

# **QUARKS Y LEPTONES**

---

- 1. El Modelo Estándar de la física de partículas**
- 2. Clasificación de las partículas: fermiones y bosones**
- 3. Partículas y antipartículas**
- 4. Sabores leptónicos**
- 5. Sabores de quarks**
- 6. Interacciones y campos**
  - i. Interacción electromagnética**
  - ii. Interacción fuerte entre quarks**
  - iii. Interacción débil**

## El Modelo Estándar de la física de partículas

- Toda la materia está formada a partir de combinaciones de tan solo 12 *fermiones* (espín  $\frac{1}{2}$ ) (6 *quarks* y 6 *leptones*)

Partícula	Sabor			$Q/ e $
Leptones	$e$	$\mu$	$\tau$	-1
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	0
Quarks	$u$	$c$	$t$	$+\frac{2}{3}$
	$d$	$s$	$b$	$-\frac{1}{3}$

- Los *quarks* **no** existen como partículas libres (propiedad del **confinamiento**). Se agrupan en ternas para formar los *bariones* (p,n, $\Lambda$ , $\Sigma$ , $\Xi$ , $\Omega$ ...) o en parejas para formar los *mesones* ( $\pi$ ,K, $\eta^0$ , $\rho$ , $\omega$ ...). Mesones y bariones se denominan *hadrones*.
- Leptones y quarks interactúan entre sí a través del intercambio de *bosones* (espín entero)

Interacción	Intensidad	Mediador
Fuerte	1	Gluón ( <b>G</b> )
Electromagnética	$10^{-2}$	Fotón ( $\gamma$ )
Débil	$10^{-7}$	$W^+, W^-, Z^0$
Gravitatoria	$10^{-39}$	Gravitón, <b>g</b>

- Limitaciones del Modelo Estándar
  - ✓ La interacción gravitatoria no está incluida
  - ✓ Los neutrinos se suponen con masa nula
  - ✓ 17 parámetros arbitrarios (masas, ángulos de mezcla, acoplamientos...)

## Clasificación de las partículas: fermiones y bosones

- **Fermiones:** partículas de espín semientero; obedecen la estadística de *Fermi-Dirac*
- **Bosones:** partículas de espín entero; obedecen la estadística de *Bose –Einstein*
- **Teorema del espín-estadística:** La función de onda de un sistema de dos partículas idénticas es antisimétrica bajo su intercambio, si son fermiones, y simétrica si son bosones.
- Ejemplo: desintegración del mesón neutro  $\rho^0$ :  $\rho^0 \not\rightarrow \pi^0\pi^0$ 
  - ✓ La partícula  $\rho^0$  tiene espín  $J=1$  ←
  - ✓ Los dos piones son dos bosones idénticos  $\Rightarrow \Psi$  simétrica
  - ✓ la función de espín es simétrica ( $s(\pi^0) = 0$ )  $\Rightarrow$
  - ✓ la función espacial debe ser simétrica  $\Rightarrow J=\text{par}$  ←
  - ✓ sí que es posible  $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$  (no son bosones idénticos)
- **Supersimetría:** Una extensión del Modelo Estándar predice la simetría fermión-bosón (un bosón por cada fermión y viceversa) en la escala de energías de  $\approx 1\text{TeV}$

## Partículas y antipartículas

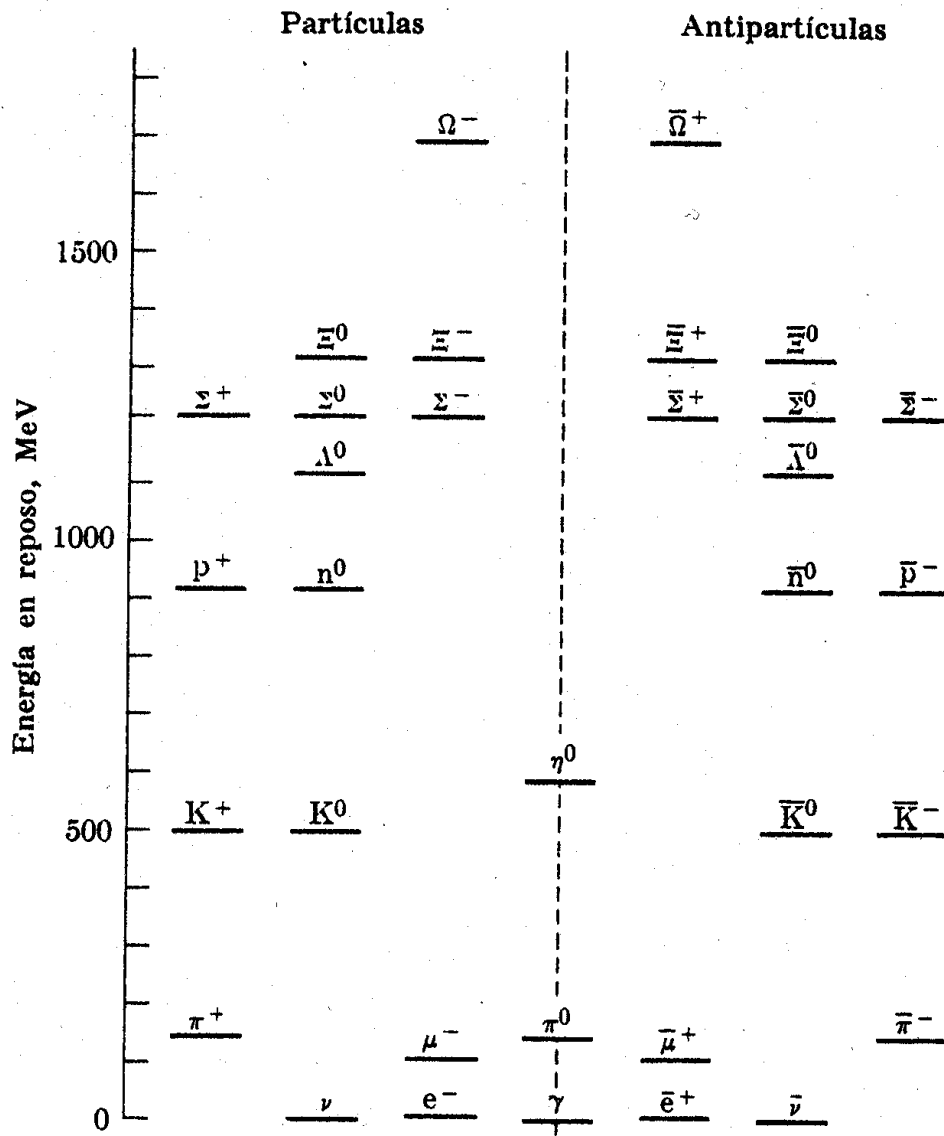
---

- Dirac predijo en 1931 la existencia de las **antipartículas**, como objetos de igual masa y vida media que sus correspondientes partículas, pero con carga eléctrica y momento magnético opuesto
- En 1932 Anderson descubría el **positrón** con una *cámara de niebla* expuesta a los rayos cósmicos. El **antiprotón** fue descubierto en 1956 en experimentos con aceleradores.
- La existencia de antipartículas es una propiedad tanto de *fermiones* como de *bosones*.
- Fermiones y antifermiones pueden crearse o destruirse a pares únicamente (*ley de conservación del número fermiónico*)

$$\gamma \rightarrow e^+ e^- \quad e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma(\gamma)$$

- No existe ley de conservación para los bosones
- El operador cuántico que conecta un estado de partícula con su antipartícula es la **conjugación de carga C**

# Partículas y antipartículas



## Sabores leptónicos

---

- Dobletes de leptones y números leptónicos asociados

$$\begin{array}{ccc}
 L_e = +1 & L_\mu = +1 & L_\tau = +1 \\
 \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \\
 \\
 L_e = -1 & L_\mu = -1 & L_\tau = -1 \\
 \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}
 \end{array}$$

Sabor	Masa leptones cargados	Masa leptones neutros ( $\nu$ )
$e$	$0,511 \text{ MeV}$	$\leq 10 \text{ eV}$
$\mu$	$105,66 \text{ MeV}$	$\leq 0,16 \text{ MeV}$
$\tau$	$1777 \text{ MeV}$	$\leq 18 \text{ MeV}$

- El  $\mu$  (rayos cósmicos 1937) y el  $\tau$  (experimentos con aceleradores 1974) son versiones inestables del electrón
- Los neutrinos son levógiros y los antineutrinos dextrógiros
- Cada sabor leptónico debe conservarse separadamente en cualquier reacción (*conservación del número leptónico*)
- Los leptones cargados interactúan tanto a través de la interacción electromagnética como de la interacción débil. Los neutrinos solo lo hacen débilmente.

## Sabores de quarks

---

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

Sabor	Número cuántico	“Masa “(GeV)
up o down	-	$\approx 0,31$
strange	$S = -1$	$\approx 0,50$
charm	$C = +1$	$\approx 1,6$
bottom	$B = -1$	$\approx 4,6$
top	$T = +1$	$\approx 180$

- Los bariones son estados ligados de tres quarks:  $Q_1 Q_2 Q_3$
- Los mesones son estados ligados quark-antiquark:  $Q_1 \bar{Q}_2$
- La conservación del número fermiónico implica la **conservación del número bariónico** (bariones y antibariones se crean o se destruyen por parejas)
- Los quarks interactúan fuertemente, además de ser sensibles a la interacción electromagnética y a la débil.
- A los quarks  $s$  se les asigna un número cuántico interno (*extrañeza*)  $S = -1$  y forman parte de las *partículas extrañas* descubiertas en los 50 (kaones, lambdas, sigmas, cascadas ...)
- El quark  $c$  se observó en 1974 formando el mesón  $\psi = c\bar{c}$
- El quark  $b$  se observó en 1977 formando el mesón  $\Upsilon = b\bar{b}$
- El quark  $t$  se observó en 1995

## Sabores de quarks

---

<i>Mesón</i>	<i>Composic</i>	<i>S</i>	<i>Barion</i>	<i>Composic</i>	<i>S</i>
$\pi^+$ (140)	$u\bar{d}$	0	$p$ (931)	$uud$	0
$K^0$ (498)	$d\bar{s}$	+1	$\Lambda$ (1116)	$uds$	-1
$K^-$ (494)	$\bar{u}s$	-1	$\Xi^0$ (1351)	$uss$	-2
$\rho^-$ (770)	$\bar{u}d$	0	$\Sigma^+$ (1189)	$uus$	-1
$\omega$ (782)	$u\bar{u}$	0	$\Omega^-$ (1672)	$sss$	-3

- En las interacciones fuertes entre quarks se conserva el sabor. También en las interacciones electromagnéticas

$$K^- + p \rightarrow \Lambda + \pi^0 \quad (s\bar{u} + uud \rightarrow sud + u\bar{u})$$

- En los procesos débiles puede cambiar el sabor de los quarks ( $\Delta S = \pm 1, \Delta C = \pm 1$ , etc.)

$$\Lambda \rightarrow p\pi^- \quad (sud \rightarrow uud + d\bar{u})$$



## Interacciones y campos

- Tres fuerzas básicas en la escala de las partículas: débil, electromagnética y fuerte.
- Cualquier tipo de interacción se hace a través del intercambio de partículas intermediarias o *cuantos del campo* propios de cada interacción, en una escala de tiempo compatible con el principio de incertidumbre:

$$\Delta E \cdot \Delta t \simeq \hbar$$

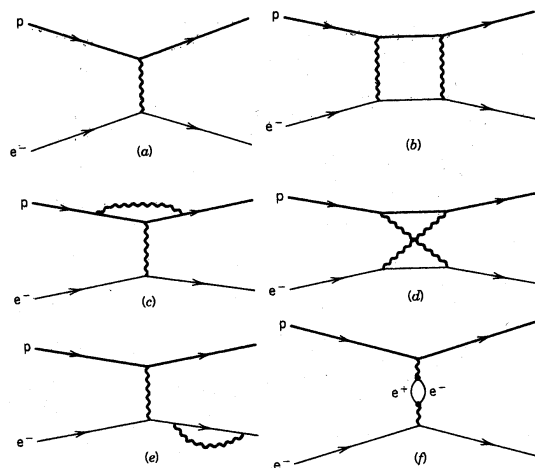
- Los bosones intermediarios no son directamente observables (*partículas virtuales*). Solo su efecto lo es.
- La amplitud de la difusión (elemento de matriz) para un proceso con intercambio de un bosón es el producto de los *vértices* o *acoplamientos* del bosón con las partículas interactuantes y del término *propagador*:

$$f(q^2) = \frac{g_0 g}{q^2 + m^2}$$

↓  
cargas

↘ masa del bosón intermediario  
↘ cuadrimomento transferido

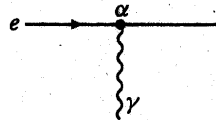
- *Diagramas de Feynman*: representación gráfica del proceso de emisión y absorción de partículas virtuales .



## Interacciones y campos (interacc. Electromagnética)

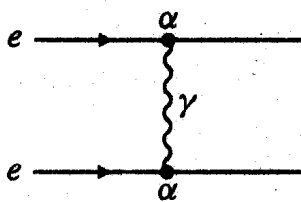
- La *constante de acoplamiento* electromagnética, caracteriza la intensidad de la interacción entre partículas cargadas y **fotones**, que son los mediadores de la interacción:

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = \frac{1}{137,0360}$$



- ✓ En presencia de un átomo
- ✓ Acoplamiento  $\gamma - e^-$ :  $\sqrt{\alpha}$
- ✓  $\sigma_{ph} \propto (\sqrt{\alpha})^2 = \alpha$

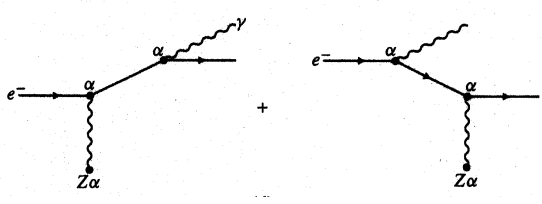
*Efecto fotoeléctrico*

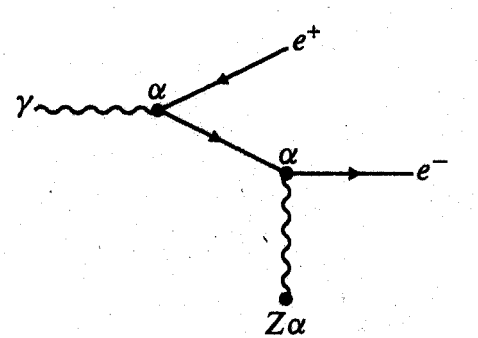


- ✓ intercambio de un fotón virtual de momento  $q$
- ✓ Dos vértices  $\gamma - e^-$ :  $\frac{\sqrt{\alpha}}{q} \frac{\sqrt{\alpha}}{q}$
- ✓  $\sigma_{Ruth} \propto \left(\frac{\alpha}{q^2}\right)^2 = \frac{\alpha^2}{q^4}$

*Difusión electrón-electrón*

## Interacciones y campos (interacc. Electromagnética)

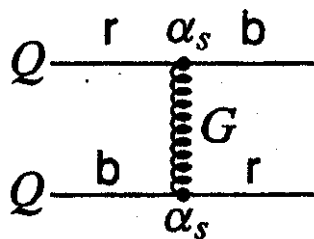
 <p style="text-align: center;"><i>Bremsstrahlung</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ emisión de un fotón en el campo de un núcleo <math>Z\alpha</math></li> <li>✓ Intercambio de un <math>\gamma</math> con el núcleo para conservar el momento</li> <li>✓ <math>\sigma_{Brems} \propto (\sqrt{\alpha}\sqrt{\alpha}Z\sqrt{\alpha})^2</math></li> </ul>
--	--

 <p style="text-align: center;"><i>Producción de pares</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ producción de pares en presencia de un núcleo</li> <li>✓ <math>\sigma_{Pares} \propto (\sqrt{\alpha}\sqrt{\alpha}Z\sqrt{\alpha})^2 = Z^2\alpha^3</math></li> </ul>
---	---

- Estos cálculos son en primer orden en teoría de perturbaciones (*leading order*), e implican la emisión o absorción de un fotón.
- Cálculos de órdenes superiores resultan divergentes. La *renormalización* (redefinición de los parámetros de la teoría) cancela las divergencias. La QED es una teoría renormalizable.

## Interacciones y campos (interacción fuerte)

- La interacción fuerte tiene lugar entre los quarks que forman los hadrones , a través del intercambio de partículas vectoriales ( $J^P = 1^-$ ) neutras y sin masa, los **gluones**.
- La cromodinámica cuántica (QCD) explica la interacción entre quarks con **6 cargas de color**:  $r$  (red),  $b$  (blue),  $g$  (green) para los quarks y  $\bar{r}, \bar{b}, \bar{g}$  para los antiquarks
- La fuerza entre quarks es independiente de los colores involucrados (*simetría de color exacta*)
- Los gluones tienen carga de color : existen 8 estados de color diferentes para los gluones.



Quark rojo interaccionando con quark azul intercambiando un gluón rojo-antiazul.

Los gluones transportan carga de color, por lo que pueden interaccionar entre ellos

- Las fuerzas entre nucleones son *fuerzas efectivas* resultado de la interacción más fundamental entre los quarks constituyentes

## Interacciones y campos (interacción fuerte)

- Algunos bariones inestables y sus desintegraciones principales

Barion	Quarks	Q (MeV)	Modo de desintegración	Vida media
$\Sigma^0(1192)$	uds	74	$\Lambda\gamma$	$10^{-19} s$
$\Sigma^+(1189)$	uus	189	$p\pi^0$	$10^{-10} s$
$\Sigma^0(1385)$	uds	208	$\Lambda\pi^0$	$10^{-23} s$

➡  $\Sigma^0(1192) \rightarrow \Lambda\gamma$  aunque sin cambio de sabor, no es fuerte porque no se conserva el *isospín*. Es un proceso electromagnético.

➡  $\Sigma^0(1385) \rightarrow \Lambda\pi^0$  es un proceso fuerte (conserva isospín)

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \propto \frac{\alpha_s^2}{\alpha^2} \approx \frac{10^{-19}}{10^{-23}} \Rightarrow \frac{\alpha_s}{\alpha} \sim 100$$

El acoplamiento fuerte es 2 órdenes de magnitud mayor que el acoplamiento electromagnético

- Potencial entre dos quarks

$$V_s = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + kr$$

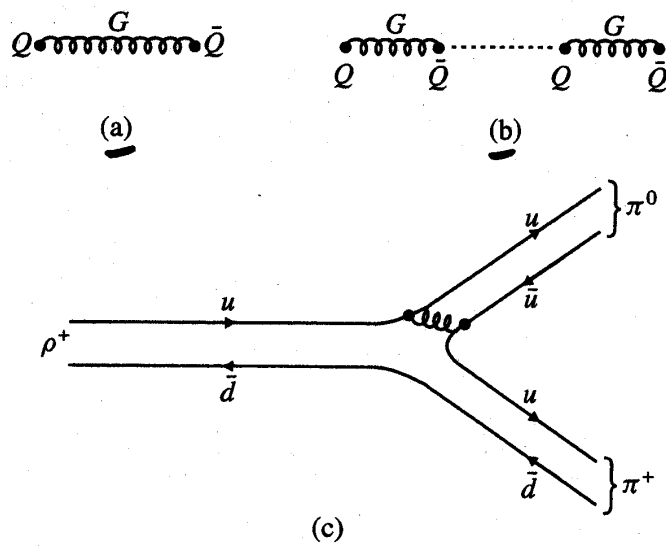
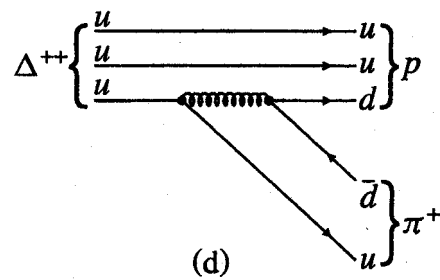
↗ Confinamiento a r grande

domina a distancias cortas  
(origen en el intercambio de un gluón) ← ↖

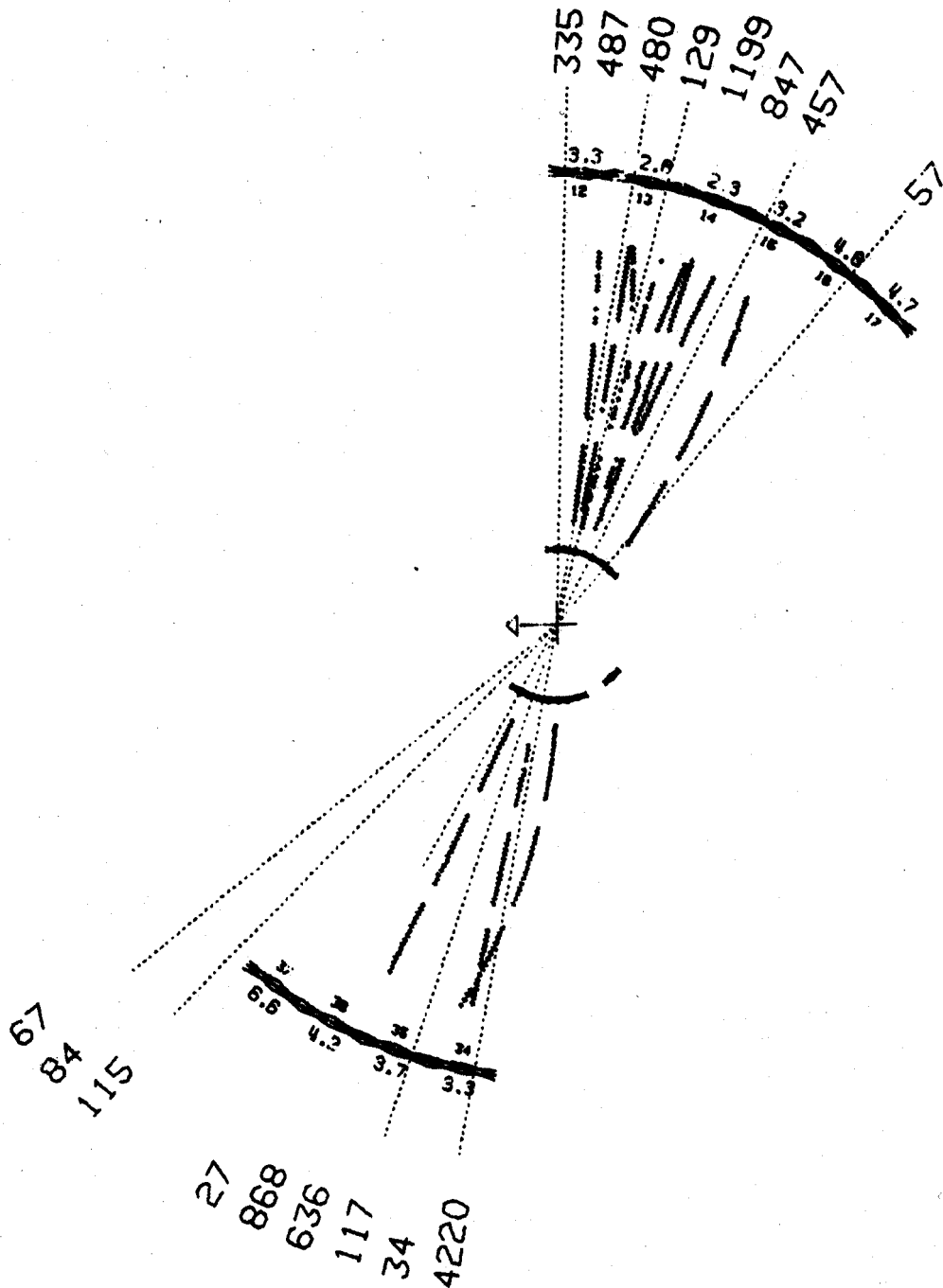
- No existen estados de quarks libres. La separación entre quarks produce la formación de pares  $Q\bar{Q}$  (mesones)

## Interacciones y campos (interacción fuerte)

- Algunos procesos fuertes



## Interacciones y campos (interacción fuerte)



Producción de hadrones en una colisión electrón-positrón a 30 GeV en centro de masas interpretado a partir del proceso elemental  $e^+e^- \rightarrow Q\bar{Q}$ .

## Interacciones y campos (interacción débil)

- Tanto quarks como leptones son sensibles a la interacción débil
- Intensidad de la interacción

└─► Proceso electromagnético con cambio de isospín

$$\frac{\tau_1(\Sigma^0 \rightarrow \Lambda \gamma)}{\tau_2(\Sigma^+ \rightarrow p \pi^0)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \propto \frac{\alpha_w^2}{\alpha^2} \approx \frac{10^{-19}}{10^{-10}} \Rightarrow \frac{\alpha_w}{\alpha} \sim 10^{-5}$$

└─► Proceso débil con cambio de extrañeza

El acoplamiento débil es 5 órdenes de magnitud menor que el electromagnético

- Los procesos débiles están muy desfavorecidos frente a los procesos fuertes o electromagnéticos, salvo si éstos últimos están prohibidos por alguna ley de conservación

➡ Incluyen **neutrinos** (sin carga eléctrica, ni carga fuerte)

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

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

➡ O quarks con cambio de sabor (prohibidos en las fuertes o em.)

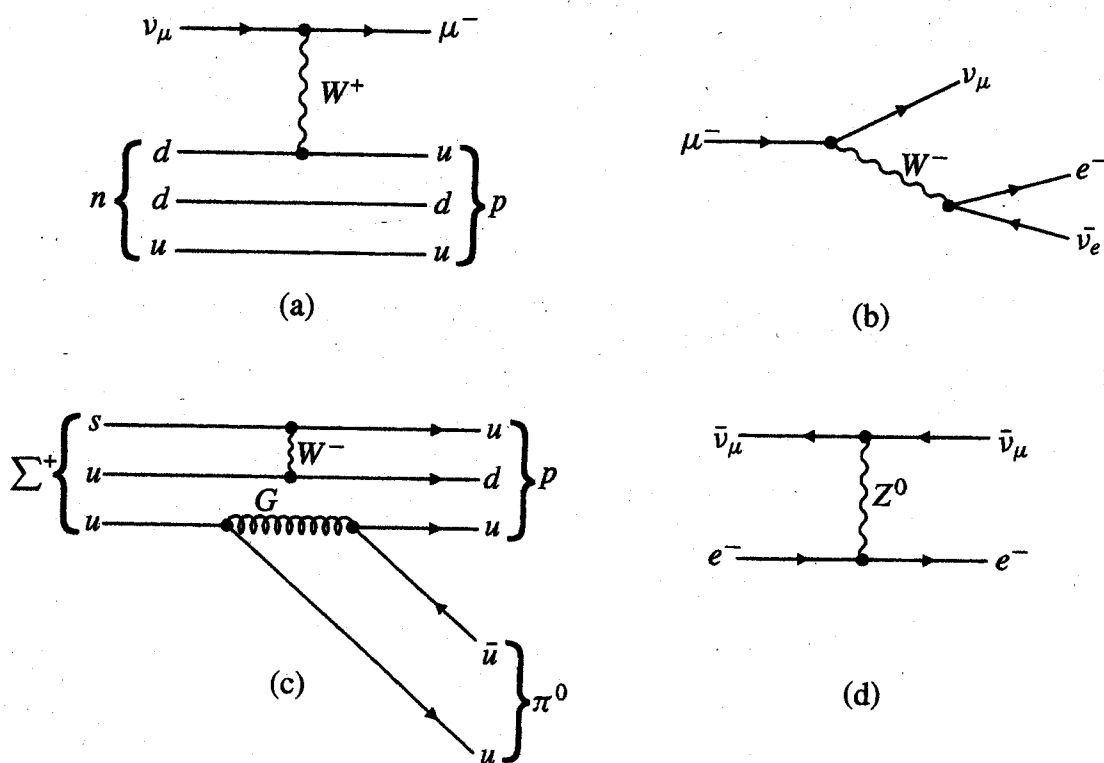
$$\Sigma^+ \rightarrow p + \pi^0$$

$$\Sigma^- \rightarrow n + \pi^-$$



## Interacciones y campos (interacción débil)

- Los procesos débiles están mediados por dos bosones vectoriales cargados de 80 GeV de masa,  $W^+$ ,  $W^-$  y uno neutro de 91 GeV de masa, el  $Z^0$ .



- El intercambio a través de los  $W^\pm$  implican un cambio en la carga del leptón o quark implicados: reacción por *corriente cargada*.
- El intercambio del  $Z^0$  implica que no hay cambio de carga: reacción a través de *corrientes neutras*

## Interacciones y campos (interacción débil)

- La **teoría electrodébil** (Glashow, Weinberg y Salam, 1961-1968) postula que a muy alta energía las fuerzas electromagnética y débil son completamente equivalentes.
- La teoría relaciona la constante de Fermi adimensional  $G$  con la constante de estructura fina  $\alpha$  a través del ángulo de Weinberg  $\theta_w$ :

$$G \sin^2 \theta_w = 4\pi\alpha$$

- Experimentalmente  $\sin^2 \theta_w = 0,2312 \pm 0,0002$
- A partir de la constante de Fermi  $G_F$  (medida de los procesos beta superpermitidos), la constante de estructura fina y del ángulo de Weinberg, se determina la constante adimensional  $G$ , que permite predecir la masa de los bosones intermedarios

$$m(W^\pm) \approx 80 \text{ GeV} \quad m(Z^0) \approx 90 \text{ GeV}$$

- En 1983 se descubrieron finalmente en el CERN

$$m(W^\pm) = 80,41 \pm 0,10 \text{ GeV} \quad m(Z^0) = 91,187 \pm 0,007 \text{ GeV}$$