

重重子质量谱和衰变

吕齐放

湖南师范大学

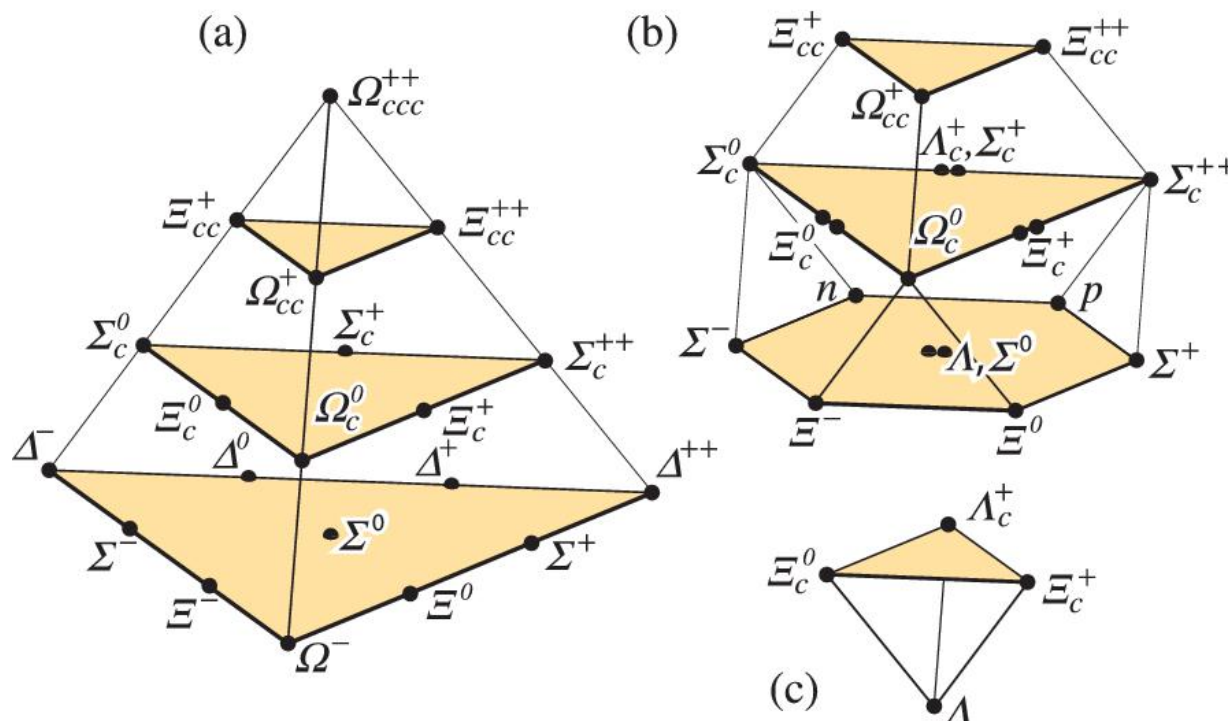
第十八届中高能核物理大会

2019. 07. 23

主要内容

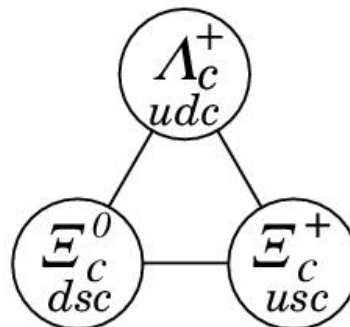
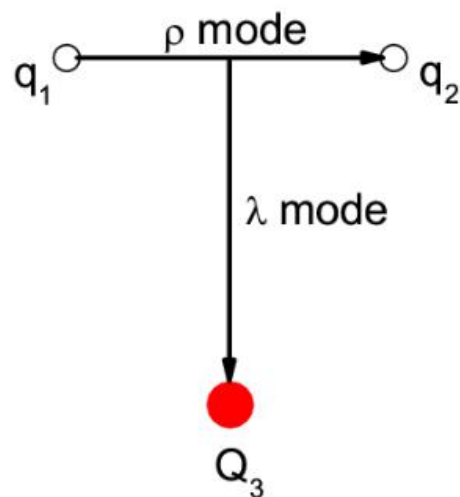
- 单重重子 $\Lambda_c(2940)$
- 双重重子 Ξ_{cc}
- 总结

传统重子基态

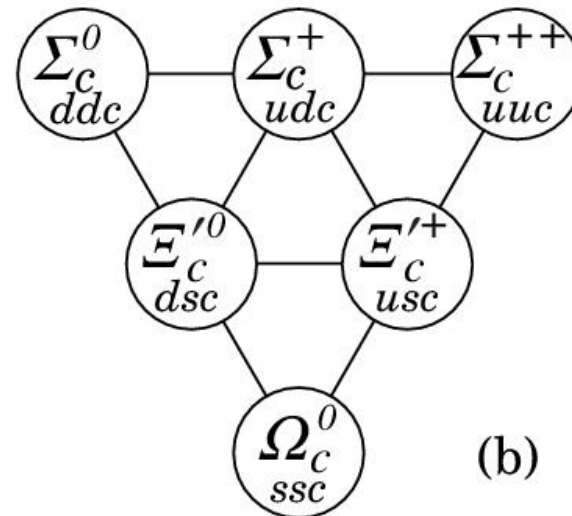


四种味道的夸克组成的重子的基态

单重重子基态



(a)



(b)

Qqq系统的雅克比坐标和基态记号

H. X. Chen, W. Chen, X. Liu, Y. R. Liu, and S. L. Zhu,
Rep. Prog. Phys. 80, 076201 (2017)

单重重子系统的特点

- 图像：两个轻夸克之间的激发是 ρ 模式的；重夸克和两个轻夸克子系统之间的激发是 λ 模式的。
- 质量： λ 模式激发比 ρ 模式激发所需能量小，质量低，比较容易。
- 强衰变：单重重子+轻介子，轻重子+重轻介子。
 ρ 模式激发的态衰变到轻重子+重轻介子被强烈压低。

LHCb实验结果

$$m[\Lambda_c(2860)^+] = 2856.1^{+2.0}_{-1.7} \pm 0.5^{+1.1}_{-5.6} \text{ MeV},$$

$$\Gamma[\Lambda_c(2860)^+] = 67.6^{+10.1}_{-8.1} \pm 1.4^{+5.9}_{-20.0} \text{ MeV},$$

$$m[\Lambda_c(2880)^+] = 2881.75 \pm 0.29 \pm 0.07^{+0.14}_{-0.20} \text{ MeV},$$

$$\Gamma[\Lambda_c(2880)^+] = 5.43^{+0.77}_{-0.71} \pm 0.29^{+0.75}_{-0.00} \text{ MeV},$$

$$m[\Lambda_c(2940)^+] = 2944.8^{+3.5}_{-2.5} \pm 0.4^{+0.1}_{-4.6} \text{ MeV},$$

$$\Gamma[\Lambda_c(2940)^+] = 27.7^{+8.2}_{-6.0} \pm 0.9^{+5.2}_{-10.4} \text{ MeV}.$$

$\Lambda_c(2940)$ 在 D^0p 末态发现，自旋宇称倾向于 $3/2^-$

R. Aaij et al., LHCb Collaboration, JHEP 1705, 030 (2017)

理论上的解释

- **D**波粲重子，宇称与实验不符。
- **D^{*}N**分子态，奇特态解释。

H.-Y. Cheng, C.-K. Chua, Phys. Rev. D75, 014006 (2007)
H. Garcilazo, J. Vijande, A. Valcarce, J. Phys. G34,961–976 (2007)
X.-H. Zhong, Q. Zhao, Phys. Rev. D77, 074008(2008) .
H. Nagahiro, S. Yasui, Phys. Rev. D 95, 014023 (2017)
J-J Guo, P Yang, A-L Zhang, arxiv:1902.07488
X.-G. He, X.-Q. Li, X. Liu, X.-Q. Zeng, Eur. Phys. J. C51, 883–889 (2007) .
P. G. Ortega, D. R. Entem, F. Fernandez, Phys. Lett. B718, 1381 (2013)
L. Zhao, H. Huang, J. Ping, Eur.Phys.J. A53, 28 (2017)
Y. Dong, A. Faessler, T. Gutsche, V. E. Lyubovitskij, Phys. Rev. D81, 014006 (2010) ; Phys. Rev. D83, 094005 (2011); Phys. Rev. D90, 094001 (2014) ; Phys. Rev. D82, 034035 (2010).
J.-J. Xie, Y.-B. Dong, X. Cao, Phys. Rev. D92,034029 (2015)
X.-Y. Wang, A. Guskov, X.-R. Chen, Phys. Rev. D92, 094032 (2015) .
Y. Huang, J. He, J.-J. Xie, X. Chen, H.-F. Zhang, Phys. Rev. D 99, 014045 (2019)

理论上的解释

2P_λ粲重子态的可能性:

- 自旋宇称3/2⁻，所以是P波态；
- 质量在3GeV附近，与理论预言的2P态质量相近；
- λ模式激发比 ρ 模式容易激发；
- 衰变到DN末态，ρ 模式激发被强烈压低，应该是λ激发。

S. Capstick, N. Isgur, Phys. Rev. D 34, 2809 (1986)

D. Ebert, R. N. Faustov, V. O. Galkin, Phys. Rev. D84, 014025 (2011)

B. Chen, K.-W. Wei, A. Zhang, Eur. Phys. J. A51, 82 (2015) .

2P_λ模式激发的粲重子

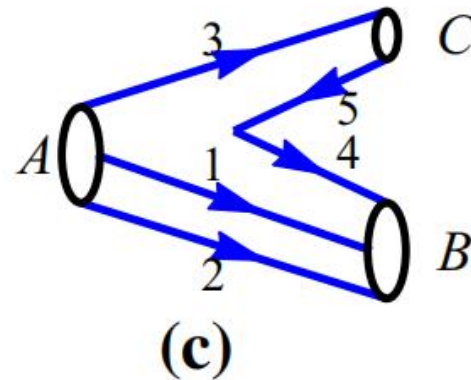
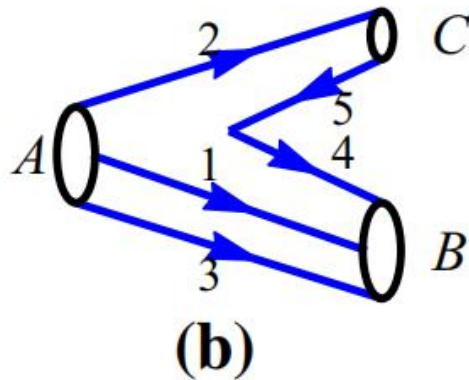
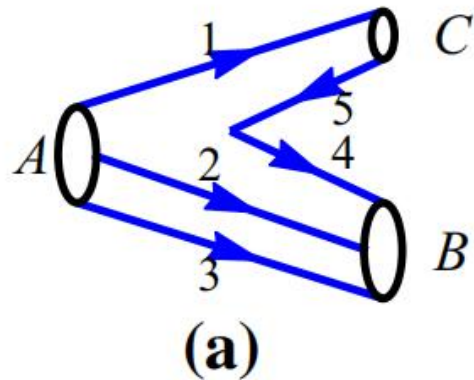
State	n_ρ	L_ρ	n_λ	L_λ	L	S_ρ	J_l	J^P
$\Lambda_{c1}(\frac{1}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	0	1	$\frac{1}{2}^-$
$\Lambda_{c1}(\frac{3}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	0	1	$\frac{3}{2}^-$
$\Sigma_{c0}(\frac{1}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	1	0	$\frac{1}{2}^-$
$\Sigma_{c1}(\frac{1}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	1	1	$\frac{1}{2}^-$
$\Sigma_{c1}(\frac{3}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	1	1	$\frac{3}{2}^-$
$\Sigma_{c2}(\frac{3}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	1	2	$\frac{3}{2}^-$
$\Sigma_{c2}(\frac{5}{2}^-, 2P)$	0	0	1	1	1	1	2	$\frac{5}{2}^-$

3P_0 模型计算强衰变

$$A(q_1, q_2, c_3) + P(q_4, \bar{q}_5) \rightarrow B(q_2, q_4, c_3) + C(q_1, \bar{q}_5),$$

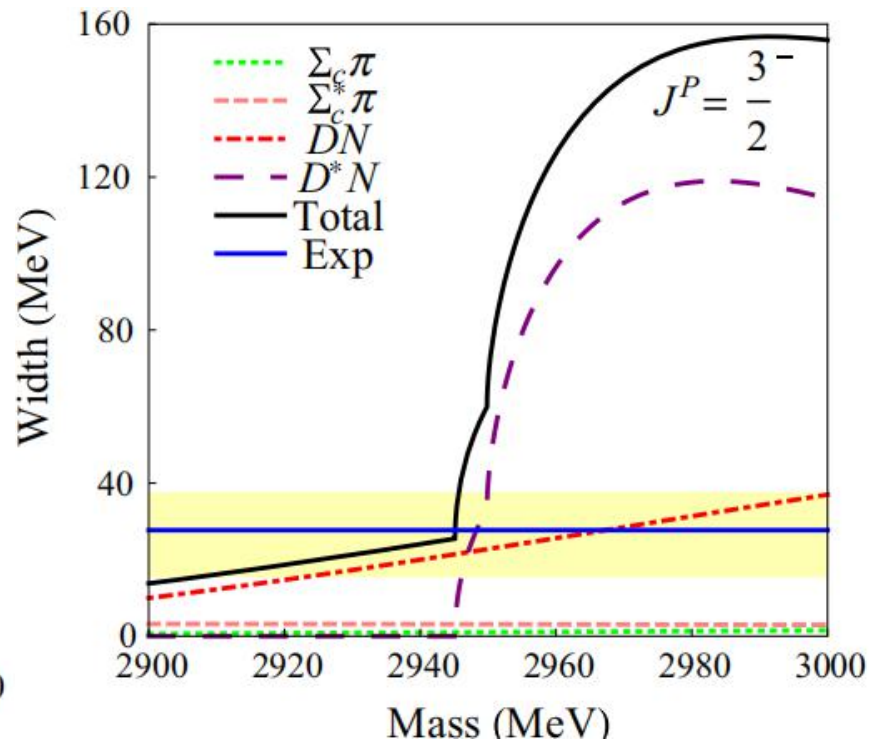
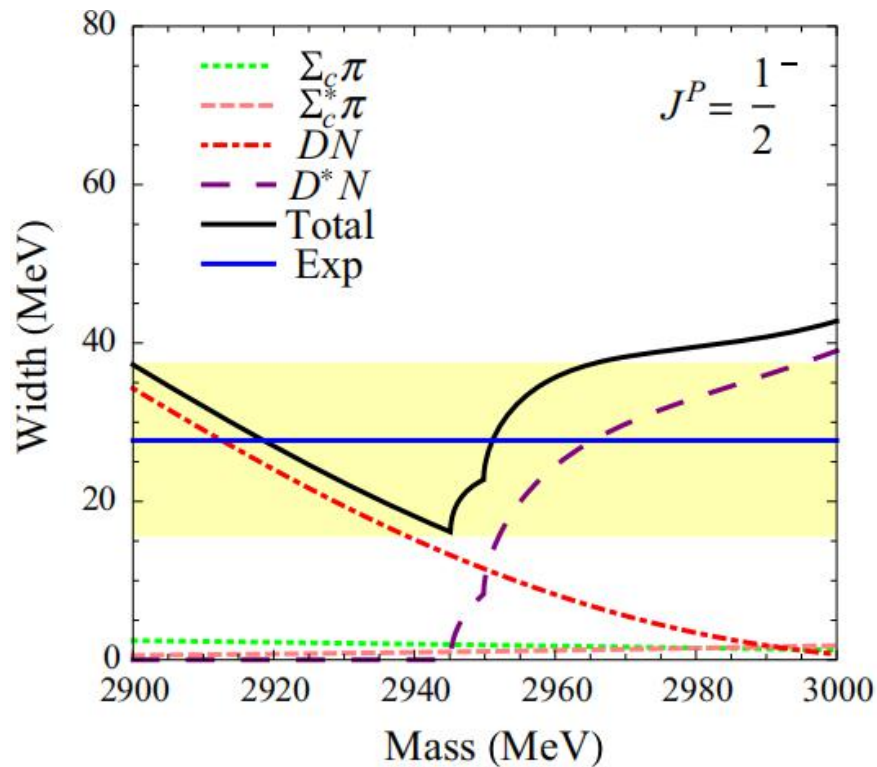
$$A(q_1, q_2, c_3) + P(q_4, \bar{q}_5) \rightarrow B(q_1, q_4, c_3) + C(q_2, \bar{q}_5),$$

$$A(q_1, q_2, c_3) + P(q_4, \bar{q}_5) \rightarrow B(q_1, q_2, q_4) + C(c_3, \bar{q}_5).$$



粲重子强衰变

$\Lambda_c(2940)$ 强衰变结果



更倾向于 $3/2^-$, 但不能排除 $1/2^-$

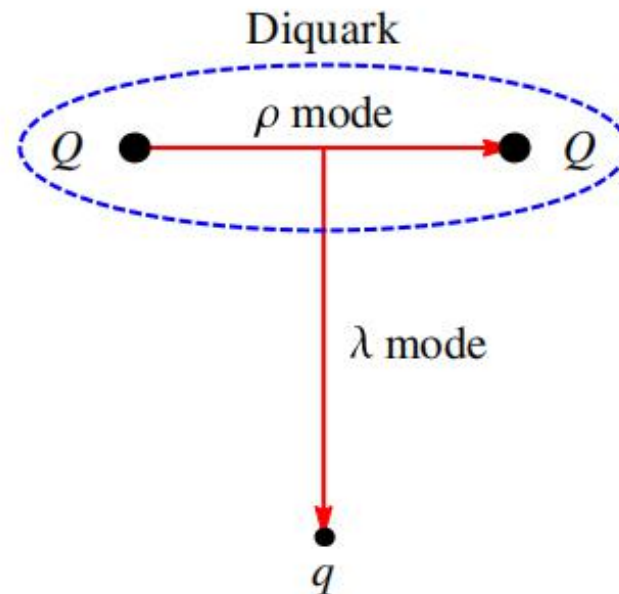
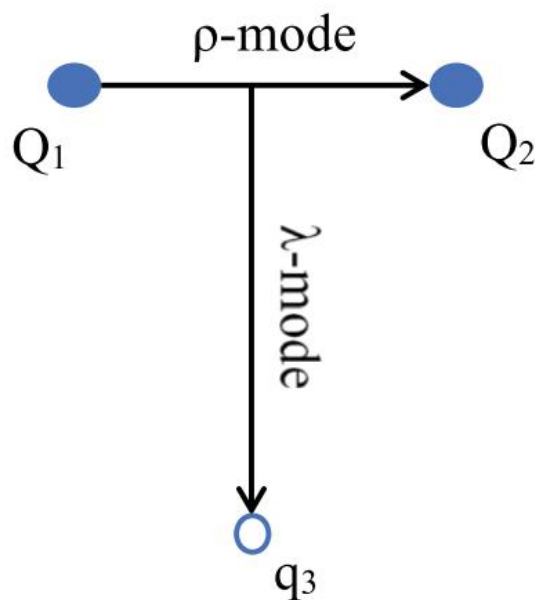
Qi-Fang Lü, Li-Ye Xiao, Zuo-Yun Wang, Xian-Hui Zhong,
Eur. Phys. J. C78:599 (2018)

2P_λ Σ_c 态的强衰变

Mode	Σ _{c0} ($\frac{1}{2}^-$, 2P)	Σ _{c1} ($\frac{1}{2}^-$, 2P)	Σ _{c1} ($\frac{3}{2}^-$, 2P)	Σ _{c2} ($\frac{3}{2}^-$, 2P)	Σ _{c2} ($\frac{5}{2}^-$, 2P)
Λ _c π ⁺	1.04	–	–	2.20	2.20
Λ _c ρ ⁺	–	3.09	3.09	0.92	1.05
Σ _c ⁺⁺ π ⁰	–	0.01	0.69	1.29	0.59
Σ _c ⁺ π ⁺	–	0.01	0.69	1.29	0.59
Σ _c ^{*++} π ⁰	–	1.09	0.60	1.05	1.69
Σ _c ^{*+} π ⁺	–	1.09	0.61	1.05	1.69
Σ _c ⁺⁺ η	–	0.86	0.12	0.26	0.13
Σ _c ^{*++} η	–	0.10	1.51	0.12	0.21
Ξ _c ⁺ K ⁺	4.93	–	–	0.96	1.04
Ξ _c ^{′+} K ⁺	–	5.13	0.08	0.19	0.10
Ξ _c ^{′*+} K ⁺	–	0.02	5.01	0.03	0.08
D ⁺ p	4.17	8.98	3.21	0.62	9.71
D ^{*+} p	1.08	11.63	8.63	34.46	21.77
D ⁰ Δ ⁺⁺	9.44	5.82	16.16	18.16	12.33
D ⁺ Δ ⁺	2.83	1.77	5.22	6.70	3.85
D _s Σ ⁺	4.56	8.92	0.07	0.03	0.70
Total	28.06	48.52	45.68	69.32	57.73

总宽度相对比较窄，未来LHCb实验上可以寻找这些态

双重重子

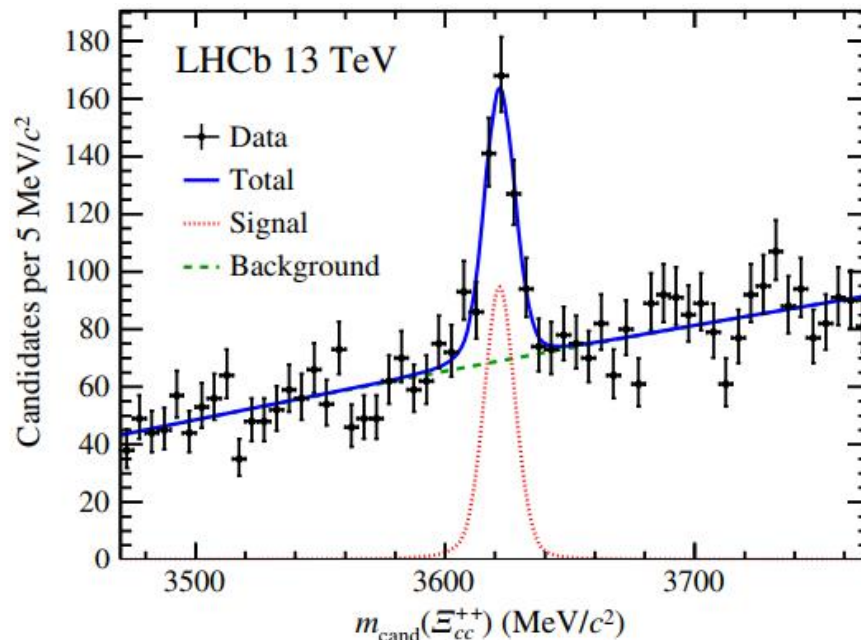
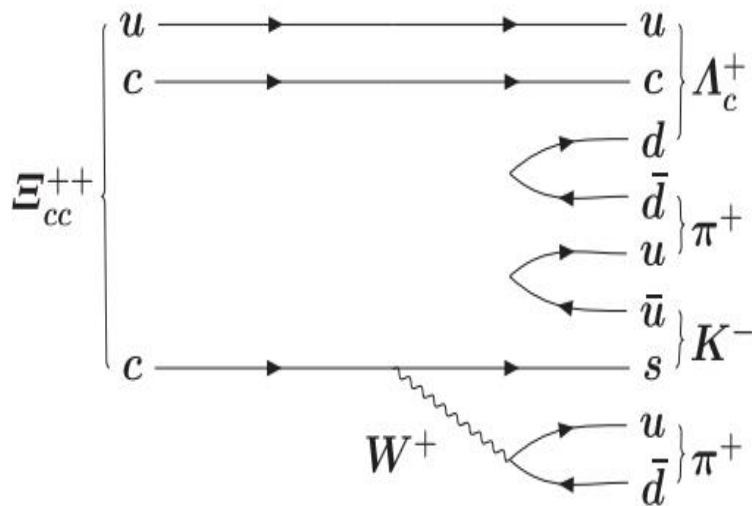


QQq系统的雅克比坐标

双重重子系统的特点

- 图像：两个重夸克之间的激发是 ρ 模式的；轻夸克和两个重夸克子系统之间的激发是 λ 模式的。
- 质量： ρ 模式激发比 λ 模式激发所需能量小，质量低，比较容易。
- 强衰变：双重重子+轻介子，单重重子+重轻介子。
 ρ 模式激发的态衰变到单重重子+重轻介子被强烈压低。

LHCb实验结果



LHCb发现的 Ξ_{cc} 质量是3621MeV，与SELEX的3519MeV相差100MeV，但SELEX的结果不能被其它合作组证实。

M. Mattson et al. (SELEX Collaboration), Phys. Rev. Lett. 89,112001 (2002).
R. Aaij et al. (LHCb Collaboration), Phys. Rev. Lett. 119, 112001 (2017).

势模型和夸克光子耦合顶点

Godfrey, Capstick和Isgur的相对论化的势模型:

$$\begin{aligned}\tilde{H} &= H_0 + \tilde{V}(\vec{p}, \vec{r}) \\ \tilde{V}(\vec{p}, \vec{r}) &= \tilde{H}_{ij}^{conf} + \tilde{H}_{ij}^{cont} + \tilde{H}_{ij}^{ten} + \tilde{H}_{ij}^{so}.\end{aligned}$$

夸克光子耦合顶点:

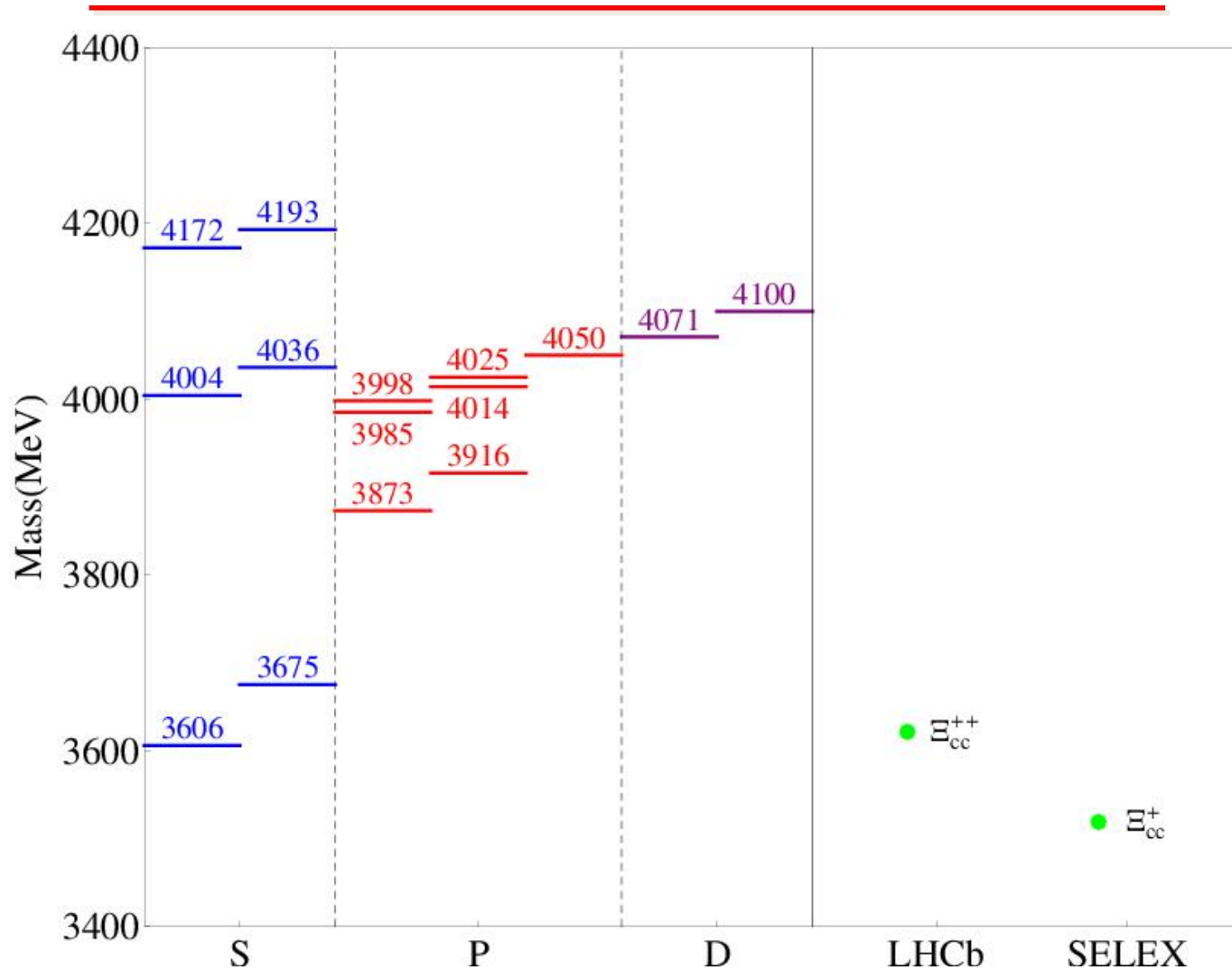
$$H_e = -\sum_j e_j \psi_j \gamma_\mu^j A^\mu(\vec{k}, \vec{r}) \psi_j$$

约化之后

$$h_e \cong \sum_j \left(e_j \vec{r}_j \cdot \vec{\varepsilon} - \frac{e_j}{2m_j} \vec{\sigma}_j \cdot (\vec{\varepsilon} \times \hat{k}) \right) e^{-i\vec{k} \cdot \vec{r}_j}.$$

S. Capstick, N. Isgur, Phys. Rev. D 34, 2809 (1986)

Ξ_{cc} 质量谱



Qi-Fang Lü, Kai-Lei Wang, Li-Ye Xiao, and Xian-Hui Zhong,
Phys. Rev. D 96, 114006(2017)

双重重子质量谱

$(N_d L_d n_q l_q) J^P$	Ξ_{cc}	Ω_{cc}	Ξ_{bb}	Ω_{bb}
$(1S 1s) 1/2^+$	3606	3715	10138	10230
$(1S 1s) 3/2^+$	3675	3772	10169	10258
$(1S 1p) 1/2^- \quad s_T=1/2$	3998	4087	10525	10605
$(1S 1p) 3/2^- \quad s_T=1/2$	4014	4107	10526	10610
$(1S 1p) 1/2^- \quad s_T=3/2$	3985	4081	10504	10591
$(1S 1p) 3/2^- \quad s_T=3/2$	4025	4114	10528	10611
$(1S 1p) 5/2^-$	4050	4134	10547	10625
$(1S 2s) 1/2^+$	4172	4270	10662	10751
$(1S 2s) 3/2^+$	4193	4288	10675	10763
$(1P 1s) 1/2^-$	3873	3986	10364	10464
$(1P 1s) 3/2^-$	3916	4020	10387	10482
$(2S 1s) 1/2^+$	4004	4118	10464	10566
$(2S 1s) 3/2^+$	4036	4142	10480	10579
$(1D 1s) 1/2^+$	4071	4186	10522	10625
$(1D 1s) 3/2^+$	4100	4207	10538	10638

双重重子基态质量

Baryon	Content	J^P	Our work	RQM	NQM	FH	NQM	LQCD
Ξ_{cc}	$\{cc\}q$	$1/2^+$	3606	3620	3478	3660	3676	3610
Ξ_{cc}^*	$\{cc\}q$	$3/2^+$	3675	3727	3610	3740	3753	3692
Ω_{cc}	$\{cc\}s$	$1/2^+$	3715	3778	3590	3740	3815	3738
Ω_{cc}^*	$\{cc\}s$	$3/2^+$	3772	3872	3690	3820	3876	3822
Ξ_{bb}	$\{bb\}q$	$1/2^+$	10138	10202	10093	10340	10340	10143
Ξ_{bb}^*	$\{bb\}q$	$3/2^+$	10169	10237	10133	10370	10367	10178
Ω_{bb}	$\{bb\}s$	$1/2^+$	10230	10359	10180	10370	10454	10273
Ω_{bb}^*	$\{bb\}s$	$3/2^+$	10258	10389	10200	10400	10486	10308

Ξ_{cc} 谱的两个基态之间质量差约为70MeV

D. Ebert, R. N. Faustov, V. O. Galkin, and A. P. Martynenko, Phys. Rev. D 66, 014008 (2002).

S. S. Gershtein, V. V. Kiselev, A. K. Likhoded, and A. I. Onishchenko, Phys. Rev. D 62, 054021 (2000).

R. Roncaglia, D. B. Lichtenberg, and E. Predazzi, Phys. Rev. D 52, 1722 (1995).

W. Roberts and M. Pervin, Int. J. Mod. Phys. A 23, 2817 (2008).

Z. S. Brown, W. Detmold, S. Meinel, and K. Orginos, Phys. Rev. D 90, 094507 (2014).

双重重子基态之间的电磁跃迁

Transition	Our work	RQM	SHO	BG	BG	CPT
$\Xi_{cc}^{*++} \rightarrow \Xi_{cc}^{++} \gamma$	7.21	23.46	16.7	4.35	1.43	22.0
$\Xi_{cc}^{*+} \rightarrow \Xi_{cc}^{+} \gamma$	3.90	28.79	14.6	3.96	2.08	9.57
$\Omega_{cc}^{*} \rightarrow \Omega_{cc} \gamma$	0.82	2.11	6.93	1.35	0.95	9.45
$\Xi_{bb}^{*0} \rightarrow \Xi_{bb}^0 \gamma$	0.98	0.31	1.19	...	...	...
$\Xi_{bb}^{*-} \rightarrow \Xi_{bb}^{-} \gamma$	0.21	0.06	0.24	...	...	...
$\Omega_{bb}^{*} \rightarrow \Omega_{bb} \gamma$	0.04	0.02	0.08	...	...	...

Ξ_{cc} 谱的两个基态之间的电磁跃迁在keV的量级

T. Branz, A. Faessler, T. Gutsche, M. A. Ivanov, J. G. Korner, V. E. Lyubovitskij, and B. Oexl, Phys. Rev. D 81,114036 (2010).

L. Y. Xiao, K. L. Wang, Q. F. Lü, X. H. Zhong, and S. L. Zhu, Phys. Rev. D 96, 094005 (2017).

R. H. Hackman, N. G. Deshpande, D. A. Dicus, and V. L. Teplitz, Phys. Rev. D 18, 2537 (1978).

A. Bernotas and V. Šimonis, Phys. Rev. D 87, 074016 (2013).

H. S. Li, L. Meng, Z. W. Liu, and S. L. Zhu, Phys.Lett. B777,169-176 (2018)

总结

- 我们利用夸克对产生模型计算了 $\Lambda_c(2940)$ 的强衰变，理论结果支持 $\Lambda_c(2940)$ 作为 $J^P=3/2^-$ 、 $2P_\lambda$ 的传统重子态。
- 五个 $2P_\lambda \Sigma_c$ 态的衰变宽度在 28~70MeV 范围内，未来的实验可以寻找这些态。
- 势模型可以很好地描述LHCb实验发现的 $\Xi_{cc}(3621)$ 的质量，认为是 $1/2^+$ 的基态。
- Ξ_{cc} 谱的两个基态之间质量差约为70MeV，电磁跃迁在 keV 的量级。

谢谢大家！