

# 重味重子激发态的研究

报告人：罗肆强

兰州大学

2026年04月27日

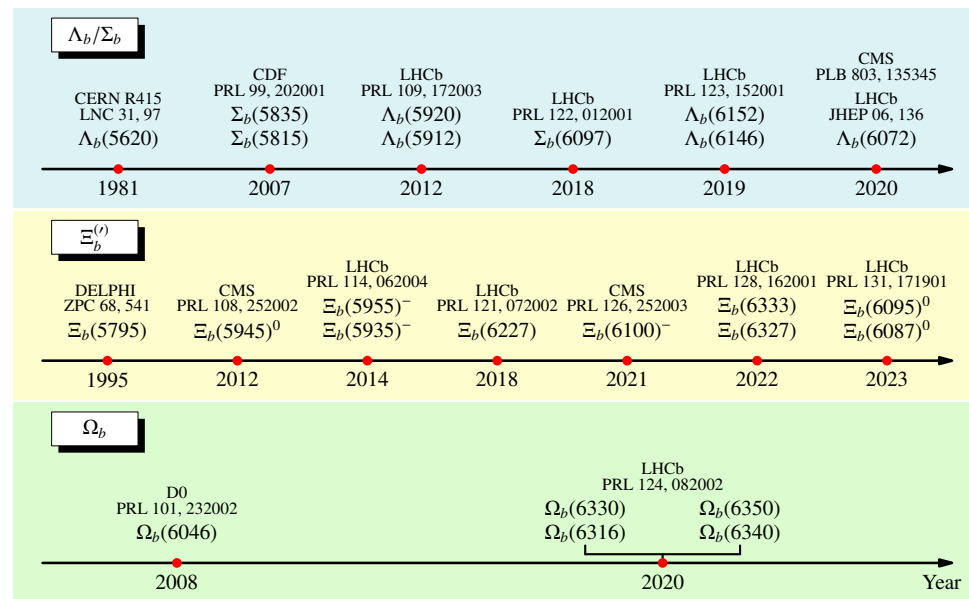
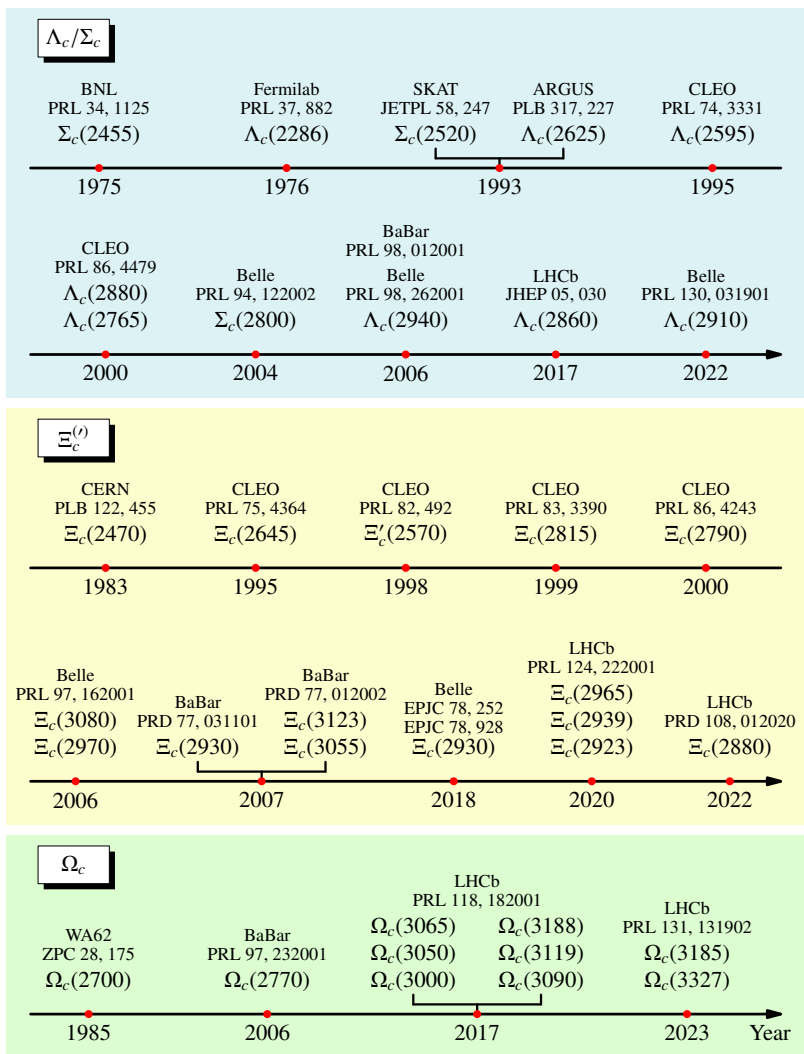
重庆

第八届全国重味物理与量子色动力学研讨会

# 报告提纲

1. 研究背景
2. 模型方法
3. 谱学及衰变研究
4. 总结

# 1. 研究背景



1. 在过去的大约 50 年里，超过 30 个单粲重子被实验发现；
2. 在过去的大约 40 年里，超过 20 个单底重子被实验发现；
3. 超过一半的数量是本世纪发现的。

## 2. 模型方法

# 1. 势模型-谱学

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

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

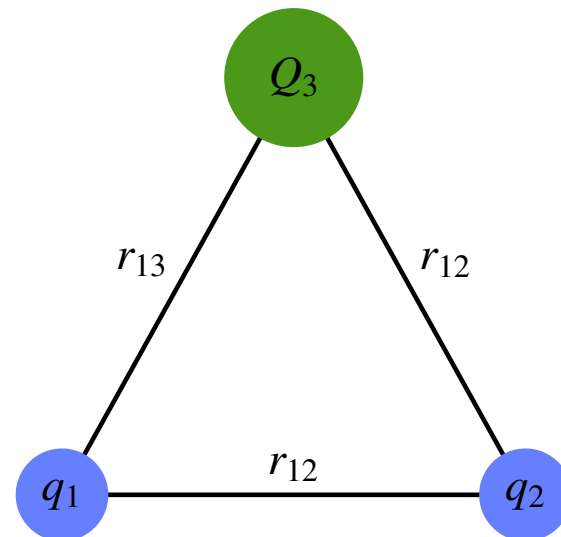
$$H_{ij}^{\text{conf}} = -\frac{2\alpha_s}{3r_{ij}} + \frac{b}{2}r_{ij} + \frac{1}{2}C$$

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

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

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

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



## 2. 求解三体薛定谔方程-高斯展开法

三体 Schrödinger 方程:

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

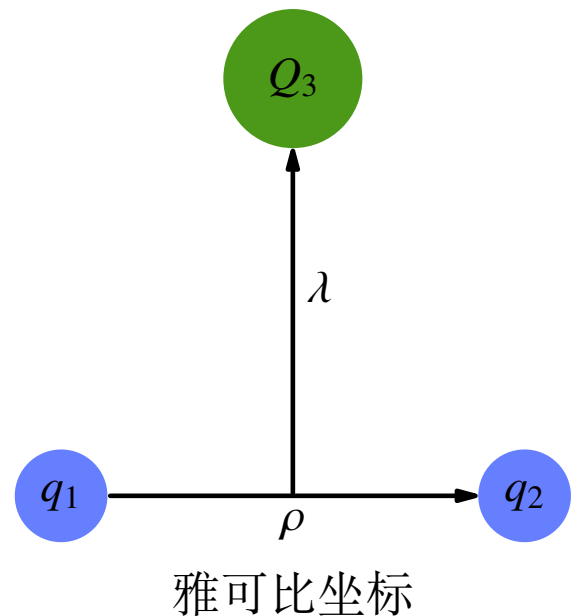
波函数  $\Psi_{JM}(\rho, \lambda)$  的展开形式为

$$\Psi_{JM}(\rho, \lambda) = \sum_{n_\rho, n_\lambda} C_{n_\rho n_\lambda} \phi^{\text{color}} \phi^{\text{flavor}} \\ \times [ [ [s_{q_1} s_{q_2}]_{s_\ell} [\phi_{n_\rho l_\rho}(\rho) \phi_{n_\lambda l_\lambda}(\lambda)]_L ]_{j_\ell} s_Q ]_{JM}$$

$C_{n_\rho n_\lambda}$  通过 Rayleigh-Ritz 变分法进行求解:

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

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



高斯参数:

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

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

### 3. QPC 模型-强衰变

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

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

$J_{BC}$  是末态  $BC$  相对自旋,  $L_{BC}$  表示  $BC$  之间相对轨道角动量,  $p$  是在  $A$  的质心系中,  $B$  或  $C$  的动量大小。最终得到的宽度为:

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

# 3. 谱学及衰变研究

# 1. 单重味重子的对称性

## 单粲重子

$\bar{3}_f$			$6_f$	
$ 1S, 1/2^+\rangle$			$ 1S, 1/2^+\rangle$	$ 1S, 3/2^+\rangle$
$\Lambda_c(2286)$			$\Sigma_c(2455)$	$\Sigma_c^*(2520)$
$\Xi_c(2470)$			$\Xi_c'(2580)$	$\Xi_c^*(2460)$
			$\Omega_c(2695)$	$\Omega_c^*(2765)$
$ 1P, \frac{1}{2}^-\rangle$	$ 1P, \frac{3}{2}^-\rangle$	$ 2S, \frac{1}{2}^+\rangle$	$1P \sim 2S$	
$\Lambda_c(2595)$	$\Lambda_c(2625)$	$\Lambda_c(2765)$	$\Sigma_c(2800)$	
$\Xi_c(2790)$	$\Xi_c(2815)$	$\Xi_c(2970)$	$\Xi_c(2880) \Xi_c(2923) \Xi_c(2939) \Xi_c(2965)$	
			$\Omega_c(3000) \Omega_c(3050) \Omega_c(3065) \Omega_c(3090)$	
			$\Omega_c(3119) \Omega_c(3188)$	
$ 1D, \frac{3}{2}^+\rangle$	$ 1D, \frac{5}{2}^+\rangle$		$1D$	
$\Lambda_c(2860)$	$\Lambda_c(2880)$			
$\Xi_c(3055)$	$\Lambda_c(3080)$			
			$\Omega_c(3327)$	

## 单底重子

$\bar{3}_f$			$6_f$	
$ 1S, 1/2^+\rangle$			$ 1S, 1/2^+\rangle$	$ 1S, 3/2^+\rangle$
$\Lambda_b(5620)$			$\Sigma_b(5815)$	$\Sigma_b^*(5835)$
$\Xi_b(5795)$			$\Xi_b'(5935)$	$\Xi_b^*(5955)$
$ 1P, \frac{1}{2}^-\rangle$			$1P \sim 2S$	
$ 1P, \frac{3}{2}^-\rangle$	$ 1P, \frac{3}{2}^-\rangle$	$ 2S, \frac{1}{2}^+\rangle$	$\Sigma_b(6097)$	
$\Lambda_b(5912)$	$\Lambda_b(5920)$	$\Lambda_b(6072)$	$\Xi_b(6227)$	
$\Xi_b(6087)$	$\Xi_b(6095)$		$\Omega_b(6316) \Omega_b(6340) \Omega_b(6330) \Omega_b(6350)$	
$ 1D, \frac{3}{2}^+\rangle$			$1D$	
$ 1D, \frac{5}{2}^+\rangle$	$ 1D, \frac{5}{2}^+\rangle$			
$\Lambda_b(6146)$	$\Lambda_b(6152)$			
$\Xi_c(6327)$	$\Xi_b(6333)$			

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

$nL(J^P)$	态	质量	质量差
1S(1/2 <sup>+</sup> )	$\Lambda_b(5619)/\Xi_b(5791)$	5619.6/5791.7	172.1
1P(1/2 <sup>-</sup> )	$\Lambda_b(5912)/\Xi_b(6087)$	5912.2/6087.0	174.8
1P(3/2 <sup>-</sup> )	$\Lambda_b(5920)/\Xi_b(6095)$	5920.0/6095.1	175.1
1D(3/2 <sup>+</sup> )	$\Lambda_b(6146)/\Xi_b(6327)$	6146.2/6327.3	181.1
1D(5/2 <sup>+</sup> )	$\Lambda_b(6152)/\Xi_b(6332)$	6152.5/6332.7	180.2

## 规律二： $\rho$ 模和 $\lambda$ 模激发的单重味重子的质量劈裂存在区别

$\lambda$  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	

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

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

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

1.  $\lambda$  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.  $\rho$  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 $\Xi_b$ 激发态的质量

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

---

---

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

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

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

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

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

---

---

实验验证：

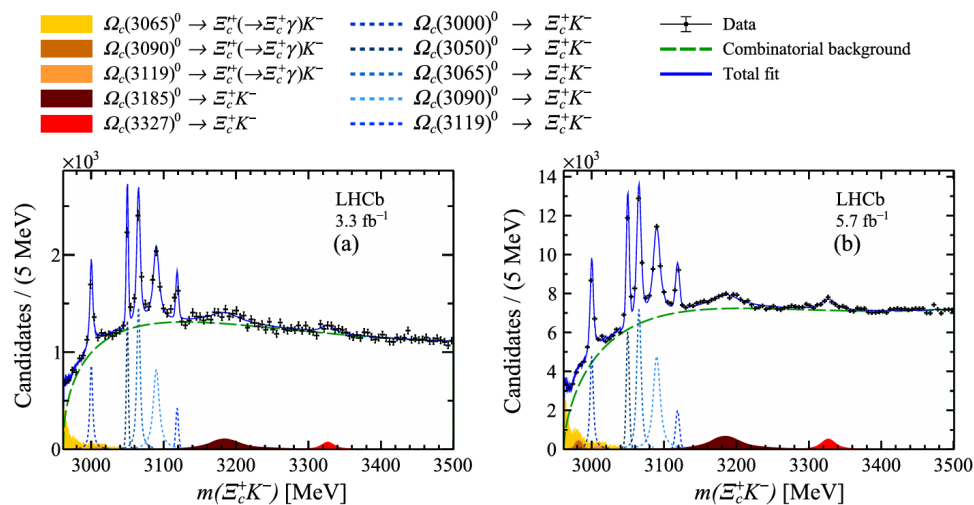
1. 使用该方法计算得到的  $\Xi_b(1P)$  的质量与 CMS [1] 和 LHCb [2] 的测量一致；
2. 使用该方法计算得到的  $\Xi_b(1D)$  的质量与 LHCb [3] 的测量一致。

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

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

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

## 2. $D$ 波单重味重子的研究



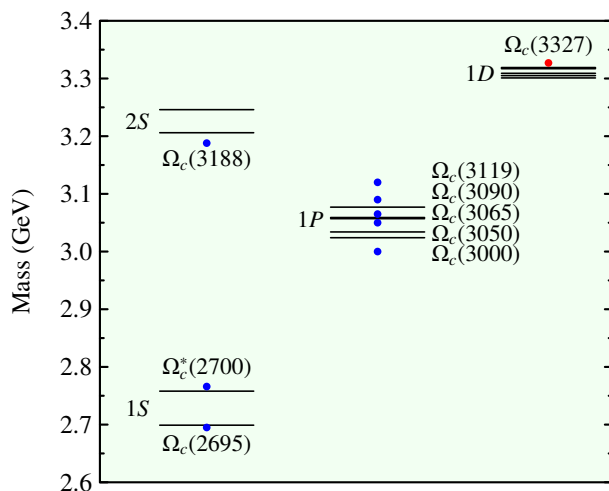
已有的  $D$  波粲重子候选态:  $\Lambda_c(2860)$  和  $\Lambda_c(2880)$

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

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

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

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
$\Xi D$	244.9	15.3	137.8	31.3	2.2	80.6
$\Xi D^*$	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]	

# $\Lambda_b(1D)$ 和 $\Xi_b(1D)$ 的研究

$\Lambda_b(6146)$  和  $\Lambda_b(6152)$  的理论解释

衰变道	$\Lambda_b(6146)(1D, \frac{3}{2}^+)$	$\Lambda_b(6152)(1D, \frac{5}{2}^+)$
$\Sigma_b(5815) \pi$	$3.25^p$	$0.22^f$
$\Sigma_b^*(5835) \pi$	$0.65^p, 0.28^f$	$4.03^p, 0.14^f$
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)

**理论与实验一致**

$\Xi_b$  宽度的理论计算

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

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

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

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

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

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

**理论被实验证实**

### 3. $F$ 波单重味重子的理论研究

现状:

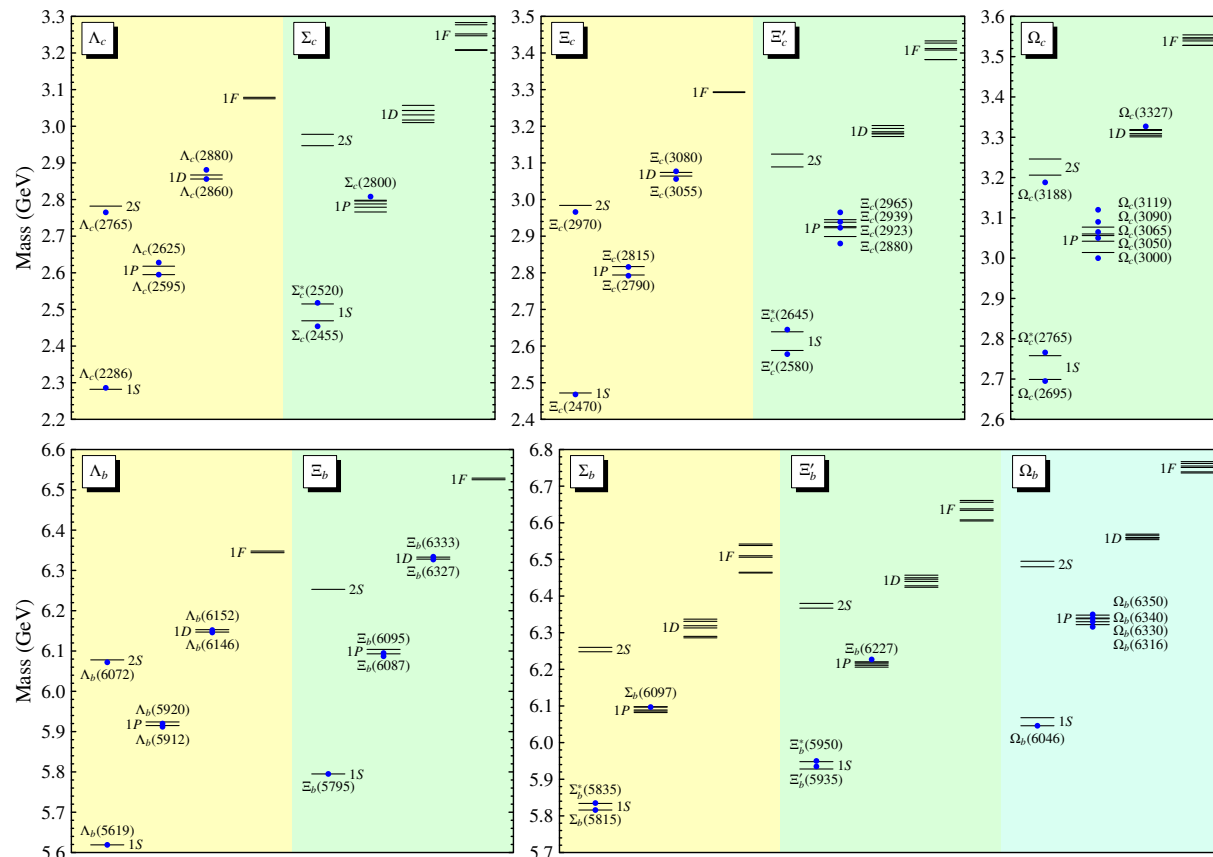
✓ 较为完备的  $1S$  态

✓ 大量的  $1P$ 、 $2S$  候选态

✓ 若干  $1D$ 、 $2P$  候选态

**? 尚未发现  $1F$  候选态**

谱学:



衰变:

## $F$ 波单粲重子

$\bar{3}_f$ :

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

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
$\Lambda D$		0.5	2.1
$\Sigma D$		10.0	22.9
$\Lambda D^*$		4.0	5.2
$\Sigma D^*$		28.3	54.3
...		0.9	0.9
Total		51.7	90.1

$6_f$ :

	Mode I	Mode II
$\Sigma_c(1F)$	$\Sigma_c(1P)\pi$	$\Delta D$
	$\Sigma_c(1D)\pi$	...
	$\Lambda_c\pi\pi$	
	...	
$\Xi'_c(1F)$	$\Sigma_c(1P)\bar{K}$	$\Sigma^*D$
	$\Sigma_c(1D)\bar{K}$	...
	$\Lambda_c\bar{K}\pi$	
	...	
$\Omega_c(1F)$	...	$\Xi^*D$
		$\Xi D^*$

质量更高, 衰变更为复杂

我们建议:

1. 通过  $ND^{(*)}$  寻找  $\Lambda_c(1F)$ ;
2. 通过  $\Sigma D^{(*)}$  寻找  $\Xi_c(1F)$ ;
3. 通过三体过程、轻味重子 + 单重介子、激发态单重味重子 + 轻味介子等过程寻找  $6_f$ - $1F$  单粲重子。

## F 波单底重子

$\bar{3}_f$ :

Decay channels	$M_f$ (MeV)	$\Lambda_b(1F, 5/2^-)$	$\Lambda_b(1F, 7/2^-)$
$\Sigma_b(1S, 1/2^+)\pi$	5816	0.6	0.3
$\Sigma_b(1S, 3/2^+)\pi$	5835	0.6	1.0
$\Sigma_{b2}(1P, 3/2^-)\pi$	6082	11.7	0.2
$\Sigma_{b2}(1P, 5/2^-)\pi$	6089	1.0	12.3
$N\bar{B}$		24.9	5.9
$N\bar{B}^*$		20.2	43.9
...		0.4	0.4
Total		59.4	64.0

Decay channels	$M_f$ (MeV)	$\Xi_b(1F, 5/2^-)$	$\Xi_b(1F, 7/2^-)$
$\Xi'_{b2}(1P, 3/2^-)\pi$	6211	2.0	0.1
$\Xi'_{b2}(1P, 5/2^-)\pi$	6220	0.2	2.2
$\Sigma_b(1S, 1/2^+)\bar{K}$	5816	1.4	0.5
$\Sigma_b(1S, 3/2^+)\bar{K}$	5835	1.1	2.2
$\Lambda\bar{B}$		2.8	1.1
$\Sigma\bar{B}$		27.0	1.9
$\Lambda\bar{B}^*$		3.1	6.0
$\Sigma\bar{B}^*$		1.1	5.4
...		0.5	0.5
Total		39.2	19.9

$6_f$ :

	Mode I	Mode II
$\Sigma_b(1F)$	$\Sigma_b(1P)\pi$	...
	$\Sigma_b(1D)\pi$	
	$\Lambda_b\pi\pi$	
	...	
$\Xi'_b(1F)$	$\Sigma_b(1P)\bar{K}$	...
	$\Sigma_b(1D)\bar{K}$	
	$\Lambda_b\bar{K}\pi$	
	...	
$\Omega_b(1F)$	...	$\Xi^*\bar{B}$
		$\Xi\bar{B}^*$

质量更高，衰变更为复杂

我们建议：

1. 通过  $N\bar{B}^{(*)}$  寻找  $\Lambda_b(1F)$ ;
2. 通过  $\Sigma\bar{B}^{(*)}$  寻找  $\Xi_b(1F)$ ;
3. 通过三体过程、轻味重子 + 单重介子、激发态单重味重子 + 轻味介子等过程寻找  $6_f$ - $1F$  单底重子。

# 4. 总结

- 目前，实验上已经发现了大量的单重味重子激发态的候选态，它们在传统的夸克模型上可以得到很好的解释；
- 从谱学上看，单重味重子存在很高的对称性；
- 我们建议通过  $ND^{(*)}$ 、 $\Sigma D^{(*)}$ 、 $N\bar{B}^{(*)}$ 、 $\Sigma\bar{B}^{(*)}$ 、部分两体及三体衰变等过程寻找  $F$  波单重味重子。

谢谢各位批评指正