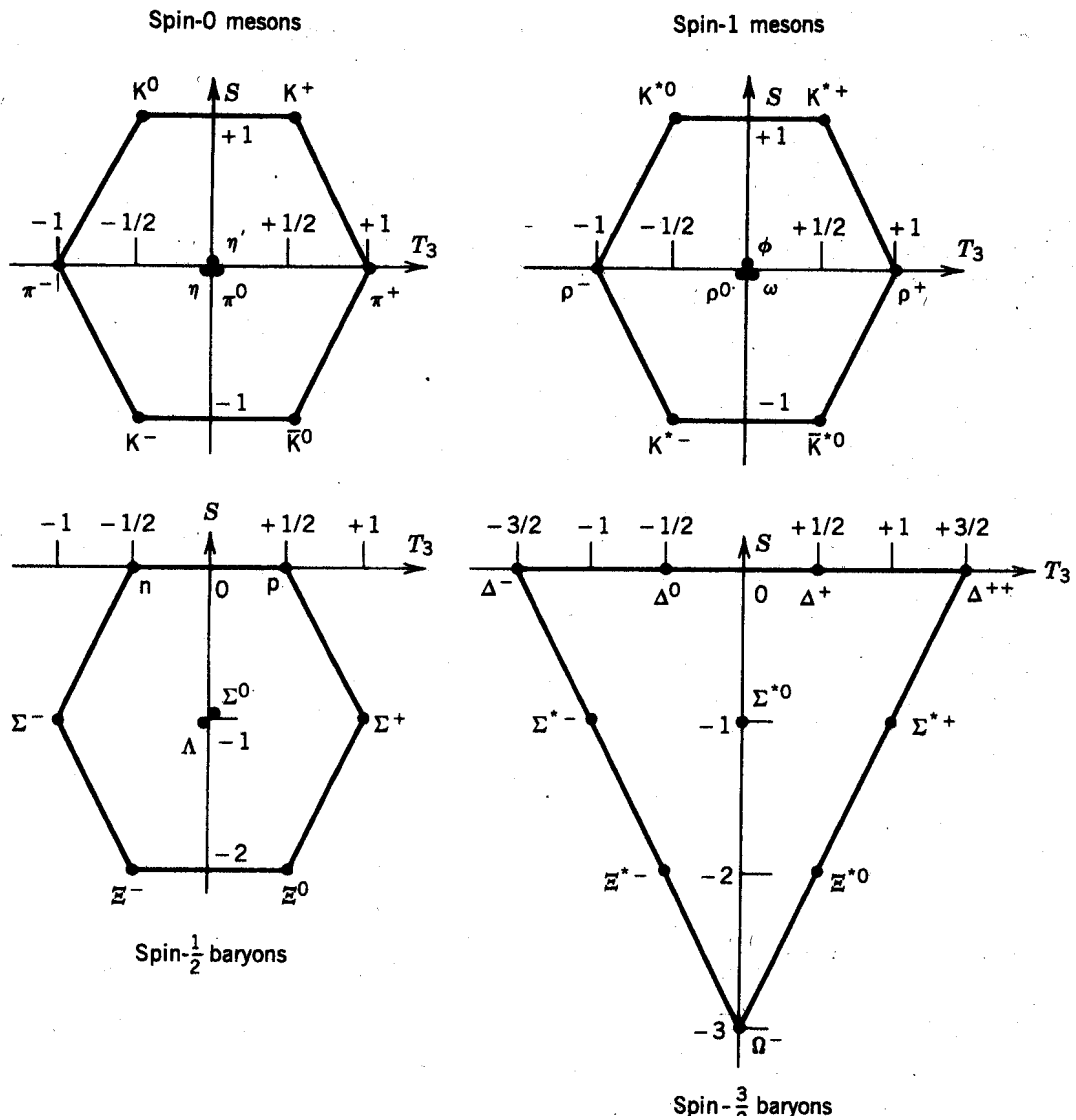


ESPECTROSCOPIA DE HADRONES

- 1. Modelo quark de los hadrones: SU(3) de sabor**
- 2. El color de los quarks**
- 3. Masas de los hadrones**
- 4. Multipletes de SU(4)**

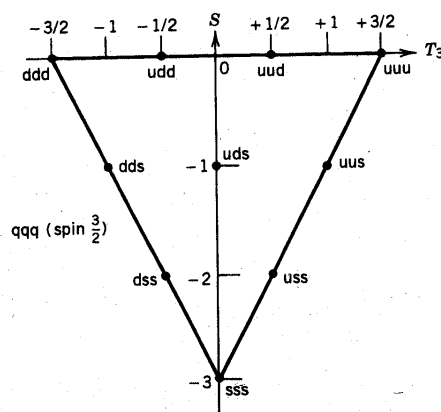
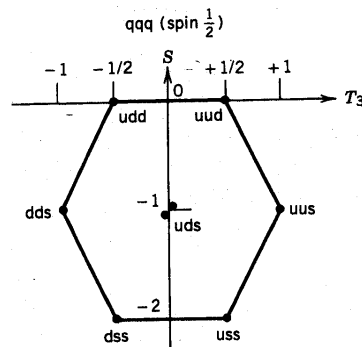
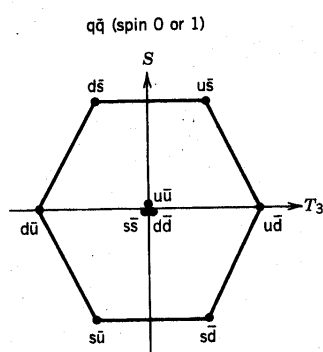
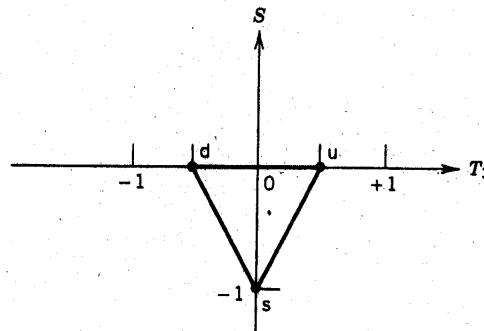
El modelo quark de los hadrones

- Diagramas **extrañeza** frente a **tercera componente de isospín** para mesones de espín 0 y 1, y para bariones de espín $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{2}$



El modelo quark de los hadrones

- Utilizando los quarks (u, d, s) y antiquarks ($\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$) agrupados según sus propiedades de extrañeza e isospín, se identifican los sabores de los hadrones (*Gell-Mann y Zweig 1964*)



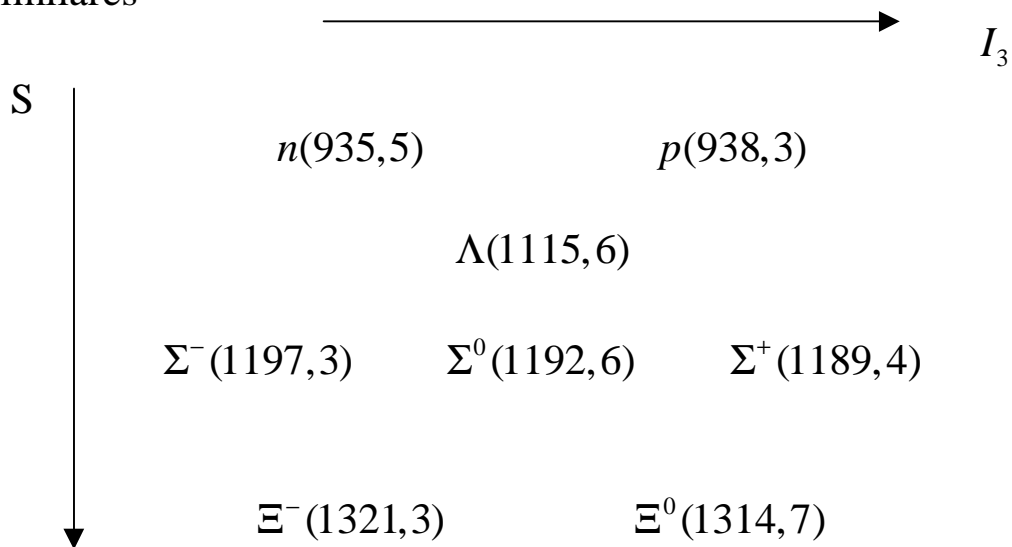
El modelo quark de los hadrones

- Si identificamos $ddd = \Delta^-$, $uuu = \Delta^{++}$ y $sss = \Omega^-$ debemos asignar cargas fraccionarias a los quarks:

$$Q(u) = +\frac{2}{3}|e| \quad Q(d) = -\frac{1}{3}|e| \quad Q(s) = -\frac{1}{3}|e|$$

y opuestas a sus antipartículas para dar cuenta del resto de cargas de los hadrones.

- Cada quark debe tener un número bariónico $B(Q) = +\frac{1}{3}$ y cada antiquark $B(\bar{Q}) = -\frac{1}{3}$
- El espín de los quarks debe ser $\frac{1}{2}$ para acoplarse a 0 ó 1 en los mesones y a $\frac{1}{2}$ ó $\frac{3}{2}$ en los bariones.
- Las masas de los miembros del mismo multiplete de isospín son similares



- El incremento en masa con el aumento de extrañeza se interpreta en términos de una mayor masa del quark s

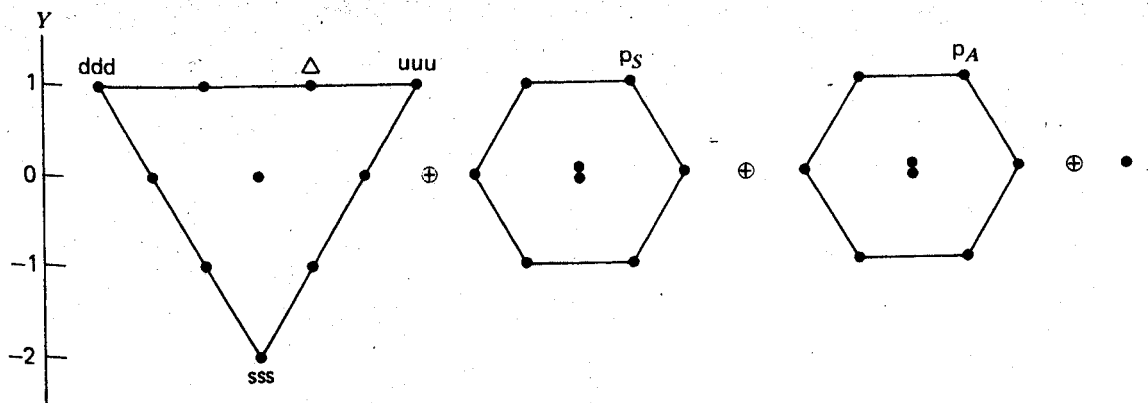
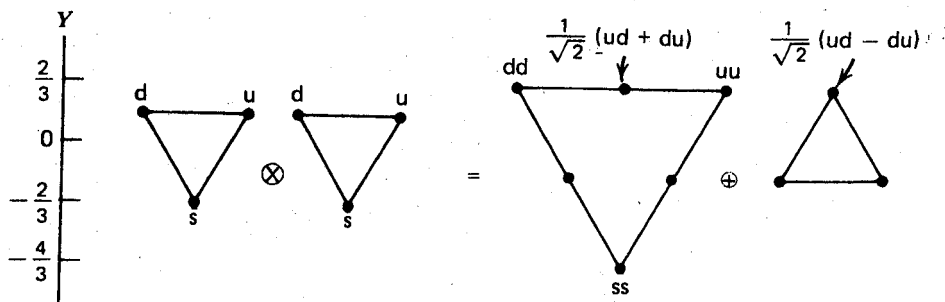
$$m_s - m_{u,d} \approx 150 MeV$$

El modelo quark de los hadrones

- En el lenguaje de grupos los hadrones constituyen los estados base de las representaciones irreducibles del grupo SU(3) de sabor:

$$3 \otimes 3^* = 1 \oplus 8 \quad (\text{mesones})$$

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = 1 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 10 \quad (\text{bariones})$$



- La existencia de los quarks como objetos de espín $\frac{1}{2}$ y carga fraccionaria se ha verificado en experimentos de *difusión profundamente inelástica* de leptones contra nucleones.

El color de los quarks

- **Hipótesis del color:** cada sabor puede tener tres posible estados diferentes de un nuevo grado de libertad interno, el color, de modo que los bariones con tres quarks que repiten sabor (ddd) o (uuu) o (sss) puedan diferenciarse en algún número cuántico (principio de exclusión de Pauli).

$$\psi(\Delta^{++}) = \underbrace{\alpha(\text{espacial})}_{l=0} \underbrace{\beta(\text{espin})}_{\left(+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}\right)} \underbrace{\gamma(\text{sabor})}_{(uuu)} \underbrace{\delta(\text{color})}_{(rgb)}$$

- El color no es una propiedad medible, por lo que los hadrones (bariones o mesones) son estados **singletes de color** (color neto cero).
- Función de onda de color para bariones (antisimétrica)

$$\delta_{color}(\text{bariones}) = \frac{1}{\sqrt{6}}(rgb + brg + gbr - rbg - bgr - grb)$$

- Función de onda de color para mesones (simétrica)

$$\delta_{color}(\text{mesones}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(r\bar{r} + g\bar{g} + b\bar{b})$$

- El color es responsable de la fuerza fuerte, como lo son las cargas eléctricas de la fuerza electromagnética
- La fuerza entre quarks es independiente de los colores involucrados: simetría exacta de color.

El color de los quarks (evidencias experimentales)

- Producción de hadrones en la aniquilación e^+e^- a diferentes energías:

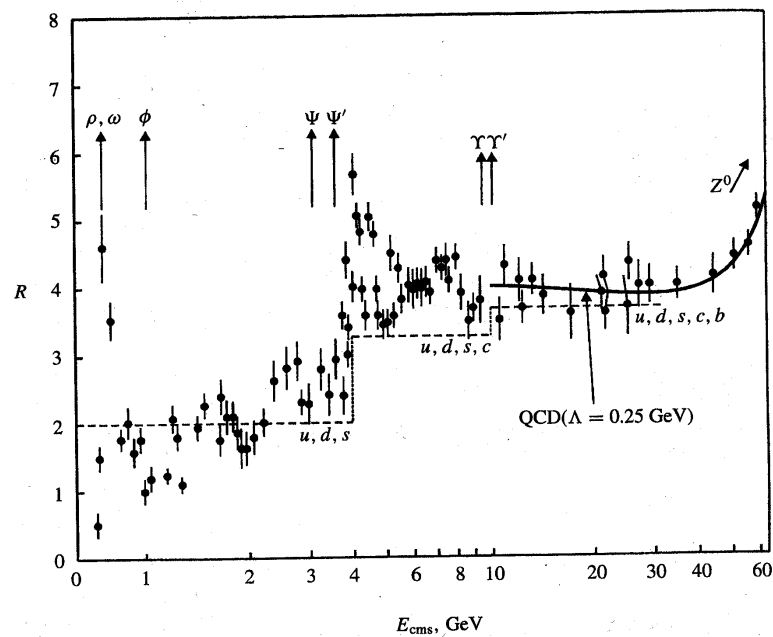
$$e^+ + e^- \rightarrow Q + \bar{Q} \rightarrow \text{hadrones}$$

$$R \equiv \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{hadrones})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)} = \frac{\sum_i \sigma(e^+e^- \rightarrow Q_i\bar{Q}_i)}{\sigma(\text{puntual})} = \frac{\sum_i q_i^2}{q_\mu^2}$$

- Para energías inferiores a 3GeV (por debajo del umbral $c\bar{c}$)

$$R = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{2}{3}$$

- Para $\sqrt{s} > 10\text{GeV}$ $R = \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 + \left(\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{11}{9}$



- Multiplicando por los 3 estados posibles de color del par quark-antiquark, se reproducen los resultados experimentales

Masas de los hadrones

- Las diferencias de masas de hadrones con igual estructura en quarks se explican como un efecto de la **interacción hiperfina** entre los momentos magnéticos de los quarks

$$m(K_{u\bar{s}}) = 494\text{MeV} \leftrightarrow m(K_{u\bar{s}}^*) = 892\text{MeV}$$

$$m(p_{uud}) = 938,27\text{MeV} \leftrightarrow m(\Delta^+_{uud}) = 1232\text{MeV}$$

- La energía de electromagnética asociada a la interacción entre dos dipolos magnéticos es proporcional al producto de los momentos magnéticos, que para fermiones cargados con momento $\vec{\mu}_i = \frac{e_i}{2m} \vec{\sigma}_i$ vale

$$\Delta E(Q\bar{Q}) = \frac{2\pi e_i e_j}{3m_i m_j} |\psi(0)|^2 \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j$$

- Para quarks con masas m_i y espines $\vec{s}_i = \frac{1}{2} \vec{\sigma}_i$ la interacción de color domina frente a la electromagnética, y la interacción magnética de color que nos da QCD es

$$\Delta E(Q\bar{Q}) = \frac{8\pi\alpha_s}{9m_i m_j} |\psi(0)|^2 \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j$$

$$\Delta E(QQ) = \frac{4\pi\alpha_s}{9m_i m_j} |\psi(0)|^2 \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j$$

- ✓ α_s es la constante de acoplamiento fuerte
- ✓ $\psi(0)$ es la función de onda de los dos fermiones en $r_{ij} = 0$

Masas de los hadrones

- El producto $\vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j$ depende en magnitud y signo de las orientaciones relativas de los espines de los quarks:

$$\langle \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j \rangle = 4 \langle \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j \rangle = 4 \left\langle \frac{1}{2} (\vec{S}^2 - \vec{s}_i^2 - \vec{s}_j^2) \right\rangle$$

$$\langle \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j \rangle = 2 \left[S(S+1) - s_i(s_i+1) - s_j(s_j+1) \right] = \begin{cases} +1 & S=1 \\ -3 & S=0 \end{cases}$$

$$\langle \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j \rangle = \begin{cases} +1 & S=1 & \text{mesones vectoriales} \\ -3 & S=0 & \text{mesones pseudoescalres} \end{cases}$$

- Para los bariones ($Q_1 Q_2 Q_3$) debemos sumar el efecto de las tres parejas

$$\left\langle \sum_{i<j} \vec{\sigma}_i \cdot \vec{\sigma}_j \right\rangle = 4 \left\langle \sum_{i<j} \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j \right\rangle = 4 \left\langle \frac{1}{2} (\vec{S}^2 - \vec{s}_1^2 - \vec{s}_2^2 - \vec{s}_3^2) \right\rangle =$$

$$2 \left[S(S+1) - 3s_1(s_1+1) \right] = \begin{cases} +3 & S = \frac{3}{2} \\ -3 & S = \frac{1}{2} \end{cases}$$

- Las masas de los hadrones seran entonces suma de las masas de los quarks constituyentes más la debida a la interacción hiperfina

Mesones

$$m(Q\bar{Q}) = m_1 + m_2 + K \frac{\vec{\sigma}_1 \vec{\sigma}_2}{m_1 m_2}$$

Bariones

$$m(Q_1 Q_2 Q_3) = m_1 + m_2 + m_3 + K \sum_{i<j} \frac{\vec{\sigma}_i \vec{\sigma}_j}{m_i m_j}$$

Masas de los hadrones

- Las masas de los octetes de **mesones** se reproducen con precisión utilizando

$$m_u = m_d = 310 \text{ MeV} \quad m_s = 483 \text{ MeV} \quad \text{y} \quad \frac{K}{m_u^2} = 160 \text{ MeV}$$

$$\checkmark \quad m^{teo}(\pi_{\bar{u}d}^+) = 310 + 310 + 160 \times \underbrace{(-3)}_{\substack{\downarrow \\ \text{mesón pseudoescalar}}} = 140 \text{ MeV}$$

$$m(\pi^\pm) = 139,56995 \pm 0,00035 \text{ MeV}$$

$$\checkmark \quad m^{teo}(\rho_{\bar{d}\bar{u}}) = 310 + 310 + 160 \times \underbrace{(+1)}_{\substack{\downarrow \\ \text{mesón vectorial}}} = 780 \text{ MeV}$$

$$m(\rho) = 770,0 \pm 0,8 \text{ MeV}$$

- Para los **bariones** se toma

$$m_u = m_d = 363 \text{ MeV} \quad m_s = 538 \text{ MeV} \quad \frac{K}{m_u^2} = 50 \text{ MeV}$$

$$\checkmark \quad m^{teo}(p_{\bar{u}ud}) = 3 \times 363 \underbrace{-3}_{S=1/2} \times 50 = 939 \text{ MeV}$$

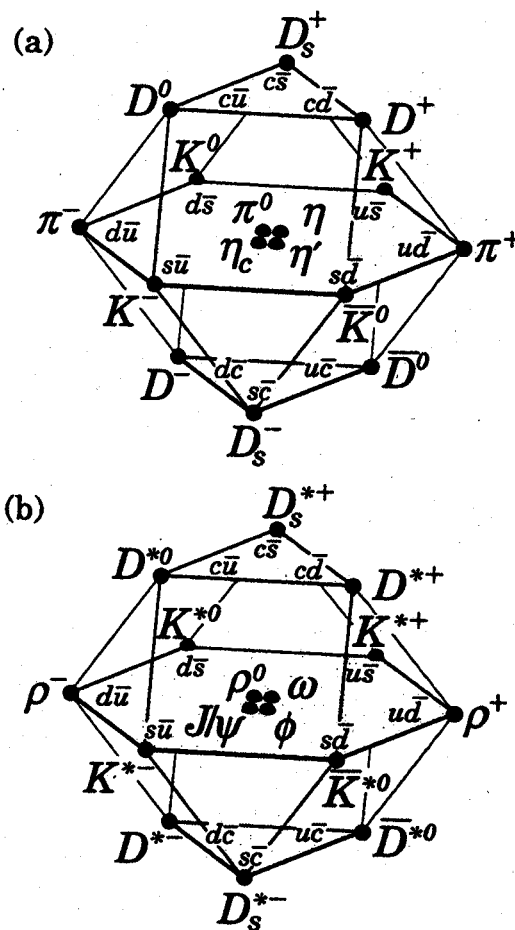
$$m(p) = 938,27231 \pm 0,00028 \text{ MeV}$$

$$\checkmark \quad m^{teo}(\Delta^+_{\bar{u}ud}) = 3 \times 363 \underbrace{+3}_{S=3/2} \times 50 = 1239 \text{ MeV}$$

$$m(\Delta) = 1230 - 1234 \text{ MeV}$$

Multipletes de SU(4). Mesones

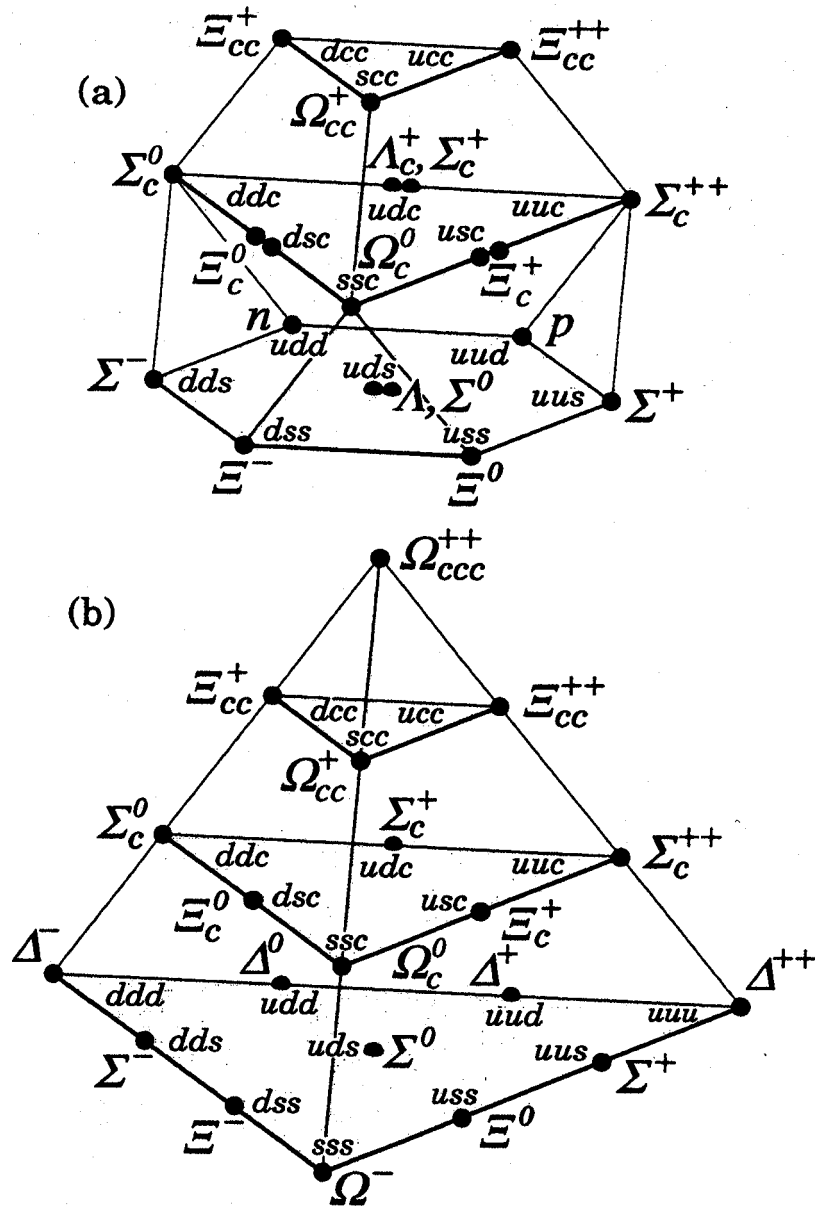
- La aparición del cuarto quark (el encanto, c) introduce una nueva dimensión dando lugar a la simetría SU(4) de sabor



Multipletes de SU(4) para mesones a) pseudoescalares y b) vectoriales compuestos de quarks u, d, s y c

- En el plano $C=0$ aparecen los mesones con encanto $C=0$, como el mesón pseudoescalar η_c (2980) y el mesón vectorial J/ψ (3097) que son estados ligados $c\bar{c}$.

Multipletes de SU(4). Bariones



Multipletes de bariones con quarks u, d, s y c .

- Todos los mesones y bariones encantados de los multipletes anteriores han sido encontrados.