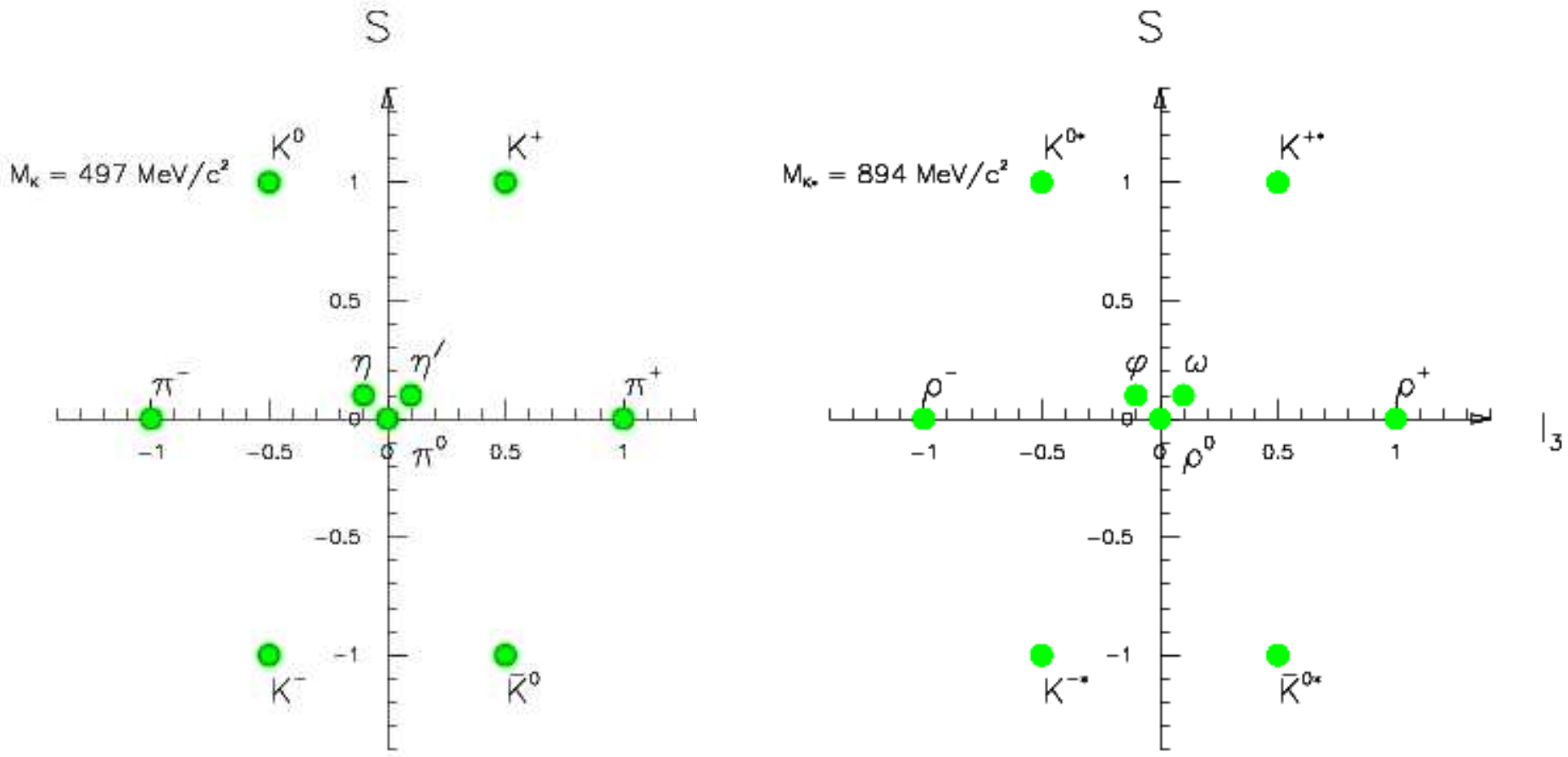
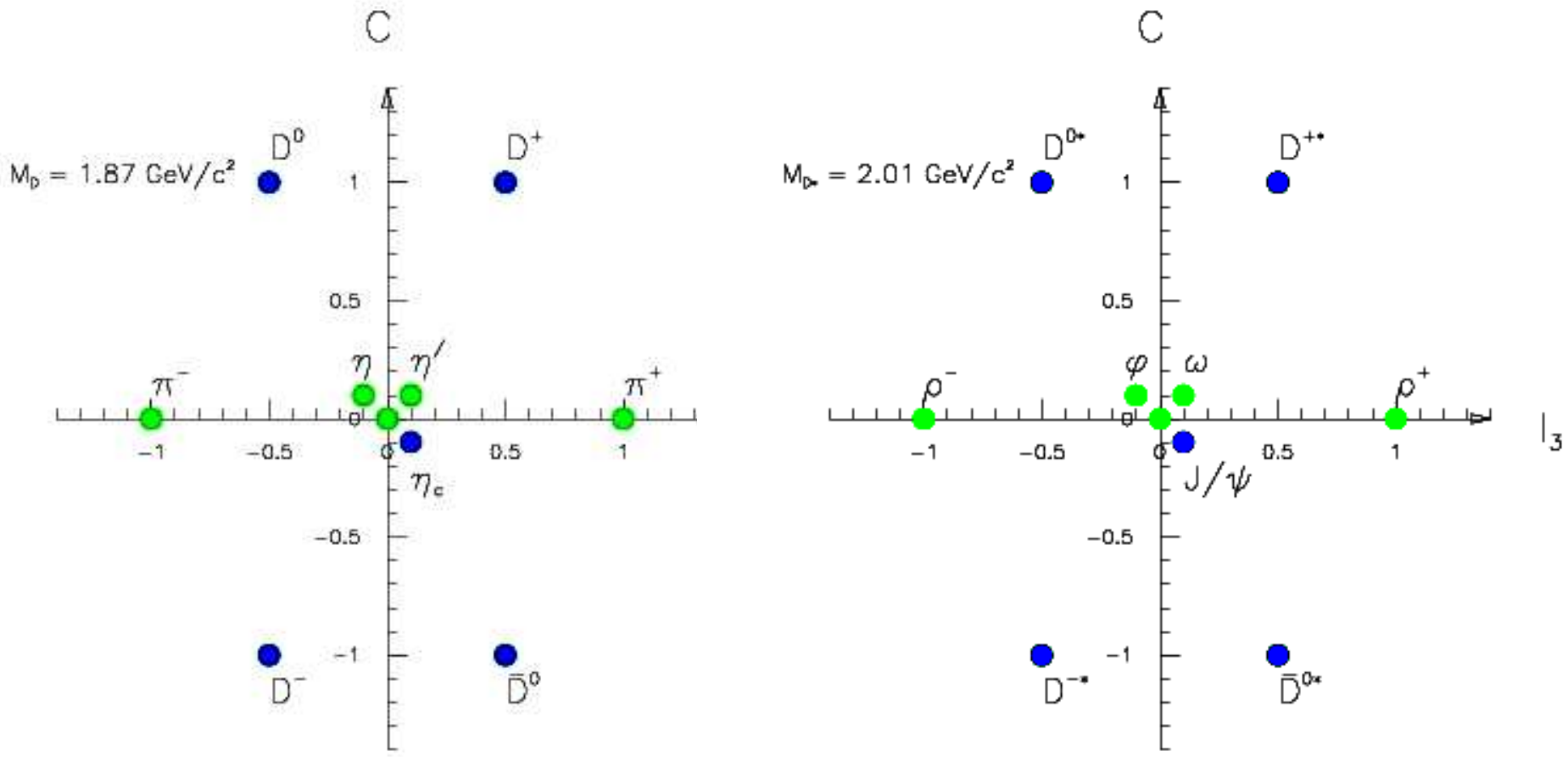
Spettroscopia Adronica / II parte

Roberto Mussa, Seminario per il Corso di Fisica delle Particelle Elementari, AA 2003-2004

Generalizzazione da SU(3) a SU(4) del sapore



Generalizzazione da SU(3) a SU(4) del sapore



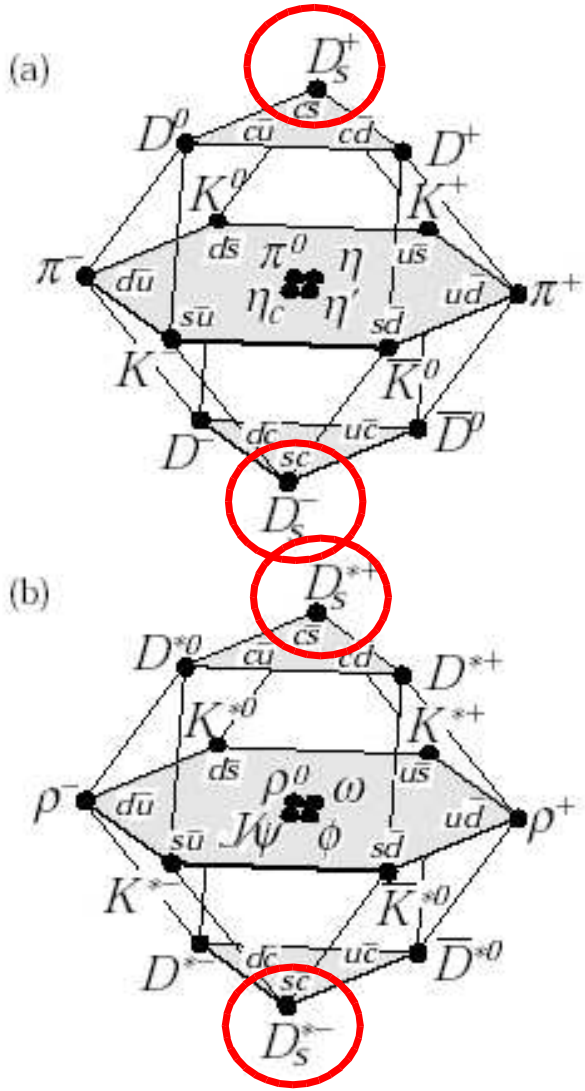
Negli anni dal 1974 al 1980 vengono trovati tutti gli stati pseudoscalari e vettoriali mostrati sopra, ma non solo questi: vengono anche osservate 4 eccitazioni radiali vettoriali, e il tripletto di stati $\chi_C(^3L_{0,1,2})$.

Ulteriori Isosingoletti

La generalizzazione da SU(3) a SU(4) ci porta pero' anche ad ipotizzare l'esistenza di altri mesoni, isosingoletti con S e C non nullo, etichettati in un primo tempo F, poi D_s.

Questi stati vengono osservati nel 1983. Come per i mesoni D ordinari, lo pseudoscalare decade debolmente, ed il vettore e' una risonanza particolarmente stretta: il D_s^* decade EM nel D_s con emissione di un π^0 (6%) o di un γ (94%).

Ma gli stati stretti non finiscono qui...



Ribaltiamo la prospettiva: da $SU(N)_{sapore}$ a $SU(2)_{spin}$

Perche' e' con la scoperta del charmonio e del bottomonio che il modello a quark ha la sua definitiva consacrazione?

Perche' sono sistemi non ultrarelativistici, e le somiglianze con gli stati legati della QED ci consentono di fare importanti paralleli:

- heavy quarkonio $\leftrightarrow$ positronio

- mesone D $\leftrightarrow$ atomo d'idrogeno

Cominciamo dunque a confrontare gli spettri di questi sistemi, fissando i quarks di valenza , al variare di J, L, S.

Esempio QED Numero 1

Stato legato e+e-
Sistema non relativistico
velocita' ~ β ~ α_{QED}

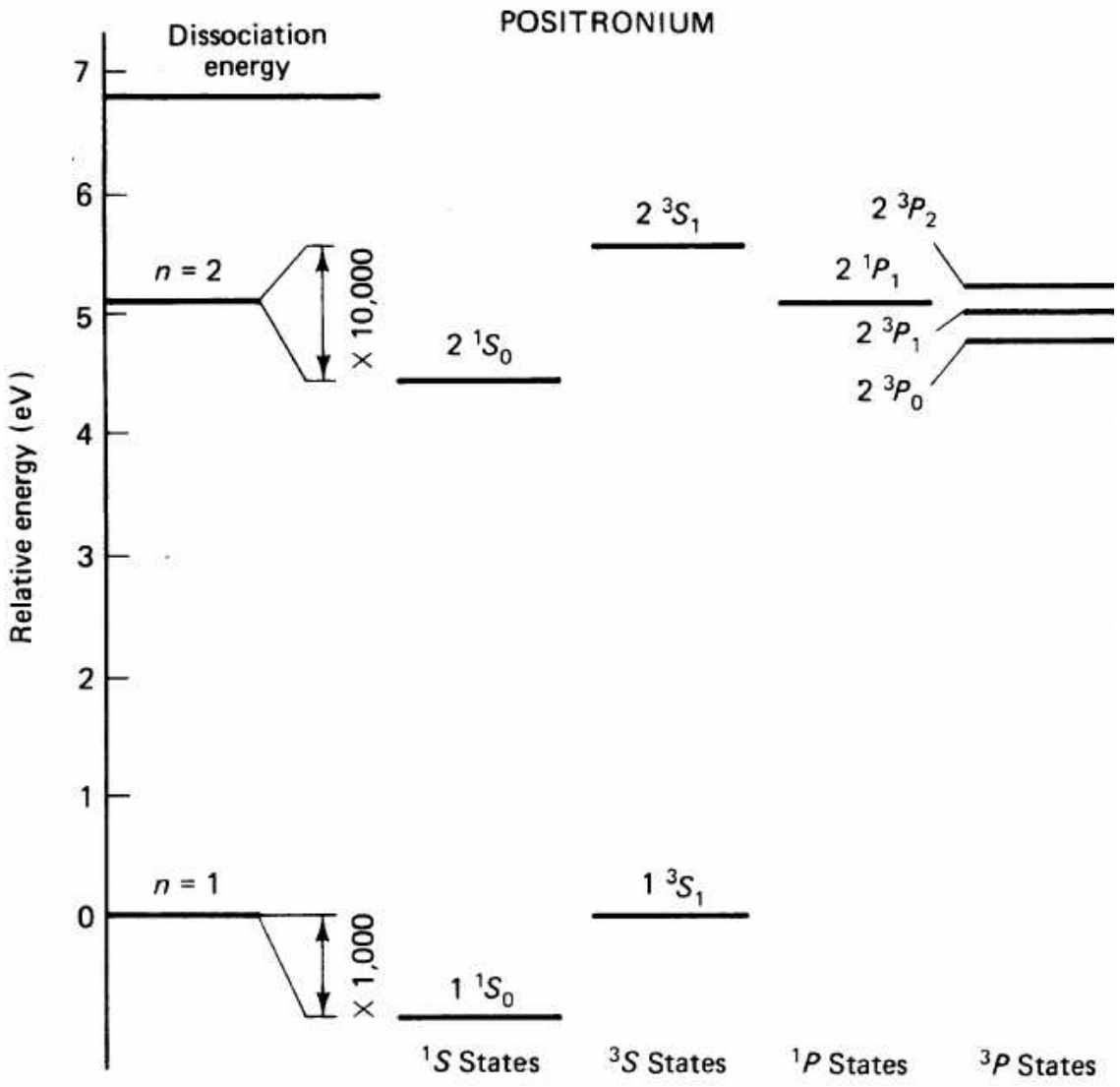
J,L,S buoni numeri quantici

S=0 : *para*positronio
decade in 2 fotoni
vita media breve

S=1 : *orto*positronio
decade in 3 fotoni
vita media lunga

Degenerazione 2S-2P

Splitting iperfine : 1 meV (1S)
0.1 meV (2S)
Splitting fine : 0.03 meV (2P)



Esempio QCD Numero 1a

Stato legato c$\bar{c}$
Sistema quasi relativistico, quasi perturbativo

$\alpha_S \sim 0.3$

J,S buoni numeri quantici
D wave mixing con S wave

S=0 : *para*charmonio (η_C)

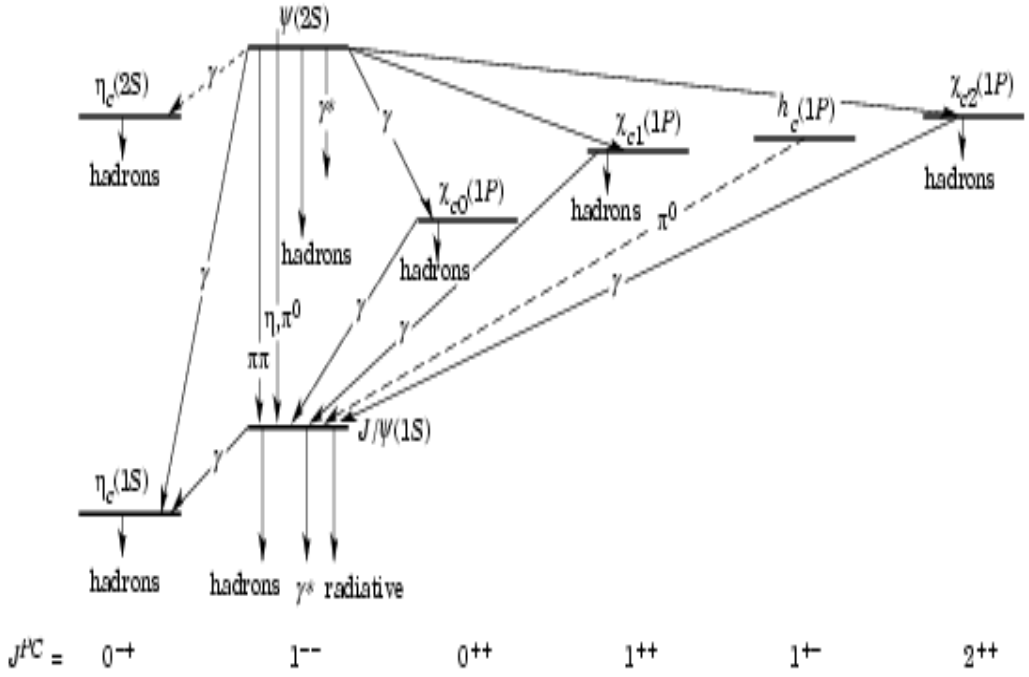
Decade in 2 gluoni
vita media breve: $\Gamma \sim 25$ MeV

S=1 : *orto*charmonio (J/ψ)

Decade in 3 gluoni
250 volte + stretta della η_C

No Degenerazione 2S-2P

Splitting iperfine : 112 MeV (1S)
40-50 MeV (2S)
Splitting fine : 45-100 MeV (1P)



Esempio QCD Numero 1b

Stato legato bb
Sistema NON relativistico, perturbativo
$\alpha_S \sim 0.1$

J,S,L buoni numeri quantici

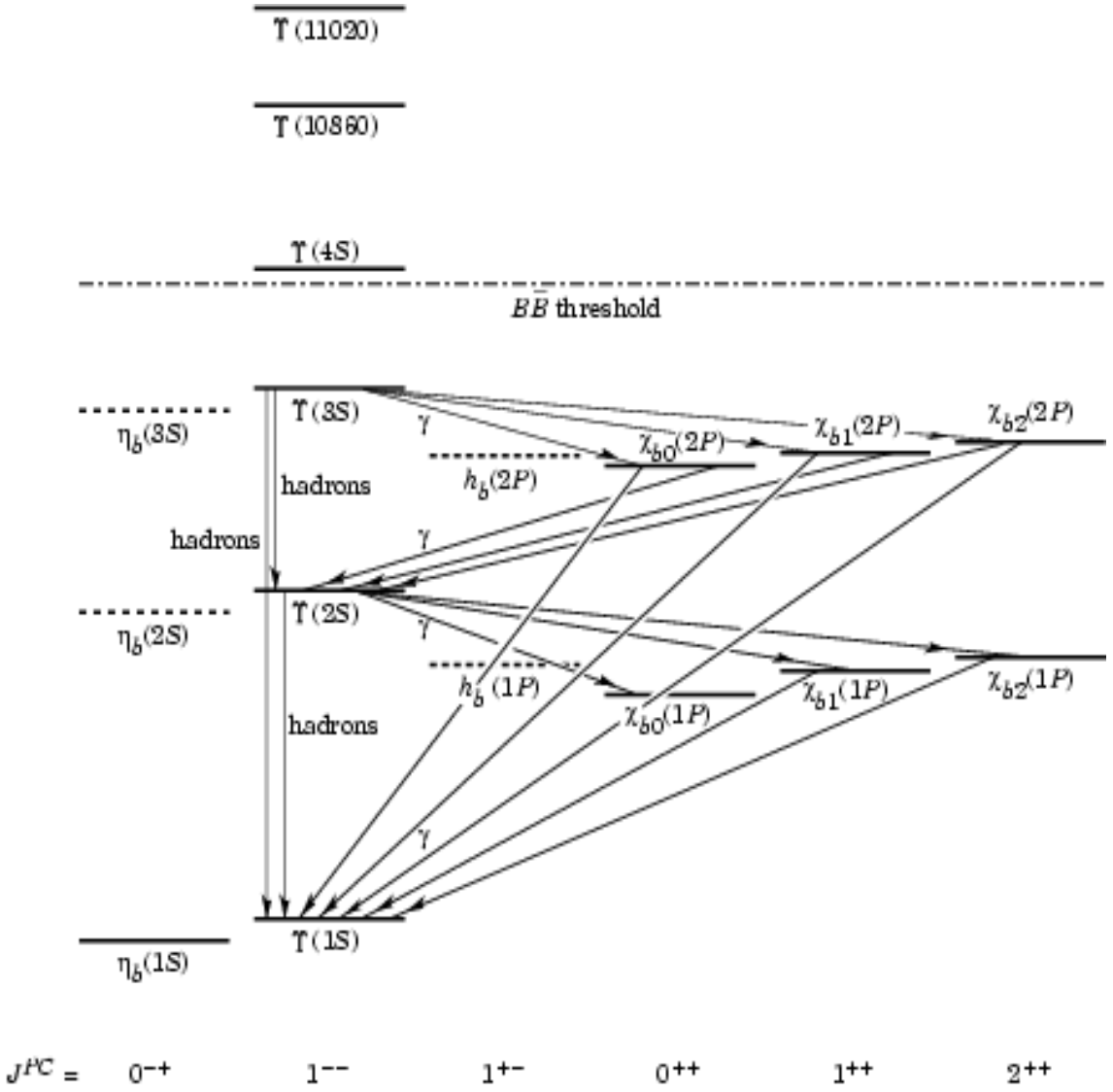
S=0 : *para*bottomonio
Non ancora osservato

S=1 : *orto*bottomonio
Y decade in 3 gluoni
$\Gamma[Y(1,2,3S)] = 53, 44, 26$ keV

No Degenerazione 2S-2P

Splitting iperfine : sconosciuto

Splitting fine : 15-30 MeV (1P)



Esempio QED Numero 2

Stato legato protone-elettrone
Sistema non relativistico
velocita' ~ β ~ n α_{QED}

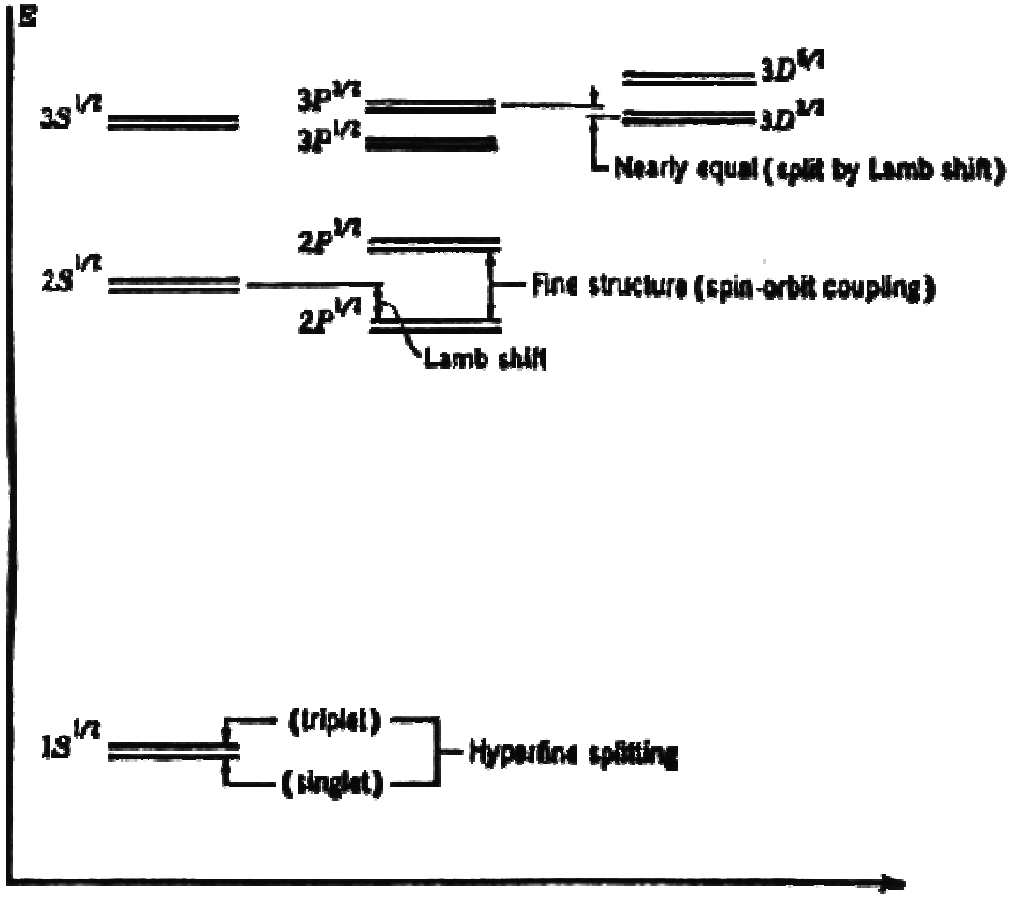
Mp / Me = 938/0.511 = 1836

Transizioni EM tra livelli
Ground state stabile

Splitting tra livelli: 2S-1S ~ 10 eV

Splitting Fine : 45 μeV(2P)

Splitting Iperfine: 5.9 μeV(1S)
0.7 μeV(2S), 0.2 μeV(2P)



Degenerazione 2S-2P rotta solo dal
Lamb Shift : $\Delta m \sim m_e \alpha^5_{QED} \sim 4.4$ μeV(1S)

Esempio QCD Numero 2

Stato legato Qq : cu,cd,cs
Sistema quasi relativistico

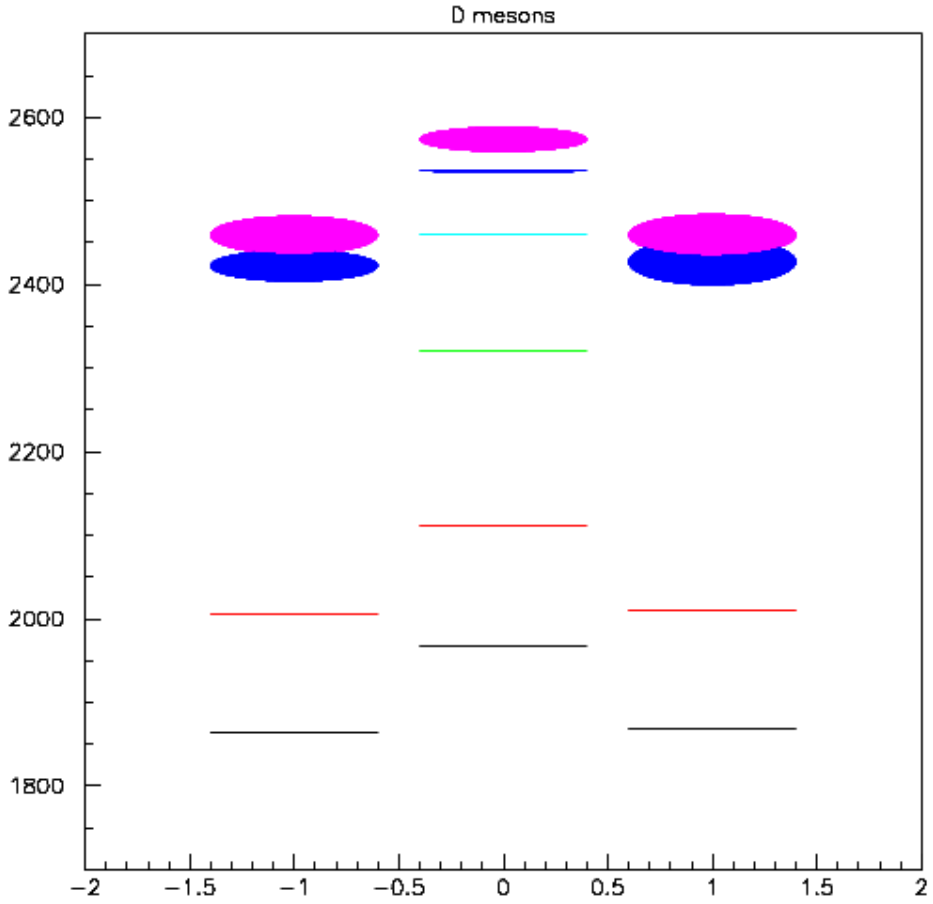
$M_Q / M_q = 300$ (D), 10 (D_s)

Transizioni tra stati con γ,π,K
Ground state decade debolmente
Si osservano i doppietti $1S_{1/2}$ e $1P_{3/2}$ di tutti i 3 sistemi, mentre si prevedono larghi i membri del doppietto $1P_{1/2}$

Splitting tra livelli: 2S-1S ignoto

Splitting Fine meno facile da definire e minore dello splitting hf

Splitting Iperfine: 140 MeV

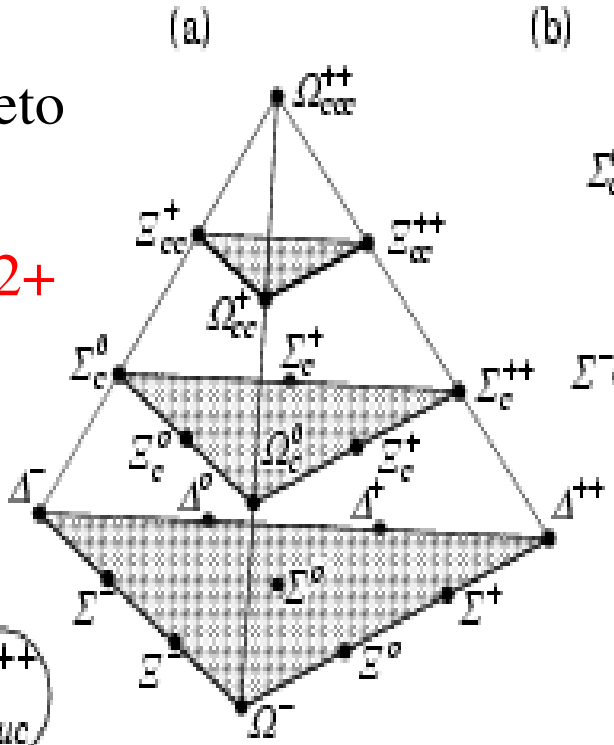


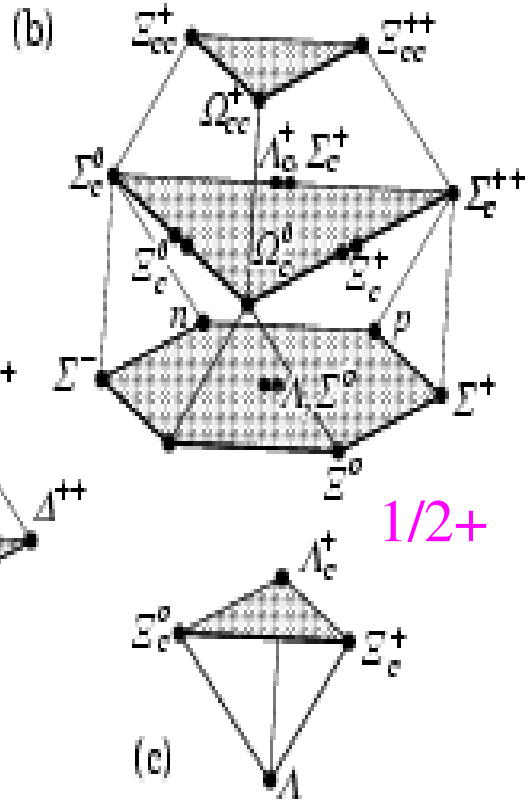
Gli stati 0+ e 1+ del D_s, inaspettatamente stretti, perche' sotto soglia DK, sono stati scoperti nel 2002 da BaBar

Ci stiamo dimenticando dei Barioni?

SU(4) completo

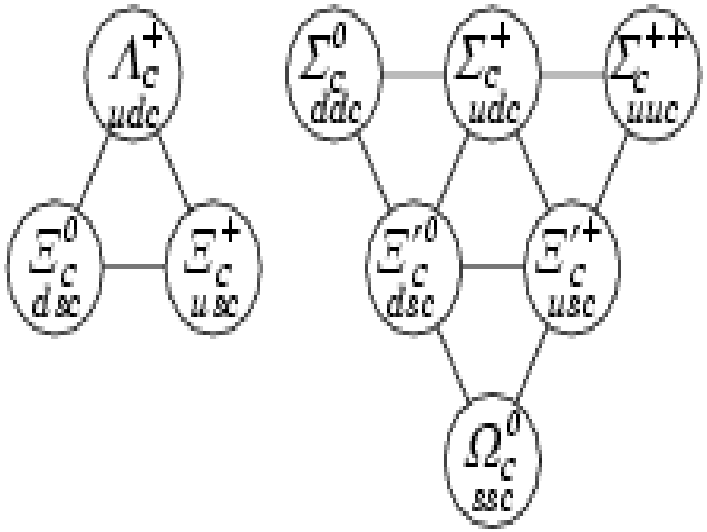
3/2+



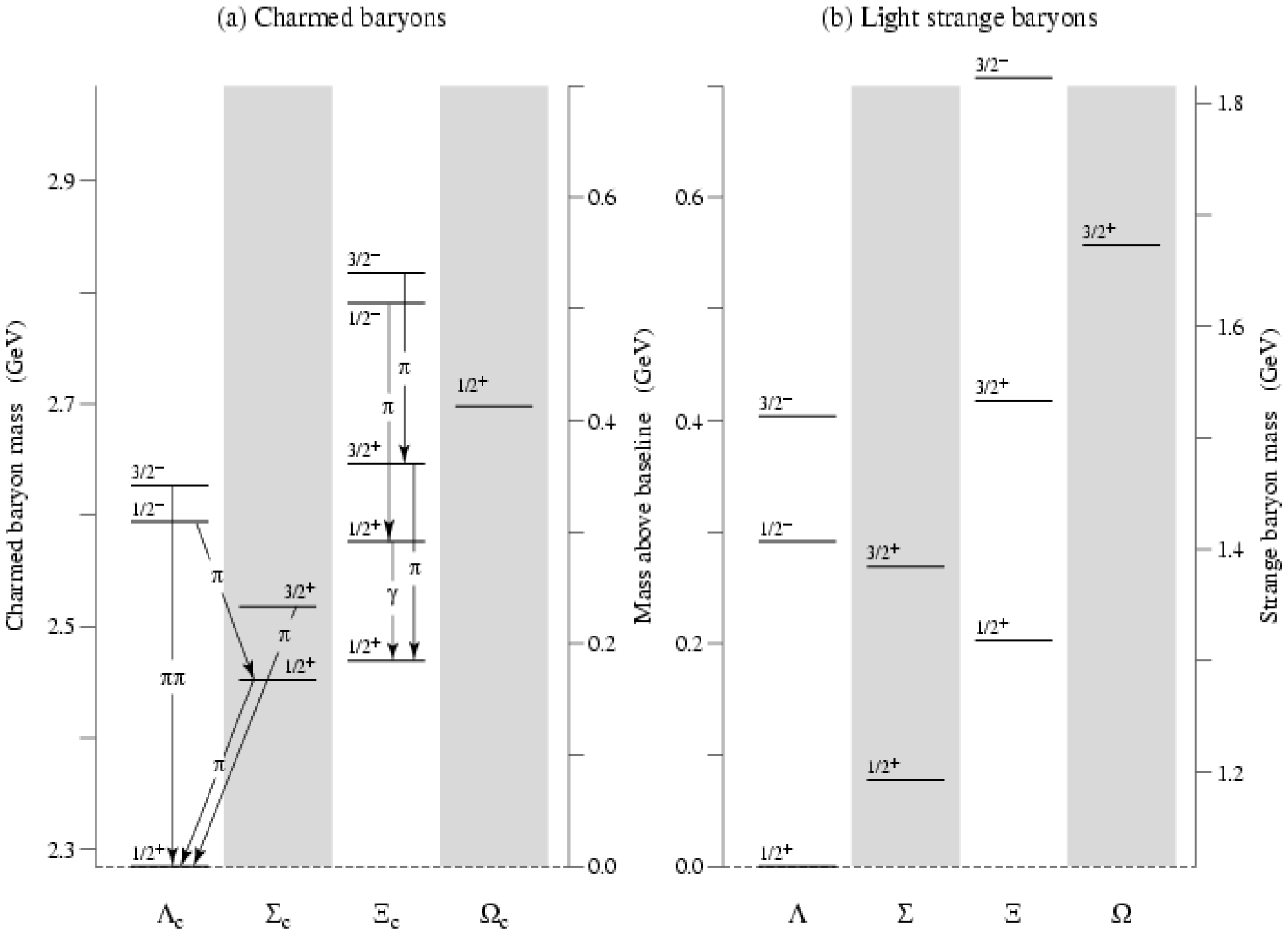


1/2+

Livello con C=1



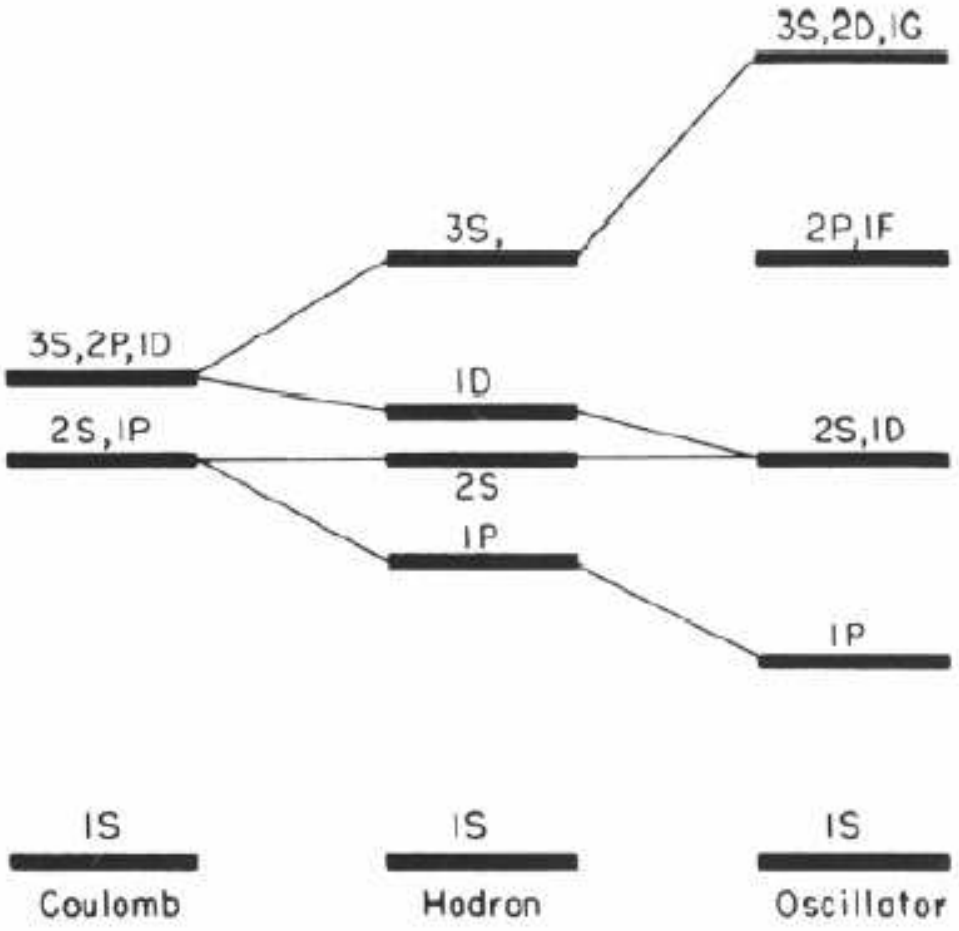
Solo una fragile evidenza (SELEX) di Barioni con doppio charm


(a) Charmed baryons
(b) Light strange baryons
Charmed baryon mass (GeV)
Mass above baseline (GeV)
Strange baryon mass (GeV)
2.9
2.7
2.5
2.3
0.6
0.4
0.2
0.0
1.8
1.6
1.4
1.2
3/2−
1/2−
3/2+
1/2+
π
ππ
γ
Λc
Σc
Ξc
Ωc
Λ
Σ
Ξ
Ω

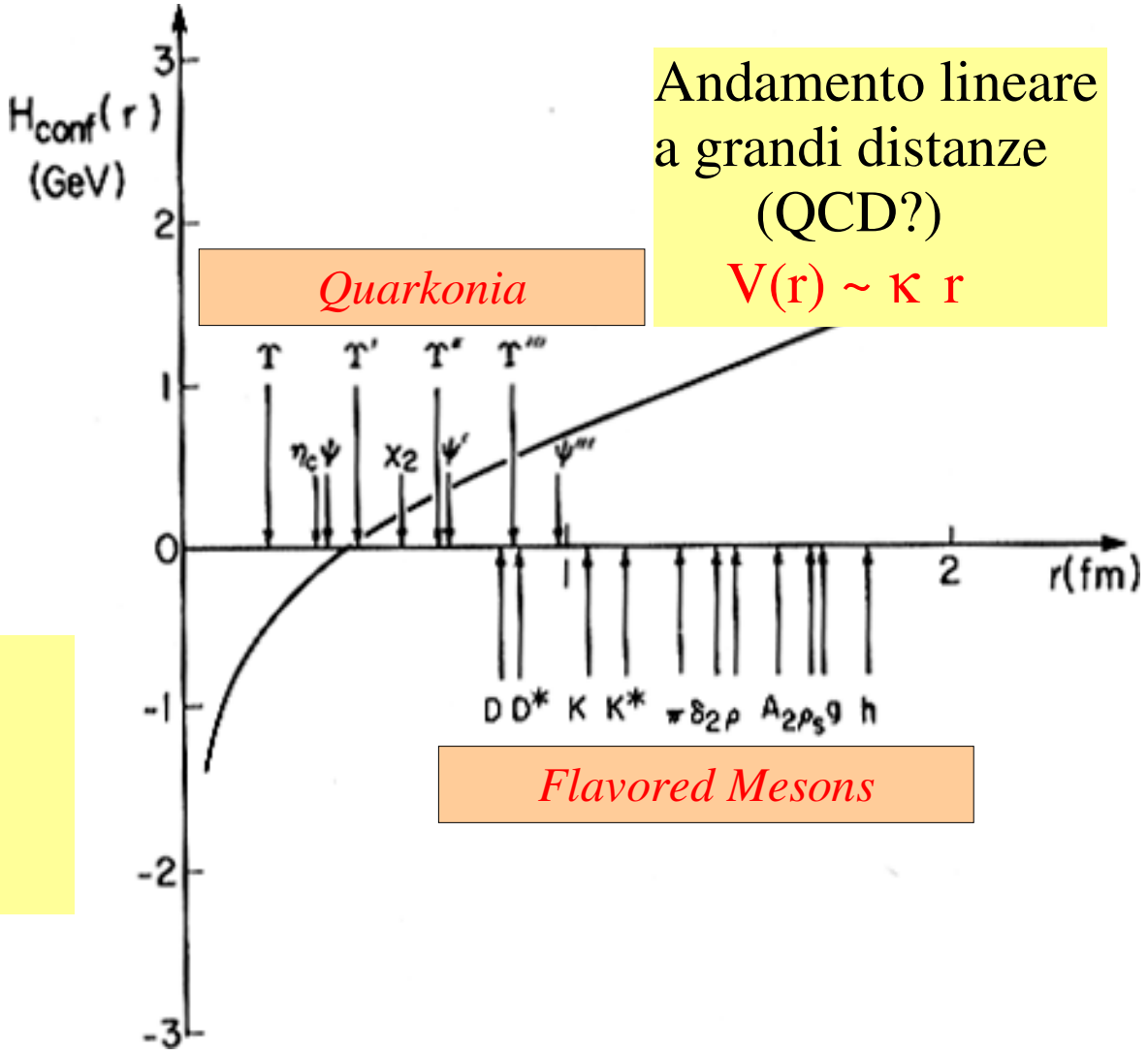
A meta' strada tra Sistema Coulombiano e Oscillatore armonico

Pattern formato dalle:

- Eccitazioni radiali della J/ψ
- Eccitazioni radiali della Y
- Spin average degli stati χ_c



Potenziale statico in QCD : 1980



Andamento lineare
a grandi distanze
(QCD?)
$V(r) \sim \kappa\ r$

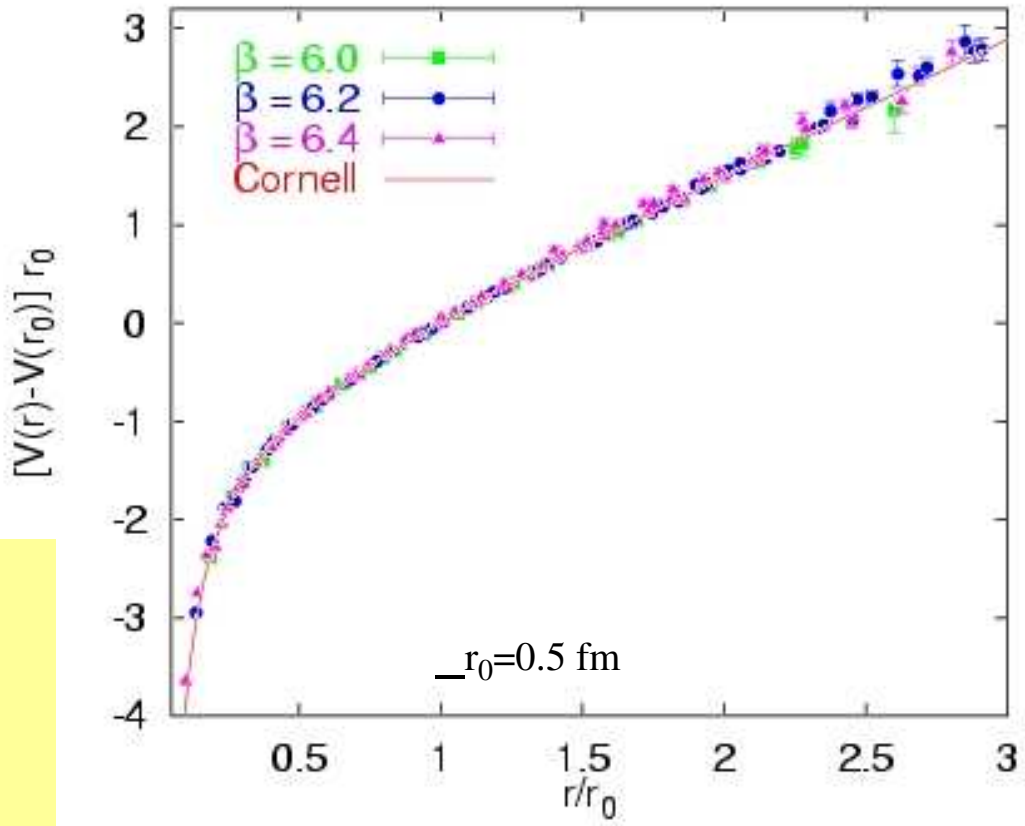
Andamento
Coulombiano
a corte distanze
$V(r) \sim \alpha_S\ / r$

Nota:il bottomonio e' lo stato legato + piccolo in natura

Potenziale statico in QCD : 2000

Andamento lineare
a grandi distanze
$V(r) \sim \kappa\ r$

QCD sul reticolo:
ora con il computer
possiamo finalmente
studiare la QCD non
perturbativa.
Possiamo cosi'
vedere la stringa
rompersi a ~1.2 fm!



Andamento
Coulombiano
a corte distanze
$V(r) \sim \alpha_S\ / r$

Figure 4.2: The quenched Wilson action $SU(3)$ potential, normalised to $V(r_0) = 0$.

Effetti di SPIN : Splitting Fine

Termine di Interazione Spin-Orbita

$$V_{LS}(r) = (\mathbf{L}\cdot\mathbf{S})\,(3\,dV_V/dr - dV_S/dr)/(2\,m^2 r)$$

For $(^3P_2,\ ^3P_1,\ ^3P_0)$ states, $\langle \mathbf{L}\cdot\mathbf{S}\rangle = (1, -1, -2)$.

Termine di Interazione Tensoriale

$$V_{tensor} = \frac{S_{12}}{12\,m_1\,m_2}\left(\frac{1}{r}\frac{dV_V}{dr} - \frac{d^2V_V}{dr^2}\right) \qquad (3.12)$$

where $S_{12} \equiv 2\,[3(\mathbf{S}\cdot\mathbf{r})(\mathbf{S}\cdot\mathbf{r}) - \mathbf{S}^2]$ has nonzero matrix elements only for $L \neq 0$.[1]

Its expectation values in $(^3P_2,\ ^3P_1,\ ^3P_0)$ states are $(-2/5, 2, -4)$.

$$M(^3P_2) = M_{cog} + h_{LS} - 2/5\ h_T$$

$$M(^3P_1) = M_{cog} - h_{LS} + 2\ h_T \qquad M_{cog} = [5M(^3P_2) + 3M(^3P_1) + M(^3P_0)]/9$$

$$M(^3P_0) = M_{cog} - 2h_{LS} - 4\ h_T$$

Effetti di SPIN : Splitting Iperfine

$$V_{SS}(r) = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{6\, m_1\, m_2} \nabla^2 V_V(r) = \frac{8\, \alpha_S(r)\, \sigma_1 \cdot \sigma_2}{9\, m_1\, m_2} \delta^3(r)$$

$\sigma_1 \bullet \sigma_2 = 4\, \mathbf{S_1} \bullet \mathbf{S_2} = (2S(S+1)-3)$

Solo se il potenziale Vettoriale e' Coulombiano

Nel caso degli stati P, lo splitting iperfine $M(^1P_1)$-$M(P_{cog})$ misura le componenti non Coulombiane del potenziale vettoriale.

L'integrazione sulle funzioni d'onda ci lascia fuori una dipendenza da $1/M_Q$ [come previsto dalla HQET per i sistemi heavy-light].

	$c\bar{u}$	$c\bar{d}$	$c\bar{s}$	$b\bar{u}, b\bar{d}$	$b\bar{s}$
$M(1^-)$-$M(0^-)$,MeV/c^2	142.12 ± 0.07	140.64±0.10	143.8±0.4	45.78±0.35	47.0±2.6

Effetti di SPIN : Splitting Iperfine

$$V_{SS}(r) = \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{6\, m_1\, m_2} \nabla^2 V_V(r) = \frac{8\, \alpha_S(r)\, \sigma_1 \cdot \sigma_2}{9\, m_1\, m_2} \delta^3(r)$$

$\sigma_1 \bullet \sigma_2 = 4\, \mathbf{S_1} \bullet \mathbf{S_2} = (2S(S+1)-3)$

Solo se il potenziale Vettoriale e' Coulombiano

L'integrazione sulle funzioni d'onda ci lascia fuori una dipendenza da $1/M_Q$ [come previsto dalla HQET per i sistemi heavy-light].

	$c\bar{u}$	$c\bar{d}$	$c\bar{s}$	$b\bar{u}, b\bar{d}$	$b\bar{s}$
M(1^-)-M(0^-),MeV/c^2	142.12 ± 0.07	140.64±0.10	143.8±0.4	45.78±0.35	47.0±2.6

ΔM	$q\bar{q}$,qqq	$s\bar{q}, sqq$	$c\bar{q}, cqq$	$c\bar{s}, csq$
Δ^B_{hf},MeV	(Δ-N) 294	(Σ)191	(Σ_c) 66	(Ξ_c) 69
Δ^M_{hf},MeV	$(\rho - \pi)$ 635	$(K^* - K)$ 397	$(D^* - D)$ 142	$(D_s^* - D_s)$ 144
ratio	0.446	0.481	0.465	0.480

Flavor indipendenza dello Splitting Tensore Vettore

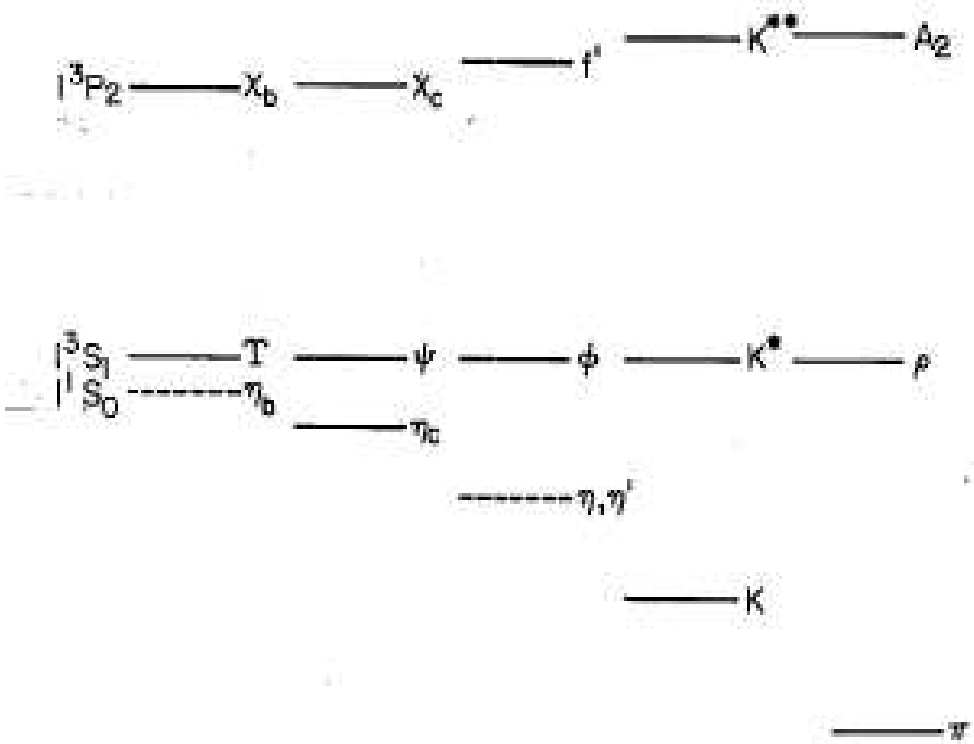


FIG. 19. A graphic illustration of the universality of meson dynamics from the π to the Υ, showing the splittings of $^3P_2$ and $^1S_0$ from $^3S_1$ in the $b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $s\bar{s}$, $u\bar{s}$, and $u\bar{d}$ families.

	$c\bar{u}$	$c\bar{d}$	$c\bar{s}$	$c\bar{c}$	$b\bar{b}$
M(2^+)-M(1^-), in MeV/c^2	452 ± 2	449±4	461±2	458.3±0.1	452.3±0.6

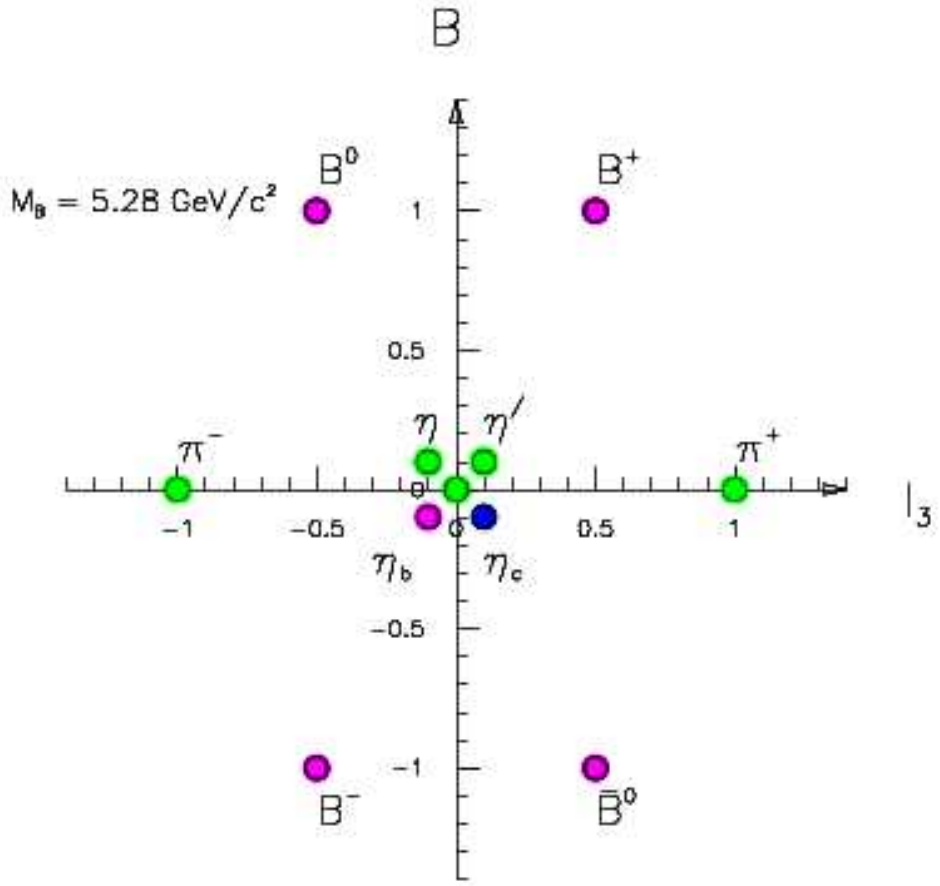
$$\frac{\Lambda_c(\frac{3}{2}^-) - \Lambda_c(\frac{1}{2}^+)}{D(2^+) - D^*(1^-)} = \frac{342}{455} = 0.752 \quad ; \quad \frac{\Lambda(\frac{3}{2}^-) - \Lambda(\frac{1}{2}^+)}{K(2^+) - K^*(1^-)} = \frac{404}{538} = 0.759$$

Bibliografia Essenziale

Rassegne classiche:
Kwong, Rosner, Quigg
Godfrey,Isgur ; Phys.Rev.D 32 (1985), 189

Rassegne moderne:
Bali, '*QCD forces and heavy quark bound states*', hep-ph/0001312
Brambilla, Vairo, '*Quark confinement and the hadron spectrum*' , hep-ph/9904330

Reticolo: Wilson
NRQCD: Bodwin, Braaten,Lepage
HQET: Isgur, Wise , PRL 66 (1991) 1530
Cornell model: Eichten et al. Hep-ph/9407339


B
M_B = 5.28 GeV/c^2
B^0
B^+
B^-
$\bar{B}^0$
η
η'
π^-
π^+
η_b
η_c
1
0.5
0
−0.5
−1
−1
−0.5
0.5
1
I_3

$N\,^{2S+1}L_J$	J^{PC}	$u\overline{d}$, $u\overline{u}$, $d\overline{d}$ $I=1$	$u\overline{u}$, $d\overline{d}$, $s\overline{s}$ $I=0$	$c\overline{c}$ $I=0$	$b\overline{b}$ $I=0$	$\overline{s}u$, $\overline{s}d$ $I=1/2$	$c\overline{u}$, $c\overline{d}$ $I=1/2$	$c\overline{s}$ $I=0$	$\overline{b}u$, $\overline{b}d$ $I=1/2$	$\overline{b}s$ $I=0$	$\overline{b}c$ $I=0$
$1\,^1S_0$	0^{-+}	$\boldsymbol{\pi}$	$\boldsymbol{\eta}$, $\boldsymbol{\eta'}$	$\boldsymbol{\eta_c(1S)}$	$\eta_b(1S)$	$\boldsymbol{K}$	$\boldsymbol{D}$	$\boldsymbol{D_s}$	$\boldsymbol{B}$	$\boldsymbol{B_s}$	$\boldsymbol{B_c}$
$1\,^3S_1$	1^{--}	$\boldsymbol{\rho}$	$\boldsymbol{\omega}$, $\boldsymbol{\phi}$	$\boldsymbol{J/\psi(1S)}$	$\boldsymbol{\Upsilon(1S)}$	$\boldsymbol{K^*(892)}$	$\boldsymbol{D^*(2010)}$	$\boldsymbol{D_s^*}$	$\boldsymbol{B^*}$	B_s^*	
$1\,^1P_1$	1^{+-}	$\boldsymbol{b_1(1235)}$	$\boldsymbol{h_1(1170)}$, $h_1(1380)$	$h_c(1P)$		$\boldsymbol{K_{1B}}^\dagger$	$\boldsymbol{D_1(2420)}$	$\boldsymbol{D_{s1}(2536)}$			
$1\,^3P_0$	0^{++}	$\boldsymbol{a_0(1450)^*}$	$\boldsymbol{f_0(1370)^*}$, $\boldsymbol{f_0(1710)^*}$	$\boldsymbol{\chi_{c0}(1P)}$	$\boldsymbol{\chi_{b0}(1P)}$	$\boldsymbol{K_0^*(1430)}$					
$1\,^3P_1$	1^{++}	$\boldsymbol{a_1(1260)}$	$\boldsymbol{f_1(1285)}$, $\boldsymbol{f_1(1420)}$	$\boldsymbol{\chi_{c1}(1P)}$	$\boldsymbol{\chi_{b1}(1P)}$	$\boldsymbol{K_{1A}}^\dagger$					
$1\,^3P_2$	2^{++}	$\boldsymbol{a_2(1320)}$	$\boldsymbol{f_2(1270)}$, $\boldsymbol{f_2'(1525)}$	$\boldsymbol{\chi_{c2}(1P)}$	$\boldsymbol{\chi_{b2}(1P)}$	$\boldsymbol{K_2^*(1430)}$	$\boldsymbol{D_2^*(2460)}$				
$1\,^1D_2$	2^{-+}	$\boldsymbol{\pi_2(1670)}$	$\eta_2(1645)$, $\eta_2(1870)$			$\boldsymbol{K_2(1770)}$					
$1\,^3D_1$	1^{--}	$\boldsymbol{\rho(1700)}$	$\boldsymbol{\omega(1650)}$	$\boldsymbol{\psi(3770)}$		$\boldsymbol{K^*(1680)}^\ddagger$					
$1\,^3D_2$	2^{--}					$\boldsymbol{K_2(1820)}$					
$1\,^3D_3$	3^{--}	$\boldsymbol{\rho_3(1690)}$	$\boldsymbol{\omega_3(1670)}$, $\boldsymbol{\phi_3(1850)}$			$\boldsymbol{K_3^*(1780)}$					
$1\,^3F_4$	4^{++}	$\boldsymbol{a_4(2040)}$	$\boldsymbol{f_4(2050)}$, $f_4(2220)$			$\boldsymbol{K_4^*(2045)}$					
$2\,^1S_0$	0^{-+}	$\boldsymbol{\pi(1300)}$	$\boldsymbol{\eta(1295)}$, $\boldsymbol{\eta(1440)}$	$\boldsymbol{\eta_c(2S)}$		$K(1460)$					
$2\,^3S_1$	1^{--}	$\boldsymbol{\rho(1450)}$	$\boldsymbol{\omega(1420)}$, $\boldsymbol{\phi(1680)}$	$\boldsymbol{\psi(2S)}$	$\boldsymbol{\Upsilon(2S)}$	$\boldsymbol{K^*(1410)}^\ddagger$					
$2\,^3P_2$	2^{++}	$a_2(1700)$	$f_2(1950)$, $\boldsymbol{f_2(2010)}$		$\boldsymbol{\chi_{b2}(2P)}$	$K_2^*(1980)$					
$3\,^1S_0$	0^{-+}	$\boldsymbol{\pi(1800)}$	$\eta(1760)$			$K(1830)$					