



兰州大学

LANZHOU UNIVERSITY

LANZHOU UNIVERSITY

D 波和 F 波粲重子激发态的研究

罗肆强

2023年7月25日至30日 吉林·长春

第八届XYZ粒子研讨会

Si-Qiang Luo and Xiang Liu, Newly observed $\Omega_c(3327)$: A good candidate for a D -wave charmed baryon, Phys. Rev. D 107, 074041 (2023).

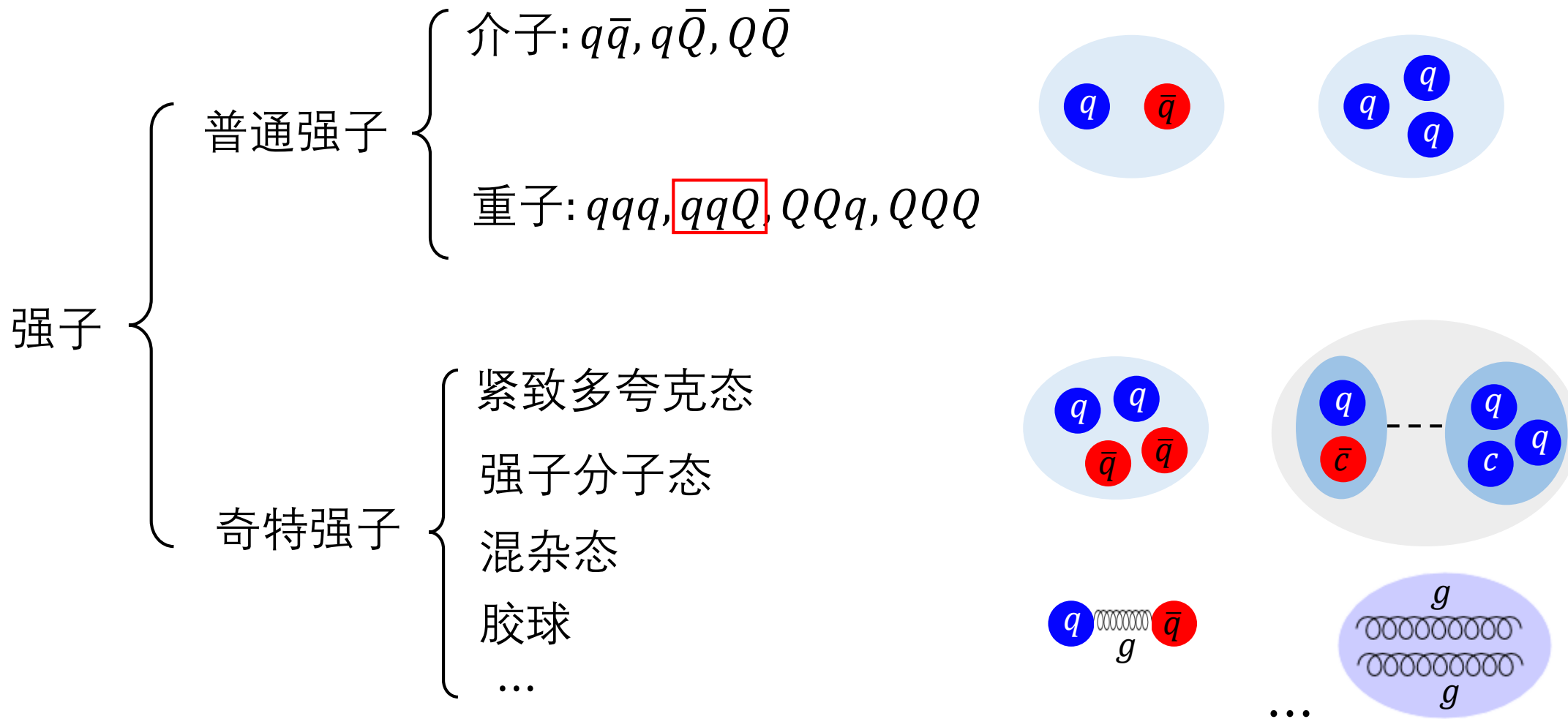
Si-Qiang Luo and Xiang Liu, Investigating the spectroscopy behavior of undetected $1F$ -wave charmed baryons, arXiv: 2306.04588 [hep-ph].

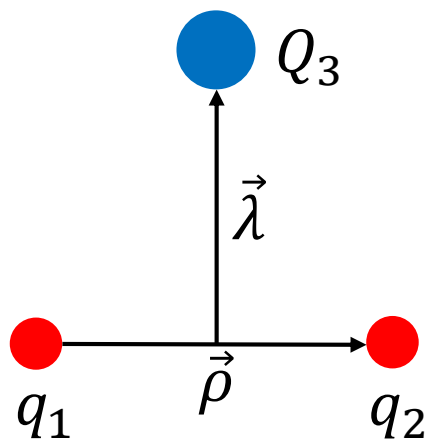
报告提纲

1. 研究背景
2. 模型方法
3. $\Omega_c(3327)$ 的发现及理论解释
4. F 波单粲重子的研究
5. 总结

研究背景

强子家族





单重味重子的Jacobi坐标

$$\vec{\rho} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$$

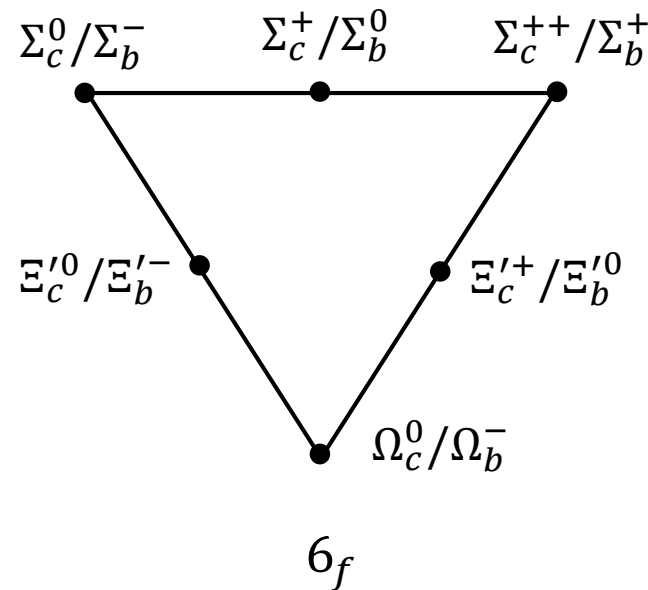
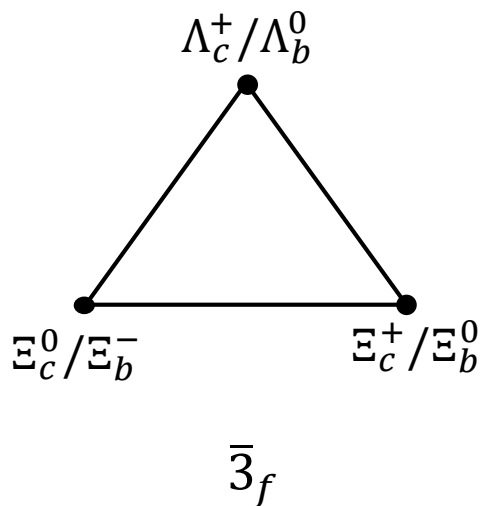
$$\vec{\lambda} = \vec{r}_3 - \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

重味夸克: $Q = c, b$

轻味夸克: $q = u, d, s$

味道波函数分解:

$$3_f \otimes 3_f = \bar{3}_f \oplus 6_f$$



实验上发现的单重味重子

Λ_c	$\Lambda_c(2286)$ $\Lambda_c(2595)$ $\Lambda_c(2625)$ $\Lambda_c(2765)$ $\Lambda_c(2860)$ $\Lambda_c(2880)$ $\Lambda_c(2910)$ $\Lambda_c(2940)$
Σ_c	$\Sigma_c(2455)$ $\Sigma_c^*(2520)$ $\Sigma_c(2800)$
$\Xi_c^{(\prime)}$	$\Xi_c(2470)$ $\Xi_c'(2580)$ $\Xi_c^*(2645)$ $\Xi_c(2790)$ $\Xi_c(2815)$ $\Xi_c(2880)$ $\Xi_c(2930)$ $\Xi_c(2923)$ $\Xi_c(2939)$ $\Xi_c(2965)$ $\Xi_c(2970)$ $\Xi_c(3055)$ $\Xi_c(3080)$ $\Xi_c(3123)$
Ω_c	$\Omega_c(2695)$ $\Omega_c^*(2765)$ $\Omega_c(3000)$ $\Omega_c(3050)$ $\Omega_c(3065)$ $\Omega_c(3090)$ $\Omega_c(3119)$ $\Omega_c(3185)$ $\Omega_c(3327)$

单粲重子(约30个)

大量的样本为
理论工作提供
了良好的研究
基础!

Λ_b	$\Lambda_b(5619)$ $\Lambda_b(5912)$ $\Lambda_b(5920)$ $\Lambda_b(6072)$ $\Lambda_b(6146)$ $\Lambda_b(6152)$
Σ_b	$\Sigma_b(5815)$ $\Sigma_b^*(5835)$ $\Sigma_b(6097)$
$\Xi_b^{(\prime)}$	$\Xi_B(5830)$ $\Xi_B'(5935)$ $\Xi_b^*(5945)$ $\Xi_b(6087)$ $\Xi_b(6100)$ $\Xi_c(6227)$ $\Xi_c(6327)$ $\Xi_c(6333)$
Ω_b	$\Omega_b(6046)$ $\Omega_c(6316)$ $\Omega_c(6330)$ $\Omega_c(6340)$ $\Omega_c(6350)$

单底重子(约20个)

模型方法

1. 谱学(非相对论势模型)

系统的Hamiltonian:

$$\hat{H} = \sum_i \left(m_i + \frac{p_i^2}{2m_i} \right) + \sum_{i<j} \left(V_{ij}^{\text{conf}} + V_{ij}^{\text{hyp}} + V_{ij}^{\text{so(cm)}} + V_{ij}^{\text{so(tp)}} \right)$$

禁闭势:

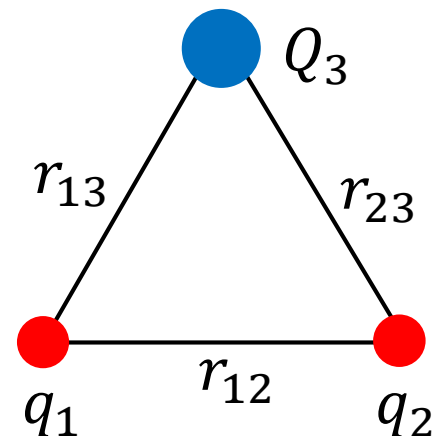
$$V_{ij}^{\text{conf}} = -\frac{2}{3} \frac{\alpha_s}{r_{ij}} + \frac{b}{2} r_{ij} + \frac{1}{2} C$$

超精细势:

$$V_{ij}^{\text{hyp}} = \frac{2\alpha_s}{3m_i m_j} \left[\frac{8\pi}{3} \tilde{\delta}(r_{ij}) \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j + \frac{1}{r_{ij}^3} S(\mathbf{r}, \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) \right]$$

$$\tilde{\delta}(r) = \frac{\sigma^3}{\pi^{3/2}} e^{-\sigma^2 r^2}$$

$$S(\mathbf{r}, \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \frac{3\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{r}_{ij} \mathbf{s}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} - \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j$$



自旋-轨道耦合项(色磁项):

$$V_{ij}^{\text{so(cm)}} = \frac{2\alpha_s}{3r_{ij}^3} \left(\frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_i}{m_i^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_j}{m_j^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_i - \mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_j}{m_i m_j} \right)$$

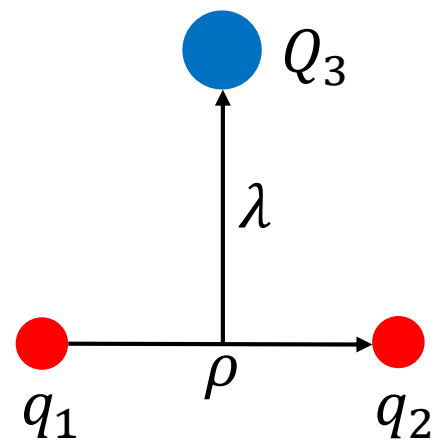
自旋-轨道耦合项(Thomas进动项):

$$V_{ij}^{\text{so(tp)}} = -\frac{1}{2r_{ij}} \frac{\partial H_{ij}^{\text{conf}}}{\partial r_{ij}} \left(\frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_i}{m_i^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_j}{m_j^2} \right)$$

三体Schrodinger方程:

$$[\hat{T} + V(r_{12}) + V(r_{13}) + V(r_{23})] \Psi_{JM} = E \Psi_{JM}$$

$$\Psi_{JM} = \sum_{\alpha} C_{\alpha} \Psi_{JM}^{\alpha} \quad C_{\alpha}: \text{Rayleigh-Ritz变分法}$$



$$|\Psi_{JM}^{\alpha}\rangle = |\phi^c H_{I_{12}}^I \chi_{s_{q_1} s_{q_2}}^{s_{\ell}} [\phi_{n_{\rho} l_{\rho}}(\rho) \phi_{n_{\lambda} l_{\lambda}}(\lambda)]_L]_{j_{\ell}} s_Q]_{JM}\rangle \quad \alpha = \{I_{12}, s_{\ell}, n_{\rho}, l_{\rho}, n_{\lambda}, l_{\lambda}, L, j_{\ell}\}$$

ϕ^c : 颜色波函数

$H_{I_{12}}^I$: 同位旋波函数

$\chi_{s_{q_1} s_{q_2}}^{s_{\ell}}$: 轻味自由度自旋波函数

$[\phi_{n_{\rho} l_{\rho}}^g(\rho) \phi_{n_{\lambda} l_{\lambda}}^g(\lambda)]_L$: 空间波函数



重夸克自旋对称性

2. 衰变(QPC模型)

跃迁算符:

$$\hat{\mathcal{T}} = -3\gamma \sum_m \langle 1, m; 1, -m | 0, 0 \rangle \int d^3 \mathbf{p}_i d^3 \mathbf{p}_j \delta(\mathbf{p}_i + \mathbf{p}_j) \\ \times \mathcal{Y}_1^m \left(\frac{\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j}{2} \right) \omega_0^{(i,j)} \phi_0^{(i,j)} \chi_{1,-m}^{(i,j)} b_i^\dagger(\mathbf{p}_i) d_j^\dagger(\mathbf{p}_j)$$

产生正反夸克对的量子数为 0^{++}
(满足真空量子数)

衰变振幅:

$$\mathcal{M}_{A \rightarrow BC}^{L_{BC} S_{BC}}(p) = \langle BC, L_{BC} S_{BC}, p | \hat{\mathcal{T}} | A \rangle$$

L_{BC} : 末态 BC 的轨道角动量

S_{BC} : 末态 BC 的相对自旋

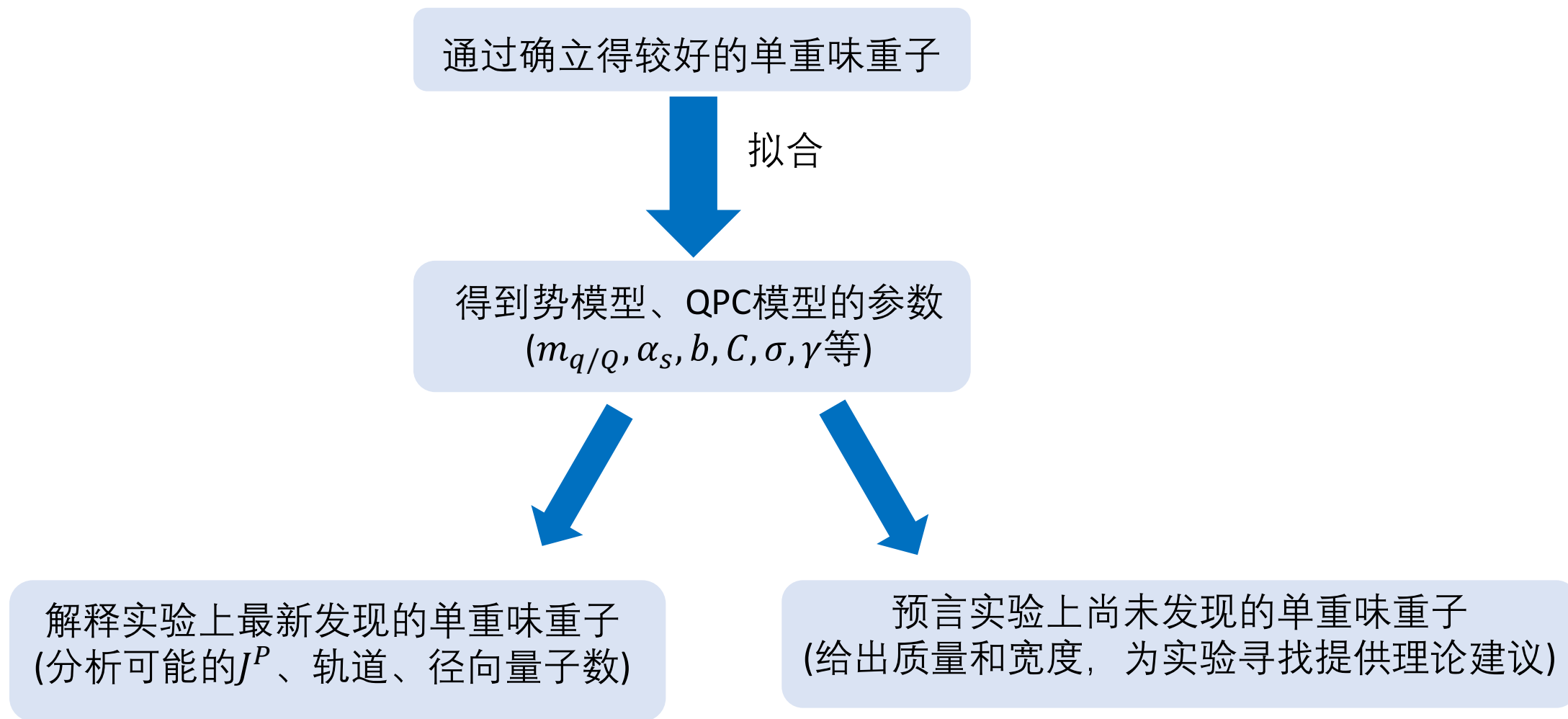
衰变宽度:

$$\Gamma_{A \rightarrow BC} = 2\pi \frac{E_B E_C}{M_A} p \sum_{L_{BC} S_{BC}} |\mathcal{M}_{A \rightarrow BC}^{L_{BC} S_{BC}}(p)|^2$$

$$E_B = \sqrt{M_B^2 + p^2}$$

$$E_C = \sqrt{M_C^2 + p^2}$$

研究流程



$\Omega_c(3327)$ 的发现及理论解释

Ω_c 重子家族

✓ $\Omega_c(1S)$:

1. $\Omega_c(2695) J^P = 1/2^+$

2. $\Omega_c^*(2765) J^P = 3/2^+$

Ω_c 激发态:

[LHCb] Phys. Rev. Lett. 118, 182001 (2017) ($pp \rightarrow \Omega_c + X$)

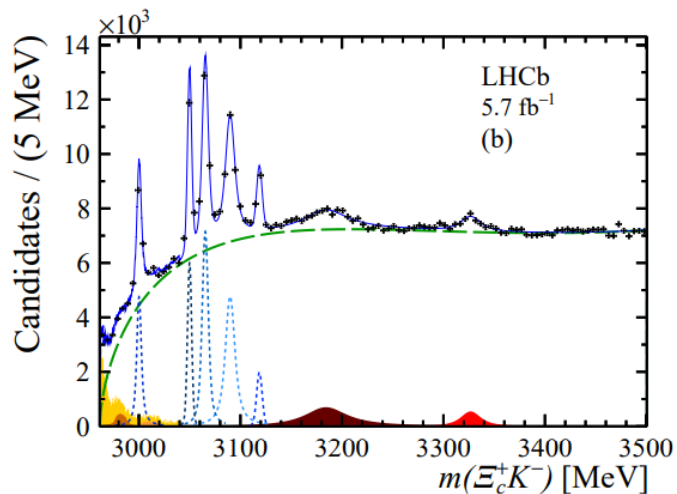
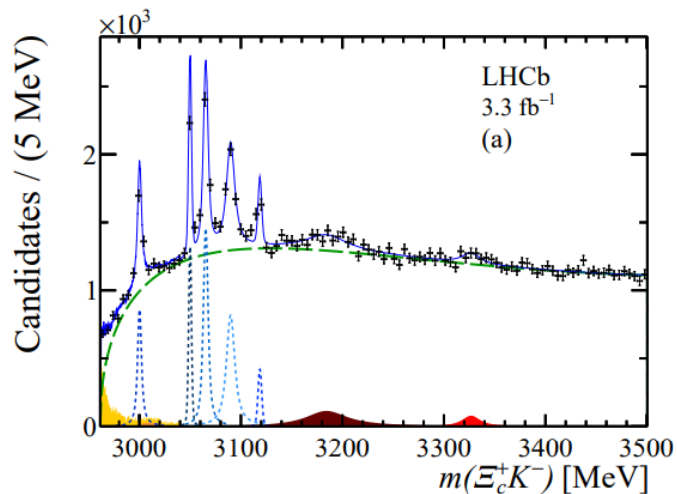
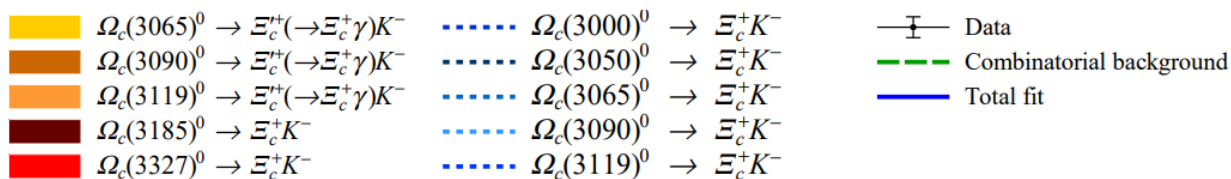
States	Mass (MeV)	Width (MeV)
$\Omega_c(3000)$	$3000.4 \pm 0.2 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.5}$	$4.5 \pm 0.6 \pm 0.3$
$\Omega_c(3050)$	$3050.2 \pm 0.1 \pm 0.1^{+0.3}_{-0.5}$	$0.8 \pm 0.2 \pm 0.1$ <1.2 MeV, 95% C.L.
$\Omega_c(3066)$	$3065.6 \pm 0.1 \pm 0.3^{+0.3}_{-0.5}$	$3.5 \pm 0.4 \pm 0.2$
$\Omega_c(3090)$	$3090.2 \pm 0.3 \pm 0.5^{+0.3}_{-0.5}$	$8.7 \pm 1.0 \pm 0.8$
$\Omega_c(3119)$	$3119.1 \pm 0.3 \pm 0.9^{+0.3}_{-0.5}$	$1.1 \pm 0.8 \pm 0.4$ <2.6 MeV, 95% C.L.
$\Omega_c(3188)$	$3188 \pm 5 \pm 13$	$60 \pm 15 \pm 11$

[Belle] Phys. Rev. D 97, 051102 (2018)

$(e^+e^- \rightarrow \Omega_c + X)$

[LHCb] Phys. Rev. D 104, L091102 (2021)

$(\Omega_b^- \rightarrow \Xi_c^+ K^- \pi^-)$



LHCb实验组在 $\Xi_c^+ K^-$ 上发现了两个 Ω_c 激发态： $\Omega_c(3185)$ 和 $\Omega_c(3327)$

[LHCb] arXiv:2302.04733 [hep-ex]

$$M_{\Omega_c(3185)} = 3185.1 \pm 1.7_{-0.9}^{+7.4} \pm 0.2 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{\Omega_c(3185)} = 50 \pm 7_{-20}^{+10} \text{ MeV}$$

(质量和宽度接近 $\Omega_c(3188)$)

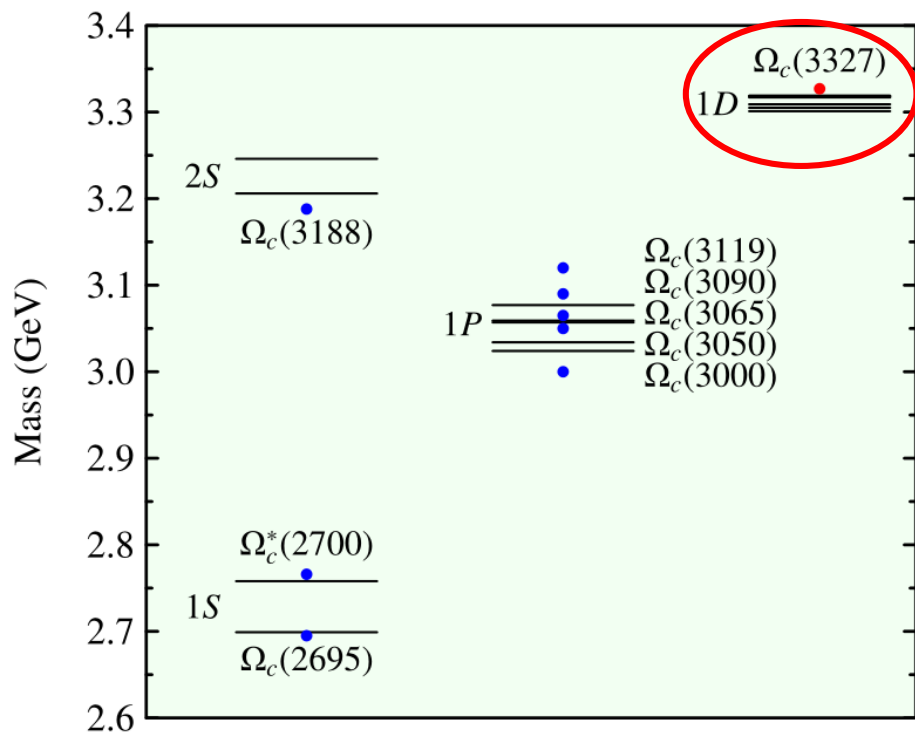
$$M_{\Omega_c(3327)} = 3327.1 \pm 1.2_{-1.3}^{+0.1} \pm 0.2 \text{ MeV}$$

$$\Gamma_{\Omega_c(3327)} = 20 \pm 5_{-1}^{+13} \text{ MeV}$$

谱学参数

System	α_s	b (GeV ²)	σ (GeV)	C (GeV)
Ξ_c/Ξ'_c	0.548	0.144	1.732	-0.711
Ω_c	0.578	0.144	1.732	-0.688
meson	0.578	0.144	1.020	-0.685

$m_{u/d} = 0.370$ GeV $m_s = 0.600$ GeV $m_c = 1.880$ GeV



λ 模激发的 $\Omega_c(1D)$

States	J	l_ρ	l_λ	L	s_ℓ	j_ℓ
$\Omega_{c1}(1D, \frac{1}{2}^+)$	$\frac{1}{2}$	0	2	2	1	1
$\Omega_{c1}(1D, \frac{3}{2}^+)$	$\frac{3}{2}$	0	2	2	1	1
$\Omega_{c2}(1D, \frac{3}{2}^+)$	$\frac{3}{2}$	0	2	2	1	2
$\Omega_{c2}(1D, \frac{5}{2}^+)$	$\frac{5}{2}$	0	2	2	1	2
$\Omega_{c3}(1D, \frac{5}{2}^+)$	$\frac{5}{2}$	0	2	2	1	3
$\Omega_{c3}(1D, \frac{7}{2}^+)$	$\frac{7}{2}$	0	2	2	1	3

通过总角动量 J 和轻味自由度角动量 j_ℓ 区分

$\Omega_c(3327)$ 的质量接近 $\Omega_c(1D)$ ，但 $\Omega_c(1D)$ 包含6个态，无法确定 $\Omega_c(3327)$ 的量子数

Decay channels	$\Omega_{c1}(1D, 1/2^+)$	$\Omega_{c1}(1D, 3/2^+)$	$\Omega_{c2}(1D, 3/2^+)$	$\Omega_{c2}(1D, 5/2^+)$	$\Omega_{c3}(1D, 5/2^+)$	$\Omega_{c3}(1D, 7/2^+)$
$\Xi_c(2470)\bar{K}$	2.7	2.7	×	×	13.4	13.4
$\Xi_c(2790)\bar{K}$	125.0	0.5	1.1	0.4	3.6	0.0
$\Xi_c(2815)\bar{K}$	0.0	114.1	0.0	0.1	0.0	0.3
$\Xi'_c(2580)\bar{K}$	3.9	0.9	8.7	2.6	3.0	1.7
$\Xi_c^*(2645)\bar{K}$	2.7	6.7	5.2	15.8	2.2	3.0
$\Omega_c(2695)\eta$	0.4	0.1	1.0	0.0	0.0	0.0
$\Omega_c(2765)\eta$	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
ΞD	244.9	15.3	137.8	31.3	2.2	80.6
ΞD^*	5.6	16.3	3.8	10.2	0.0	0.0
Total	385.2	156.6	157.6	60.5	24.4	99.0
Exp.					$20 \pm 5^{+13}_{-1}$ [1]	

[1] [LHCb] arXiv:2302.04733 [hep-ex]

重夸克极限下:

- $\Omega_c(3327)$ 可能的量子数为 $J^P = 5/2^+$
- $\text{BR}[\Omega_{c3}(1D, 5/2^+) \rightarrow \Xi_c(2470)\bar{K}] \approx 55\%$
- $\Omega_{c1}(1D, 1/2^+)$, $\Omega_{c1}(1D, 3/2^+)$, $\Omega_{c2}(1D, 3/2^+)$, $\Omega_{c2}(1D, 5/2^+)$, $\Omega_{c1}(1D, 7/2^+)$ 中, ΞD 和 ΞD^* 起着重要的作用
- 我们建议通过 ΞD 和 ΞD^* 寻找更多的 Ω_c 激发态

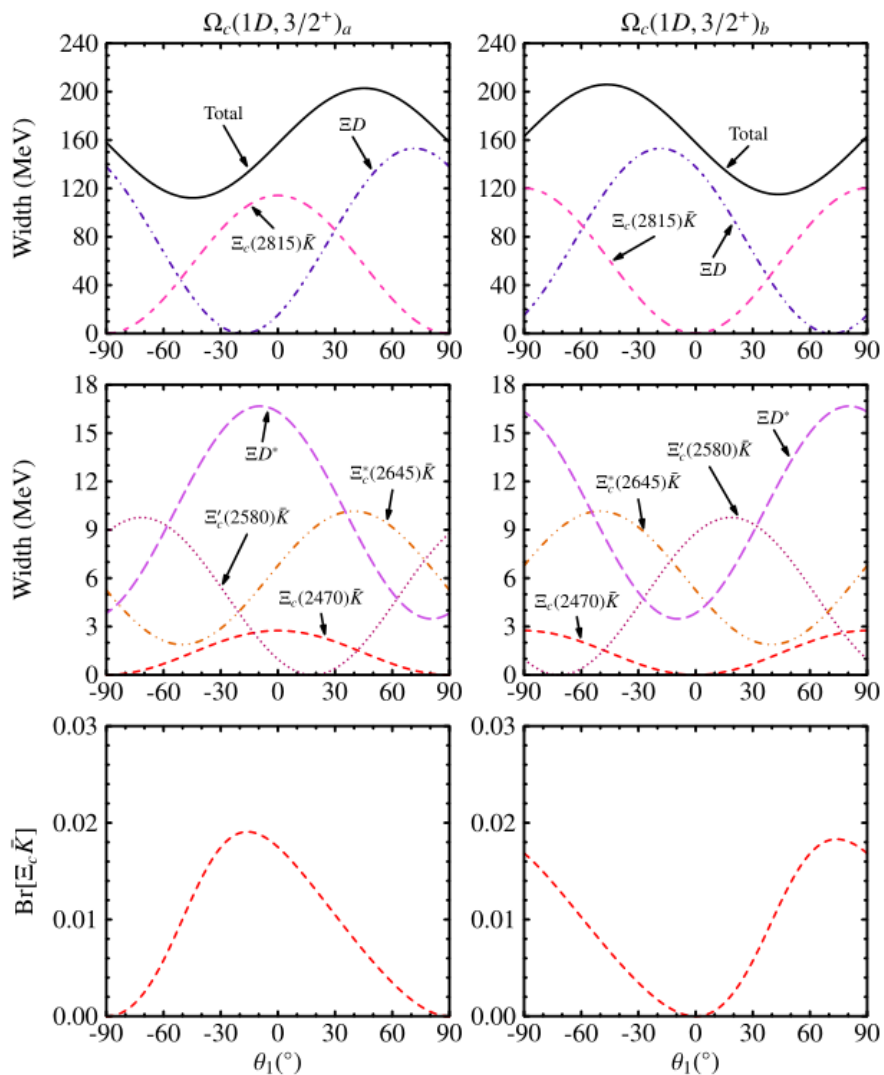
- G. L. Yu, Y. Meng, Z. Y. Li, Z. G. Wang and L. Jie, arXiv:2302.11758 [hep-ph].
- Z. G. Wang, F. Lu and Y. Liu, arXiv:2303.13976 [hep-ph].
- J. Feng, C. Cheng, F. Yang and Y. Huang, arXiv:2303.17770 [hep-ph].
- M. Karliner and J. L. Rosner, Phys. Rev. D 108, 014006 (2023).
- M. J. Yan, F. Z. Peng and M. Pavon Valderrama, arXiv:2304.14855 [hep-ph].
- P. Jakhad, J. Oudichhya, K. Gandhi and A. K. Rai, Phys. Rev. D 108, 014011 (2023).
- Q. Xin, X. S. Yang and Z. G. Wang, arXiv:2307.08926 [hep-ph].
- Y. X. Yao, K. L. Wang and X. H. Zhong, Phys. Rev. D 98, 076015 (2018).

⋮

混合表象下:

两个 $J^P = 3/2^+$ 的态会产生混合:

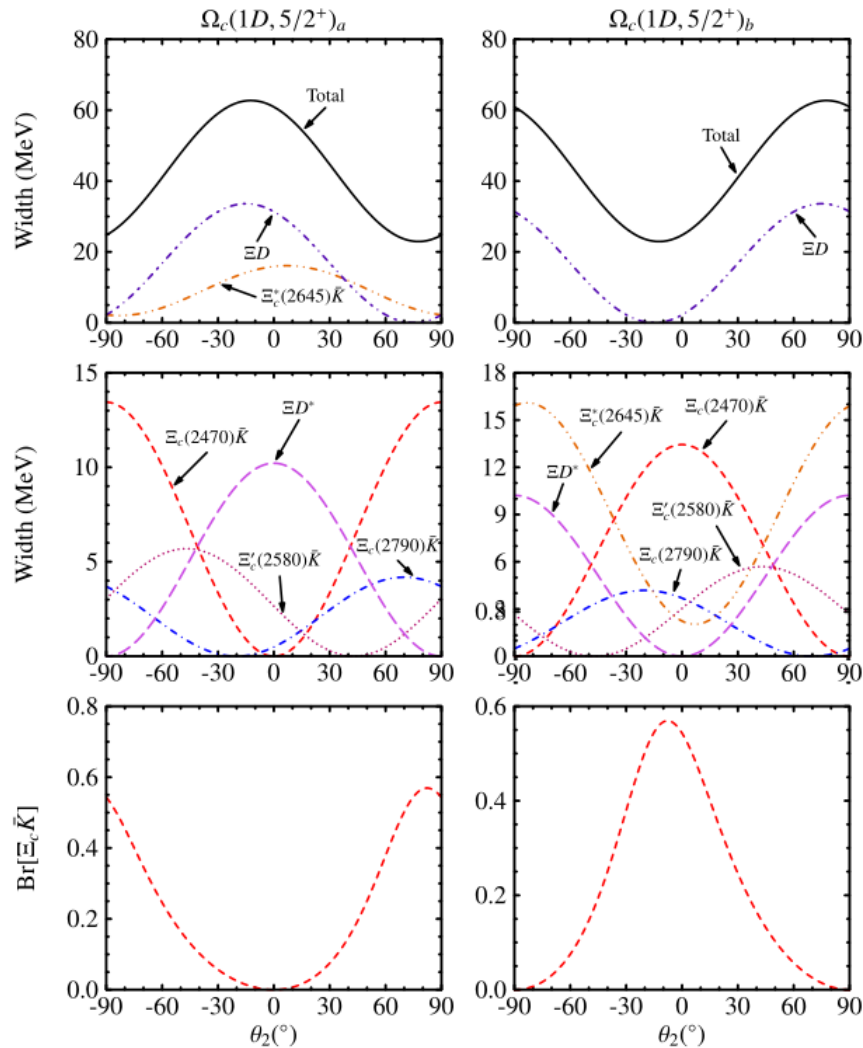
$$\begin{pmatrix} |\Omega_c(1D, 3/2^+)_a\rangle \\ |\Omega_c(1D, 3/2^+)_b\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\Omega_{c1}(1D, 3/2^+)\rangle \\ |\Omega_{c2}(1D, 3/2^+)\rangle \end{pmatrix}$$



- 两个 $\Omega_c(1D, 3/2^+)$ 预期为宽态
- $\Xi_c(2815)\bar{K}$ 和 ΞD 可能占据较大的分支比
- $\Xi_c \bar{K}$ 的分支比较小

两个 $J^P = 5/2^+$ 的态会产生混合:

$$\begin{pmatrix} |\Omega_c(1D, 5/2^+)_a\rangle \\ |\Omega_c(1D, 5/2^+)_b\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\Omega_{c2}(1D, 5/2^+)\rangle \\ |\Omega_{c3}(1D, 5/2^+)\rangle \end{pmatrix}$$

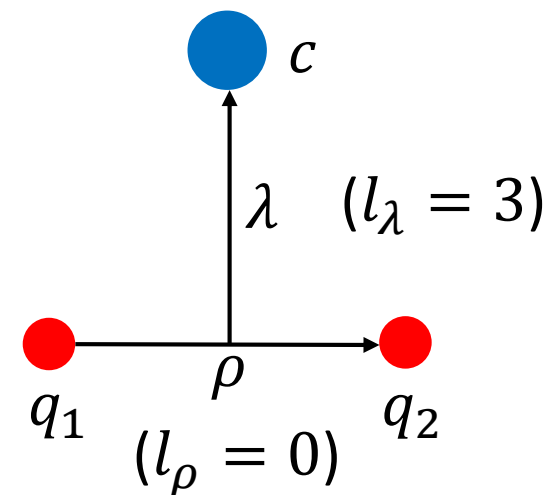


- 两个 $\Omega_c(1D, 3/2^+)$ 预期宽度大约位于 20~60 MeV
- $\Xi_c \bar{K}$ 分支比与混合角有关
- 建议测量 ΞD 的不变质量谱以得到更多的信息

F 波单粲重子的研究

单粲重子的实验现状:

- ✓ 较为完备的 $1S$ 态
- ✓ 大量的 $1P$ 候选态
- ✓ 若干 $1D$, $2S$, $2P$ 候选态
- ? 尚未发现 $1F$ 单粲重子候选态



λ 模激发的 F 波单粲重子

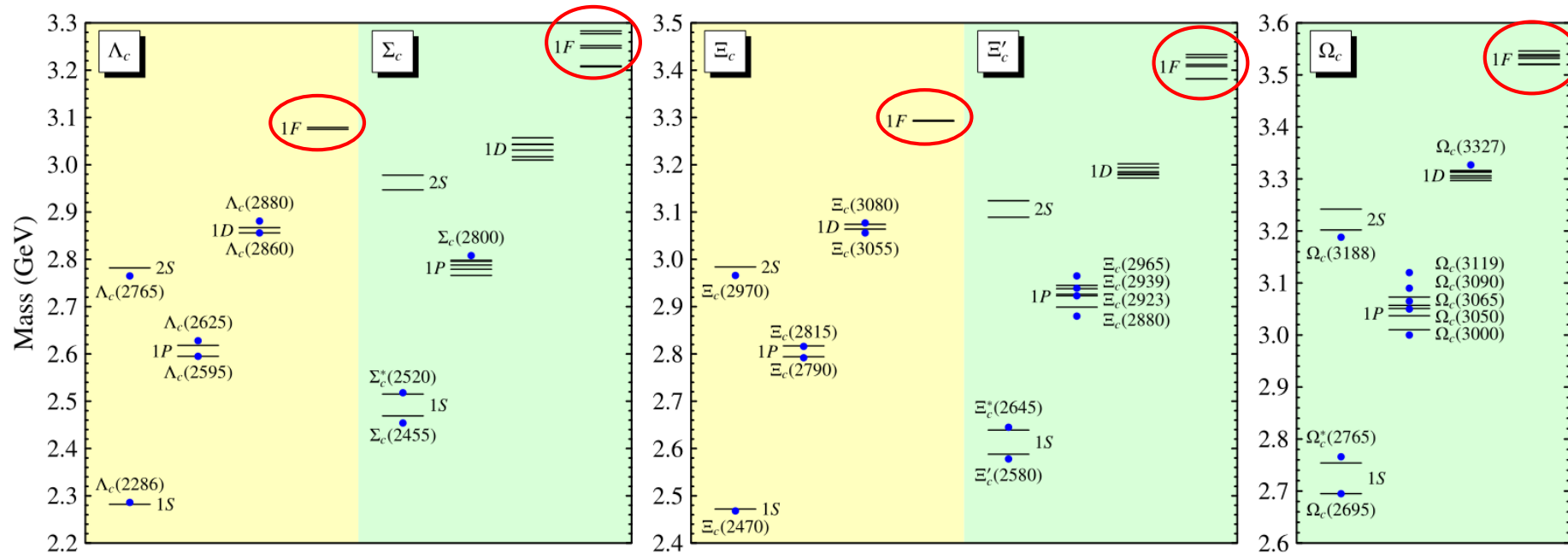
Symmetry	States	J	l_ρ	l_λ	L	s_ℓ	j_ℓ
$\bar{3}_f$	$\Lambda_c/\Xi_c(1F, 5/2^-)$	$\frac{5}{2}$	0	3	3	0	3
	$\Lambda_c/\Xi_c(1F, 7/2^-)$	$\frac{7}{2}$	0	3	3	0	3
6_f	$\Sigma_{c2}/\Xi'_{c2}/\Omega_{c2}(1F, 3/2^-)$	$\frac{3}{2}$	0	3	3	1	2
	$\Sigma_{c2}/\Xi'_{c2}/\Omega_{c2}(1F, 5/2^-)$	$\frac{5}{2}$	0	3	3	1	2
	$\Sigma_{c3}/\Xi'_{c3}/\Omega_{c3}(1F, 5/2^-)$	$\frac{5}{2}$	0	3	3	1	3
	$\Sigma_{c3}/\Xi'_{c3}/\Omega_{c3}(1F, 7/2^-)$	$\frac{7}{2}$	0	3	3	1	3
	$\Sigma_{c4}/\Xi'_{c4}/\Omega_{c4}(1F, 7/2^-)$	$\frac{7}{2}$	0	3	3	1	4
	$\Sigma_{c4}/\Xi'_{c4}/\Omega_{c4}(1F, 9/2^-)$	$\frac{9}{2}$	0	3	3	1	4

势模型参数

System	α_s	b (GeV ²)	σ (GeV)	C (GeV)
Λ_c/Σ_c	0.560	0.122	1.600	-0.633
$\Xi_c^{(\prime)}$	0.560	0.140	1.600	-0.693
Ω_c	0.578	0.144	1.732	-0.688
meson	0.578	0.144	1.028	-0.685

$m_{u/d} = 0.370$ GeV $m_s = 0.600$ GeV $m_c = 1.880$ GeV

数值结果



1. $\Lambda_c(1F)$

Decay channels	M_f (MeV)	$\Lambda_c(1F, 5/2^-)$	$\Lambda_c(1F, 7/2^-)$
$\Sigma_c(1S, 3/2^+)\pi$	2520	0.5	0.8
$\Sigma_{c2}(1P, 3/2^-)\pi$	2779	9.5	0.2
$\Sigma_{c2}(1P, 5/2^-)\pi$	2796	0.8	9.5
ND		9.9	11.8
ND^*		21.6	40.2
...		1.0	0.8
Total		43.3	63.3

$$\text{Br} [\Lambda_c(1F, 5/2^-) \rightarrow ND^*] \approx 49.9\%$$

$$\text{Br} [\Lambda_c(1F, 7/2^-) \rightarrow ND^*] \approx 63.5\%$$

2017年, LHCb实验组通过 $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c^+(X)\pi^- \rightarrow D^0 p \pi^-$ 过程看到了 $\Lambda_c(2860)^+$, $\Lambda_c(2860)^+$ 和 $\Lambda_c(2940)^+$

[LHCb] JHEP 05, 030 (2017)

我们建议通过 $\Lambda_b^0 \rightarrow D^{*0} p \pi^-$ 寻找 $\Lambda_c(1F)$

2. $\Xi_c(1F)$

Decay channels	M_f (MeV)	$\Xi_c(1F, 5/2^-)$	$\Xi_c(1F, 7/2^-)$
$\Xi'_{c2}(1P, 3/2^-)\pi$	2926	1.5	0.1
$\Xi'_{c2}(1P, 5/2^-)\pi$	2945	0.2	1.6
$\Sigma_c(1S, 1/2^+)\bar{K}$	2455	0.7	0.7
$\Sigma_c(1S, 3/2^+)\bar{K}$	2520	1.2	1.7
$\Sigma_{c2}(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2779	4.4	0.0
$\Sigma_{c2}(1P, 5/2^-)\bar{K}$	2796	0.0	0.6
ΛD		0.5	2.1
ΣD		10.0	22.9
ΛD^*		4.0	5.2
ΣD^*		28.3	54.3
...		0.9	0.9
Total		51.7	90.1

- ΣD 和 ΣD^* 在 $\Xi_c(1F)$ 的衰变的起着重要的作用
- ΣD^* 在 $\Xi_c(1F)$ 的理论分支比达到50%
- 我们建议通过 $\Sigma D^{(*)}$ 建找 $\Xi_c(1F)$

3. $\Sigma_c(1F)$

Decay channels	M_f (MeV)	$\Sigma_{c2}(1F, 3/2^-)$	$\Sigma_{c2}(1F, 5/2^-)$	$\Sigma_{c3}(1F, 5/2^-)$	$\Sigma_{c3}(1F, 7/2^-)$	$\Sigma_{c4}(1F, 7/2^-)$	$\Sigma_{c4}(1F, 9/2^-)$
$\Lambda_c(2S, 1/2^+)\pi$	2766	7.7	8.5	×	×	6.5	6.7
$\Lambda_c(1P, 1/2^-)\pi$	2592	3.5	0.0	1.8	1.0	8.1	1.7
$\Lambda_c(1P, 3/2^-)\pi$	2628	0.5	3.3	2.0	2.8	4.4	10.9
$\Lambda_c(2P, 1/2^-)\pi$	3004	3.6	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0
$\Lambda_c(2P, 3/2^-)\pi$	2940	2.8	15.4	0.5	0.8	0.2	0.9
$\Lambda_c(1D, 3/2^+)\pi$	2856	14.5	0.7	17.4	3.1	9.1	0.4
$\Lambda_c(1D, 5/2^+)\pi$	2881	1.5	13.1	4.3	17.2	1.2	8.9
$\Lambda_c(1F, 5/2^-)\pi$	3075	17.8	1.0	3.6	0.2	–	–
$\Lambda_c(1F, 7/2^-)\pi$	3079	0.0	17.8	0.2	3.8	–	–
$\Sigma_{c0}(1P, 1/2^-)\pi$	2788	×	×	3.0	3.1	×	×
$\Sigma_{c1}(1P, 1/2^-)\pi$	2766	0.1	1.0	3.9	2.3	2.4	0.1
$\Sigma_{c1}(1P, 3/2^-)\pi$	2798	1.2	1.1	4.0	5.6	0.7	2.5
$\Sigma_{c2}(1P, 3/2^-)\pi$	2779	1.6	1.6	1.9	0.5	5.6	1.0
$\Sigma_{c2}(1P, 5/2^-)\pi$	2796	2.1	2.4	0.6	2.9	1.6	5.5
$\Sigma_{c2}(1D, 3/2^+)\pi$	3030	18.3	1.6	1.1	0.2	0.2	0.0
$\Sigma_{c2}(1D, 5/2^+)\pi$	3043	1.5	19.9	0.2	1.0	0.0	0.1
$\Sigma_{c3}(1D, 5/2^+)\pi$	3010	3.6	0.7	25.4	0.3	1.5	0.1
$\Sigma_{c3}(1D, 7/2^+)\pi$	3017	0.6	3.7	0.3	26.2	0.1	1.3
ND		0.0	0.0	0.0	1.6	0.1	3.6
ΔD		4.8	15.0	14.0	7.4	23.9	1.3
ND^*		0.5	1.0	4.7	3.5	7.6	4.3
ΔD^*		1.9	4.8	0.1	0.6	–	–
ΣD_s		2.5	0.1	1.0	0.0	0.0	0.0
...		2.3	2.2	3.3	3.0	1.7	1.7
Total		92.9	114.9	93.4	87.2	75.0	51.0

- $\Sigma_{c2}(1F, 3/2^-)$, $\Sigma_{c2}(1F, 5/2^-)$, $\Sigma_{c3}(1F, 5/2^-)$, $\Sigma_{c3}(1F, 7/2^-)$, $\Sigma_{c4}(1F, 7/2^-)$ 的理论宽度大约位于70~110 MeV
- $\Sigma_{c4}(1F, 9/2^-)$ 的计算宽度为51.0 MeV
- 我们建议在 ΔD 上寻找 $\Sigma_c(1F)$
- 我们建议在 $\Lambda_c(1P)\pi$ 和 $\Lambda_c(1D)\pi$ 上寻找 $\Sigma_c(1F)$
- 部分 $\Sigma_c(1P)$ 或 $\Sigma_c(1D)$ 可以衰变到 $\Lambda_c\pi$, 因此 $\Sigma_c(1F)$ 可以通过 $\Lambda_c\pi\pi$ 来寻找

4. $\Xi'_c(1F)$

Decay channels	M_f (MeV)	$\Xi'_{c2}(1F, 3/2^-)$	$\Xi'_{c2}(1F, 5/2^-)$	$\Xi'_{c3}(1F, 5/2^-)$	$\Xi'_{c3}(1F, 7/2^-)$	$\Xi'_{c4}(1F, 7/2^-)$	$\Xi'_{c4}(1F, 9/2^-)$
$\Xi_c(2S, 1/2^+)\pi$	2970	0.7	0.9	×	×	1.6	1.6
$\Xi_c(1P, 1/2^-)\pi$	2790	0.8	0.0	0.7	0.4	4.7	0.3
$\Xi_c(1P, 3/2^-)\pi$	2815	0.2	0.7	0.8	1.1	1.7	5.7
$\Xi_c(1D, 3/2^+)\pi$	3055	4.3	0.7	7.5	1.1	7.1	0.1
$\Xi_c(1D, 5/2^+)\pi$	3080	0.9	3.2	1.4	6.5	0.6	5.9
$\Xi'_{c1}(1P, 3/2^-)\pi$	2938	0.3	0.3	0.8	1.2	0.2	0.7
$\Xi'_{c2}(1P, 3/2^-)\pi$	2926	0.3	0.3	0.6	0.0	1.4	0.2
$\Xi'_{c2}(1P, 5/2^-)\pi$	2945	0.3	0.4	0.1	0.8	0.4	1.3
$\Xi'_{c2}(1D, 3/2^+)\pi$	3181	5.7	0.3	0.4	0.1	0.2	0.0
$\Xi'_{c2}(1D, 5/2^+)\pi$	3194	0.3	6.1	0.1	0.3	0.0	0.1
$\Xi'_{c3}(1D, 5/2^+)\pi$	3172	0.6	0.1	8.0	0.1	0.7	0.0
$\Xi'_{c3}(1D, 7/2^+)\pi$	3179	0.1	0.6	0.1	8.3	0.1	0.5
$\Lambda_c(1S, 1/2^+)\bar{K}$	2286	0.0	0.0	×	×	1.2	1.2
$\Lambda_c(2S, 1/2^+)\bar{K}$	2766	1.7	2.1	×	×	1.7	1.7
$\Lambda_c(1P, 1/2^-)\bar{K}$	2592	2.2	0.0	2.2	1.3	8.5	1.7
$\Lambda_c(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2628	0.5	1.6	2.4	3.3	4.3	11.1
$\Lambda_c(1D, 3/2^+)\bar{K}$	2856	5.0	1.1	4.5	0.7	1.0	0.0
$\Lambda_c(1D, 5/2^+)\bar{K}$	2881	0.9	10.1	0.3	1.9	0.0	0.0
$\Sigma_c(1S, 1/2^+)\bar{K}$	2455	0.1	0.0	0.3	1.4	1.1	0.7
$\Sigma_c(1S, 3/2^+)\bar{K}$	2520	0.2	0.3	2.6	1.9	1.6	2.0
$\Sigma_{c0}(1P, 1/2^-)\bar{K}$	2788	×	×	1.8	2.0	×	×
$\Sigma_{c1}(1P, 1/2^-)\bar{K}$	2766	5.4	0.8	4.4	2.6	1.9	0.0
$\Sigma_{c1}(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2798	2.4	10.4	3.1	4.6	0.3	1.2
$\Sigma_{c2}(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2779	4.4	2.3	19.4	0.2	3.9	0.7
$\Sigma_{c2}(1P, 5/2^-)\bar{K}$	2796	2.6	5.5	1.8	24.0	0.8	2.9
$\Lambda_c(1S, 1/2^+)\bar{K}^*$	2286	0.2	0.2	1.1	1.2	0.7	0.7
ΛD		0.0	0.0	0.0	1.9	0.1	4.5
ΣD		0.0	0.0	0.0	2.9	0.1	6.7
$\Sigma^* D$		5.0	30.7	16.4	18.0	34.5	5.7
ΛD^*		0.5	1.0	5.7	4.0	10.6	6.0
ΣD^*		1.8	3.8	7.4	6.8	10.6	6.0
$\Sigma^* D^*$		3.1	7.4	1.0	3.8	—	—
...		1.3	1.7	3.8	2.6	2.1	0.4
Total		51.8	92.6	98.7	105.0	103.7	69.6

- $\Xi'_{c2}(1F, 5/2^-)$, $\Xi'_{c3}(1F, 5/2^-)$,
 $\Xi'_{c3}(1F, 7/2^-)$, $\Xi'_{c4}(1F, 7/2^-)$
 的理论宽度大约位于90~100 MeV
- $\Xi'_{c2}(1F, 3/2^-)$ 和 $\Sigma_{c4}(1F, 9/2^-)$
 宽度的计算值分别为51.8和69.6
 MeV
- 我们建议在 $\Sigma^* D$ 上寻找 $\Xi'_c(1F)$
- 部分 $\Sigma_c(1P)$ 可以衰变到 $\Lambda_c \pi$,
 因此 $\Xi'_c(1F)$ 可以通过 $\Lambda_c K \pi$ 来寻找

5. $\Omega_c(1F)$

Decay channels	M_f (MeV)	$\Omega_{c2}(1F, 3/2^-)$	$\Omega_{c2}(1F, 5/2^-)$	$\Omega_{c3}(1F, 5/2^-)$	$\Omega_{c3}(1F, 7/2^-)$	$\Omega_{c4}(1F, 7/2^-)$	$\Omega_{c4}(1F, 9/2^-)$
$\Xi_c(1S, 1/2^+)\bar{K}$	2470	0.0	0.0	×	×	1.7	1.7
$\Xi_c(1P, 1/2^-)\bar{K}$	2790	0.1	0.7	2.9	1.7	19.2	0.7
$\Xi_c(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2815	1.6	1.6	2.9	4.1	5.9	20.7
$\Xi'_c(1S, 3/2^+)\bar{K}$	2645	0.2	0.3	1.1	1.0	0.7	0.9
$\Xi'_{c0}(1P, 1/2^-)\bar{K}$	2923	×	×	1.1	1.2	×	×
$\Xi'_{c1}(1P, 1/2^-)\bar{K}$	2899	7.0	0.3	2.2	1.3	1.6	0.0
$\Xi'_{c1}(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2938	1.9	10.5	1.1	1.7	0.2	0.7
$\Xi'_{c2}(1P, 3/2^-)\bar{K}$	2926	3.5	0.8	18.7	0.0	1.8	0.3
$\Xi'_{c2}(1P, 5/2^-)\bar{K}$	2945	0.8	3.8	1.4	20.5	0.3	1.1
$\Xi_c(1S, 1/2^+)\bar{K}^*$	2470	0.6	0.6	1.2	1.3	0.4	0.4
ΞD		3.4	0.1	2.5	27.9	1.0	64.2
$\Xi^* D$		22.5	58.5	61.5	38.9	117.3	13.7
ΞD^*		30.8	68.5	73.6	77.2	110.7	61.3
...		0.6	1.1	0.4	0.7	0.6	0.4
Total		73.0	146.8	170.6	177.5	261.4	166.1

$$\text{Br} [\Omega_{c2}(1F, 3/2^-) \rightarrow \Xi^* D] \approx 30.8\%$$

$$\text{Br} [\Omega_{c2}(1F, 3/2^-) \rightarrow \Xi D^*] \approx 42.2\%$$

- $\Omega_{c2}(1F, 5/2^-), \Omega_{c3}(1F, 5/2^-), \Omega_{c3}(1F, 7/2^-), \Omega_{c4}(1F, 7/2^-), \Omega_{c4}(1F, 9/2^-)$ 预期宽度较大
- $\Omega_{c2}(1F, 3/2^-)$ 宽度的理论值为 73.0 MeV
- 我们建议通过 $\Xi^* D$ 和 ΞD^* 寻找 $\Omega_c(1F)$

总结

- $\Omega_c(3327)$ 是一个很好的 D 波激发态候选态
- 我们建议通过 $\Xi^{(*)}D^{(*)}$ 寻找更多的 Ω_c 激发态
- 我们建议通过轻味重子+重味介子的过程寻找 F 波粲重子
- 部分 F 波粲重子可以通过 $\Lambda_c\pi\pi$, $\Lambda_c K\pi$, $\Lambda_c(1P)\pi$, $\Lambda_c(1D)\pi$ 等过程寻找

谢谢各位批评指正