

XXV Reunião de Trabalho sobre Interações Hadrônicas (RETINHA)

Excitações dos novos estados do Charmonium

Vinícius Rodrigues Debastiani

Iniciação Científica – Espectroscopia de Hádrons Exóticos

Orientador: Prof. Dr. Fernando Silveira Navarra

Instituto de Física - Universidade de São Paulo

**O presente trabalho foi realizado com o apoio da
Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade de São Paulo.**

Tópicos

- Introdução
- Charmonium
- Átomo de H, Positronium, Quarkonium
- Estados Exóticos – $X(3872)$ e $Z^+(3900)$
- Proposta de Trabalho

Introdução

Iniciação Científica – Espectroscopia de Hádrons Exóticos

- Estudar os fundamentos da Mecânica Quântica e Física de Partículas Elementares.
- Estudar estados exóticos de charmonium, como o $X(3872)$ e $Z^+(3900)$: entender a física envolvida e os modelos exóticos candidatos a explicá-los.
- Calcular estados excitados como argumento para escolha do melhor modelo exótico.

Charmonium

- Charmonium é “pesado” → abordagem não-relativística
- Estados exóticos de charmonium
- Descoberta do J/ψ em 1974 e a Revolução de Novembro
 - **Samuel Chao Chung Ting** em Brookhaven → J
 - 10 e 11 de novembro: **Burton Richter** no SLAC → ψ
 - J/ψ : o primeiro charmonium observado → Consolidação do modelo dos quarks

$$n^{(2s+1)}l_j = 1^3 S_1$$

SLAC: mesmos números quânticos do fóton virtual ($s = 1$)

$$e^+e^- \rightarrow \gamma \rightarrow J/\psi$$

- Duas semanas depois: $\psi'(2^3 S_1)$
(1ª excitação radial)

Charmonium é “pesado”

- Energia de ligação (potencial) é pequena se comparada com a energia (massa) de repouso dos constituintes
- Energia Cinética \sim Energia Potencial (pelo Teorema do Virial) \rightarrow Energia Cinética é pequena se comparada com a energia de repouso (isto é, o momento dos quarks envolvidos é muito menor do que a sua massa de repouso)
- \rightarrow Charmonium pode ser tratado como não-relativístico através da equação de Schrödinger e potencial de Cornell
 - \rightarrow Espectro dos níveis de energia

Átomo de Hidrogênio

$$E_n^H = -\alpha^2 mc^2 \left(\frac{1}{2n^2} \right) = -13.6 eV / n^2$$

$$\alpha \equiv \frac{e^2}{\hbar c} \cong \frac{1}{137.036}$$

- Modelo para estados ligados

- Não-relativístico → Equação de Schrödinger $H \Psi = \left(-\frac{\nabla^2}{2\mu} + V \right) \Psi = E \Psi$

- Potencial Coulombiano $V(r) = -e^2 / r$

Estrutura Fina:
$$\Delta E_{fina}^H = -\alpha^4 mc^2 \frac{1}{4n^2} \left(\frac{2n}{(j+1/2)} - \frac{3}{2} \right) \quad j = l \pm \frac{1}{2}$$

- Correção Relativística no momento $T = p^2 / 2m - p^4 / 8m^3 c^2 + \dots \quad p \rightarrow -i\hbar \nabla$

- Acoplamento Spin-órbita

$$\boldsymbol{\mu}_e = -\frac{e}{mc} \mathbf{S}$$

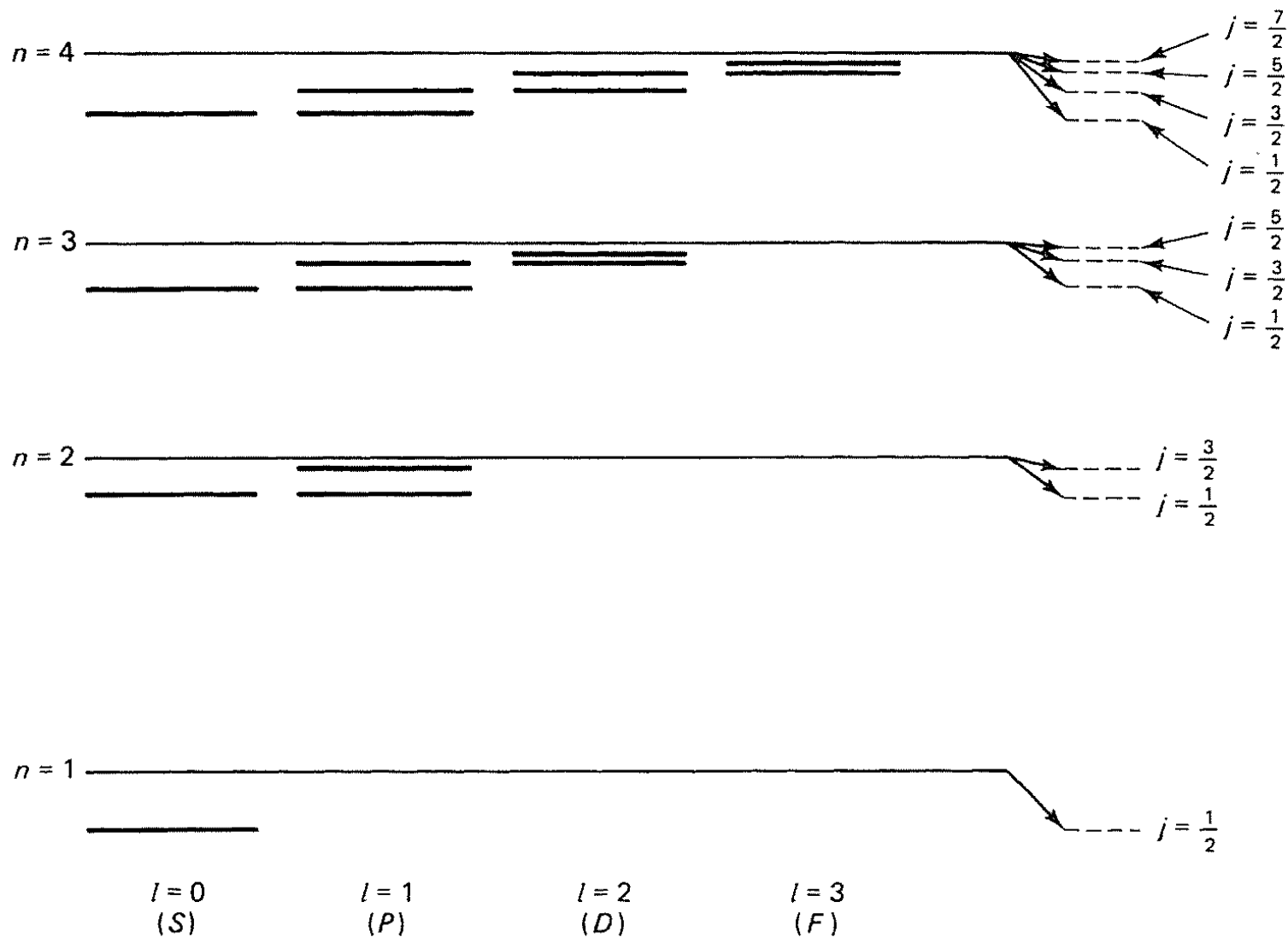


Fig. 5.2 Fine structure in hydrogen. The n th Bohr level (fine line) splits into n sub-levels (dashed lines), characterized by $j = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots, (n - \frac{1}{2})$. Except for the last of these, two different values of l contribute to

each level: $l = j - \frac{1}{2}$ and $l = j + \frac{1}{2}$. Spectroscopists' nomenclature – S for $l = 0$, P for $l = 1$, D for $l = 2$, F for $l = 3$ – is indicated. All levels are shifted downward, as shown (the diagram is not to scale, however).

- Lamb Shift (QED) $\Delta E^H_{Lamb} = \alpha^5 mc^2 \frac{1}{4n^3} k(n,0) \quad l=0$

$$\Delta E^H_{Lamb} = \alpha^5 mc^2 \frac{1}{4n^3} \left\{ k(n,l) \pm \frac{1}{\pi(j+1/2)(l+1/2)} \right\} \quad l \neq 0 \quad j = l \pm \frac{1}{2}$$

- Estrutura Hiperfina: $\Delta E^H_{hiper} = \left(\frac{m}{m_p} \right) \alpha^4 mc^2 \frac{\gamma_p}{2n^3} \left(\frac{\pm 1}{(f+1/2)(l+1/2)} \right) \quad f = j \pm \frac{1}{2}$

- Acoplamento spin-spin (próton-elétron)

$$\boldsymbol{\mu}_p = -\gamma_p \frac{e}{m_p c} \mathbf{S}_p$$

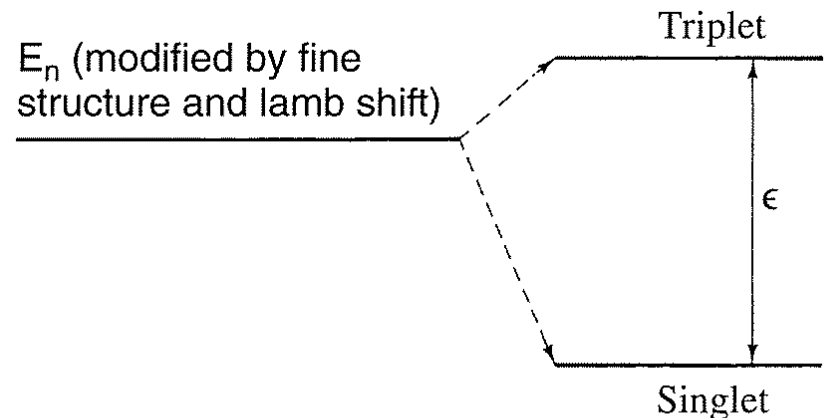


Fig. 5.4 Hyperfine splitting for $l = 0$.

Positronium

- Modelo de partícula-antipartícula

Massa reduzida:

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} = \frac{m}{2} \rightarrow E_n^{pos} = \frac{1}{2} E_n^H = -\alpha^2 m c^2 \left(\frac{1}{4n^2} \right) = \frac{-6.8 eV}{n^2}$$

- Estrutura “Fina” e “Hiperfina” da mesma ordem ($m_{e^+} / m_{e^-} = 1$)

(incluindo correções de potencial retardado):

$$\Delta E_{fina}^{pos} = \alpha^4 m c^2 \frac{1}{2n^3} \left(\frac{11}{32n} - \frac{(1 + \varepsilon/2)}{(2l+1)} \right) \quad \begin{array}{l} \varepsilon = 0 \quad \rightarrow \text{singeto} \\ \varepsilon = \varepsilon(l) \quad \rightarrow \text{tripleto} \end{array}$$

- Aniquilação: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$ Aumenta a energia do tripleto: ($l = 0, s = 1$)

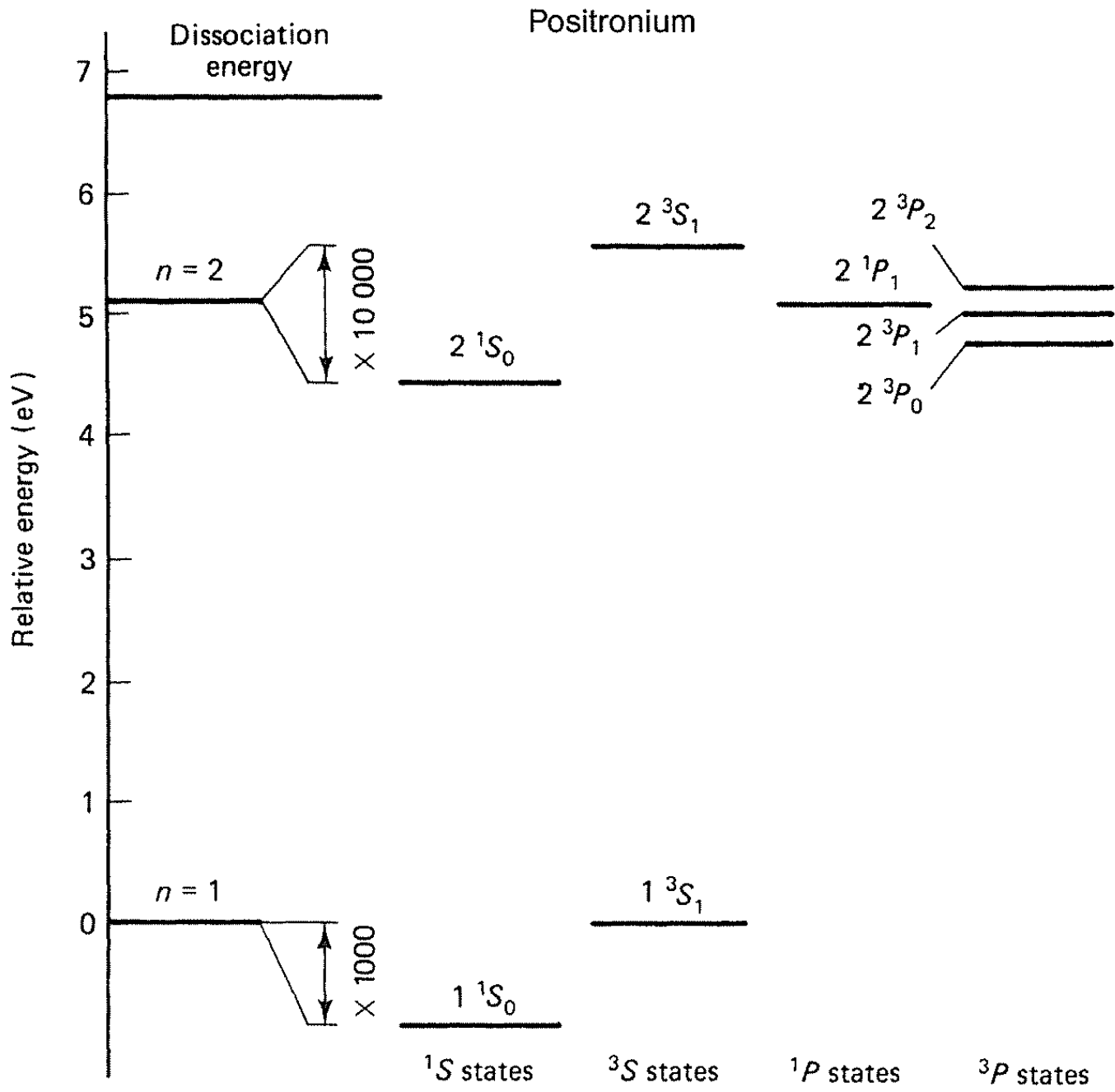
- superposição $\rightarrow l = 0$

$$\Delta E_{aniq}^{pos} = \alpha^4 m c^2 \frac{1}{4n^3}$$

- conservação dos números quânticos:

$s = 0 \rightarrow$ número par de fótons (2)

$s = 1 \rightarrow$ número ímpar de fótons (3)



Quarkonium

- Energia de interação na massa:

$$M = m_1 + m_2 + E / c^2$$

- Acoplamento devido à força forte, diferente do átomo de H ou positronium (força eletromagnética)

Cromodinâmica é similar à Eletrodinâmica:

- Troca de glúon ~ troca de fóton

→ Coulombiano a curtas distâncias:

$$V \sim 1/r$$

- Confinamento

→ linear $V \sim r$

Potencial de Cornell:
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s \hbar c}{r} + F_0 r$$

Table 4.4 Quark masses (MeV/c²)

Quark flavor	Bare mass	Effective mass
<i>u</i>	2	336
<i>d</i>	5	340
<i>s</i>	95	486
<i>c</i>	1300	1550
<i>b</i>	4200	4730
<i>t</i>	174 000	177 000

Warning: These numbers are somewhat speculative and model dependent [12].

Charmonium

- Semelhante ao positronium

$$n^{(2s+1)l_j}$$

n^1S_0 - Singletos $s=l=0 \rightarrow \eta_c$

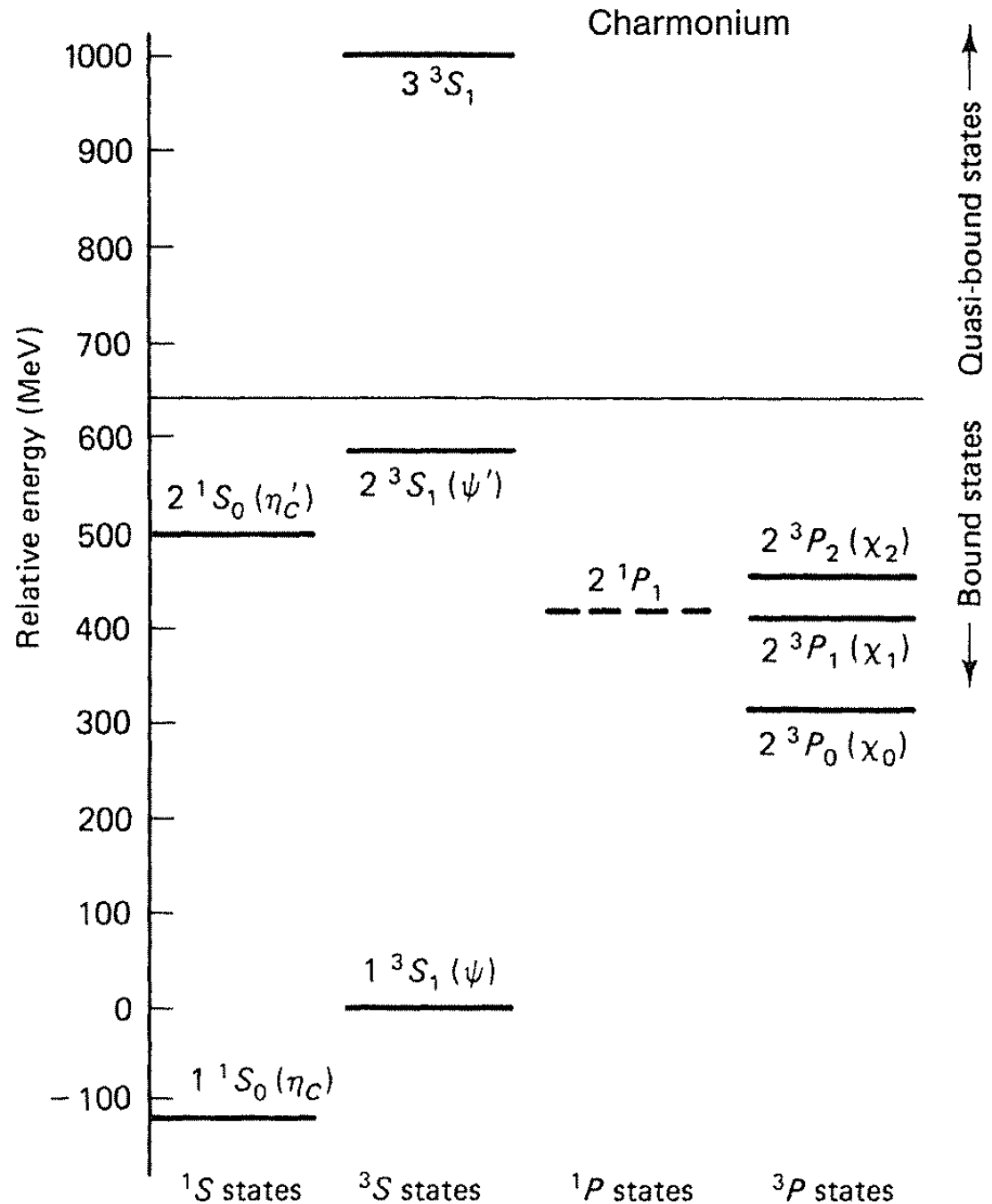
n^3S_1 - Tripletos $s=1, l=0 \rightarrow \psi$

n^3P_j - Tripletos $s=1; l=1 \rightarrow \chi_{cs}$

- Para $n = 1, 2$ o tempo de vida é maior, devido à supressão pelas Regras de OZI

- Para $n \geq 3$ as massas do charmonium estão acima do limiar para a produção de dois mésons D charmosos:

$$D^0 e \bar{D}^0 \text{ ou } D^\pm$$



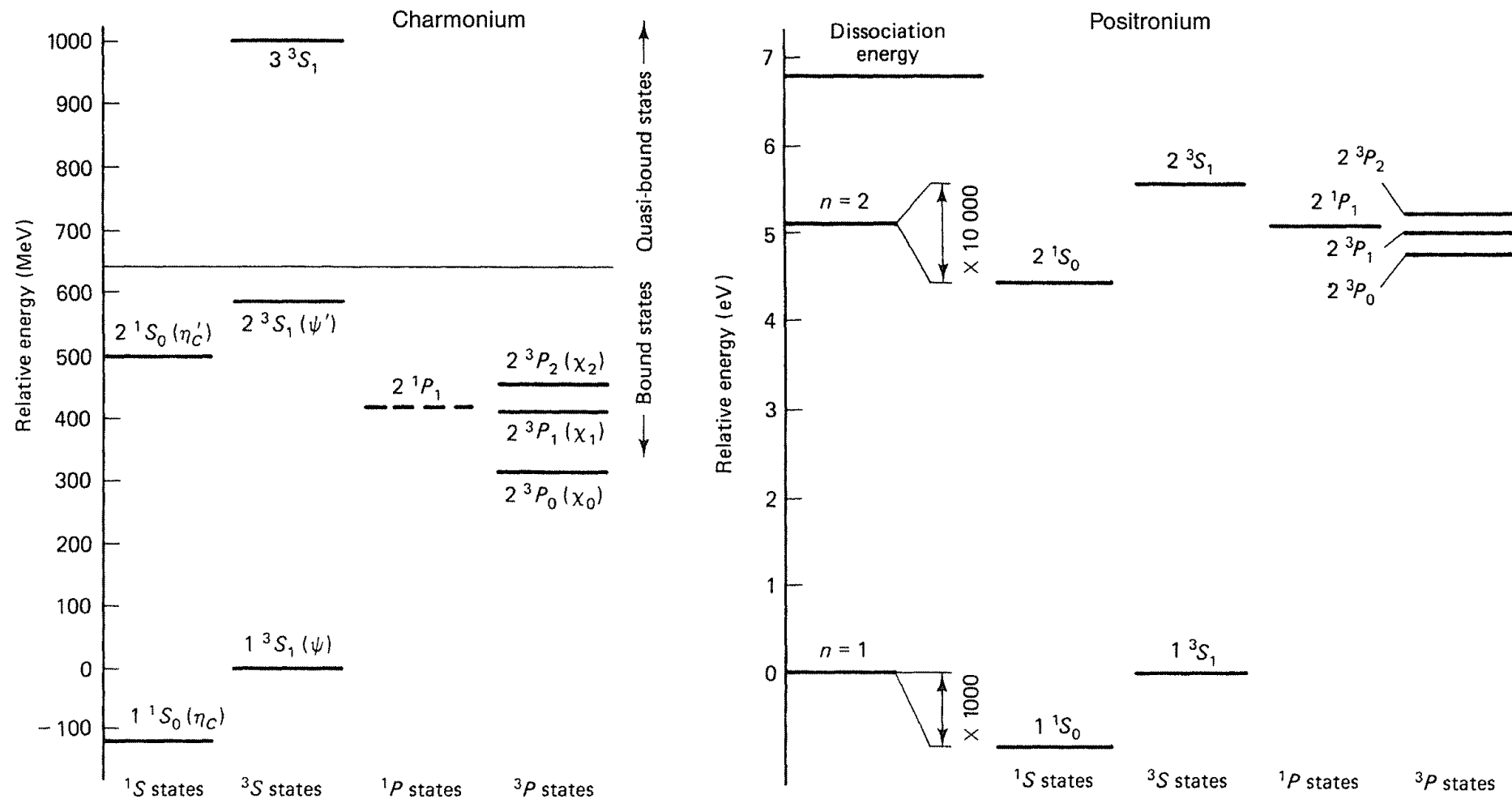


Fig. 5.6 Spectrum of energy levels in positronium and charmonium. Note that the scale is greater by a factor of 100 million for charmonium. In positronium, the various combinations of angular momentum cause only minuscule shifts in energy (shown by expanding the vertical scale), but in charmonium the shifts are much larger. All energies are given with reference to the 1^3S_1 state. At 6.8 eV positronium dissociates. At 633 MeV above the energy of the ψ charmonium becomes quasi-bound, because it can decay into D^0 and \bar{D}^0 mesons. (Source: Bloom, E. and Feldman, G. (May 1982) 'Quarkonium', *Scientific American*, p. 66, reprinted by permission.)

Regras de OZI

Okubo, Zweig, Iizuka

- No decaimento devido às interações fortes.

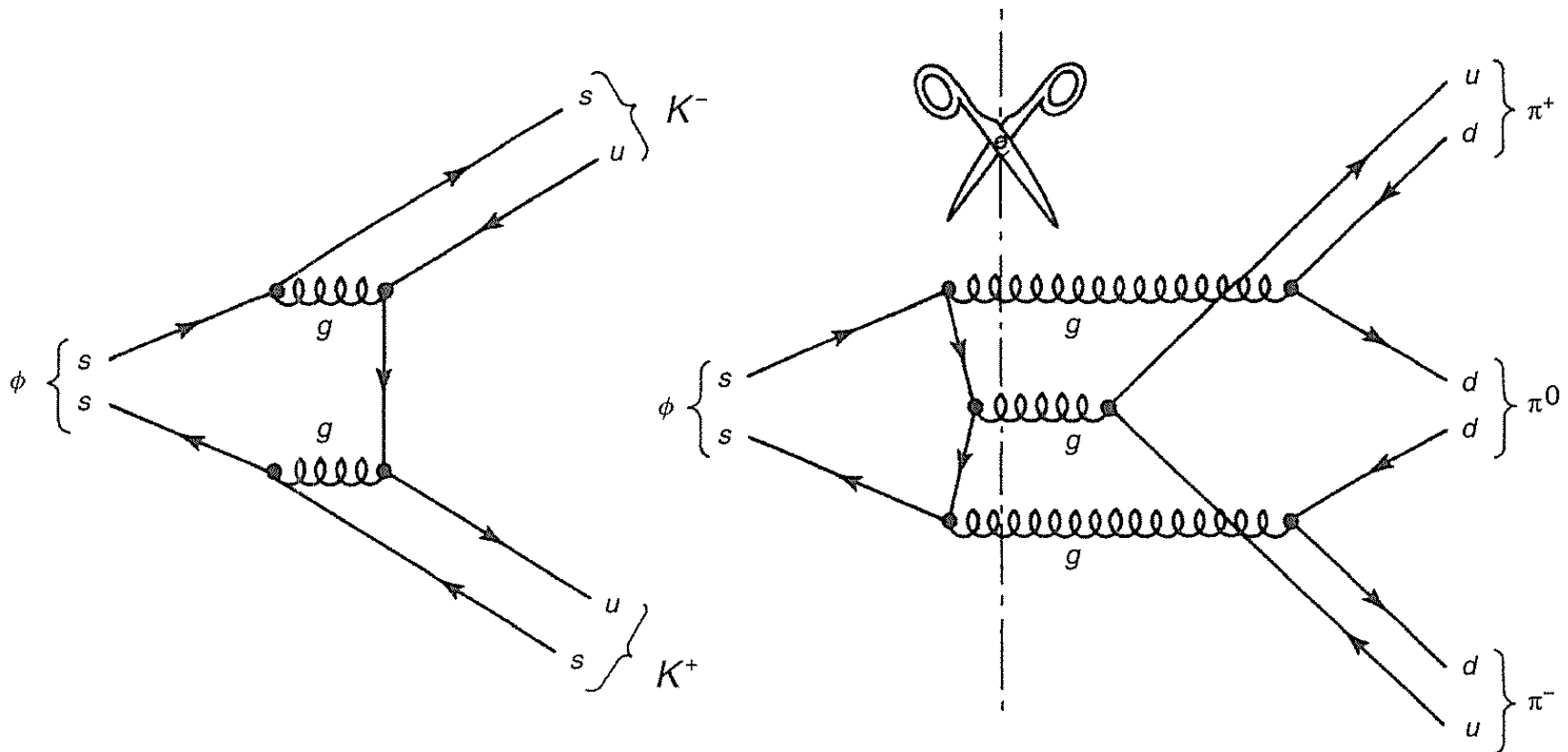
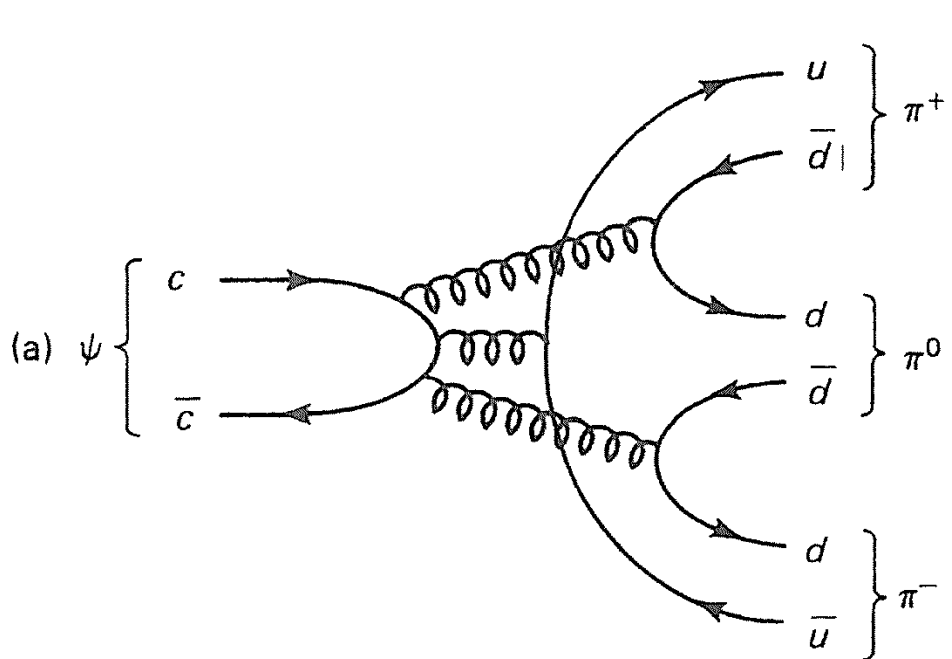


Fig. 2.4 The OZI rule: if the diagram can be cut in two by slicing only gluon lines (and not cutting any external lines), the process is suppressed.

Regras de OZI no Charmonium



→Decaimento $(c\bar{c}) \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$
 suprimido pelas regras de OZI.

→Abaixo do limiar $D\bar{D}$ os decaimentos
 são cineticamente proibidos, o que
 explica a longevidade do J/ψ

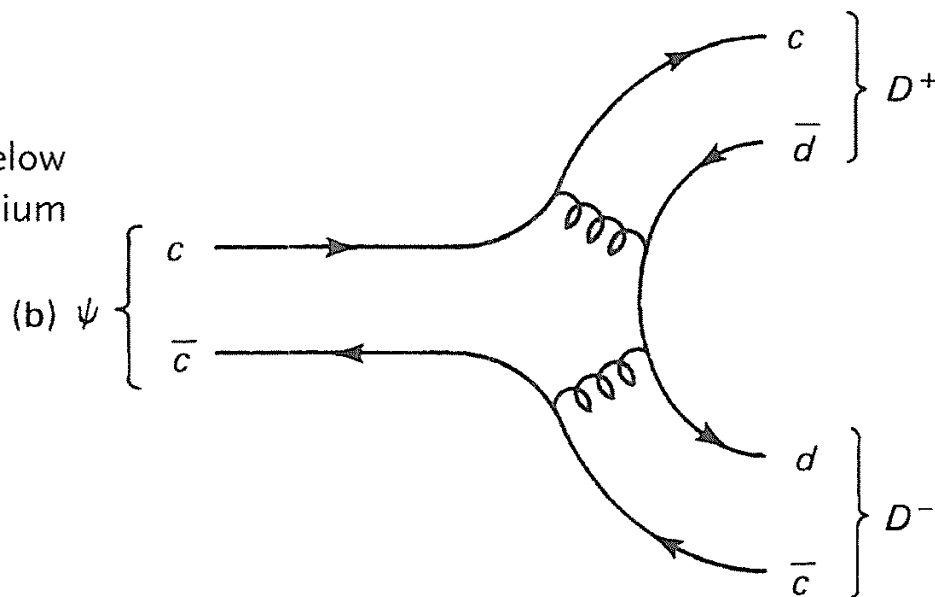


Fig. 5.7 (a) OZI-suppressed decay for charmonium below the $D\bar{D}$ threshold, (b) OZI-allowed decay for charmonium above the $D\bar{D}$ threshold.

→Acima do limiar, o decaimento pode
 ocorrer, o que explica os estados
quasi-ligados

Estados Exóticos

Antes de 2003:

Depois 2003:

Potencial de Cornell :

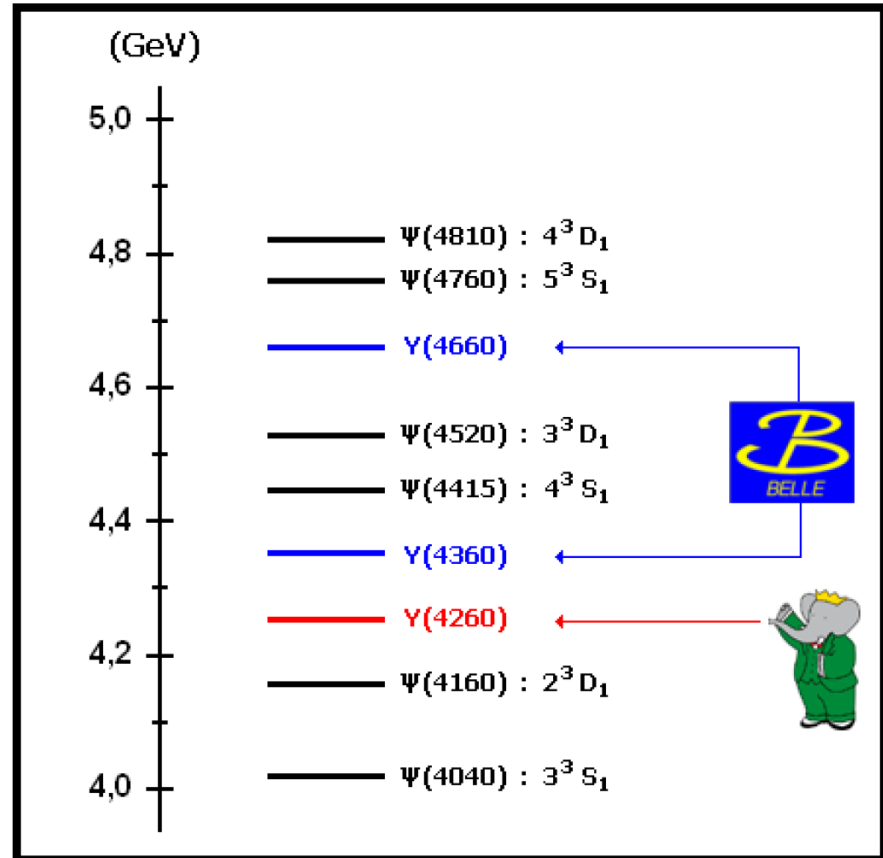
$$V(r) = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} + \sigma r$$

$(\hbar = c = 1)$

Equação de Schrödinger:

$$H \Psi = \left(-\frac{\nabla^2}{2\mu} + V \right) \Psi = E \Psi$$

$$M_n = 2m_Q + E_n$$



“Bom” espectro de quarkonium

Estados com massas “Erradas”

Isospin é um número quântico bom, pois é conservado

Mas o $X(3872)$ viola a conservação de Isospin: (2003)

Decaimento: $\left\{ \begin{array}{l} (c\bar{c}) \rightarrow J/\psi \omega \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad I=0 \\ (c\bar{c}) \rightarrow J/\psi \rho \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad I=1 \end{array} \right. \quad \times$

$$\frac{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- \pi^0)}{\mathcal{B}(X \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-)} = 1.0 \pm 0.4 \pm 0.3.$$

Abandonada a interpretação do X como um estado simples de charmonium ($c\bar{c}$)

Estados com carga elétrica não podem ser simples mésons ($q - \bar{q}$)

$Z^+(4430) \quad Z^+(c\bar{c}u\bar{d}) \rightarrow \psi' \pi^+ \quad (2007)$

10 anos de “mau comportamento”

Table 1: Charmonium states observed in the last years.

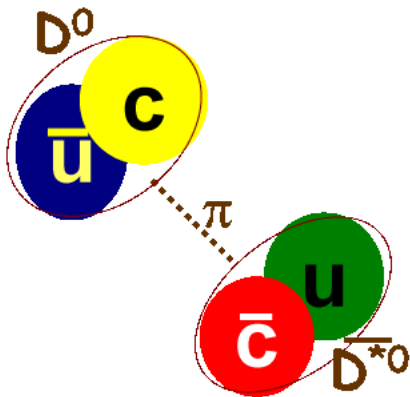
state	production mode	decay mode
$X(3872)$	$B \rightarrow KX(3872)$	$J/\psi\pi\pi$
$X(3915)$	$\gamma\gamma \rightarrow X(3915)$	$J/\psi\omega$
$Z(3930)$	$\gamma\gamma \rightarrow Z(3930)$	$D\bar{D}$
$Y(3930)$	$B \rightarrow KY(3930)$	$J/\psi\omega$
$X(3940)$	$e^+e^- \rightarrow J/\psi X(3940)$	$D\bar{D}^*$
$Y(4008)$	$e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR}Y(4008)$	$J/\psi\pi\pi$
* $Z_1^+(4050)$	$B^0 \rightarrow K^-Z_1^+(4050)$	$\chi_{c1}\pi^+$
$Y(4140)$	$B \rightarrow KY(4140)$	$J/\psi\phi$
$X(4160)$	$e^+e^- \rightarrow J/\psi X(4160)$	$D^*\bar{D}^*$
* $Z_2^+(4250)$	$B^0 \rightarrow K^-Z_2^+(4250)$	$\chi_{c1}\pi^+$
$Y(4260)$	$e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR}Y(4260)$	$J/\psi\pi\pi$
$X(4350)$	$\gamma\gamma \rightarrow X(4350)$	$J/\psi\phi$
$Y(4360)$	$e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR}Y(4260)$	$\psi'\pi\pi$
$Z^+(4430)$	$B^0 \rightarrow K^-Z^+(4430)$	$\psi'\pi^+$
$X(4630)$	$e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR}X(4630)$	$\Lambda^+\Lambda^-$
$Y(4660)$	$e^+e^- \rightarrow \gamma_{ISR}Y(4660)$	$\psi'\pi\pi$

* $Z_c^+(3900) = (c\bar{c}u\bar{d}) \rightarrow J/\psi\pi^+$ (2013)

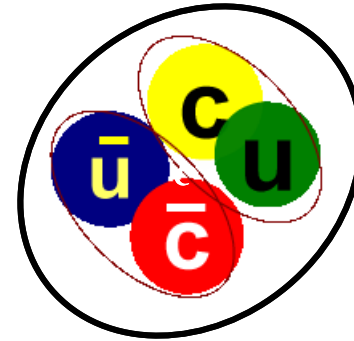
Novas perguntas

Qual a estrutura dos novos estados?

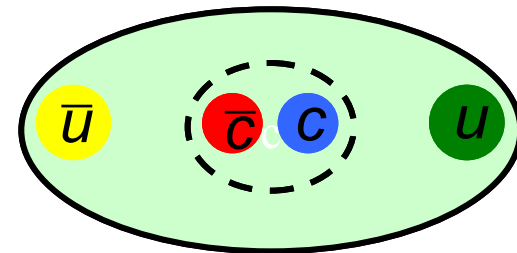
Molécula de mésons



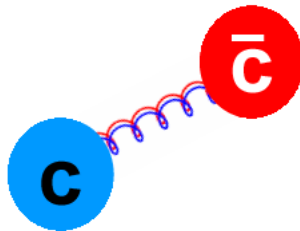
Tetraquark



Hadro-charmonium



Híbrido



$X(3872)$

$$M_X = (3871,20 \pm 0,39) \text{ MeV}$$

- Principais modelos exóticos:

- molécula de mésons:

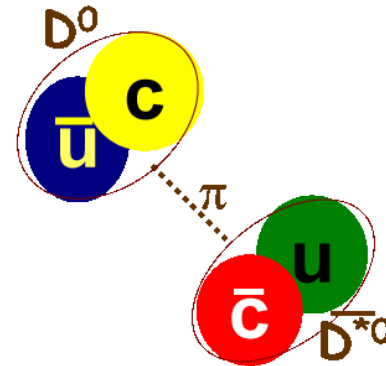
$$D^0 - \bar{D}^{*0} \text{ onde } D^0 = \bar{u}c \text{ e } \bar{D}^{*0} = u\bar{c}$$

- troca de píons: acoplamento fraco
- sem estados excitados

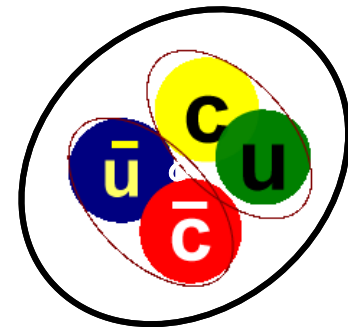
- tetraquark:

- diquark-antidiquark $uc - \bar{u}\bar{c}$

- troca de objetos coloridos: acoplamento forte
- estados excitados possíveis



Molécula de mésons



Tetraquark

→ $J^{PC} = 1^{++}$: LHCb em fevereiro de 2013, arXiv:1302.6269v1

$Z^+(3900)$

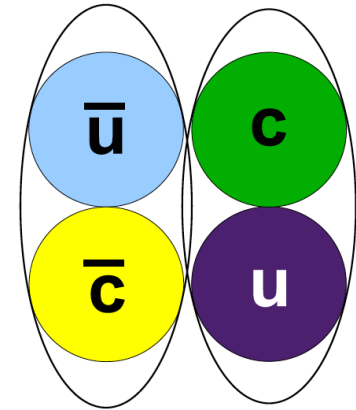
- Descoberto em Abril de 2013
 - BES III (Beijing Electron Positron Collider)
 - Belle (KEK).
- Charmonium com carga elétrica: não pode ser méson ($q - \bar{q}$)
→ Modelo exótico necessário
- Decai em píons carregados e J/ψ , o que é consistente com a hipótese do Z^+ ser composto por quatro quarks ou mais.

Proposta de trabalho

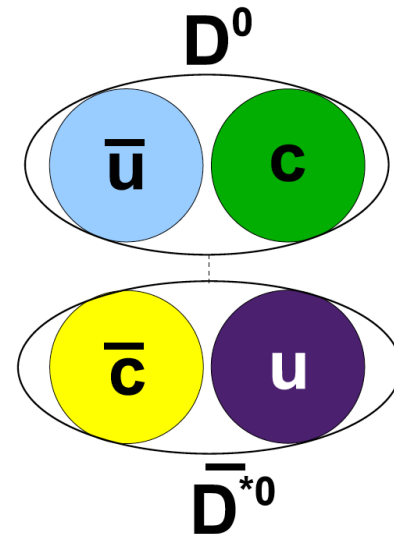
- X é pesado → abordagem não relativística
 - Calcular o espectro dos níveis de energia em busca de estados excitados, resolvendo a equação de Schrödinger com o potencial de Cornell (reduzir o problema de quatro corpos, a dois problemas de dois corpos, cada caso com a respectiva tensão de corda).
 - Para o tetraquark, utilizar a massa do diquark pesado, para a molécula, a massa dos mésons.
 - Usar também o potencial de Yukawa para a molécula de mésons.

Correções adicionais:

- interação spin-órbita para os quarks
 - interação spin-spin entre os quarks
 - variações nas combinações de números quânticos dos diquarks que levam aos números quânticos $J^{PC} = 1^{++}$ para o estado composto (no caso do X).
 - Trabalho semelhante com o $Z^+(3900)$ e outros candidatos a estados exóticos.
- Verificar se as excitações radiais ainda permitem obter estados ligados, o que favorece o modelo de tetraquark devido às interações intensas.



antidiuark - diquark



Referência:

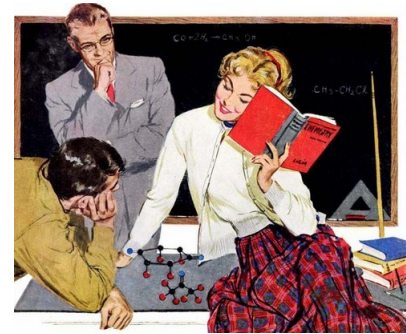
David J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*, Second Revised Edition, 2008, Editora Wiley-VCH.

Extra:

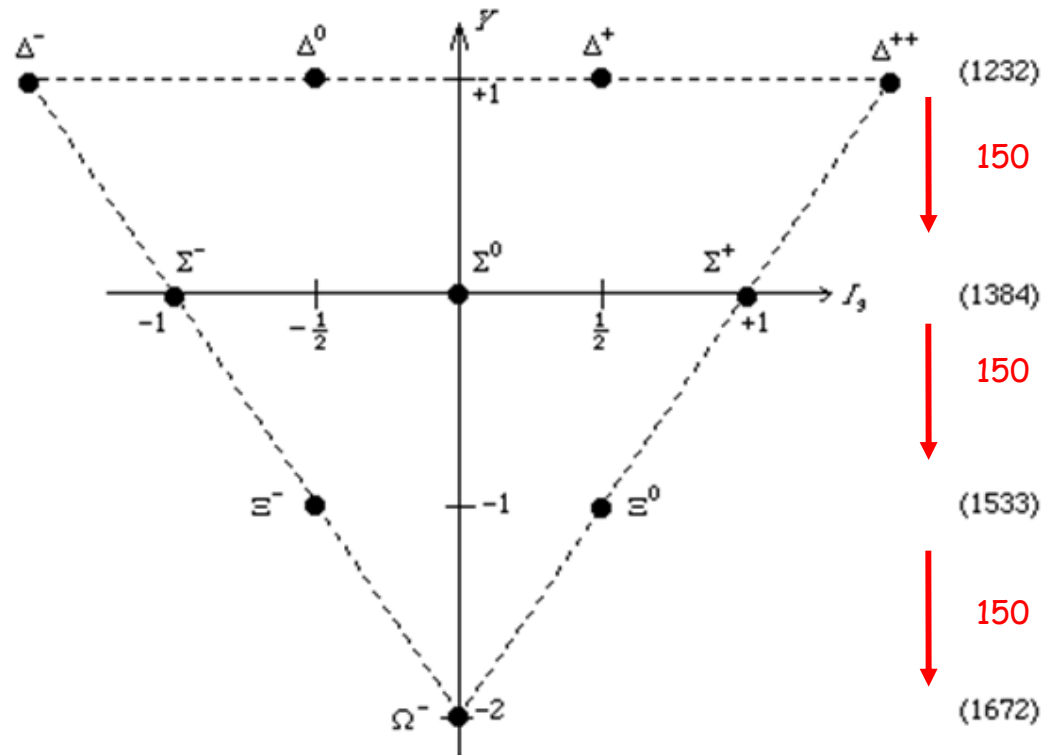
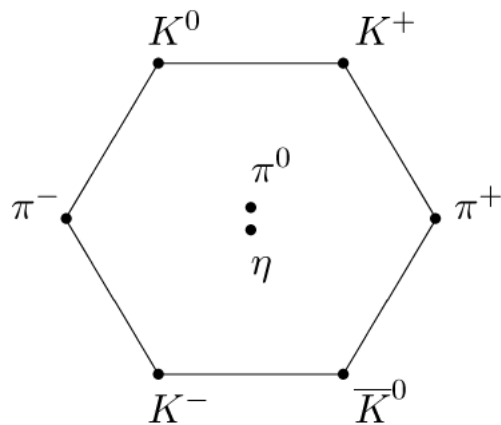
Como agrupar os novos estados?



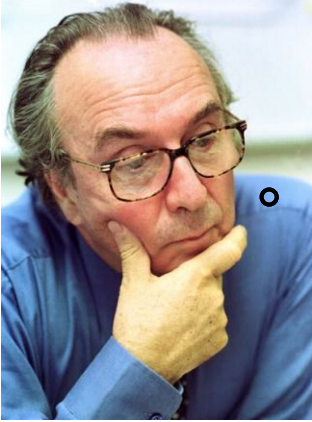
Gell-Mann



fifties,
sixties...

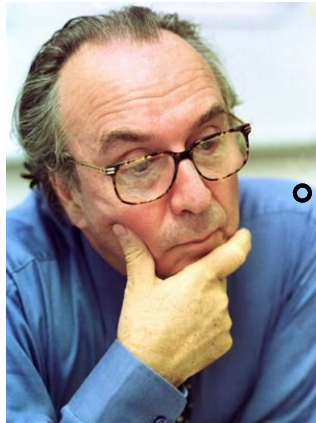


What is the relation between them ?



Maiani (2005)

X(3872) must have a charged partner



Maiani (2007)

Z⁺(4430) is its first radial excitation

$$M_{\Psi(2S)} - M_{\Psi(1S)} = 590 \text{ MeV}$$

$$M_{Z^+(4430)} - M_{X^+(3872)} = 560 \text{ MeV} \quad !$$