

单重味重子性质的研究

报告人：罗肆强

兰州大学

2024年4月5日 - 4月9日

第三届强子与重味物理理论与实验联合研讨会

报告提纲

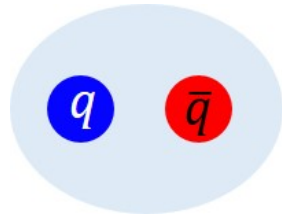
1. 研究背景
2. 模型方法
3. 单重味重子的谱学和强衰变
4. 总结

1. 研究背景

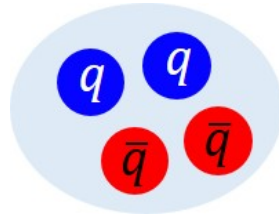
强子分类

普通强子

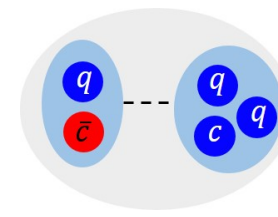
奇特强子



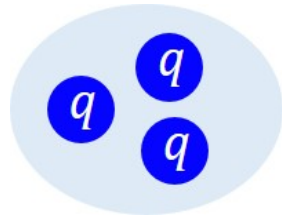
介子



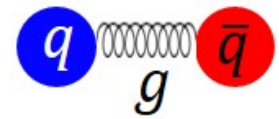
紧致多夸克态



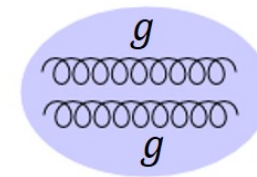
强子分子态



重子



混杂态



胶球

...

- 强子：由夸克、反夸克、胶子组成，是探索强相互作用过程中的重要研究对象

轻夸克 { u : 上夸克
 d : 下夸克
 s : 奇异夸克

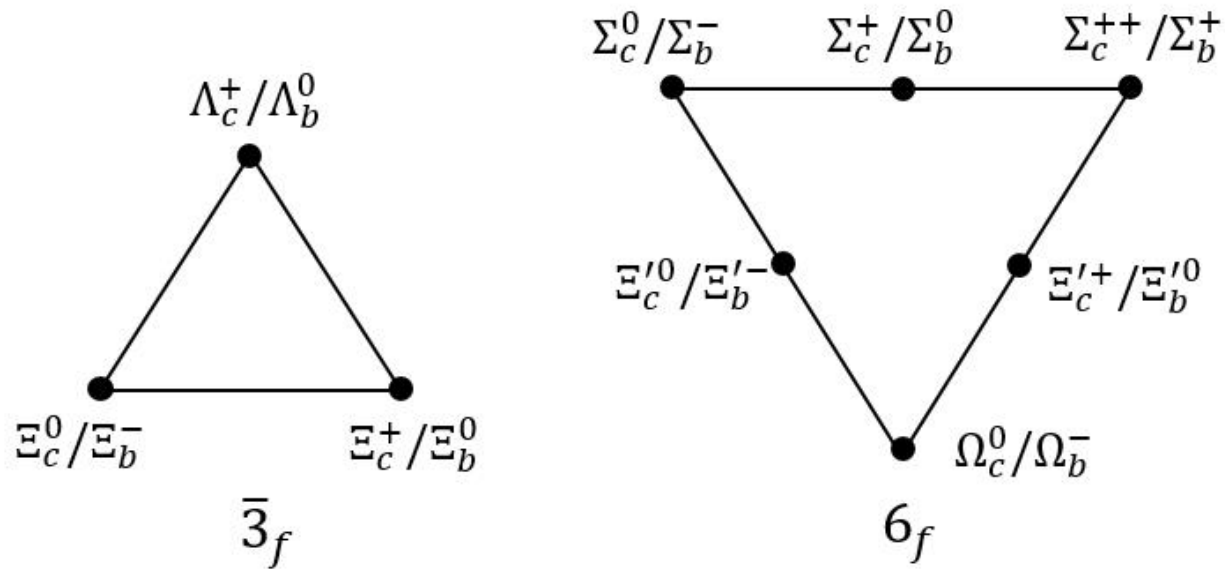
- 轻味重子：由三个轻夸克组成，目前实验上已经找到数量庞大的轻味重子；
- 单重味重子：由两个轻夸克和一个重夸克组成，目前实验上已经找到大量的单重味重子，且实验仍然在继续进行；

重夸克 { c : 粲夸克
 b : 底夸克
 t : 顶夸克

- 双重味重子：由一个轻夸克和两个重夸克组成，目前实验上已经找到1个双重味重子；
- 三重味重子：由三个重夸克组成，目前实验上尚未找到三重味重子。

$SU(3)$ 味道对称性下，单重味重子可以进行如下分解

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



$$\phi_{\Lambda_Q}^{\text{flavor}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(ud - du)Q$$

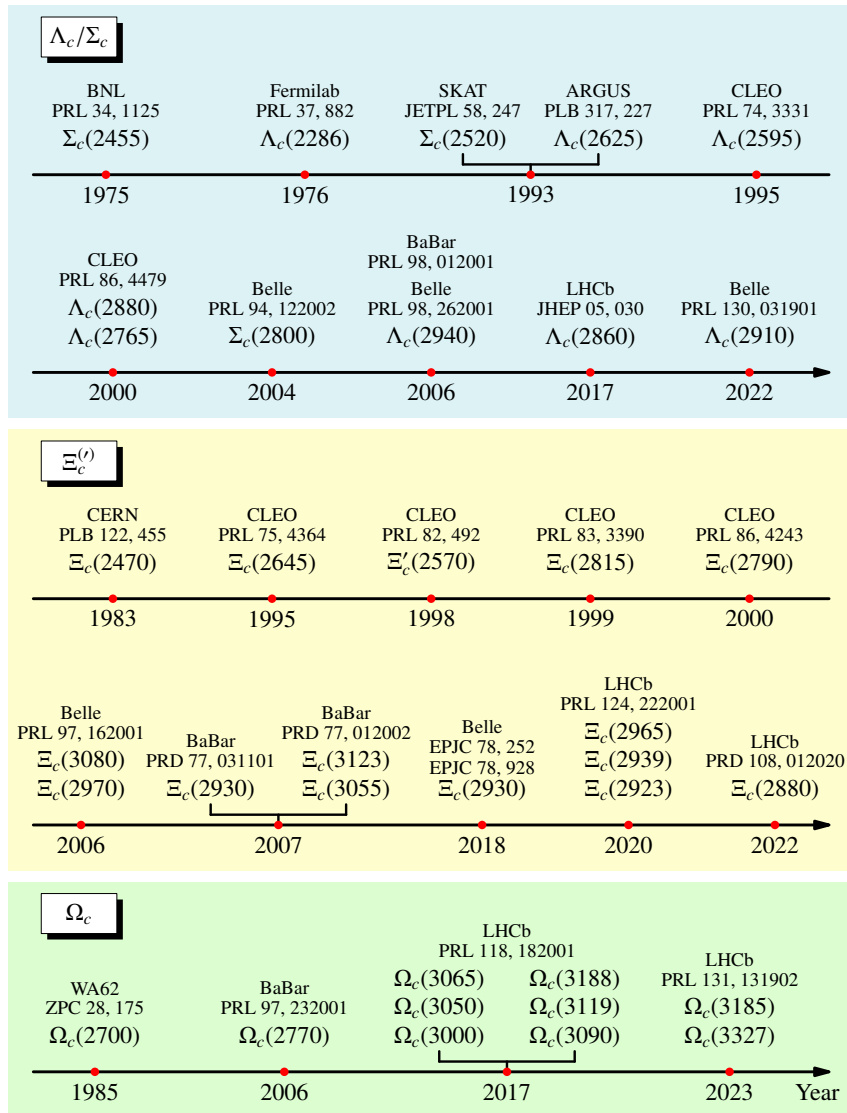
$$\phi_{\Xi_Q}^{\text{flavor}} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}(us - su)Q \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ds - sd)Q \end{cases}$$

$$\phi_{\Sigma_Q}^{\text{flavor}} = \begin{cases} uuQ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ud + du)Q \\ ddQ \end{cases}$$

$$\phi_{\Xi'_Q}^{\text{flavor}} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}(us + su)Q \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ds + sd)Q \end{cases},$$

$$\phi_{\Omega_Q}^{\text{flavor}} = ssQ.$$

粲重子

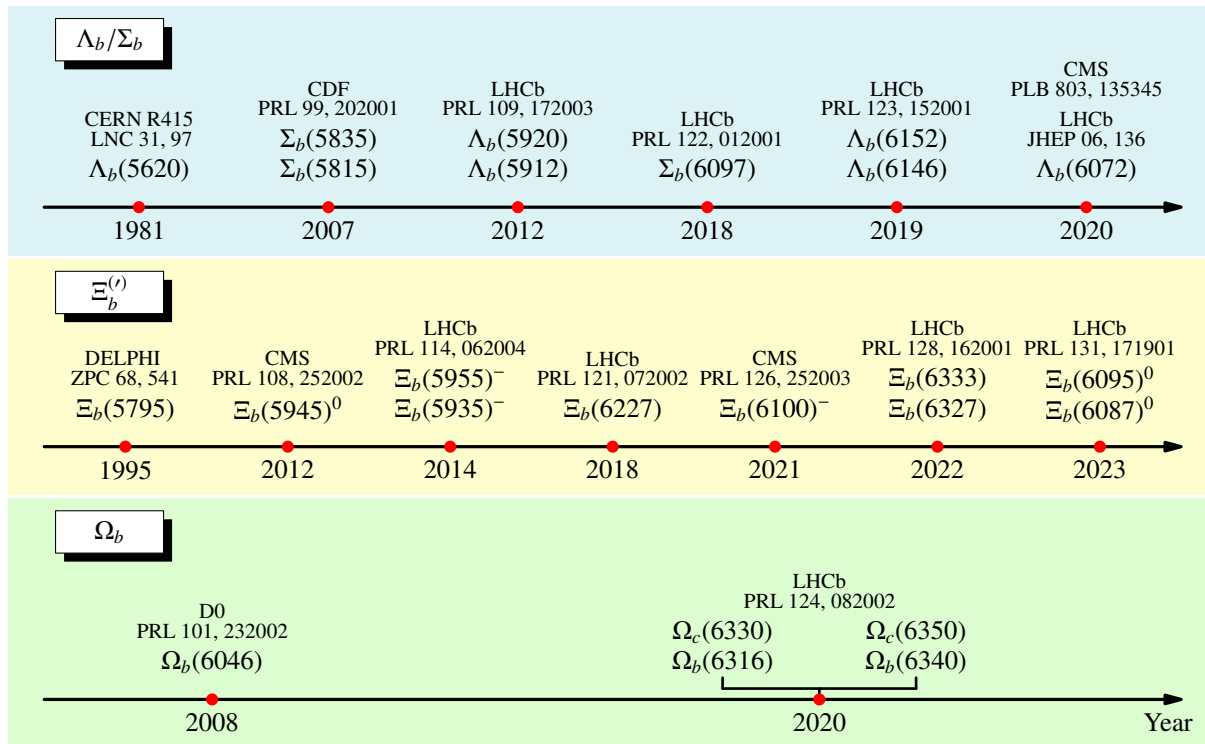


1. 过去的约 50 年里，实验上发现了超过 30 个粲重子；

2. 其中超过一半是本世纪发现的。

实验上发现的单粲重子

底重子



实验上发现的单粲重子

过去的约 40 年里，实验上发现了超过 20 个粲底重子

2. 模型方法

谱学方法：三体模型

$$H = \sum_{i=1}^3 \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_{i<j} V_{ij}(\mathbf{r})$$

$$V_{ij} = H_{ij}^{\text{conf}} + H_{ij}^{\text{hyp}} + H_{ij}^{\text{so(cm)}} + H_{ij}^{\text{so(tp)}}$$

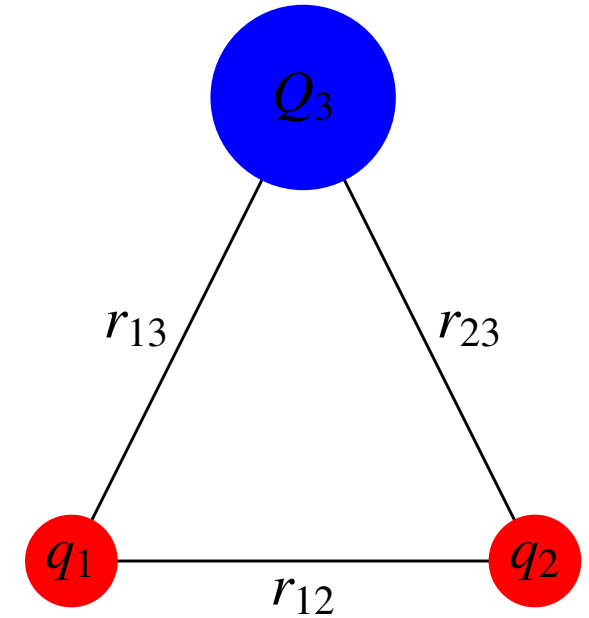
$$H_{ij}^{\text{conf}} = -\frac{2\alpha_s}{3r_{ij}} + \frac{b}{2}r_{ij} + \frac{1}{2}C$$

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

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

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

$$\tilde{\delta}(r) = \frac{\sigma^3}{\pi^{3/2}} e^{-\sigma^2 r^2} \quad S(\mathbf{r}, \mathbf{s}_i, \mathbf{s}_j) = \frac{3\mathbf{s}_i \cdot \mathbf{r}_{ij} \mathbf{s}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^2} - \mathbf{s}_i \cdot \mathbf{s}_j$$



衰变：QPC 模型

QPC 模型的算符为：

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

衰变的分波振幅可以写成

$$M_{A \rightarrow BC}^{SL}(p) = \langle BC, S, L, p | \hat{\mathcal{T}} | A \rangle,$$

S 是末态 BC 相对自旋， L 表示 BC 这间相对轨道角动量， P 是在 A 的质心系中， B 或 C 的动量大小。最终得到的宽度为：

$$\Gamma_{A \rightarrow BC}^{SL} = 2\pi \frac{E_B(p) E_C(p)}{M_A} p |M_{A \rightarrow BC}^{SL}(p)|^2$$

数值方法：高斯展开法

三体 Schrödinger 方程为

$$\left(\sum_{i=1}^3 \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_{i<j} V_{ij}(\mathbf{r}) \right) |\Psi_{JM}\rangle = E |\Psi_{JM}\rangle$$

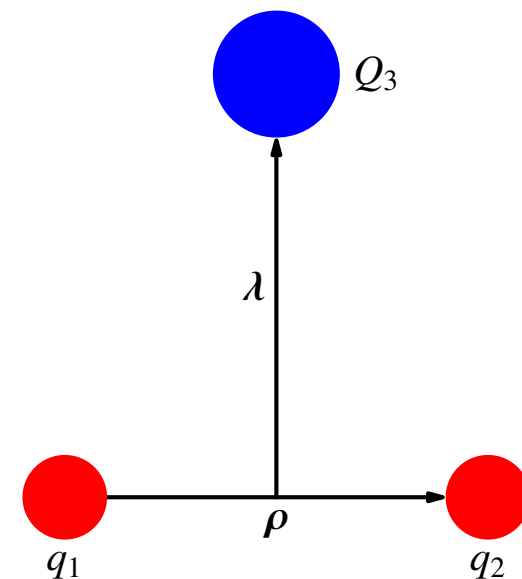
Ψ_{JM} 是系统的波函数，展开式为

$$|\Phi_{JM}(\rho, \lambda)\rangle = \sum_{n_\rho, n_\lambda} C_{n_\rho n_\lambda} \phi^c [\chi_{s_{12}S} \phi_{n_\rho l_\rho}(\rho) \phi_{n_\lambda l_\lambda}(\lambda)]_{JM}$$

$C_{n_\rho n_\lambda}$ 通过 Rayleigh-Ritz 变分法求解

$$\phi_{n_\rho l_\rho m_\rho}(\rho) = N_{n_\rho l_\rho} \rho^{l_\rho} e^{-v_{n_\rho} \rho^2} Y_{l_\rho m_\rho}(\hat{\rho})$$

$$\phi_{n_\lambda l_\lambda m_\lambda}(\lambda) = N_{n_\lambda l_\lambda} \lambda^{l_\lambda} e^{-v_{n_\lambda} \lambda^2} Y_{l_\lambda m_\lambda}(\hat{\lambda})$$



单重味重子的 Jacobi 坐标

高斯参数:

$$v_{n_\rho} = \frac{1}{\rho_{n_\rho}^2}, \quad \rho_{n_\rho} = \rho_1 a^{n_\rho - 1} \quad (n_\rho = 1 - n_{\max}^\rho)$$

$$v_{n_\lambda} = \frac{1}{\lambda_{n_\lambda}^2}, \quad \lambda_{n_\lambda} = \lambda_1 b^{n_\lambda - 1} \quad (n_\lambda = 1 - n_{\max}^\lambda)$$

3. 单重味重子的谱学和强衰变

$\Omega(3327)$ 的发现及理论解释

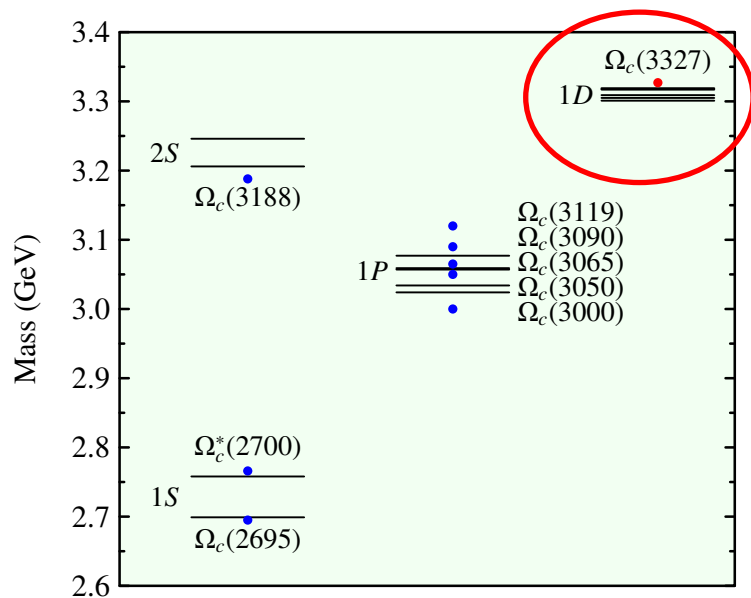
2023 年, LHCb 实验组 [1] 在 $\Xi_c K$ 上发现了一个新的态 $\Omega_c(3327)$ 质量和宽度为:

[1] [LHCb] Phys. Rev. Lett. 131, 131902 (2023)

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

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

谱学:



衰变:

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.					$20 \pm 5_{-1}^{+13}$ [1]	

$\Omega_c(3327)$ 是一个很好的 D 波 Ω_c 候选态

$\Lambda_b(6146)$ 和 $\Lambda_b(6152)$ 的发现及理论解释

衰变道	$\Lambda_b(6146)(1D, \frac{3}{2}^+)^0$	$\Lambda_b(6152)(1D, \frac{5}{2}^+)^0$
$\Sigma_b(5815) \pi$	3.25^p	0.22^f
$\Sigma_b^*(5835) \pi$	$0.65^p, 0.28^f$	$4.03^p, 0.14^f$
总宽度	4.18	4.39
实验值 [1]	$2.9 \pm 1.3 \pm 0.3$	$2.1 \pm 0.8 \pm 0.3$

[1] [LHCb] Phys. Rev. Lett. 123, 152001 (2019)

[2] [LHCb] Phys. Rev. Lett. 128, 162001 (2022)

理论与实验一致

对 $\Xi_b(1D)$ 的宽度预言

衰变道	$\Xi_b(6327)(1D, \frac{3}{2}^+)$	$\Xi_b(6330)^0(1D, \frac{5}{2}^+)$
$\Xi_b'(5935) \pi$	0.39^p	0.09^f
$\Sigma_b(5815) \bar{K}$	1.73^p	0.00^f
$\Xi_b^*(5955) \pi$	$0.09^p, 0.15^f$	$0.51^p, 0.07^f$
$\Sigma_b^*(5835) \bar{K}$	$0.02^p, 0.00^f$	$0.09^p, 0.00^f$
总宽度	2.38	0.76

实验测量 [2]

$$m[\Xi_b(6327)^0] = 6327.28_{-0.21}^{+0.23} \text{ MeV},$$

$$m[\Xi_b(6333)^0] = 6332.69_{-0.18}^{+0.17} \text{ MeV},$$

$$\Gamma[\Xi_b(6327)^0] = 0.93_{-0.60}^{+0.74} \text{ MeV},$$

$$\Gamma[\Xi_b(6333)^0] = 0.25_{-0.25}^{+0.58} \text{ MeV},$$

理论被实验证实

1F 波单粲重子性质的研究

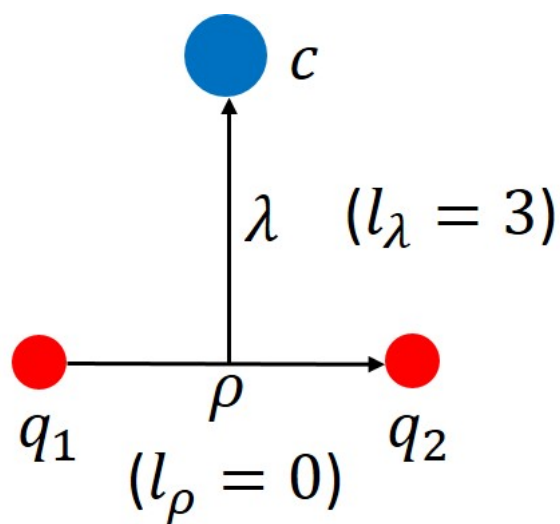
单粲重子的现状：

- ✓ 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 候选态

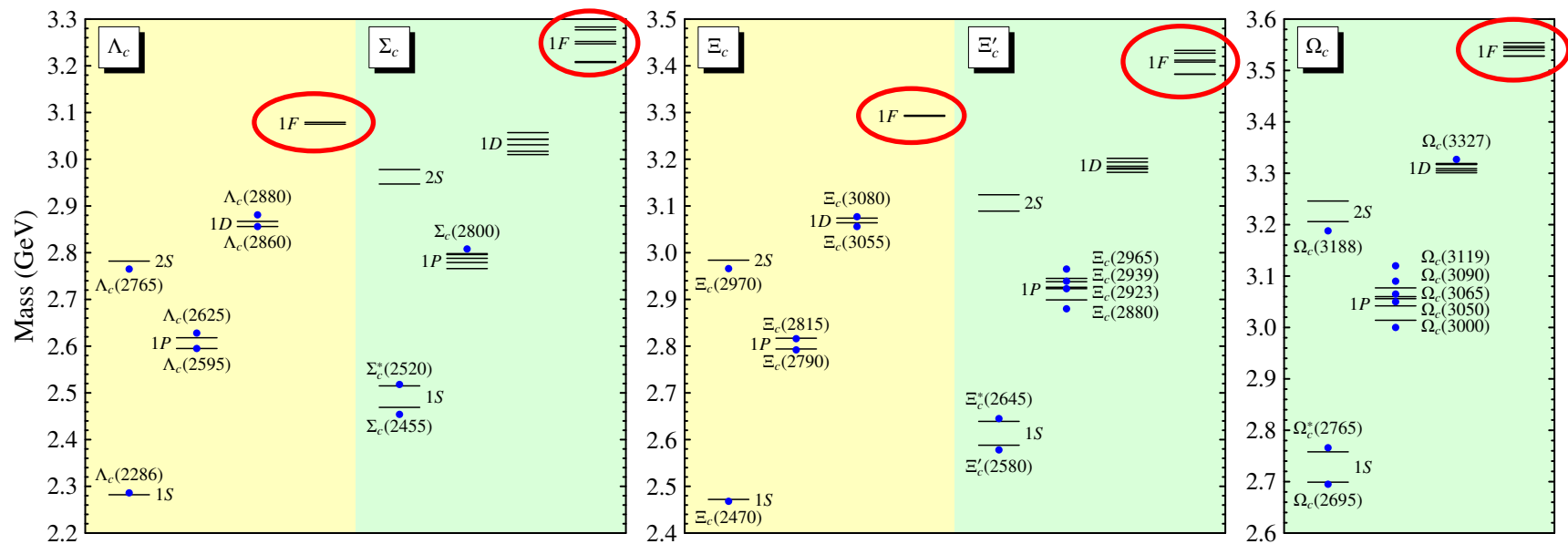
- 模型在 1S、1P、1D、2S 中取得了成功
- 但 1F 属于高分波，模型尚未在 1F 中进行验证
- 该工作对模型提出挑战，对 1F 的研究有助于验证模型的可靠性

λ 模激发的单粲重子的 Jacobi 坐标和基矢:



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

谱学:



单重味重子的理论值与实验值。短横线代表理论值，圆点代表实验值。

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

所用到的谱学参数

衰变:

$\bar{3}_f$:

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

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

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

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

$$\text{Br} [\Xi_c(1F, 5/2^-) \rightarrow \Sigma D^*] \approx 54.7\%,$$

$$\text{Br} [\Xi_c(1F, 7/2^-) \rightarrow \Sigma D^*] \approx 60.2\%.$$

6_f :

特点：质量更大，衰变更加复杂

理论分支比较大的衰变道

$\Sigma_c(1F)$ $\Xi'_c(1F)$ $\Omega_c(1F)$

单粲重子 + 轻味介子 $\Sigma_c(1P)\pi$ $\Sigma_c(1P)\bar{K}$ 理论计算的分支比较小

$\Sigma_c(1D)\pi$ $\Lambda_c(1P)\bar{K}$

$\Lambda_c\pi\pi$ $\Lambda_c\bar{K}\pi$

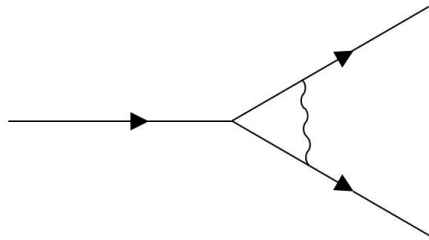
...

轻味重子 + 单粲介子 ΔD $\Sigma^* D$ $\text{Br} [\Omega_{c2}(1F, 3/2^-) \rightarrow \Xi^* D] \approx 30.8\%$

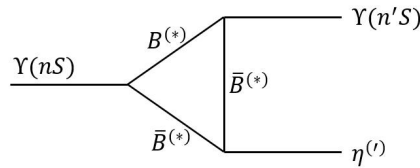
$\text{Br} [\Omega_{c2}(1F, 3/2^-) \rightarrow \Xi D^*] \approx 42.2\%$

...

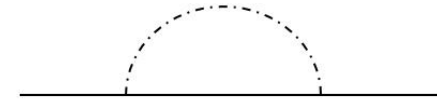
重子的强子圈效应



反常磁矩



OZI 压低的衰变



质量修正

在耦合道模型中，强子的裸态可以与中间衰变道耦合，形成强子圈，强子和物理态波函数需要重新写成

$$|\psi\rangle = c_0 |\psi_A\rangle + c_{BC}(\mathbf{p}) |\psi_{BC}(\mathbf{p})\rangle,$$

这里， $|\psi_A\rangle$ 是裸态， $|\psi_{BC}(\mathbf{p})\rangle$ 是中间态， c_0 和 $c_{BC}(\mathbf{p})$ 分别为裸态和中间衰变道的几率振幅。由于态矢的定义发生了变化，系统的哈密顿量的定义也需要重定义成

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_I + \hat{H}_{BC},$$

这里， \hat{H}_0 只对裸态 $|\psi_A\rangle$ 起作用， \hat{H}_{BC} 只对中间态 $|\psi_{BC}(\mathbf{p})\rangle$ 起作用， \hat{H}_I 为连接裸态和中间衰变道的跃迁哈密顿量。

得到耦合道方程：

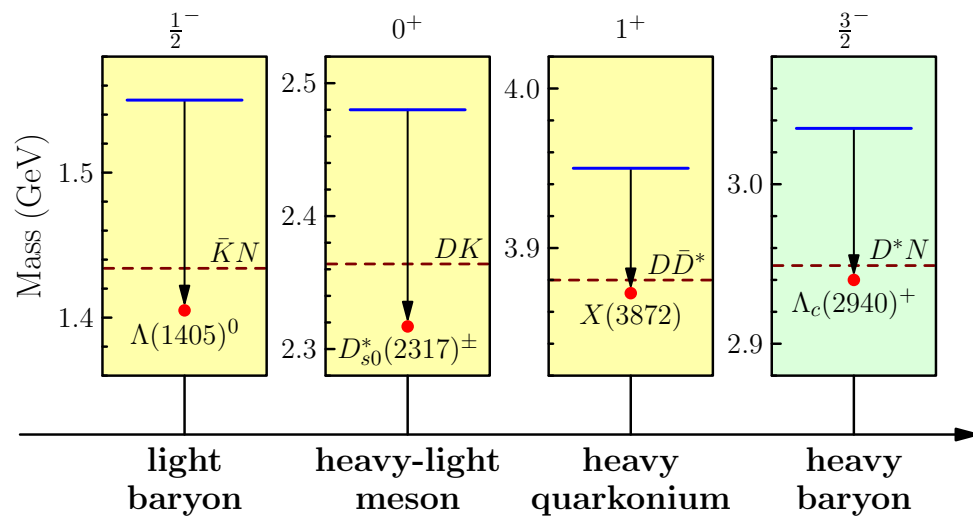
$$M_0 + \int \frac{|H_{A \rightarrow BC}(\mathbf{p})|^2}{M - E_{BC}(p)} d^3 \mathbf{p} = M.$$

我们定义质量平移：

$$\Delta M(M) = \int \frac{|H_{A \rightarrow BC}(\mathbf{p})|^2}{M - E_{BC}(p)} d^3 \mathbf{p}.$$

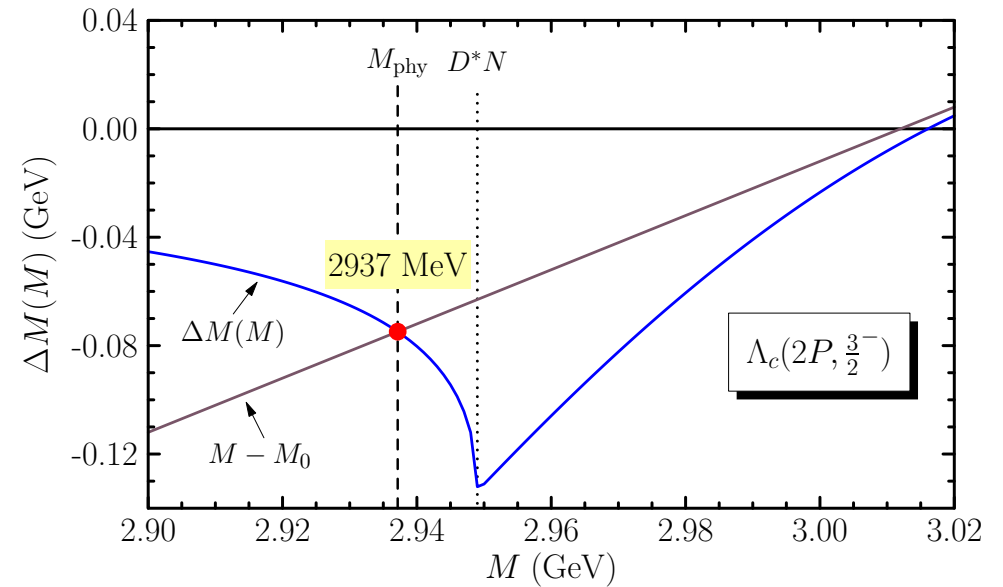
1. M_0 : 裸质量，由传统的夸克模型求解
2. M : 物理质量
3. $H_{A \rightarrow BC}(\mathbf{p})$: 裸态到圈的跃迁矩阵元

$\Lambda_c(2940)$ 的低质量疑难



1. 大部分的强子可以在传统的夸克模型下得到很好的解释；
2. $\Lambda(1405)$, $D_{s0}^*(2317)$ 、 $X(3872)$ 等少数粒子的质量低于理论预言的 100 MeV 左右；
3. $\Lambda_c(2940)$ 是首个具有质量反常的单重味重子。

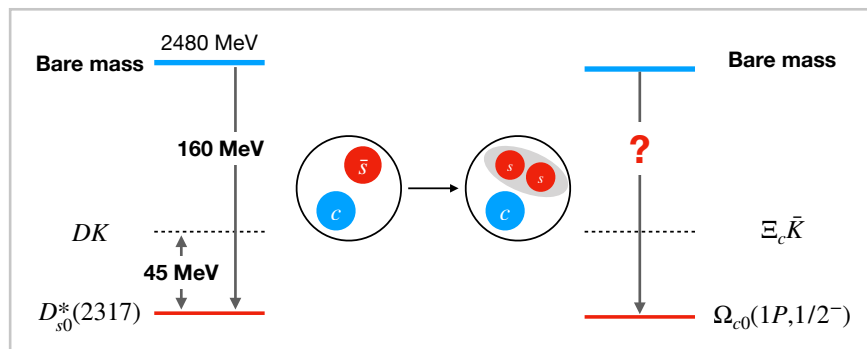
数值结果



1. 在耦合道效应下，可以很好地解释 $\Lambda_c(2940)$ ；
2. 文献 [1] 中引入强子圈的自相互作用，此时质量压低更加明显。

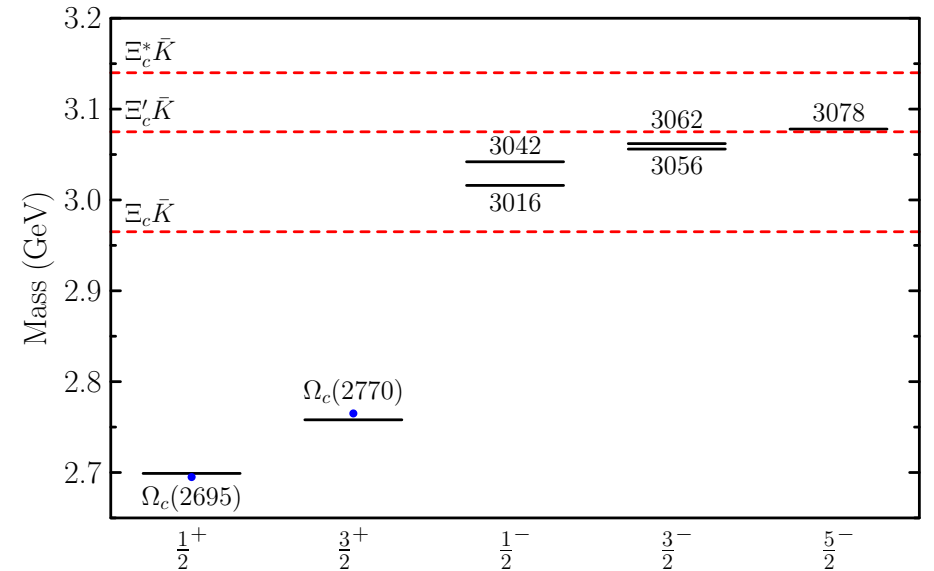
[1] Z. L. Zhang, Z. W. Liu, S. Q. Luo, F. L. Wang, B. Wang and H. Xu, Phys. Rev. D 107, 034036 (2023)

强子圈在 Ω_c 中的应用



数值结果

Ω_c 的势模型质量

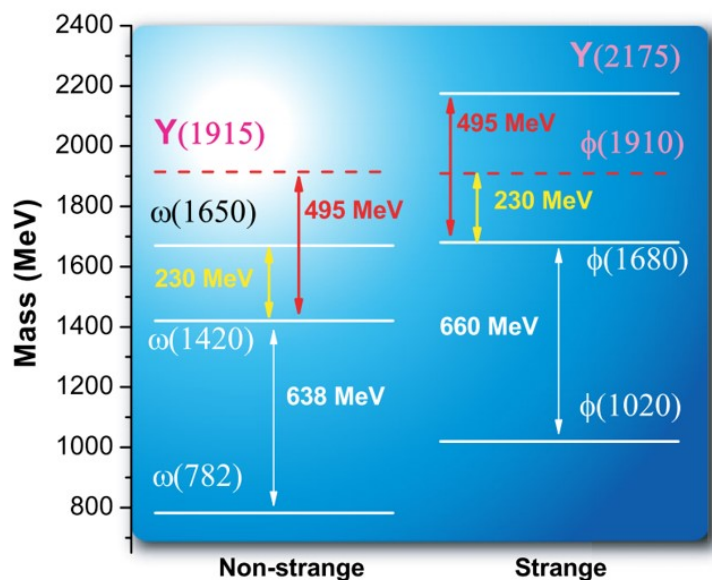


- $D_{s0}^*(2317)$ 存在明显的圈效应；
- 将 \bar{s} 替换成 ss ，可以研究圈效应对 Ω_c 质量的影响。

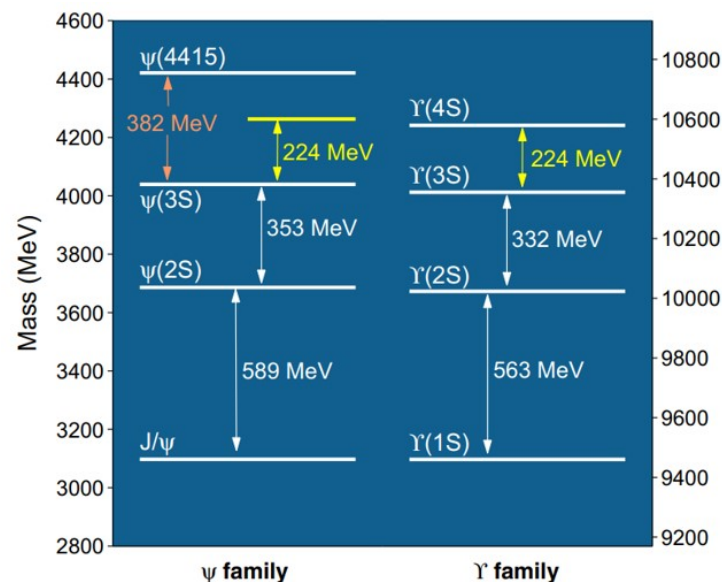
- $\Omega_{c0}^d(1P, 1/2^-)$ 的物理质量预言为 2945 MeV，其质量大约下移 97 MeV，存在明显的圈效应；
- 我们建议 Belle II、LHCb 等实验组对 $\Omega_{c0}^d(1P, 1/2^-)$ 进行寻找。

单重味重子的对称性

介子中的质量差存在规律



Phys. Rev. D 85, 074024
(2012)



Eur. Phys. J. C 74, 3208
(2014)

单重味重子中是否存在类似的规律?

规律一：奇异夸克数不同的体系激发能近似相等

$nL(J^P)$	态	质量	质量差
$1S(1/2^+)$	$\Lambda_c(2286)^+/\Xi_c(2470)^+$	2286.5/2467.9	181.4
$1P(1/2^-)$	$\Lambda_c(2595)^+/\Xi_c(2790)^+$	2592.3/2792.4	200.1
$1P(3/2^-)$	$\Lambda_c(2625)^+/\Xi_c(2815)^+$	2628.1/2816.7	188.6
$2S(1/2^+)$	$\Lambda_c(2765)^+/\Xi_c(2970)^+$	2766.6/2966.3	199.7
$1D(3/2^+)$	$\Lambda_c(2860)^+/\Xi_c(3055)^+$	2856.1/3055.9	199.8
$1D(5/2^+)$	$\Lambda_c(2880)^+/\Xi_c(3080)^+$	2881.6/3077.2	195.6

系统	奇异夸克数
Λ_c	0
Ξ_c	1

$nL(J^P)$	态	质量差
$1S(1/2^+)$	$\Sigma_c(2455)^{++}/\Xi'_c(2570)^+/\Omega_c(2695)^0$	124.4/116.8
	$\Sigma_b(5815)^+/\Xi'_b(5935)^-/\Omega_b(6046)^-$	124.4/111.1
$1S(3/2^+)$	$\Sigma_c^*(2520)^{++}/\Xi_c^*(2645)^+/\Omega_c(2765)^0$	127.2/120.3
	$\Sigma_b^*(5835)^+/\Xi_b^*(5955)^-/\Omega_b^-(\dots)$	125.0/...
$1P(\frac{3}{2}^- \text{ or } \frac{5}{2}^-)$	$\Sigma_c(2800)^{++}/\Xi'_c(2939)^0/\Omega_c(3065)^0$	137.6/127.0
	$\Sigma_b(6097)^-/\Xi'_b(6227)^-/\Omega_b(6350)^-$	128.9/123.0

系统	奇异夸克数
Σ_c	0
Ξ'_c	1
Ω_c	2

规律二： Λ_Q 和 Ξ_Q 的自旋劈裂近似相等

Λ_Q 态	自旋劈裂	Ξ_Q 态	自旋劈裂
$\Lambda_c(2595)^+/\Lambda_c(2625)^+$	35.8	$\Xi_c(2790)^+/\Xi_c(2815)^+$	24.3
$\Lambda_c(2860)^+/\Lambda_c(2880)^+$	25.5	$\Xi_c(3055)^+/\Xi_c(3080)^+$	21.3

对于 Λ_Q 和 Ξ_Q 的 nL 激发态，会产生 $J = L - \frac{1}{2}$ 和 $J = L + \frac{1}{2}$ 两个态

$$m_{\Lambda_c(L+\frac{1}{2})} - m_{\Lambda_c(L-\frac{1}{2})} \approx m_{\Xi_c(L+\frac{1}{2})} - m_{\Xi_c(L-\frac{1}{2})}$$

规律三： ρ 模和 λ 模激发的单重味重子的质量劈裂存在区别

λ 模激发的 $\Lambda_c/\Sigma_c/\Xi_c^{(\prime)}$ 质量谱

$\Lambda_c(2286)$	$\Lambda_c(2765)$	$\Lambda_c(2595)$	$\Lambda_c(2625)$	$\Lambda_c(2860)$	$\Lambda_c(2880)$
2286.5	2766.6	2592.3	2628.1	2856.1	2881.6
2286	2788	2595	2620	2858	2871
$\Xi_c(2468)$	$\Xi_c(2970)$	$\Xi_c(2790)$	$\Xi_c(2815)$	$\Xi_c(3055)$	$\Xi_c(3080)$
2467.9	2966.3	2792.4	2816.7	3055.9	3077.2
2466	2985	2786	2811	3060	3071
$\Sigma_c(2455)$	$\Sigma_c(2520)$	$\Sigma_c(2800)$			
2454.0	2518.4	2801.0			
2463	2511	2791			
$\Xi_c'(2580)$	$\Xi_c'(2645)$	$\Xi_c'(2923)$	$\Xi_c'(2939)$	$\Xi_c'(2965)$	
2578.4	2645.6	2923.0	2938.6	2964.9	
2595	2648	2928	2949	2934	

ρ 模激发的 $\Lambda_c/\Sigma_c/\Xi_c^{(\prime)}$ 质量谱

	$ 1/2^- \rangle_L$	$ 1/2^- \rangle_H$	$ 3/2^- \rangle_L$	$ 3/2^- \rangle_H$	$ 5/2^- \rangle$
$\Lambda_c^\rho(1P)$	2862	2868	2834	2891	2863
$\Xi_c^\rho(1P)$	3010	3016	2988	3048	3021
ΔM	148	148	154	157	158
	$ 1/2^- \rangle$	$ 3/2^- \rangle$			
$\Sigma_c^\rho(1P)$	2854	2874			
$\Xi_c^{\prime\rho}(1P)$	3005	3027			
ΔM	151	153			

$$m_{u/d} = 310 \text{ MeV}, m_s = 450 \text{ MeV}, m_c = 1650 \text{ MeV}$$

1. λ 模激发的 $\Xi_c-\Lambda_c/\Xi_c'-\Sigma_c$ 的质量差即与 $m_s-m_{u/d}$ 的差有关，也与自旋相关项有关；
2. ρ 模激发的 $\Xi_c-\Lambda_c/\Xi_c'-\Sigma_c$ 的质量差主要与 $m_s-m_{u/d}$ 的差有关。

应用：预言 Ξ_b 激发态的质量

$$\Xi_b \text{ 激发态质量公式: } m_{\Xi_b^{\text{excited}}} = m_{\Xi_b^{\text{ground}}} + (m_{\Lambda_b^{\text{excited}}} - m_{\Lambda_b^{\text{ground}}})$$

$$m_{\Xi_b(2S,1/2^+)} = 6257 \text{ MeV}$$

$$m_{\Xi_b(1P,1/2^-)} = 6097 \text{ MeV} \quad m_{\Xi_b(1P,3/2^-)} = 6105 \text{ MeV}$$

$$m_{\Xi_b(1D,3/2^+)} = 6331 \text{ MeV} \quad m_{\Xi_b(1D,5/2^+)} = 6337 \text{ MeV}$$

实验验证：

1. CMS [1] 和 LHCb [2] 验证了我们对 $\Xi_b(1P)$ 的质量预言；
2. LHCb [3] 验证了我们对 $\Xi_b(1D)$ 的质量预言。

[1] [CMS] Phys. Rev. Lett. 126, 252003 (2021)

[2] [LHCb] Phys. Rev. Lett. 131, 171901 (2023)

[3] [LHCb] Phys. Rev. Lett. 128, 162001 (2022)

总结

- 大部分的单重味重子的理论计算与实验符合较好；
- 强子圈可以解决强子谱的反常现象；
- 单重味重子的谱学具有较高的对称性。

目前，实验上已经发现了大量的单重味重子，这为我们的研究提供了大量的数据，随着技术的进步，我们对单重味重子的计算有望在实验上被找到。

谢谢各位批评指正