

# Tema 9. Quarks y hadrones

---

César Fernández Ramírez  
Departamento de Física Interdisciplinar  
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)



# Contextualización dentro de la asignatura

---

- Bloque I. Estructura nuclear
  - Tema 1: Principales características del núcleo atómico
  - Tema 2: La interacción nuclear. El deuterón y la interacción nucleón-nucleón
  - Tema 3: Modelos nucleares
- Bloque II. Radioactividad y desintegraciones nucleares
  - Tema 4: Desintegración nuclear
  - Tema 5: Desintegraciones  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$
- Bloque III. Reacciones nucleares e interacción radiación-materia
  - Tema 6: Reacciones nucleares
  - Tema 7: Interacción radiación-materia
- **Bloque IV. Física subnuclear**
  - Tema 8: El Modelo Estándar de partículas elementales
  - **Tema 9: Quarks y hadrones**

# Cronograma

---

	L	M	X	J	V	S	D	
<b>Octubre</b>		1	2	3	4	5	6	
	7	8	9	10	11	12	13	
	14	15	16	17	18	19	20	
	21	22	23	24	25	26	27	
	28	29	30	31				
<b>Noviembre</b>					1	2	3	
	4	5	6	7	8	9	10	
	11	12	13	14	15	16	17	
	18	19	20	21	22	23	24	
	25	26	27	28	29	30		
<b>Diciembre</b>							1	
	2	3	4	5	6	7	8	
	9	10	11	12	13	14	15	
	16	17	18	19	20	21	22	
	23	24	25	26	27	28	29	
	30	31						
<b>Enero</b>			1	2	3	4	5	
	6	7	8	9	10	11	12	
	13	14	15	16	17	18	19	
	20	21	22	23	24	25	26	
	27	28	29	30	31			

<b>Bloque I</b>	Tema 1
	Tema 2
	Tema 3
<b>Bloque II</b>	Tema 4
	Tema 5
<b>Bloque III</b>	Tema 6
	Tema 7
<b>Bloque IV</b>	Tema 8
	Tema 9
<b>PEC</b>	
<b>Apertura TE</b>	
<b>Exámenes</b>	
<b>Periodo vacacional</b>	
<b>Cierre TE</b>	

## Material disponible

---

- Material disponible en el repositorio Github de la asignatura
  - <https://github.com/cefera/FNyP>
  - Esta presentación:
    - [./Presentaciones/Tema9.pdf](#)
  - Código en Python asociado:
    - [./Notebooks/Tema9.ipynb](#)

## Esquema

---

- Confinamiento del color.
- El modelo de quarks constituyente.
- Mesones. Estudio del pion.
- Bariones. Estructura del protón.
- Partículas extrañas. Propiedades.
- Hadrones exóticos. Estados moleculares.
- Plasma de quarks y gluones.

## Objetivos específicos

---

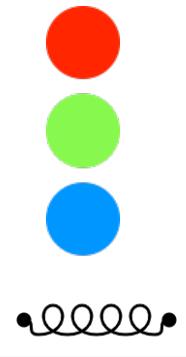
- Tener una primera aproximación al problema del confinamiento del color.
- Comprender la estructura interna de los hadrones.
- Entender el modelo quarks constituyentes de los hadrones.
- Entender a nivel básico los mesones y los bariones, así como la estructura del protón.
- Entender el concepto de extrañeza y cuáles son sus manifestaciones experimentales.
- Entender qué son los hadrones exóticos y las distintas dinámicas asociadas.
- Tener una primera aproximación al plasma de quarks y gluones.

## Recordatorio

---

- Tenemos cuatro interacciones fundamentales
- El Modelo Estándar abarca tres de ellas:
  - Fuerte
  - Electromagnética
  - Débil
- La interacción fuerte es descrita por la Cromodinámica Cuántica (**QCD**)
- La carga fuerte se denomina color (*rgb*)
- Sus grados de libertad son los quarks y los gluones

 up (u)	 down (d)
 strange (s)	 charm (c)
 bottom (b)	 top (t)
gluones: 8 combinaciones <b>color-anticolor</b>	



## Origen de la masa del protón

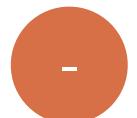
---

- El bosón de Higgs proporciona su masa a las partículas elementales
- Pero...
  - El protón tiene dos quarks  $u$  y un quark  $d$  que suman paroximadamente 25 MeV
  - El protón tiene una masa de  $\sim 940$  MeV...
  - $25/940 \times 100\% \approx 2,7\%$  ... (similar para el neutrón)
- Considerando que casi toda la masa del Universo visible son los núcleos, el Higgs sería responsable de menos del 3% de la masa visible....
- ¿De dónde proviene el otro 97%?
  - Es dinámicamente generado por la interacción fuerte (**QCD**)

## Confinamiento del color

---

- Fenomenológicamente fácil de describir:
  - La carga de color no es observable.
  - Los quarks y los gluones tienen color, por lo que **no** podemos aislar un quark o un gluon, producirlo en una colisión y detectarlo.
  - Sólo los objetos "neutros" son observables
  - Los quarks y los gluones están **confinados en singletes de color**, hadrones, que sí podemos detectar.
  - El espectro de QCD son los hadrones.
- Entender cómo a partir de QCD emerge el confinamiento es un problema abierto. Además está vinculado a uno de los problemas matemáticos del milenio:  
<https://www.claymath.org/millennium/yang-mills-the-maths-gap/>



## Confinamiento del color

---

- Fenomenológicamente fácil de describir:
  - La carga de color no es observable.
  - Los quarks y los gluones tienen color, por lo que **no** podemos aislar un quark o un gluon, producirlo en una colisión y detectarlo.
  - Sólo los objetos "neutros" son observables
  - Los quarks y los gluones están **confinados en singletes de color**, hadrones, que sí podemos detectar.
  - El espectro de QCD son los hadrones.
- Entender cómo a partir de QCD emerge el confinamiento es un problema abierto. Además está vinculado a uno de los problemas matemáticos del milenio:  
<https://www.claymath.org/millennium/yang-mills-the-maths-gap/>



objeto neutro

## Confinamiento del color

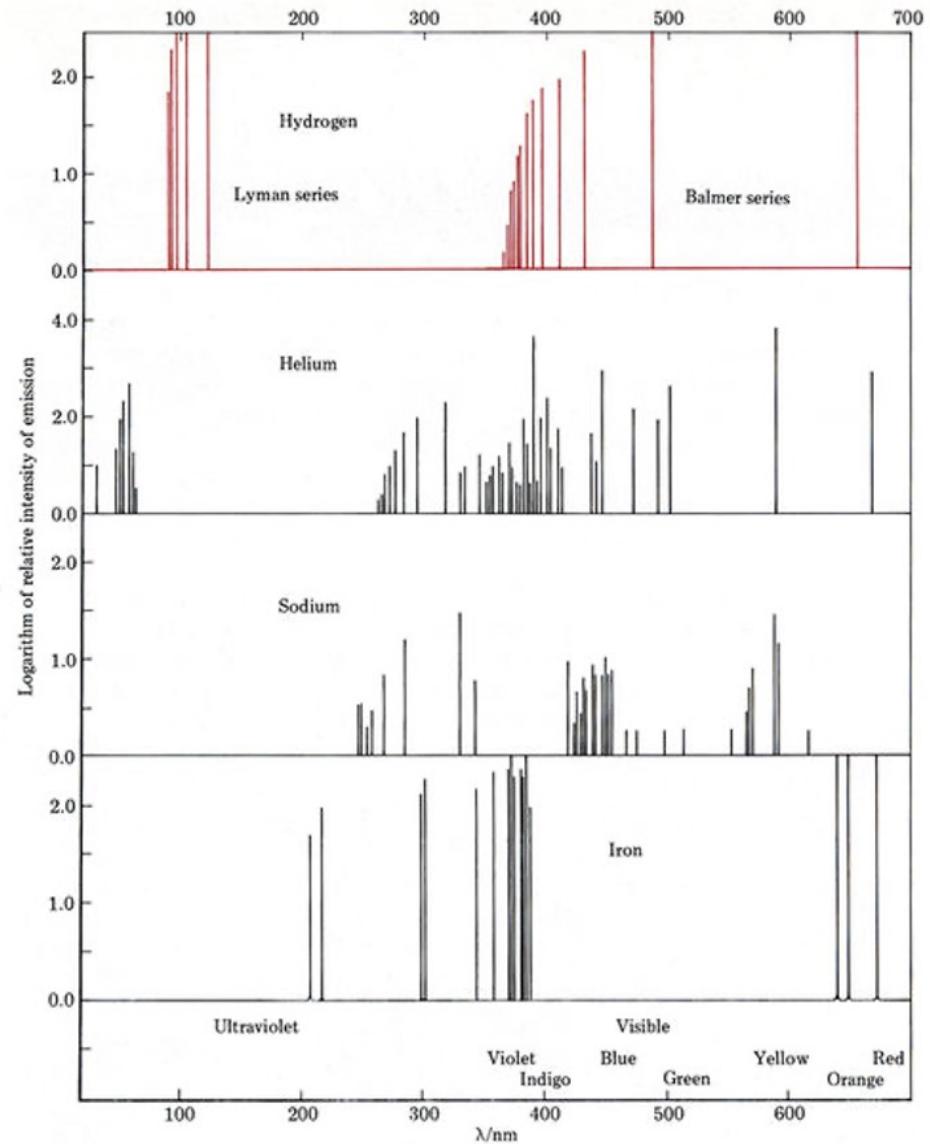
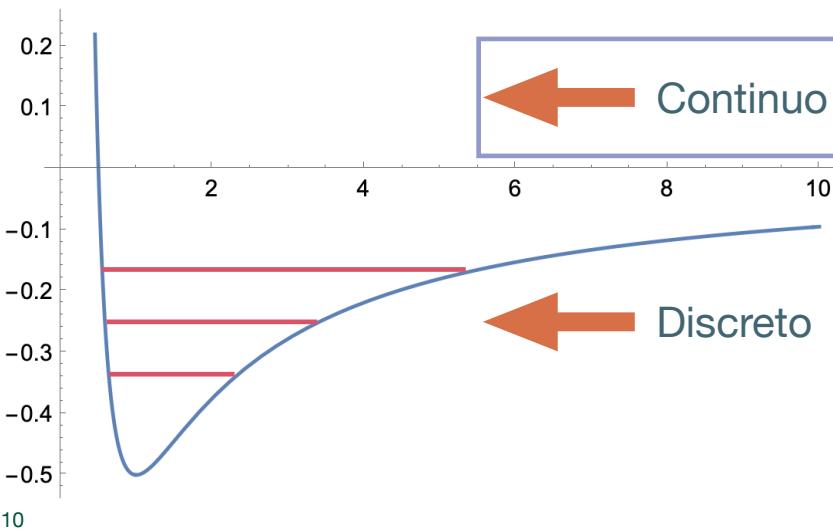
---

- Fenomenológicamente fácil de describir:
  - La carga de color no es observable.
  - Los quarks y los gluones tienen color, por lo que **no** podemos aislar un quark o un gluon, producirlo en una colisión y detectarlo.
  - Sólo los objetos "neutros" son observables
  - Los quarks y los gluones están **confinados en singletes de color**, hadrones, que sí podemos detectar.
  - El espectro de QCD son los hadrones.
- Entender cómo a partir de QCD emerge el confinamiento es un problema abierto. Además está vinculado a uno de los problemas matemáticos del milenio:  
<https://www.claymath.org/millennium/yang-mills-the-maths-gap/>



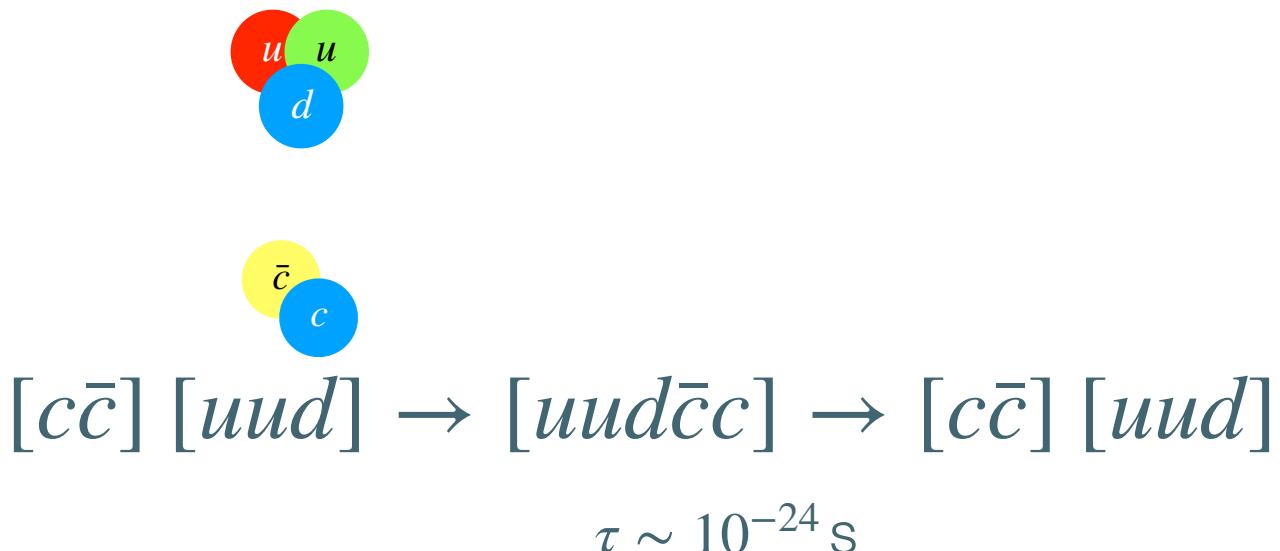
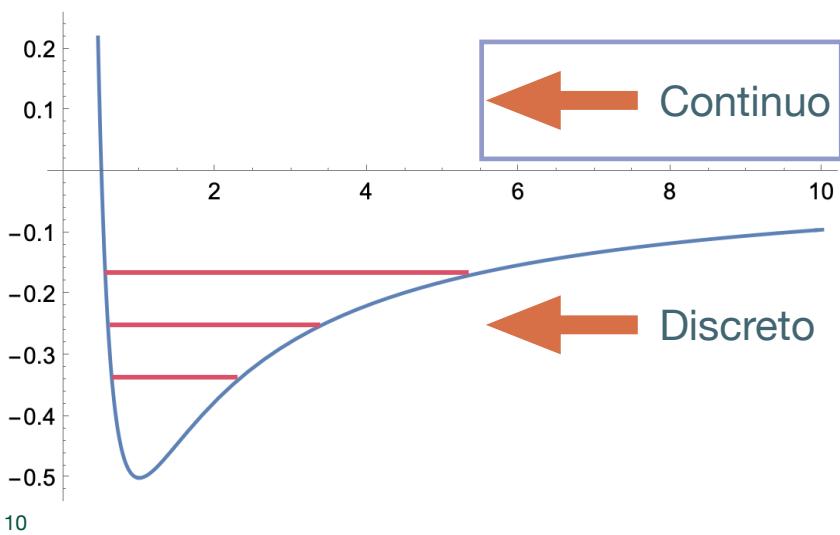
# Espectroscopía hadrónica

- En física atómica y molecular podemos usar la espectroscopía para estudiar las interacciones subyacentes
- En espectroscopía hadrónica se hace lo mismo... pero con estados de colisión



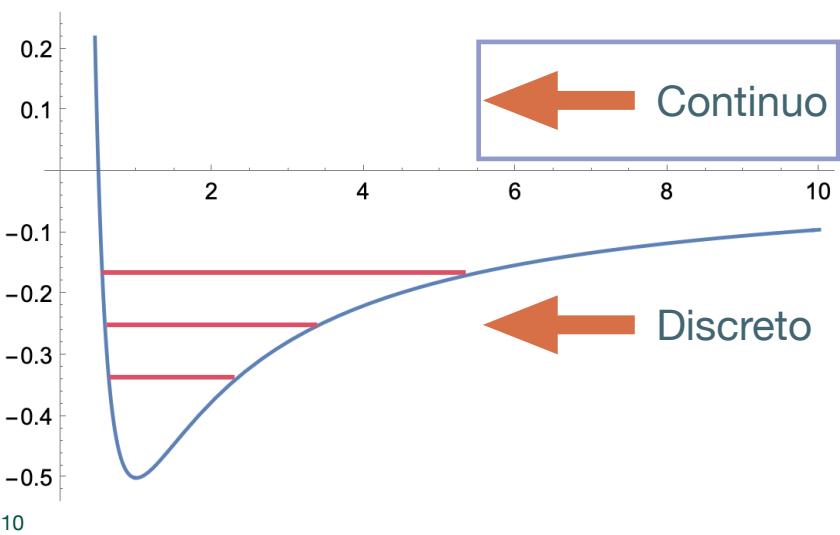
# Espectroscopía hadrónica

- En física atómica y molecular podemos usar la espectroscopía para estudiar las interacciones subyacentes
- En espectroscopía hadrónica se hace lo mismo... pero con estados de colisión

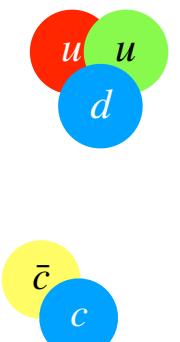


# Espectroscopía hadrónica

- En física atómica y molecular podemos usar la espectroscopía para estudiar las interacciones subyacentes
- En espectroscopía hadrónica se hace lo mismo... pero con estados de colisión

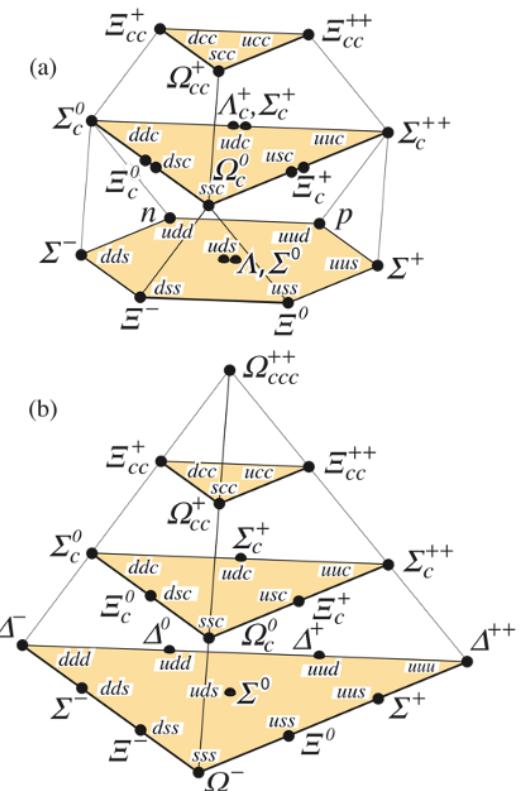
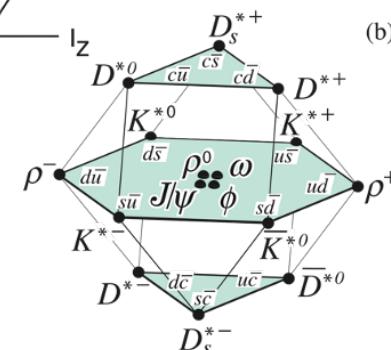
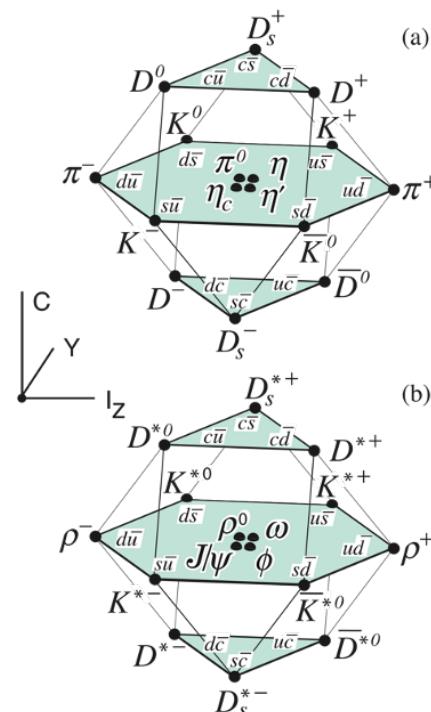


$$\tau \sim 10^{-24} \text{ s}$$



# Modelo de quarks constituyentes

- (Anti)Bariones (fermiones)
  - Número bariónico (-)1
  - 3 (anti)quarks
- Mesones (bosones)
  - Número bariónico 0
  - par quark-antiquark
- Configuraciones con quarks  $u, d, s$  y  $c \Rightarrow$
- Los estados que van más allá de este modelo se denominan exóticos

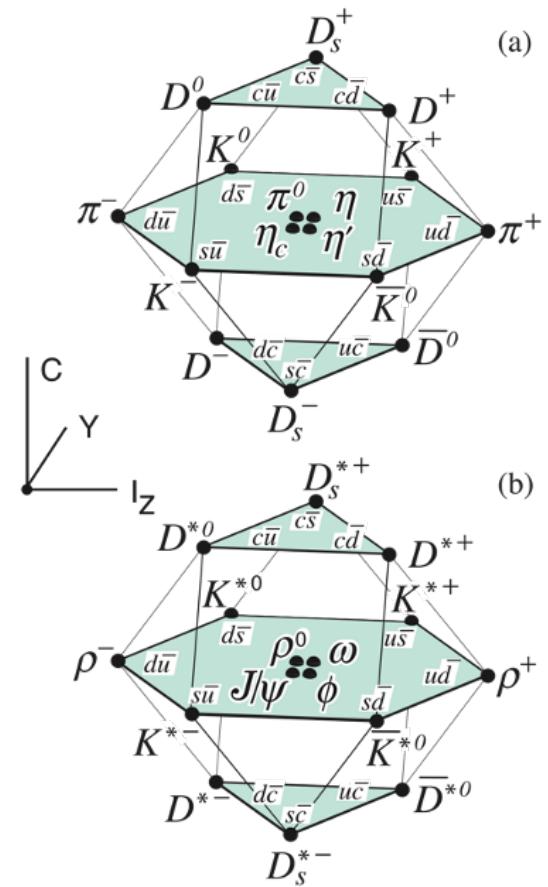


## Números cuánticos de los quarks

Quark	$J$	$B$	$Q$	$I$	$I_3$	$S$	$C$	$B'$	$T$
$u$	1/2	1/3	2/3	1/2	1/2	0	0	0	0
$d$	1/2	1/3	-1/3	1/2	-1/2	0	0	0	0
$s$	1/2	1/3	-1/3	0	0	1	0	0	0
$c$	1/2	1/3	2/3	0	0	0	1	0	0
$b$	1/2	1/3	-1/3	0	0	0	0	1	0
$t$	1/2	1/3	2/3	0	0	0	0	0	1

# Ejemplos de mesones y su composición en quarks

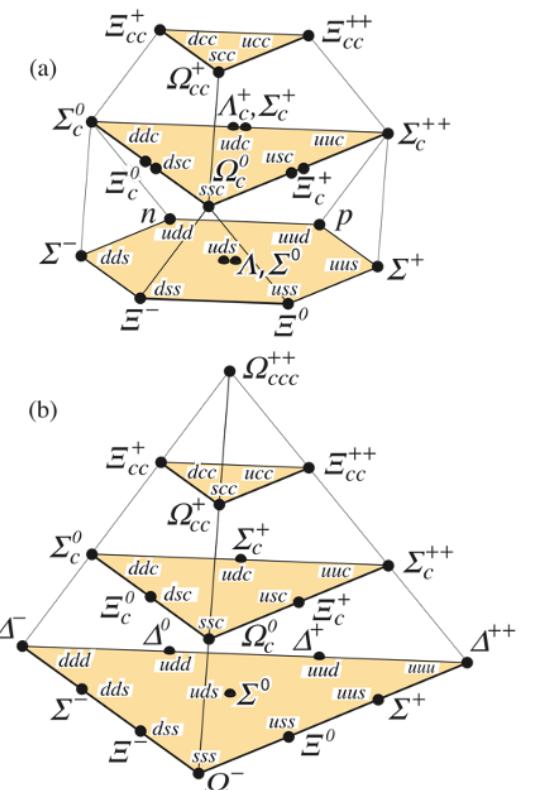
- Mesones sin extrañeza
  - $\pi^\pm (u\bar{d}, \bar{u}d), \pi^0 (u\bar{u}, d\bar{d}), \eta^0 (u\bar{u}, d\bar{d})$
- Mesones con extrañeza
  - $K^\pm (u\bar{s}, \bar{u}s), K^0, \bar{K}^0 (d\bar{s}, s\bar{d})$
- Mesones con encanto
  - $D^\pm (c\bar{d}, \bar{c}d), D^0, \bar{D}^0 (u\bar{c}, c\bar{u})$
- Mesones con encanto y extrañeza
  - $D_s^\pm (c\bar{s}, \bar{c}s)$
- Mesones con belleza
  - $B^\pm (b\bar{d}, \bar{b}d), B^0, \bar{B}^0 (b\bar{u}, u\bar{b})$
- Mesones con belleza y extrañeza
  - $B_s^0 (b\bar{s}, \bar{b}s)$



# Ejemplos de bariones y su composición en quarks

---

- Bariones sin extrañeza
  - $p(uud), n(udd)$
- Bariones con extrañeza  $S=-1$ 
  - $\Lambda^0(uds), \Sigma^+(uus), \Sigma^0(uds), \Sigma^-(dds)$
- Bariones con extrañeza  $S=-2$ 
  - $\Xi^0(uss), \Xi^-(dss)$
- Bariones con extrañeza  $S=-3$ 
  - $\Omega^-(sss)$
- Bariones con encanto
  - $\Lambda_c^+(udc), \Sigma_c^+(uuc, udc, ddc), \Xi_c^+(usc), \Xi_c^0(dsc), \Omega_c^0(ssc)$
- Bariones con belleza
  - $\Lambda_b^0(udb)$



## Números cuánticos de los hadrones

---

- En función del número de quarks constituyentes

- Número bariónico:  $S = [N(q) - N(\bar{q})]/3$

- Extrañeza:  $S = -N_s = -[N(s) - N(\bar{s})]$

- Encanto:  $C = N_c = [N(c) - N(\bar{c})]$

- Belleza:  $B' = -N_b = -[N(b) - N(\bar{b})]$

- Verdad:  $T = -N_t = [N(t) - N(\bar{t})]$

- El número bariónico también se puede calcular como:

$$B = \frac{1}{2} \sum_q N_q = \frac{1}{3} (N_u + N_d - S + C - B + T) \text{ donde } N_{u,d} = [N(u, d) - N(\bar{u}, \bar{d})]$$

- El número bariónico se conserva en todas las interacciones

## Ejemplos.

---

- $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$   
 $p \rightarrow uud$   
 $n \rightarrow udd$   
 $\pi^+ \rightarrow u\bar{d} = u - d$
- $\gamma p \rightarrow n\pi^+$   
 $p \rightarrow uud$   
 $n \rightarrow udd$   
 $\pi^+ \rightarrow u\bar{d} = u - d$
- $e^+ + e^- \rightarrow \pi^+ + \pi^-$   
 $\pi^+ \rightarrow u\bar{d} = u - d$   
 $\pi^- \rightarrow d\bar{u} = d - u$
- Se puede comprobar que el número de quarks se conserva en todos los casos

## Isospín

---

- Ya lo vimos para los nucleones (Tema 1).
- El protón y el neutrón pueden ser descritos simultáneamente mediante una partícula de isospín  $I=1/2$ : el nucleón.

$$|p\rangle = |I = \frac{1}{2}, I_3 = +\frac{1}{2}\rangle$$

$$|n\rangle = |I = \frac{1}{2}, I_3 = -\frac{1}{2}\rangle$$

- El origen es la simetría de isospín en término de quarks u y d.

$$|u\rangle = |I = \frac{1}{2}, I_3 = +\frac{1}{2}\rangle$$

$$|d\rangle = |I = \frac{1}{2}, I_3 = -\frac{1}{2}\rangle$$

- Todo hadrón que contenga sólo quarks u y d tiene isospín

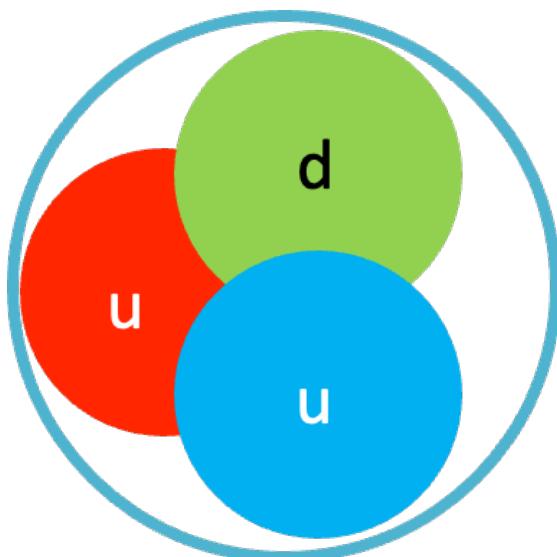
## El pión.

---

- $l=1, (\pi^+, \pi^0, \pi^-)$   
 $\pi^+ = |u\bar{d}\rangle$   
 $\pi^0 = (|u\bar{u}\rangle - |d\bar{d}\rangle)/\sqrt{2}$   
 $\pi^- = |d\bar{u}\rangle$
- Es el mesón más ligero:  $m_{\pi^\pm} = 139,57 \text{ MeV}/c^2$  y  $m_{\pi^0} = 134,98 \text{ MeV}/c^2$
- Los piones son estables frente a la interacción fuerte  
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$
- Se desintegran débil o electromagnéticamente:  $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$   
$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma$$
- Vida media pion neutro:  $8,5 \times 10^{-17} \text{ s}$
- Vida media pion cargado:  $2,5 \times 10^{-8} \text{ s}$
- Factor de forma del pión (recordad el Tema 1). A muy alta energía:  $F(Q^2) \rightarrow 16\pi \frac{\alpha_s(Q^2)}{Q^2} f_\pi^2$

## Una primera aproximación a los bariones: el protón

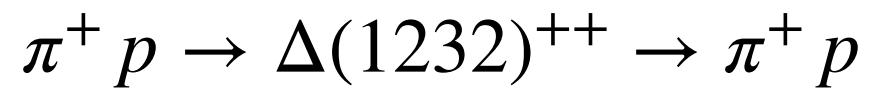
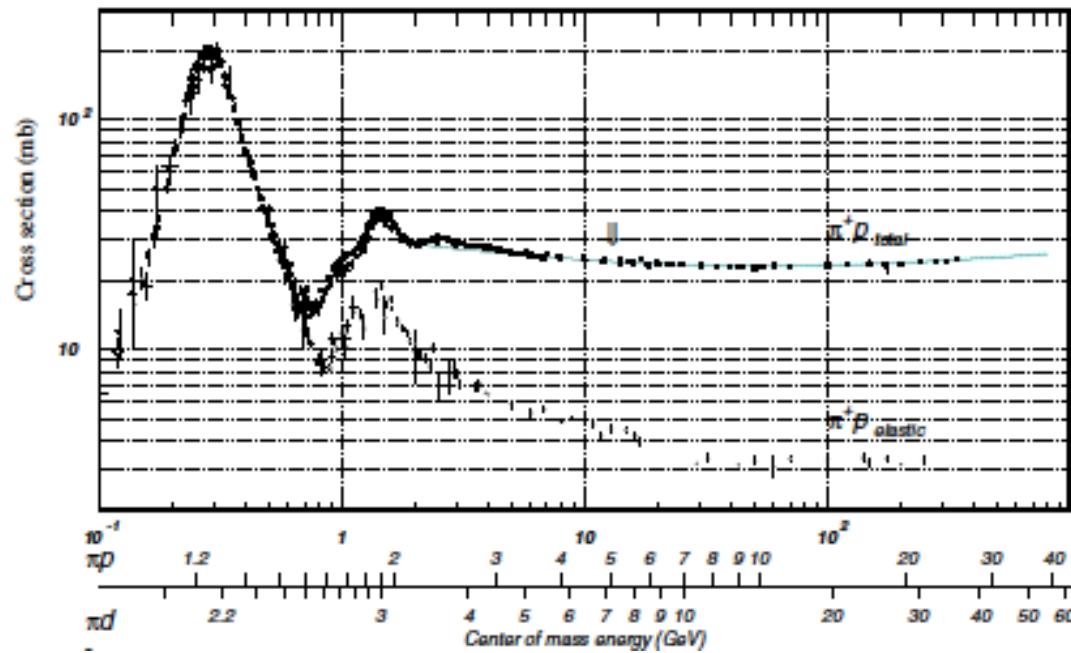
---



- Como primera aproximación, el protón se puede considerar como un estado (ligado) compuesto por tres quarks  $|uud\rangle$  cada uno de un color diferente en una configuración de singlete de color
  - Cada quark tiene espín  $\frac{1}{2}$ . Dos quarks con espín  $\uparrow$  y uno con espín  $\downarrow$  para proporcionar el espín  $\frac{1}{2}$  del protón
- 
- Three circular icons representing quarks, each with a vertical arrow indicating spin. The first is green with an upward arrow, the second is blue with an upward arrow, and the third is red with a downward arrow. They are separated by plus signs.
- En realidad el protón es más complejo que esto, ya que hay que tener en cuenta QCD y, en particular, los gluones
  - La interacción fuerte es responsable del 97% de la masa

## Resonancias

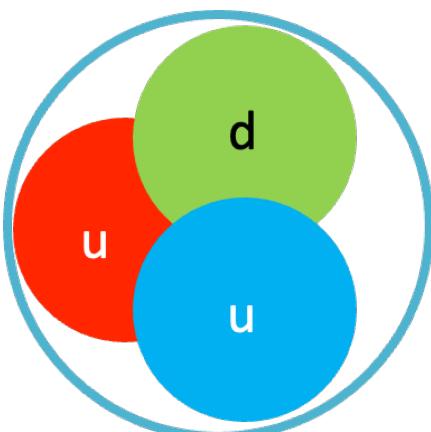
---



Anderson, Fermi, Long, Nagle, Phys. Rev. 85 (1952) 936

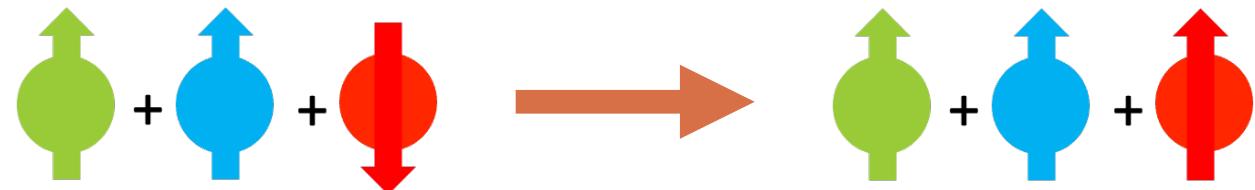
## Una primera aproximación a los estados excitados: la $\Delta(1232)$

---



- Estado excitado del protón con espín  $\frac{3}{2}$
- Cada quark tiene espín  $\frac{1}{2}$ . Tres quarks con espín  $\uparrow$

$$\pi^+ p \rightarrow \Delta(1232)^{++}$$



# Masas de los bariones en el modelo de quarks constituyentes

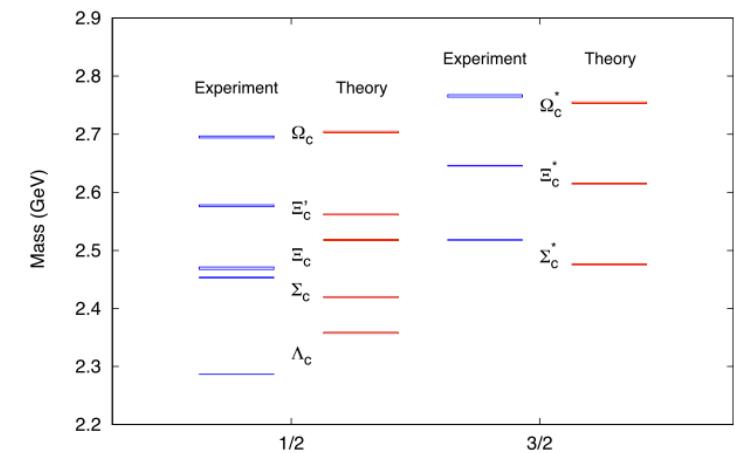
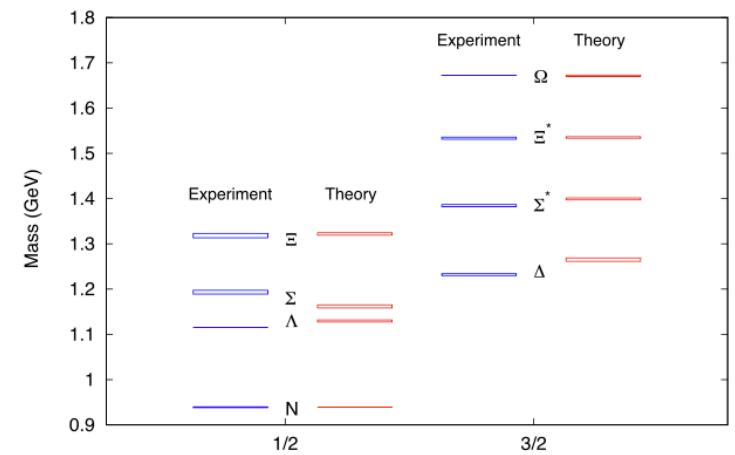
- El modelo de quarks constituyentes es capaz de describir muy bien las masas de los bariones
- En este modelo, los quarks son pesados y se obtienen a partir de la masa del nucleón.

$$m_u = m_d = M_N/3 = 312,972 \text{ MeV}$$

- Hay tres contribuciones principales: masa de los quarks constituyentes, espín-sabor

$$\left\langle \sum_{i < j}^n (\vec{\lambda}_i \cdot \vec{\lambda}_j) (\vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j) \right\rangle \text{ y de momento angular}$$

$$M_{orb}^2 = \alpha' L.$$



## Momentos magnéticos en el modelo de quarks constituyentes

---

- Las partículas con espín tienen momento dipolar magnético:  $\vec{\mu} = g_s \frac{\mu_N}{\hbar} \vec{S}$
- Si el protón no tuviera estructura:  $\mu = 2\mu_N$
- Si embargo de ha medido:  $\mu_p = 2,79\mu_N$  y  $\mu_n = -1,91\mu_N$
- Del modelo de quarks constituyentes:  $\vec{\mu}_p = \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_u + \vec{\mu}_d$  luego  
$$\mu_p = \frac{2}{3}(\mu_u + \mu_u - \mu_d) + \frac{1}{3}\mu_d$$
- Podemos obtener así los momentos magnéticos de otros bariones  $\mu_p = \frac{1}{3}(4\mu_u - \mu_d)$ ;  
 $\mu_n = \frac{1}{3}(4\mu_d - \mu_u)$ ;  $\mu_{\Sigma^+} = \frac{1}{3}(4\mu_u - \mu_d)$  obteniéndose  $\frac{\mu_n}{\mu_p} = -\frac{2}{3}$  que no está lejos del valor experimental de -0,685
- Buena herramienta para obtener una estimación de los momentos magnéticos dipolares de los bariones

## La imagen que tenemos del protón

---

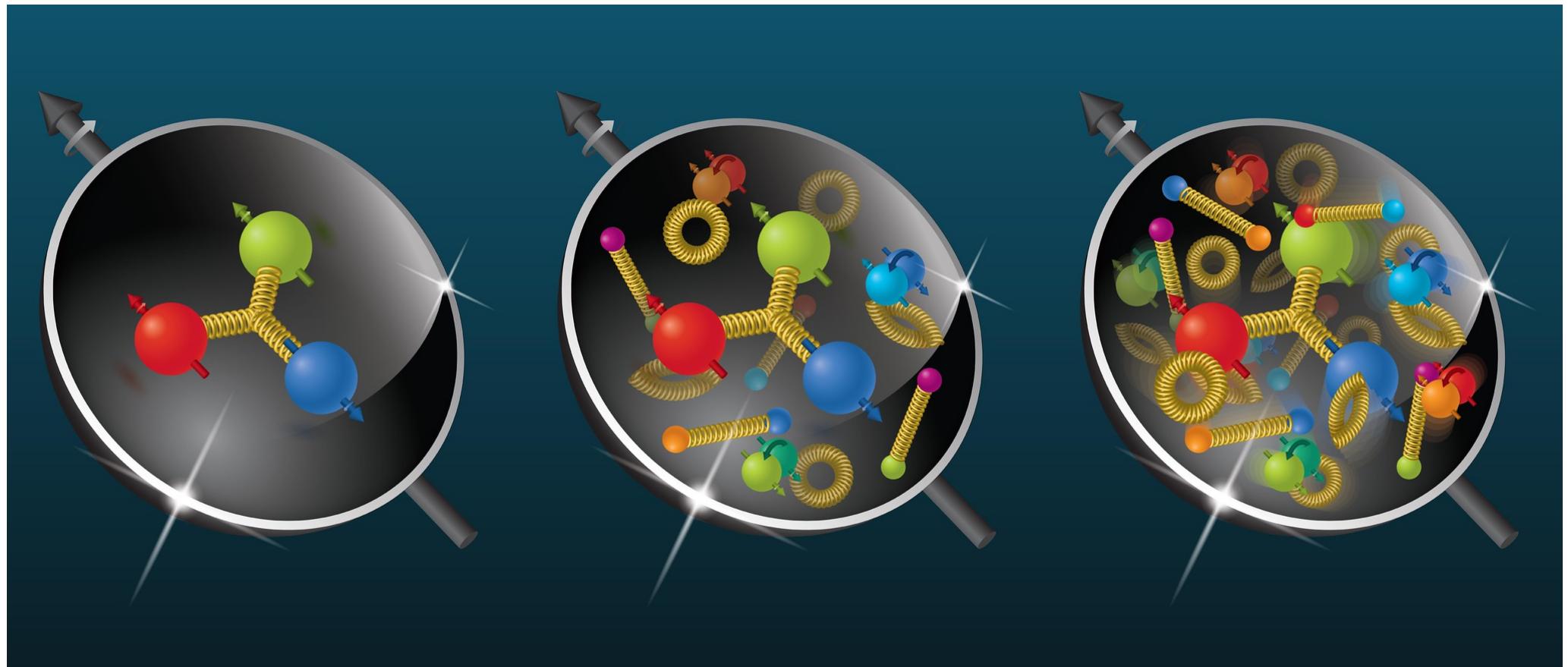


Imagen de Brookhaven National Lab <sup>24</sup>

## Partículas extrañas

---

- La extrañeza fue introducida para explicar el hecho de que algunos hadrones tienen vidas relativamente largas indicando que decaen débilmente: Kaones.
- Si recordáis las oscilaciones de neutrinos. Se puede tener autoestados de masa que no commuten con los autoestados de la interacción.
- Los kaones neutros,  $K^0$  y  $\bar{K}^0$  suelen ser producidos por la interacción fuerte
- Ambos decaen débilmente, pero no son autoestados de la interacción débil

## El Kaon

---

- Los autoestados de la interacción fuerte son  $K^0$  y  $\bar{K}^0$
- Los autoestados de  $CP$  son  $K_1^0$  y  $K_2^0$  [ $CP=+1$  y  $-1$ ] donde
- Como  $K_1^0$  tiene  $CP=+1$  puede decaer a dos piones o a tres piones con el momento angular adecuado. El decaimiento a dos piones es el más habitual
- Como  $K_2^0$  tiene  $CP=-1$  puede decaer a tres piones y no puede decaer a dos piones
- Esto hace pensar que:
  - $K_S^0 = K_1^0$  ya que decae principalmente a 2 piones y tiene vida media  $8,96 \times 10^{-11}$  s
  - $K_L^0 = K_2^0$  ya que decae principalmente a 3 piones y tiene vida media  $5,18 \times 10^{-8}$  s. Pero decae también a 2 piones.
- Resulta que la situación es más compleja y resulta que  $K_S^0$  y  $K_L^0$  no son los autoestados de  $CP$  y hay un mixing de  $2,228 \times 10^{-3}$
- Los kaones oscilan como los neutrinos
- Los  $D^0$  y  $\bar{D}^0$  también oscilan

## Estado exótico

---

- Estado cuyos números cuánticos no pueden ser obtenidos mediante combinaciones  $q\bar{q}$  o  $qqq$
- Estados cuyo contenido mínimo no puede ser explicado mediante combinaciones  $q\bar{q}$  o  $qqq$
- Estados cuyo contenido mínimo puede ser explicado como  $q\bar{q}$  o  $qqq$  pero tiene propiedades que van más allá de dicho modelo

# Más allá del modelo de quarks constituyentes

---

- Superposición de estados:

- Mesones:

$$| \text{Mesón} \rangle = \alpha_0 | q\bar{q} \rangle + \alpha_1 | qq\bar{q}\bar{q} \rangle + \alpha_2 | q\bar{q}g \rangle + \alpha_3 | gg \rangle + \dots$$

- Bariones:

$$| \text{Barión} \rangle = \alpha_0 | qqq \rangle + \alpha_1 | qqqq\bar{q} \rangle + \alpha_2 | qqqg \rangle + \dots$$

- Estados ordinarios:  $| qqq \rangle$   ,  $| q\bar{q} \rangle$  

- Híbridos:  $| q\bar{q}g \rangle$  

- Glueball:  $| gg \rangle$  

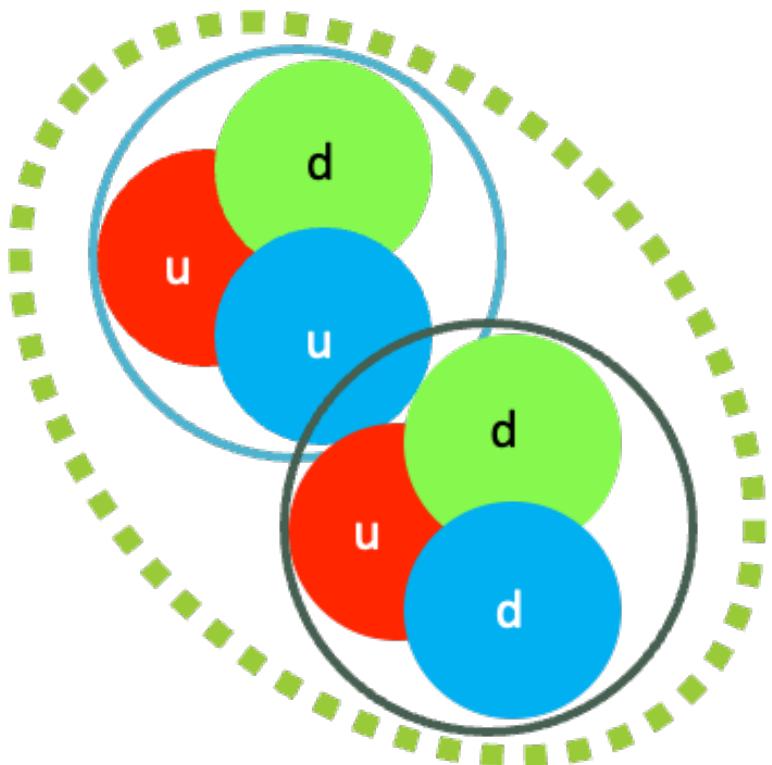
- Tetraquarks compactos:  $| qq\bar{q}\bar{q} \rangle$  

- Pentaquarks compactos:  $| qqqq\bar{q} \rangle$  

- Moléculares (como el  ${}^2\text{H}$ ):  $| K\bar{K} \rangle$ ,  $| \Lambda\bar{K} \rangle$ ,  $| \Sigma_c^+\bar{D}^0 \rangle$  

## La molécula hadrónica más simple: el deuterón

---

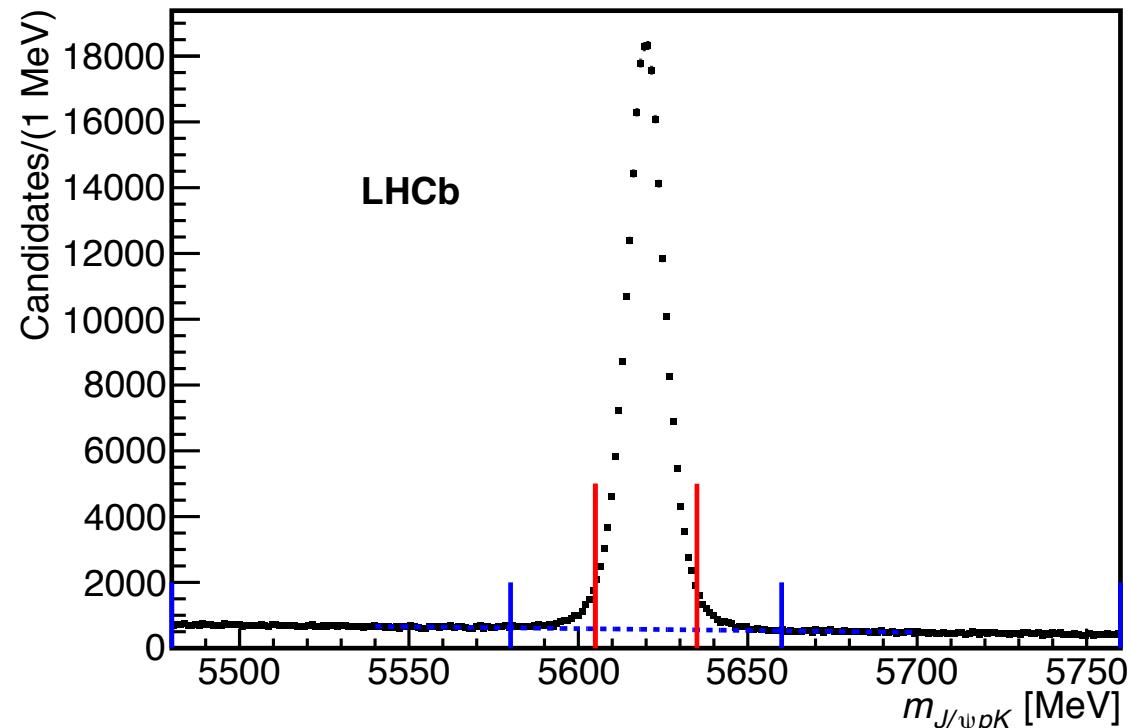
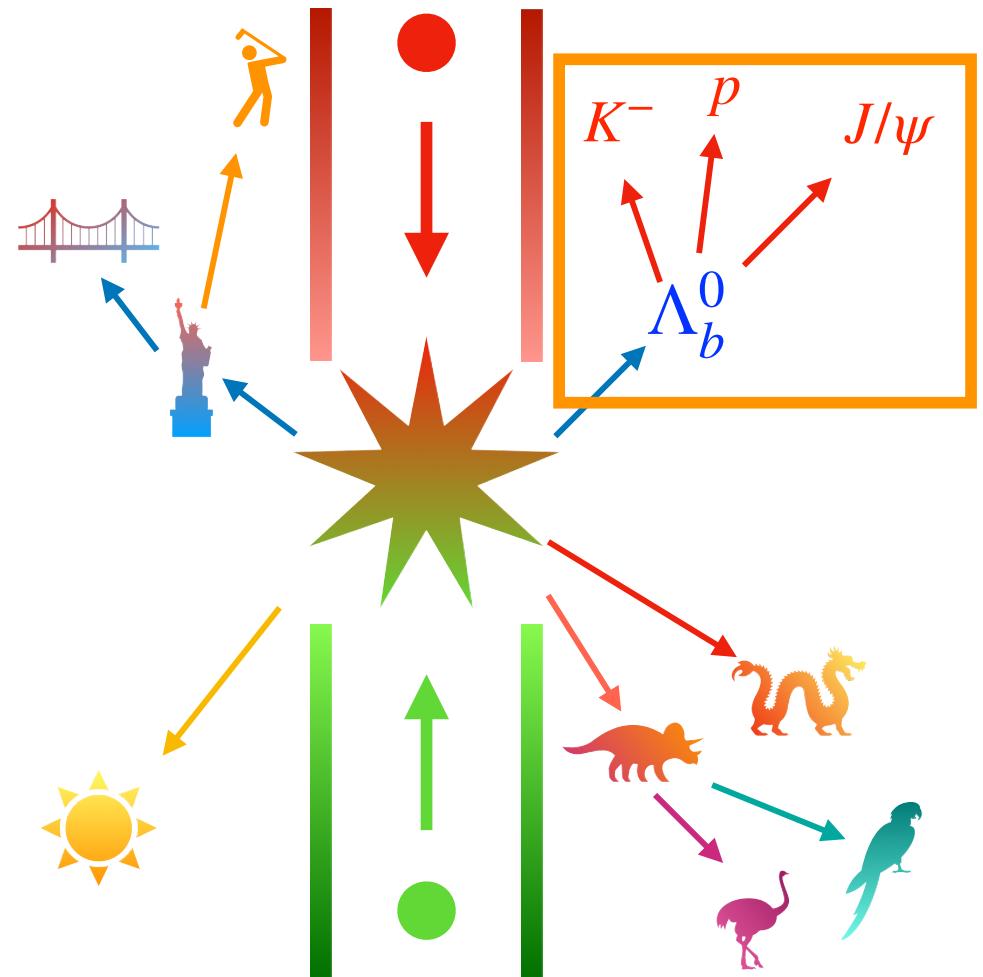


- Desde el punto de física hadrónico, el deuterón es una «molécula hadrónica» donde el protón y el neutrón forman un estado ligado 2.2 MeV por debajo del umbral unidos por la interacción residual que liga los quarks que componen el protón y el neutrón
- ¿Es el deuterón una molécula hadrónica o un hexaquark?

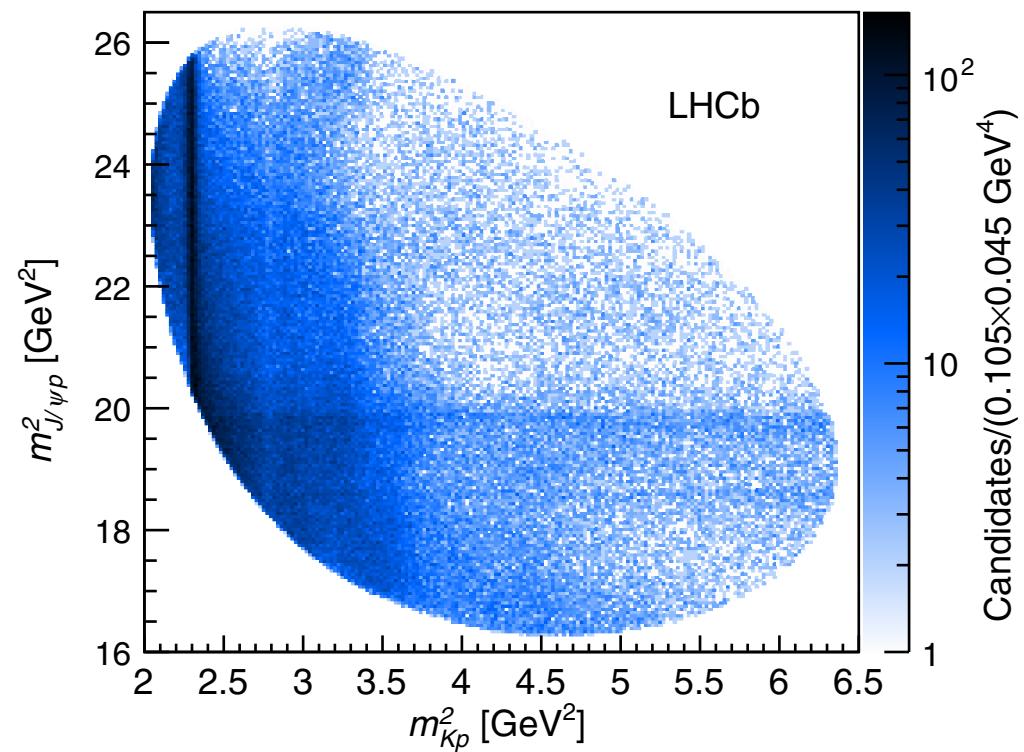
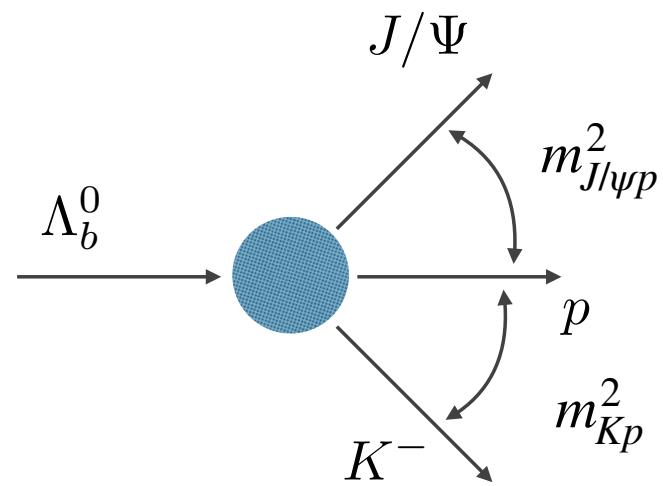
Weinberg, *Phys. Rev* 137 (1965) B672

- De hecho, los núcleos son moléculas multibariónicas

## Ejemplo: Pentaquark (I)



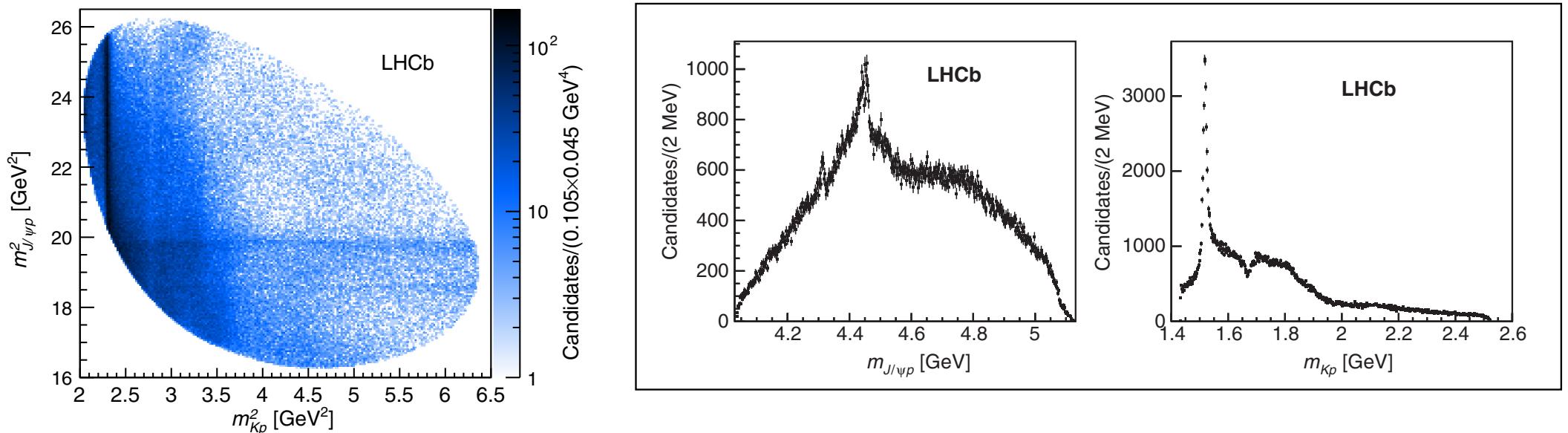
## Ejemplo: Pentaquark (II)



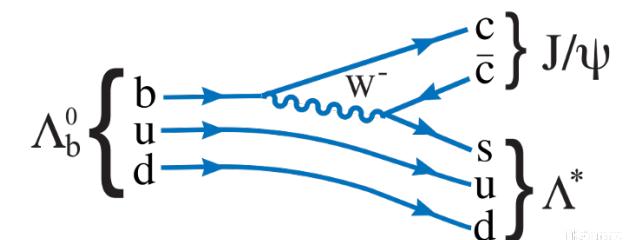
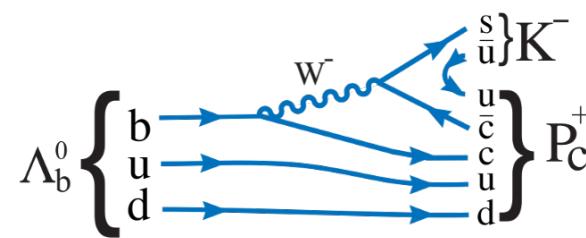
LHCb, Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 222001

246000 eventos

## Ejemplo: Pentaquark (III)



Identificamos las resonancias en los subcanales



## ¿Cuál es la naturaleza del estado?

---

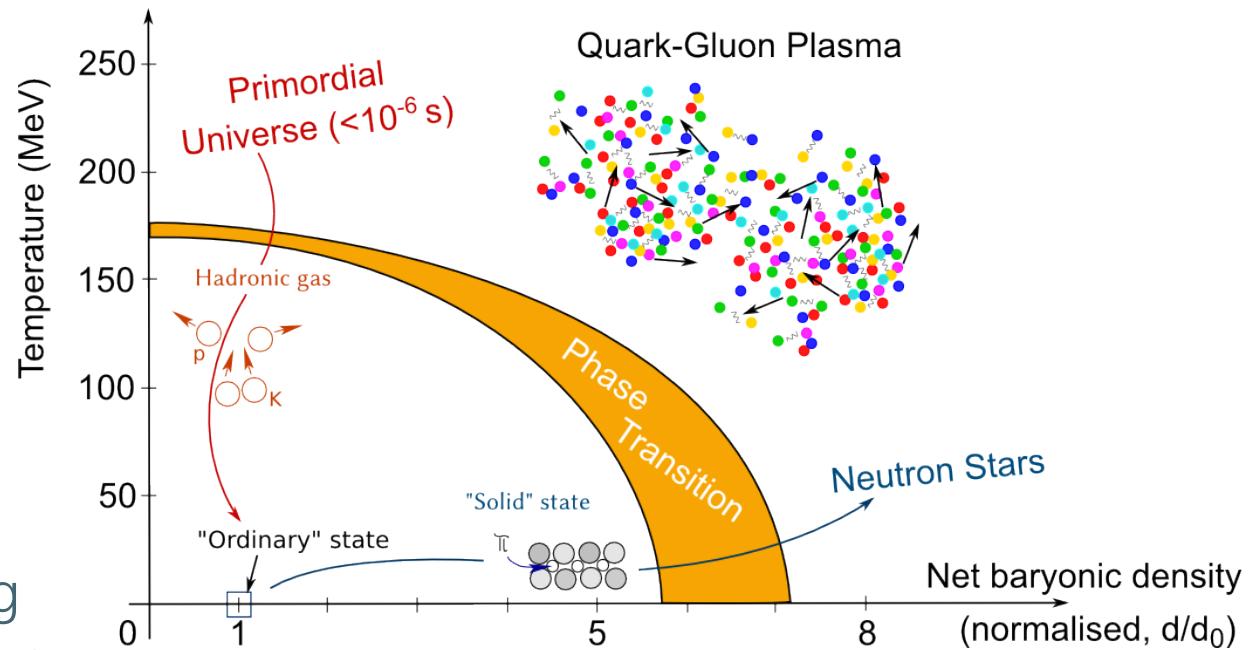
- Compacto
- Molecular
- Mezcla

$$|P_c\rangle = (1 - \alpha) \quad \text{Diagram A} \quad + \alpha \quad \text{Diagram B}$$

The equation shows the state  $|P_c\rangle$  as a superposition of two states. The first term,  $(1 - \alpha)$ , is associated with Diagram A, which shows a grey circle containing four smaller colored circles (red, blue, yellow, green) with black dots. The second term,  $\alpha$ , is associated with Diagram B, which shows a grey circle containing three smaller colored circles (red, blue, green) with black dots, and a separate grey circle containing one yellow circle with a black dot.

# Plasma de quarks y gluones

- Estado de la materia que se produce en condiciones de extrema temperatura y/o densidad en la que los quarks y los gluones están separados y se comportan como partículas libres
- Antes de que se creara la materia actual tras el Big-Bang (a los  $20 \mu\text{s}$ ) lo que había era un plasma de estas características



ALICE@CERN <https://alice.cern/physics-primer>

## Resumen

---

- Confinamiento del color
- Modelo de quarks constituyentes
- Clasificación de los hadrones en función de su contenido en quarks de valencia
- Espectroscopía hadrónica
- La estructura del protón
- Estados exóticos
- Moléculas hadrónicas
- Los hadrones también «oscilan» como los neutrinos.
- Plasma de quarks y gluones