

INTRODUCCIÓN A LA ASTROFÍSICA RELATIVISTA

Gustavo E. Romero
Cursada 2023, FCAyG/UNLP

¿Hay cosas básicas?

Según el **Modelo Estándar** hay 12 tipos diferentes de partículas que forman todas las cosas. Estas partículas se dividen en dos grupos: quarks y leptones. Hay 6 **quarks** y 6 **leptones**. Existen además hay cuatro tipos de **bosones de gauge**, que son las partículas mediadoras de las interacciones electromagnética (el **fotón**), débil (**bosones Z y W^\pm**) y fuerte (ocho clases de **gluones**). La última partícula que compone el modelo es el **bosón de Higgs**.

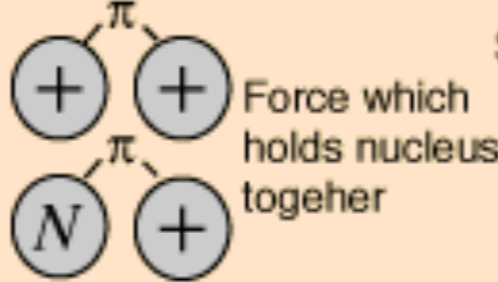

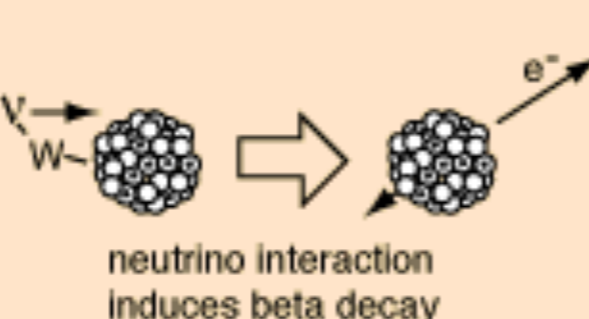
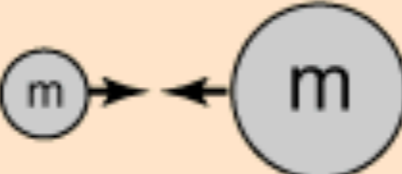
Partículas del Modelo Standard

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2	0 0 1	γ photon
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
	0.511 MeV/c^2 -1 1/2	105.7 MeV/c^2 -1 1/2	1.777 GeV/c^2 -1 1/2	91.2 GeV/c^2 0 1	GAUGE BOSONS
	e electron	μ muon	τ tau	W W boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	80.4 GeV/c^2 ± 1 1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino		

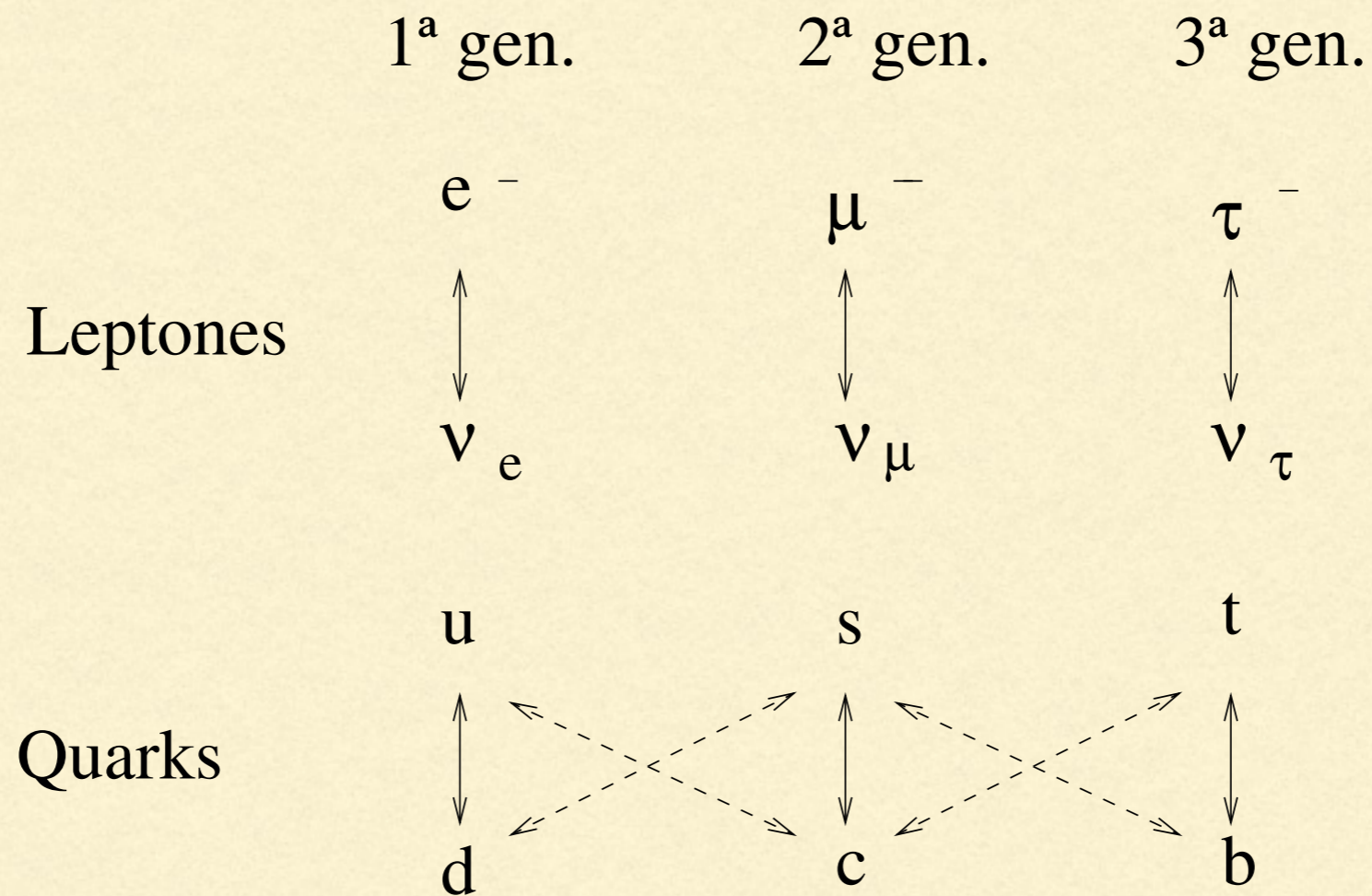
Estados e interacciones

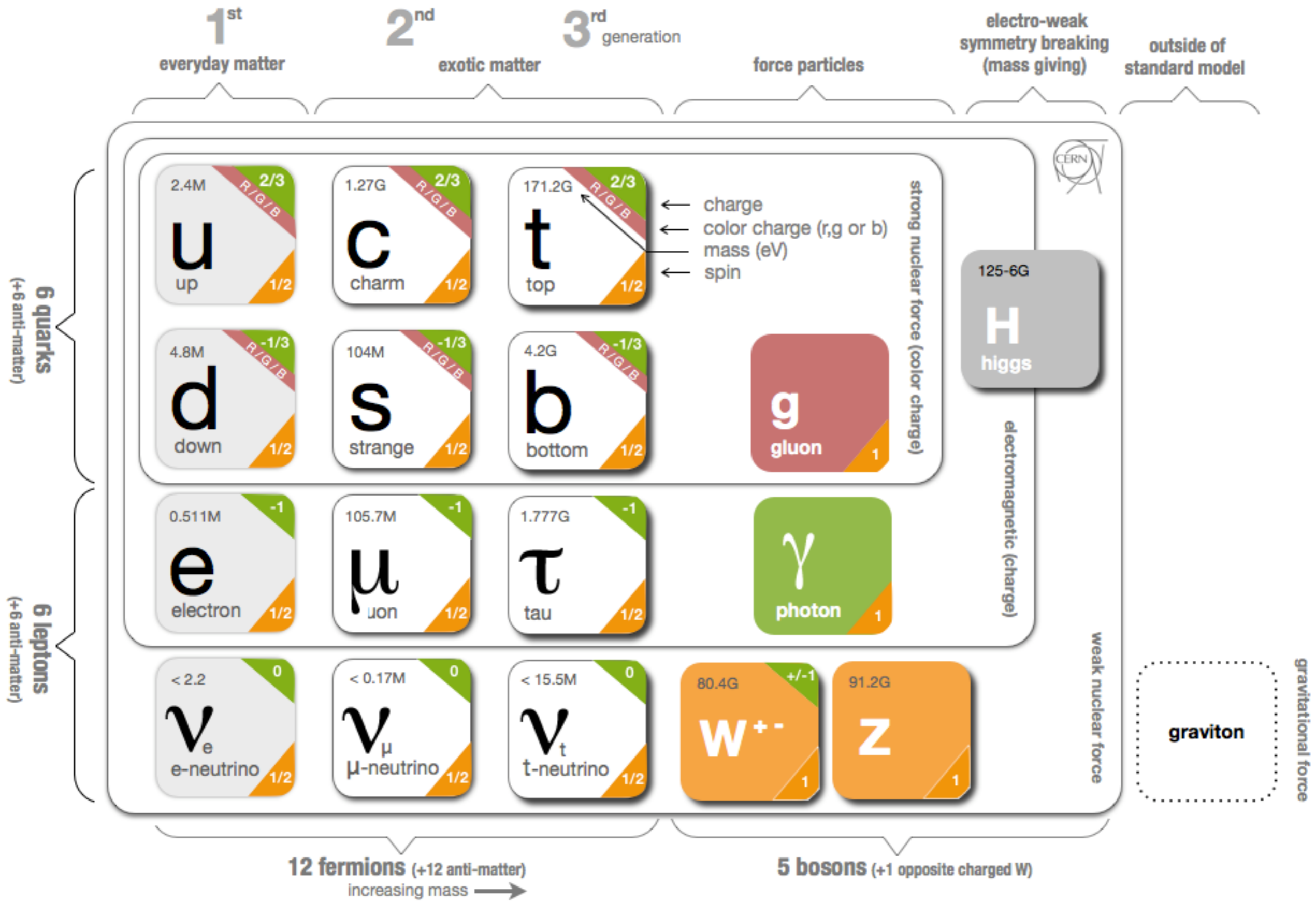
Las cosas no sólo existen, sino que deben existir de alguna manera particular. Los modos de existencia son lo que llamamos **propiedades**. La colección de propiedades de una cosa o sistema es su **estado**. Las **interacciones** son acciones de una cosa sobre otra que resultan en un **cambio de estado**. A un cambio de estado se lo llama suceso o **evento**.

Fundamental interactions

<i>Strong</i>	 <p>Force which holds nucleus together</p>	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	 <p>neutrino interaction induces beta decay</p>	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+ , W^- , Z_0 , mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

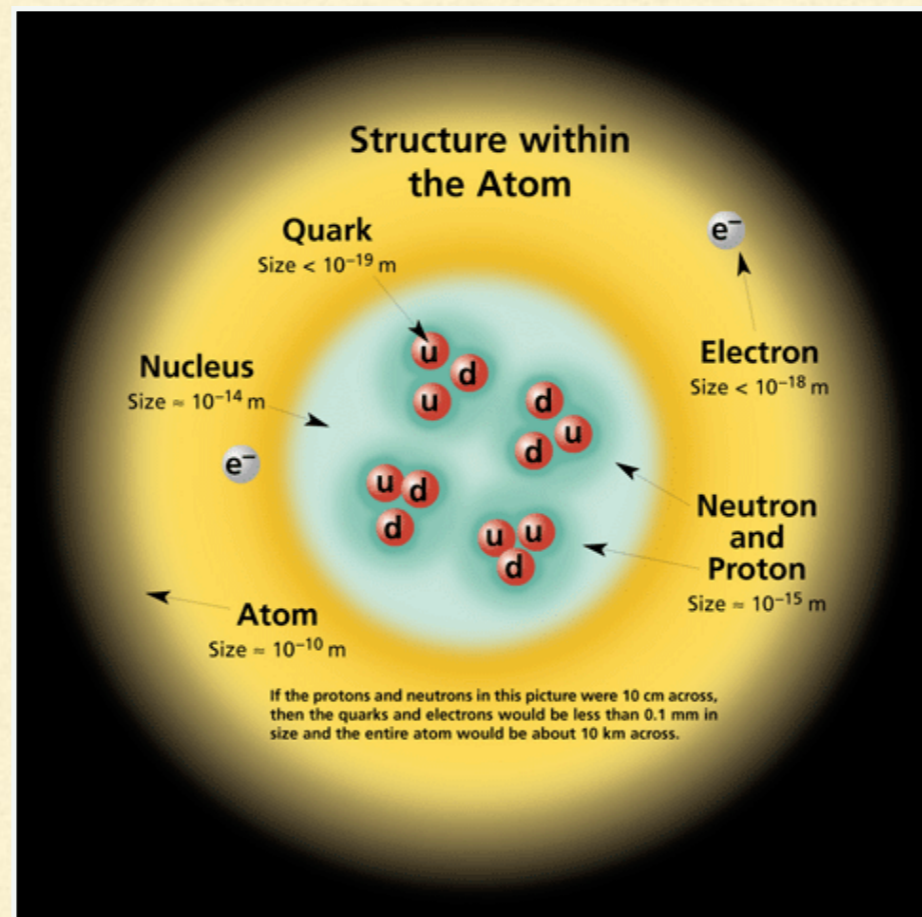
La **interacción débil** intercambia las propiedades de leptones y quarks en forma selectiva, definiendo 3 familias de partículas que se denominan “generaciones”.





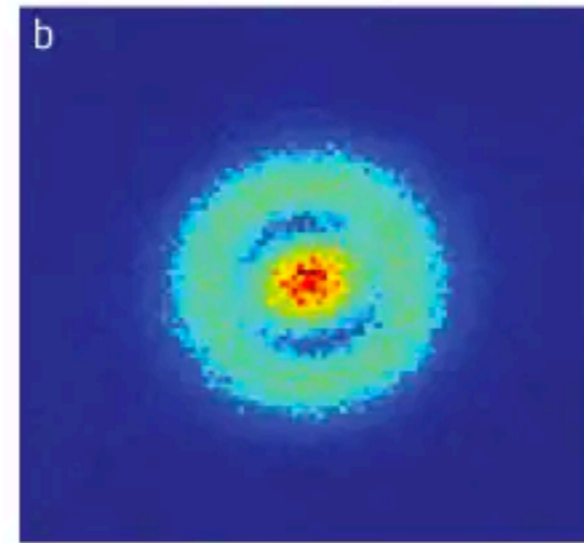
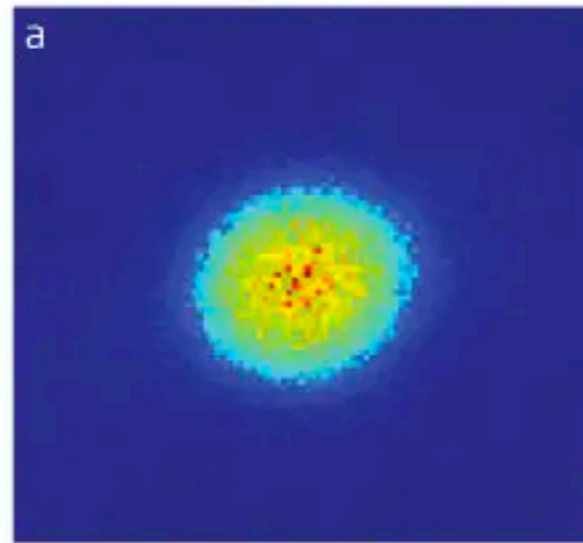
La **interacción fuerte** sólo actúa sobre **quarks**. Como es una fuerza atractiva, permite la formación de partículas más complejas. Las partículas formadas por quarks se llaman **hadrones**.

La **interacción electromagnética** actúa sobre partículas **cargadas**. Es una fuerza atractiva o repulsiva dependiendo de la carga eléctrica, que viene en dos sabores conocidos como “+” y “—”.

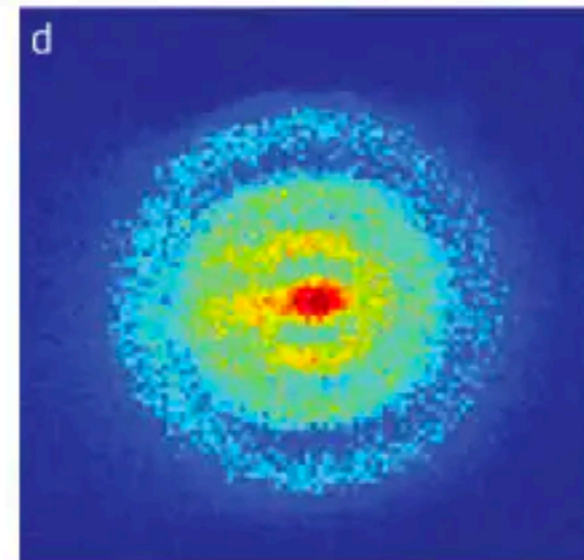
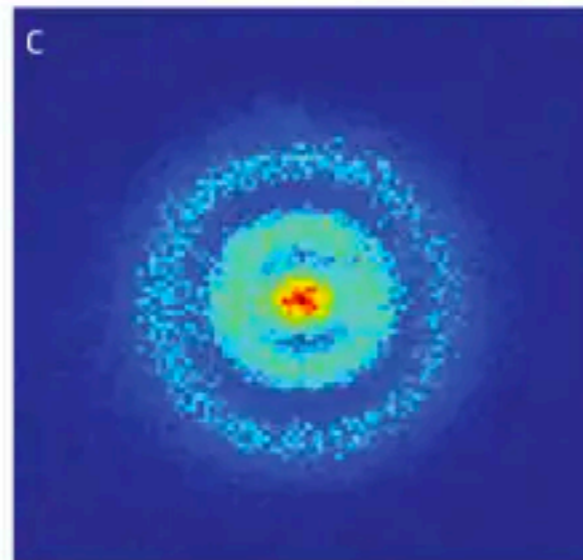


An atom undressed

©NewScientist

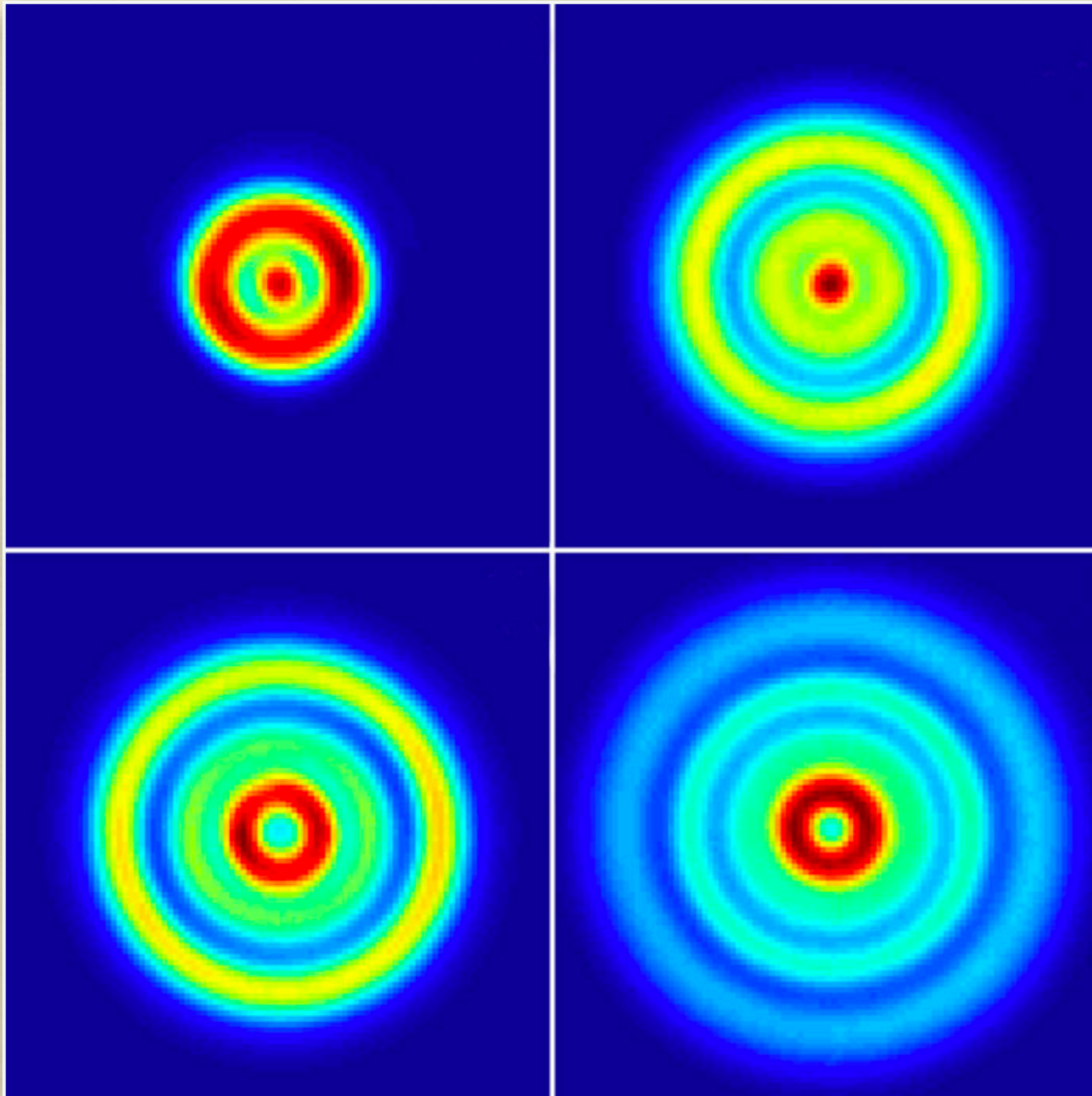


Increasing electron density →



SOURCE: PHYSICAL REVIEW LETTERS

Diferentes estado de excitación del átomo de H



He

Leptones

Los leptones son las partículas elementales que no sufren interacciones fuertes. Hay seis leptones, que pueden clasificarse de acuerdo con sus propiedades: la carga eléctrica Q y el número leptónico L . El electrón, el muón y el tau tienen carga eléctrica $Q = -1$ y los neutrinos carga nula.

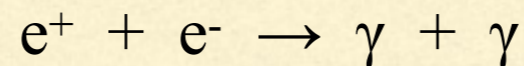
El número leptónico es una propiedad intrínseca de los leptones. Hay tres tipos de número leptónico, L_e , L_μ y L_τ ; cada tipo es característico de una generación. Toda interacción que involucre leptones debe conservar tanto la carga eléctrica como el número leptónico.

	Partícula	Q	L_e	L_μ	L_τ	mc^2
Generación 1	e	-1	1	0	0	0.511 MeV
	ν_e	0	1	0	0	$\sim 2-3$ eV
Generación 2	μ	-1	0	1	0	105.7 MeV
	ν_μ	0	0	1	0	< 0.19 MeV
Generación 3	τ	-1	0	0	1	1776.84 MeV
	ν_τ	0	0	0	1	< 18.2 MeV

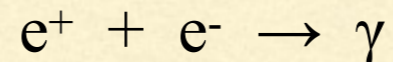
Antipartículas

A cada partícula del modelo estándar le corresponde una **antipartícula** que posee la misma masa y el mismo espín, pero carga eléctrica y número leptónico o bariónico contrario. Algunas partículas son idénticas a su antipartícula, como por ejemplo el fotón, que no tiene carga. Pero **no** todas las partículas de carga neutra son idénticas a su antipartícula.

Si una partícula y su antipartícula se encuentran en los estados cuánticos apropiados, entonces pueden aniquilarse la una con la otra y producir otras partículas. Ejemplo:



La aniquilación de un par electrón-positrón en un solo fotón:



no puede ocurrir porque es imposible que se conserven la energía y el momento a la vez en este proceso.

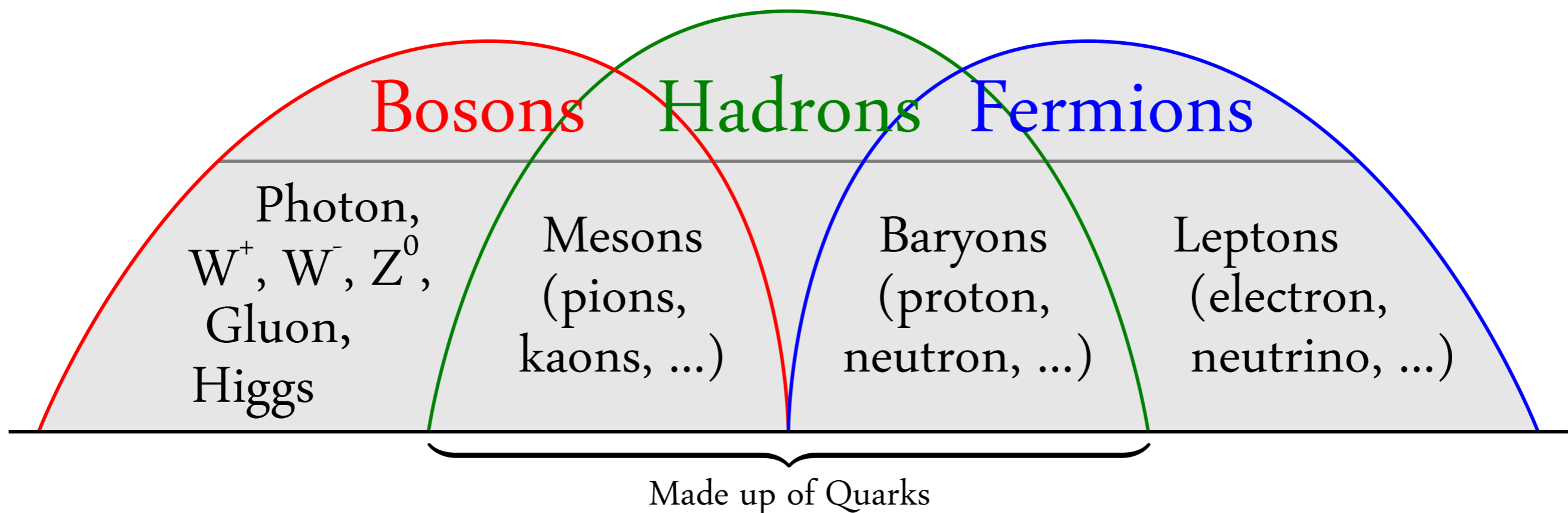
Las antipartículas tienen números cuánticos exactamente opuestos a las partículas, por lo que las sumas de todos los números cuánticos del par original son cero. Por lo tanto, se puede producir cualquier conjunto de partículas cuyos números cuánticos totales también sean cero siempre y cuando se obedezcan la conservación de la energía y la conservación del momento.

Durante una aniquilación de baja energía, se favorece la producción de fotones, ya que estas partículas no tienen masa. Sin embargo, los colisionadores de partículas de alta energía y fuentes astrofísicas producen aniquilaciones donde se crea una gran variedad de partículas pesadas exóticas.

Hadrones

Los quarks se combinan para formar partículas no elementales llamadas *hadrones*. Tres quarks forman un *barión*, tres antiquarks forman un *antibarión* y un quark y un antiquark forman un *mesón*.

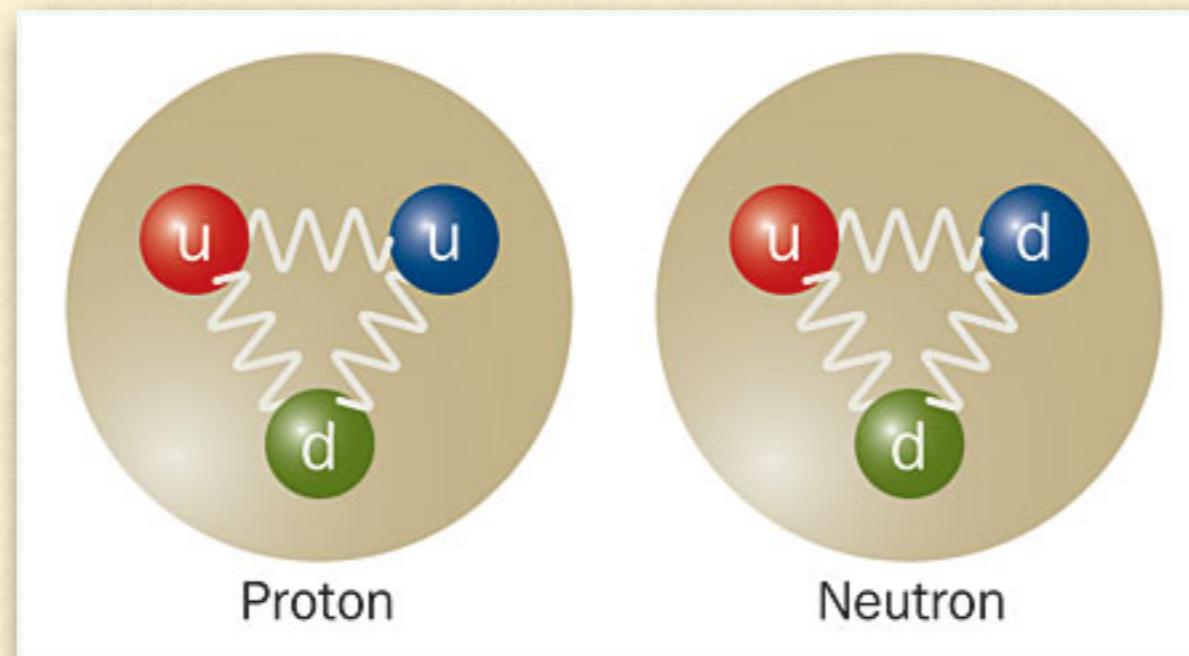
$$\text{Hadrones} \begin{cases} \text{Bariones} & (qqq) \\ \text{Antibariones} & (\bar{q}\bar{q}\bar{q}) \\ \text{Mesones} & (q\bar{q}) \end{cases}$$



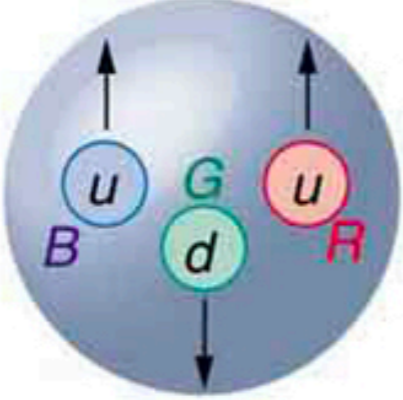
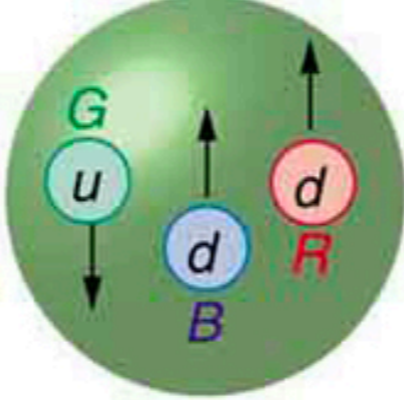
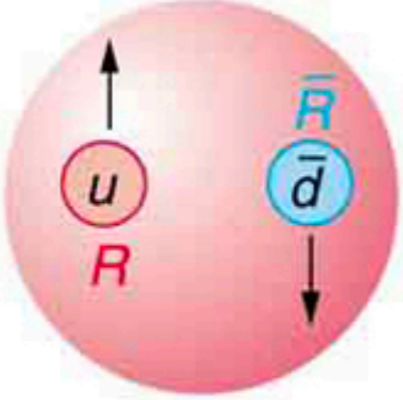
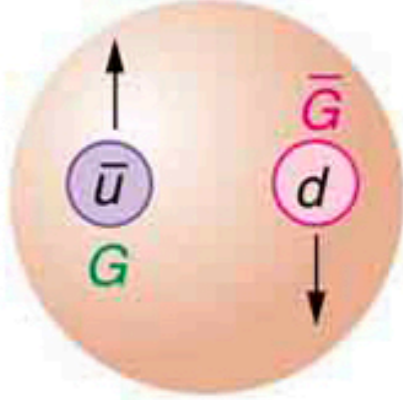
El protón y el neutrón, llamados en conjunto *nucleones* por componer el núcleo atómico, son ejemplos de bariones. El protón está formado por dos quarks *u* y un quark *d* y el neutrón por dos quarks *d* y un quark *u*:

$$\begin{array}{ll} \text{Protón} & p \equiv uud \\ \text{Neutrón} & n \equiv udd \end{array}$$

El protón es el barión más ligero y es estable. Todos los demás bariones son inestables y decaen.



Spin y carga de los bariones más ligeros

				
	Proton	Neutron	π^+	π^-
Spin	$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$	$+\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$
Charge	$+\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$	$+\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$	$+\frac{2}{3} + \frac{1}{3} = +1$	$-\frac{2}{3} - \frac{1}{3} = -1$

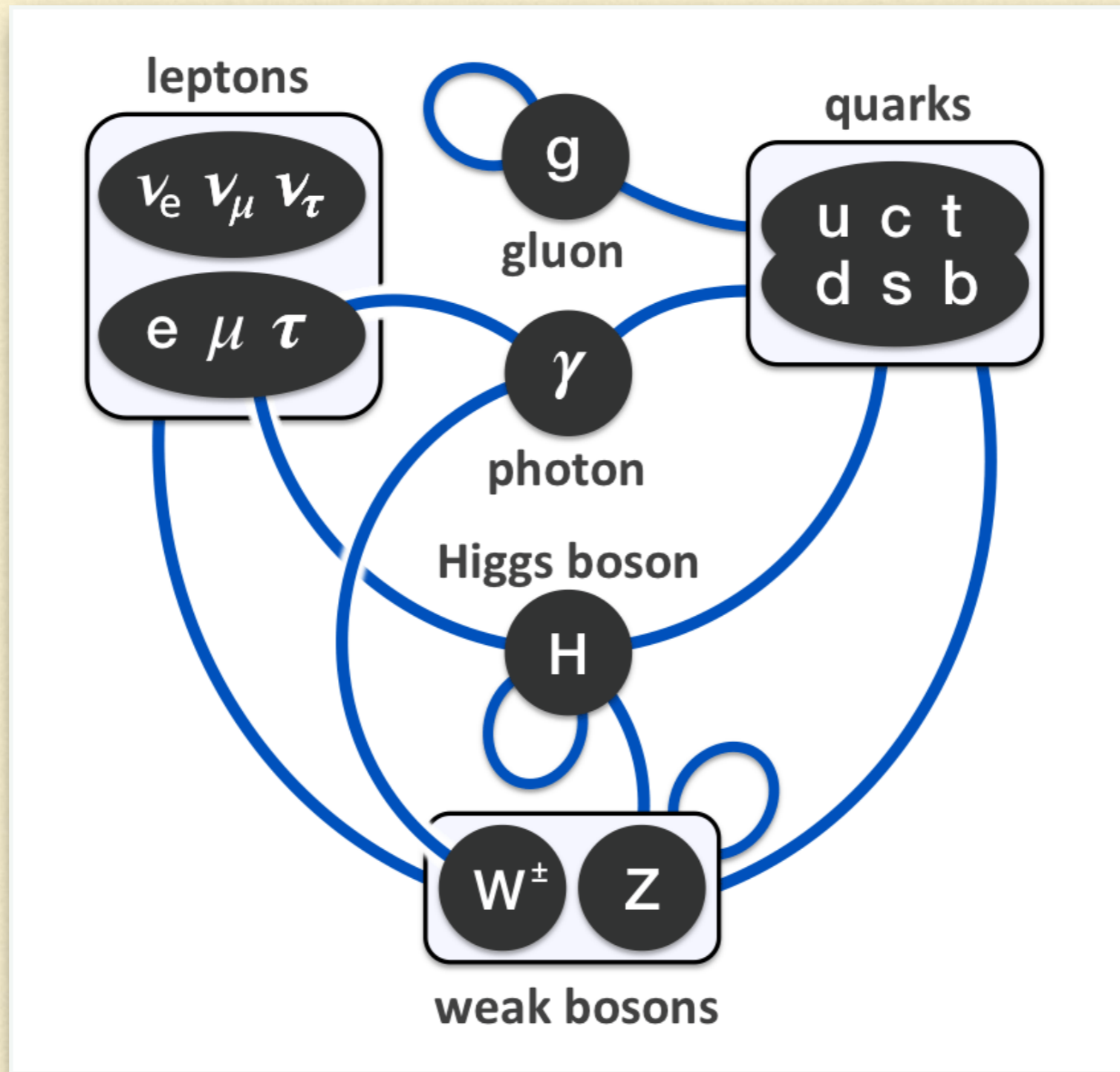
Como el protón tiene carga eléctrica $Q_p = +1$ y el neutrón $Q_n = 0$, de lo anterior se deduce que los quarks tienen carga eléctrica fraccionaria (respecto de la del electrón). En particular

$$Q_u = +\frac{2}{3} \quad Q_d = -\frac{1}{3}.$$

La fuerza débil no puede cambiar un quark en un leptón. De aquí que los quarks tengan su propio número llamado *número bariónico*. Vale $1/3$ para los quarks y 0 para los leptones. El número bariónico se conserva en todas las interacciones. Los antiquarks tienen carga y número bariónico opuesto a los quarks.

La propiedad de los quarks que permite diferenciarlos entre sí es el *sabor*. Existen 6 diferentes sabores: u (up), d (down), c (charm), s (strange), t (top o truth) y b (bottom o beauty).

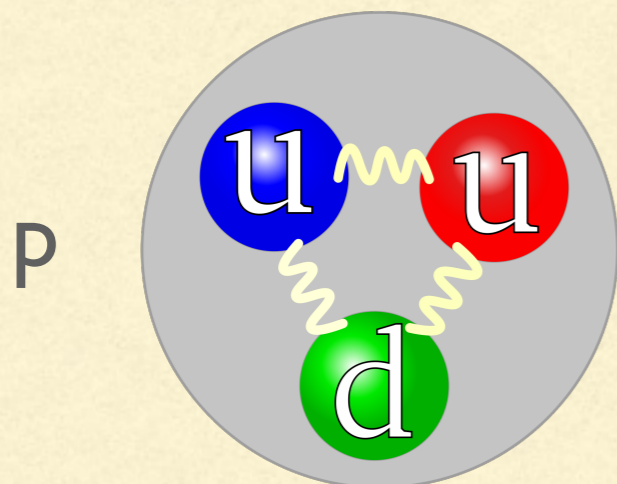
Partículas y sus interacciones



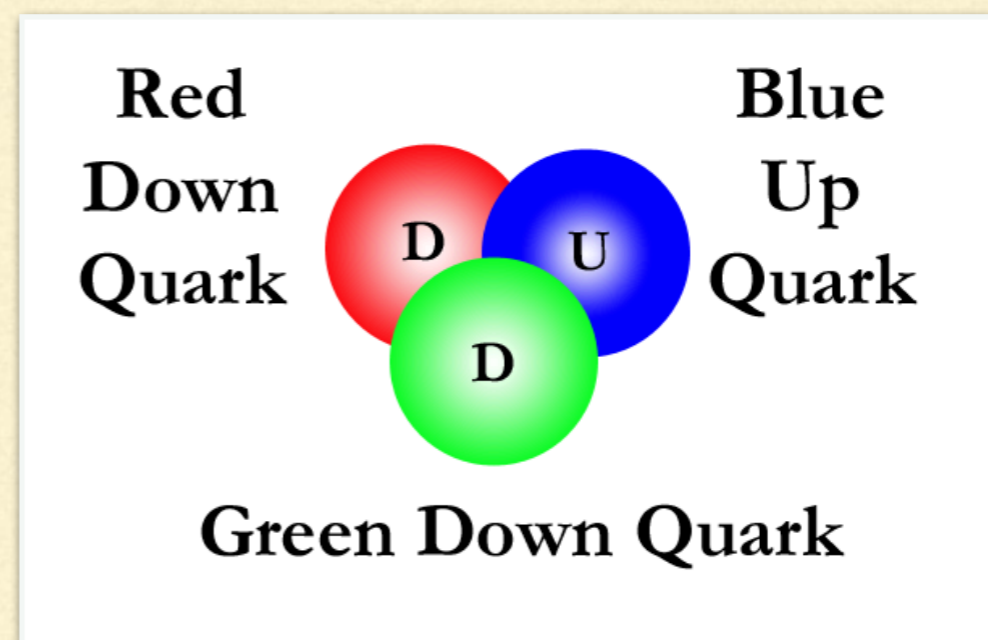
El color es la carga asociada a la fuerza fuerte. Hay tres tipos de carga de color: rojo (r), verde (g) y azul (b).

Una característica fundamental de la fuerza fuerte es que determina que para poder existir como partícula libre, un hadrón *no debe tener color neto*. Esto se logra con cualquier combinación de quarks que incluya los tres colores o un color y su *anticolor*, lo que explica por qué los hadrones solo se observan en combinaciones de quarks de la forma qqq o $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ (bariones) y $q\bar{q}$ (mesones). Por ejemplo, en términos de la carga de color de los quarks que lo forman, un protón puede ser $p \equiv u_r u_b d_g$ o $p \equiv u_r u_g d_b$. Los antiquarks tienen anticolor, por lo que, por ejemplo, los piones pueden ser $\pi^+ \equiv u_r \bar{d}_{\bar{r}}$, $\pi^0 \equiv u_b \bar{u}_{\bar{b}}$, etc.

La propiedad anterior, conocida como *confinamiento de color*, implica también que no pueden existir quarks libres ya que tienen color neto: están confinados dentro de los hadrones.



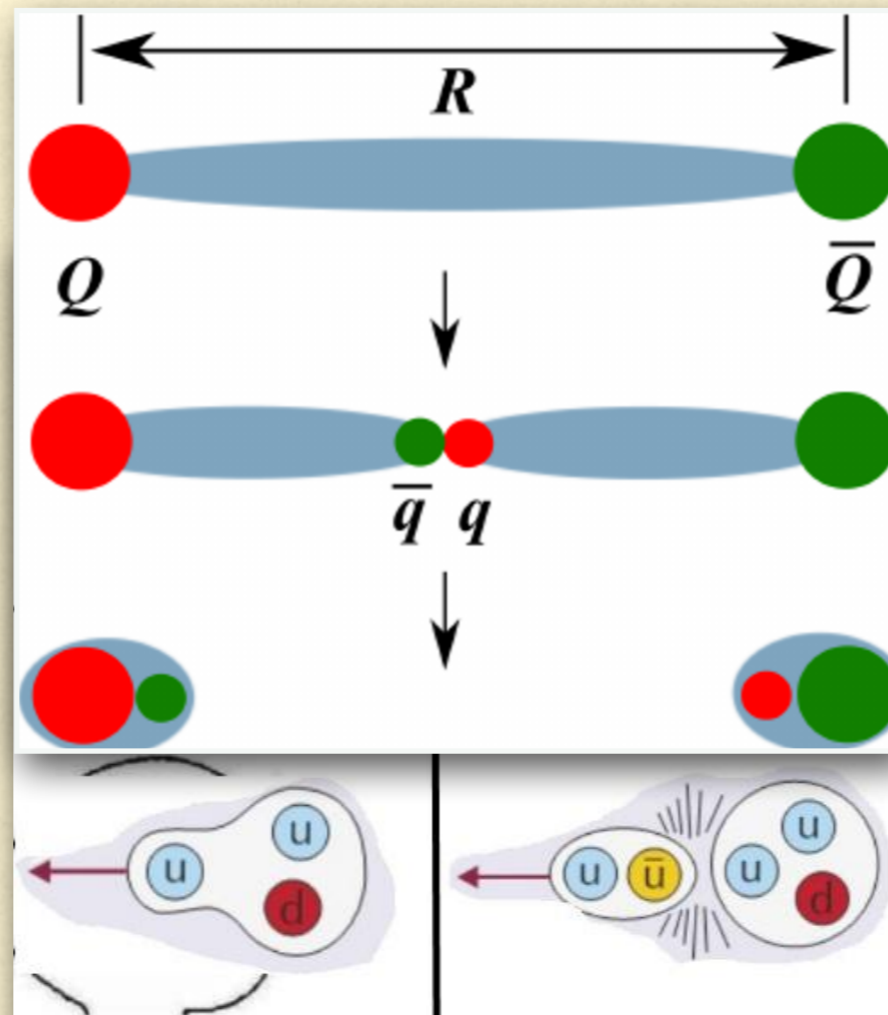
n



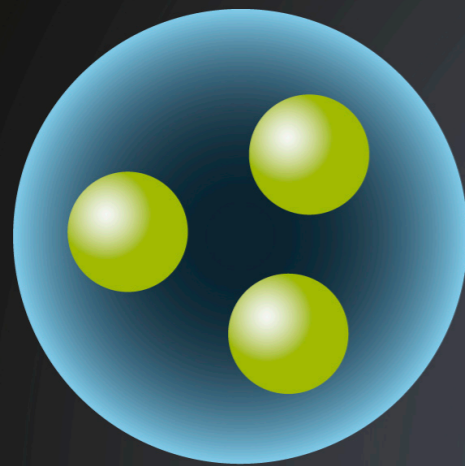
Aunque la fuerza fuerte entre quarks no puede describirse en términos clásicos, se la suele representar de forma aproximada a través del siguiente potencial:

$$V(\text{color}) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

donde r es la separación entre los quarks, $\alpha_s \sim 1 \text{ J m}$ y $k = 1.36 \times 10^5 \text{ J m}^{-1}$.



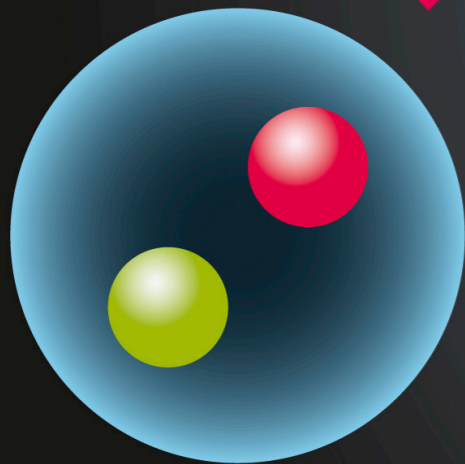
Quark bound states



Baryon

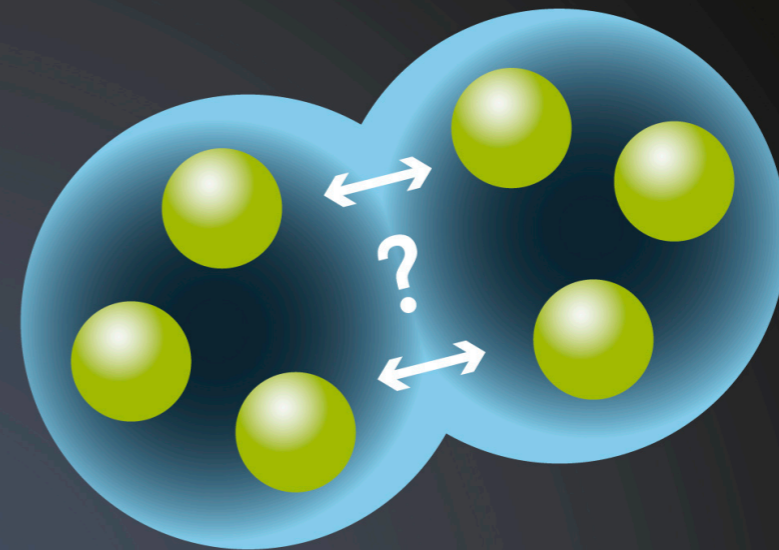
Lifetime:
> 10^{30} years (proton)
 ≈ 15 minutes (neutron)
< 10^{-10} seconds (others)

FAMILIAR STATES



Meson

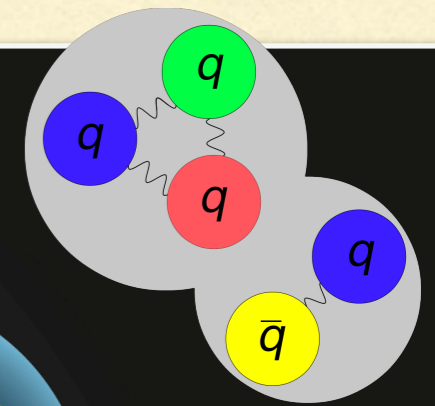
Lifetime:
< 10^{-8} seconds



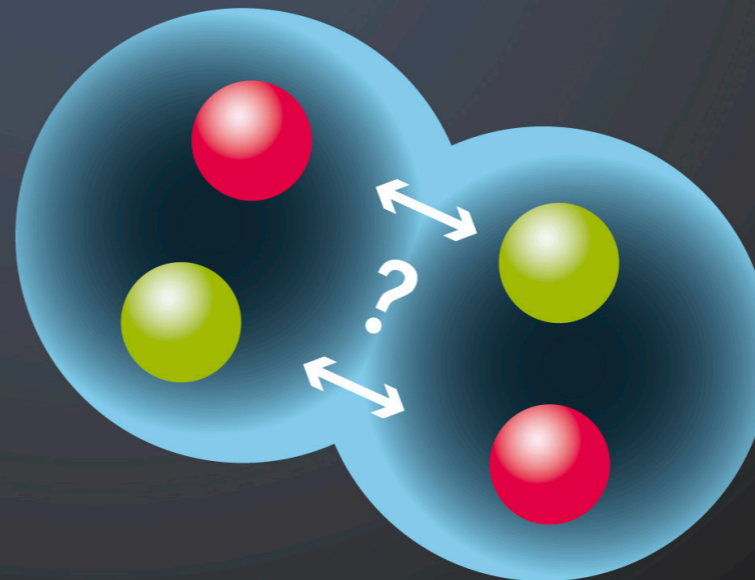
NEW DISCOVERY FROM JÜLICH

Dibaryon

Lifetime:
< 10^{-23} seconds



Pentaquark



RECENTLY DISCOVERED

Tetraquark

Lifetime:
< 10^{-23} seconds

 Quark  Antiquark  Interaction

Combinando los tres quarks más ligeros se pueden formar distintos bariones. El llamado *octeto bariónico* está formado por las siguientes partículas:

$$\mathbf{Nucleones} \quad p \equiv uud \quad n \equiv udd \quad \mathbf{S} = \mathbf{0}$$
$$(0.938) \quad (0.940)$$

$$\mathbf{Sigma} \quad \Sigma^+ \equiv uus \quad \Sigma^0, \Lambda \equiv uds \quad \Sigma^- \equiv dds \quad \mathbf{S} = -\mathbf{1}$$
$$(1.189) \quad (1.192) \quad (1.197)$$

$$\mathbf{Xi} \quad \Xi^0 \equiv uss \quad \Xi^- \equiv dss \quad \mathbf{S} = -\mathbf{2}$$
$$(1.314) \quad (1.321)$$

A cualquier hadrón que tenga extrañeza no nula se le llama *partícula extraña*. A los hadrones extraños que decaen que no contengan quarks c , t ni b se los suele llamar *hiperones*.

Los quarks dentro de los bariones tienen una variedad de niveles energéticos, por lo que los estados excitados dan lugar a partículas más masivas llamadas *resonancias*. Las más conocidas son las partículas Δ , de extrañeza $S = 0$:

$$\begin{array}{cccc} \Delta^- \equiv ddd & \Delta^0 \equiv udd & \Delta^+ \equiv uud & \Delta^{++} \equiv uuu \\ (1.23) & (1.23) & (1.23) & (1.23) \end{array}$$

Las partículas Σ^* son resonancias más masivas:

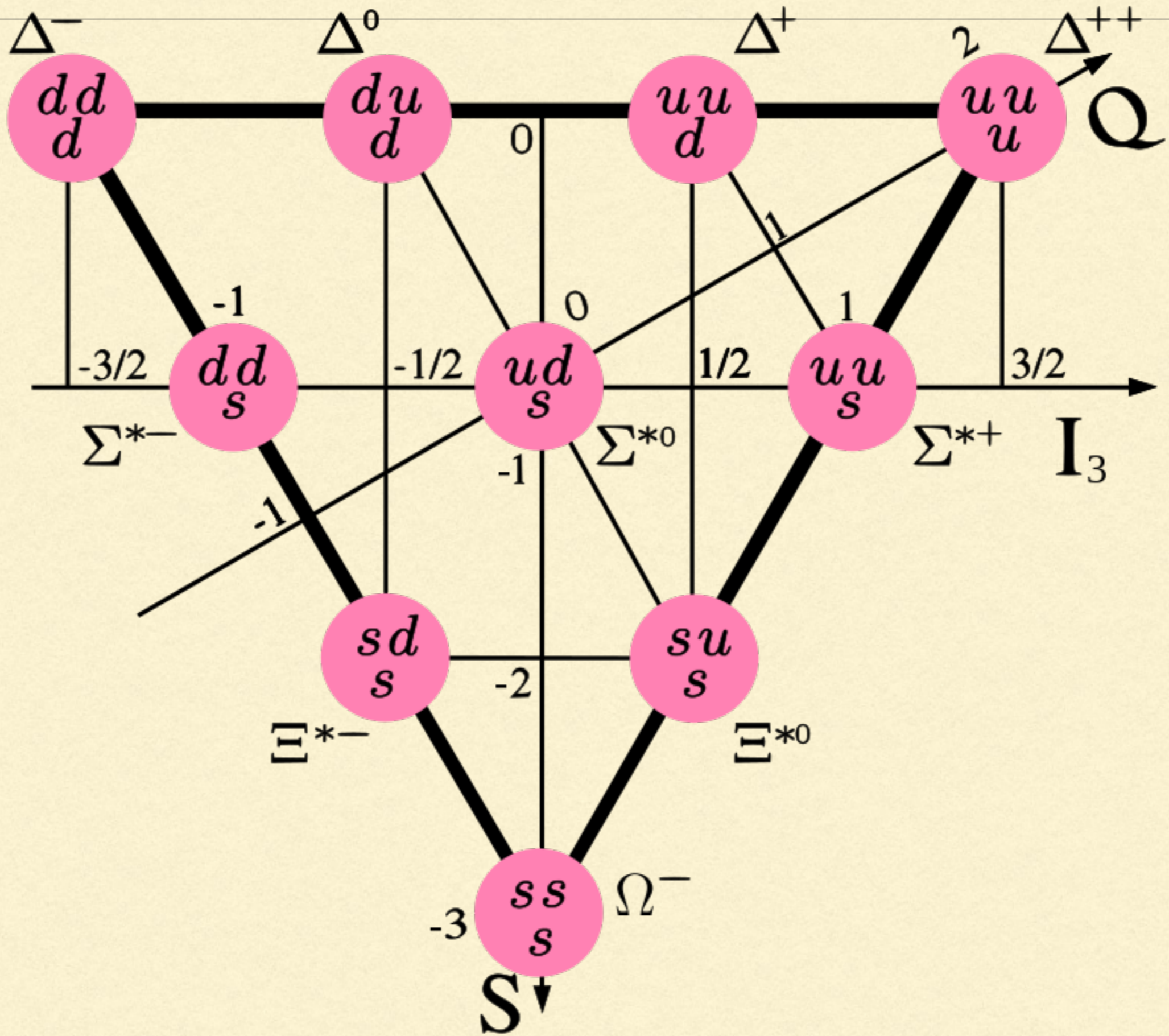
$$\begin{array}{ccc} \Sigma^{*+} \equiv uus & \Sigma^{*0} \equiv uds & \Sigma^{*-} \equiv dds & \mathbf{S= -1} \\ (1.383) & (1.384) & (1.387) & \end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} \Xi^{*0} \equiv uss & \Xi^{*-} \equiv dss & \mathbf{S= -2} \\ (1.531) & (1.535) & \end{array}$$

Finalmente, es posible formar un barión solo con quarks extraños, la partícula Ω^- de extrañeza $S = -3$:

$$\begin{array}{c} \Omega^- \equiv sss \\ (1.67) \end{array}$$

Estas diez partículas forman el llamado *decuplete bariónico*.



Los *mesones* son hadrones formados por un quark y un antiquark, que no tienen por qué ser del mismo sabor. Los mesones que se pueden formar con los tres quarks más ligeros son:

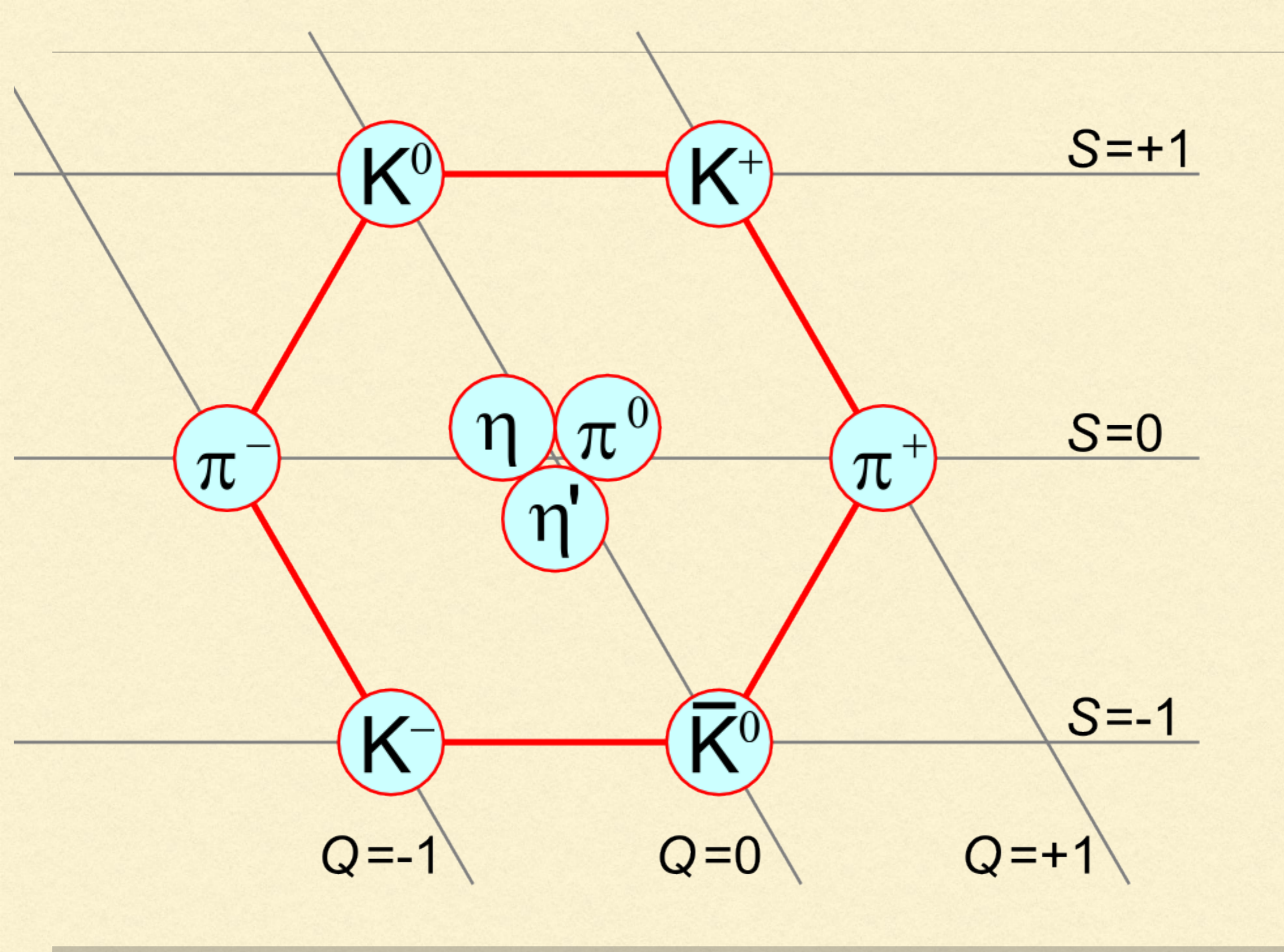
$$\mathbf{Pi3n} \quad \pi^- \equiv d\bar{u} \quad \pi^0 \equiv u\bar{u} \quad \pi^+ \equiv u\bar{d} \quad \mathbf{S} = \mathbf{0}$$
$$(0.14) \quad (0.135) \quad (0.140)$$

$$\mathbf{Eta} \quad \eta \equiv d\bar{d} \quad \eta' \equiv s\bar{s} \quad \mathbf{S} = \mathbf{0}$$
$$(0.547) \quad (0.958)$$

$$\mathbf{Ka3n} \quad K^0 \equiv d\bar{s} \quad K^+ \equiv u\bar{s} \quad \mathbf{S} = \mathbf{1}$$
$$(0.498) \quad (0.494)$$

$$K^- \equiv s\bar{u} \quad \bar{K}^0 \equiv s\bar{d} \quad \mathbf{S} = \mathbf{-1}$$
$$(0.494) \quad (0.498)$$

Este es el llamado *noneto mes3nico*.



Bosons	Z	Z^0	Self	91.19×10^3	0	0	0	0	0	1.32×10^{-25}
Leptons	Electron	e^-	e^+	0.511	0	± 1	0	0	0	Stable
	Neutrino (e)	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$0(7.0\text{eV})^{[6]}$	0	± 1	0	0	0	Stable
	Muon	μ^-	μ^+	105.7	0	0	± 1	0	0	2.20×10^{-6}
	Neutrino (μ)	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	$0(< 0.27)$	0	0	± 1	0	0	Stable
	Tau	τ^-	τ^+	1777	0	0	0	± 1	0	2.91×10^{-13}
	Neutrino (τ)	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	$0(< 31)$	0	0	0	± 1	0	Stable
Hadrons (selected)										
Mesons	Pion	π^+	π^-	139.6	0	0	0	0	0	2.60×10^{-8}
		π^0	Self	135.0	0	0	0	0	0	8.4×10^{-17}
	Kaon	K^+	K^-	493.7	0	0	0	0	± 1	1.24×10^{-8}
		K^0	\bar{K}^0	497.6	0	0	0	0	± 1	0.90×10^{-10}
	Eta	η^0	Self	547.9	0	0	0	0	0	2.53×10^{-19}
(many other mesons known)										
Baryons	Proton	p	\bar{p}	938.3	± 1	0	0	0	0	Stable ^[7]
	Neutron	n	\bar{n}	939.6	± 1	0	0	0	0	882
	Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1115.7	± 1	0	0	0	∓ 1	2.63×10^{-10}
	Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	1189.4	± 1	0	0	0	∓ 1	0.80×10^{-10}
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1192.6	± 1	0	0	0	∓ 1	7.4×10^{-20}
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	1197.4	± 1	0	0	0	∓ 1	1.48×10^{-10}
	Xi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1314.9	± 1	0	0	0	∓ 2	2.90×10^{-10}
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^+$	1321.7	± 1	0	0	0	∓ 2	1.64×10^{-10}
Omega	Ω^-	$\bar{\Omega}^+$	1672.5	± 1	0	0	0	∓ 3	0.82×10^{-10}	

Interacciones de partículas

Las partículas elementales interactúan cuando se acercan lo suficiente como para que las fuerzas fundamentales puedan actuar modificando su estado. Las interacciones entre partículas involucran el intercambio entre ellas de bosones de gauge, que son los mensajeros o portadores de las fuerzas fundamentales.

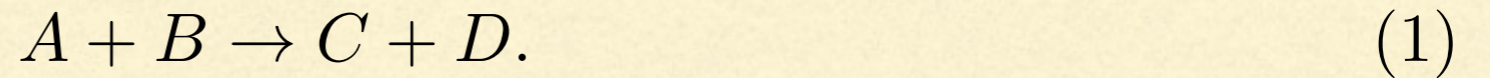
Una interacción puede tener dos resultados:

1. la trayectoria de las partículas en el espacio-tiempo se modifica,
 2. las partículas cambian y/o nuevas partículas aparecen.
-

El resultado de una interacción queda completamente determinado por las condiciones iniciales, las fuerzas fundamentales y las leyes de conservación. Cuanto más energéticas sean las partículas, mayor será el rango de posibilidades para la actuación de las diferentes fuerzas.

Todas las interacciones deben conservar el cuadri-impulso (energía y momento) y la carga eléctrica. Las interacciones que involucran hadrones conservan el número bariónico y las que involucran leptones el número leptónico. Estrictamente hablando, el sabor no se conserva ya que la fuerza débil puede cambiarlo.

Consideremos una reacción permitida (es decir, que conserve todos los números cuánticos necesarios)



Entonces cualquier reacción donde una de las partículas pase al otro lado como su antipartícula también está permitida, por ejemplo



La reacción inversa también está permitida,

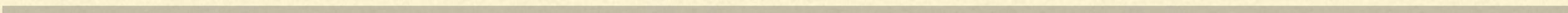


Sin embargo, hay que tener en cuenta que algunas de estas reacciones pueden no ocurrir ya que no se conserva el cuadri-impulso. Se dice entonces que están *cinemáticamente* prohibidas. Por ejemplo, si A y C son menos masivas que B y D la reacción de la Ec. (2) no podrá ocurrir a menos que la energía cinética inicial supere cierto valor umbral.

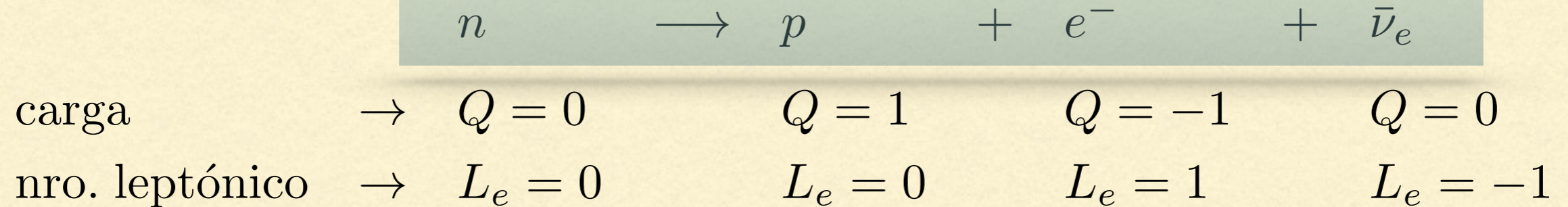
Ejemplos

El muón puede decaer en un electrón y dos neutrinos,

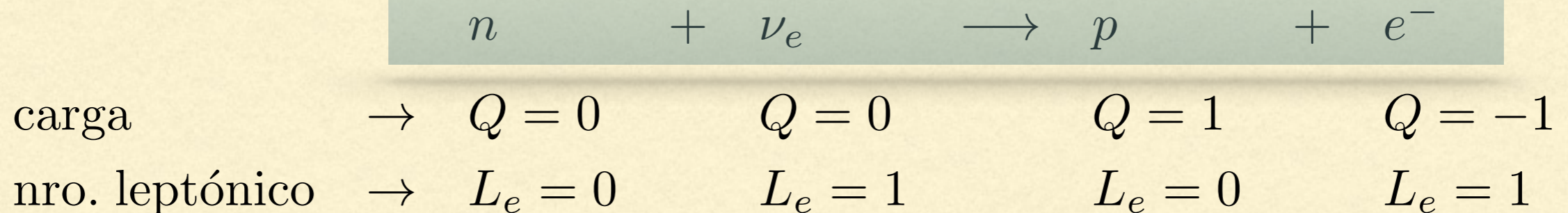
		μ^-	\longrightarrow	e^-	$+$	ν_μ	$+$	$\bar{\nu}_e$	
carga	\rightarrow	$Q = -1$		$Q = -1$		$Q = 0$		$Q = 0$	
nro. leptónico	\rightarrow	$L_\mu = 1$		$L_e = 1$		$L_\mu = 1$		$L_e = -1.$	



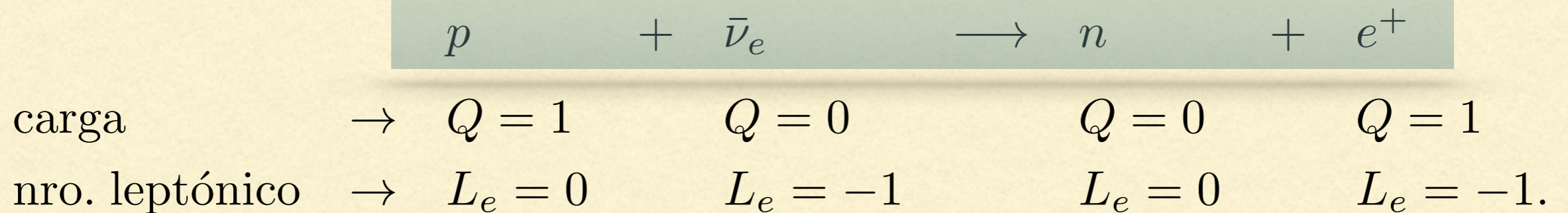
Dos importantes reacciones permitidas son el decaimiento β del neutrón,



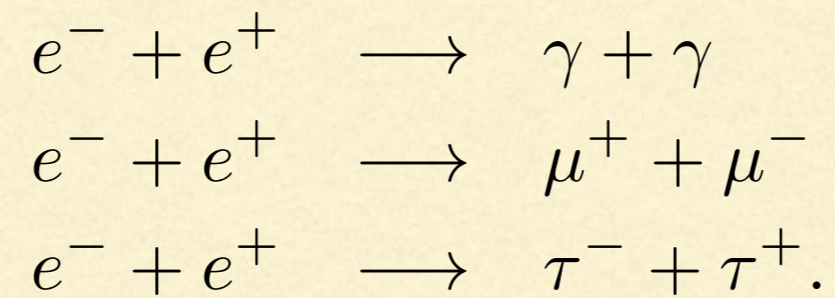
y sus versiones “cruzadas”, el decaimiento β inverso,



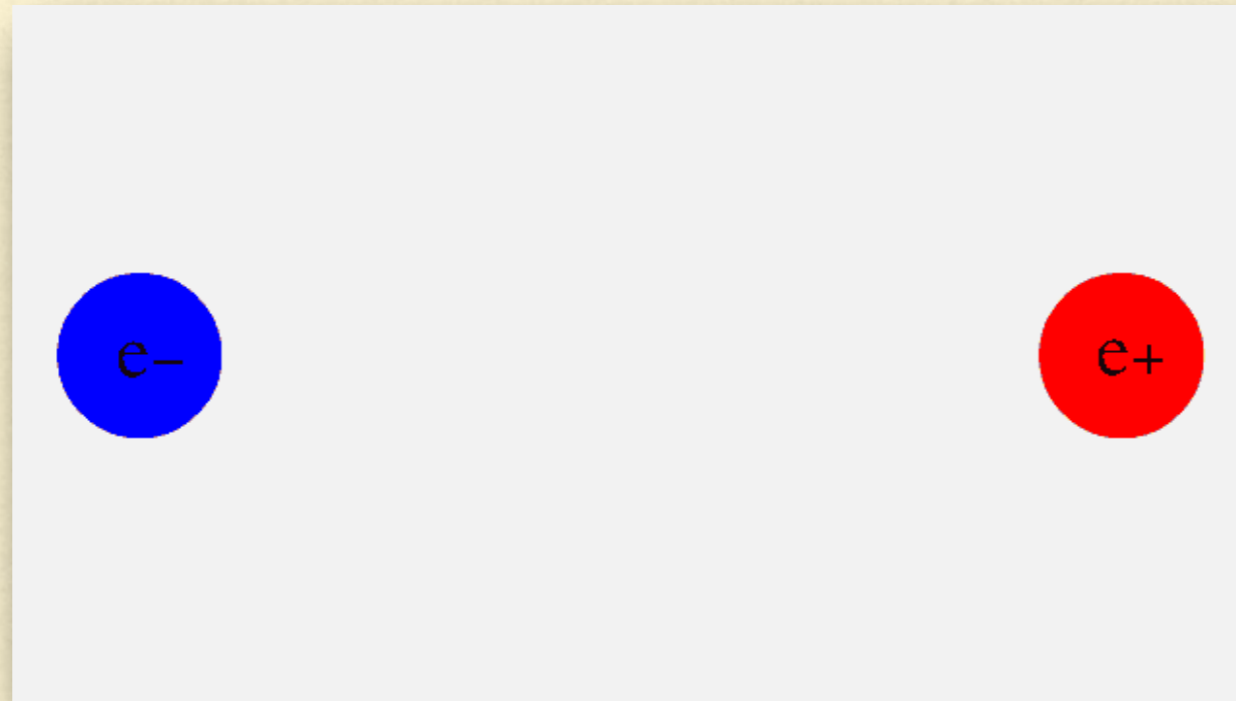
y



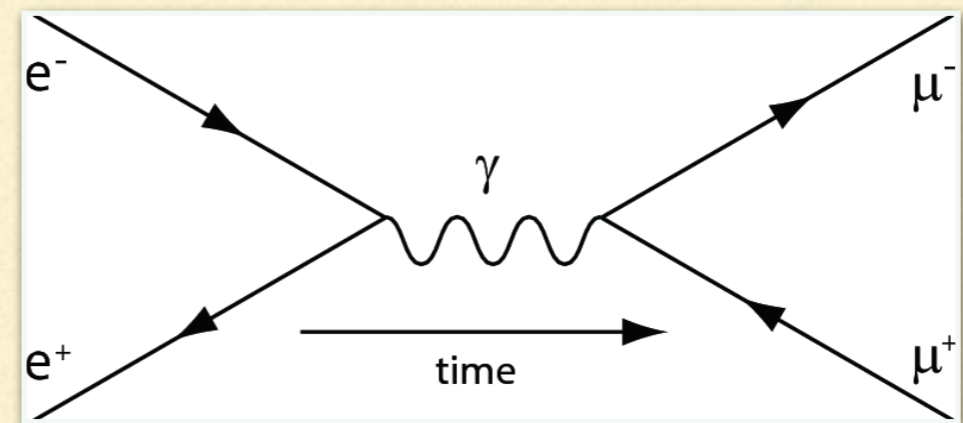
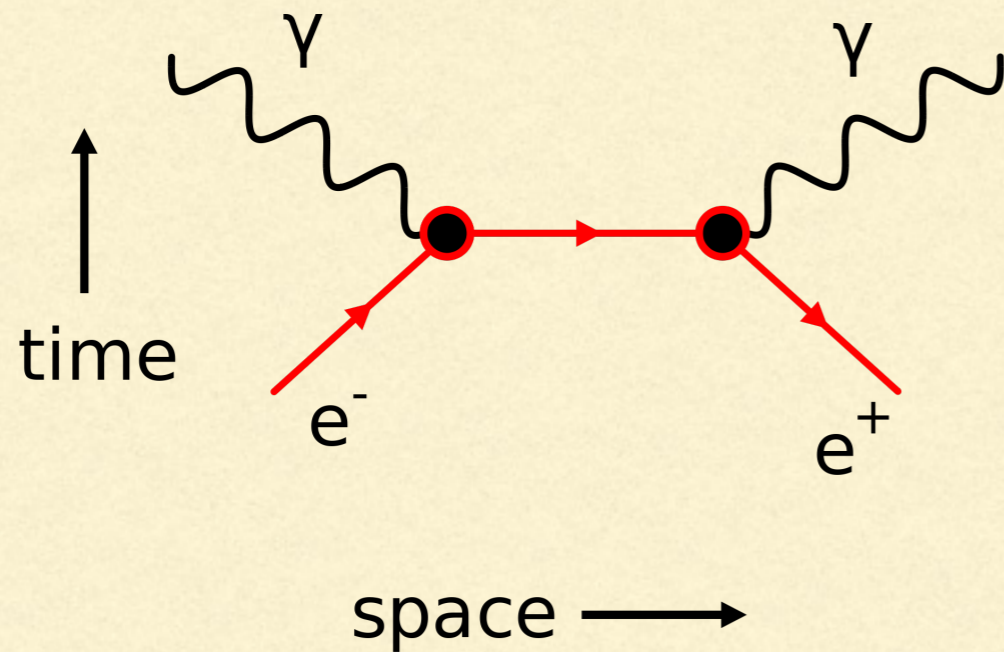
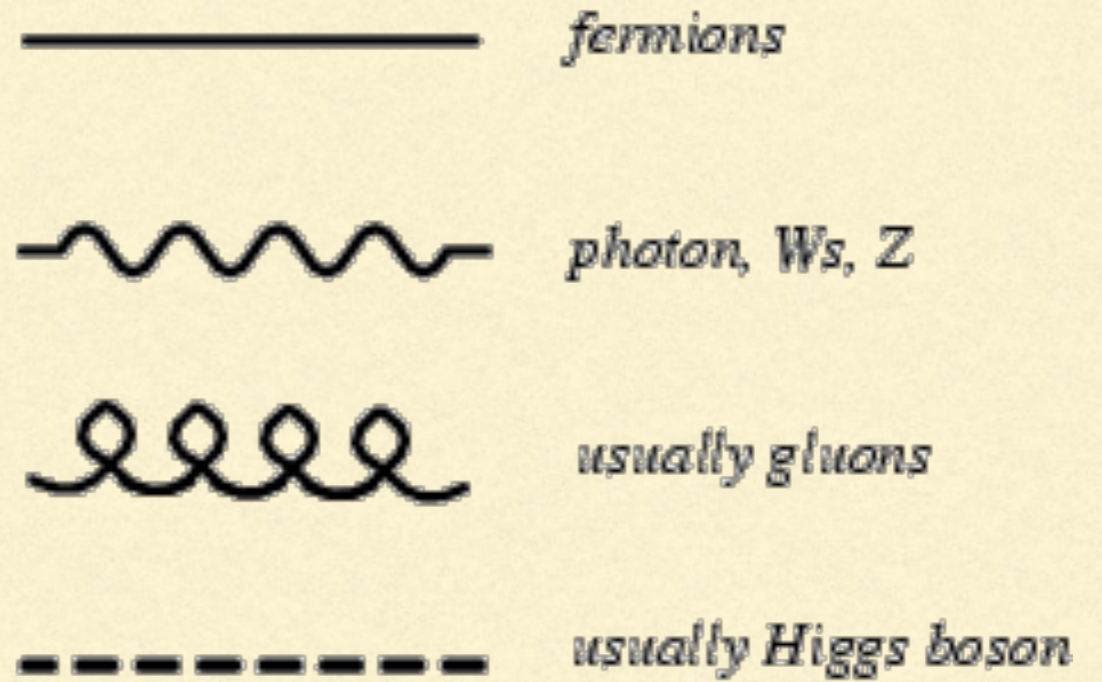
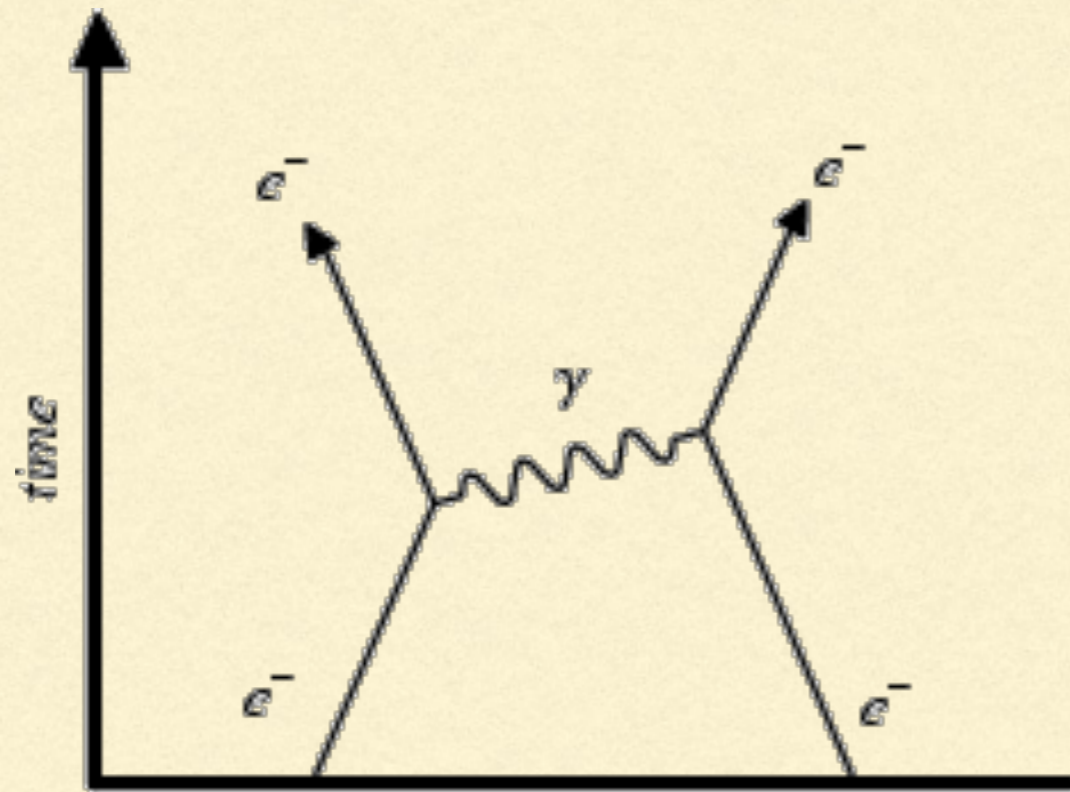
Dependiendo de la energía de un par e^\pm , pueden ocurrir las siguientes reacciones de *aniquilación*:

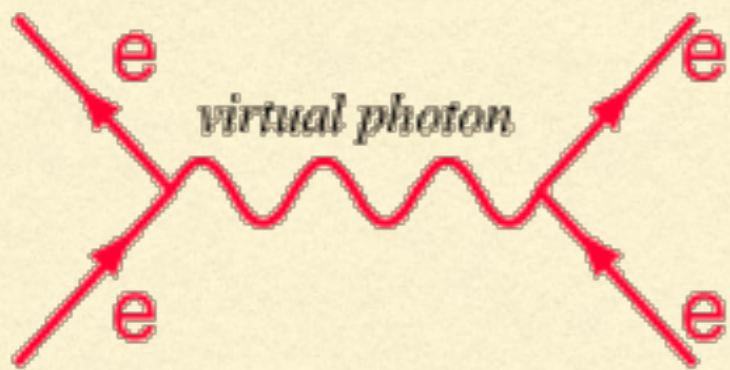


El número leptónico y la carga se conservan en todas ellas.

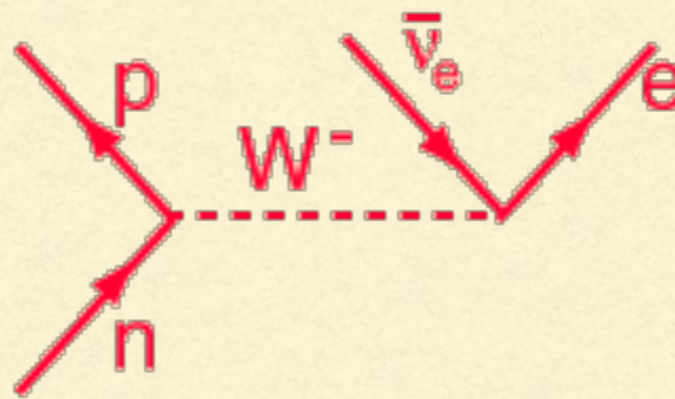


Diagramas de Feynman

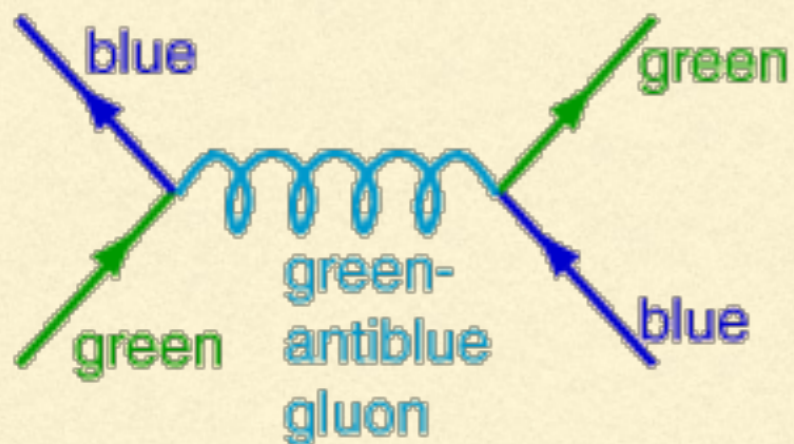




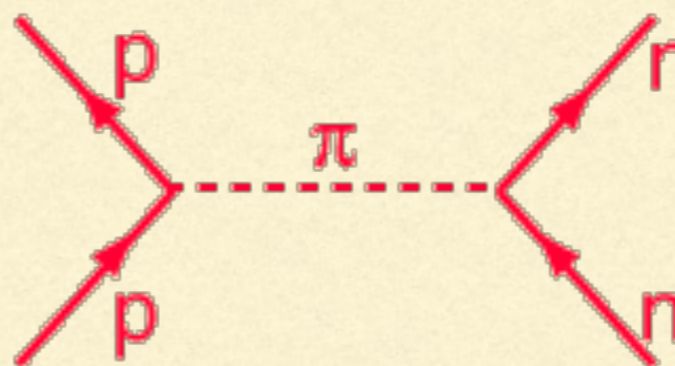
Electromagnetic



Weak

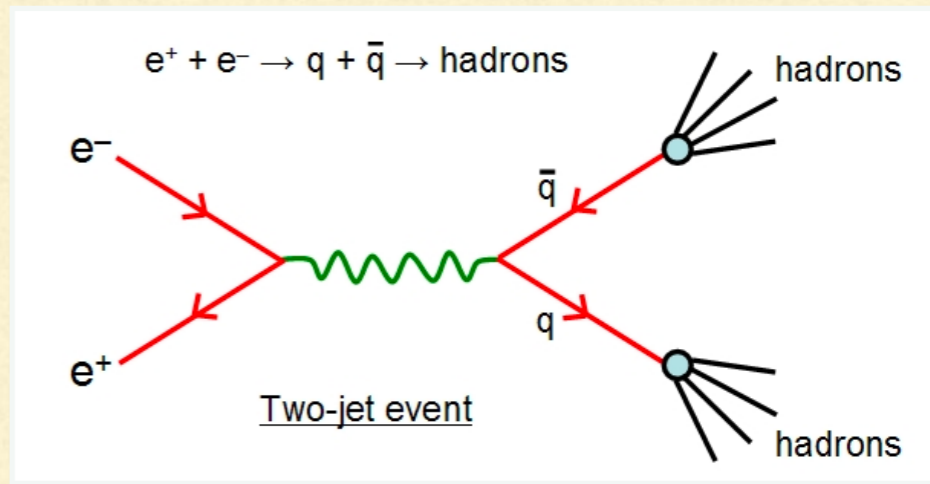


between quarks



between nucleons

Strong Interaction



All Standard Model Particles

		<u>Particle</u>	<u>symbols</u>	<u>spin</u>	<u>charge</u>	<u>Mass (MeV/c²)</u>
Fermions (add anti-particles)	leptons	Electron	e^-	$\frac{1}{2}$	-1	0.511
		Electron neutrino	ν_e	$\frac{1}{2}$	0	0?
		Muon	μ	$\frac{1}{2}$	-1	105.7
		Muon neutrino	ν_μ	$\frac{1}{2}$	0	0?
		Tau	τ	$\frac{1}{2}$	-1	1777
		Tau neutrino	ν_τ	$\frac{1}{2}$	0	0?
	quarks	Up quark	uuu	$\frac{1}{2}$	+2/3	3
		Down quark	ddd	$\frac{1}{2}$	-1/3	5
		Charm quark	ccc	$\frac{1}{2}$	+2/3	1,300
		Strange quark	sss	$\frac{1}{2}$	-1/3	120
		Top quark	ttt	$\frac{1}{2}$	+2/3	174,200
		Bottom quark	bbb	$\frac{1}{2}$	-1/3	4,300
	force carriers	Photon	γ	1	0	0
Gluon		$gggggggg$	1	0	0	
W-boson		W^\pm	1	± 1	80,400	
Z-boson		Z^0	1	0	91,188	
	Higgs	H	0	0	116,000	

Higgs H 0 0 116,000

Z-boson Z^0 1 0 91,188



La reacción más simple es la dispersión o *scattering*

$$p + p \longrightarrow p + p.$$

Cuando se incrementa la energía son posibles nuevos canales:

$$\begin{aligned} p + p &\longrightarrow p + p + \pi^0 \\ p + p &\longrightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-. \end{aligned}$$

En términos de quarks:

$$\begin{aligned} p + p &\longrightarrow p + p + \pi^0 \\ \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} &\longrightarrow \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ \bar{u} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

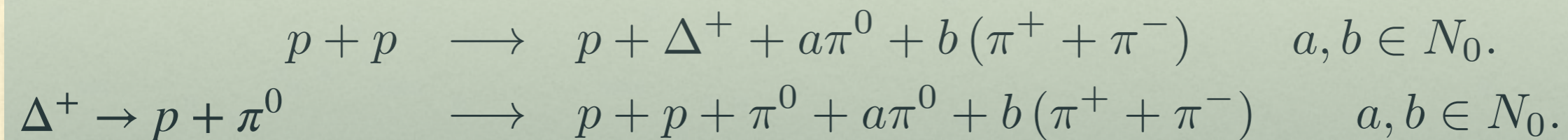
Al aumentar la energía de los protones incidentes, puede aumentar la multiplicidad de los piones producidos. En general:

$$p + p \longrightarrow p + p + a\pi^0 + b(\pi^+ + \pi^-) \quad a, b \in N_0.$$

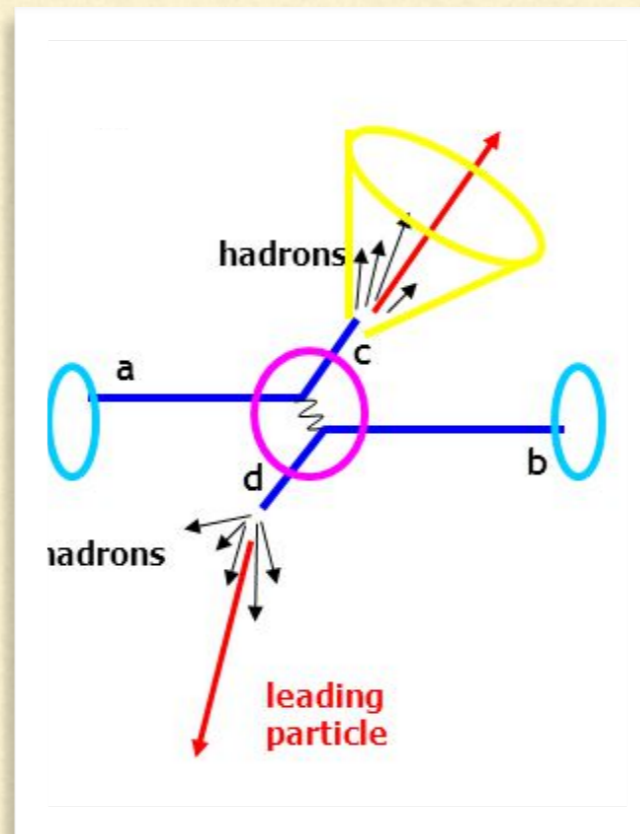
Si aumenta aún más la energía pueden aparecer partículas extrañas:

$$\begin{aligned} p + p &\longrightarrow p + \Sigma^+ + K^0 \\ p + p &\longrightarrow p + n + K^+ + \bar{K}^0. \end{aligned}$$

La colisión suele ser tal que la mayor parte de la energía se usa para crear un estado excitado de uno de los protones, que al decaer produce un *leading pion* que transfiere la energía a rayos gamma:



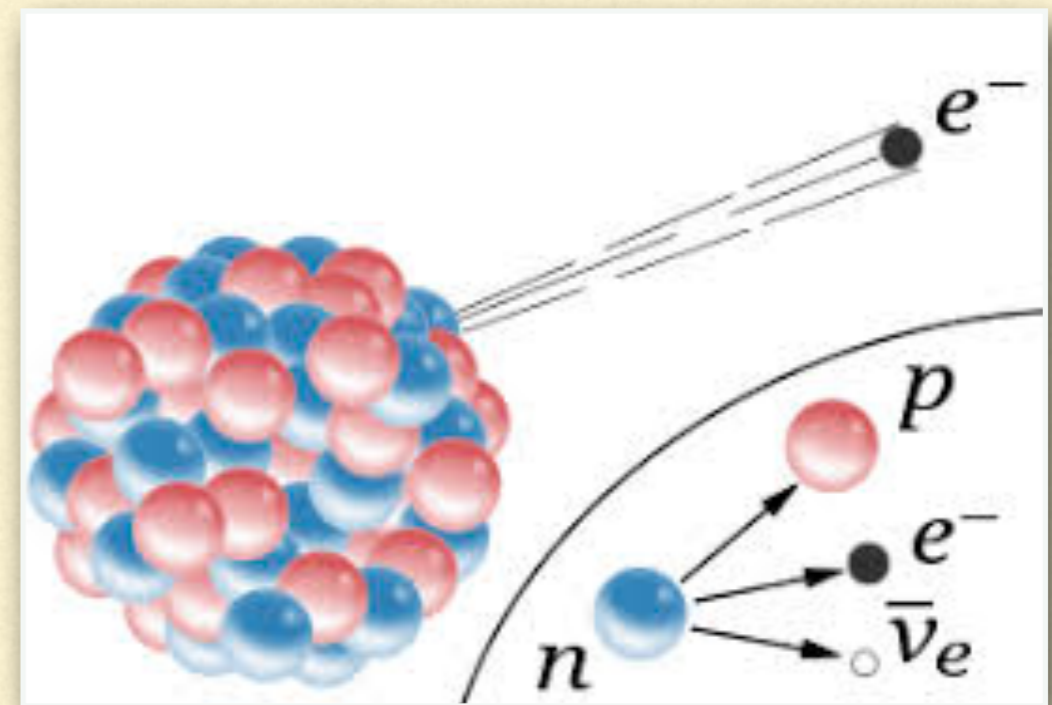
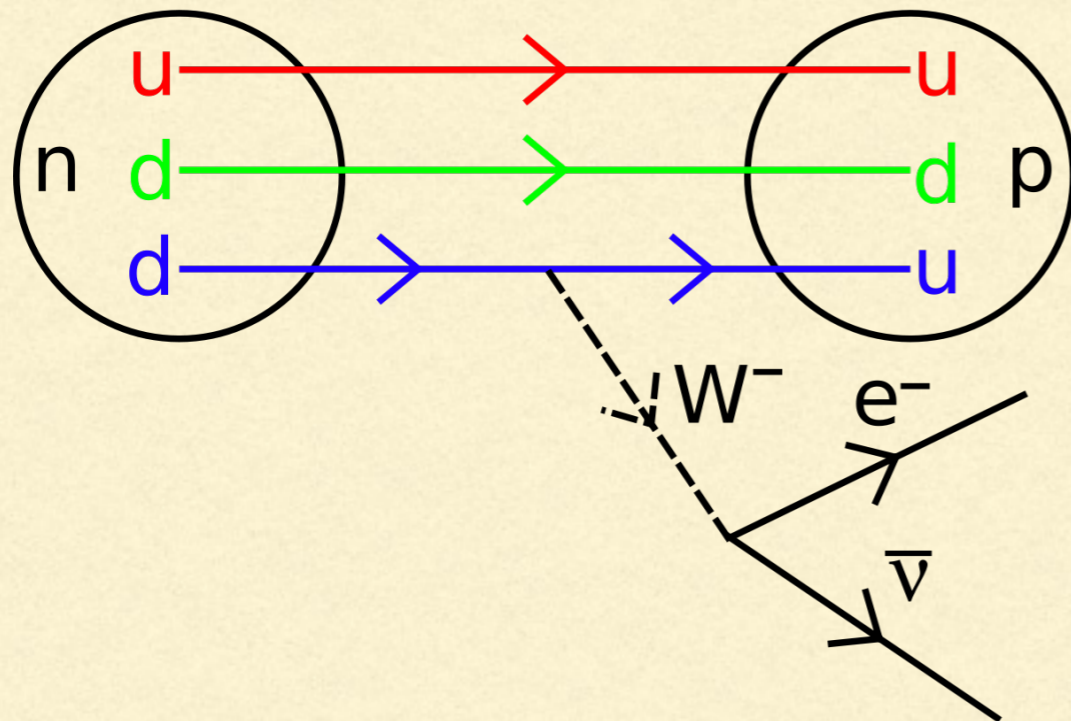
A los productos mesónicos diferentes del leading pion se les suele llamar *fireball*:
 $F = a\pi^0 + b(\pi^+ + \pi^-)$.



Decaimientos

Un decaimiento es la desintegración de una partícula en partículas más livianas como consecuencia de la acción de alguna fuerza elemental.

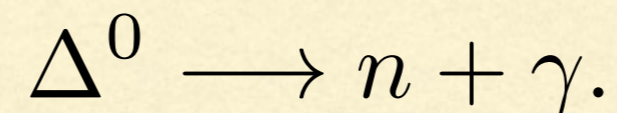
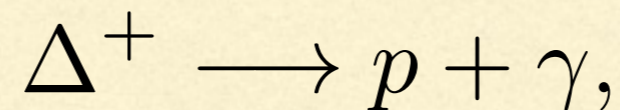
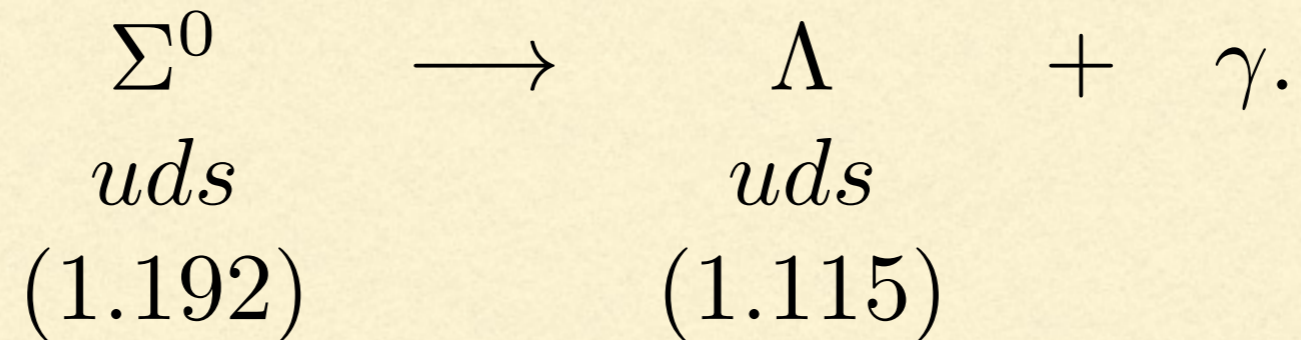
Los decaimientos conservan todos los números cuánticos de la partícula original, y ocurren de acuerdo con probabilidades fijas que miden las propensiones de las partículas a decaer.



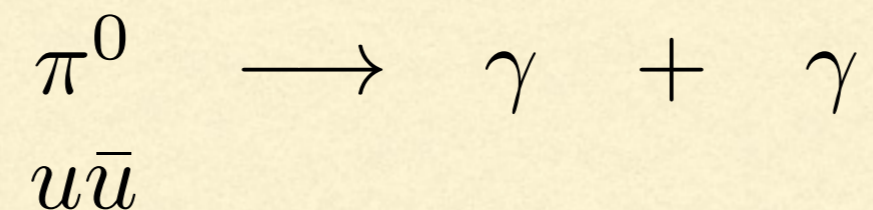
Decaimiento electromagnético

Dos hadrones pueden estar formados por los mismos quarks pero en distintos niveles de energía. El decaimiento se produce por la emisión de ese exceso de energía en forma de un fotón. En estos decaimientos no hay creación de quarks.

Ejemplos:

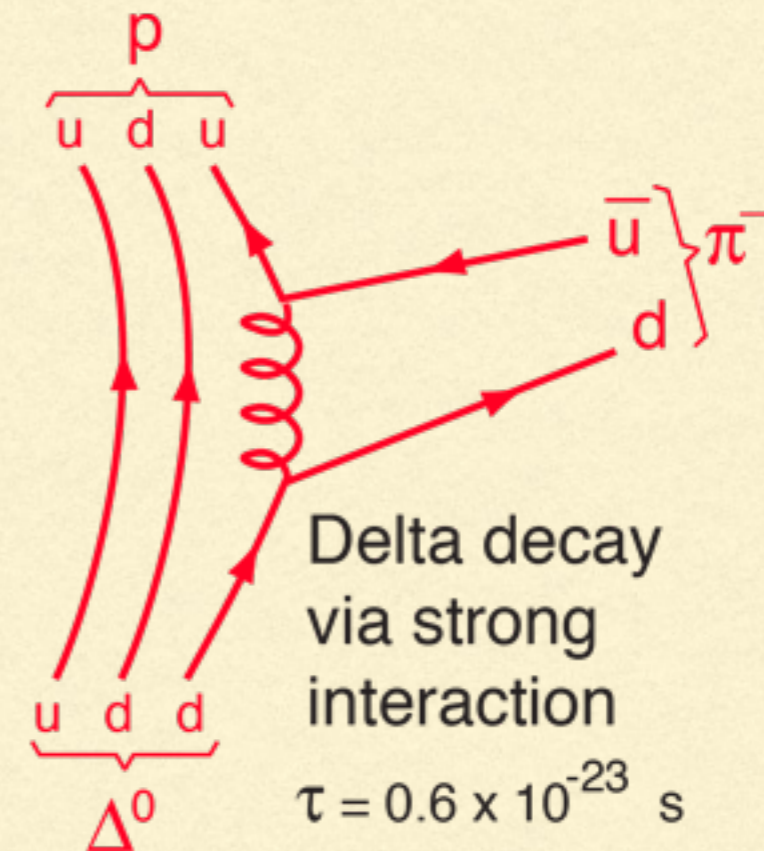
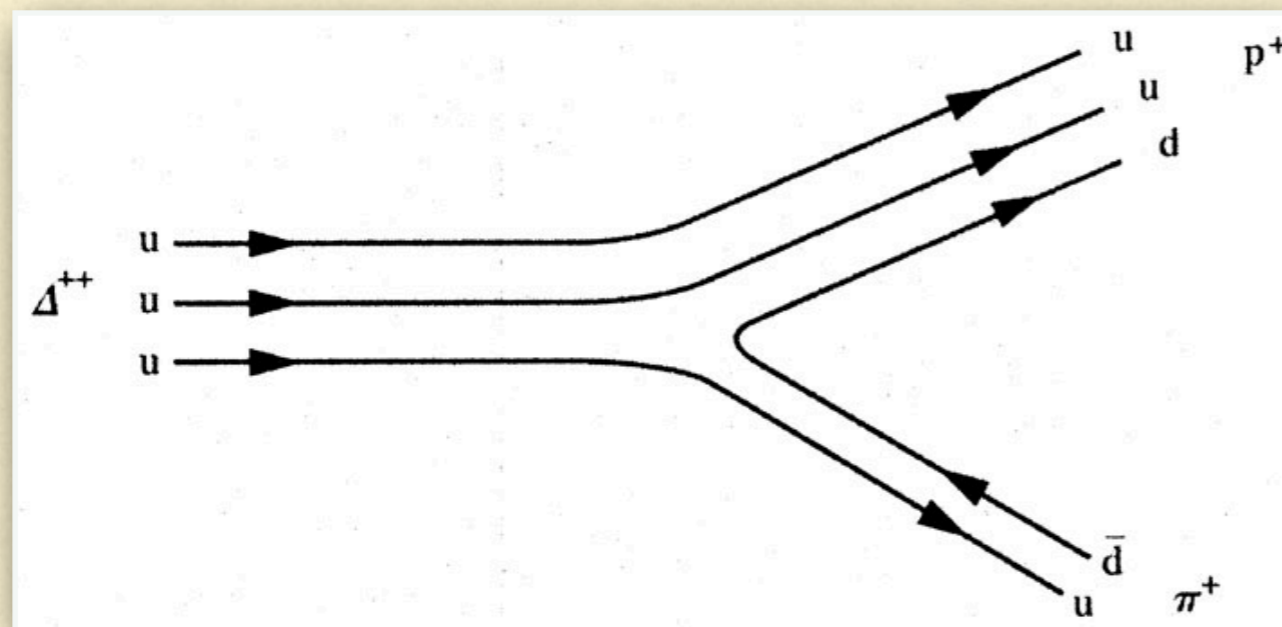


En algunos casos el decaimiento electromagnético opera por aniquilación directa de un par quark-antiquark. Un decaimiento de este tipo muy relevante en astrofísica es el del pión neutro en dos fotones:



Los decaimientos mediados por la interacción electromagnética ocurren sobre tiempos típicos $\sim 10^{-10} - 10^{-16}$ s. Por ejemplo, la vida media del π^0 es $\tau_{\pi^0} = (8.52 \pm 0.18) \times 10^{-17}$ s $\sim 10^{-16}$ s.

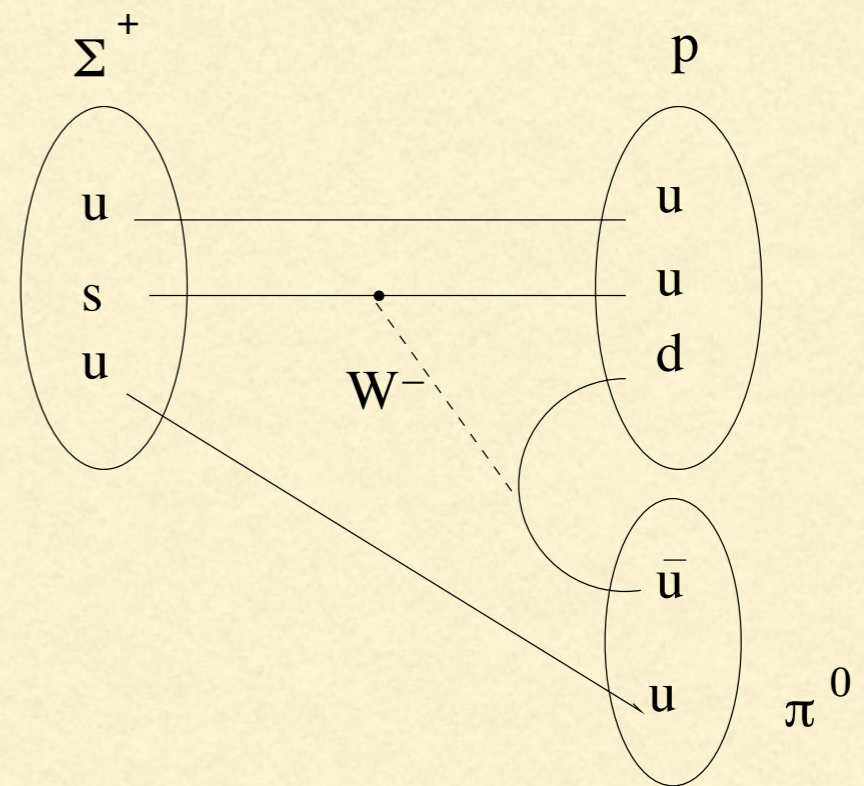
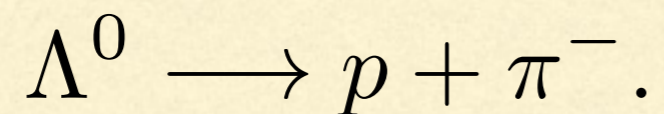
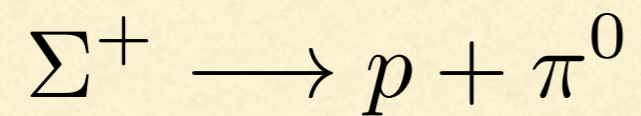
Los decaimientos mediados por la fuerza fuerte ocurren sobre tiempos extremadamente cortos ($\sim 10^{-25}$ s) en comparación con los decaimientos electromagnéticos. Por ejemplo, la vida media de la partícula Δ^+ respecto del decaimiento fuerte es de $\tau_{\Delta^+} \sim 5.6 \times 10^{-24}$ s.



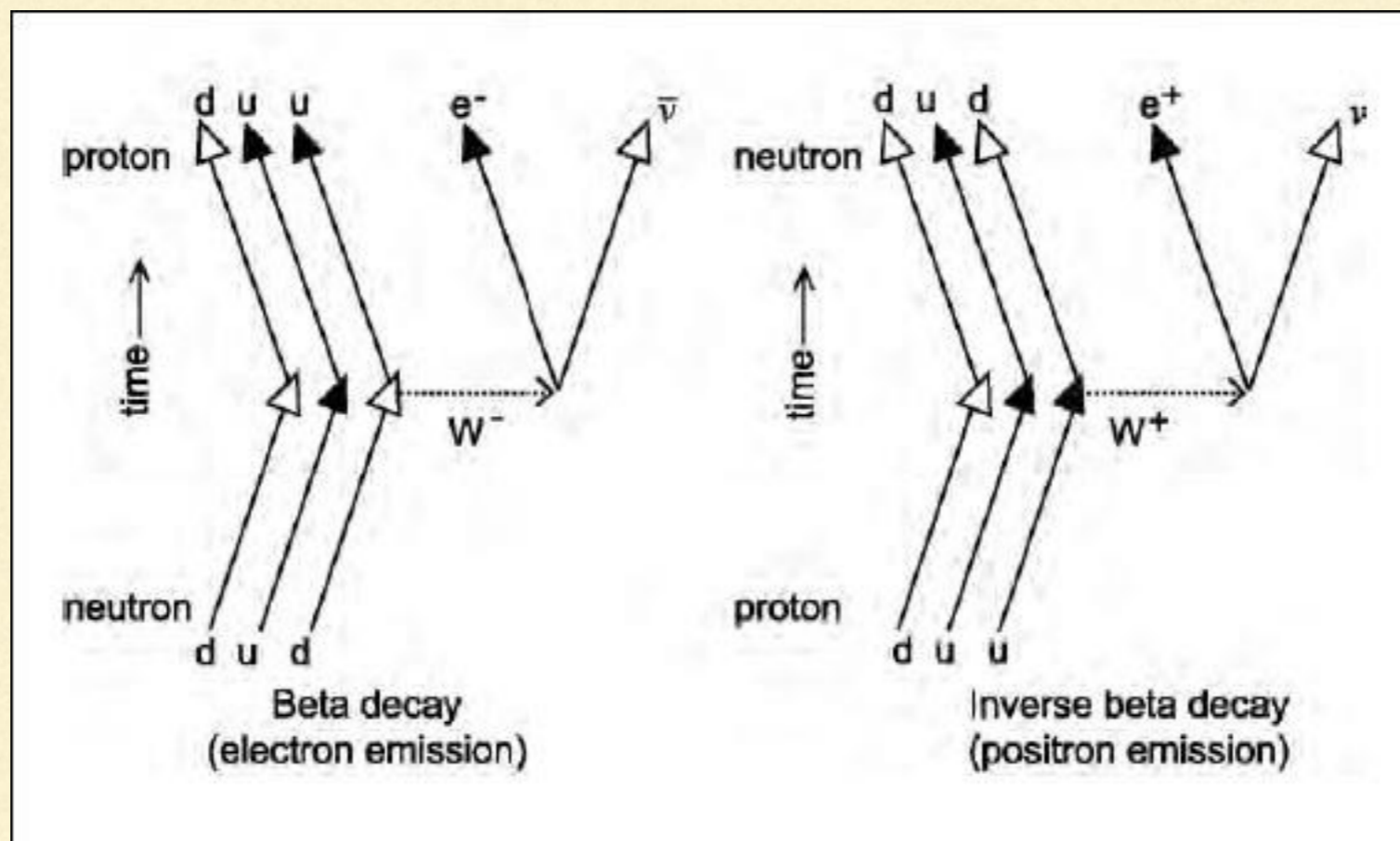
Decaimiento débil

Son decaimientos en los cuales hay creación de quarks por acción de los bosones W^+ y W^- .

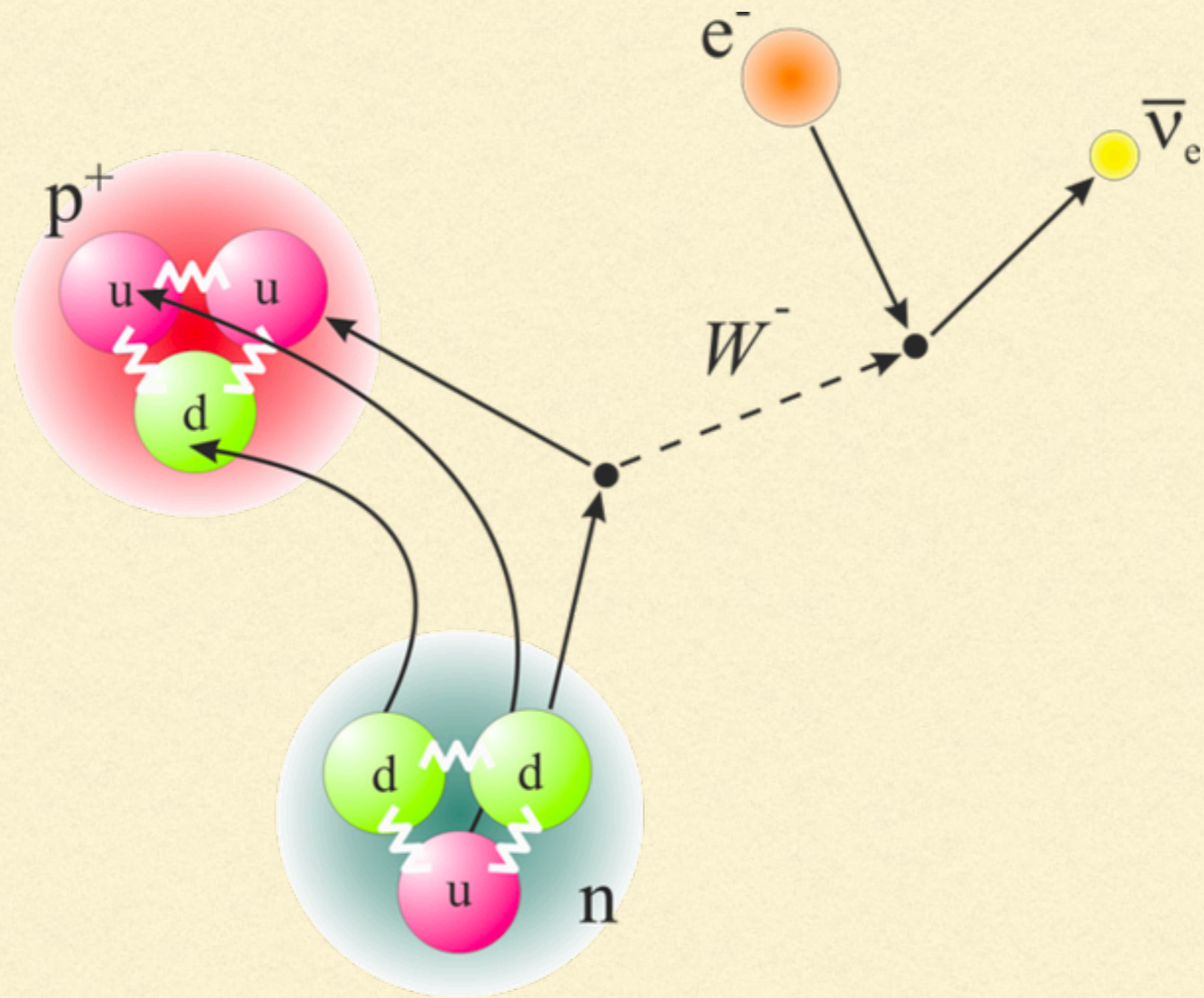
Ejemplos:



Debido a la debilidad de la interacción débil, los **decaimientos débiles son muy lentos comparados con los decaimientos fuertes o los electromagnéticos**. Por ejemplo, un decaimiento electromagnético de un pion neutro tiene una vida de cerca de 10^{-16} segundos; mientras que un decaimiento débil cargado con un pion vive cerca de 10^{-8} segundos, es decir, cien millones de veces más largo. Un neutrón libre "vive" cerca de 15 minutos, haciéndola una partícula subatómica inestable con la vida media más larga conocida.



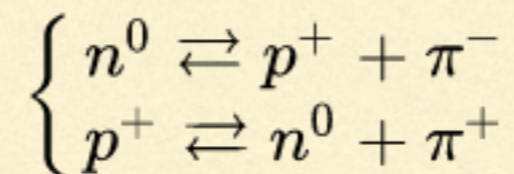
Neutron decay



Aisladamente los neutrones pueden sufrir vía interacción débil la siguiente desintegración:



Sin embargo, dentro del núcleo atómico la cercanía entre neutrones y protones hace que sean mucho más rápidas, vía interacción fuerte las reacciones:



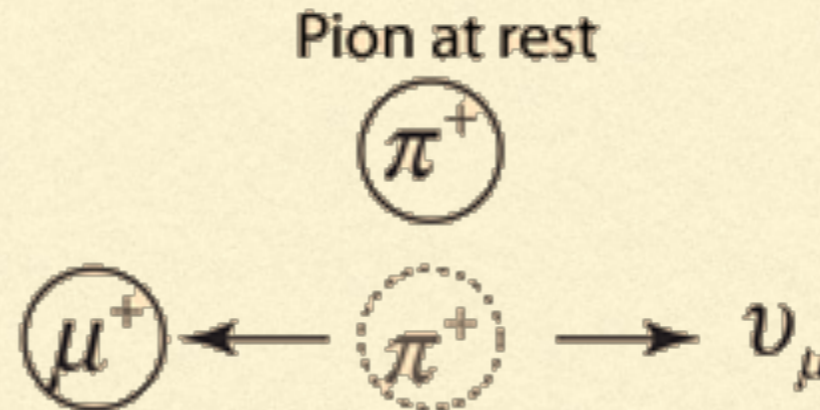
Esto hace que continuamente los neutrones del núcleo se transformen en protones, y algunos protones en neutrones. Esto hace que la reacción (1) apenas tenga tiempo de acontecer, lo que explica que los neutrones de los núcleos atómicos sean mucho más estables que los neutrones aislados. Si el número de protones y neutrones es desequilibrado, se abre la posibilidad de que en cada momento haya más neutrones y sea más fácil la ocurrencia de la reacción (1).

Pion decay

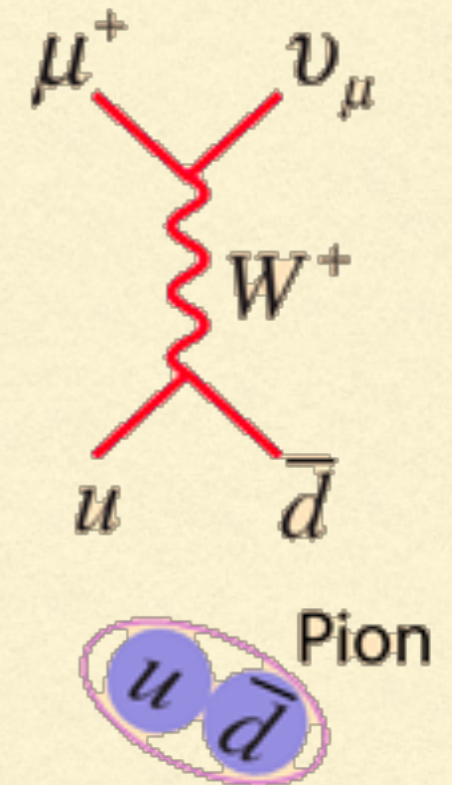
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

139.57 MeV 105.66 MeV

$Q = 33.91 \text{ MeV}$



Two-particle decays give definite values of energy and momentum to the products.



$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma \quad 98.8\%$$

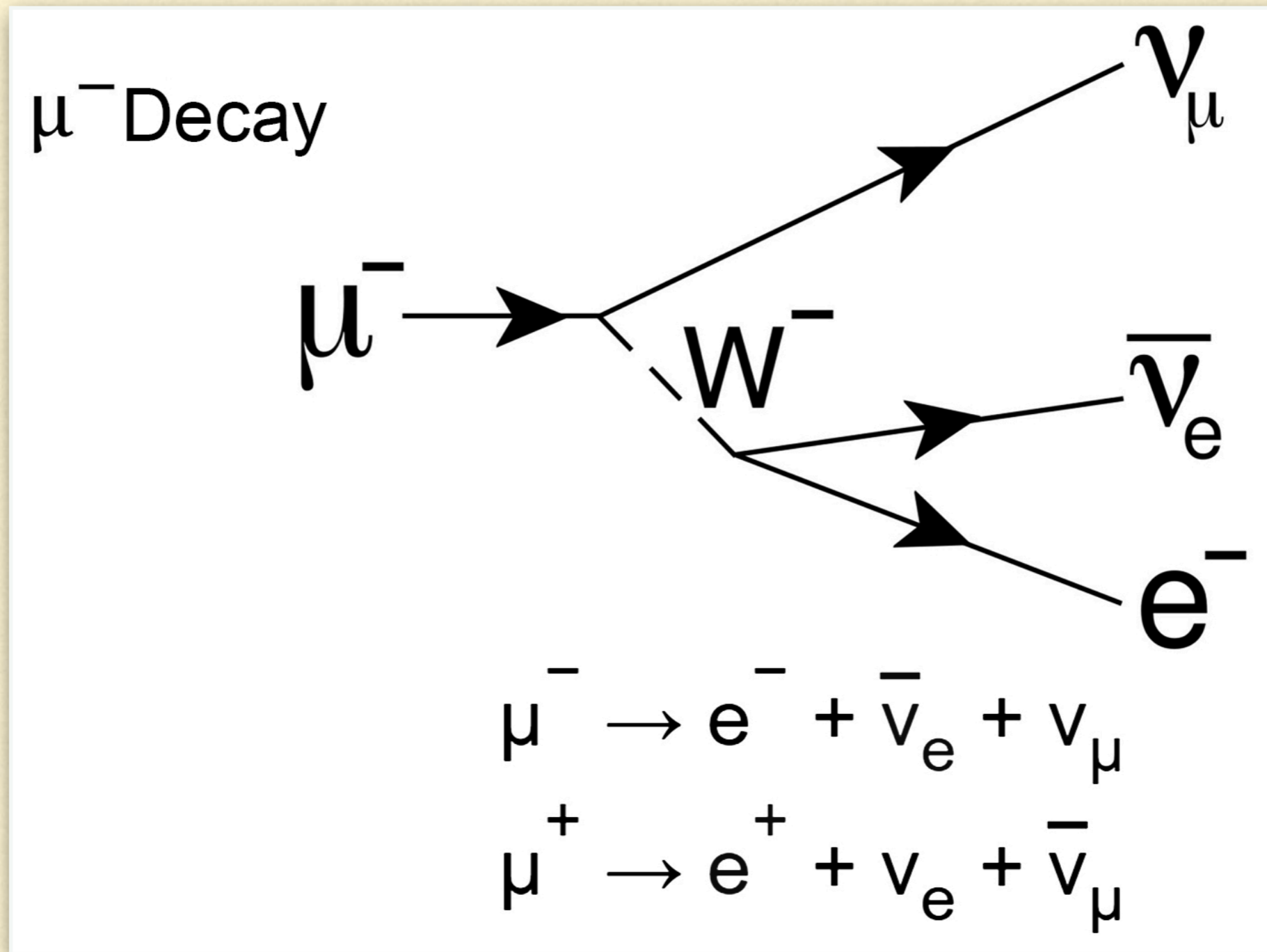
$$\pi^0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma \quad 1.2\%$$

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

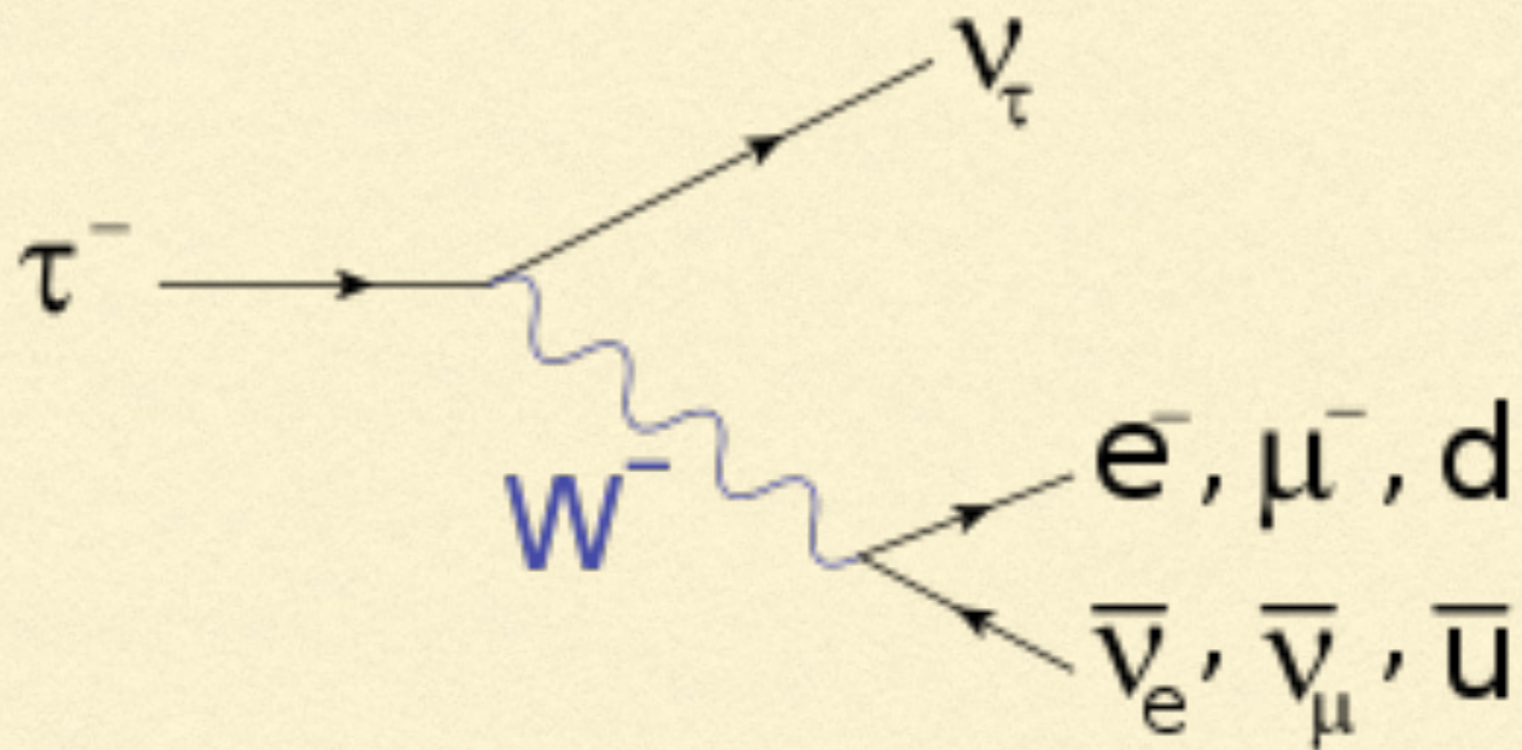
$$mass = 264m_e = 135.0 \text{ MeV} / c^2$$

$$mass = 273m_e = 139.6 \text{ MeV} / c^2$$

Muon decay



Tau decay



¿Existe el gravitón?

La gravitación entendida como efecto de la curvatura del espacio-tiempo no es una teoría cuantificable. Si existe un dominio en el cual se pueda definir la existencia de un *cuanto* de interacción gravitacional, debe ser completamente diferente de lo adoptado en el escenario clásico. A la fecha, no hay ninguna teoría aceptable de la gravedad en régimen cuántico. Los intentos por tratar la gravedad como un campo han fracasado.

Un enfoque diferente es tratar al espacio-tiempo como un emergente de entidades más básicas.

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

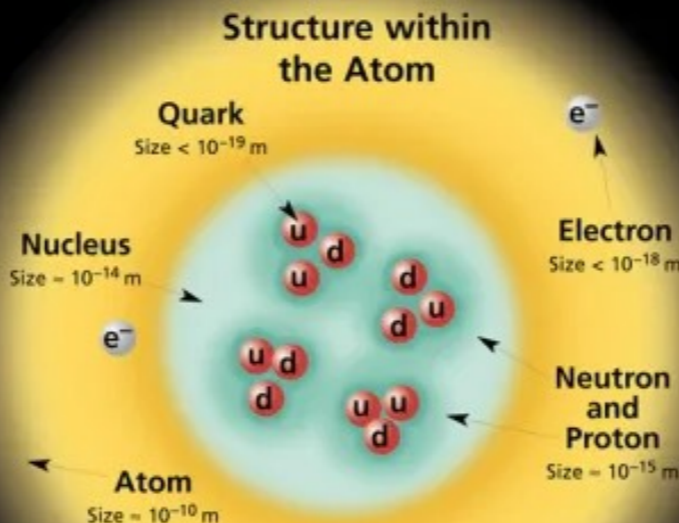
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Color Charge
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+ W^- Z^0$	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:					
for two u quarks at: 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
for two u quarks at: $3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-41}	10^{-4}	1	60	Not applicable to quarks
for two protons in nucleus	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

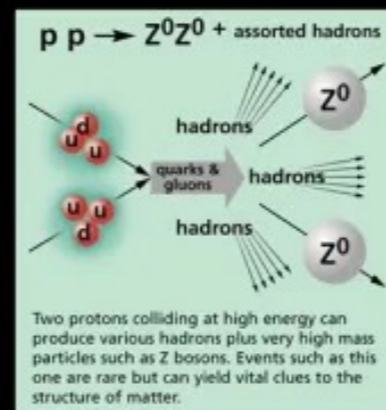
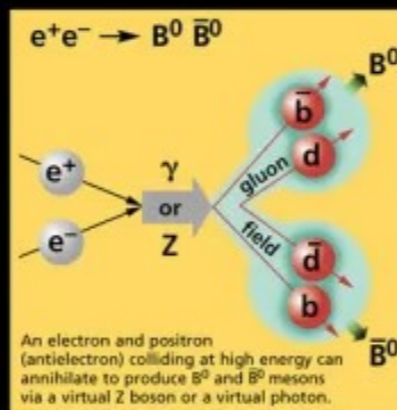
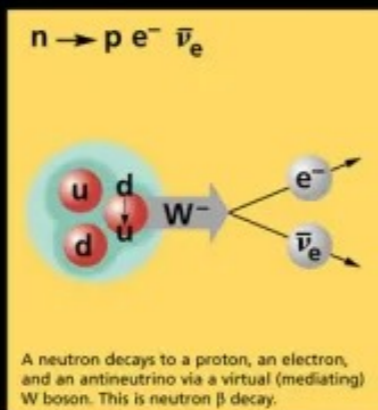
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>