

## LES PARTÍCULES ELEMENTALS

### 1. Introducció.

No qualsevol reacció entre partícules elementals que poguem escriure té perquè donar-se en la natura. L'energia, el moment lineal i l'angular, i la càrrega elèctrica, per exemple, s'han de conservar. La importància d'aquestes lleis de conservació ja s'havia establert a escala macroscòpica i la seva validesa s'ha d'estendre al nivell de les partícules elementals també. Per exemple, considerem la hipotètica reacció següent

$$p \rightarrow n$$

aquesta reacció viola la conservació de la càrrega (a banda de la conservació del moment angular i l'energia, com ja veurem), de forma que no es pot donar per cap dels canals permesos; força nuclear forta, nuclear feble o electromagnètica.

Hi ha reaccions que aparentment no violen les lleis de conservació abans esmentades, per exemple

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

o

$$p + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

o

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

Considerem per exemple la darrera. Es veu que la càrrega es conserva, el moment també i l'energia es pot conservar. De tota manera, totes les partícules són hadrons (senten la força nuclear forta) i per tant les reaccions haurien de donar-se amb un temps  $\approx 10^{-23}$  segons. Ara bé, la nostra mateixa existència és testimoni de que aquesta reacció no és dona, com a mínim a aquesta velocitat, els protons no es desintegren espontàniament, de fet es considera que la seva vida mitja és infinita ( $\approx 10^{31}$  anys, comparada amb edat de l'univers  $\approx 4 \cdot 10^9$  anys). Tot això suggereix que hi ha d'haver altres lleis de conservació a aquesta escala que no eren evidents a escala macroscòpica.

## 2. Nombres quàntics.

**Conservació del nombre bariònic.** Una llei de conservació que explica l'estabilitat del protó és la conservació del *nombre bariònic*,  $B$ . Això també explica que el neutró i totes altres partícules elementals més pesades, els barions, es desintegren de manera que el resultat final és el protó. De la mateixa manera que les partícules poden tenir càrrega elèctrica amb valors 0,  $\pm 1$  o  $\pm 2$ , etc., en unitats de la càrrega elemental (la del protó), cada partícula posseeix un valor de la “càrrega bariònica”,  $B = 0$ ,  $B = +1$  o  $B = -1$ . Més encara, el nombre bariònic s'ha de conservar en totes les reaccions. El protó és la partícula més lleugera amb nombre bariònic  $+1$ , cosa que explica la seva estabilitat. Tots els barions tenen  $B = 1$ , les seves antipartícules  $B = -1$ , i tots els mesons, leptons i fotons tenen  $B = 0$ . D'aquesta manera

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

és una reacció prohibida perquè el nombre bariònic no es conserva mentre que, per exemple

$$\Delta^{++} \rightarrow p + \pi^+$$

respecta la conservació del nombre bariònic. Aquesta reacció involucra només hadrons i es dona amb temps típics de  $\approx 10^{23}$  segons. De forma semblant, l'anomenada desintegració  $\beta^-$ , que retrobarem al tema següent de desintegració radioactiva,

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

també és permesa per la conservació del nombre bariònic. De tota manera, com involucra leptons, aquest procés es dona a una velocitat molt més lenta  $\approx 1000$  segons.

**Els mesons.** La descripció relativista de les interaccions implica que cada interacció porta associada l'intercanvi d'una partícula, que ha de ser un bosó (el valor de l'spin ha de ser un nombre sencer). En el cas de la interacció electromagnètica la partícula intercanviada és un fotó (spin zero).

Hideki Yukawa prediu l'any 1935 l'existència d'una partícula que actuaria com a missatger en la interacció forta, el valor de la seva massa essent inversament proporcional al rang de la interacció  $m = \frac{\hbar c}{a}$ . Com

que aquest rang és d' 1 fm, aquestes partícules han de tenir una massa d'uns 200 MeV. Els anomena *mesons*. L'any 1937, tenim el descobriment del muó ( $\mu^-$ ), de massa 107 MeV. No és la partícula de Yukawa perquè no interacciona amb la matèria fortament. Al 1947, tenim el descobriment dels pions ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$ ,  $\pi^-$ ), de massa 140 MeV. Sí corresponen a la partícula de Yukawa. Més endavant, es van trobar partícules de masses intermitges entre els pions i els protons ( $m_p = 938 \text{ MeV}$ ), com els mesons  $K$  ( $m = 500 \text{ MeV}$ ), i d'altres més pesants que el protó, anomenades hiperons, com la  $\Lambda$  ( $m = 1110 \text{ MeV}$ ). Aquestes partícules són inestables i es descomposen en temps de l'ordre de  $10^{-8}$  segons per donar protons, neutrons, electrons i neutrins. Posteriorment, amb el desenvolupament dels acceleradors de partícules, es produeixen moltes més partícules, de vida cada cop més curta.

**Conservació del nombre leptònic.** Els leptons es caracteritzen perquè no senten la interacció forta. L'electró, el muó i el tau tenen càrrega elèctrica negativa. Els neutrins tenen càrrega elèctrica nul·la. Tots tenen spin  $1/2$ , i per tant, són *fermions*. Les partícules que tenen spin enter s'anomenen *bosons*. Per cada partícula existeix la seva antipartícula. Els leptons es consideren partícules elementals. Els neutrins només senten la interacció feble. L'electró és la partícula més lleugera amb càrrega elèctrica. La conservació de la càrrega obliga a que l'electró sigui estable. La descripció detallada de la interacció feble i els seus missatgers queda fora de l'abast d'aquests apunts.

- **Muó:** El muó es desintegra per interacció feble segons

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

El procés  $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ , no s'observa experimentalment. Si aquest procés fos el més important, hauriem de pensar que el muó és un estat excitat de l'electró.

- **Tau:** el tau, al tenir una massa relativament gran, pot desintegrar-se, per interacció feble, en moltes combinacions de partícules, encara que sempre apareix un  $\nu_\tau$ .

Als processos d'interacció feble, quan desapareix un electró, un muó o un tau, apareix el neutrí corresponent. Per una altra banda, també existeixen processos (com la desintegració beta) en els que es crea un electró, muó o tau i l'antineutrí corresponent, això va portar a introduir un nombre quàntic leptònic, que es conserva en la interacció feble.

- Nombre leptònic electrònic ( $L_e$ ): val 1 per a  $e^-$  i  $\nu_e$ , -1 per a  $e^+$  i  $\bar{\nu}_e$ , i zero per la resta de partícules.
- Nombre leptònic muónic ( $L_\mu$ ): val 1 per a  $\mu^-$  i  $\nu_\mu$ , -1 per a  $\mu^+$  i  $\bar{\nu}_\mu$ , i zero per la resta de partícules.
- Nombre leptònic tauónic ( $L_\tau$ ): val 1 per a  $\tau^-$  i  $\nu_\tau$ , -1 per a  $\tau^+$  i  $\bar{\nu}_\tau$ , i zero per la resta de partícules.

La interacció electromagnètica no afecta als neutrins, però pot aniquilar o crear parells leptó-antileptó, de manera que es conserven els nombres leptònics. La interacció forta no actua sobre els leptons.

### Estranyesa.

L'estranyesa s'introdueix per explicar el fet que alguns hadrons ( $K$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma$ , ...), tinguin vides relativament llargues, el que implica que no decauen a altres hadrons més lleugers ( $p$ ,  $\pi$ ) per la interacció forta o la electromagnètica, sinó per la feble. Als experiments en la cambra de boira es va observar una paradoxa, ja que aquestes partícules sentien la interacció forta quan eren produïdes, però no quan es desintegren. La solució de la paradoxa va sorgir de l'observació que les partícules estranyes sempre apareixien per parelles. Es va introduir un nombre quàntic  $S$ , que havia de ser conservat per les interaccions forta i electromagnètica, però podia ser violat per la interacció feble. L'estranyesa  $S$  val zero pels hadrons "normals" ( $p$ ,  $n$ ,  $\pi$ ), i es va assignar el valor  $S = 1$  pels kaons  $K^0$  i  $K^+$ . Degut a la conservació de  $S$  per la interacció forta, en els processos de col·lisió entre hadrons normals que produeixen  $K^0$  o  $K^+$ , l'altre partícula estranya ha de tenir  $S = 1$ . Així, es va assignar  $S = -1$  per a  $\bar{K}^0$ ,  $K^-$ ,  $\Lambda$ ,  $\Sigma^+$ ,  $\Sigma^-$ ,  $\Sigma^0$ . Les partícules anomenades "cascades"  $\Xi^0$ ,  $\Xi^-$  tenen  $S = -2$ . Les antipartícules tenen estranyesa oposada a les partícules, per a que puguin aniquilar-se sense violació de  $S$ .

### L'isospín.

S'introdueix a partir del fet que els hadrons apareixen en grups de partícules, anomenats *multiplets*, amb massa i propietats molt semblants (mateix spin, nombre bariònic, estranyesa), llevat que tenen càrrega elèctrica que varia d'un en un. Per exemple, tenim el neutró i el protó, els pions ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\pi^0$ ), etc. Per descriure aquest fet s'introdueix l'isospín com  $I_3 = -Y/2 + Q/e$ , on  $Y$  és una constant per a cada multiplet, anomenada *hipercàrrega*, que és dues vegades la càrrega mitja del

multiplet. Gell-Mann i Nishijima van trobar experimentalment que la hipercàrrega estava relacionada amb l'estranyesa i el nombre bariònic a través de la relació  $Y = B + S$ . D'aquesta manera pels nucleons,  $Y = 1$ ,  $I_3 = 1/2$  pel protó i  $-1/2$  pel neutró. Pels pions,  $Y = 0$  i  $I_3 = +1$  pel  $\pi^+$ ,  $0$  pel  $\pi^0$  i  $-1$  pel  $\pi^-$ .

### 3. Model de Quarks

La hipòtesi fonamental del model de quarks és que existeix una partícula, anomenada quark, amb tres estats interns o “sabors”, anomenats  $u$ ,  $d$  i  $s$ . A la taula següent donem els valors respectius de  $I_3$  i  $Y$ . De la fórmula  $Q/e = I_3 + Y/2$  es dedueix que els quarks tenen càrrega elèctrica fraccionària.

	$I_3$	$Y$	$Q/e$	$B$	$S$
$u$	$1/2$	$1/3$	$2/3$	$1/3$	$0$
$d$	$-1/2$	$1/3$	$-1/3$	$1/3$	$0$
$s$	$0$	$-2/3$	$-1/3$	$1/3$	$-1$

Es considera que els barions són sistemes de tres quarks, com que tots els barions tenen  $B = 1$  i el nombre bariònic és additiu, tots els quarks han de tenir  $B = 1/3$ . A partir de la relació  $Y = B + S$  es pot obtenir l'estranyesa dels quarks. L'antipartícula del quark, l'antiquark, té tres estats o “sabors”,  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$  que tenen nombres quàntics oposats als dels estats  $u, d, s$ . Al model de quarks, els mesons són sistemes quark-antiquark, per tant el seu nombre bariònic sempre és zero.

A partir dels valors de  $I_3$  i  $Y$  dels barions, es pot saber la seva composició en quarks, per exemple, la  $\Omega^-$  ( $I_3 = 0$ ,  $S = -3$ ) està composta de tres quarks  $s$ . De la mateixa manera,  $\Delta^-$  ( $I_3 = -\frac{3}{2}$ ,  $S = 0$ ) conté els triplet  $ddd$ . Pels mesons es pot fer el mateix,  $K^-$ , ( $I_3 = -\frac{1}{2}$ ,  $S = -1$ ) conté  $s\bar{u}$ . S'ha de tenir en compte que la interacció feble pot canviar el *sabor* dels quarks.

Els quarks interaccionen entre sí mitjançant l'anomenada *càrrega de color*, concepte que queda fora de l'abast d'aquest apunts. La interacció feble pot modificar el sabor dels quarks. Raonaments teòrics van fer predir l'existència de tres quarks més, anomenats pesants, dels quals es va obtenir evidència experimental més tard. Aquests quarks pesants s'anomenen *charm* ( $c$ ), *top* ( $t$ ) i *bottom* ( $b$ ).

## Exercicis

1. Trobeu el contingut en quarks de tots els hadrons que apareguin a les següents reaccions
  - (a)  $p \rightarrow \pi^+ + e^+ + e^-$
  - (b)  $\Lambda^0 \rightarrow p + e^-$
  - (c)  $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$
  - (d)  $n + p \rightarrow \Sigma^+ + \Lambda^0$
  - (e)  $p + \bar{p} \rightarrow \gamma + \gamma$
  - (f)  $p + \bar{p} \rightarrow n + \bar{\Sigma}^0 + K^0$
  - (g)  $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0 + \pi^0$
2. A la llum dels resultats de l'exercici anterior, raoneu quines reaccions venen governades per la interacció forta, feble, electromagnètica o no estan permeses.
3. Una partícula fictícia (que anomenarem  $\xi$ ), és produïda mitjançant la interacció forta en el procés

$$K^+ + p \rightarrow \xi + \Lambda^0$$

Determineu tots els nombres quàntics per aquesta partícula.

4. Per cadascuna de les següents reaccions i desintegracions, raoneu si el procés està permès o no explicant perquè
  - (a)  $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$
  - (b)  $\Omega^- \rightarrow n + n + \pi^-$
  - (c)  $K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^0$
  - (d)  $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma$
  - (e)  $\pi^- + p \rightarrow n + \pi^0$
  - (f)  $K^- + p \rightarrow K^- + \Sigma^+$
  - (g)  $K^- + p \rightarrow \Xi^0 + \pi^- + \pi^-$