

1 Clasificación de las partículas "elementales".

Terminología

Inicialmente se pretendió catalogar a las partículas elementales en función de su masa y se asignaron los nombres de **leptones**, **mesones** y **bariones** para caracterizar partículas ligeras, de masa intermedia y pesadas, respectivamente. Posteriormente quedó claro que era más apropiado clasificar a las partículas en función del tipo de interacción que sufren lo que motivó que se asignara un nuevo significado, que prevalece hasta nuestros días, a los términos introducidos anteriormente:

- **Leptones:** Todas aquellas partículas que no se ven afectadas por la interacción fuerte (tales como el electrón y el muón).
- **Hadrones:** Todas aquellas partículas que sienten la interacción fuerte. Los hadrones se subdividen en dos categorías:
 - Mesones:** Son hadrones de spin entero (son por tanto bosones).
Ejemplo: los piones.
 - Bariones:** Son hadrones de spin semientero (son por tanto fermiones).
Ejemplo: los nucleones (protón y neutrón).

Veremos más adelante que a los leptones se les puede asignar un número cuántico intrínseco aditivo llamado **número leptónico**. De forma similar, a los bariones se les puede asignar un número cuántico intrínseco aditivo llamado **número bariónico**. Los mesones tienen número bariónico nulo. Se comprueba fenomenológicamente que el número leptónico y el número bariónico se conservan en cualquier reacción.

2 Interacción electromagnética

Es la más conocida de las interacciones fundamentales, tanto desde un punto de vista clásico como cuántico. El descubrimiento del fotón puso de manifiesto que la interacción electromagnética entre partículas, que desde una perspectiva clásica ejerce su acción a distancia a través de un campo clásico que se propaga en el espacio-tiempo, desde una perspectiva cuántica tiene su origen en el intercambio de fotones (bosones mediadores de la interacción).

3 Interacción nuclear fuerte

Antes de que se descubriese el neutrón se pensaba que los núcleos atómicos podían estar constituidos por protones y electrones ligados por la interacción electromagnética. Sin embargo, a partir del descubrimiento del neutrón (James Chadwick, 1932) quedó claro que los núcleos estaban constituidos por neutrones y protones por lo que debía existir una nueva interacción que mantuviese ligados a los nucleones dentro del núcleo.

3.1 Características de la interacción fuerte

- **Atractiva** en promedio y mucho más **intensa** que la interacción electromagnética (pues debe vencer la repulsión electrostática entre protones). Energías típicas 1 MeV.
- **Corto alcance** del orden del diámetro nuclear: $1F = 10^{-15} m$ (pues no es efectiva más allá del volumen nuclear).
- **Independencia de carga:** No distingue entre neutrones y protones. Este resultado se infiere de los experimentos de scattering entre nucleones de baja energía.

3.2 Modelo de Yukawa

Por analogía con la interacción electromagnética mediada por el fotón, Yukawa propone en 1935 la existencia de una partícula mediadora de la interacción fuerte (**mesón de Yukawa**). Dado que el alcance d de la interacción fuerte es del orden de $1F = 10^{-15} m$ la masa del mesón de Yukawa debía ser del orden de 100 MeV:

$$mc^2 \sim \hbar c/d \sim 100 \text{ MeV}$$

Los piones π^+, π^- observados en 1947, que tenían una masa $m \simeq 140 \text{ MeV}$, sentían la interacción fuerte y tenían espín cero, fueron identificados con los cuantos mediadores de la interacción fuerte. En 1949 Yukawa recibió el Premio Nobel de Física por su predicción teórica de la existencia de mesones. En 1950 se descubrió el pión π^0 , cuya masa es de 135 MeV . Aunque hoy en día sabemos que la hipótesis de Yukawa no es correcta, muchos procesos a energías no demasiado altas (menores que 1 GeV) pueden explicarse identificando los mesones de Yukawa con los piones (π^+, π^-, π^0).

3.3 Números cuánticos de isospin y paridad

Veremos más adelante que la interacción fuerte es invariante bajo transformaciones de **paridad** ($\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$) así como bajo un grupo de simetría interna que recibe el nombre de **isospín** (dado que sus propiedades matemáticas son similares a las del espín). Por este motivo las partículas con interacción fuerte tienen números cuánticos bien definidos de paridad P , isospín I y tercera componente de isospín I_3 .

3.4 Partículas extrañas

- **1947:** los físicos ingleses G. D. Rochester y C. C. Butler descubren nuevas partículas en fotografías de cámara de niebla producidas por rayos cósmicos.
- Masa $\sim 1000 m_e$
- Durante los 6 años siguientes fueron observadas en experimentos con rayos cósmicos y fueron clasificadas en dos tipos:

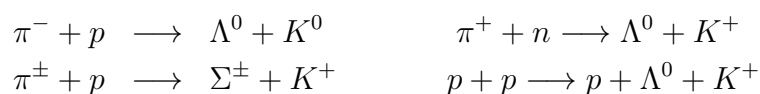
Hyperones \rightarrow Son bariones (hadrones de spin semientero).

Kaones \rightarrow Son mesones (hadrones de spin entero).

- Recibieron el nombre de partículas extrañas debido a su comportamiento anómalo:

Se observó que se producían como consecuencia de la interacción nuclear fuerte, por ejemplo como consecuencia de la colisión entre 2 protones o de un protón y un pión, con lo cual uno esperaría un tiempo de decaimiento del orden de 10^{-23} s (típico de la interacción fuerte). Sin embargo, a partir de la longitud de la trazas en las fotografías se pudo estimar un tiempo de vida $\tau \sim 10^{-10}$ s (típico de la interacción débil). Este extraño comportamiento parecía contradecir la reversibilidad microscópica de las reacciones y requería explicación.

- **1952:** A. Pais (físico americano) sugiere que la interacción fuerte sólo puede producir partículas extrañas por parejas (**producción asociada**).
- **1953:** En el acelerador de Brookhaven se crean por primera vez partículas extrañas y se confirma la hipótesis de Pais. Las partículas extrañas siempre aparecen a pares en reacciones tales como:



- **1953:** Gell-Mann y Nishijima explican el mecanismo de producción asociada proponiendo la introducción de una nueva ley de conservación aplicable sólo a la interacción fuerte: la **extrañeza**. Además de los números cuánticos de spin, paridad e isospin, cada partícula tendría asignado un número cuántico S de extrañeza. En cualquier proceso mediado por la interacción fuerte, la extrañeza total de las partículas antes y después de la reacción debería ser el mismo.

La producción asociada puede explicarse ahora asignando una extrañeza positiva a una de las partículas extrañas producidas y negativa a la otra, de modo que la extrañeza total del estado final sea cero, la misma que la del estado inicial:

$$\begin{aligned} \pi^- + p &\longrightarrow \Lambda^0 + K^0 \\ S : \quad 0 + 0 &\longrightarrow (-1) + (+1) \end{aligned}$$

El decaimiento de las partículas extrañas en partículas no extrañas no puede ser mediado por la interacción fuerte, que por definición, debe conservar la extrañeza. Este decaimiento se debe a la interacción débil (que no tiene que conservar la extrañeza) lo que confiere a las partículas extrañas una vida media relativamente larga ($\tau \sim 10^{-10}$ s). Por ejemplo:

$$\begin{aligned} \Lambda^0 &\longrightarrow \pi^- + p & (\Delta S = +1) \\ K^+ &\longrightarrow \pi^+ + \pi^0 & (\Delta S = -1) \end{aligned}$$

- Gell-Mann y Nishijima proponen definir el número cuántico de extrañeza S a través de la fórmula:

$$Q = |e| \left(I_3 + \frac{B + S}{2} \right)$$

siendo e la carga del electrón, I_3 la tercera componente de isospin y B el número bariónico. Alternativamente, la extrañeza queda definida a través de la **hipercarga** Y :

$$\begin{aligned} Y &= B + S \\ Y &= Q_{\min} + Q_{\max} \end{aligned}$$

siendo Q_{\min} y Q_{\max} la carga mínima y máxima del correspondiente multiplete de isospin.

- Hoy en día sabemos que lo que caracteriza a las partículas extrañas es que contienen el quark extraño s o su correspondiente antiquark \bar{s} .

- **Conjunto básico de partículas extrañas:**

Kaones ($J^P = 0^-, B = 0$): K^+, K^-, K^0, \bar{K}^0

Los kaones K^+ y K^- son antipartículas una de la otra, mientras que a diferencia de lo que ocurre con los piones, la antipartícula del kaon neutro no coincide con ella misma.

Hyperones ($J^P = 1/2^+, B = 1$): $\Lambda^0, \Sigma^0, \Sigma^+, \Sigma^-, \Xi^-, \Xi^0$

Antipartículas: ($J^P \rightarrow J^{-P}, B \rightarrow -B, S \rightarrow -S$).

- **Asignación del número cuántico de extrañeza:**

	K^+	K^-	K^0	\bar{K}^0	Λ^0	Σ^+	Σ^-	Σ^0	Ξ^-	Ξ^0
S :	+1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2

- Las partículas no extrañas tienen $S = 0$.
- El decaimiento de las partículas Ξ (que reciben el nombre de Cascadas) en partículas no extrañas se produce a través de dos procesos de interacción débil, ya que la interacción débil sólo puede modificar la extrañeza en una unidad cada vez:

$$\begin{aligned} \Xi^0 &\longrightarrow \Lambda^0 + \pi^0 \longrightarrow (\pi^- + p) + \pi^0 \\ \Delta S &= +1 \qquad \Delta S = +1 \end{aligned}$$

- Aparte del conjunto básico de partículas extrañas existen otras muchas partículas extrañas (**resonancias**) de tiempo de vida muy corto ($\tau \sim 10^{-23}$ s) que suelen decaer como consecuencia de la interacción fuerte en partículas extrañas del conjunto básico, antes de decaer finalmente en partículas no extrañas en un proceso mucho más lento mediado por la interacción débil.

- **Resonancias mésonicas (extrañas)** ($J^P = 1^-, B = 0$): $K^{*+}, K^{*-}, K^{*0}, \bar{K}^{*0}$

La extrañeza S de las resonancias K^* coincide con la de los correspondientes kaones K (de hecho, hoy en día sabemos que tienen el mismo contenido en quarks, por lo que los primeros pueden considerarse estados excitados de los segundos):

$$K^{*+} \longrightarrow K^+ + \pi^0 \longrightarrow (\pi^+ + \pi^0) + \pi^0$$

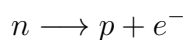
- **Resonancias bariónicas (extrañas)** ($J^P = 3/2^+, B = 1$): $\Sigma^{*0}, \Sigma^{*\pm}, \Xi^{*-}, \Xi^{*0}$

La extrañeza S de las resonancias bariónicas coincide con la de los correspondientes hyperones (tienen el mismo contenido en quarks, por lo que pueden considerarse estados excitados de estos últimos):

$$\Sigma^{*+} \longrightarrow \Sigma^+ + \pi^0 \longrightarrow (p + \pi^0) + \pi^0$$

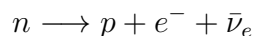
4 Interacción débil

- Tras el descubrimiento del neutrón quedó claro que esta partícula cuando se encuentra aislada (lo que no ocurre en el interior de los núcleos atómicos) no es estable: se desintegra en un tiempo de unos 15 minutos (**desintegración β**).
- Este proceso es el responsable del decaimiento β radiactivo que presentan algunos núcleos atómicos, en el que un neutrón se transforma en un protón emitiendo un electrón.
- El tiempo de vida del neutrón aislado es demasiado grande para ser debido a la interacción fuerte y no hay motivo para pensar que la interacción electromagnética sea la causante de tal desintegración (el neutrón no tiene carga eléctrica y no se observan fotones en el proceso).
- El decaimiento del neutrón debe ser debido a una nueva fuerza de la naturaleza: la interacción débil.
- Inicialmente se supuso que el neutrón se desintegraba según:



Sin embargo, los resultados experimentales indicaban que el e^{-} saliente no respetaba la ley de conservación de energía-momento.

- **1930:** W. Pauli postula la existencia de una nueva partícula, el **neutrino electrónico** ν_e , que sería portadora de la energía y momento angular faltante:



- **Propiedades del neutrino:**

$q = 0 \longrightarrow$ por conservación de la carga.

$s = 1/2 \longrightarrow$ por conservación del momento angular.

$m_\nu \simeq 0 \longrightarrow$ por conservación de la energía-momento (algunos e^{-} emergen con la energía-momento correcta). El Modelo Standard de las Partículas e Interacciones Elementales supone que $m_\nu \equiv 0$, sin embargo a finales de la década de 1960 varios experimentos pusieron de manifiesto que el número de neutrinos electrónicos que alcanzaban la Tierra procedentes del Sol era muy inferior a la estimación teórica del Modelo Solar Standard (entre 1/3 y

1/2 de la cantidad prevista). Este problema (conocido como *solar neutrino problem*) se resuelve admitiendo que los neutrinos poseen masa, lo que hace que puedan oscilar entre los distintos sabores posibles (*neutrino oscillation*): e, μ, τ . Experimentalmente $m_\nu < 2$ eV.

Velocidad = c (por ser $m_\nu = 0$).

Helicidad = $-1/2$ (por ser $s = 1/2$ y $m_\nu = 0$).

Sólo siente la interacción débil y la gravitatoria.

- Debido a la debilidad de la interacción débil (cuya intensidad relativa a la de interacción fuerte es de 10^{-12}) el neutrino permaneció indetectable durante muchos años, hasta que fue posible disponer de grandes flujos de neutrinos procedentes de reacciones nucleares.
- **1953:** C. L. Cowan y F. Reines demuestran experimentalmente la existencia del neutrino electrónico.
- Alcance de la interacción débil: $\lesssim 10^{-18}$ m.
- **Procesos de desintegración mediados por la interacción débil:**

Piones:

$$\begin{array}{ll} \pi^+ \longrightarrow e^+ + \nu_e & \pi^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ \pi^- \longrightarrow e^- + \bar{\nu}_e & \pi^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{array}$$

Muones:

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

Partículas extrañas:

$$\begin{array}{ll} K^+ \longrightarrow \pi^+ + \pi^0 & K^+ \longrightarrow \mu^+ + \nu_\mu \\ K^- \longrightarrow \pi^- + \pi^0 & K^- \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^- & \Lambda^0 \longrightarrow n + \pi^0 \\ \Sigma^+ \longrightarrow p + \pi^0 & \Sigma^+ \longrightarrow n + \pi^+ \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \Sigma^- \longrightarrow n + \pi^- \\ \Xi^- \longrightarrow \Lambda^0 + \pi^- \\ \Xi^0 \longrightarrow \Lambda^0 + \pi^0 \end{array}$$

5 Magnitudes físicas conservadas

TABLE 1.4 Conservation rules

Conserved quantity	Interaction		
	Strong	Electromagnetic	Weak
Energy/momentum	Yes	Yes	Yes
Charge			
Baryon number			
Lepton number			
<i>I</i> (isospin)	Yes	No	No ($\Delta I = 1$ or $\frac{1}{2}$)
<i>S</i> (strangeness)	Yes	Yes	No ($\Delta S = 1, 0$)
<i>C</i> (charm)	Yes	Yes	No ($\Delta C = 1, 0$)
<i>P</i> (parity)	Yes	Yes	No
<i>C</i> (charge-conjugation parity)	Yes	Yes	No
<i>CP</i> (or <i>T</i>)	Yes	Yes	Yes ^a
<i>CPT</i>	Yes	Yes	Yes

^a But 10^{-3} violation in K^0 decay.