激发态单重味重子谱学和衰变的研究

报告人：罗肆强

兰州大学

2025 年 07 月 14 日

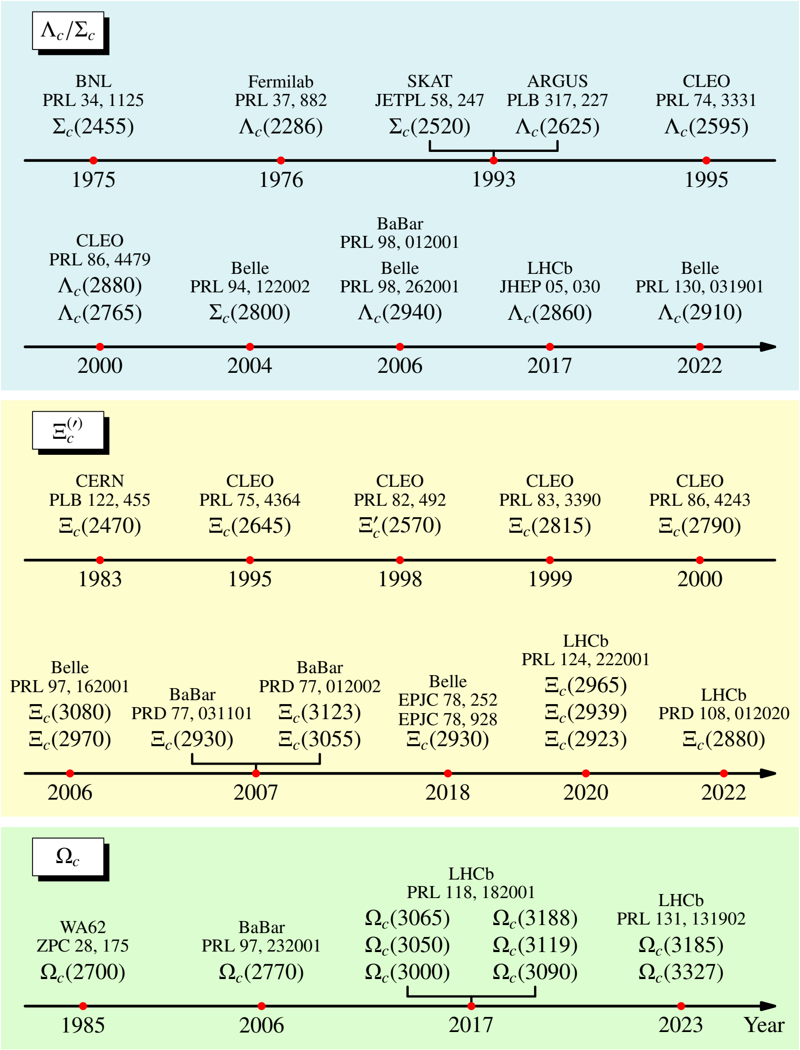
广西 • 桂林

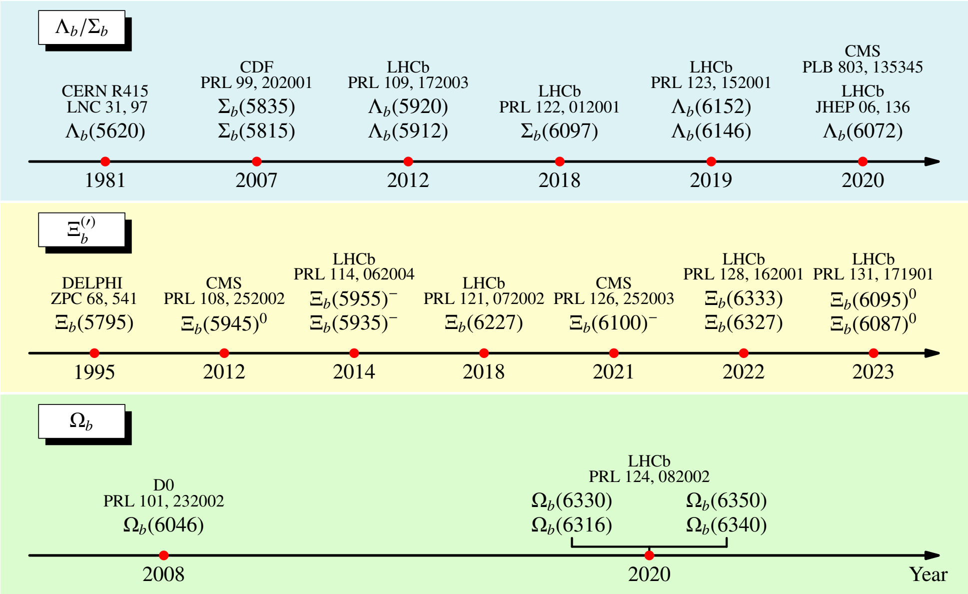
第八届强子谱和强子结构研讨会

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



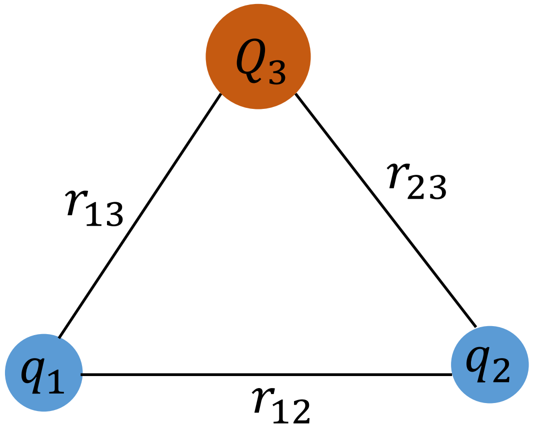


1. 在过去的大约 50 年里，超过 30 个单粲重子被实验发现；
2. 在过去的大约 40 年里，超过 20 个单底重子被实验发现；
3. 超过一半的数量是本世纪发现的。

2. 模型方法

1. 势模型-谱学

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



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

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

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

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

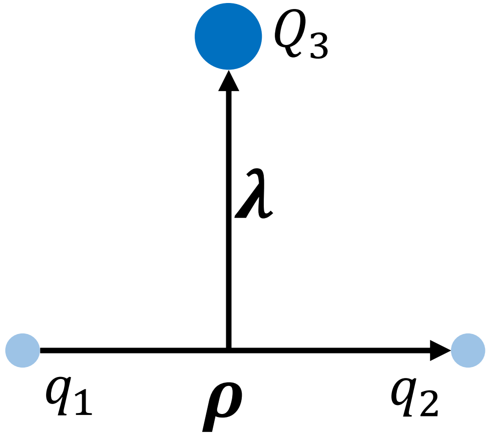
$$H_{ij}^{\mathrm{so(tp)}} = -\frac{1}{2r_{ij}}\frac{\partial H_{ij}^{\mathrm{conf}}}{\partial r_{ij}}\left(\frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{s}_i}{m_i^2} - \frac{\mathbf{r}_{ij} \times \mathbf{p}_j \cdot \mathbf{s}_j}{m_j^2}\right).$$

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

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

$$\Psi_{JM}(\boldsymbol{\rho},\boldsymbol{\lambda}) = \sum_{n_\rho,n_\lambda} C_{n_\rho n_\lambda}\phi^{\text{color}}\phi^{\text{flavor}}$$

$$\times\, [[[s_{q_1}s_{q_2}]_{s_\ell}[\phi_{n_\rho l_\rho}(\boldsymbol{\rho})\phi_{n_\lambda l_\lambda}(\boldsymbol{\lambda})]_L]_{j_\ell}s_Q]_{JM}$$

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

$$\phi_{n_\rho l_\rho m_\rho}(\boldsymbol{\rho}) = N_{n_\rho l_\rho}\rho^{l_\rho}\mathrm{e}^{-\nu^\rho_{n_\rho}\rho^2}Y_{l_\rho m_\rho}(\hat{\boldsymbol{\rho}})$$

$$\phi_{n_\lambda l_\lambda m_\lambda}(\boldsymbol{\lambda}) = N_{n_\lambda l_\lambda}\lambda^{l_\lambda}\mathrm{e}^{-\nu^\lambda_{n_\lambda}\lambda^2}Y_{l_\lambda m_\lambda}(\hat{\boldsymbol{\lambda}})$$

高斯参数:

雅可比坐标

$$\nu_{n_\rho} = \frac{1}{\rho^2_{n_\rho}},\ \rho_{n_\rho} = \rho_1 a^{n_\rho-1}\ (n_\rho = 1 - n^\rho_{\max})$$

$$\nu_{n_\lambda} = \frac{1}{\lambda^2_{n_\lambda}},\ \lambda_{n_\lambda} = \lambda_1 b^{n_\lambda-1}\ (n_\lambda = 1 - n^\lambda_{\max})$$

3. QPC 模型-强衰变

QPC 模型的算符为:

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

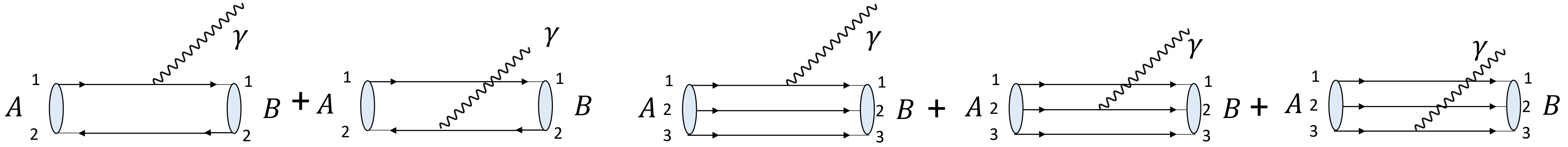
衰变的分波振幅可以写成

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

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:

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

4. 辐射衰变



在树图阶下，夸克和光子耦合的 Hamiltonian 为

$$H_e = -\sum_j e_j \bar{\psi}_j \gamma_\mu^j A^\mu(\boldsymbol{k}, \boldsymbol{r}) \psi_j,$$

在非相对论近似下，夸克和光子耦合的 Hamiltonian 化简为

$$h_e \simeq \sum_j \left[e_j \boldsymbol{r}_j \cdot \boldsymbol{\epsilon} - \frac{e_j}{2m_j} \boldsymbol{\sigma}_j \cdot (\boldsymbol{\epsilon} \times \hat{\boldsymbol{k}}) \right] e^{-i\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r}_j}.$$

使用上述的 Hamiltonian，辐射衰变的的振幅可以表示为

$$\mathcal{A} = -i\sqrt{\frac{\omega_\gamma}{2}} \langle f|h_e|i\rangle,$$

这里 $|i\rangle$ 和 $|f\rangle$ 分别表示初态和末态的波函数，ω_γ 为末态的光子能量。该辐射衰变的宽度为：

$$\Gamma = \frac{|\boldsymbol{k}|^2}{\pi} \frac{2}{2J_i + 1} \frac{M_f}{M_i} \sum_{J_{fz}, J_{iz}} |\mathcal{A}_{J_{fz}, J_{iz}}|^2.$$

3. 谱学及衰变研究

1. 单重味重子的分类

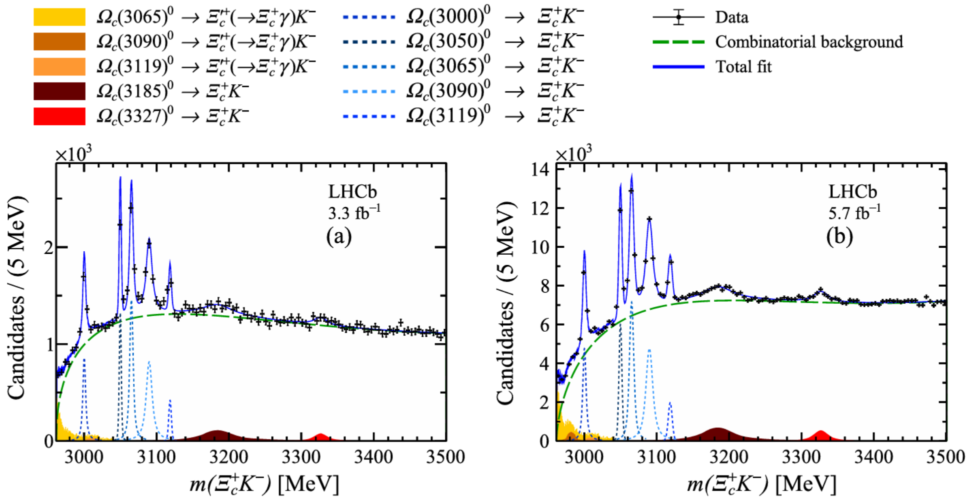
单粲重子

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

单底重子

$\bar{3}_f$			6_f	
$\|1S, 1/2^+\rangle$			$\|1S, 1/2^+\rangle$	$\|1S, 3/2^+\rangle$
$\Lambda_b(5620)$			$\Sigma_b(5815)$	$\Sigma_b^*(5835)$
$\Xi_b(5795)$			$\Xi_b'(5935)$	$\Xi_b^*(5955)$
			$\Omega_b(6046)$	
$\|1P, \frac{1}{2}^-\rangle$	$\|1P, \frac{3}{2}^-\rangle$	$\|2S, \frac{1}{2}^+\rangle$	$1P \sim 2S$	
$\Lambda_b(5912)$	$\Lambda_b(5920)$	$\Lambda_b(6072)$	$\Sigma_b(6097)$	
$\Xi_b(6087)$	$\Xi_b(6095)$		$\Xi_b(6227)$	
			$\Omega_b(6316)$ $\Omega_b(6340)$ $\Omega_b(6330)$ $\Omega_b(6350)$	
$\|1D, \frac{3}{2}^+\rangle$	$\|1D, \frac{5}{2}^+\rangle$		$1D$	
$\Lambda_b(6146)$	$\Lambda_b(6152)$			
$\Xi_c(6327)$	$\Xi_b(6333)$			

2. D 波单重味重子的研究

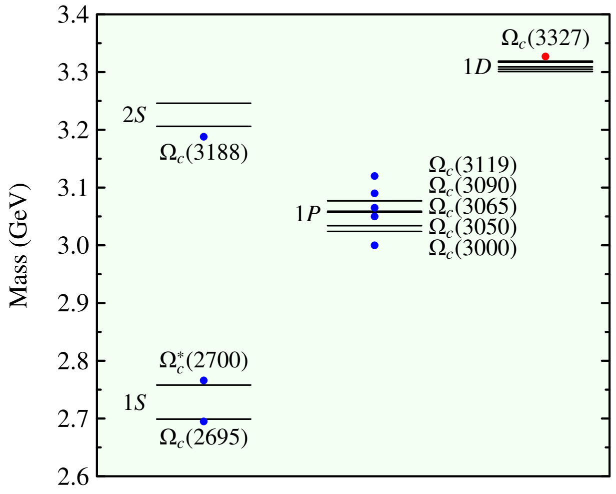


$\Omega_c(3327)$ 的发现及理论解释

$$M_{\Omega_c(3327)} = 3327.1 \pm 1.2^{+0.1}_{-1.3} \pm 0.2\,\text{MeV},$$
$$\Gamma_{\Omega_c(3327)} = 20 \pm 5^{+13}_{-1}\,\text{MeV}.$$

[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
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]	

$\Lambda_b(1D)$ 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

Ξ_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)

$$m[\Xi_b(6327)^0] = 6327.28^{+0.23}_{-0.21}\ \mathrm{MeV},$$
$$m[\Xi_b(6333)^0] = 6332.69^{+0.17}_{-0.18}\ \mathrm{MeV},$$
$$\Gamma[\Xi_b(6327)^0] = 0.93^{+0.74}_{-0.60}\ \mathrm{MeV},$$
$$\Gamma[\Xi_b(6333)^0] = 0.25^{+0.58}_{-0.25}\ \mathrm{MeV},$$

理论被实验证实

3. F 波单重味重子的理论研究

现状：

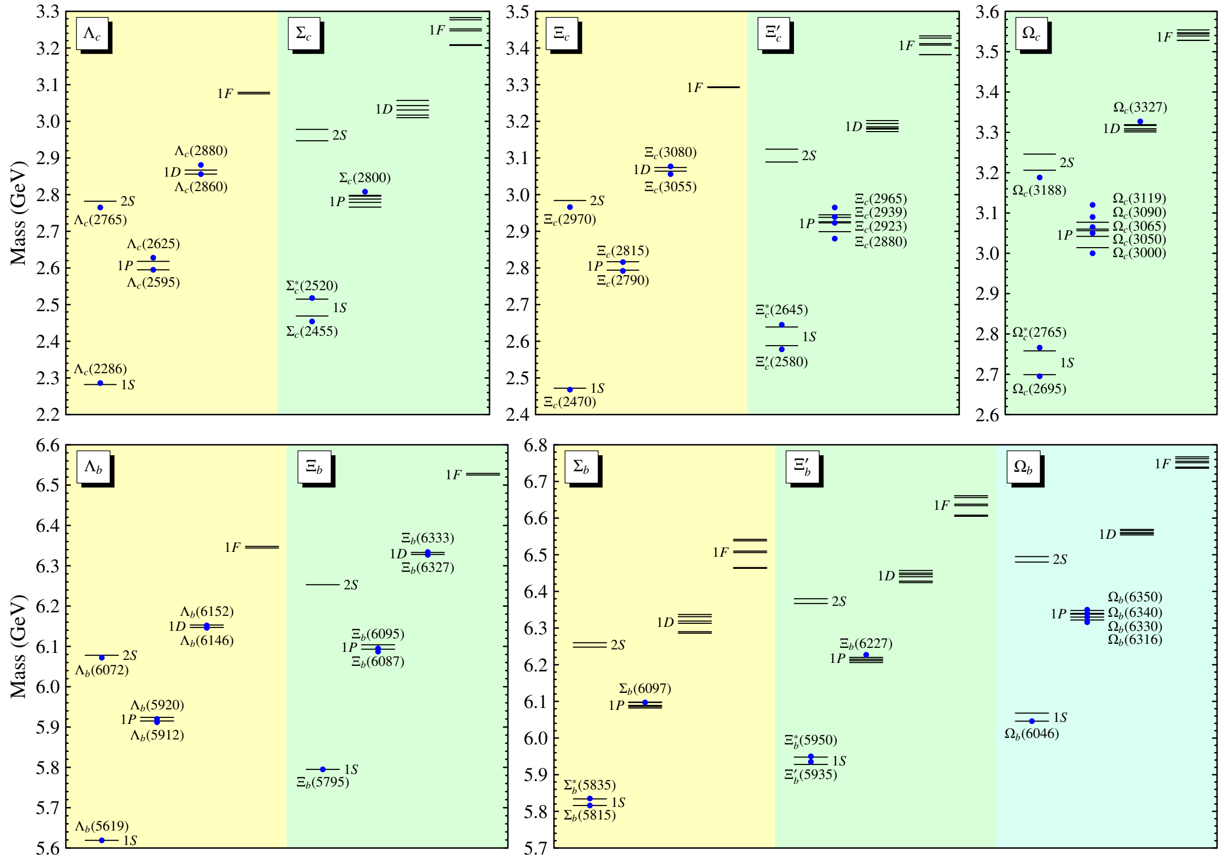
✓ 较为完备的 1S 态

✓ 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
$\cdots$		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
ΛD		0.5	2.1
ΣD		10.0	22.9
ΛD^*		4.0	5.2
ΣD^*		28.3	54.3
$\cdots$		0.9	0.9
Total		51.7	90.1

6_f:

	Mode I	Mode II
$\Sigma_c(1F)$	$\Sigma_c(1P)\pi$, $\Sigma_c(1D)\pi$, $\Lambda_c\pi\pi$, $\cdots$	ΔD, $\cdots$
$\Xi'_c(1F)$	$\Sigma_c(1P)\bar{K}$, $\Sigma_c(1D)\bar{K}$, $\Lambda_c\bar{K}\pi$, $\cdots$	Σ^*D, $\cdots$
$\Omega_c(1F)$	$\cdots$	Ξ^*D, ΞD^*

质量更高，衰变更为复杂

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
$\cdots$		0.4	0.4
Total		59.4	64.0

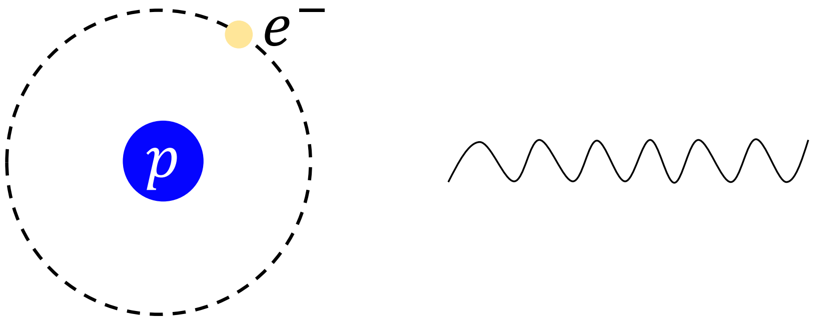
Decay channels	M_f (MeV)	$\Xi_b(1F,5/2^-)$	$\Xi_b(1F,7/2^-)$
$\Xi'_{b2}(1P,3/2^-)\pi$	6211	2.0	0.1
$\Xi'_{b2}(1P,5/2^-)\pi$	6220	0.2	2.2
$\Sigma_b(1S,1/2^+)\bar{K}$	5816	1.4	0.5
$\Sigma_b(1S,3/2^+)\bar{K}$	5835	1.1	2.2
$\Lambda\bar{B}$		2.8	1.1
$\Sigma\bar{B}$		27.0	1.9
$\Lambda\bar{B}^*$		3.1	6.0
$\Sigma\bar{B}^*$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

6_f:

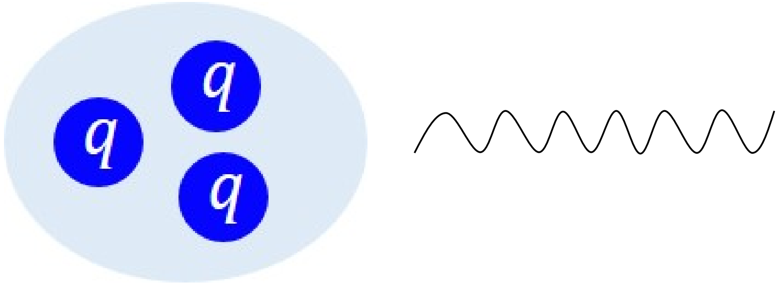
	Mode I	Mode II
$\Sigma_b(1F)$	$\Sigma_b(1P)\pi$ $\Sigma_b(1D)\pi$ $\Lambda_b\pi\pi$ $\cdots$	$\cdots$
$\Xi'_b(1F)$	$\Sigma_b(1P)\bar{K}$ $\Sigma_b(1D)\bar{K}$ $\Lambda_b\bar{K}\pi$ $\cdots$	$\cdots$
$\Omega_b(1F)$	$\cdots$	Ξ^*D ΞD^*

质量更高，衰变更为复杂

5. 辐射衰变



辐射衰变 $\longrightarrow$ 氢原子能级结构



辐射衰变 $\longrightarrow$ 强子结构

实验上观察到的单粲重子的辐射衰变

Processes	Status
$\Xi_c'^+ \to \Xi_c^+\gamma$	✓
$\Xi_c'^0 \to \Xi_c^0\gamma$	✓
$\Omega_c^{*0} \to \Omega_c^0\gamma$	✓
$\Xi_c^0(2790) \to \Xi_c^0\gamma$	✓
$\Xi_c^0(2815) \to \Xi_c^0\gamma$	✓
$\Xi_c^+(2790) \to \Xi_c^+\gamma$	Upper limits
$\Xi_c^+(2815) \to \Xi_c^+\gamma$	Upper limits

$\bar{3}_f$ 单粲重子

Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Expt. [3]
$\Lambda_c^+(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Lambda_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.1	0.26	0.1	$\Xi_c^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_c^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	217.5	263	202.5	800 ± 320
$\Lambda_c^+(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Sigma_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.3	0.45	1.0	$\Xi_c^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_c'^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0	$\cdots$
$\Lambda_c^+(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Sigma_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.0	0.05	0.0	$\Xi_c^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_c^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0	$\cdots$
$\Lambda_c^+(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Lambda_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.8	0.30	0.7	$\Xi_c^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_c^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	243.1	292	292.6	$320\pm45^{+45}_{-80}$
$\Lambda_c^+(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Sigma_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.9	1.17	2.5	$\Xi_c^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_c'^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.1	$\cdots$
$\Lambda_c^+(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Sigma_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.2	0.26	0.2	$\Xi_c^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_c^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0	$\cdots$
				$\Xi_c^+(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	1.7	4.65	7.4	<350
				$\Xi_c^+(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_c'^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	1.2	1.43	1.3	$\cdots$
				$\Xi_c^+(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.5	0.44	0.1	$\cdots$
				$\Xi_c^+(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	1.0	2.8	4.8	<80
				$\Xi_c^+(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_c'^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	2.1	2.32	2.9	$\cdots$
				$\Xi_c^+(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	1.2	0.99	0.3	$\cdots$

[1] K. L. Wang, Y. X. Yao, X. H. Zhong, and Q. Zhao, Phys. Rev. D 96, 116016 (2017).

[2] E. Ortiz-Pacheco and R. Bijker, Phys. Rev. D 108, 054014 (2023).

[3] [Belle Collaboration] Phys. Rev. D 102, 071103 (2020).

6_f 单粲重子

Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Ref. [3]	Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Ref. [3]
$\Sigma_c^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+) \to \Sigma_c^0(1S,\frac{1}{2}^+)\,\gamma$	1.3	3.43	1.8	1.378	$\Xi_c'^0(1S,\frac{1}{2}^+)\to\Xi_c^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.3	0.0	0.4	0.342
$\Sigma_c^{+}(1S,\frac{1}{2}^+) \to \Lambda_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\,\gamma$	59.2	80.6	87.2	93.5	$\Xi_c^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_c^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	1.1	0.0	1.6	1.322
$\Sigma_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+) \to \Lambda_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\,\gamma$	132.8	373	199.4	231	$\Xi_c^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_c'^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	1.0	3.03	1.4	1.262
$\Sigma_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+) \to \Sigma_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\,\gamma$	0.0	0.004	0.0	0.00067	$\Xi_c'^+(1S,\frac{1}{2}^+)\to\Xi_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	14.9	42.3	20.6	21.38
$\Sigma_c^{*++}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Sigma_c^{++}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	1.7	3.94	2.1	1.483	$\Xi_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_c^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	52.7	139	74.2	81.9
					$\Xi_c^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_c'^+(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.1	0.004	0.1	0.029
					$\Omega_c^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Omega_c^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.9	0.89	1.0	1.14

[1] K. L. Wang, Y. X. Yao, X. H. Zhong, and Q. Zhao, Phys. Rev. D 96, 116016 (2017).
[2] E. Ortiz-Pacheco and R. Bijker, Phys. Rev. D 108, 054014 (2023).
[3] A. Hazra, S. Rakshit, and R. Dhir, Phys. Rev. D 104, 053002 (2021).

$\bar{3}_f$ 单底重子

Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]
$\Lambda_b^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Lambda_b^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	47.0	50.2	40.7	$\Xi_b^-(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_b^-(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	79.1	135	91.5
$\Lambda_b^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Sigma_b^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.1	0.14	0.2	$\Xi_b^-(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_b^{\prime -}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0
$\Lambda_b^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Sigma_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.1	0.09	0.0	$\Xi_b^-(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_b^{*-}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0
$\Lambda_b^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Lambda_b^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	49.1	52.8	43.4	$\Xi_b^-(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_b^-(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	84.5	147	96.1
$\Lambda_b^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Sigma_b^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.1	0.21	0.3	$\Xi_b^-(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_b^{\prime -}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0
$\Lambda_b^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Sigma_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.1	0.15	0.0	$\Xi_b^-(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_b^{*-}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.0	0.0	0.0
				$\Xi_b^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_b^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	33.9	63.6	83.1
				$\Xi_b^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_b^{\prime 0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.4	1.32	0.6
				$\Xi_b^0(1P,\frac{1}{2}^-)\to\Xi_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.5	2.04	0.1
				$\Xi_b^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_b^0(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	35.2	68.3	88.9
				$\Xi_b^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_b^{\prime 0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.6	1.68	0.7
				$\Xi_b^0(1P,\frac{3}{2}^-)\to\Xi_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\gamma$	0.6	2.64	0.2

[1] K. L. Wang, Y. X. Yao, X. H. Zhong, and Q. Zhao, Phys. Rev. D 96, 116016 (2017).

[2] E. Ortiz-Pacheco and R. Bijker, Phys. Rev. D 108, 054014 (2023).

6_f 单底重子

Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Ref. [3]	Process	Our	Ref. [1]	Ref. [2]	Ref. [3]
$\Sigma_b^{*-}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Sigma_b^{-}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.06	0.0	0.0144	$\Xi_b^{\prime -}(1S,\frac{1}{2}^+)\to\Xi_b^{-}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.6	0.0	0.6	0.707
$\Sigma_b^{0}(1S,\frac{1}{2}^+)\to\Lambda_b^{0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	94.7	130	128.1	151.9	$\Xi_b^{*-}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_b^{-}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.8	0.0	1.0	1.044
$\Sigma_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Lambda_b^{0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	120.2	335	168.8	198.8	$\Xi_b^{*-}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_b^{\prime -}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	15.0	0.0	0.0122
$\Sigma_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Sigma_b^{0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.02	0.0	0.0059	$\Xi_b^{\prime 0}(1S,\frac{1}{2}^+)\to\Xi_b^{0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	28.0	84.6	28.4	46.9
$\Sigma_b^{*+}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Sigma_b^{+}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.1	0.25	0.1	0.080	$\Xi_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_b^{0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	40.8	104	45.2	65.0
					$\Xi_b^{*0}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Xi_b^{\prime 0}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	5.19	0.0	0.0069
					$\Omega_b^{*-}(1S,\frac{3}{2}^+)\to\Omega_b^{-}(1S,\frac{1}{2}^+)\gamma$	0.0	0.1	0.0	0.056

[1] K. L. Wang, Y. X. Yao, X. H. Zhong, and Q. Zhao, Phys. Rev. D 96, 116016 (2017).

[2] E. Ortiz-Pacheco and R. Bijker, Phys. Rev. D 108, 054014 (2023).

[3] A. Hazra, S. Rakshit, and R. Dhir, Phys. Rev. D 104, 053002 (2021).

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；
- 我们建议通过 $ND^{(*)}$、$\Sigma D^{(*)}$、$N\bar{B}^{(*)}$、$\Sigma\bar{B}^{(*)}$、部分三体衰变等过程寻找 F 波单重味重子；
- 辐射衰变也可以用于研究单重味重子的结构。

谢谢各位批评指正