

# 利用夸克模型研究单重味重子S波和P波的强衰变及辐射衰变性质

报告人：王凯雷

指导导师：钟显辉教授

湖南师范大学

[arXiv:1709.04268v2](https://arxiv.org/abs/1709.04268v2)

# 汇报提纲

- 1 引言
- 2 单重味重子夸克模型分类
- 3 理论模型
- 4 结论与分析
- 5 总结

# 1 引言

- 单重味重子谱实验现状

最近, LHCb观察到最新的五个 $\Omega_c$ 重子。实验只给出了它们的衰变道及衰变宽度, 而其他性质尚未确定, 这使我们需要通过理论来研究它们的一些性质(比如 $J^P$ 宇称等)并进一步建立 $\Omega_c$ 重子谱。

## $\Omega_c$ 实验现状

state	$J^P$	Mass	Width	Decay Modes	experiments	status
$\Omega_c^0$	$\frac{1}{2}^+$	$2695.2 \pm 1.7$		Weak	WA62[1]	***
$\Omega_c(2770)^0$	$\frac{3}{2}^+$	$2765.9 \pm 2.0$		$\Omega_c \gamma$	Belle[2]	***
$\Omega_c(3000)^0$	??	$3000.4^{+0.4}_{-0.5}$	$4.5 \pm 0.7$	$\Xi_c \bar{K}$	LHCb[3]	
$\Omega_c(3050)^0$	??	$3050.2^{+0.3}_{-0.5}$	$0.8 \pm 0.2$	$\Xi_c \bar{K}$	LHCb[3]	
$\Omega_c(3066)^0$	??	$3065.6^{+0.4}_{-0.6}$	$3.5 \pm 0.4$	$\Xi_c \bar{K}$	LHCb[3]	
$\Omega_c(3090)^0$	??	$3090.2^{+0.7}_{-0.8}$	$8.7 \pm 1.3$	$\Xi'_c \bar{K}$	LHCb[3]	
$\Omega_c(3119)^0$	??	$3119.1^{+1.0}_{-1.1}$	$1.1 \pm 0.9$	$\Xi'_c \bar{K}$	LHCb[3]	

1: Z.Phys.C28, 175

2: Phys.Lett.B672,1

3: PRL118.182001

## Λ<sub>c</sub>, Σ<sub>c</sub>, Ξ<sub>c</sub>, Ξ'<sub>c</sub> 激发态的实验现状

在PDG上，我们知道目前对于含一个重味夸克重子性质还比较缺乏，通过建立Ω<sub>c</sub>重子谱，可有助于进一步研究含一个重味夸克重子的衰变性质。

state	$J^P$	Mass	Width	Decay Modes	experiments	status
Λ <sub>c</sub> (2595) <sup>+</sup>	$\frac{1}{2}^-$	2592.25 ± 0.28	2.59 ± 0.56	Λ <sub>c</sub> ππ, Σ <sub>c</sub> π	CLEO [76]	***
Λ <sub>c</sub> (2625) <sup>+</sup>	$\frac{3}{2}^-$	2628.11 ± 0.19	< 0.97	Λ <sub>c</sub> ππ, Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π	ARGUS [77]	***
Λ <sub>c</sub> (2765) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	2766.6 ± 2.1	50	Σ <sub>c</sub> π, Λ <sub>c</sub> ππ	CLEO [78]	*
Λ <sub>c</sub> (2860) <sup>+</sup>	$\frac{3}{2}^+$	2856.1 <sup>+2.0†</sup> <sub>-5.9</sub>	67.6 <sup>+11.8†</sup> <sub>-21.6</sub>	Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π, D <sup>0</sup> p, D <sup>+</sup> n	LHCb [14]	
Λ <sub>c</sub> (2880) <sup>+</sup>	$\frac{5}{2}^+$	2881.64 ± 0.25 <sup>†</sup>	5.6 ± 0.7 <sup>†</sup>	Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π, Λ <sub>c</sub> ππ, D <sup>0</sup> p, D <sup>+</sup> n	CLEO [78]	***
Λ <sub>c</sub> (2940) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	2939.8 ± 1.4 <sup>†</sup>	20 ± 6 <sup>†</sup>	Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π, Λ <sub>c</sub> ππ, D <sup>0</sup> p, D <sup>+</sup> n	BaBar [22]	***
Σ <sub>c</sub> (2800) <sup>++</sup>	? <sup>?</sup>	2801 <sup>+4</sup> <sub>-6</sub>	75 <sup>+22</sup> <sub>-17</sub>	Λ <sub>c</sub> π, Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π, Λ <sub>c</sub> ππ	Belle [28]	***
Σ <sub>c</sub> (2800) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	2792 <sup>+14</sup> <sub>-5</sub>	62 <sup>+64</sup> <sub>-44</sub>	Λ <sub>c</sub> π, Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π, Λ <sub>c</sub> ππ	Belle [28]	***
Σ <sub>c</sub> (2800) <sup>0</sup>	? <sup>?</sup>	2806 <sup>+5</sup> <sub>-7</sub>	72 <sup>+22</sup> <sub>-15</sub>	Λ <sub>c</sub> π, Σ <sub>c</sub> <sup>(*)</sup> π, Λ <sub>c</sub> ππ	Belle [28]	***
Ξ <sub>c</sub> (2790) <sup>+</sup>	$\frac{1}{2}^-$	2791.5 ± 0.6*	8.9 ± 1.0*	Ξ <sub>c</sub> 'π, Ξ <sub>c</sub> π, Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$	CLEO [89]	***
Ξ <sub>c</sub> (2790) <sup>0</sup>	$\frac{1}{2}^-$	2794.8 ± 0.6*	10.0 ± 1.1*	Ξ <sub>c</sub> 'π, Ξ <sub>c</sub> π, Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$	CLEO [89]	***
Ξ <sub>c</sub> (2815) <sup>+</sup>	$\frac{3}{2}^-$	2816.7 ± 0.3*	2.43 ± 0.26*	Ξ <sub>c</sub> <sup>*</sup> π, Ξ <sub>c</sub> ππ, Ξ <sub>c</sub> 'π	CLEO [90]	***
Ξ <sub>c</sub> (2815) <sup>0</sup>	$\frac{3}{2}^-$	2820.2 ± 0.3*	2.54 ± 0.25*	Ξ <sub>c</sub> <sup>*</sup> π, Ξ <sub>c</sub> ππ, Ξ <sub>c</sub> 'π	CLEO [90]	***
Ξ <sub>c</sub> (2930) <sup>0</sup>	? <sup>?</sup>	2931 ± 6	36 ± 13	Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Ξ <sub>c</sub> π, Ξ <sub>c</sub> 'π	BaBar [17]	*
Ξ <sub>c</sub> (2970) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	2966.7 ± 0.8*	24.6 ± 2.0*	Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, Ξ <sub>c</sub> ππ	Belle [2]	***
Ξ <sub>c</sub> (2970) <sup>0</sup>	? <sup>?</sup>	2970.6 ± 0.8*	29 ± 3*	Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, Ξ <sub>c</sub> ππ	Belle [2]	***
Ξ <sub>c</sub> (3055) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	3055.1 ± 1.7	11 ± 4	Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, DΛ	BaBar [20, 91]	***
Ξ <sub>c</sub> (3055) <sup>0</sup>	? <sup>?</sup>	3059.0 ± 0.8	6.4 ± 2.4	Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, DΛ		
Ξ <sub>c</sub> (3080) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	3076.94 ± 0.28	4.3 ± 1.5	Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, DΛ	Belle [2, 20]	***
Ξ <sub>c</sub> (3080) <sup>0</sup>	? <sup>?</sup>	3079.9 ± 1.4	5.6 ± 2.2	Σ <sub>c</sub> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, DΛ	Belle [2]	***
Ξ <sub>c</sub> (3123) <sup>+</sup>	? <sup>?</sup>	3122.9 ± 1.3	4.4 ± 3.8	Σ <sub>c</sub> <sup>*</sup> $\bar{K}$ , Λ <sub>c</sub> $\bar{K}$ π, DΛ	BaBar [91]	*

## $\Lambda_b, \Sigma_b, \Xi_b, \Xi'_b$ 实验现状

在PDG上，对于含b夸克的重味重子在实验上大部分仅仅只是探测到了基态，对于P波的激发态除了  $\Lambda_b(5912)$  和  $\Lambda_b(5920)$  被探测到，其他的重子的P波还没有任何实验信息，这就需要我们用理论来研究它们的衰变性质，希望为实验提供一些理论依据。

State	$J^P$	Mass (MeV)	Width (MeV)	Decay channel	Experiment	Status
$\Lambda_b^0$	$\frac{1}{2}^+$	$5619.51 \pm 0.23$	$(1466 \pm 10) \times 10^{-15} s$	$pK^-\pi^+\pi^-$	CERN R415 [15]	***
$\Lambda_b(5912)^0$	$\frac{1}{2}^-$	$5912.11 \pm 0.13 \pm 0.23$	$< 0.66$	$\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$	LHCb [14]	***
$\Lambda_b(5920)^0$	$\frac{3}{2}^-$	$5919.81 \pm 0.23$	$< 0.63$	$\Lambda_b^0\pi^+\pi^-$	LHCb [14], CDF [16]	***
$\Sigma_b^+$	$\frac{1}{2}^+$	$5811.3^{+0.9}_{-0.8} \pm 1.7$	$9.7^{+3.8+1.2}_{-2.8-1.1}$	$\Lambda_b^0\pi$	CDF [17]	***
$\Sigma_b^-$	$\frac{1}{2}^+$	$5815.5^{+0.6}_{-0.5} \pm 1.7$	$4.9^{+3.1}_{-2.1} \pm 1.1$	$\Lambda_b^0\pi$	CDF [17]	***
$\Sigma_b^{*+}$	$\frac{3}{2}^+$	$5832.1 \pm 0.7^{+1.7}_{-1.8}$	$11.5^{+2.7+1.0}_{-2.2-1.5}$	$\Lambda_b^0\pi$	CDF [17]	***
$\Sigma_b^{*-}$	$\frac{3}{2}^+$	$5835.1 \pm 0.6^{+1.7}_{-1.8}$	$7.5^{+2.2+0.9}_{-1.8-1.4}$	$\Lambda_b^0\pi$	CDF [17]	***
$\Xi_b^0$	$\frac{1}{2}^+$	$5791.9 \pm 0.5$	$(1464 \pm 31) \times 10^{-15} s$	$\Xi_c^+\pi^-$	DELPHI [18]	***
$\Xi_b^-$	$\frac{1}{2}^+$	$5794.5 \pm 1.4$	$(1560 \pm 40) \times 10^{-15} s$	$\Xi_c^0\pi^-, J/\psi\Xi^-$	DELPHI [18]	***
$\Xi'_b(5935)^-$	$\frac{1}{2}^+$	$5935.02 \pm 0.02 \pm 0.05$	$< 0.08$	$\Xi_b^0\pi^-$	LHCb [19]	***
$\Xi_b^*(5945)^0$	$\frac{3}{2}^+$	$5948.9 \pm 0.8 \pm 1.4$	$2.1 \pm 1.7$	$\Xi_b^-\pi^+$	CMS [20]	***
$\Xi_b^*(5955)^-$	$\frac{3}{2}^+$	$5955.33 \pm 0.12 \pm 0.05$	$1.65 \pm 0.31 \pm 0.10$	$\Xi_b^0\pi^-$	LHCb [19]	***
$\Omega_b^-$	$\frac{1}{2}^+$	$6046.4 \pm 1.9$	$1570^{+230}_{-200} \times 10^{-15} s$	$J/\psi\Omega^-$	DØ [21]	***

## 2. 单重味重子夸克模型分类

- $\Lambda_c(b)$ ,  $\Sigma_c(b)$ ,  $\Xi_c(b)$ ,  $\Omega_c(b)$  重子在夸克模型分类如下:

$$\phi_{\bar{3}}^c = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}(ud - du)c & \text{for } \Lambda_c^+, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(us - su)c & \text{for } \Xi_c^+, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ds - sd)c & \text{for } \Xi_c^0; \end{cases}$$

$$\phi_6^c = \begin{cases} uuc & \text{for } \Sigma_c^{++}, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ud + du)c & \text{for } \Sigma_c^+, \\ ddc & \text{for } \Sigma_c^0, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(us + su)c & \text{for } \Xi_c'^+, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ds + sd)c & \text{for } \Xi_c'^0, \\ ssc & \text{for } \Omega_c^0; \end{cases}$$

$$\phi_{\bar{3}}^b = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}(ud - du)b & \text{for } \Lambda_b^0, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(us - su)b & \text{for } \Xi_b^0, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ds - sd)b & \text{for } \Xi_b^- . \end{cases}$$

$$\phi_6^b = \begin{cases} uub & \text{for } \Sigma_b^+, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ud + du)b & \text{for } \Sigma_b^0, \\ ddb & \text{for } \Sigma_b^-, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(us + su)b & \text{for } \Xi_b'^0, \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(ds + sd)b & \text{for } \Xi_b'^-, \\ ssb & \text{for } \Omega_b^-; \end{cases}$$

# 3.理论模型

- 赝标量介子-夸克耦合有效拉氏量:

$$H_m = \sum_j \frac{1}{f_m} \hat{I}_j \bar{\psi}_j \gamma_\mu^j \gamma_5^j \psi_j \partial^\mu \phi_m$$

- 赝标量介子-夸克耦合非相对论形式的哈密顿量:

$$H_m^{nr} = \sum_j \left[ A \boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{q} + \frac{\omega_m}{2\mu_q} \boldsymbol{\sigma}_j \cdot \mathbf{p}_j \right] I_j e^{-i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_j}$$

- 光子-夸克耦合形式:

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

- 光子-夸克耦合非相对论形式:

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

# 4.结论与分析

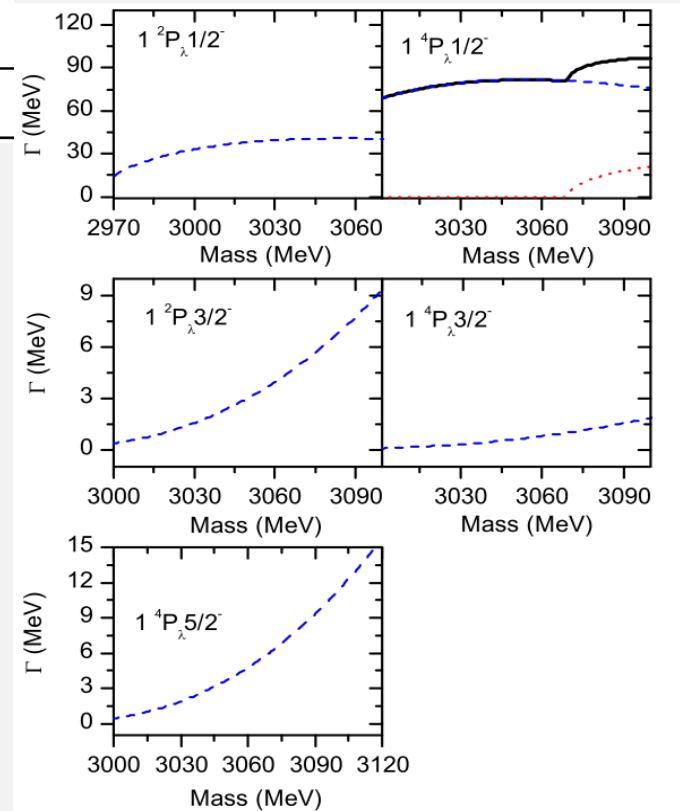
## 4.1.1 $\Omega_c$ 结论与分析

### S波 $\Omega_c(2695)$ 和 $\Omega_c(2770)$ 间辐射衰变

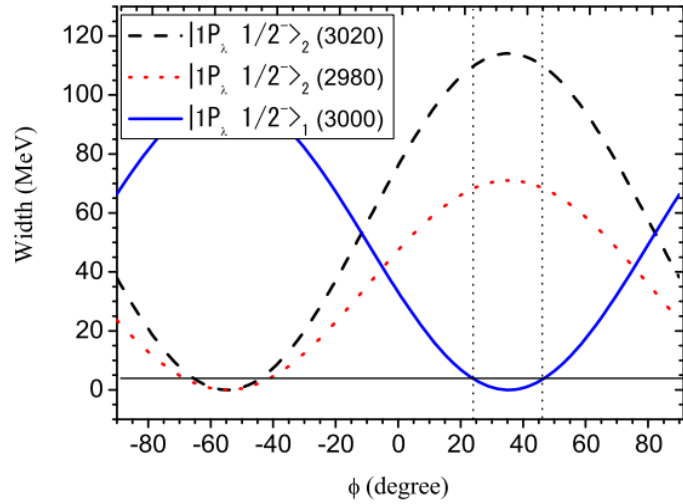
$B_Q \rightarrow B'_Q$	$\Gamma$ (Ours)	VMC[102]	BM[101]	LCQSR[94]
$\Omega_c^{*0} \rightarrow \Omega_c^0 \gamma$	0.89	1.439	1.07	0.932

### $\Omega_c$ P波的强衰变和辐射衰变

$\Omega_c(3000)$ 可能对应  $J^P=1/2^-$  的态，然而从我们的结果可以看出：两个  $J^P=1/2^-$  的态的衰变宽度 $\Gamma$ 远远大于4.5MeV。故我们进一步考虑了这两个态的混合。







$$\begin{pmatrix} |P_{\lambda} \frac{1}{2}^{-}\rangle_1 \\ |P_{\lambda} \frac{1}{2}^{-}\rangle_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |^2P_{\lambda} \frac{1}{2}^{-}\rangle \\ |^4P_{\lambda} \frac{1}{2}^{-}\rangle \end{pmatrix}$$

$$\Phi = 24^{\circ} \text{ 或 } 47^{\circ}$$

State	Mass	$\Gamma(\Xi_c \bar{K})$	$\Gamma(\Xi'_c \bar{K})$	$\Gamma[\Omega_c(2695)\gamma]$	$\Gamma[\Omega_c(2770)\gamma]$	$\Gamma_{\text{total}}^{\text{th}}$	$\Gamma_{\text{total}}^{\text{exp}}$	Possible assignment
$ 1P_{\lambda} \frac{1}{2}^{-}\rangle_1$	3000	4.0	...	0.36/0.20	0.02/0.08	4.38/4.28	$4.5 \pm 0.9$	$\Omega_c(3000)$
$ 1^4P_{\lambda} \frac{3}{2}^{-}\rangle$	3050	0.61	...	$1.12 \times 10^{-3}$	0.33	0.94	$0.8 \pm 0.3$	$\Omega_c(3050)$
$ 1^2P_{\lambda} \frac{3}{2}^{-}\rangle$	3066	4.61	...	0.35	$5.68 \times 10^{-4}$	4.96	$3.5 \pm 0.4$	$\Omega_c(3066)$
$ 1^4P_{\lambda} \frac{5}{2}^{-}\rangle$	3090	9.32	0.03	$1.00 \times 10^{-4}$	0.18	9.53	$8.7 \pm 1.8$	$\Omega_c(3090)$

State	Mass	$\Gamma(\Xi_c \bar{K})$	$\Gamma(\Xi'_c \bar{K})$	$\Gamma[\Omega_c(2695)\gamma]$	$\Gamma[\Omega_c(2770)\gamma]$	$\Gamma_{\text{total}}^{\text{th}}$	$\Gamma_{\text{total}}^{\text{exp}}$
$ 2^2S_{\lambda\lambda} \frac{1}{2}^{+}\rangle$	3119	0.60	0.45	$2.9 \times 10^{-3}$	$6.4 \times 10^{-4}$	1.15	$1.1 \pm 0.8 \pm 0.4$
State	Mass	$\Gamma(\Xi_c K)$	$\Gamma(\Xi'_c K)$	$\Gamma[\Omega_c(2695)\gamma]$	$\Gamma[\Omega_c(2770)\gamma]$	$\Gamma_{\text{total}}^{\text{th}}$	$\Gamma_{\text{total}}^{\text{exp}}$
$ 2^4S_{\lambda\lambda} \frac{3}{2}^{+}\rangle$	3119	0.60	0.11	$1.0 \times 10^{-3}$	$8.1 \times 10^{-4}$	0.73	$1.1 \pm 0.8 \pm 0.4$

## 4.1.2 $\Omega_b$ 结论与分析

### S波 $\Omega_b(6046)$ 和 $\Omega_b^*(6090)$ (PRD84, 014025) 的辐射衰变

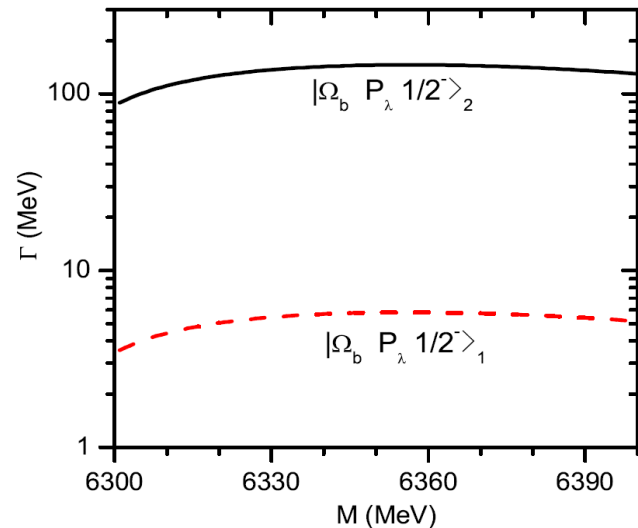
$B_Q \rightarrow B'_Q$	$\Gamma$ (Ours)	VMC[102]	BM[101]	LCQSR[94]
$\Omega_b^{*-} \rightarrow \Omega_b^- \gamma$	0.1	2.873	0.006	0.092

### $\Omega_b$ P波的强衰变和辐射衰变

State	Mass (MeV) [24]	$\Gamma[\Xi_b K]$ (MeV)	$\Gamma[\Omega_b \gamma]$ (keV)	$\Gamma[\Omega_b^* \gamma]$ (keV)	$\Gamma_{\text{total}}$ (MeV)
$ \Omega_b^4 S_{\frac{3}{2}}^+\rangle$	6088	...	0.09	...	...
$ \Omega_b^2 P_{\lambda \frac{1}{2}}^-\rangle$	6339	49.38	154	1.49	49.53
$ \Omega_b^2 P_{\lambda \frac{3}{2}}^-\rangle$	6340	1.82	83.4	1.51	1.90
$ \Omega_b^4 P_{\lambda \frac{1}{2}}^-\rangle$	6330	94.98	0.64	99.23	95.08
$ \Omega_b^4 P_{\lambda \frac{3}{2}}^-\rangle$	6331	0.22	1.81	70.68	0.29
$ \Omega_b^4 P_{\lambda \frac{5}{2}}^-\rangle$	6334	1.60	1.21	63.26	1.66

LCQSR 方法(arxiv:1708.07348[hep-ph])

$|\Omega_b^4 P_{\lambda \frac{3}{2}}^-\rangle$  和  $|\Omega_b^2 P_{\lambda \frac{1}{2}}^-\rangle$  的衰变宽度分别为： $\approx 0.04 \text{ MeV}$  和  $\approx 3.97 \text{ MeV}$



## 4.2.1 $\Lambda_c$ 结论与分析

在以前的工作中已经讨论过  $\Lambda_c$  (2593) 和  $\Lambda_c$  (2625) 的强衰变, 根据理论结果, 这两个态可能分别为  $J^p=1/2^-$  和  $3/2^-$  的态 (PRD77,074008)。在本工作中, 我们进一步讨论了它们的辐射衰变:

	Notation	Channel	$\Gamma_{\text{exp}}$ (MeV)	$\Gamma_{\text{th}}$ (MeV)
$\Lambda_c(2593)$	$ \Lambda_c^2 P_{\lambda 2}^{1-}\rangle$	$\Sigma_c^{++} \pi^-$	$0.65^{+0.41}_{-0.31}$	0.37
		$\Sigma_c^+ \pi^0$		0.73
		$\Sigma_c^0 \pi^+$	$0.67^{+0.41}_{-0.31}$	0.40
$\Lambda_c(2625)$	$ \Lambda_c^2 P_{\lambda 2}^{3-}\rangle$	$\Sigma_c^{++} \pi^-$	$<0.10$	$1.47 \times 10^{-2}$
		$\Sigma_c^+ \pi^0$		$2.08 \times 10^{-2}$
		$\Sigma_c^0 \pi^+$	$<0.09$	$1.50 \times 10^{-2}$

$B_Q \rightarrow B'_Q$	Ours	RQM [76]	LCQSR [61]	HQS [85]	Bound state [86]	Bound state [87]
$\Lambda_c(2593) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma$	0.26	$115 \pm 1$	36	...	16	278
$\Lambda_c(2593) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Sigma_c^+ \gamma$	0.45	$77 \pm 1$	11	...	...	2
$\Lambda_c(2593) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Sigma_c^{*+} \gamma$	0.05	$6 \pm 1$	1	6.05	...	...
$\Lambda_c(2625) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma$	0.30	$151 \pm 2$	48	...	21	...
$\Lambda_c(2625) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Sigma_c^+ \gamma$	1.17	$35 \pm 0.5$	5	34.7	...	...

$\Lambda_c(2593) \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma$  为例:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}} = & \frac{\langle e_1 \rangle}{\alpha_\lambda} \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}m'}{2m+m'} \exp\left(-\frac{k_\rho^2}{4\alpha_\rho^2} - \frac{k_\lambda^2}{4\alpha_\lambda^2}\right) \\ & + \frac{\langle e_2 \rangle}{\alpha_\lambda} \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}m'}{2m+m'} \exp\left(-\frac{k_\rho^2}{4\alpha_\rho^2} - \frac{k_\lambda^2}{4\alpha_\lambda^2}\right) \\ & - \frac{\langle e_3 \rangle}{\alpha_\lambda} \left( \frac{\sqrt{2}m}{2m+m'} + \frac{k'_\lambda}{2\sqrt{3}m'} \right) \exp\left(-\frac{k'_\lambda{}^2}{4\alpha_\lambda^2}\right), \end{aligned}$$

$$k_\rho = \sqrt{\frac{1}{2}}k, \quad k_\lambda = \sqrt{\frac{1}{6}} \frac{3m'}{2m+m'}k$$

$$k'_\lambda = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{3m}{2m+m'}k$$

$$\langle e_1 \rangle = \langle e_2 \rangle = 1/6$$

$$\langle e_3 \rangle = 2/3$$

$$\exp(-k_\rho^2/4\alpha_\rho^2 - k_\lambda^2/4\alpha_\lambda^2) \simeq \exp(-k'_\lambda{}^2/4\alpha_\lambda^2) \simeq 1$$

## 4.2.1 $\Lambda_b$ 结论与分析

对于  $\Lambda_b$  重子，在PDG 上， $\Lambda_b(5912)$  和  $\Lambda_b(5920)$  分别对应  $J^P=1/2^-$  和  $3/2^-$  的态。在本工作中把它们分别对应于  $\lambda$  型的两个 P 波激发态  $1^2P_\lambda 1/2^-$  和  $1^2P_\lambda 3/2^-$ 。由于  $\Lambda_b(5912)$  和  $\Lambda_b(5920)$  在  $\Sigma_b \pi$  阈值以下，故仅需对它们的辐射衰变进行预言：

$B_Q \rightarrow B'_Q$	$\Gamma$ (Ours)	LCQSR[61]	HQS[85]	Bound state[86]
$\Lambda_b(5912) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Lambda_b^0 \gamma$	50.2	1	90	...
$\Lambda_b(5912) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Sigma_b^0 \gamma$	0.14	11	...	81.7
$\Lambda_b(5912) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Sigma_b^{*0} \gamma$	0.09	1	...	8.91
$\Lambda_b(5920) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Lambda_b^0 \gamma$	52.8	1	119	...
$\Lambda_b(5920) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Sigma_b^0 \gamma$	0.21	5	...	33.8
$\Lambda_b(5920) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Sigma_b^{*0} \gamma$	0.15	6	...	49.9

76: PRD60, 094002 M. A. Ivanov

61: PRD61, 114019 S. L. Zhu

85: PRD63, 034005 S. Tawfiq

86: PRD54, 3374 C. K. Chow

87: PRD83, 074018 D. Gamermann

### 4.3.1 $\Sigma_c$ 结论与分析

#### $\Sigma_c$ S波的强衰变和辐射衰变

在 $\Sigma_c$ 重子中， $\Sigma_c(2455)$ 和 $\Sigma_c(2520)$ 作为1S波的基态，其强衰变在以前的工作中已经讨论过 (PRD77.074008)，为了更好的理解 $\Sigma_c(2455)$ 和 $\Sigma_c(2520)$ ，接下来我们进一步讨论了它们的辐射衰变。结合PDG中的总衰变宽度，我们估算了 $B[\Sigma_c(2455,2520)^+ \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma]$ 的分支比，其可以达到2%。这样， $\Sigma_c(2455,2520)^+ \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma$ 的衰变模式可能被以后的实验观测到。

	Notation	Channel	$\Gamma_{\text{exp}}$ (MeV)	$\Gamma_{\text{th}}$ (MeV)
$\Sigma_c(2455)$	$ \Sigma_c^2 S_2^{1+}\rangle$	$\Lambda_c \pi^+$	$2.23 \pm 0.30$	1.89
		$\Lambda_c \pi^0$	$<4.6$	2.18
		$\Lambda_c \pi^-$	$2.2 \pm 0.4$	1.86
$\Sigma_c(2520)$	$ \Sigma_c^4 S_2^{3+}\rangle$	$\Lambda_c \pi^+$	$14.9 \pm 1.9$	input
		$\Lambda_c \pi^0$	$<17$	15.53
		$\Lambda_c \pi^-$	$16.1 \pm 2.1$	14.92

94: EPJC75, 14 (2015)  
 95: PRD79, 056005 (2009)  
 96: PRD93, 056007  
 101: PRD87, 074016  
 102: Mod. Phys. Lett. A27, 1250054

$B_Q \rightarrow B'_Q$	Ours	RQM [76]	VMC [102]	BM [101]	LCQSR [94-96]	HQS [85]	NQM [103]	Other works
$\Sigma_c^+ \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma$	80.6	$60.7 \pm 1.5$	...	46.1	$50 \pm 17$	...	98.7	93 [99]
$\Sigma_c^{*+} \rightarrow \Lambda_c^+ \gamma$	373	$151 \pm 4$	409.3	126	$130 \pm 65$	233	250	...
$\Sigma_c^{*+} \rightarrow \Sigma_c^+ \gamma$	0.004	$0.14 \pm 0.004$	0.187	0.004	$0.40 \pm 0.22$	0.22	$1 \times 10^{-3}$	$0.40^{+0.43}_{-0.21}$ [92]
$\Sigma_c^{*0} \rightarrow \Sigma_c^0 \gamma$	3.43	...	1.049	1.08	$0.08 \pm 0.042$	...	1.2	$1.58^{+1.68}_{-0.82}$ [92]
$\Sigma_c^{*++} \rightarrow \Sigma_c^{++} \gamma$	3.94	...	3.567	0.826	$2.65 \pm 1.60$	...	1.7	$6.36^{+6.79}_{-3.31}$ [92]

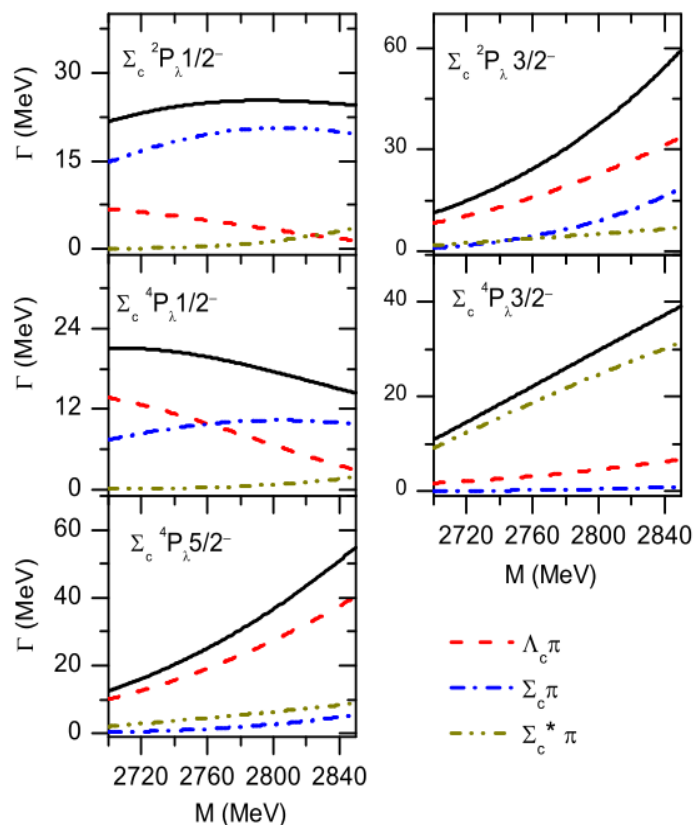
## $\Sigma_c$ P波的强衰变和辐射衰变

- 对于P波  $\Sigma_c$  重子， $\lambda$  型激发的P波有五个： $|^2P_\lambda 1/2^- \rangle$ ， $|^2P_\lambda 3/2^- \rangle$ ， $|^4P_\lambda 1/2^- \rangle$
- $|^4P_\lambda 3/2^- \rangle$  和  $|^4P_\lambda 5/2^- \rangle$ 。然而，到目前为止还没有一个P波的激发态被明确的确
- 定。根据各种夸克模型分析，我们知道  $\Sigma_c$  重子的  $\lambda$  型激发的P波质量  $\approx 2.8\text{GeV}$ 。
- 本工作采用相对论夸克模型的质量 (PRD84, 014025)，对其强衰变和辐
- 射衰变进行分析。

右图可以看出  $|^2P_\lambda 3/2^- \rangle$  和  $|^4P_\lambda 5/2^- \rangle$  主要衰变道为  $\Lambda_c^+ \pi$ ； $|^4P_\lambda 3/2^- \rangle$  的主要衰变道为  $\Sigma_c^* \pi$ 。

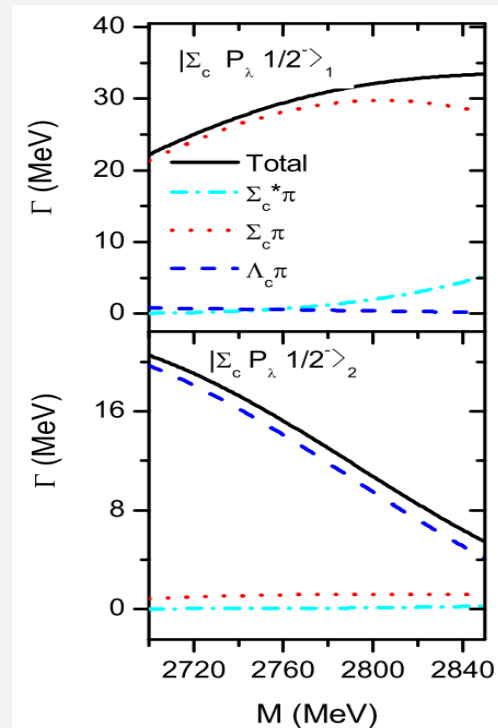
实验： $\Sigma_c(2800)$  主要衰变道是  $\Lambda_c^+ \pi$ ，所以  $\Sigma_c(2800)$  可能为  $|^2P_\lambda 3/2^- \rangle$  和  $|^4P_\lambda 5/2^- \rangle$ 。需要说明的一点是， $^3P_0$  模型 (PRD75, 094017) 支持  $J^P=3/2^-(5/2^-)$ ；相对论夸克模型 (Int. J. Mod. Phys. E17, 585) 支持  $J^P=5/2^-$ 。

state	HHChPT[68]	$^3P_0$ model[64]	RQM[29]	Faddeev studies[30]	OUR
$\Sigma_c(2800)$	$3/2^-$	$3/2^-(5/2^-)$	$5/2^-$	$3/2^-(1/2^-)$	$3/2^-(5/2^-)$



基于  $\Omega_c$  的两个P波  $J^P=1/2^-$  的混合，我们也考虑了  $\Sigma_c$  重子的两个  $\lambda$  型激发的P波的混合（ $\Phi=24^\circ$  或  $47^\circ$ ）。理论结果显示： $|\Sigma_c P_\lambda 1/2^- \rangle_1$  的衰变宽度约  $\approx 30\text{MeV}$ ； $|\Sigma_c P_\lambda 1/2^- \rangle_2$  的衰变宽度约  $\approx 10\text{MeV}$ 。

$$\begin{pmatrix} |P_{\lambda\frac{1}{2}^-} \rangle_1 \\ |P_{\lambda\frac{1}{2}^-} \rangle_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |^2P_{\lambda\frac{1}{2}^-} \rangle \\ |^4P_{\lambda\frac{1}{2}^-} \rangle \end{pmatrix}$$



	$ \Sigma_c^2 P_{\lambda\frac{1}{2}^-} \rangle(2713)$		$ \Sigma_c^2 P_{\lambda\frac{3}{2}^-} \rangle(2798)$		$ \Sigma_c^4 P_{\lambda\frac{1}{2}^-} \rangle(2799)$		$ \Sigma_c^4 P_{\lambda\frac{3}{2}^-} \rangle(2773)$		$ \Sigma_c^4 P_{\lambda\frac{5}{2}^-} \rangle(2789)$	
	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$
$\rightarrow \Sigma_c^{++}\gamma$	283	1.25	210	0.58	8.54	0.05	17.5	0.07	13.6	0.04
$\rightarrow \Sigma_c^+\gamma$	1.60	< 0.01	4.64	0.01	0.92	< 0.01	1.86	0.01	1.46	< 0.01
$\rightarrow \Sigma_c^0\gamma$	205	0.91	245	0.67	1.02	< 0.01	2.12	0.01	1.64	< 0.01
$\rightarrow \Lambda_c^+\gamma$	48.3	0.21	87.3	0.24	52.1	0.30	105	0.43	59.4	0.18
$\rightarrow \Sigma_c^{*++}\gamma$	3.04	0.01	14.7	0.04	387	2.20	181	0.73	168	0.51
$\rightarrow \Sigma_c^{*+}\gamma$	0.31	< 0.01	1.55	< 0.01	1.75	0.01	0.68	< 0.01	0.89	< 0.01
$\rightarrow \Sigma_c^{*0}\gamma$	0.39	< 0.01	1.82	< 0.01	289	1.64	159	0.65	160	0.48

## 4.3.2 $\Sigma_b$ 结论与分析

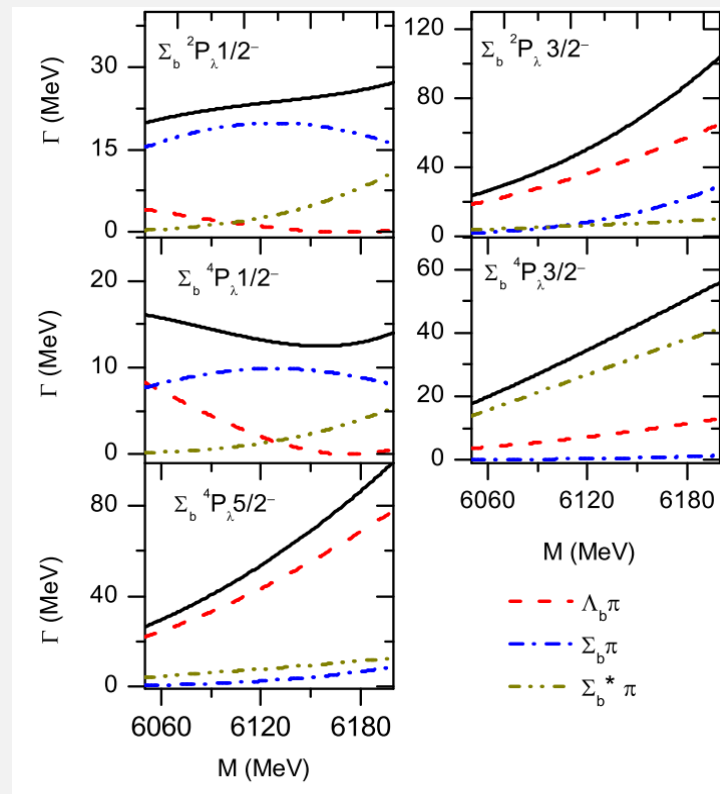
### S波的强衰变和辐射衰变

- 类似于  $\Sigma_c$ ，我们以前的工作已对  $\Sigma_b$  S波的强衰变 (PRD86,034024) 进行了讨论。
- 在此基础上，本工作对  $\Sigma_b$  S波的辐射衰变进行研究，计算结果如下表：

### P波的强衰变和辐射衰变

右图可以看出：

$|^2P_{\lambda} 3/2^- \rangle$  和  $|^4P_{\lambda} 5/2^- \rangle$  主要衰变道为  $\Lambda_b^+ \pi$ ； $|^4P_{\lambda} 3/2^- \rangle$  的主要衰变道为  $\Sigma_b^* \pi$ 。



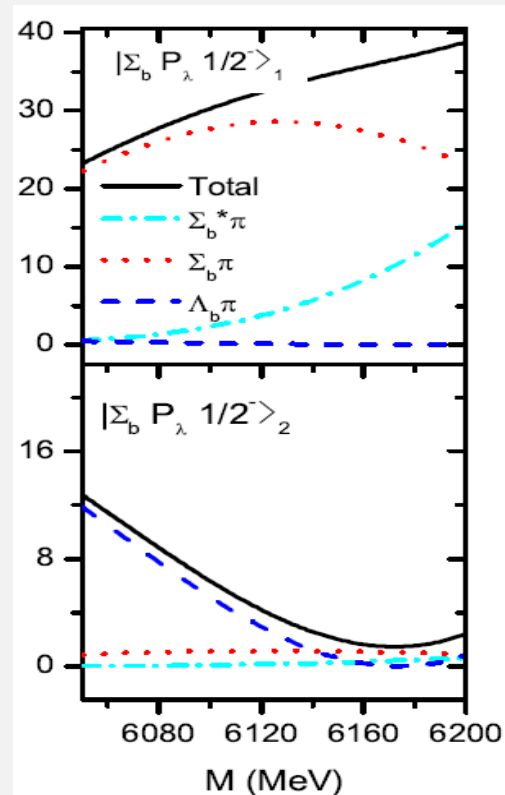
$B_Q \rightarrow B'_Q$	Ours	RQM [75]	VMC [100]	BM [99]	LCQSR [92-94]	HQS [84]	NQM [101]	Other works
$\Sigma_b^0 \rightarrow \Lambda_b^0 \gamma$	130	...	...	58.9	$152 \pm 60$	...	...	...
$\Sigma_b^{*0} \rightarrow \Lambda_b^0 \gamma$	335	...	221.5	81.1	$114 \pm 62$	251	...	344 [89]
$\Sigma_b^{*0} \rightarrow \Sigma_b^0 \gamma$	0.02	...	0.006	0.005	$0.028 \pm 0.020$	0.15	...	0.08 [89]
$\Sigma_b^{*+} \rightarrow \Sigma_b^+ \gamma$	0.25	...	0.137	0.054	$0.46 \pm 0.28$	...	...	1.26 [89]
$\Sigma_b^{*-} \rightarrow \Sigma_b^- \gamma$	0.06	...	0.040	0.01	$0.11 \pm 0.076$	...	...	0.32 [89]



类似于 $\Sigma_c$ 重子，我们对其 $\Sigma_b$ 重子的两个 $\lambda$ 型激发的P波也做了混合 ( $\Phi=24^\circ$  或  $47^\circ$ )。我们可以很容易看出  $|\Sigma_b P_\lambda 1/2^->_1$  的衰变宽度约 $\approx 30\text{MeV}$ ； $|\Sigma_b P_\lambda 1/2^->_2$  的衰变宽度约 $\approx 10\text{MeV}$ 。

右图可知：

$|\Sigma_b P_\lambda 1/2^->_1$  的主要衰变道为  $\Sigma_b \pi$ ，  
 $|\Sigma_b P_\lambda 1/2^->_2$  的主要衰变道为  $\Lambda_b \pi$ 。



	$ \Sigma_b^{-2} P_{\lambda \frac{1}{2}^-}\rangle(6101)$		$ \Sigma_b^{-2} P_{\lambda \frac{3}{2}^-}\rangle(6096)$		$ \Sigma_b^{-4} P_{\lambda \frac{1}{2}^-}\rangle(6095)$		$ \Sigma_b^{-4} P_{\lambda \frac{3}{2}^-}\rangle(6087)$		$ \Sigma_b^{-4} P_{\lambda \frac{5}{2}^-}\rangle(6084)$	
	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$
$\rightarrow \Sigma_b^+ \gamma$	1016	4.49	483	1.23	5.31	0.04	13.1	0.05	8.07	0.02
$\rightarrow \Sigma_b^0 \gamma$	74.9	0.33	37.9	0.10	0.32	< 0.01	0.80	< 0.01	0.49	< 0.01
$\rightarrow \Sigma_b^- \gamma$	212	0.94	94.0	0.24	1.37	0.01	3.39	0.01	2.08	< 0.01
$\rightarrow \Lambda_c^0 \gamma$	133	0.59	129	0.33	63.6	0.45	170	0.65	83.3	0.22
$\rightarrow \Sigma_b^{*+} \gamma$	16.9	0.07	15.6	0.04	867	6.10	527	2.00	426	1.11
$\rightarrow \Sigma_b^{*0} \gamma$	1.03	< 0.01	0.95	< 0.01	63.6	0.45	39.8	0.15	32.6	0.09
$\rightarrow \Sigma_b^{*-} \gamma$	4.36	0.02	4.02	0.01	182	1.28	107	0.41	85.3	0.22

#### 4.4.1 $\Xi_c$ 结论与分析

$\Xi_c(2790)$  (主要衰变道为  $\Xi_c'\pi$ ) 和  $\Xi_c(2815)$  (主要衰变道为  $\Xi_c^*\pi$ ) 在以前的工作中已经讨论过, 然而近来, Belle 实验组精确测量了  $\Xi_c(2790)$  和  $\Xi_c(2815)$  的衰变宽度 (PRD94.052011):

$$\Gamma(\Xi_c(2790)) \approx 10 \text{ MeV},$$

$$\Gamma(\Xi_c(2815)) \approx 2.5 \text{ MeV}.$$

这样可以使我们进一步精确的研究它们。

结论:

$\Xi_c(2815)$  的总衰变宽度与实验值接近, 而  $\Xi_c(2790)$  与实验值相差大约三倍。辐射衰变和前面  $\Lambda_c$  的辐射衰变结果类似。

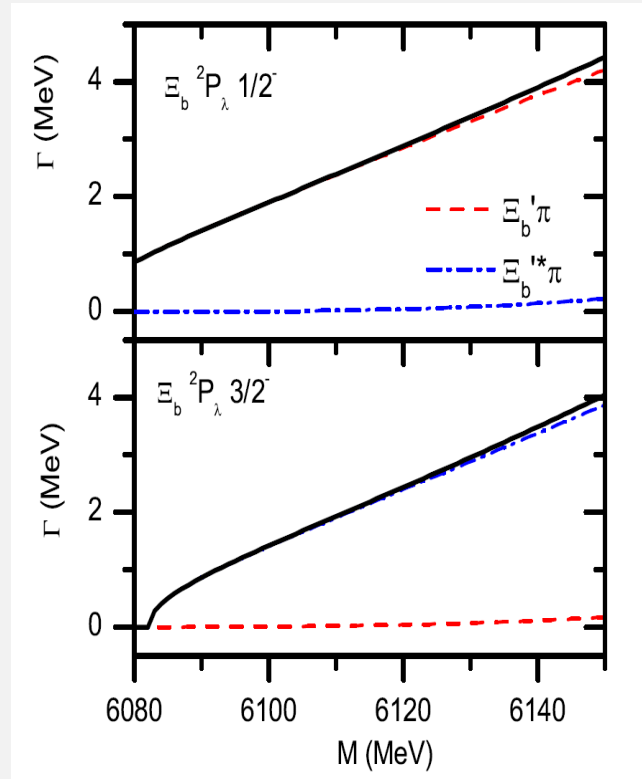
$ ^{2S+1}L_\lambda J^P\rangle$	State	Channel	$\Gamma_i$ (MeV)	$\mathcal{B}_i$
$ ^2P_{\lambda\frac{1}{2}}\rangle$	$\Xi_c(2790)$	$\Xi_c'\pi$	3.61	100%
		$\Xi_c^*\pi$	$3.9 \times 10^{-4}$	$\approx 0.0\%$
		total	3.61	
$ ^2P_{\lambda\frac{3}{2}}\rangle$	$\Xi_c(2815)$	$\Xi_c'\pi$	0.31	14.69%
		$\Xi_c^*\pi$	1.80	85.31%
		total	2.11	

$B_Q \rightarrow B'_Q$	$\Gamma$ (Ours)	$\Gamma$ [76]	$\Gamma$ [87]
$\Xi_c^+(2790)\frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_c^+\gamma$	4.65	...	246
$\Xi_c^0(2790)\frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_c^0\gamma$	263	...	117
$\Xi_c^+(2790)\frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_c'^+\gamma$	1.43	...	1
$\Xi_c^0(2790)\frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_c'^0\gamma$	0.0	...	1
$\Xi_c^+(2790)\frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_c^{*+}\gamma$	0.44	...	...
$\Xi_c^0(2790)\frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_c^{*0}\gamma$	0.0	...	...
$\Xi_c^+(2815)\frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_c^+\gamma$	2.8	$190 \pm 5$	...
$\Xi_c^0(2815)\frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_c^0\gamma$	292	$497 \pm 14$	...
$\Xi_c^+(2815)\frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_c'^+\gamma$	2.32	...	...
$\Xi_c^0(2815)\frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_c'^0\gamma$	0.0	...	...
$\Xi_c^+(2815)\frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_c^{*+}\gamma$	0.99	...	...
$\Xi_c^0(2815)\frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_c^{*0}\gamma$	0.0	...	...

## 4.4.2 $\Xi_b$ 结论与分析

由于实验上还没有任何有关  $\Xi_b$  P波的信息，我们采用非相对论夸克模型预言的理论质量 (PRD84, 014025) 来计算  $\Xi_b$  的强衰变和辐射衰变。结果可以看出： $\Xi_b(6120)$  主要衰变为  $\Xi_b' \pi$ ； $\Xi_b(6130)$  主要衰变为  $\Xi_b'^* \pi$ 。

$B_Q \rightarrow B'_Q$	$\Gamma$ (Ours)
$\Xi_b^0(6120) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_b^0 \gamma$	63.6
$\Xi_b^-(6120) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_b^- \gamma$	135
$\Xi_b^0(6120) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^0 \gamma$	1.32
$\Xi_b^-(6120) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^- \gamma$	0.0
$\Xi_b^0(6120) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^*0 \gamma$	2.04
$\Xi_b^-(6120) \frac{1}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^*- \gamma$	0.0
$\Xi_b^0(6130) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_b^0 \gamma$	68.3
$\Xi_b^-(6130) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_b^- \gamma$	147
$\Xi_b^0(6130) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^0 \gamma$	1.68
$\Xi_b^-(6130) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^- \gamma$	0.0
$\Xi_b^0(6130) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^*0 \gamma$	2.64
$\Xi_b^-(6130) \frac{3}{2}^- \rightarrow \Xi_b'^*- \gamma$	0.0



$ ^{2S+1}L_{\lambda} J^P\rangle$	State	Channel	$\Gamma_i$ (MeV)	$\mathcal{B}_i$
$ ^2P_{\lambda \frac{1}{2}}\rangle$	$\Xi_b(6120)$	$\Xi_b' \pi$	2.84	98.61%
		$\Xi_b'^* \pi$	0.04	1.39%
		total	2.88	
$ ^2P_{\lambda \frac{3}{2}}\rangle$	$\Xi_b(6130)$	$\Xi_b' \pi$	0.07	2.37%
		$\Xi_b'^* \pi$	2.88	97.63%
		total	2.95	

### 4.5.1 $\Xi'_c$ 结论与分析

#### $\Xi'_c$ S波的强衰变和辐射衰变

在PDG中,  $\Xi'_c$ 的两个基态分别对应 $\Xi'_c$ 和 $\Xi'_c(2645)$ 。我们之前的工作(PRD86.034024)已对 $\Xi'_c(2645)$ 的强衰变性质进行了研究,并得到其衰变宽度 $\Gamma \approx 2.4\text{MeV}$ ;其与Belle(2.2MeV)实验组最近的测量结果符合。在这个工作中,我们进一步对其辐射衰变做了讨论。

$B_Q \rightarrow B'_Q$	Ours	RQM [75]	VMC [100]	BM [99]	LCQSR [92-94]	HQS [84]	NQM [101]	Other works
$\Xi_c^+ \rightarrow \Xi_c^+ \gamma$	42.3	$12.7 \pm 1.5$	...	10.2	$8.5 \pm 2.5$	14.6	32	16 [97]
$\Xi_c^0 \rightarrow \Xi_c^0 \gamma$	0.0	$0.17 \pm 0.02$	...	0.0015	$0.27 \pm 0.06$	0.35	0.27	0.3 [97]
$\Xi_c^{*+} \rightarrow \Xi_c^+ \gamma$	139	$54 \pm 3$	152.4	44.3	$52 \pm 32$	...	124	...
$\Xi_c^{*0} \rightarrow \Xi_c^0 \gamma$	0.0	$0.68 \pm 0.04$	1.318	0.908	$0.66 \pm 0.41$	...	0.8	...
$\Xi_c^{*+} \rightarrow \Xi_c^+ \gamma$	0.004	...	0.485	0.011	0.274	...	0.03	...
$\Xi_c^{*0} \rightarrow \Xi_c^0 \gamma$	3.03	...	1.317	1.03	2.142	...	0.7	...

#### $\Xi'_c$ P波的强衰变和辐射衰变

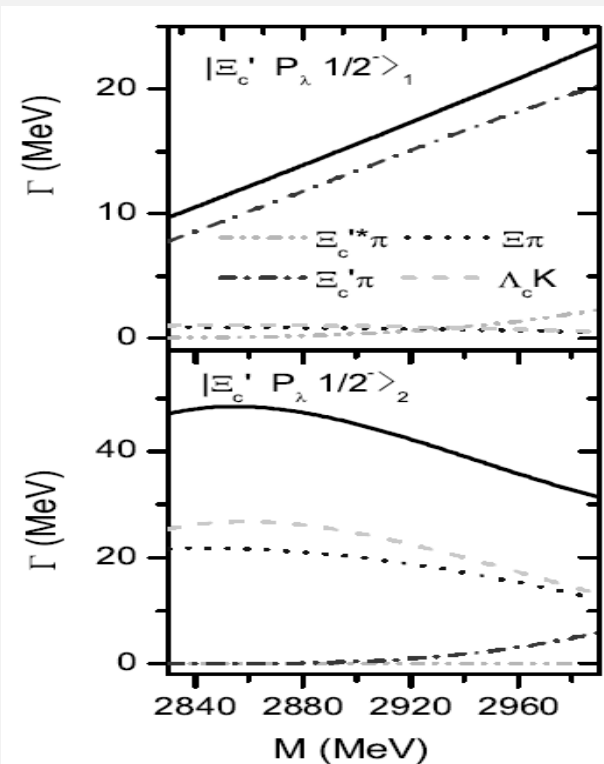
对于P波 $\Xi'_c$ 重子,我们对它们的强衰变和辐射衰变进行了系统地计算。类似与 $\Omega_c$ 的P波,  $|\Xi'_c \ ^2P_{\lambda} 1/2^- \rangle$ 和  $|\Xi'_c \ ^4P_{\lambda} 1/2^- \rangle$ 也做了同样的混合( $\Phi=24^\circ$  或  $47^\circ$ )。

结果： $|\Xi'_c P_\lambda 1/2^- \rangle_2$ 在质量为2930MeV附近，其总宽度 $\Gamma \approx 41\text{MeV}$ 。

实验：在 $\Lambda^+ K^-$ 末态测到的 $\Xi'_c(2930)$ 的衰变宽度 $\Gamma \approx 36 \pm 18\text{MeV}$ 可以很好的对应上。

主要衰变道比值：

$$\frac{\Gamma[\Xi_c(2930)^0 \rightarrow \Lambda_c^+ K^-]}{\Gamma[\Xi_c(2930)^0 \rightarrow \Xi_c \pi]} \simeq 1.2$$



	$ \Xi'_c {}^2 P_{\lambda 2}^{-}\rangle(2936)$		$ \Xi'_c {}^2 P_{\lambda 2}^{-}\rangle(2935)$		$ \Xi'_c {}^4 P_{\lambda 2}^{-}\rangle(2854)$		$ \Xi'_c {}^4 P_{\lambda 2}^{-}\rangle(2912)$		$ \Xi'_c {}^4 P_{\lambda 2}^{-}\rangle(2929)$	
	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$
$\rightarrow \Xi_c^+ \gamma$	46.4	0.21	46.1	0.22	14.5	0.04	54.6	0.44	32.0	0.16
$\rightarrow \Xi_c^0 \gamma$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.00
$\rightarrow \Xi_c^{*+} \gamma$	0.03	< 0.01	12.1	0.06	0.33	< 0.01	2.06	0.02	1.63	< 0.01
$\rightarrow \Xi_c^{*0} \gamma$	472	2.18	302	1.45	0.20	< 0.01	1.21	< 0.01	0.93	< 0.01
$\rightarrow \Xi_c^{*'+} \gamma$	1.61	< 0.01	1.59	< 0.01	0.16	< 0.01	1.64	0.01	2.35	0.01
$\rightarrow \Xi_c^{*0} \gamma$	1.00	< 0.01	1.05	< 0.01	125	0.34	187	1.52	192	0.95

## 4.5.2 $\Xi'_b$ 结论与分析

### $\Xi'_b$ S波的强衰变和辐射衰变

- $\Xi_b'^*(5945)$ 和  $\Xi_b'^*(5955)$ 的衰变宽度:

$$\Gamma[\Xi_b'^{*0} \rightarrow \Xi_b \pi] \simeq 0.73 \text{ MeV}$$

$$\Gamma[\Xi_b'^{* -} \rightarrow \Xi_b \pi] \simeq 1.23 \text{ MeV}$$

- LHCb实验数据:

$$\Gamma(\Xi_b'^{*0}) \simeq 0.90 \pm 0.24 \text{ MeV (JHEP1605,161(2016))}$$

$$\Gamma(\Xi_b'^{* -}) \simeq 1.65 \pm 0.41 \text{ MeV (PRL114,062004(2015))}$$

- $\Xi'_b(5935)$ 的强衰变宽度  $\Gamma[\Xi_b'^{-} \rightarrow \Xi_b \pi] \simeq 78 \text{ keV}$

### 辐射衰变

- LHCb实验数据:

$$\Gamma(\Xi_b'^{-}) = 80 \text{ keV}$$

- (上限极限)

$B_Q \rightarrow B'_Q$	Ours	RQM [75]	VMC [100]	BM [99]	LCQSR [92-94]
$\Xi_b'^0 \rightarrow \Xi_b^0 \gamma$	84.6	...	...	14.7	$47 \pm 21$
$\Xi_b'^- \rightarrow \Xi_b^- \gamma$	0.0	...	...	0.118	$3.3 \pm 1.3$
$\Xi_b'^{*0} \rightarrow \Xi_b^0 \gamma$	104	...	270.8	24.7	$135 \pm 85$
$\Xi_b'^{* -} \rightarrow \Xi_b^- \gamma$	0.0	...	2.246	0.278	$1.50 \pm 0.95$
$\Xi_b'^{*0} \rightarrow \Xi_b^0 \gamma$	5.19	...	0.281	0.004	0.131
$\Xi_b'^{* -} \rightarrow \Xi_b^- \gamma$	15.0	...	0.702	0.005	0.303

## $\Xi'_b$ P波的强衰变和辐射衰变

结论：

右图可知： $|^2P_{\lambda} 3/2^- \rangle$  和  $|^4P_{\lambda} 5/2^- \rangle$  主要衰变道为  $\Xi'_b \pi$ ； $|^4P_{\lambda} 3/2^- \rangle$  的主要衰变道为  $\Xi'^*(5945) \pi$ 。

$|^2P_{\lambda} 1/2^- \rangle$  和  $|^4P_{\lambda} 3/2^- \rangle$  混合后结果：

$|^{\Xi'_b} P_{\lambda} 1/2^- \rangle_1$  的主要衰变道为  $\Xi'^*(5945) \pi$ ，  
 $|^{\Xi'_b} P_{\lambda} 1/2^- \rangle_2$  的主要衰变道为  $\Lambda_b K$  和  $\Xi_b \pi$

$ ^{2S+1}L_{\lambda} J^P \rangle$	State	Channel	$\Gamma_i$ (MeV)	$\mathcal{B}_i$
$ ^2P_{\lambda} \frac{1}{2}^- \rangle$	$\Xi'_b(6233)$	$\Lambda_b K$	12.11	44.77%
		$\Xi_b \pi$	4.77	17.63%
		$\Xi'_b \pi$	9.23	34.12%
		$\Xi'_b(5945) \pi$	0.94	3.48%
		total	27.05	
$ ^2P_{\lambda} \frac{3}{2}^- \rangle$	$\Xi'_b(6234)$	$\Lambda_b K$	4.14	17.14%
		$\Xi_b \pi$	14.91	61.74%
		$\Xi'_b \pi$	2.37	9.81%
		$\Xi'_b(5945) \pi$	2.73	11.30%
		total	24.15	
$ ^4P_{\lambda} \frac{1}{2}^- \rangle$	$\Xi'_b(6227)$	$\Lambda_b K$	17.28	53.60%
		$\Xi_b \pi$	10.01	31.05%
		$\Xi'_b \pi$	4.54	14.08%
		$\Xi'_b(5945) \pi$	0.41	1.27%
		total	32.24	
$ ^4P_{\lambda} \frac{3}{2}^- \rangle$	$\Xi'_b(6224)$	$\Lambda_b K$	0.98	6.19%
		$\Xi_b \pi$	2.67	16.87%
		$\Xi'_b \pi$	0.10	0.63%
		$\Xi'_b(5945) \pi$	12.08	76.31%
		total	15.83	
$ ^4P_{\lambda} \frac{5}{2}^- \rangle$	$\Xi'_b(6226)$	$\Lambda_b K$	4.20	17.22%
		$\Xi_b \pi$	16.37	67.12%
		$\Xi'_b \pi$	0.60	2.46%
		$\Xi'_b(5945) \pi$	3.22	13.20%
		total	24.39	

	$ ^{\Xi'_b} 2P_{\lambda} \frac{1}{2}^- \rangle(6233)$		$ ^{\Xi'_b} 2P_{\lambda} \frac{3}{2}^- \rangle(6234)$		$ ^{\Xi'_b} 4P_{\lambda} \frac{1}{2}^- \rangle(6227)$		$ ^{\Xi'_b} 4P_{\lambda} \frac{3}{2}^- \rangle(6224)$		$ ^{\Xi'_b} 4P_{\lambda} \frac{5}{2}^- \rangle(6226)$	
	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$	$\Gamma_i$	$\mathcal{B}_i(\%)$
$\rightarrow \Xi_b^0 \gamma$	72.2	0.27	72.8	0.30	34.0	0.11	94.0	0.59	47.7	0.20
$\rightarrow \Xi_b^- \gamma$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$\rightarrow \Xi_b^{\prime 0} \gamma$	76.3	0.28	43.9	0.18	0.25	< 0.01	0.67	< 0.01	0.44	< 0.01
$\rightarrow \Xi_b^{\prime -} \gamma$	190	0.70	92.3	0.38	1.48	< 0.01	2.94	0.02	1.88	< 0.01
$\rightarrow \Xi_b^{*0} \gamma$	0.89	< 0.01	0.90	< 0.01	69.5	0.22	47.5	0.30	41.5	0.17
$\rightarrow \Xi_b^{*-} \gamma$	3.54	0.01	3.60	0.01	164	0.51	104	0.66	88.2	0.36

## 5.总结

\* 对于近来LHCb实验上测量的五个态 $\Omega_c(3000)$ ,  $\Omega_c(3050)$ ,  $\Omega_c(3066)$ ,  $\Omega_c(3090)$ ,  $\Omega_c(3119)$ , 我们的结论为:  $\Omega_c(3000)$ 是一个混合的 $|P_{\lambda} 1/2^{-}\rangle_1$ 比较窄的态;  $\Omega_c(3050)$ 和 $\Omega_c(3066)$ 分别对应 $J^P=3/2^{-}$ 态,  $|^4P_{\lambda} 3/2^{-}\rangle$ 和 $|^2P_{\lambda} 3/2^{-}\rangle$ ;  $\Omega_c(3090)$ 对应 $J^P=5/2^{-}$ 的态,  $|^4P_{\lambda} 5/2^{-}\rangle$ ;  $\Omega_c(3119)$ 可能对应于2S中的任意一个态,  $|2^2S_{\lambda\lambda} 1/2^{+}\rangle$ 和 $|2^4S_{\lambda\lambda} 3/2^{+}\rangle$ 。

\* 对于基态的重子 $\Sigma_b^0$ 和 $\Sigma_b^{*0}$ , 辐射衰变道 $\Lambda_b^0 \gamma$ 的分支比比较大, 故在实验上获取 $\Sigma_b^0$ 和 $\Sigma_b^{*0}$ 的性质, 可通过该衰变道。

\* 对于1P波 $|\Xi_b^0 ^2P_{\lambda} 1/2^{-}\rangle$ 和 $|\Xi_b^0 ^2P_{\lambda} 3/2^{-}\rangle$ , 它们的宽度非常窄, 主要衰变道分别为 $\Xi_b^0 \pi$ 和 $\Xi_b^0 \pi^*$ , 并且到 $\Xi_b^0 \gamma$ 的辐射衰变也相当可观。

\* 对于 $\Sigma_{c(b)}$ 和 $\Xi_{c(b)}^0$ 的1P波, 即 $|^2P_{\lambda} 1/2^{-}\rangle$ ,  $|^2P_{\lambda} 3/2^{-}\rangle$ ,  $|^4P_{\lambda} 1/2^{-}\rangle$ ,  $|^4P_{\lambda} 3/2^{-}\rangle$ 和 $|^4P_{\lambda} 5/2^{-}\rangle$ , 衰变性质各不相同, 但他们都有比较窄的衰变宽度。需要指出的一点是 $|^2P_{\lambda} 1/2^{-}\rangle$ 和 $|^4P_{\lambda} 1/2^{-}\rangle$ 可能存在混合。



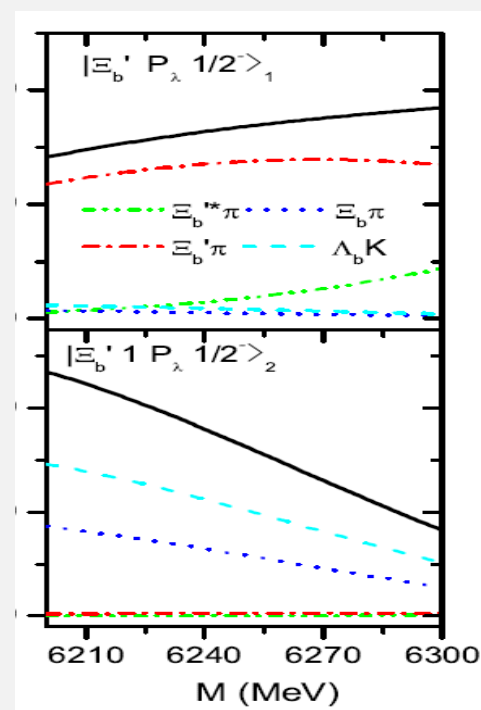
谢谢

# 附录

## $\Xi'_c$ P波的强衰变

$ ^{2S+1}L_\lambda J^P\rangle$	State	Channel	$\Gamma_i$ (MeV)	$\mathcal{B}_i$
$ ^2P_{\lambda\frac{1}{2}^-}\rangle$	$\Xi'_c(2936)$	$\Lambda_c K$	7.11	32.81%
		$\Xi_c \pi$	3.90	18.00%
		$\Xi'_c(2580)\pi$	10.08	46.52%
		$\Xi'_c(2645)\pi$	0.58	2.68%
		total	21.67	
$ ^2P_{\lambda\frac{3}{2}^-}\rangle$	$\Xi'_c(2935)$	$\Lambda_c K$	3.73	17.86%
		$\Xi_c \pi$	10.85	51.94%
		$\Xi'_c(2580)\pi$	3.89	18.62%
		$\Xi'_c(2645)\pi$	2.42	11.58%
		total	20.89	
$ ^4P_{\lambda\frac{1}{2}^-}\rangle$	$\Xi'_c(2854)$	$\Lambda_c K$	18.56	50.09%
		$\Xi_c \pi$	15.02	40.54%
		$\Xi'_c(2580)\pi$	3.44	9.28%
		$\Xi'_c(2645)\pi$	0.03	0.07%
		total	37.05	
$ ^4P_{\lambda\frac{3}{2}^-}\rangle$	$\Xi'_c(2912)$	$\Lambda_c K$	0.50	4.06%
		$\Xi_c \pi$	1.70	13.79%
		$\Xi'_c(2580)\pi$	0.13	1.05%
		$\Xi'_c(2645)\pi$	10.00	81.10%
		total	12.33	
$ ^4P_{\lambda\frac{5}{2}^-}\rangle$	$\Xi'_c(2929)$	$\Lambda_c K$	4.06	20.10%
		$\Xi_c \pi$	12.24	60.59%
		$\Xi'_c(2580)\pi$	1.06	5.25%
		$\Xi'_c(2645)\pi$	2.84	14.06%
		total	20.2	

## $\Xi'_b$ P波( $J^P=1/2^-$ )强衰变的混合



## Ω<sub>c</sub>结论与其他模型比较

State	[20]	[21]	[22]	[24]	[30]	[26]	[28]	[29]	[33]	[27]	This work
Ω <sub>c</sub> (3000)		1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup> (3/2 <sup>-</sup> )	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>+</sup> or 3/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>-</sup>		1/2 <sup>-</sup>
Ω <sub>c</sub> (3050)		1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup> (3/2 <sup>-</sup> )	1/2 <sup>-</sup>	5/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	5/2 <sup>+</sup> or 7/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>-</sup>		3/2 <sup>-</sup>
Ω <sub>c</sub> (3066)	1/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>+</sup> or 1/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>-</sup> (5/2 <sup>-</sup> )	3/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>-</sup>	5/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>+</sup>		3/2 <sup>-</sup>
Ω <sub>c</sub> (3090)			3/2 <sup>-</sup> (1/2 <sup>+</sup> )	3/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>-</sup>	5/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>+</sup>		5/2 <sup>-</sup>
Ω <sub>c</sub> (3119)	3/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>-</sup> (3/2 <sup>+</sup> )	5/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>-</sup>	3/2 <sup>+</sup>	5/2 <sup>-</sup>	5/2 <sup>+</sup> or 7/2 <sup>+</sup>	3/2 <sup>+</sup>	1/2 <sup>-</sup>	1/2 <sup>+</sup> or 3/2 <sup>+</sup>

20: EPL 118 (2017) no. 6, 61001

21: Phys. Rev. D 95, 094008

22: Phys. Rev. D 95, 114012

24: arXiv:1704.00259

26: Phys. Rev. D 95, 094018

28: Eur. Phys. J. C 77, 325

29: arXiv:1704.02688

30: arXiv:1704.02583

33: arXiv:1704.04928