Modelo de Quarks para os Hadrons :

A15

Espectro de Mésons "Leves"

(π^+, π^0, π^-) : $K^+, K^-, K^0, \overline{K^0}$ η e η'

São mésons de spin 0, e com massas $\lesssim m_p, m_n$

"Estranheza" os Mésons K tem estranheza S.

Modelo de Quarks

2 Quarks : u, d

Assumimos que um méson é um estado ligado de um quark com um anti-quark.

Isospin :
- u tem $|\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}\rangle$
- d tem $|\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}\rangle$
- $\bar{u}$ tem $|\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}\rangle$
- $\bar{d}$ tem $(-) |\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\rangle$

Isotripleto $I = 1$

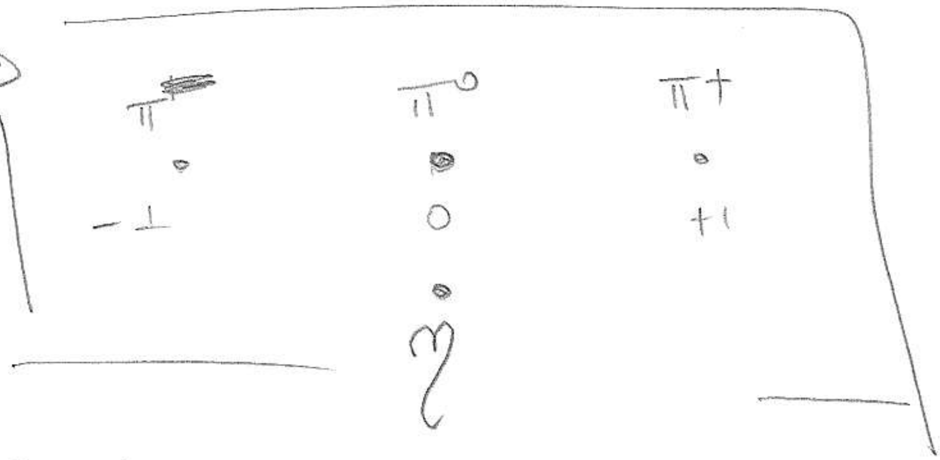
$$
\begin{cases}
|1\,1\rangle = -u\bar{d} \\
|1\,0\rangle = \dfrac{(u\bar{u} - d\bar{d})}{\sqrt{2}} \\
|1\,-1\rangle = d\bar{u}
\end{cases}
$$

Isosingleto

$$|0\,0\rangle = \frac{u\bar{u} + d\bar{d}}{\sqrt{2}}$$

(Fica igual com $u \leftrightarrow d$ pq $\bar{u} \leftrightarrow \bar{d}$ igual)

$\Rightarrow$ SU(2) $\Rightarrow$



$$2 \otimes \bar{2} = 3 \oplus 1$$

SU(2) isospin é uma simetria das interações fortes $\Rightarrow$ ($\pi^+, \pi^-, \pi^0, \eta$)!

3 Quarks : u, d, s

s tem $I=0$! (NÃO está no p ou n)

Agora podemos ter

$K^+ = u\bar{s}$, $K^0 = d\bar{s}$; $\bar{K}^0 = -s\bar{d}$; $K^- = s\bar{u}$

$I_3 = \frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$

Além de que temos 2 possíveis jeitos de fazer $I=0$:

$$\eta = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} - 2s\bar{s}}{\sqrt{6}}$$

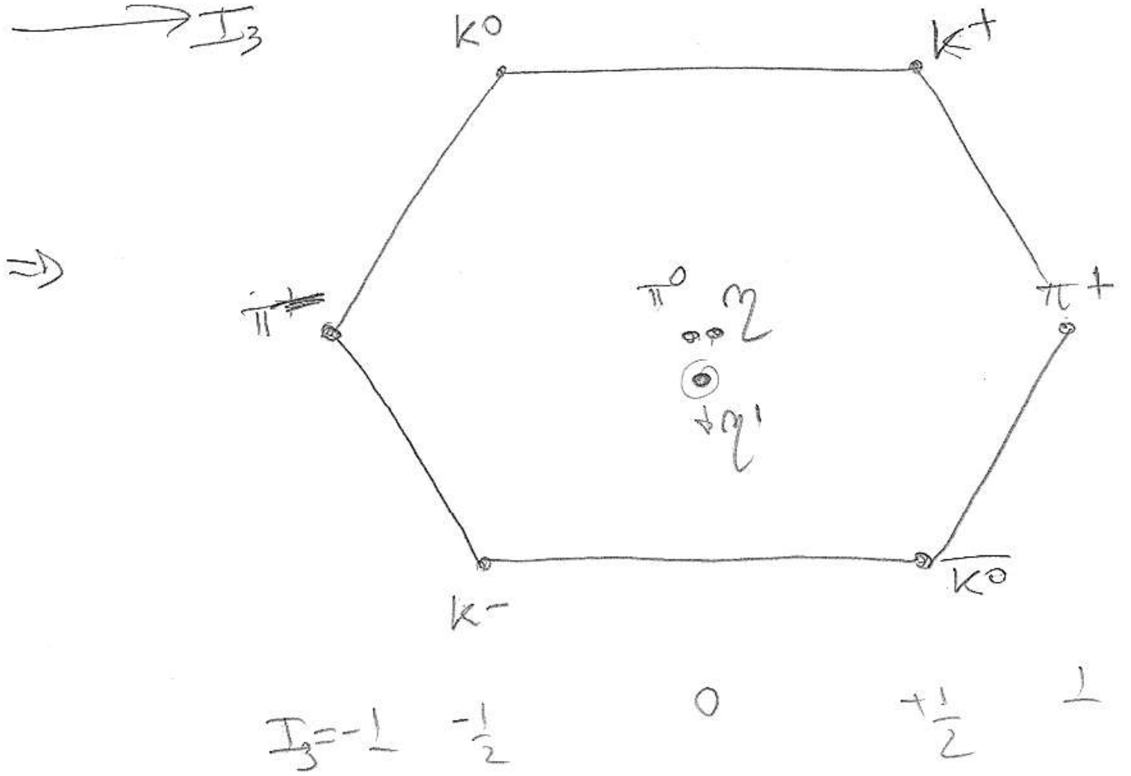
singleto de SU(2) Isospin

ou

$$\eta' = \frac{u\bar{u} + d\bar{d} + s\bar{s}}{\sqrt{3}}$$

o η' é um singleto de

$$\begin{matrix} u & & u \\ d & \rightarrow & d \\ s & & s \end{matrix}$$



$\Rightarrow$

Octeto de Mésons de SU(3)

$(\pi^-, \pi^0, \pi^+, K^0, \overline{K^0}, K^-, K^+, \eta)$

Singleto de SU(3) $\boxed{\eta'}$

Em função de T. de Grupos

$$\boxed{3 \otimes \overline{3} = 8 \oplus 1}$$

Esses mésons escalares correspondem (spin=0)

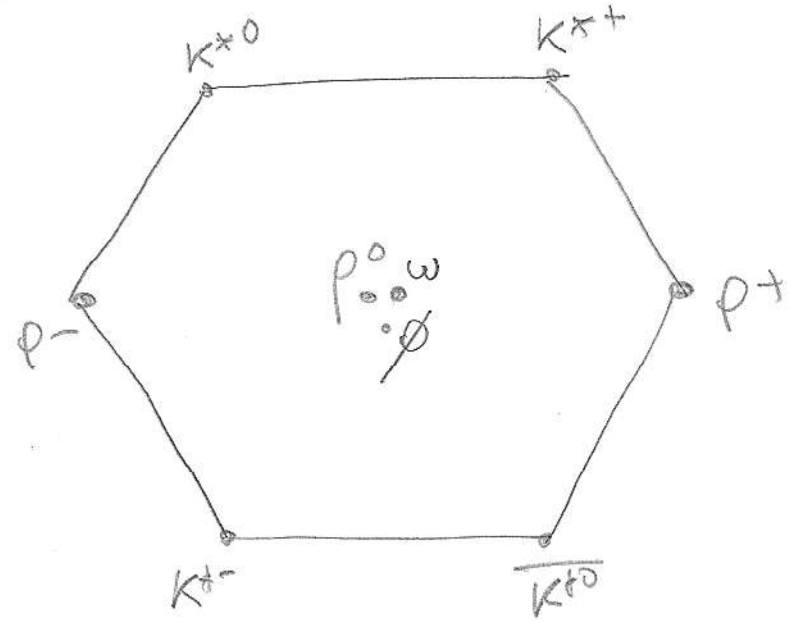
a ter o quark e o anti-quark com as helicidades opostas

$$\uparrow\downarrow \Rightarrow S=0$$

Mas podemos por eles formando um méson de spin 1: $\uparrow\uparrow \Rightarrow S=1$

mésons vetoriais:

Mesmo conteúdo de "sabor" que o octeto de SU(3)



são, em geral, um pouco mais pesados

$$m_V \simeq m_p, m_n$$

Bárions: (leves) $\Rightarrow q = u, d, s$

$\Rightarrow$ 3 Quarks

Estado Fundamental $\Rightarrow$ Momento angular orbital Relativo $= 0$ $\boxed{L = 0}$

$\Rightarrow \vec{J}$ é a soma dos spins

$\uparrow\uparrow\uparrow = 3/2$, etc $\Rightarrow 2^3$ possíveis estados

$\downarrow\downarrow\downarrow = -3/2$

Princípio de Exclusão de Pauli - Partículas "Idênticas"

Dois férmions idênticos

$\Rightarrow$ função de onda $\psi(1,2)$ é anti-simétrica

$$\Rightarrow \quad \psi(1,2) = -\psi(2,1)$$

(Para bósons é simétrica!)

Em geral, com n férmions "idênticos"

$$\psi(1, \ldots i, j, \ldots n) = -\psi(1, \ldots j, i, \ldots n)$$

Exemplo de 2 férmions:

$$\psi(1,2) = \frac{\left(\psi_\alpha(1)\psi_\beta(2) - \psi_\alpha(2)\psi_\beta(1)\right)}{\sqrt{2}}$$

ψ_α, ψ_β são estados.

$$\Rightarrow \underline{\psi(1,2) = -\psi(2,1)}$$

Exclusão de Pauli: 1 e 2 não podem estar no mesmo estado.

$$\boxed{\psi(1,2) = 0 \quad \text{para } \psi_\alpha = \psi_\beta \,!}$$

A função de Onda Total dos fermions tem de ser ~~totalmente~~ antisimétrica sob troca de 2 férmions.

$$\Rightarrow \boxed{\psi = \psi_{(espacial)}\,\psi_{(spin)}\,\psi_{(sabor)}}$$

$$\psi_{(espacial)} = (-1)^{l} \Rightarrow \text{se } l = 0 \text{ (Estado fundamental)}$$

$$\Rightarrow \boxed{\psi_{(espacial)} \text{ é simétrica}}$$

$\underline{\psi_{(spin)}}$ & possíveis combinações de spin

$\uparrow\uparrow\uparrow$, $\uparrow\uparrow\downarrow$, $\uparrow\downarrow\uparrow$, ---

Clasificar de acordo com o momento angular total : $\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$

$S_T = \frac{3}{2}$

$S_T = \frac{1}{2}$

$S_T = \frac{3}{2}$

$|\frac{3}{2}; \frac{3}{2}\rangle = \uparrow\uparrow\uparrow$

$|\frac{3}{2}; \frac{1}{2}\rangle = \frac{(\uparrow\uparrow\downarrow + \uparrow\downarrow\uparrow + \downarrow\uparrow\uparrow)}{\sqrt{3}}$

$|\frac{3}{2}; -\frac{1}{2}\rangle = \frac{(\uparrow\downarrow\downarrow + \downarrow\uparrow\downarrow + \downarrow\downarrow\uparrow)}{\sqrt{3}}$

$|\frac{3}{2}; -\frac{3}{2}\rangle = \downarrow\downarrow\downarrow$

Simétricas sob $\leftrightarrow$

$S_T = \frac{1}{2}$

$|\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\rangle = \frac{(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)}{\sqrt{2}}\uparrow$

$|\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}\rangle = \frac{(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)}{\sqrt{2}}\downarrow$

antisimétrica na troca $1 \Leftrightarrow 2$

$S_T = \frac{1}{2}$

$|\frac{1}{2}; \frac{1}{2}\rangle = \uparrow\frac{(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)}{\sqrt{2}}$

$|\frac{1}{2}; -\frac{1}{2}\rangle = \downarrow\frac{(\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow)}{\sqrt{2}}$

antisimétrica na troca $2 \Leftrightarrow 3$

A troca $1 \Longleftrightarrow 3$ não é independente!

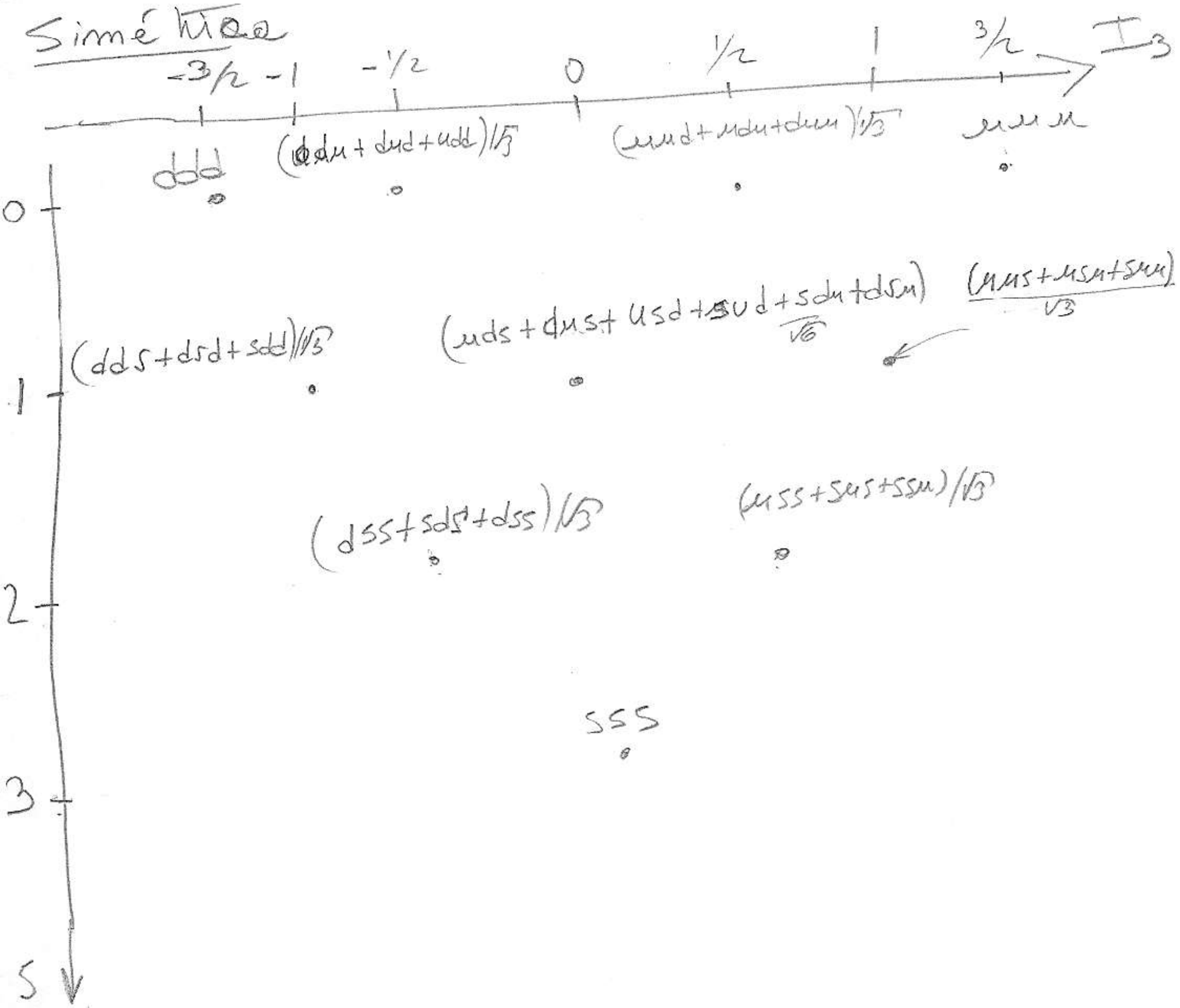
Ψ(sabor) com $f = u, d, s \longleftarrow SU(3)$

$3 \times 3 \times 3 \Rightarrow 27$ possibilidades:

uuu, uud, udd, ----- sss

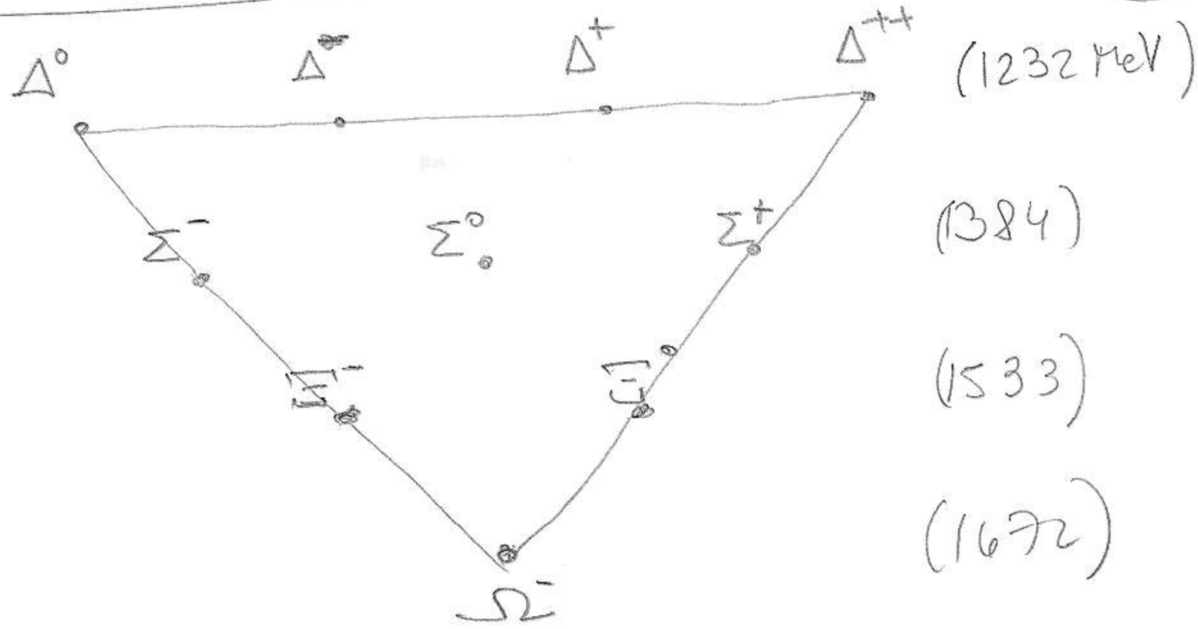
Também podemos ter Ψ(sabor) simétrica (eg. sss) ou anti-simétrica:

Simétrica



Decupleto de Bárions

(11)



$\boxed{Spin = \frac{3}{2}}$

No limite de SU(3)
$\Rightarrow$ Todos tem mesma massa

Antissimétrico: Exemplo

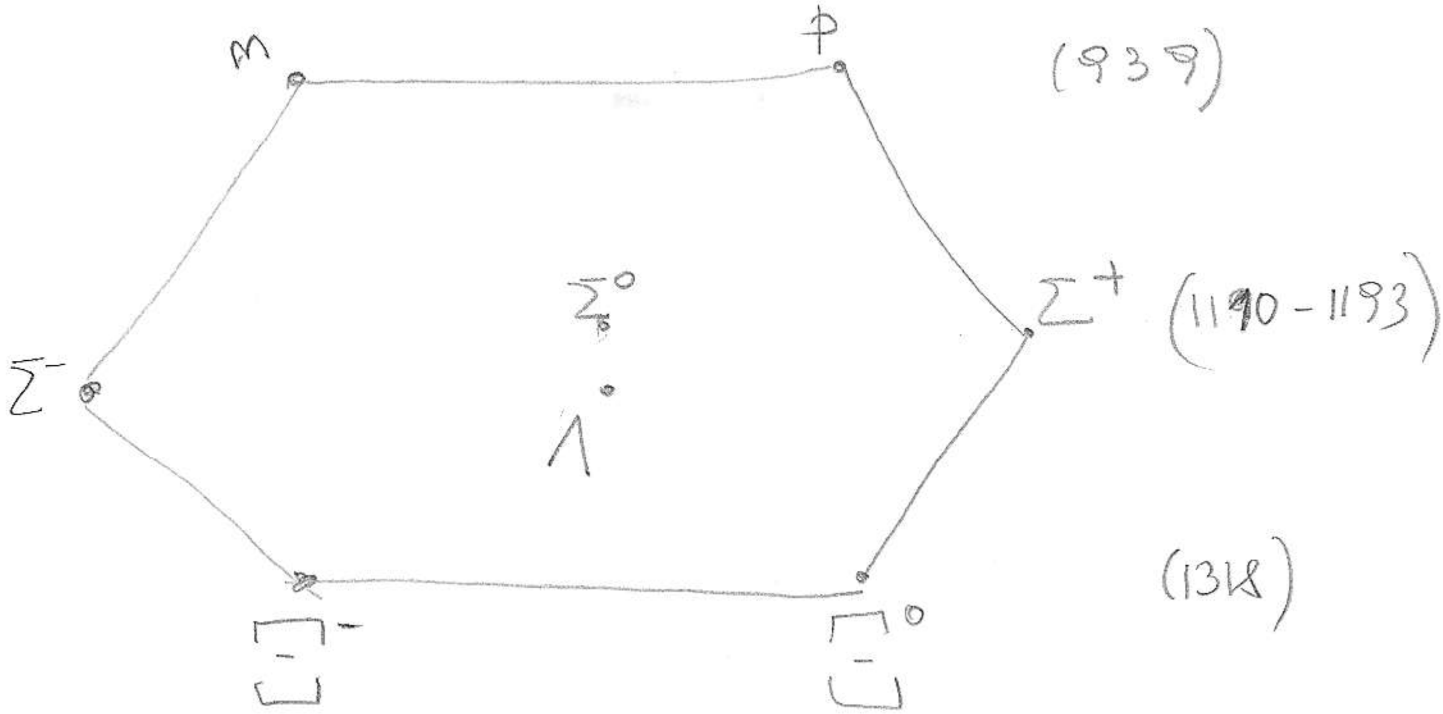
$(ud-du)d/\sqrt{2}$ $(ud-du)u/\sqrt{2}$

$(ds-sd)d/\sqrt{2}$ $(us-su)u/\sqrt{2}$

$(us-su)d + (ds-sd)u$

$(ds-sd)s/\sqrt{2}$ $(us-su)u/\sqrt{2}$

Octeto (Antisim.) de Bárions $\boxed{S = 1/2}$



Tem mais um outro octeto + um singleto

Em termos de T. de Grupos:

$$3 \otimes 3 \otimes 3 = \underset{\downarrow\ \text{sim}}{10} \oplus \underbrace{8 \oplus 8 \oplus 1}_{\text{anti-sim}}$$

Problema

AI-5 (13)

Exemplo: 10 $\psi(\text{spin})$ é sim $(S_T = 3/2)$

$\psi(\text{sabor})$ é sim

$\psi(\text{espacial})$ é sim.

MAS deve ser que

$$\boxed{\underset{+}{\psi_{10} = \psi(\text{spin})}\ \underset{+}{\psi(\text{espacial})}\ \underset{+}{\psi(\text{sabor})}\ \text{deve ser anti-sim!!}}$$

Para o 8 também $\psi(\text{spin})$ anti sim

$\psi(\text{sabor})$ anti sim

$$\psi_8 = \underset{-}{\psi(\text{spin})}\ \underset{+}{\psi(\text{espacial})}\ \underset{-}{\psi(\text{sabor})} \quad !!$$

não é anti-sim!!

Introduzir novo número quântico: "Cor"

(Nambu-Han)

. Todos os hádrons tem cor zero (Neutros de cor)

. Quarks tem "carga" de cor /

ψ(cor) é antisimétrico na troca de 2 quarks!

3 cores: $\Rightarrow$ $\epsilon_{ijk} f_i f_j f_k$ é antisimétrico!

Do ponto de vista da teoria de grupos, cores formam um SU(3)!

Pq. SU(3) e não U(3)? (Mais tarde!)