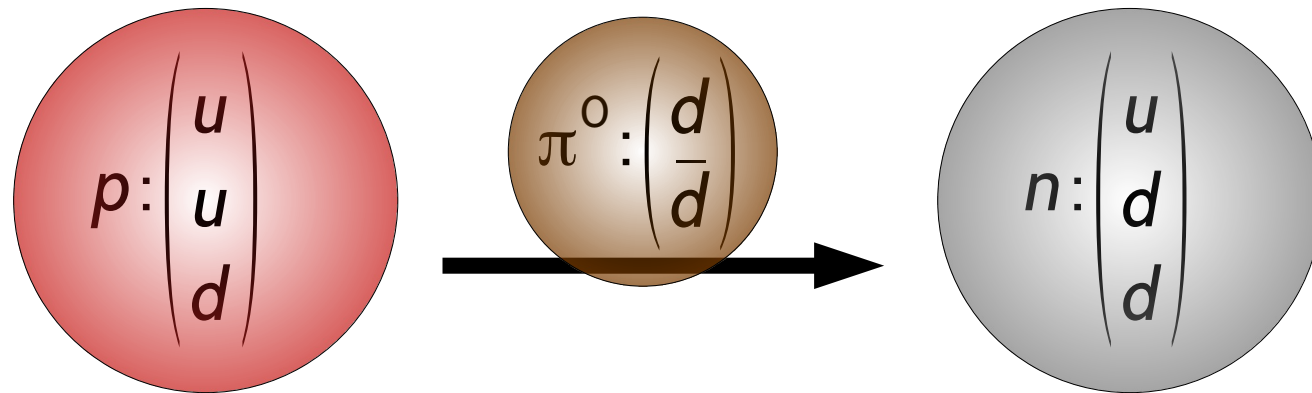
- Mesones π :

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

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

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: $+2/3 - 1 = -1/3$)





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, Λ^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), $\tau \sim 10^{-8} \text{ s}$

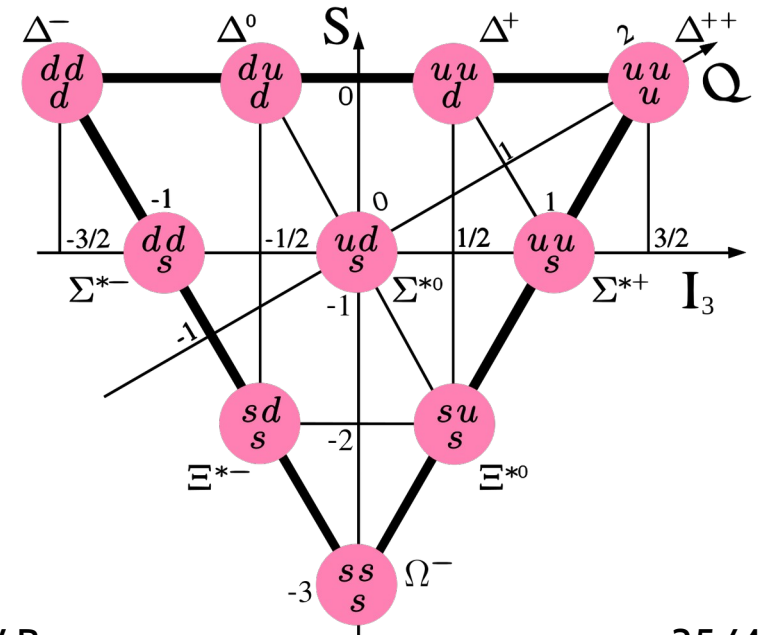
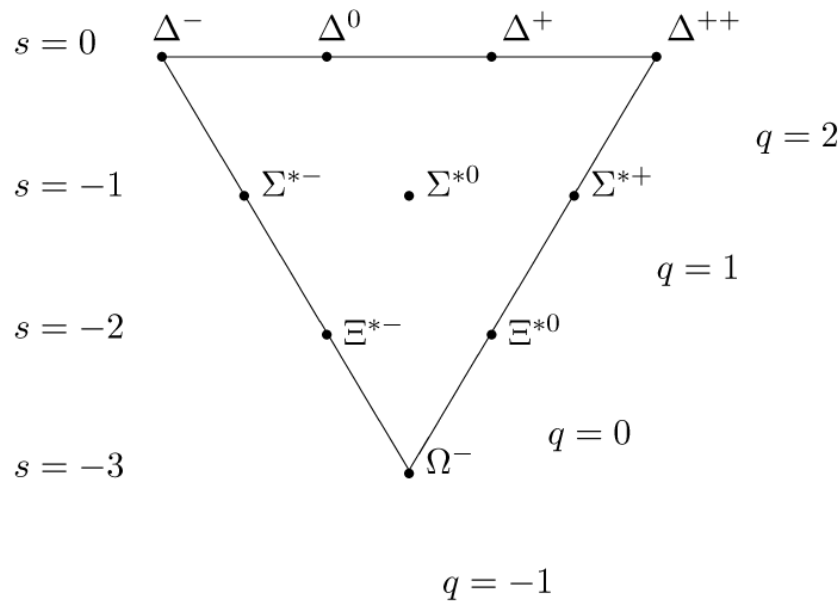
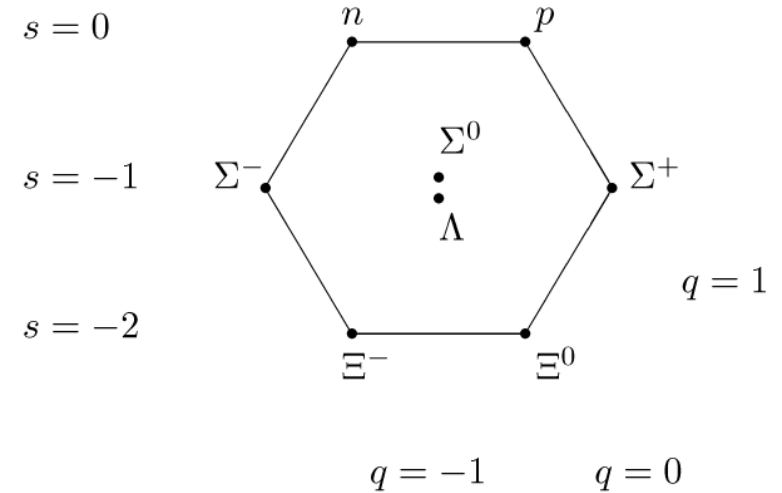
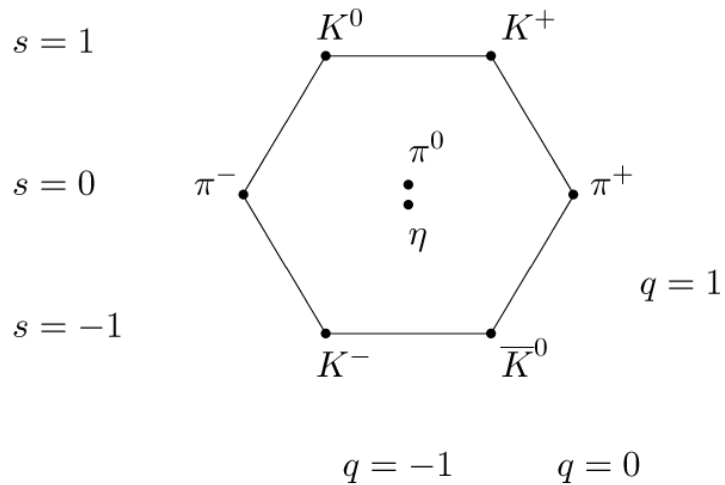
$$K^+ = \begin{pmatrix} u \\ \bar{s} \end{pmatrix} \quad K^- = \begin{pmatrix} \bar{u} \\ s \end{pmatrix} \quad K^0 = \begin{pmatrix} d \\ \bar{s} \end{pmatrix} \quad K^0 = \begin{pmatrix} \bar{d} \\ s \end{pmatrix}$$

- Bariones extraños: Sigmas (Σ)

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



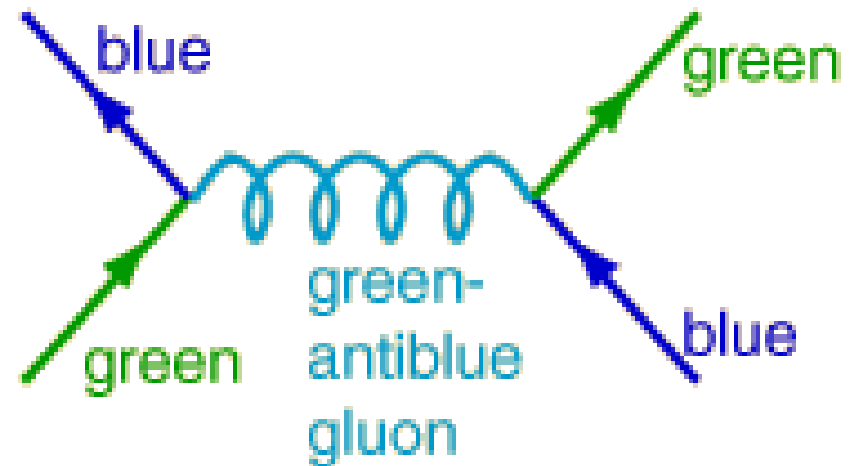
Y además con los aceleradores...



- 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.

Intercambio de color como interacción fuerte

- Sea en un barión un par de quarks: $u d$
- El quark u emite un gluón azul (su color) y antirrojo (el contrario al color del otro).
Queda rojo: $u \Rightarrow d$
- El quark d recibe antirrojo y azul, queda azul: $u d$
- El resultado final es el intercambio de carga de color de ambos quarks: $u d$



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

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
	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!)