

**ELEMENTOS DE
FÍSICA DE PARTÍCULAS**

PARTÍCULAS ELEMENTALES

- ❖ Hemos construido un modelo de espacio-tiempo a partir de conceptos generales como los de cosa, propiedad y cambio.
- ❖ Si las cosas se asocian para formar cosas nuevas, es razonable preguntar si existen cosas básicas a partir de las cuales todas las demás pueden ser construidas.
- ❖ El concepto de cosa básica fue introducido por Leucipo y Demócrito (ambos de Abdera) hacia el año 460 antes de Cristo.
- ❖ La idea de que hay elementos constitutivos básicos en la naturaleza ha perdurado hasta la actualidad, siendo quizás, la más fecunda y duradera de la historia del pensamiento humano.

PARTÍCULAS ELEMENTALES

Nuestras ideas actuales acerca de los elementos básicos que forman todas las cosas que hay en el Universo están expresadas en el llamado **modelo estándar de las partículas elementales**.

Según el modelo estándar hay **12 diferentes partículas** que forman todas las cosas. Estas partículas se dividen en dos grupos llamados **QUARKS y LEPTONES**. Hay 6 quarks y 6 leptones.

Los 6 tipos de quarks son llamados,
en orden de masa creciente,

UP (u), DOWN (d),
STRANGE (s), CHARM (c),
BOTTOM (b) y TOP (t).

Quarks	Leptones
UP (<i>u</i>)	ELECTRÓN (e^-)
DOWN (<i>d</i>)	NEUTRINO ELECTRÓNICO (ν_e)
STRANGE (<i>s</i>)	MUÓN (μ^-)
CHARM (<i>c</i>)	NEUTRINO MUÓNICO (ν_μ)
BOTTOM (<i>b</i>)	TAU (τ)
TOP (<i>t</i>)	NEUTRINO TAU (ν_τ)

Los 6 tipos de leptones son:

ELECTRÓN (e^-), NEUTRINO ELECTRÓNICO (ν_e),
MUÓN (μ^-), NEUTRINO MUÓNICO (ν_μ),
TAU (τ^-) y NEUTRINO TAU (ν_τ)

Las partículas elementales tienen, a su vez, **propiedades elementales**.

Estas propiedades consisten en la *capacidad de cambiar el estado de otras partículas*.

Se suele llamar a estas propiedades **fuerzas o interacciones elementales**.

Hay 4 interacciones elementales:

- Gravedad
- Electromagnetismo
- Fuerza fuerte
- Fuerza débil

Todas estas interacciones actúan a distancia pero con diferente rango (alcance).

➤ La **gravedad**

- tiene *rango infinito* pero es *muy débil*.
- Actúa sobre todas las partículas y
- es una fuerza atractiva.
- Es la interacción que determina la estructura a gran escala del Universo.

➤ El **electromagnetismo**

- también tiene *rango infinito*, pero es una interacción *mucho más fuerte*.
- Actúa sobre aquellas partículas que tienen carga eléctrica.

Hay dos tipos de carga: positiva y negativa.

El número total de cargas positivas es igual al número total de cargas negativas, por lo que sobre escalas espaciales grandes la fuerza electromagnética se anula.

El electromagnetismo es la interacción dominante a escala humana, pero no tiene influencia sobre la estructura a gran escala del Universo.

➤ La **interacción fuerte**

- es de *corto alcance* ($\sim 10^{-15}$ m) y
- *sólo actúa entre quarks*.
- Los leptones no sienten la interacción fuerte.

De aquí que las partículas se dividan en dos grandes grupos:

- quarks, que sienten la interacción fuerte, y
- el resto de las partículas, que no la sienten.

La interacción fuerte cohesiona a los quarks para formar partículas más complejas llamadas **hadrones**.

➤ La **interacción débil**

- es de *rango aún más corto que la fuerte* ($\sim 10^{-18}$ m)
- y actúa tanto sobre los quarks como sobre los leptones, aunque con ciertas limitaciones.

Respecto a la intensidad relativa de las distintas interacciones, se tiene el siguiente cuadro comparativo, donde se han considerado los efectos sobre dos protones en contacto:

Fuerza fuerte	1
Fuerza electromagnética	10^{-2}
Fuerza débil	10^{-7}
Fuerza gravitacional	10^{-39}

Todas las interacciones cambian el estado de las partículas sobre las que actúan.

Las tres primeras interacciones **modifican el momento** de las partículas sobre las que actúan.

La fuerza débil, además, **modifica la clase** a la que pertenece la partícula.

Es importante enfatizar:

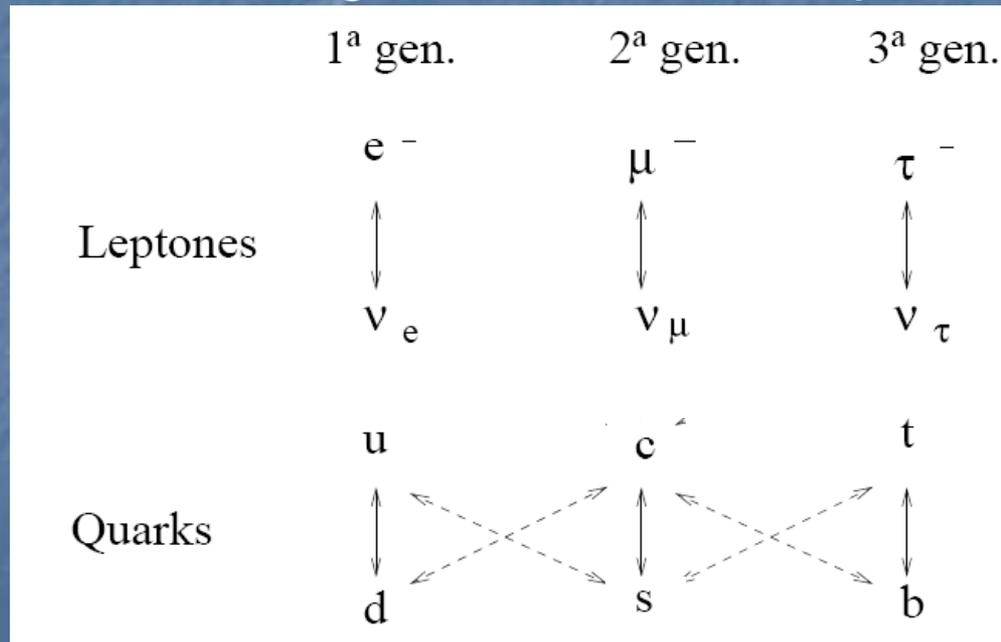
1. La **gravitación** es la única interacción que actúa absolutamente sobre todas las partículas.
2. La **interacción fuerte** actúa sobre los quarks, no sobre los leptones.
3. Como la interacción fuerte no actúa sobre los leptones, estos no forman partículas estables más complejas.

Las partículas elementales son divididas, además, en tres **GENERACIONES**.

Esta clasificación se relaciona con el modo de acción de la interacción débil sobre ellas.

La interacción débil sólo puede transformar un leptón en otro que pertenezca a la misma generación.

En cambio, ocasionalmente, la fuerza débil también puede actuar entre distintas generaciones de quarks (menos probable).



acción de la fuerza débil:
transición fácil



acción de la fuerza débil:
transición difícil

La interacción débil no puede cambiar leptones de distinta generación.

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 .

De ellas, **el electrón, el muón y el tau tienen carga eléctrica -1 .**

Los **neutrinos** tienen carga nula y masa no nula muy pequeña:
sólo sienten la interacción débil

LEPTONES

El número leptónico es una propiedad intrínseca de los leptones.

Hay tres tipos de número leptónico que deben conservarse en todas las interacciones: L_e L_μ L_τ

Cada tipo de número leptónico es característico de cada generación.

	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

La teoría especial de la relatividad implica que

por cada leptón l

con número leptónico $L_l = 1$

y carga eléctrica $Q_l = -1$

debe haber

un antileptón \bar{l}

con número leptónico $L_{\bar{l}} = -1$

y carga eléctrica $Q_{\bar{l}} = +1$

Si el leptón es neutro (por ejemplo un neutrino), el antileptón sólo difiere en el número leptónico.

ANTIPARTÍCULAS (cont.)

Partículas y antipartículas pueden crearse y aniquilarse, conservando

- la carga eléctrica,
- la energía y
- el número leptónico.

El concepto de antipartícula surge naturalmente en relatividad especial a partir de la relación entre energía y momento para una partícula libre:

$$E = \pm(m_0^2 c^4 + c^2 p^2)^{1/2}$$

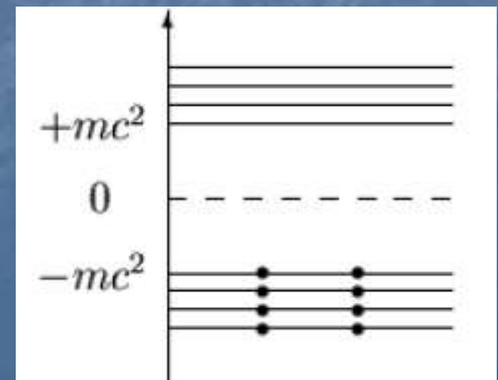
donde m_0 es la masa en reposo y p es el módulo del vector momento.

ANTIPARTÍCULAS (cont.)

En 1927 Dirac formuló una ecuación de onda relativista para describir la propagación de electrones libres cuya solución incluía estos estados de energía negativa.

Dirac sugirió que los niveles de energía negativos no están vacíos, sino que están poblados por un “mar” de electrones y por ello los electrones con $E > 0$ no pueden ocuparlos.

Electrones ocupando el llamado “mar de Dirac”, estados con energía negativa.

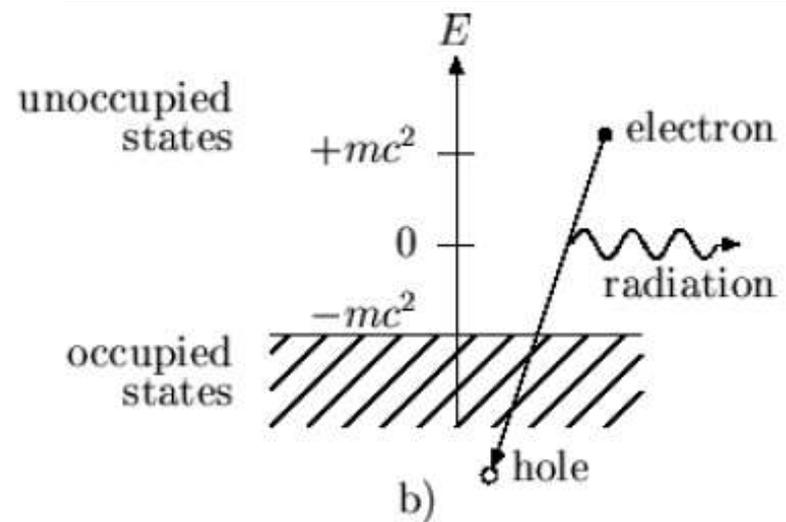
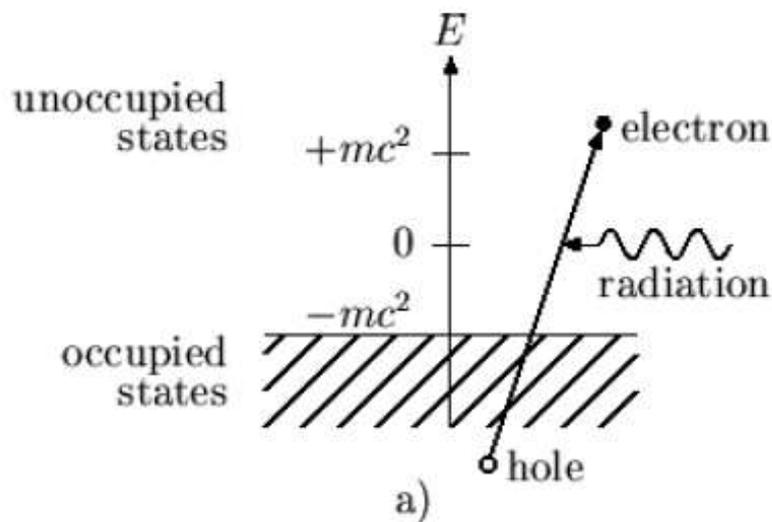


ANTIPARTÍCULAS (cont.)

Cuando en una interacción un electrón del mar de Dirac recibe energía, puede pasar a los niveles de energía positiva libres.

El espacio vacío que deja en el mar de Dirac se manifiesta como un positrón (antipartícula del electrón).

Un electrón con energía positiva emite un fotón y pasa a formar parte del mar de Dirac llenando un agujero.



ANTIPARTÍCULAS (cont.)

Posteriormente Stückelberg en 1941 y Feynman en 1948 formularon la interpretación moderna de las soluciones de la ecuación de Dirac:

Mientras que las soluciones con **energía positiva** representan **estados de las partículas** (por ejemplo electrones),

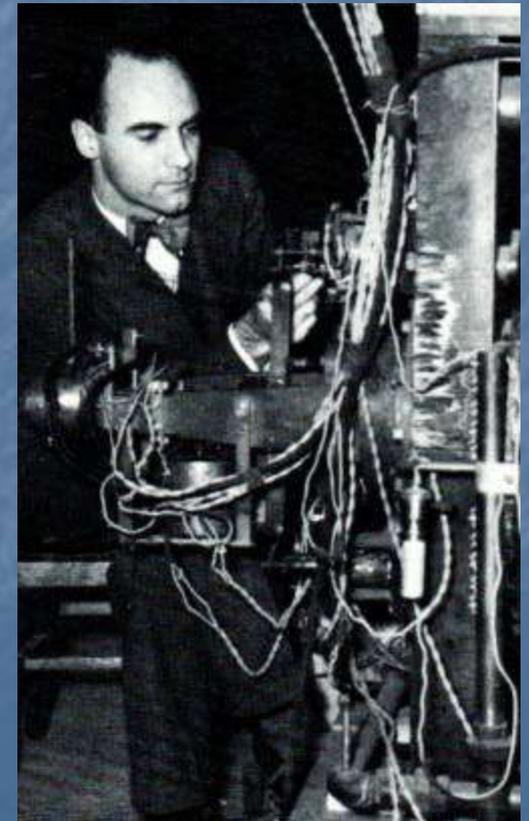
las soluciones con **energía negativa** representan **estados de energía positiva de las correspondientes antipartículas** (por ejemplo positrones).

Positrón

The existence of positrons was first postulated in 1928 by Paul Dirac (1902-1984) as a consequence of the Dirac equation.



In 1932, positrons were discovered by Carl D. Anderson, who gave the positron its name. The positron was the first evidence of antimatter and was discovered by passing cosmic rays through a cloud chamber and a lead plate surrounded by a magnet to distinguish the particles by bending differently charged particles in different directions.



The Positron

- * First conjectured by Paul Dirac that electrons (and other particles) have partners of same mass and opposite charge
- * Positron first discovered in cosmic rays

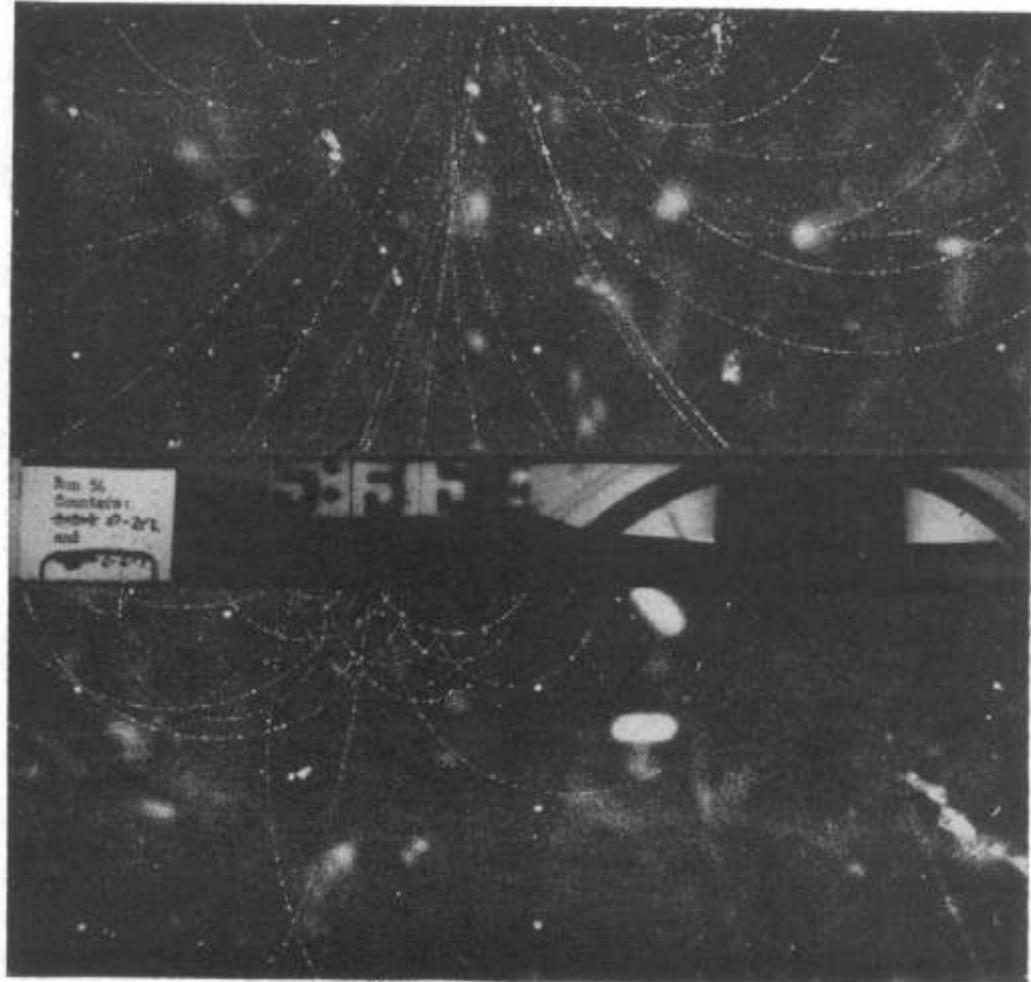


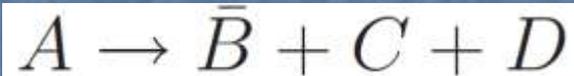
FIG. 20-1. Electrons and positrons.

INTERACCIONES

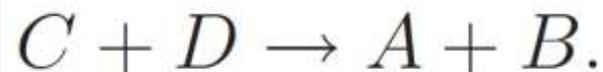
Consideremos una reacción permitida
(que conserve todos los números cuánticos necesarios)



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,



INTERACCIONES

Sin embargo, hay que tener en cuenta que algunas de estas reacciones pueden no ocurrir ya que no se conserva la energía. Se dice entonces que están **cinemáticamente prohibidas**.

Por ejemplo, si la masa de A es menor que la de la suma de B, C y D, entonces $A \rightarrow \bar{B} + C + D$ no es posible.

De la misma forma, si A y C son menos pesadas que B y D, entonces $A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$ no podrá ocurrir hasta que la energía cinética inicial no supere cierto valor umbral.

LEPTONES: interacciones y decaimientos

Partículas con número leptónico +1	$\begin{bmatrix} e^- \\ \nu_e \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{bmatrix}$
Partículas con número leptónico -1	$\begin{bmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{bmatrix}$

Consideremos algunos decaimientos típicos y verifiquemos que tanto la carga como el número leptónico se conservan:

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

LEPTONES: interacciones y decaimientos (cont.)

La siguiente reacción, sin embargo, no se observa, ya que aunque se conserva la carga **no se conserva el número leptónico**:

	μ^-	\longrightarrow	e^-	$+$	γ
carga	\longrightarrow	$Q_\mu = -1$	$Q_e = -1$		$Q_\gamma = 0$
nro. leptónico	\longrightarrow	$L_\mu = 1$	$L_e = 1$		$L_\gamma = 0$

LEPTONES: interacciones y decaimientos (cont.)

Otras reacciones permitidas importantes son el decaimiento β del neutrón,

	n	\longrightarrow	p	$+$	e^-	$+$	$\bar{\nu}_e$
carga	\longrightarrow	$Q_n = 0$	$Q_p = 1$	$Q_e = -1$	$Q_{\bar{\nu}} = 0$		
nro. leptónico	\longrightarrow	$L_e = 0$	$L_e = 0$	$L_e = 1$	$L_e = -1$		

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

	n	$+$	ν_e	\longrightarrow	p	$+$	e^-
carga	\longrightarrow	$Q_n = 0$	$Q_\nu = 0$	$Q_p = 1$	$Q_e = -1$		
nro. leptónico	\longrightarrow	$L_e = 0$	$L_e = 1$	$L_e = 0$	$L_e = 1$		

	p	$+$	$\bar{\nu}_e$	\longrightarrow	n	$+$	e^+
carga	\longrightarrow	$Q_p = 1$	$Q_\nu = 0$	$Q_n = 0$	$Q_e = 1$		
nro. leptónico	\longrightarrow	$L_e = 0$	$L_e = -1$	$L_e = 0$	$L_e = -1$		

LEPTONES: interacciones y decaimientos (cont.)

Otra reacción cruzada posible es la conversión de un protón en un neutrón:

	p	\longrightarrow	n	$+$	e^+	$+$	ν_e
carga	$\rightarrow Q_p = 1$		$Q_n = 0$		$Q_e = 1$		$Q_\nu = 0$
nro. leptónico	$\rightarrow L_e = 0$		$L_e = 0$		$L_e = -1$		$L_e = 1.$

Para protones libres esta reacción cinemáticamente prohibida (no se conserva la energía) porque la masa del neutrón (939,56 MeV/c²) es mayor que la del protón (938,27 MeV/c²).

Es posible, sin embargo, dentro del núcleo atómico, a expensas de la energía de ligadura.

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 con un antiquark forman un mesón.

$$\text{Hadrones} \left\{ \begin{array}{ll} \text{Bariones} & (qqq) \\ \text{Mesones} & (q\bar{q}) \\ \text{Antibariones} & (\bar{q}\bar{q}\bar{q}) \end{array} \right.$$

Ejemplos: **nucleones**:

Protón	$p \equiv uud$
Neutrón	$n \equiv udd$

Todos los bariones, excepto el protón, son *inestables* y *decaen*.
El protón es el barión más ligero y es **estable**.
El neutrón fuera del átomo es **inestable**

HADRONES (cont.)

Como el protón tiene carga eléctrica +1 y el neutrón 0,

Protón	$p \equiv uud$
Neutrón	$n \equiv udd$

de lo anterior se deduce que los **quarks tienen carga eléctrica fraccionaria:**

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

Generación	1 ^{ra}	2 ^a	3 ^{ra}
$Q = +2/3$	u	c	t
$Q = -1/3$	d	s	b

HADRONES (cont.)

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.

Los antiquarks tienen carga y número bariónico opuesto a los quarks.

HADRONES (cont.)

La propiedad de los quarks que permite diferenciarlos es el **sabor**,

Existen 6 diferentes “cargas” de sabor:

U (up)

D (down)

C (charm)

S (strangeness)

T (top ó truth)

B (bottom ó beauty).

Los antiquarks, tienen sabor opuesto.

HADRONES (cont.)

Así como los leptones, los quarks también pueden dividirse en tres generaciones.

Como es imposible aislar un quark, no es posible determinar en forma directa las masas de los quarks. Deben deducirse a partir de las masas de las partículas que forman.

	quark	Q	D	U	S	C	B	T	mc^2
Generación 1	d	-1/3	-1	0	0	0	0	0	3.5 - 6.0 MeV
[0.2cm]	u	2/3	0	1	0	0	0	0	1.5 - 3.3 MeV
Generación 2	s	-1/3	0	0	-1	0	0	0	104_{-34}^{+26} MeV
[0.2cm]	c	2/3	0	0	0	1	0	0	$1.27_{-0.11}^{+0.07}$ GeV
Generación 3	b	-1/3	0	0	0	0	-1	0	$4.20_{-0.07}^{+0.17}$ GeV
[0.2cm]	t	2/3	0	0	0	0	0	1	171.2 ± 2.1 GeV

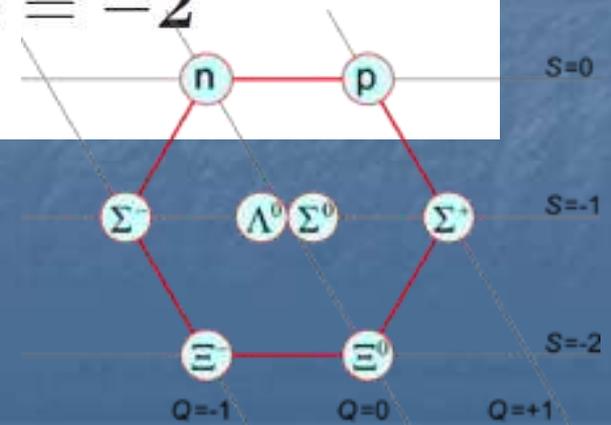
HADRONES (cont.)

Con los tres quarks más ligeros se pueden formar distintas combinaciones (bariones):

Nucleones $p \equiv uud$ $n \equiv udd$ $S = 0$
(0.938) (0.940)

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

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



Este es el **octeto bariónico**

HADRONES (cont.)

Los quarks dentro de los bariones tienen una variedad de niveles energéticos, por lo que pueden dar lugar a partículas más pesadas llamadas **resonancias**.

HADRONES (cont.)

➤ Las resonancias más conocidas son las partículas Δ , de extrañeza $S = 0$ (decaen en $5.58 \pm 0.09 \times 10^{-24}$ s):

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

➤ Las partículas Σ^* son resonancias más pesadas:

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

Todas ellas son de extrañeza $S = -1$.

➤ Las resonancias con $S = -2$ son las partículas Ξ^* :

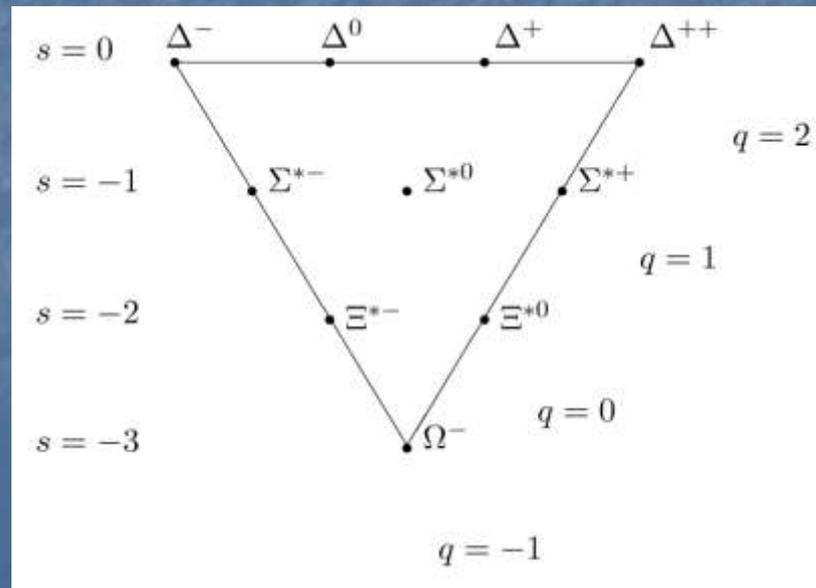
$$\begin{array}{cc} \Xi^{*0} \equiv uss & \Xi^{*-} \equiv dss \\ (1.531) & (1.535) \end{array}$$

HADRONES (cont.)

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

$$\Omega^- \equiv sss \quad (1.67)$$

Estas diez partículas forman el llamado **decuplete bariónico**.



HADRONES (cont.)

Los mesones son hadrones hechos de un quark y un antiquark.

Estos no tienen porque ser del mismo sabor.

Los mesones que se pueden formar con los tres quarks más ligeros son:

$$\text{Pi3n} \quad \pi^- \equiv d\bar{u} \quad \pi^0 \equiv u\bar{u} \quad \pi^+ \equiv u\bar{d} \quad \mathbf{S} = 0$$

(0.14) (0.135) (0.140)

$$\text{Eta} \quad \eta \equiv d\bar{d} \quad \eta' \equiv s\bar{s} \quad \mathbf{S} = 0$$

(0.547) (0.958)

$$\text{Ka3n} \quad K^0 \equiv d\bar{s} \quad K^+ \equiv u\bar{s} \quad \mathbf{S} = 1$$

(0.498) (0.494)

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

(0.494) (0.498)

Este es el llamado **noneto mes3nico**.

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

Dos partículas interactúan cuando se acercan lo suficiente como para que **las fuerzas fundamentales puedan actuar modificando su estado.**

La interacción puede tener dos resultados:

1. La trayectoria de las partículas en el espacio-tiempo se modifica.
2. Las partículas pueden cambiar o nuevas partículas pueden aparecer.

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

Lo que resulta de la 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.

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

Todas las interacciones deben conservar la energía, el 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.

Sin embargo, en reacciones puramente hadrónicas es útil suponer conservación de la extrañeza S .

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

La reacción más simple es: $p + p \longrightarrow p + p$

Cuando se incrementa la energía son posibles nuevos canales:

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^0$$

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^+ + \pi^-$$

Analicemos la primera de estas reacciones en términos de quarks:

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^0$$

$$\begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ \bar{u} \end{pmatrix}$$

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

$$p + p \longrightarrow p + p + \pi^0$$

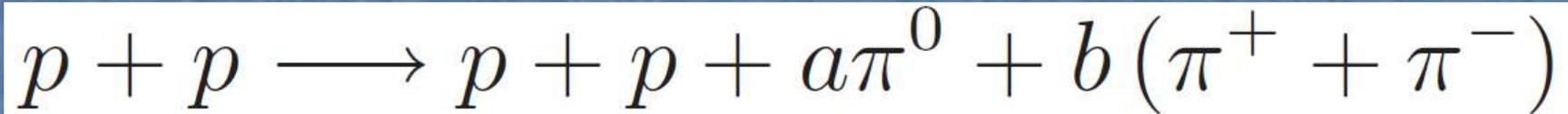
$$\begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} \longrightarrow \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ u \\ d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u \\ \bar{u} \end{pmatrix}$$

Parte de la energía fue usada para crear un par quark-antiquark.

Observar que tanto la carga como el número bariónico se conservan.

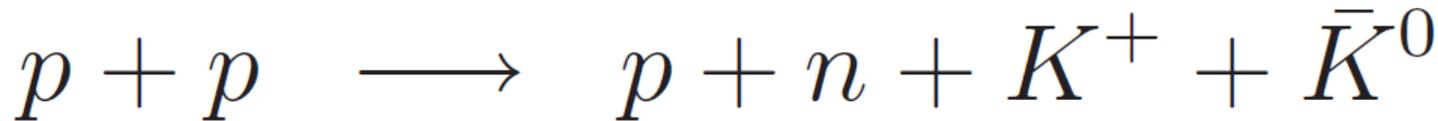
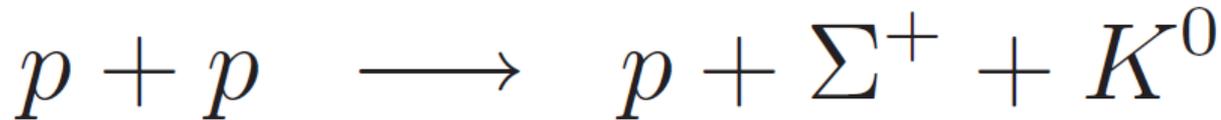
INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

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



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

Si aumenta aún más la energía pueden aparecer partículas extrañas:



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

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

La **fuerza fuerte** entre quarks es tal que a mayor separación se hace más fuerte la interacción.

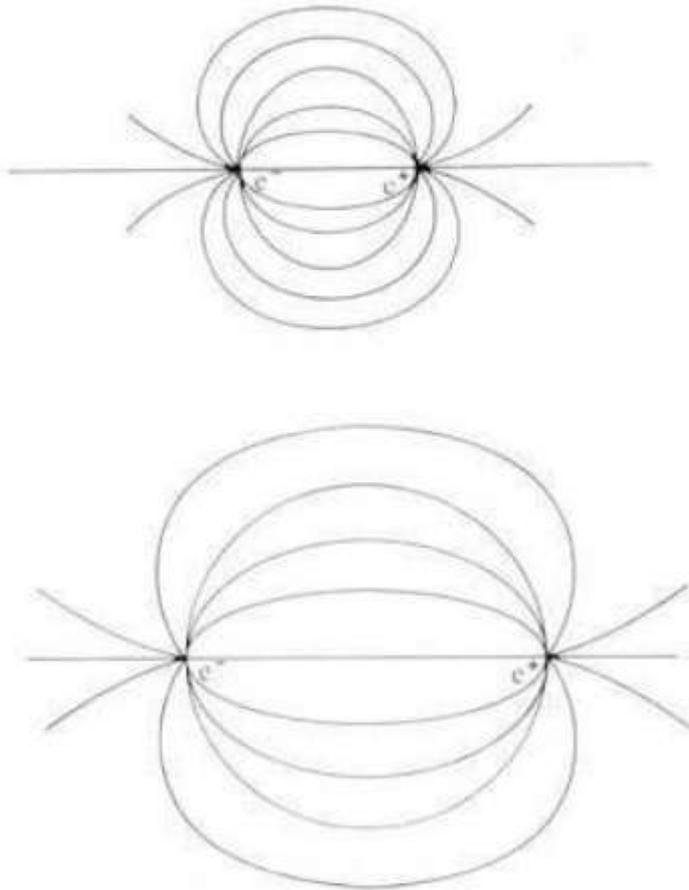
Esto significa que **la densidad de energía en el campo fuerte aumenta cuando se hace trabajo para separar las cargas.**

Si se continúa aplicando fuerza para separar las partículas **la densidad de energía del campo puede superar el umbral de creación de un par partícula-antipartícula.**

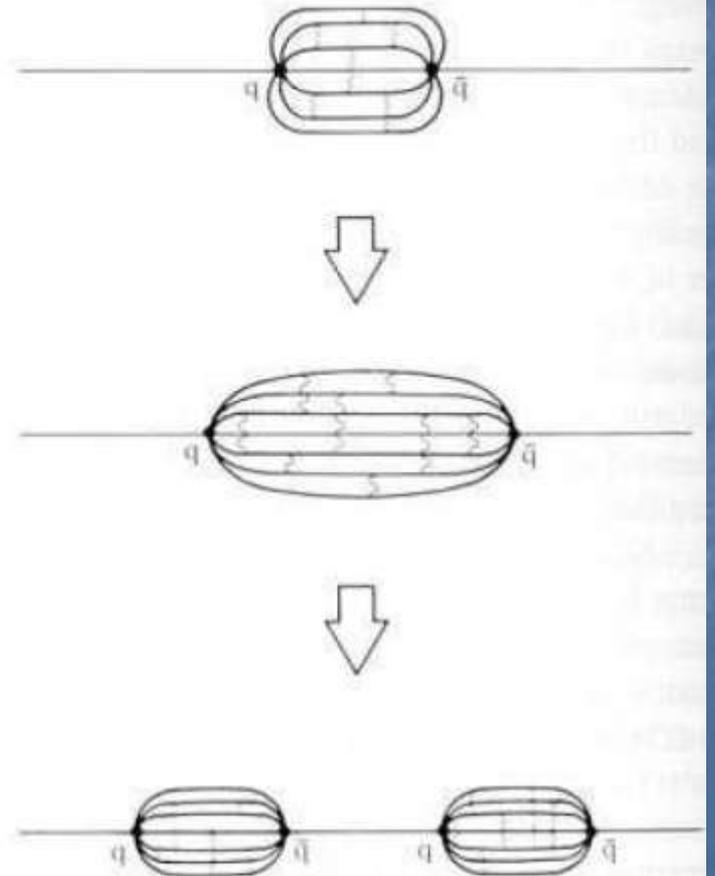
INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

Creación de mesones por separación de quarks.

Electric field lines spread out as the electric charges are separated.



Colour force lines between quarks are collimated into a tube-like shape and do not spread out as the quarks are separated. Eventually a single tube will split into two when the force applied has completed enough work.



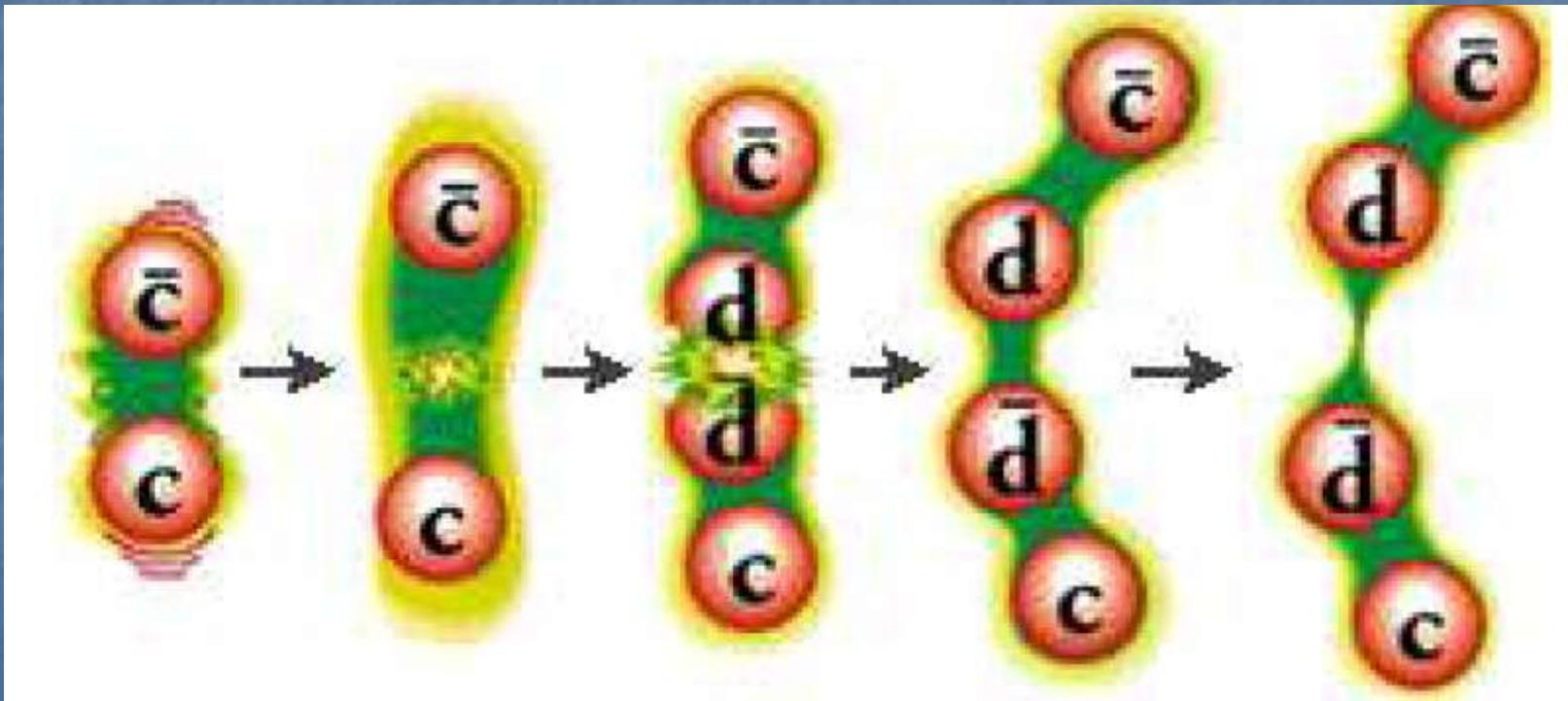
INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

Creación de mesones por separación de quarks.

Cuando el quark c se separa del \bar{c}

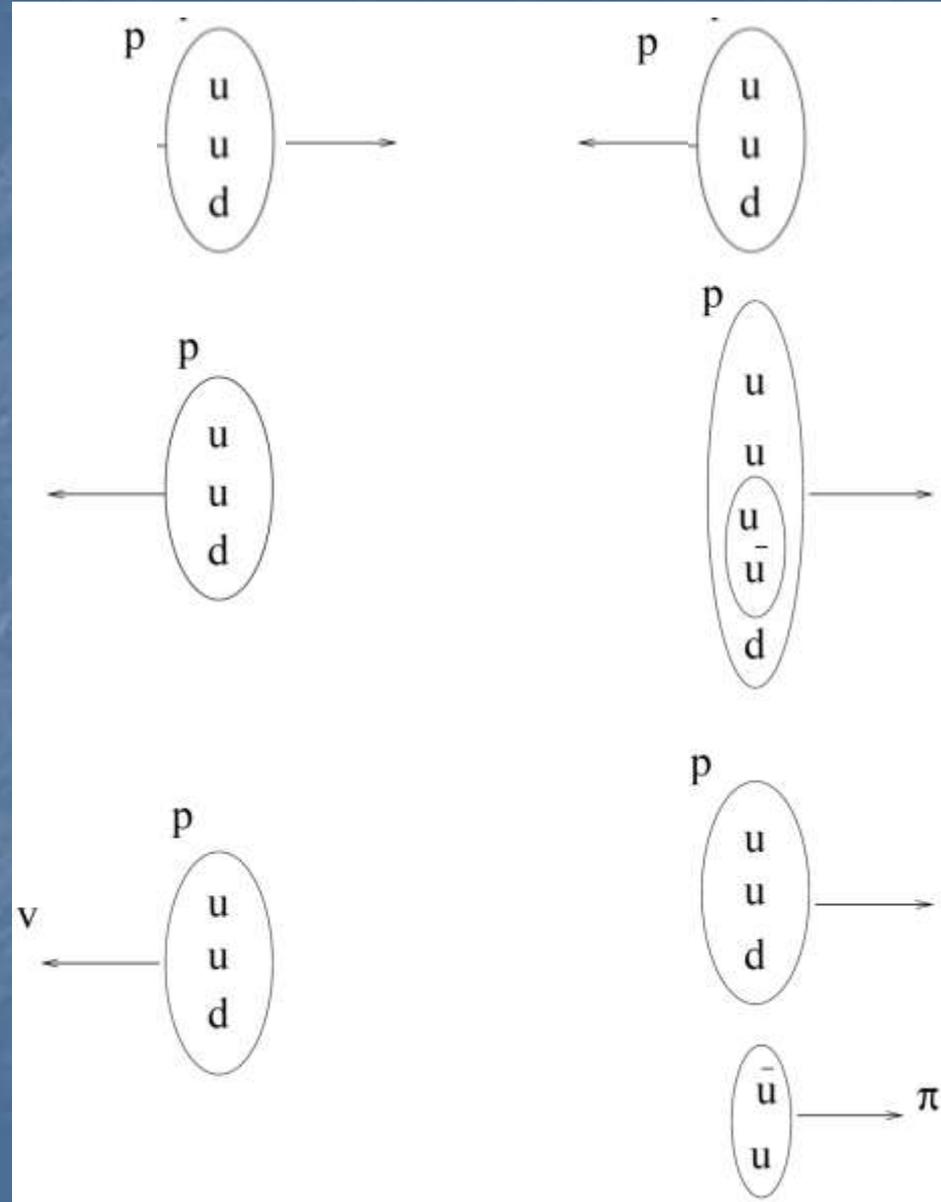
se crea un par de quarks $d\bar{d}$.

En lugar de conseguir entonces dos quarks separados se crean dos mesones.

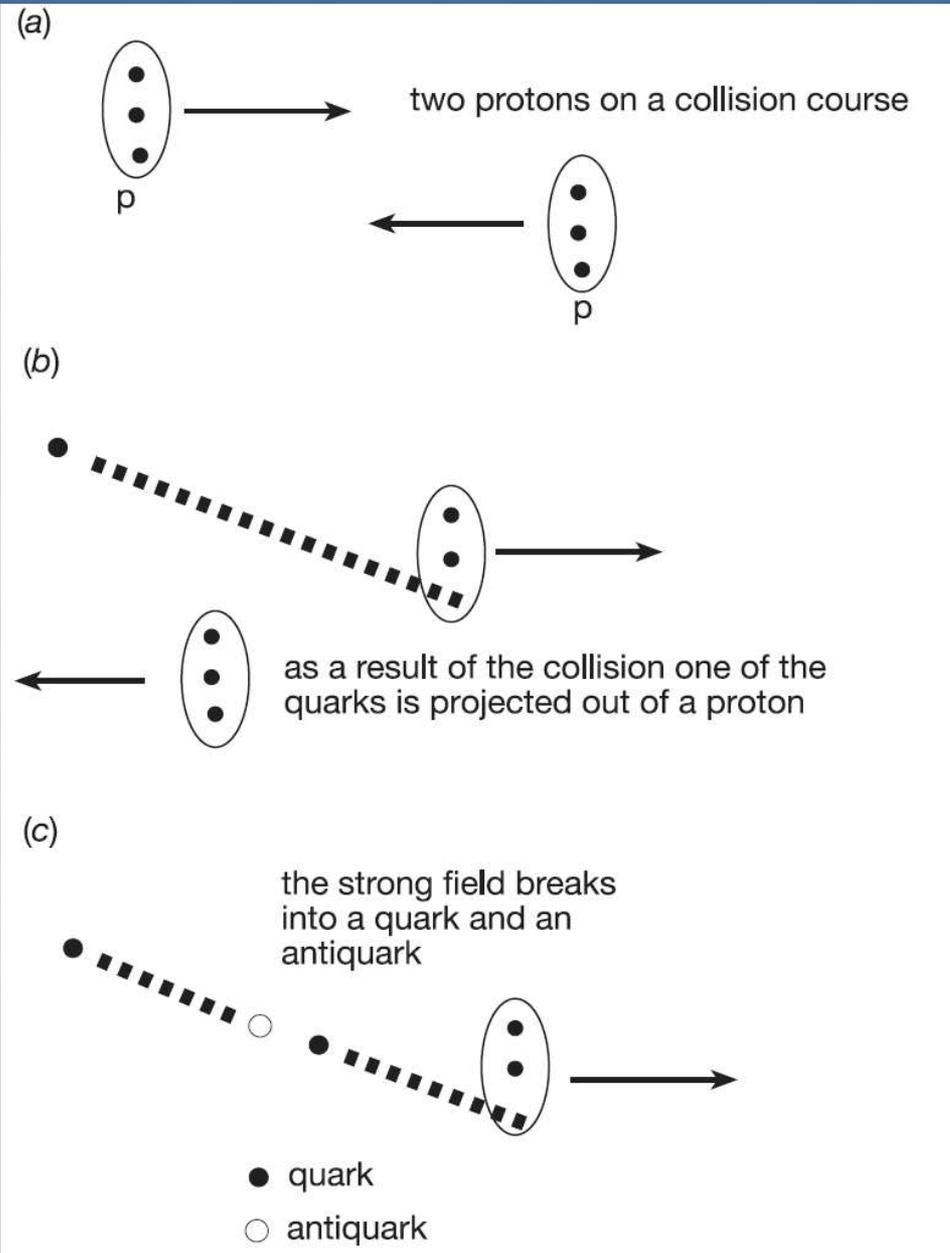


INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

Así, por ejemplo, en la interacción de protones el trabajo realizado durante la colisión sobre un quark incrementa la energía del campo fuerte materializando un mesón.



INTERACCIONES DE PARTÍCULAS



There is enough energy in the tube *to materialize a quark-antiquark pair*.

When this happens, the tube breaks into two smaller pieces.

The quark gets an antiquark on the other end of its piece of fractured tube, and the proton has a quark on the end of its tube.

The ejected quark has turned into a meson, and the proton has gained a new quark to ensure that it remains a baryon, but not necessarily a proton.

INTERACCIONES DE PARTÍCULAS

La fuerza fuerte no puede extenderse sobre grandes distancias precisamente porque su intensidad se incrementa con la distancia.

Como su alcance es menor que el radio del núcleo, no interactúa con otros núcleos cercanos. Si no fuera así, todos los núcleos del universo se habrían colapsado para formar un gran conglomerado de masa nuclear.

Si se da energía a los quarks el campo fuerte produce pares de partículas (quarks-antiquarks).

Por esta razón **nunca puede hallarse un quark aislado.**

Partículas de interacción

En la teoría cuántica de campos, a cada tipo de interacción le corresponde una familia de **partículas portadoras de la interacción**.

La teoría cuántica de campos (o QFT, sigla en inglés de quantum field theory) es una disciplina de la física que aplica los principios de la mecánica cuántica a los sistemas clásicos de campos continuos, como por ejemplo el campo electromagnético.

Una consecuencia inmediata de esta teoría es que el comportamiento cuántico de un campo continuo es equivalente al de un sistema de partículas cuyo número no es constante, esto es, que pueden crearse o destruirse.

Partículas de interacción

Las diferentes cargas que dan lugar a las fuerzas elementales producen campos en el espacio-tiempo.

Las *perturbaciones de estos campos* son **discretas** y forman las llamadas **partículas de interacción**.

Partículas de interacción

El cuanto de interacción del campo electromagnético es el **fotón**.

El fotón, a diferencia de las partículas cargadas que producen el campo, no tiene carga eléctrica.

El cuanto de interacción del *campo fuerte* es el **gluón**.

El gluón experimenta la fuerza fuerte, o sea, que es portador de carga fuerte.

Por lo tanto, actualmente se dice que la fuerza que mantiene unidos a protones y neutrones en el núcleo del átomo, es la fuerza que actúa entre los quarks (quarks up y quarks down) por intermedio de los gluones. Esta interacción sería, en último caso, la que hace que protones y neutrones permanezcan unidos formando el núcleo de un átomo.

Partículas de interacción

Las perturbaciones del *campo débil* son los **bosones** masivos W^\pm , que tienen carga eléctrica.

Además, hay un bosón neutro Z^0 , que se manifiesta en condiciones de unificación con el electromagnetismo.

El cuanto de interacción del *campo gravitatorio* es el **gravitón**, que siente los efectos del campo gravitatorio. Es una partícula sin carga eléctrica ni masa en reposo.

DECAIMIENTO DE PARTÍCULAS

El *decaimiento* de una partícula es el proceso por el cual la energía de una **partícula aislada se transforma en un cierto número de partículas con menor energía.**

Un *decaimiento* también puede ocurrir cuando una **partícula pasa a un nivel de energía menor**, como cuando un átomo excitado decae emitiendo un fotón al pasar el electrón excitado a un nivel de menor energía.

Hay varios tipos de decaimiento.

1) Decaimiento electromagnético

Dos hadrones pueden estar hechos de los mismos quarks pero en distintos niveles de energía.

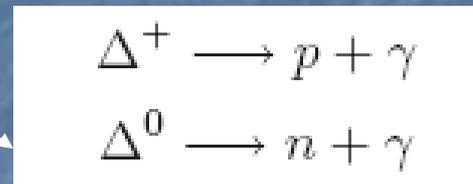
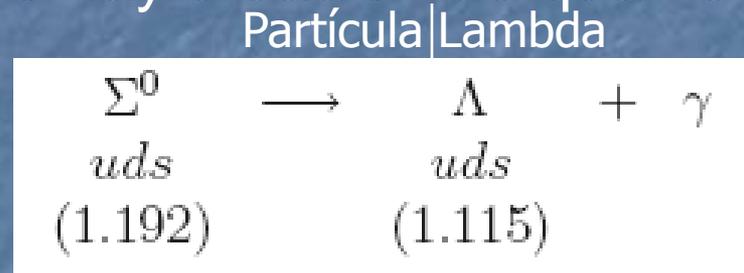
El decaimiento se produce por la emisión de ese exceso de energía a través de un fotón.

En estos decaimientos no hay creación de quarks.

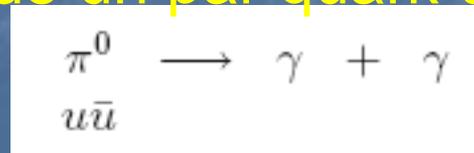
Ejemplos:

RESONANCIAS:

Partículas formadas por quarks con variados niveles energéticos



En algunos casos el decaimiento electromagnético opera por aniquilación directa de un par quark-antiquark. Por ejemplo:

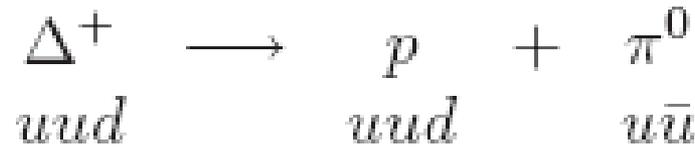


Tiempo de decaimiento: 10^{-16} s

2) Decaimientos fuertes

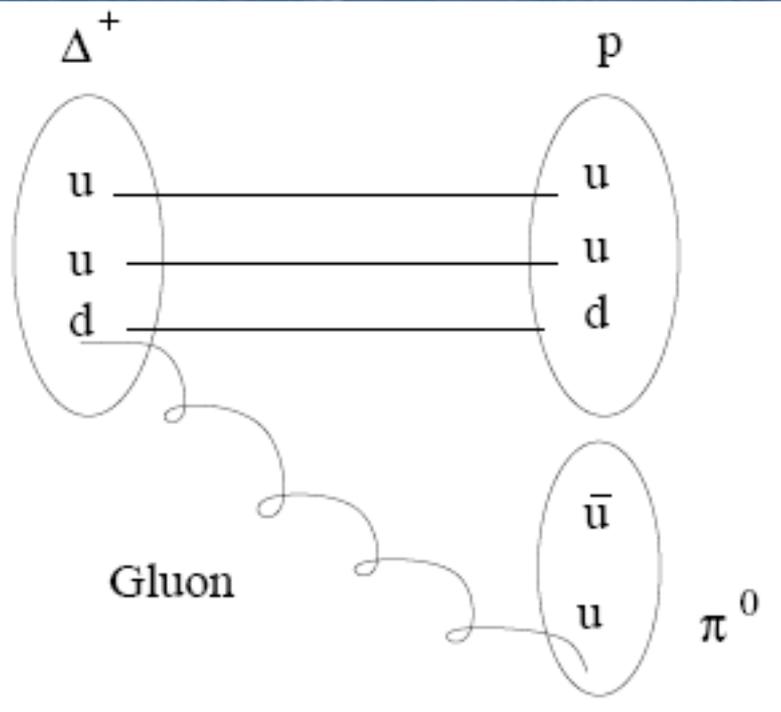
Se trata de decaimientos en los cuales hay **creación de quarks**.

Ejemplo:



Aquí, el **par $u\bar{u}$ es creado** no por fotones (perturbación del campo electromagnético) sino **por gluones** (perturbaciones del campo fuerte).

Representación de este tipo de decaimiento:

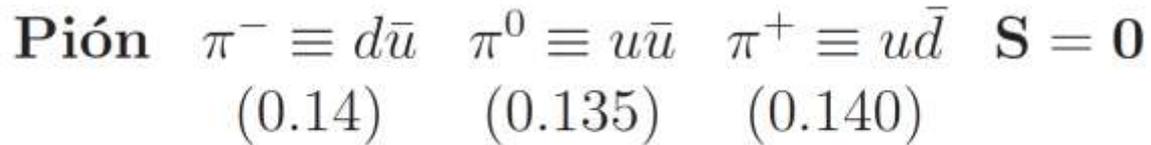
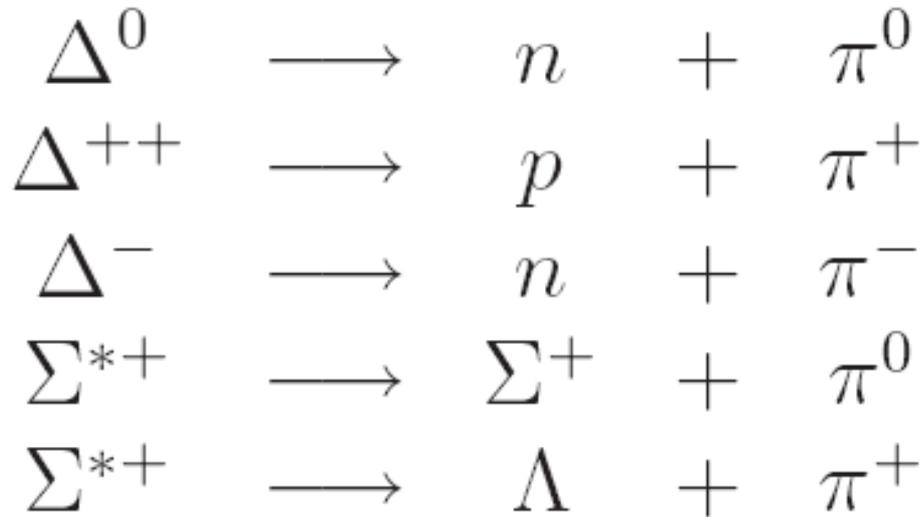


When the quarks lose energy a disturbance is set up in the strong field. A moving packet of disturbance in the strong field is called a gluon. This disturbance is emitted in a similar way to the photon in the electromagnetic case.

The properties of the strong force dictate that the quark and antiquarks involved must be of the same flavour, since gluons have not electric charge.

2) Decaimientos fuertes (cont.)

Otros ejemplos:

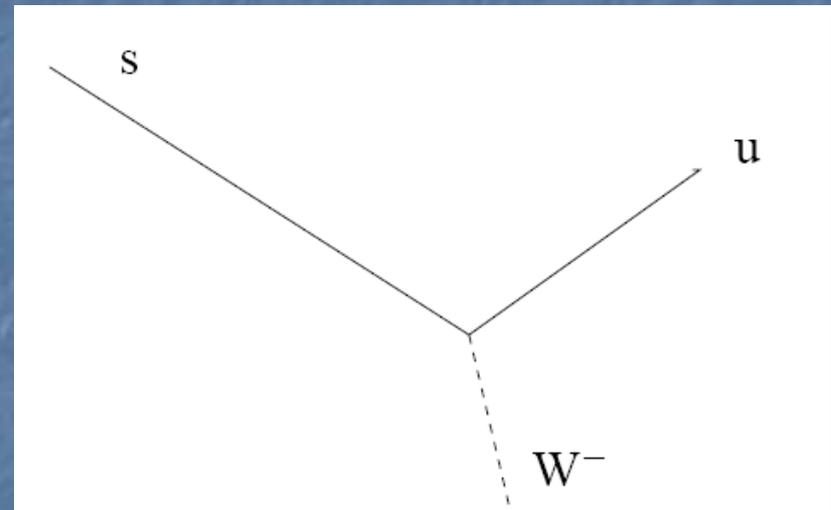
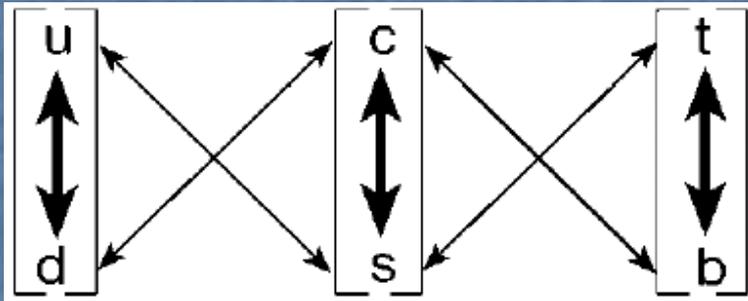


Todos estos decaimientos **ocurren sobre tiempos extremadamente cortos** ($\sim 10^{-25}$ s), en comparaci3n con los decaimientos electromagn3ticos ($\sim 10^{-10} - 10^{-16}$ s).

3) Decaimientos débiles

Son decaimientos en los cuales hay **creación de quarks por bosones W** (perturbaciones del campo débil).

- Cuando un **quark s** cambia a uno **u** la diferencia de masa y carga **escapa como un W^-** .

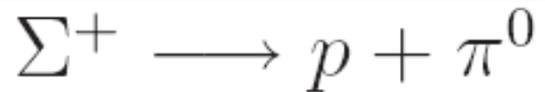


- Cuando un **quark u** cambia en un **d** se **emite un W^+** .

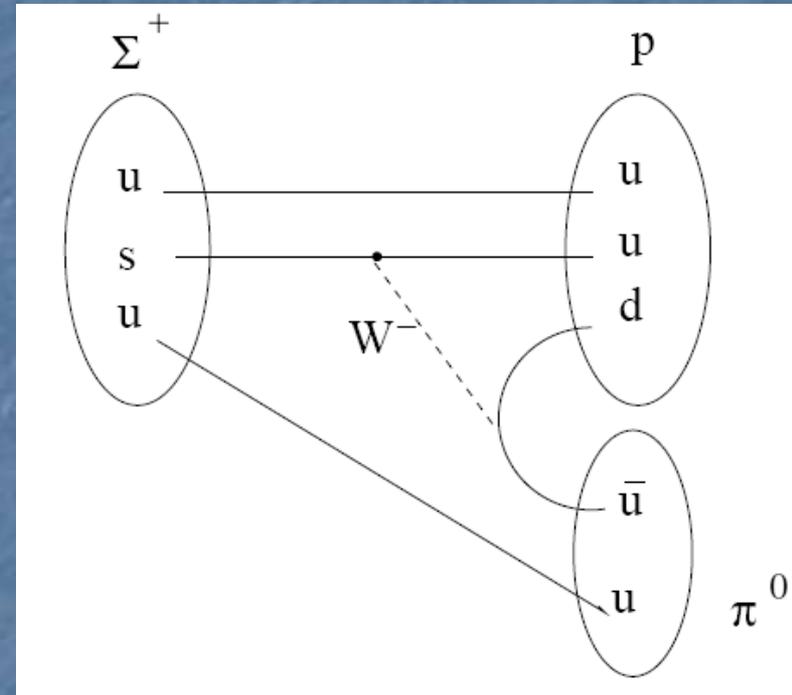
	u	c	t
$Q = +2/3$	$5 \text{ MeV}/c^2$	$1.58 \text{ GeV}/c^2$	$1.75 \text{ GeV}/c^2$
	d	s	b
$Q = -1/3$	$\sim 9 \text{ MeV}/c^2$	$0.47 \text{ GeV}/c^2$	$4.58 \text{ GeV}/c^2$

3) Decaimientos débiles (cont.)

La energía de estos bosones W puede ser usada para crear pares quark-antiquark. Un ejemplo:



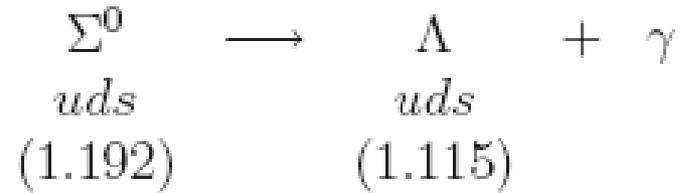
Un quark tipo down (con carga $-1/3$) puede emitir o absorber a un bosón W y convertirlo en una superposición de quark up. Al contrario, un quark up puede convertir en una superposición de quarks down.



Los hadrones extraños que decaen produciendo un protón se suelen llamar **hyperiones**.

3) Decaimientos débiles (cont.)

Σ^0 can decay electromagnetically

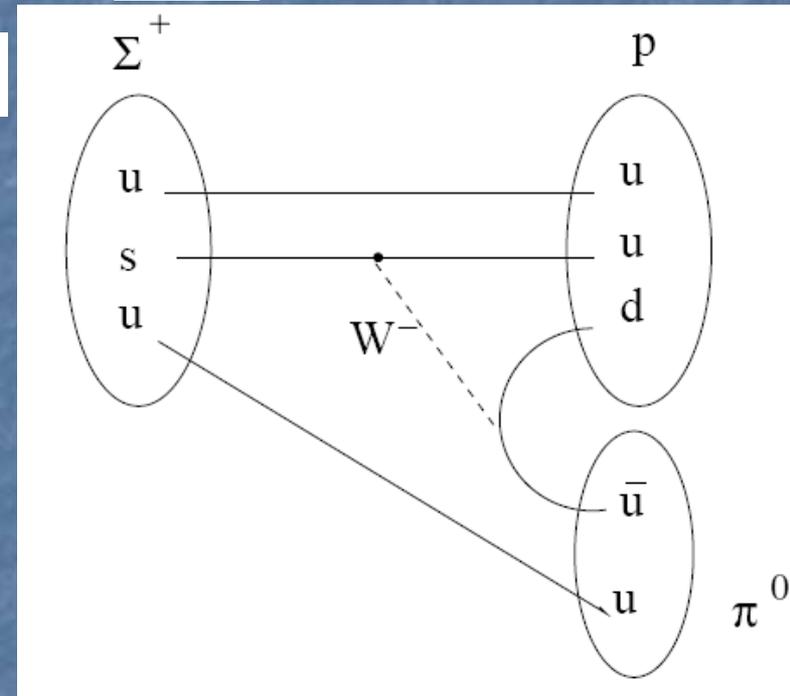


but there are no light mass versions of the Σ^+

Hence, a weak decay $\Sigma^+ \longrightarrow p + \pi^0$

is obviously a beneficial transition to take place within the Σ^+ as the u quark is less massive, and therefore the energy of the hadron will be reduced. This is not quite the same as a quark dropping energy levels, in a sense it is more fundamental than that.

In this case the quark is changing into a different particle and in the process giving up some energy to the weak field.



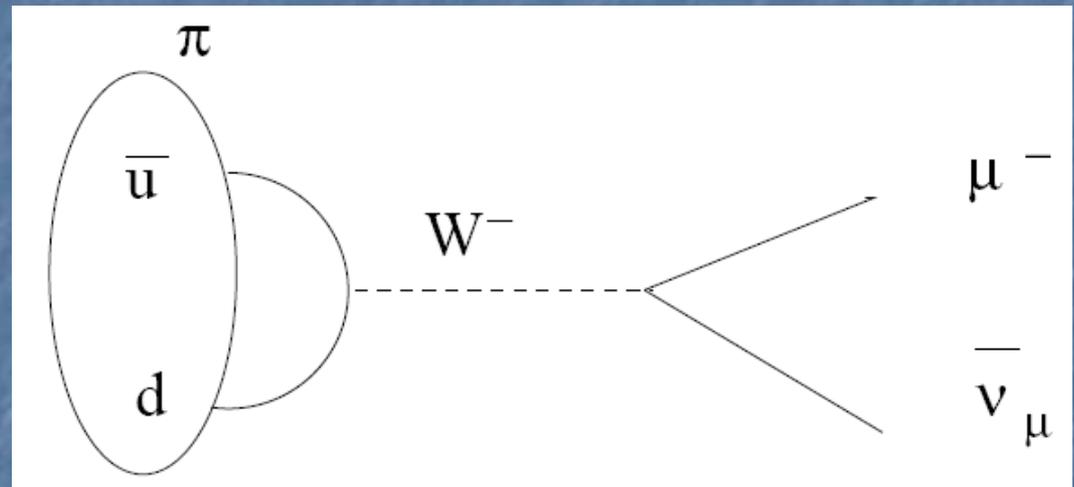
5) Decaimiento de mesones

Los π^0 decaen electromagnéticamente.

En el caso de los piones cargados (π^\pm) la conservación de la carga electromagnética y el sabor impiden que estas partículas decaigan en forma electromagnética o fuerte.

El decaimiento procede a través de los bosones W.

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



As the d and anti- u quarks are amongst the lightest, there is no advantage in the π^- decaying into a W^- which then materializes quarks again. The only other possibility is for the W^- to turn into a lepton pair.

En forma similar:

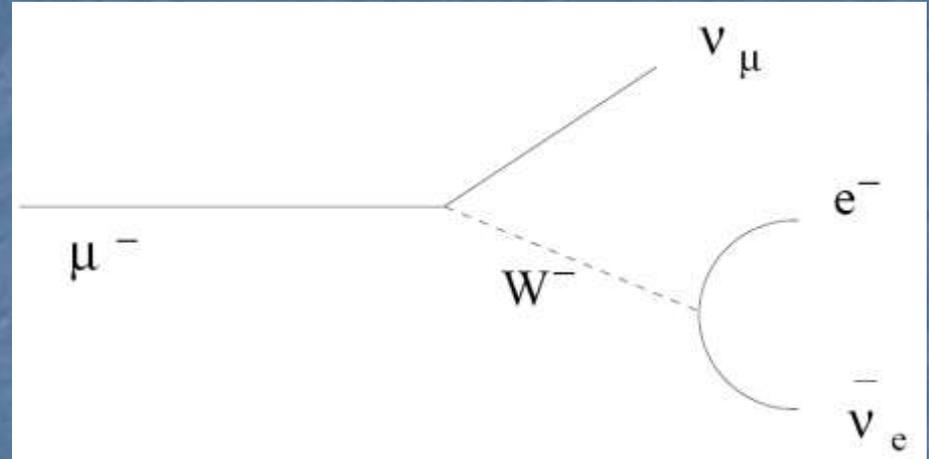
$$\pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

6) Decaimiento de leptones

El muón y el tau decaen en leptones de generación más liviana:

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

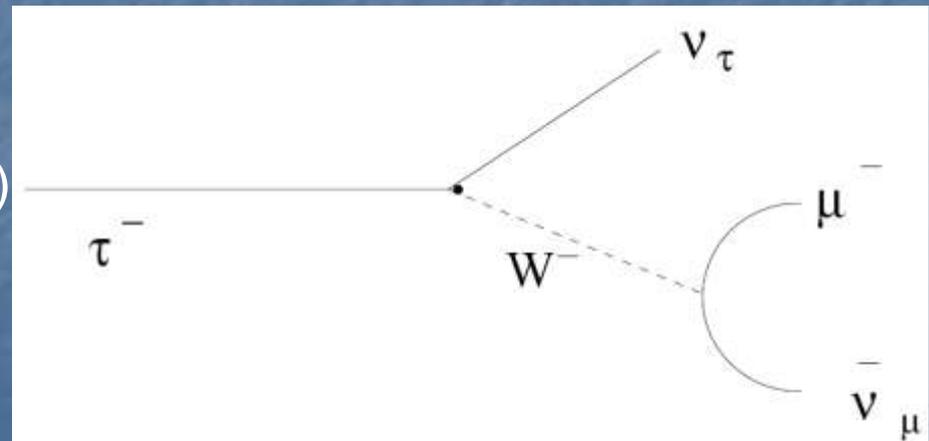
Este decaimiento se produce por la emisión de un W^- por parte del μ^-



En forma similar:

$$\tau^- \longrightarrow \mu^- + \nu_\tau + \bar{\nu}_\mu$$

$$\begin{array}{rcl} -1 & = & -1 + 0 + 0 \text{ (carga)} \\ 1 & = & 1 + 1 + -1 \text{ (nro. Leptónico)} \end{array}$$



Propiedades intrínsecas de las partículas: spin

El spin es una propiedad cuántica que poseen todas las partículas.

El spin se mide en múltiplos de la constante de Planck, $\hbar = h/2\pi$.

*Las partículas materiales tienen spin $(1/2)h$
(tanto los quarks como los leptones).*

Por otra parte, todas las partículas que son perturbaciones en los campos creados por las partículas materiales **tienen spin entero** ($1h$ los protones, gluones y bosones W^\pm y Z^0 , $2h$ los gravitones).

Las partículas con spin 1/2 se llaman **fermiones** y obedecen al principio de **exclusión de Pauli**: dos partículas no pueden ocupar el mismo estado cuántico.

Las partículas con spin entero se llaman **bosones** y no obedecen a este principio.

Propiedades intrínsecas de las partículas: colores

Los quarks sienten la fuerza fuerte, mientras que los leptones no.

→ Es evidente que hay una propiedad de los quarks que los leptones no poseen. El número bariónico no es suficiente porque no explica la razón de que los quarks sólo aparezcan en combinaciones de la forma

$$qqq, \bar{q}\bar{q}\bar{q} \text{ ó } q\bar{q}$$

Esto se puede explicar introduciendo una “carga” para la fuerza fuerte:
el color.

Hay tres colores de quarks: rojo (r), verde (g) y azul (b).

Para ser estable, un hadrón necesita no tener color neto.

Esto se logra con cualquier combinación que incluya los tres colores o un color y su anticolor.

Por ejemplo, un protón puede ser $u_r u_b d_g$ o $u_r u_g d_b$

Los antiquarks tienen anticolor, por lo que,
por ejemplo, $\pi^+ \equiv u_r \bar{d}_{\bar{r}}, \pi^0 \equiv u_b \bar{u}_{\bar{b}}, \text{ etc.}$

Propiedades intrínsecas de las partículas: colores (cont.)

Tabla de sabor y color

Sabor (Q)	rojo	verde	azul
$u(+\frac{2}{3}e)$	u_r	u_g	u_b
$d(-\frac{1}{3}e)$	d_r	d_g	d_b
$s(-\frac{1}{3}e)$	s_r	s_g	s_b

Poco tiempo después de que la existencia de los quarks fuera propuesta por primera vez en 1964, Oscar W. Greenberg introdujo la noción de la carga de color para explicar cómo los quarks podían coexistir dentro de algunos hadrones en estados de otro modo idénticos y todavía satisfacer el principio de exclusión de Pauli. El concepto resultó ser útil. La cromodinámica cuántica ha estado en desarrollo desde los 1970s y constituye un ingrediente importante en el modelo estándar de la física de partículas.

Propiedades intrínsecas de las partículas: colores (cont.)

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

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

$$\alpha_s \sim 1 \text{ J m y } k = 1.36 \times 10^5 \text{ J m}^{-1}$$

donde r es la separación entre los quarks.

A diferencia del fotón, el gluón tiene color y por tanto siente la fuerza fuerte.

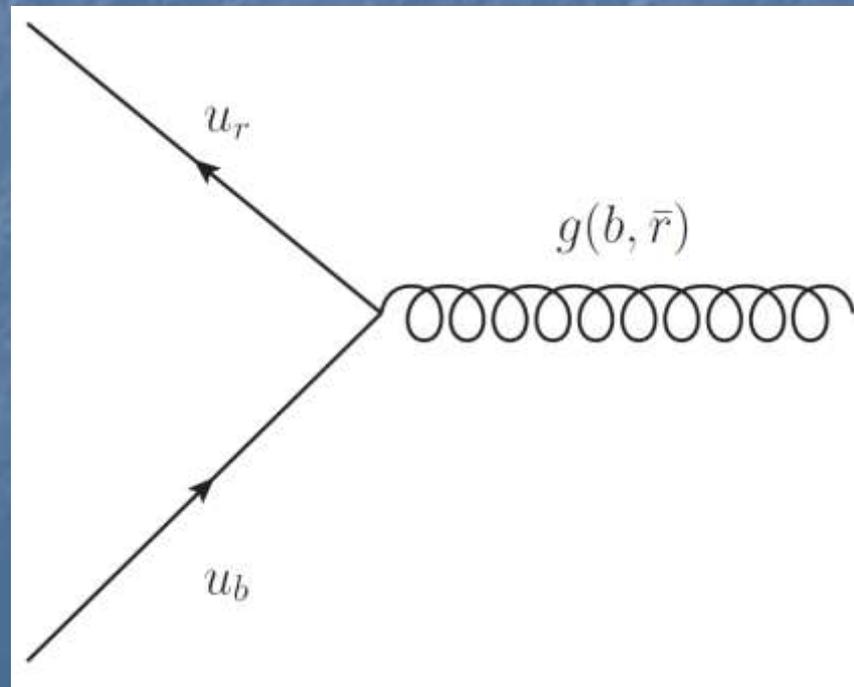
Esto hace que los gluones formen tubos de flujo, con los efectos que hemos visto antes (formación de pares quark-antiquark y de aquí mesones).

Propiedades intrínsecas de las partículas: colores (cont.)

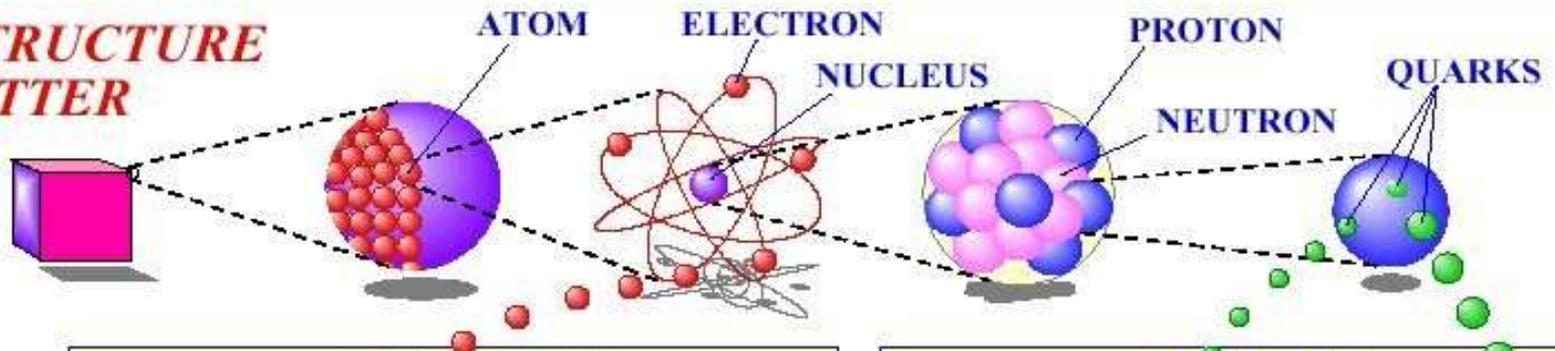
En una interacción fuerte un quark puede cambiar su color (pero no su sabor).

Como el color (al igual que la carga eléctrica) debe conservarse, la “diferencia” de color debe llevársela un gluón.

Los gluones tienen entonces dos colores, un color y un anticolor.



THE STRUCTURE OF MATTER



LEPTONS

These particles exist on their own

Constituents of ordinary matter.

These particles existed in the early moments after the Big Bang. Now they are found only in cosmic rays and particle accelerators.

1st FAMILY	ELECTRON (e^-) Charge = -1 Responsible for electricity and chemical reactions. Mass = $0.51 \text{ MeV}/c^2$	ELECTRON NEUTRINO (ν_e) Charge = 0 Rarely interacts with other matter. Very small mass.
	MUON (μ^-) A heavier relative of the electron. Discovered 1937. Mass = $0.106 \text{ GeV}/c^2$	MUON NEUTRINO (ν_μ) A relative of ν_e . Discovered 1962. Very small mass.
	TAU (τ^-) A heavier relative of the electron and muon. Discovered 1975. Mass = $1.78 \text{ GeV}/c^2$	TAU NEUTRINO (ν_τ) Not yet discovered. Very small mass.

Several recent experiments suggest that the mass of the neutrinos is not zero.

QUARKS

These particles only exist bound together

UP (u) Charge = $+2/3$. Mass $\sim 5 \text{ MeV}/c^2$	DOWN (d) Charge = $-1/3$. Mass $\sim 10 \text{ MeV}/c^2$
CHARM (c) A heavier relative of the up quark. Discovered 1973. Mass $\sim 1.3 \text{ GeV}/c^2$	STRANGE (s) A heavier relative of the down quark. Identified 1963. Mass $\sim 0.2 \text{ GeV}/c^2$
TOP (t) The heaviest quark. Discovered 1994. Mass $\sim 175 \text{ GeV}/c^2$	BOTTOM (b) A heavier relative of the down and strange quarks. Discovered 1977. Mass $\sim 4.3 \text{ GeV}/c^2$

Protons are made up of two up quarks and one down quark.
 Neutrons are made up of one up quark and two down quarks.

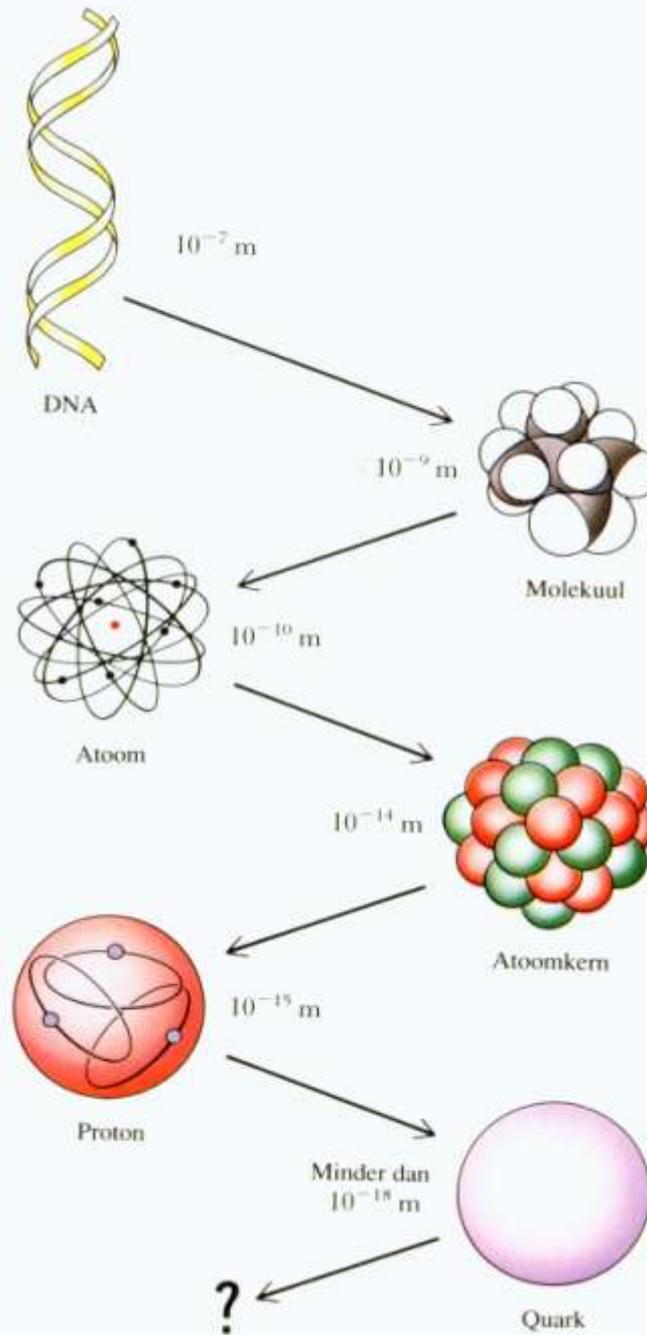
ALL OF THE ABOVE PARTICLES HAVE AN ANTI-PARTICLE COUNTERPART.

A particle and its antiparticle can annihilate to produce the bosons that carry forces eg $e^+e^- \rightarrow \gamma + \gamma$.

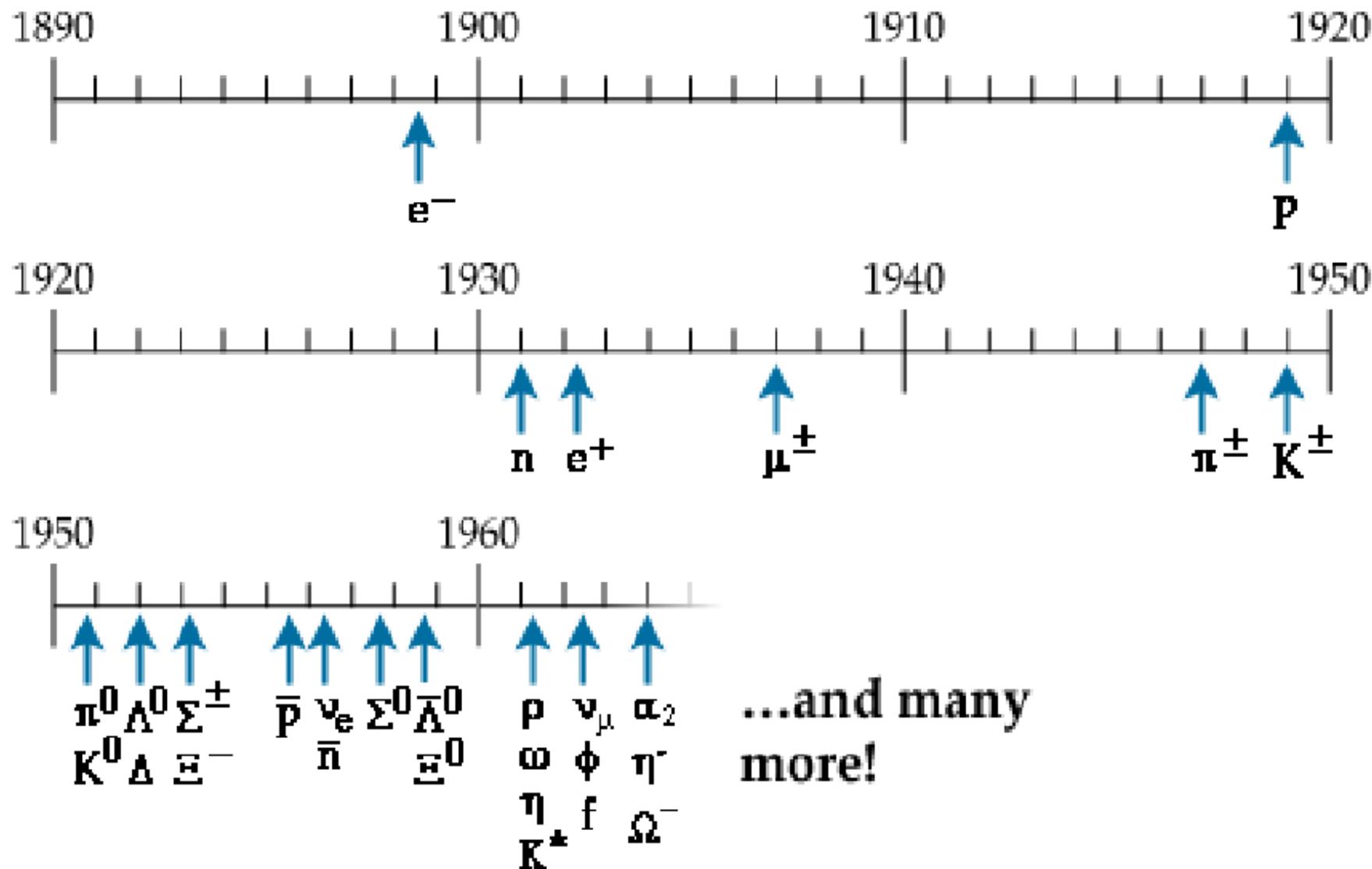
A particle - antiparticle pair can be produced from a force-carrying boson eg $Z \rightarrow b\bar{b}$, $\gamma \rightarrow e^+e^-$.

Scale.

- So let's have one more look at the scales at which we are working:



The Exploratory Era



Radioactividad: rayos α , β ó γ

La radioactividad es una propiedad de las partículas “inestables”, que al decaer producen **emisiones electromagnéticas** o **emisiones de partículas**.



Rayos X
(descubiertos en
1895
por Röntgen)



Rayos α : núcleos de He

Rayos β : electrones

Rayos γ : fotones
de alta energía,
descubiertos por
Paul Villard, en
1900, mientras
estudiaba el uranio.

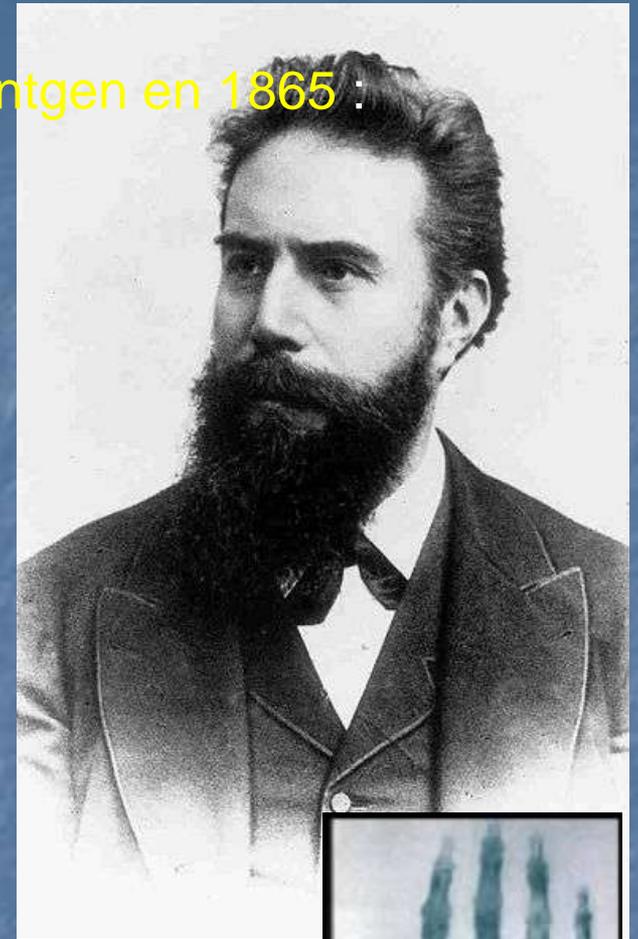
Rayos X

Los rayos X fueron **descubiertos por Wilhelm Röntgen en 1865** :

Estudiaba los rayos catódicos, y para ver la fosforescencia que producían en una pantalla cubierta de sal de bario, oscureció el laboratorio, y descubrió que una pantalla cercana en la que un estudiante había escrito la letra A con sal de bario, destellaba. Esa luz la causaba algo que salía del tubo y era más penetrante que los rayos catódicos: **rayos X**

Accidentalmente en un experimento el haz de rayos catódicos pasó por su mano y obtuvo en una placa de revelado fotográfico lo que hoy llamamos una radiografía de su mano.

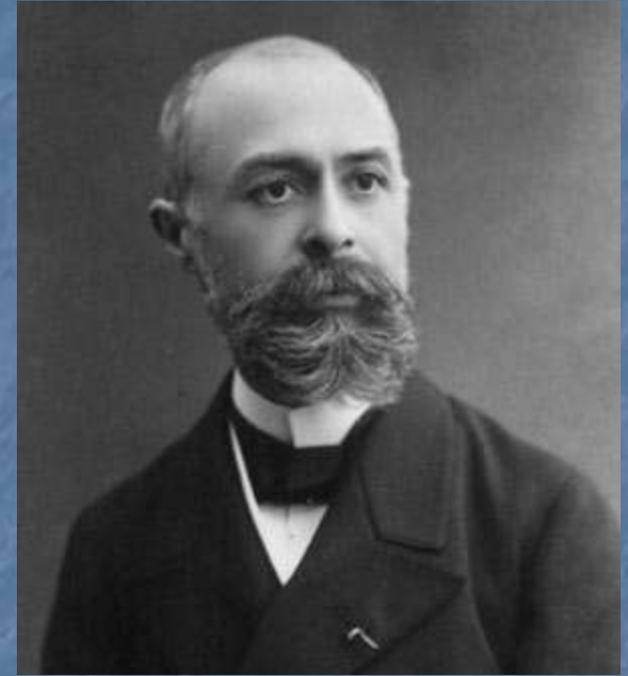
Gracias a su descubrimiento fue galardonado con el **primer Premio Nobel de Física en 1901**



Radioactividad: rayos α , β ó γ

La radioactividad fue **descubierta por Becquerel en 1896**: este fenómeno se produjo durante su investigación sobre la fluorescencia; al colocar sales de uranio sobre una placa fotográfica, comprobó que dicha placa se ennegrecía. Las sales de uranio emitían radiación. El Uranio decae muy lentamente emitiendo una partícula alfa.

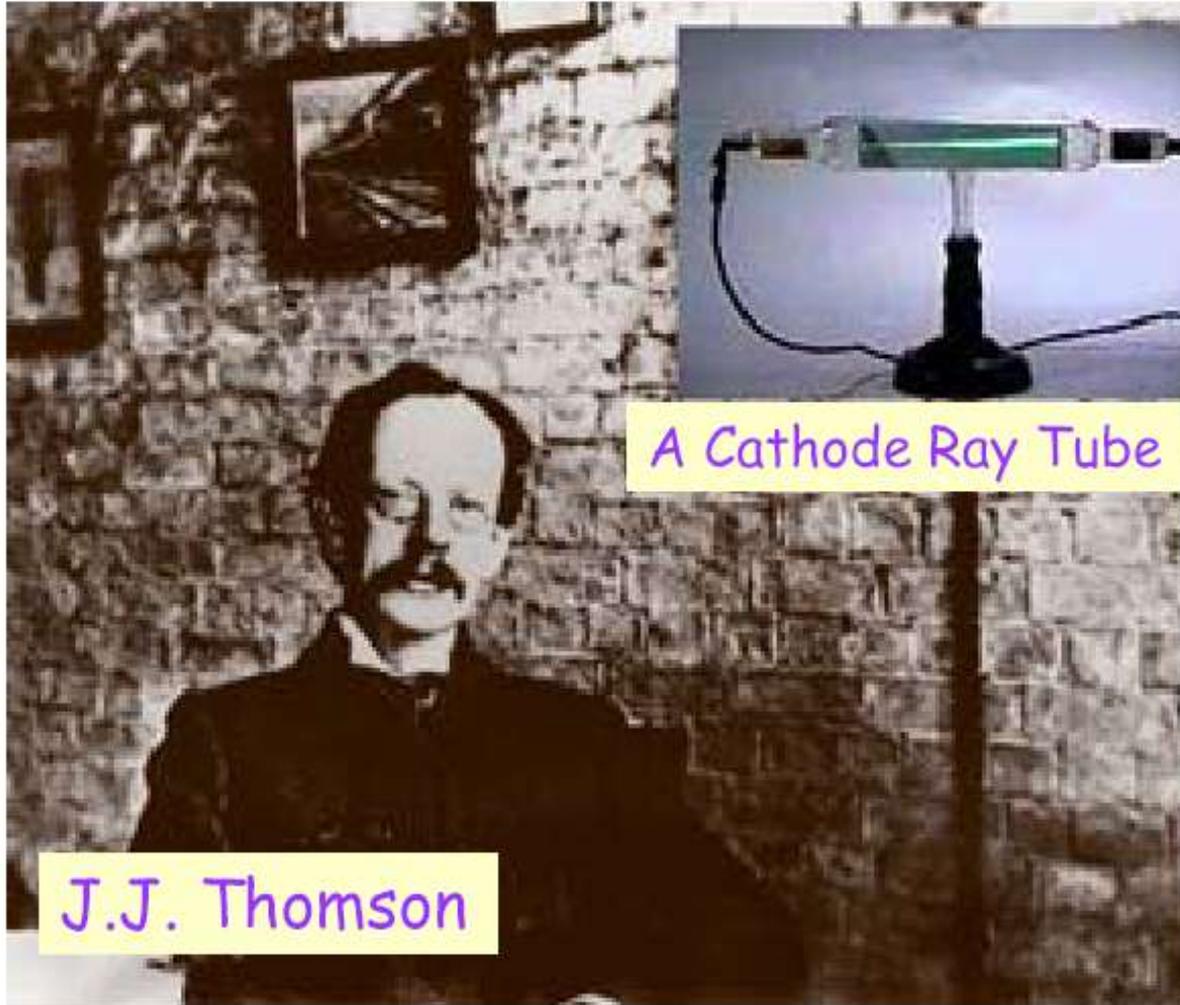
En 1903, Becquerel compartió el Premio Nobel de Física con Pierre y Marie Curie.



La **fluorescencia** es la propiedad de una sustancia para emitir luz cuando es expuesta a radiaciones del tipo ultravioleta, rayos catódicos (corrientes de electrones observados en tubos de vacío) o rayos X.

En el proceso, una molécula absorbe un fotón de alta energía, el cual es emitido como un fotón de baja energía (mayor longitud de onda). La diferencia de energía entre la absorción y la emisión, es disipada como calor (vibraciones moleculares).

The Electron ,1897



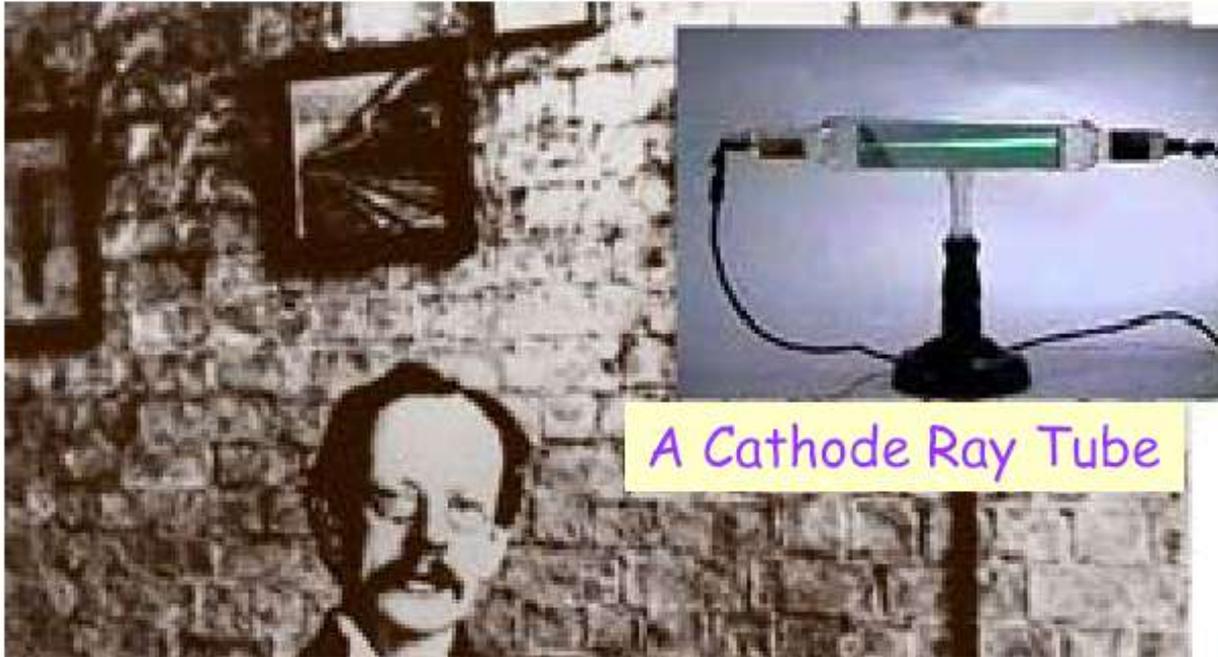
Discovered by J.J. Thomson in 1897 at Cavendish Laboratory, Cambridge, GB

Cathode Ray Tube:
100 eV Electron Racetrack

Possibilities:

- Vary gas content
- Gas Pressure
- Electric field
- Apply Heat
- Magnetic field
- Insert obstacles

The Electron ,1897



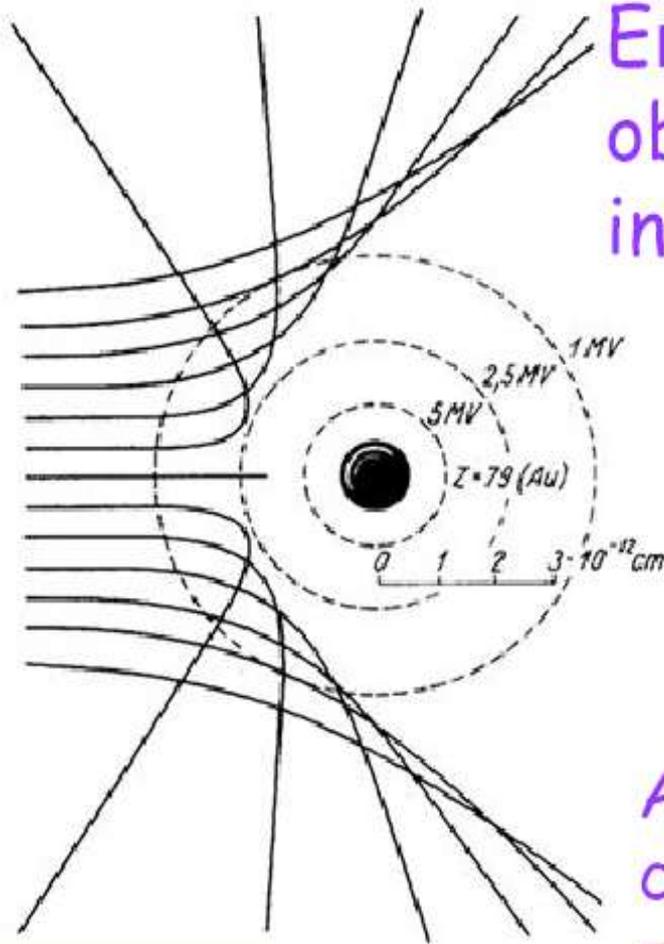
Discovered by J.J. Thomson in 1897 at Cavendish Laboratory, Cambridge, GB

Cathode Ray Tube:
100 eV Electron Racetrack

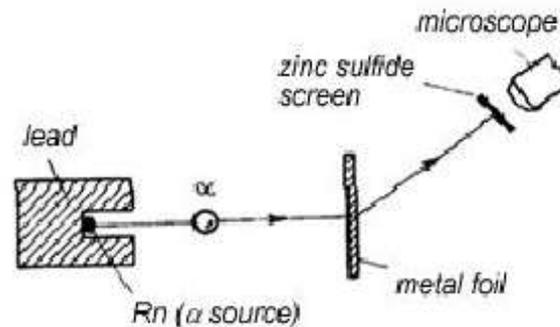
Los gases son aislantes para voltajes bajos, sin embargo, frente a voltajes elevados se vuelven conductores. Cuando en un tubo de vidrio que contiene un gas se hace parcialmente el vacío y se aplica un voltaje de varios miles de voltios, fluye una corriente eléctrica a través de él. Asociado a este flujo eléctrico, el gas encerrado en el tubo emite unos rayos de luz de colores, denominados **rayos catódicos**, que son **desviados por la acción de los campos eléctricos y magnéticos**.

Mediante un estudio cuidadoso de esta desviación, **J. J. Thomson** demostró en 1897 que los rayos estaban formados por una corriente de partículas cargadas negativamente, que llamó **electrones**.

Rutherford Experiment (~1910)



Ernest Rutherford: The first to observe scattering of α -particles in matter.



Backscatter!

Atom consists of a small, positively charged nucleus, surrounded by an electron cloud.

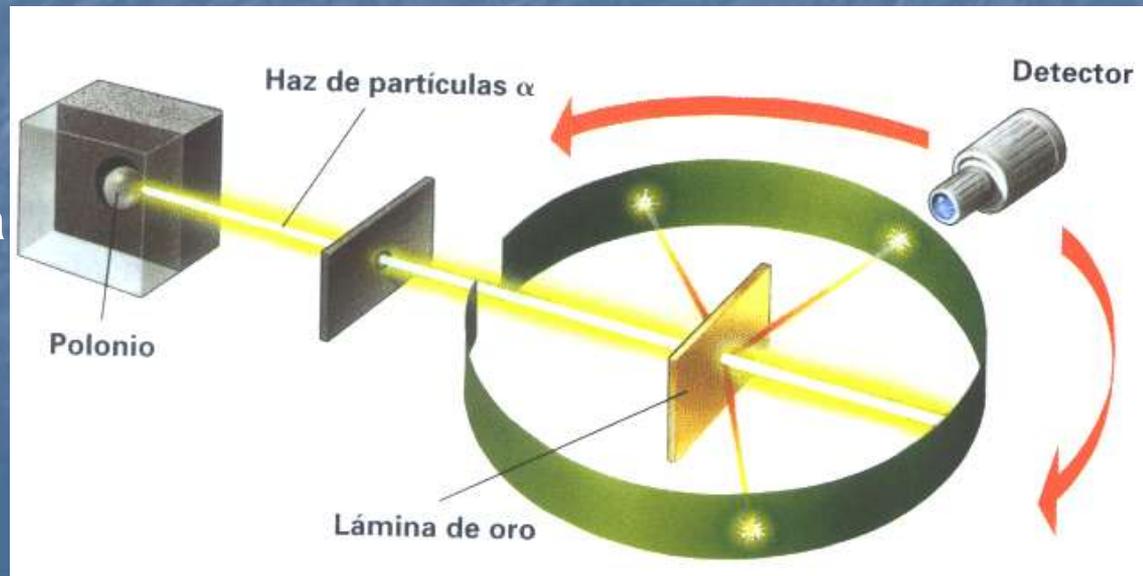
A "planetary system" held together by electric attraction.

Rutherford Experiment (~1910)

Ernest Rutherford concibió el experimento de dispersión de partículas alfa como un intento de contrastación del modelo de Thomson. Consistía en lanzar partículas alfa (de una masa casi ocho mil veces mayor que la del electrón, y una carga dos veces mayor, pero positiva) contra una delgadísima lámina de oro de 0,00005 cm de espesor (lo que suponía que la lámina tendría unos 2000 átomos de oro) y en registrar la desviación que sufrían las partículas después de atravesar la lámina metálica.

Las partículas alfa se registraban en una pantalla de sulfuro de cinc, que tiene la propiedad de que emite un destello luminoso cuando es golpeado por una partícula cargada.

Con un microscopio que se podía trasladar por la pantalla esférica que rodeaba la lámina metálica que hacia de blanco, se podían contar el número de destellos que se producen en una determinada zona.

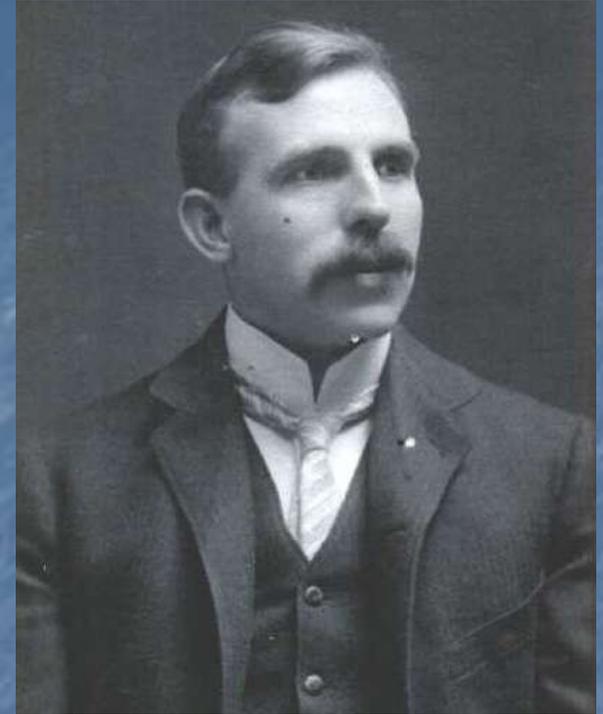


Rutherford experiment (cont.)

The discovery was made by Hans Geiger and Ernest Marsden in 1909 when they performed the gold foil experiment under the direction of Rutherford, in which they fired a beam of alpha particles at layers of gold leaf only a few atoms thick. At the time of the experiment, the atom was thought to be analogous to a plum pudding (as proposed by J.J. Thomson), with the negative charges (the plums) found throughout a positive sphere (the pudding). If the plum-pudding model

were correct, the positive “pudding”, being more spread out than in the current model of a concentrated nucleus, would not be able to exert such large coulombic forces, and the alpha particles should only be deflected by small angles as they pass through.

However, the results showed that around 1 in 8000 alpha particles were deflected by very large angles (over 90°), while the rest passed straight through with no deflection. From this, Rutherford concluded that the majority of the mass was concentrated in a minute, positively charged region (the nucleus) surrounded by electrons.



Missing Higgs

A major breakthrough in particle physics came in the 1970s when physicists realized that there are very **close ties between** two of the four fundamental forces – namely, **the weak force and the electromagnetic force**.

The two forces can be described within the same theory, which forms the basis of the Standard Model. **This 'unification' implies that electricity, magnetism, light and some types of radioactivity are all manifestations of a single underlying force called, the electroweak force.** But in order for this unification to work mathematically, *it requires that the force-carrying particles have no mass.*

We know from experiments that this is not true, so physicists Peter Higgs, Robert Brout and François Englert came up with a solution to solve this conundrum.

Missing Higgs

Peter Higgs, Robert Brout and François Englert suggested that **all particles had no mass just after the Big Bang.**

As the Universe cooled and the temperature fell below a critical value, **an invisible force field called the 'Higgs field' was formed together with the associated 'Higgs boson'.**

The field prevails throughout the cosmos: **any particles that interact with it are given a mass via the Higgs boson.** The more they interact, the heavier they become, whereas particles that never interact are left with no mass at all.

This idea provided a satisfactory solution and fitted well with established theories and phenomena. The problem is that no one has ever observed the Higgs boson in an experiment to confirm the theory... TILL NOW!

Nueva partícula subatómica consistente con el boson de Higgs: 4 de julio de 2012

Scientists at the Large Hadron Collider (LHC) **have discovered a new sub-atomic particle** consistent with the long-sought **Higgs boson:**

Cuanto que surge por la excitación del campo de Higgs que permea todo el Universo para darle masa a las partículas. Las masas se generan por una resistencia que ofrece el campo de Higgs al movimiento de las partículas.

The particle's confirmation would stand out as one of the great scientific achievements of the 21st Century so far.

Nueva partícula subatómica consistente con el boson de Higgs: 4 de julio de 2012

The Standard Model does not predict an exact mass for the Higgs itself.

Particle accelerators such as the LHC are used to systematically search for the particle over a range of masses where it could plausibly be.

The LHC works by smashing together two beams of protons at close to light-speed. This generates a vast shower of particles that are only created at high energies. The Higgs will probably never be observed directly, but scientists at the LHC have been looking for a Higgs that fleetingly exists in this soup of particles. If it behaves as researchers think it will, it should decay further into yet more particles, leaving a trail that proves its existence.

Nueva partícula subatómica consistente con el boson de Higgs: 4 de julio de 2012

LHC is not the first machine to hunt for the particle. The LEP machine, which ran at Cern from 1989-2000, ruled out the Higgs up to a certain mass, and until it was switched off in 2011, the US Tevatron accelerator searched for the particle above this range.

On Monday 2nd July 2012, the Tevatron team released their final analysis, which tantalisingly points to a particle much like the one that the LHC data suggests.

Nueva partícula subatómica consistente con el boson de Higgs: 4 de julio de 2012

El 14 de marzo de 2013 el CERN, con dos veces más datos de los que disponía en el anuncio del descubrimiento en julio de 2012, encontraron que la nueva partícula se ve cada vez más como el bosón de Higgs.

La manera en que interactúa con otras partículas y sus propiedades cuánticas, junto con las interacciones medidas con otras partículas, indican fuertemente que es un bosón de Higgs.

Todavía permanece la cuestión de si es el bosón de Higgs del Modelo estándar o quizás el más liviano de varios bosones predichos en algunas teorías que van más allá del Modelo estándar.