

### 4.3 Física de Partículas


#### 4.3.1 Partículas Elementales

\* Hadrones: partículas con volumen

- Hadrones pesados: Bariones (p, n, etc)
- Hadrones livianos: Mesones ( $\pi$ , K ...)

\* Leptones: partículas puntuales ( $e^-$ ,  $\nu$ ...)

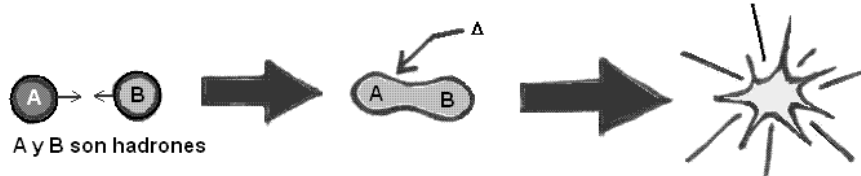
\* Partículas de Fuerza

- Interacción EM: **Fotón**  $\rightarrow \gamma$
- Interacción gravitatoria: gravitón
- Interacción fuerte
  - ✓ Entre hadrones: **Mesones:  $\pi$ , K y  $\eta$**  (fuerza fuerte residual)
  - ✓ Entre quarks: **Gluón**  $\rightarrow$   = **g** (fuerza fuerte fundamental)

\* Interacción Débil: Bosones mediadores  $W^+$ ,  $W^-$  y  $Z^0$ .

\* Partícula creadora de masa cuando  $T \lesssim 10^{15} K$ : **Bosón de Higgs:  $H^0$**

\* Caso especial: partículas de resonancia  $\rightarrow \Delta$



#### ANTIPARTÍCULAS

$\bar{X}$  es la antipartícula de X si

$$X + \bar{X} \longrightarrow 2\gamma$$

**sólo materia**      **sólo energía**

Esto es “aniquilación de materia-antimateria”.

Además

$$X \begin{cases} \text{Masa: } m \\ \text{Carga: } Q \end{cases} \quad \bar{X} \begin{cases} \text{Masa: } m \\ \text{Carga: } -Q \end{cases}$$

NOTA: toda partícula elemental tiene una antipartícula.

Ejemplos de aniquilación de materia y antimateria.

i) Protón y antiprotón.

$$p + \bar{p} \longrightarrow 2\gamma$$

Notación		
$p$	$\leftrightarrow$	$p^+$
$\bar{p}$	$\leftrightarrow$	$p^-$

¿Por qué  $\bar{p}$  es la antipartícula de  $p$  ?

Porque  $\begin{cases} m(p) = m(\bar{p}) \\ Q(p) = -Q(\bar{p}) = +e \end{cases}$

ii) Electrón y positrón (o “antielectrón”)

$$e^- + e^+ \longrightarrow 2\gamma$$

### 4.3.2 Leyes de Conservación

$$A + B \rightarrow X + Y$$

En cualquier reacción debe conservarse lo siguiente:

- a) La carga eléctrica:  $Q_i = Q_f$
- b) Masa y energía:  $(E, m)_i = (E, m)_f \rightarrow$  Recordemos que  $E = mc^2$
- c) El momentum lineal total:  $\vec{P}_i = \vec{P}_f$
- d) El momentum angular total:

$$\vec{J}_i = \vec{J}_f$$

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}$$

- e) El número bariónico:  $B_i = B_f$

$$B \begin{cases} + 1 \text{ para bariones } X \\ - 1 \text{ para antibariones } \bar{X} \\ 0 \text{ para las otras partículas} \end{cases}$$

- f) Otras variables conservadas
  - Conservación del número leptónico:  $L_e, L_\mu, L_\tau$
  - Conservación del isoespín.  $\vec{T}$  sólo se conserva en desintegraciones donde participa la fuerza fuerte.
  - Conservación de la Extrañeza.  $S$  sólo se conserva en desintegraciones fuertes y EM.
  - Conservación de la Hipercarga.  $Y$  sólo se conserva en desintegraciones fuertes y EM.
  - Conservación de la Paridad.  $P$  sólo se conserva en desintegraciones fuertes y EM.

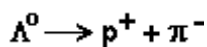
### EJERCICIO 9

Investigue lo siguiente:

- a) Los hadrones experimentan la fuerza fuerte fundamental. Caracterice cinco hadrones.
- b) ¿En qué situaciones se puede experimentar la fuerza débil?

### EJERCICIO 10

Dada la siguiente desintegración imaginaria:



Determine si se conservan las siguientes propiedades físicas:

- a) Carga eléctrica
- b) Número Bariónico
- c) Extrañeza (averigüe primero la extrañeza de las tres partículas)

Solución

$$a) Q_i = 0$$

$$Q_f = e + (-e) = 0$$

Por lo tanto, la carga eléctrica se conserva.

$$b) \Lambda^0 = \text{Barión} \Rightarrow B = +1$$

$$p^+ = \text{Barión} \Rightarrow B(p^+) = +1$$

$$\pi^- = \text{mesón} \Rightarrow B(\pi^-) = 0$$

$$\therefore B_f = 1 + 0 = 1$$

Por lo tanto, el número bariónico se conserva

$$c) S(\Lambda^0) = -1$$

$$S(p^+) = 0$$

$$S(\pi^-) = 0$$

∴ La extrañeza no se conserva

---

#### 4.3.3 Quarks y Cuerdas

##### 4.3.3.1 Quarks

Los leptones son partículas puntuales o verdaderamente “elementales”.

Leptones:

$$(e^- \text{ y } \nu_e)$$

$$(\tau^- \text{ y } \nu_\tau)$$

$$(\mu^- \text{ y } \nu_\mu)$$

Por lo tanto, tenemos seis leptones más los antileptones correspondientes (antipartículas).

Se considera que los leptones son partículas puntuales ( $r \ll 10^{-15}$  m)

Los hadrones son partículas con volumen ( $\sim 10^{-15}$  fm)

Si se pudiera romper un hadrón, se encontrarían quarks (se requiere muchísima energía para romper un hadrón, razón por la cual ésto se considera imposible).

Los quarks son partículas puntuales o verdaderamente elementales ( $r \ll 10^{-15}$  m).

Lista de quarks:

(up y down) → (u y d)

(strange y charm) → (s y c)

(bautiful y true) → (b y t)

Por lo tanto, tenemos seis quarks más los antiquarks correspondientes:  $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}$  y  $\bar{t}$ .

Cada quark tiene una carga fuerte o de color, las que se denominan red, green y blue.

Cada anti-quark puede manifestarse en tres anticolores:

$\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$  (anti-rojo, anti-verde y anti-azul).

REGLAS IMPORTANTES
--------------------

$r + g + b = 0 = \text{blanco} = \bar{r} + \bar{g} + \bar{b}$
$0 = r + \bar{r} = b + \bar{b} = g + \bar{g}$

Los hadrones son partículas albinas, es decir, la suma de los colores de los quarks que los componen tiene que dar cero en cualquier instante.

A los hadrones livianos se les denomina mesones.

A los hadrones pesados se les denomina bariones.

NOTA: el color de los quarks siempre cambia debido a que permanentemente emiten “gluones” (partículas de fuerza que se llevan el color original de los quarks).

Por ejemplo, si se tiene un mesón formado por un quark u y otro anti-d:

- En  $t_1$  la combinación puede ser u de color rojo y anti-d de color anti-rojo
- En  $t_2$  (después de la emisión de un gluón rojo/anti-azul) la combinación puede ser u de color azul y anti-d de color anti-azul. ¿Por qué?

### Constitución de los Hadrones

\* Bariones: estados ligados formados por tres quarks, de modo que la suma de los tres colores dé cero (colores opuestos como verde y antiverde se atraen fuertemente).

- Combinaciones de colores posibles:
  - ✓ Para los bariones: r, g y b
  - ✓ Para los antibariones:  $\bar{r}$ ,  $\bar{g}$  y  $\bar{b}$

\* Mesones: estados ligados formados por un quark y un antiquark.

Evidentemente, la suma de los dos colores debe dar cero. Luego, las combinaciones de colores permitidas son:

$r y \bar{r}$   
 $g y \bar{g}$   
 $b y \bar{b}$

Resumiendo:

El universo está formado por las siguientes partículas elementales (aparentemente) "puntuales":

- **Leptones**
  - ✓ Seis leptones
  - ✓ Seis antileptones
- **Quarks**
  - ✓ Seis quarks: up, down, strange, charm, true y beautiful
  - ✓ Seis antiquarks:  $\bar{u}$ ,  $\bar{d}$ ,  $\bar{s}$ ,  $\bar{c}$ ,  $\bar{t}$  y  $\bar{b}$
  - ✓ Cada quark viene en tres colores: r, g y b
  - ✓ Cada antiquark viene en tres anticolores:  $\bar{r}$ ,  $\bar{g}$  y  $\bar{b}$

\* El mundo "normal" de los Químicos necesita utilizar átomos convencionales, lo que implica:

- Un núcleo con protones y neutrones

$$\begin{matrix} p^+ = u u d \\ n^0 = u d d \end{matrix}$$

- Orbitales con electrones
- Desintegraciones típicas con emisión de neutrinos  $\nu_e$

Luego, el mundo "típico" de las ciencias duras sólo requiere de  $\left\{ \begin{array}{l} 2 \text{ Leptones: } (e^- \text{ y } \nu_e) \\ 2 \text{ quarks: } (u \text{ y } d) \end{array} \right.$

A estas cuatro partículas se les denomina "Partículas de Primera Generación" (o Familia n° 1).

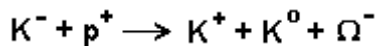
**LISTA DE PARTÍCULAS ELEMENTALES**

Partícula	Energía en reposo*	Carga, [e]
<b>QUARKS</b>		
u	360 MeV	+ 2 / 3
d	361 MeV	- 1 / 3
c	1500 MeV	+ 2 / 3
s	540 MeV	- 1 / 3
t	173 GeV	+ 2 / 3
b	5 GeV	- 1 / 3
<b>LEPTONES</b>		
e <sup>-</sup>	511 KeV	- 1
μ <sup>-</sup>	106 MeV	- 1
τ <sup>-</sup>	1784 MeV	- 1
ν <sub>e</sub>	< 2.5 eV	0
ν <sub>τ</sub>	< 18 MeV	0
ν <sub>μ</sub>	< 170 KeV	0

\* m = [Energía en reposo] / c<sup>2</sup>  
 1 eV = 1.78 × 10<sup>-36</sup> Kg

**EJERCICIO 11**

Dada la siguiente reacción:



Determine si se conservan o no los quarks.

**DATOS**

$$K^- = \bar{u} s$$

$$K^+ = u \bar{s}$$

$$K^0 = d \bar{s}$$

$$p^+ = u u d$$

$$\Omega^- = s s s$$

Solución.

A la izquierda tenemos:

$$(\bar{u} s) + (u d)$$

$$\text{Neto} \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ quark } u \\ 1 \text{ quark } s \\ 1 \text{ quark } d \end{array} \right.$$

A la derecha tenemos:

$$(u \bar{s}) + (d \bar{s}) + (s s s)$$

$$\text{Neto} \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ quark } u \\ 1 \text{ quark } s \\ 1 \text{ quark } d \end{array} \right.$$

∴ Se conservan los quarks.

**Composición Quárcica de los hadrones.**

Partículas	Quarks
<b>Mesones</b>	
$\pi^+$	$u \bar{d}$
$\pi^-$	$\bar{u} d$
$K^+$	$u \bar{s}$
$K^-$	$\bar{u} s$
$K^0$	$d \bar{s}$
<b>Bariones</b>	
$p^+$	$u u d$
$n^0$	$u d d$
$\Lambda^0$	$u d s$
$\Sigma^+$	$u u s$
$\Sigma^-$	$d d s$
$\Sigma^0$	$u d s$
$\Xi^-$	$d s s$
$\Xi^0$	$u s s$
$\Omega^-$	$s s s$

**EJERCICIO 12**

*Investigue qué es lo que diferencia una partícula lambda cero de una sigma cero.*

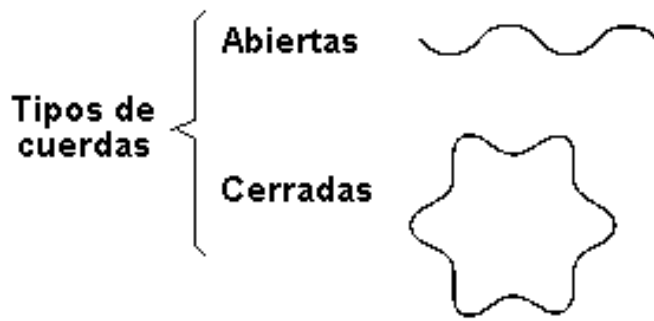
4.3.3.2 Cuerdas

Si pudiésemos “abrir” las partículas supuestamente puntuales (quarks y leptones) encontraríamos “cuerdas” siempre vibrantes.

Partícula	r, [ m ]
Atomo	$\sim 10^{-10}$
Núcleo	$\sim 10^{-15}$
Quark	$\ll 10^{-15}$
Leptón	$\ll 10^{-15}$
Cuerda	$10^{-35}$

Referencia:

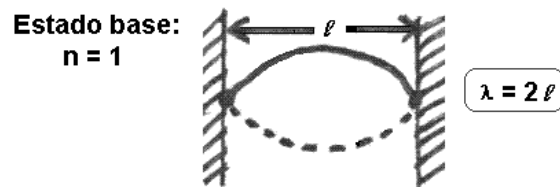
$$\frac{\text{Sistema Solar}}{\text{Ojo de una pulga}} = \frac{\text{Protón}}{\text{Cuerda}}$$



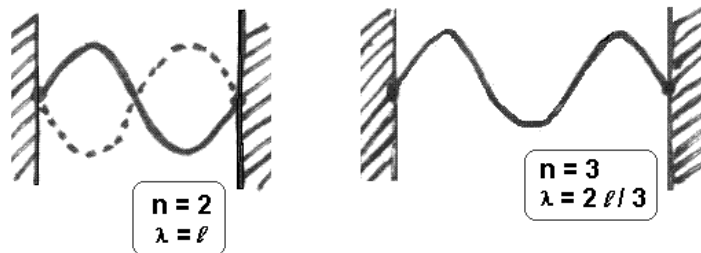
Es decir, una partícula “puntual” (leptones y quarks) es realmente un filamento vibrando de un modo especial (en “resonancia”)

**\* Resonancia en cuerdas**

i) Cuerdas abiertas con extremos fijos.



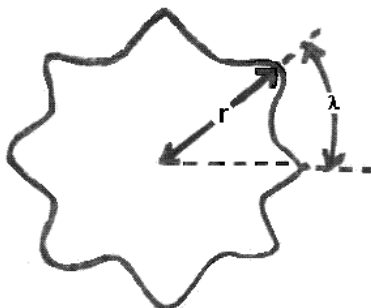
**Primer estado excitado (n = 2)**



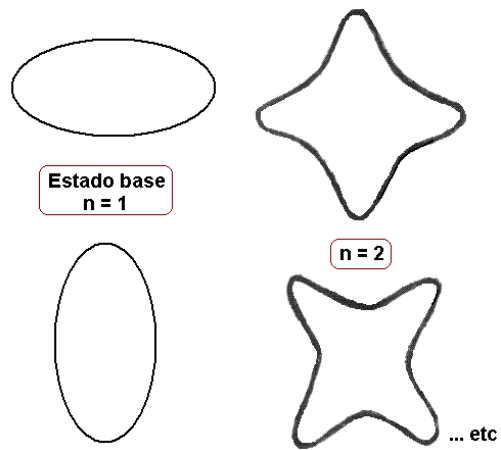
**Condición matemática:**

$$n (\lambda / 2) = l$$

ii) Cuerdas cerradas



**Condición matemática:**  $n \lambda = 2\pi r$



**Webs sugeridas:**

[www.pbs.org/wgbh/nova/elegant](http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant)

[www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/resonance.html](http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/resonance.html)

[www.pbs.org/wgbh/nova/elegant](http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant) → Clic en “Elementary Particles”

[www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/program.html](http://www.pbs.org/wgbh/nova/elegant/program.html) (videos)