

用QCD求和规则研究重重子、双重重子、 三重重子的性质

王志刚

华北电力大学物理系

保定 071003

zgwang@aliyun.com

提纲

- QCD求和规则中正负宇称重子的区分
- $\frac{1}{2}^\pm$ 三重态重重子的质量
- $\frac{1}{2}^+$ 和 $\frac{3}{2}^+$ 六重态重重子和三重态双重重子的质量
- $\frac{1}{2}^-$ 和 $\frac{3}{2}^-$ 六重态重重子和三重态双重重子的质量
- $\frac{1}{2}^\pm$ 和 $\frac{3}{2}^\pm$ 三重重子的质量
- P-波重重子的质量
- D-波重重子的质量
- 结论

1 QCD求和规则中正负宇称重子的区分

用QCD求和规则研究重子是个传统题材，比较成功；但正负宇称粒子经常互相干扰。

$J^+(x)$ — 正宇称重子流

$J^-(x) = i\gamma_5 J^+(x)$ — 负宇称重子流

$i\gamma_5$ — 改变宇称

定义关联函数

$$\Pi^\pm(p) = i \int d^4x e^{ip \cdot x} \langle 0 | T \{ J^\pm(x) \bar{J}^\pm(0) \} | 0 \rangle$$

$$\Pi_{\mu\nu}^\pm(p) = i \int d^4x e^{ip \cdot x} \langle 0 | T \{ J_\mu^\pm(x) \bar{J}_\nu^\pm(0) \} | 0 \rangle$$

$J^\pm(x)$ —— 自旋 $\frac{1}{2}$ 重子流

$J_\mu^\pm(x)$ —— 自旋 $\frac{3}{2}$ 重子流

正负宇称重子流关联函数的关系

$$\Pi^-(p) = -\gamma_5 \Pi^+(p) \gamma_5$$

$$\Pi_{\mu\nu}^-(p) = -\gamma_5 \Pi_{\mu\nu}^+(p) \gamma_5$$

通过流和重子耦合，可以看到正负宇称重子贡献有一定关系。

$$\langle 0 | J^+(0) | B_+(p) \rangle = \lambda_+ U_+(p, s),$$

$$\langle 0 | J_\mu^+(0) | B_+^*(p) \rangle = \lambda_+ U_\mu^+(p, s),$$

$$\langle 0 | J^-(0) | B_-(p) \rangle = \lambda_- U_-(p, s),$$

$$\langle 0 | J_\mu^-(0) | B_-^*(p) \rangle = \lambda_- U_\mu^-(p, s),$$

$$\langle 0 | J^+(0) | B_-(p) \rangle = i\gamma_5 \lambda_- U_-(p, s),$$

$$\langle 0 | J_\mu^+(0) | B_-^*(p) \rangle = i\gamma_5 \lambda_- U_\mu^-(p, s),$$

$$\langle 0 | J^-(0) | B_+(p) \rangle = i\gamma_5 \lambda_+ U_+(p, s),$$

$$\langle 0 | J_\mu^-(0) | B_+^*(p) \rangle = i\gamma_5 \lambda_+ U_\mu^+(p, s).$$

在关联函数里面插入重子完备集，可以看到正负字称的重子都有贡献。

$$\begin{aligned} & \langle 0 | J_+(0) | B_\pm(p) \rangle \langle B_\pm(p) | \bar{J}_+(0) | 0 \rangle \\ &= -\gamma_5 \langle 0 | J_-(0) | B_\pm(p) \rangle \langle B_\pm(p) | \bar{J}_-(0) | 0 \rangle \gamma_5 , \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \langle 0 | J_\mu^+(0) | B_\pm(p) \rangle \langle B_\pm(p) | \bar{J}_\nu^+(0) | 0 \rangle \\ &= -\gamma_5 \langle 0 | J_\mu^-(0) | B_\pm(p) \rangle \langle B_\pm(p) | \bar{J}_\nu^-(0) | 0 \rangle \gamma_5 , \end{aligned}$$

区分正负宇称重子贡献

$$\Pi_+(p) = \lambda_+^2 \frac{\not{p} + M_+}{M_+^2 - p^2} + \lambda_-^2 \frac{\not{p} - M_-}{M_-^2 - p^2} + \dots,$$

$$\Pi_{\mu\nu}^+(p) = -\lambda_+^2 \frac{\not{p} + M_+}{M_+^2 - p^2} g_{\mu\nu} - \lambda_-^2 \frac{\not{p} - M_-}{M_-^2 - p^2} g_{\mu\nu} + \dots = -\Pi_+(p)g_{\mu\nu} + \dots,$$

如果取 **三维矢量** $\vec{p} = 0$, 那么

$$\begin{aligned} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\text{Im}\Pi_+(p_0 + i\epsilon)}{\pi} &= \lambda_+^2 \frac{\gamma_0 + 1}{2} \delta(p_0 - M_+) + \lambda_-^2 \frac{\gamma_0 - 1}{2} \delta(p_0 - M_-) + \dots \\ &= \gamma_0 A(p_0) + B(p_0) + \dots, \end{aligned}$$

where

$$\begin{aligned} A(p_0) &= \frac{1}{2} [\lambda_+^2 \delta(p_0 - M_+) + \lambda_-^2 \delta(p_0 - M_-)], \\ B(p_0) &= \frac{1}{2} [\lambda_+^2 \delta(p_0 - M_+) - \lambda_-^2 \delta(p_0 - M_-)], \end{aligned} \quad (2)$$

$A(p_0) + B(p_0)$ 对应正宇称重子
 $A(p_0) - B(p_0)$ 对应负宇称重子

正负字称重子求和规则

引入权重函数 $\exp\left[-\frac{p_0^2}{T^2}\right]$ 和 $p_0^2 \exp\left[-\frac{p_0^2}{T^2}\right]$

$$\lambda_{\pm}^2 \exp\left[-\frac{M_{\pm}^2}{T^2}\right] = \int_{\Delta}^{\sqrt{s_0}} dp_0 [\rho^A(p_0) \pm \rho^B(p_0)] \exp\left[-\frac{p_0^2}{T^2}\right], \quad (3)$$

$$\lambda_{\pm}^2 M_{\pm}^2 \exp\left[-\frac{M_{\pm}^2}{T^2}\right] = \int_{\Delta}^{\sqrt{s_0}} dp_0 [\rho^A(p_0) \pm \rho^B(p_0)] p_0^2 \exp\left[-\frac{p_0^2}{T^2}\right] \quad (4)$$

s_0 是连续阈值参数, Δ 是阈值参数, T^2 是布尔参数, $\rho^A(p_0)$ 和 $\rho^B(p_0)$ 是 QCD 层次上的谱密度.

2 $\frac{1}{2}^{\pm}$ 三重态重重子的质量

- 算符乘积展开收敛和极点为主 (QCD求和规则必须满足的两个条件, 明确列出, 以后不再明确列出)

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	极点项	微扰项
$\Lambda_c(\frac{1}{2}^+)$	1.7 – 2.7	3.1	(46 – 83)%	(47 – 73)%
$\Xi_c(\frac{1}{2}^+)$	1.9 – 2.9	3.2	(46 – 79)%	(59 – 77)%
$\Lambda_b(\frac{1}{2}^+)$	4.3 – 5.3	6.5	(46 – 67)%	(58 – 72)%
$\Xi_b(\frac{1}{2}^+)$	4.4 – 5.4	6.5	(45 – 64)%	(62 – 73)%
$\Lambda_c(\frac{1}{2}^-)$	2.2 – 3.2	3.4	(49 – 77)%	(70 – 84)%
$\Xi_c(\frac{1}{2}^-)$	2.4 – 3.4	3.5	(49 – 75)%	(76 – 86)%
$\Lambda_b(\frac{1}{2}^-)$	4.7 – 5.7	6.7	(49 – 67)%	(69 – 80)%
$\Xi_b(\frac{1}{2}^-)$	5.0 – 6.0	6.8	(49 – 65)%	(75 – 83)%

● 比较实验数据[Z.G.Wang, Eur.Phys.J.C68(2010)479]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	$M(\text{GeV})$ PDG
$\Lambda_c(\frac{1}{2}^+)$	1.7 – 2.7	3.1 ± 0.1	2.26 ± 0.27	0.022 ± 0.008	2.28646
$\Xi_c(\frac{1}{2}^+)$	1.9 – 2.9	3.2 ± 0.1	2.44 ± 0.23	0.027 ± 0.008	2.46793/2.47085
$\Lambda_b(\frac{1}{2}^+)$	4.3 – 5.3	6.5 ± 0.1	5.65 ± 0.20	0.030 ± 0.009	5.61958
$\Xi_b(\frac{1}{2}^+)$	4.4 – 5.4	6.5 ± 0.1	5.73 ± 0.18	0.032 ± 0.009	5.7945
$\Lambda_c(\frac{1}{2}^-)$	2.2 – 3.2	3.4 ± 0.1	2.61 ± 0.21	0.035 ± 0.009	2.59225
$\Xi_c(\frac{1}{2}^-)$	2.4 – 3.4	3.5 ± 0.1	2.76 ± 0.18	0.042 ± 0.009	2.7920/2.7928
$\Lambda_b(\frac{1}{2}^-)$	4.7 – 5.7	6.7 ± 0.1	5.85 ± 0.18	0.042 ± 0.012	5.91218
$\Xi_b(\frac{1}{2}^-)$	5.0 – 6.0	6.8 ± 0.1	6.01 ± 0.16	0.051 ± 0.012	?

用红色字体标出者，是理论计算和（论文发表后）实验数据的比较。

3 $\frac{1}{2}^+$ 和 $\frac{3}{2}^+$ 六重态重重子和三重态双重子的质量

- $\frac{1}{2}^+$ 六重态重重子的质量 [Z.G.Wang, Phys.Lett.B685(2010)59]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	$M(\text{GeV})(\text{experimental})$
Ω_b	5.2 – 6.2	6.8 ± 0.1	6.11 ± 0.16	0.134 ± 0.030	6.0461
Ξ'_b	4.9 – 5.9	6.7 ± 0.1	5.96 ± 0.17	0.079 ± 0.020	5.93502
Σ_b	4.6 – 5.6	6.6 ± 0.1	5.80 ± 0.19	0.062 ± 0.018	$5.8113/5.8155$
Ω_c	2.2 – 3.2	3.4 ± 0.1	2.70 ± 0.20	0.093 ± 0.023	2.6952
Ξ'_c	2.0 – 3.0	3.3 ± 0.1	2.56 ± 0.22	0.055 ± 0.016	$2.5774/2.5788$
Σ_c	1.8 – 2.8	3.2 ± 0.1	2.40 ± 0.26	0.045 ± 0.015	$2.45397/2.4529/2.45375$

- $\frac{3}{2}^+$ 六重态重重子的质量 (比较实验数据) [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.C68(2010)459]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	$M(\text{GeV})(\text{PDG})$
Ω_b^*	5.3 – 6.3	6.9 ± 0.1	6.17 ± 0.15	0.083 ± 0.018	?
Ξ_b^*	5.0 – 6.0	6.8 ± 0.1	6.02 ± 0.17	0.049 ± 0.012	5.95533
Σ_b^*	4.6 – 5.6	6.7 ± 0.1	5.85 ± 0.20	0.038 ± 0.011	$5.8321/5.8351$
Ω_c^*	2.4 – 3.4	3.5 ± 0.1	2.79 ± 0.19	0.056 ± 0.012	2.7659
Ξ_c^*	2.2 – 3.2	3.4 ± 0.1	2.65 ± 0.20	0.033 ± 0.008	$2.64553/2.64632$
Σ_c^*	2.0 – 3.0	3.3 ± 0.1	2.48 ± 0.25	0.027 ± 0.008	$2.51841/2.5175/2.51848$

- $\frac{1}{2}^+$ 三重态双重重子的质量(GeV) (比较实验数据)
[Z.G.Wang, Eur.Phys.J.A45(2010)267]

	Ξ_{cc}	Ω_{cc}	Ξ_{bb}	Ω_{bb}
PDG	3.5189	?	?	?
This work	3.57 ± 0.14	3.71 ± 0.14	10.17 ± 0.14	10.32 ± 0.14

- $\frac{3}{2}^+$ 三重态双重重子的质量(GeV) (比较实验数据)
[Z.G.Wang, Eur.Phys.J.C68(2010)459]

Reference	Ξ_{cc}^*	Ω_{cc}^*	Ξ_{bb}^*	Ω_{bb}^*
PDG	?	?	?	?
This work	3.61 ± 0.18	3.76 ± 0.17	10.22 ± 0.15	10.38 ± 0.14

LHCb 数据组在衰变 $\Xi_{cc}^{++} \rightarrow \Lambda_c^+ K^- \pi^+ \pi^+$ 观测到 Ξ_{cc}^{++} , 实验质量 $3621.40 \pm 0.72 \pm 0.27 \pm 0.14 \text{ MeV}$ 。与QCD求和规则对 Ξ_{cc} 和 Ξ_{cc}^* 质量的预言都是相容的, 由于LHCb 数据组并没有测量 Ξ_{cc}^{++} 的自旋和宇称, 所以 Ξ_{cc}^{++} 可能为 $J^P = \frac{1}{2}^+$ 或 $\frac{3}{2}^+$ 的重子。

4 $\frac{1}{2}^-$ 和 $\frac{3}{2}^-$ 六重态重重子和三重态双重子的质量

- $\frac{1}{2}^-$ 六重态重重子的质量 [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.A47(2011)81]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	Roberts et al	Ebert et al
Σ_c	2.3 – 3.3	3.5 ± 0.1	2.74 ± 0.20	0.071 ± 0.019	2.748	2.795
Ξ'_c	2.5 – 3.5	3.6 ± 0.1	2.87 ± 0.17	0.084 ± 0.019	2.859	2.928
Ω_c	2.7 – 3.7	3.7 ± 0.1	2.98 ± 0.16	0.136 ± 0.027	2.977	3.020
Σ_b	4.9 – 5.9	6.8 ± 0.1	6.00 ± 0.18	0.085 ± 0.022	6.099	6.108
Ξ'_b	5.2 – 6.2	6.9 ± 0.1	6.14 ± 0.15	0.103 ± 0.024	6.192	6.238
Ω_b	5.5 – 6.5	7.0 ± 0.1	6.27 ± 0.14	0.173 ± 0.035	6.301	6.352

- $\frac{3}{2}^-$ 六重态重重子的质量 [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.A47(2011)81]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	Roberts et al	Ebert et al
Σ_c^*	$2.4 - 3.4$	3.5 ± 0.1	2.74 ± 0.20	0.037 ± 0.009	2.763	2.761
Ξ_c^*	$2.6 - 3.6$	3.6 ± 0.1	2.86 ± 0.17	0.045 ± 0.009	2.871	2.900
Ω_c^*	$2.8 - 3.8$	3.7 ± 0.1	2.98 ± 0.16	0.072 ± 0.013	2.986	2.998
Σ_b^*	$5.0 - 6.0$	6.8 ± 0.1	6.00 ± 0.18	0.047 ± 0.012	6.101	6.076
Ξ_b^*	$5.3 - 6.3$	6.9 ± 0.1	6.14 ± 0.16	0.054 ± 0.013	6.194	6.212
Ω_b^*	$5.6 - 6.6$	7.0 ± 0.1	6.26 ± 0.15	0.095 ± 0.019	6.304	6.330

- $\frac{1}{2}^-$ 三重态双重重子的质量(和势模型预言差别较大) [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.A47(2011)81]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	Roberts et al	Ebert et al
Ξ_{cc}	$3.1 - 4.6$	4.5 ± 0.1	3.77 ± 0.18	0.159 ± 0.037	3.910	3.838
Ω_{cc}	$3.4 - 4.9$	4.6 ± 0.1	3.91 ± 0.14	0.192 ± 0.041	4.046	4.002
Ξ_{bb}	$8.8 - 10.8$	11.1 ± 0.1	10.38 ± 0.15	0.364 ± 0.088	10.493	10.632
Ω_{bb}	$9.1 - 11.1$	11.2 ± 0.1	10.53 ± 0.15	0.443 ± 0.101	10.616	10.771

- $\frac{3}{2}^-$ 三重态双重重子的质量(和势模型预言差别较大) [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.A47(2011)81]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	Roberts et al	Ebert et al
Ξ_{cc}^*	$3.3 - 4.8$	4.5 ± 0.1	3.77 ± 0.17	0.087 ± 0.019	3.921	3.959
Ω_{cc}^*	$3.6 - 5.1$	4.6 ± 0.1	3.91 ± 0.16	0.105 ± 0.020	4.052	4.102
Ξ_{bb}^*	$9.0 - 11.0$	11.1 ± 0.1	10.39 ± 0.15	0.206 ± 0.049	10.495	10.647
Ω_{bb}^*	$9.3 - 11.3$	11.2 ± 0.1	10.52 ± 0.15	0.251 ± 0.056	10.619	10.785

5 $\frac{1}{2}^{\pm}$ 和 $\frac{3}{2}^{\pm}$ 三重重子的质量

- $\frac{1}{2}^{\pm}$ 和 $\frac{3}{2}^{\pm}$ 三重重子的质量 (极点重夸克质量) [Z.G.Wang, Commun.Theor.Phys.58(2012)723]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	pole	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$
$\Omega_{ccc}(\frac{3}{2}^+)$	4.6 – 6.4	5.6 ± 0.2	(41 – 79)%	4.99 ± 0.14	0.20 ± 0.04
$\Omega_{ccb}(\frac{1}{2}^+)$	6.3 – 8.3	8.8 ± 0.2	(43 – 80)%	8.23 ± 0.13	0.47 ± 0.10
$\Omega_{ccb}(\frac{3}{2}^+)$	6.4 – 8.4	8.8 ± 0.2	(43 – 80)%	8.23 ± 0.13	0.26 ± 0.05
$\Omega_{bbc}(\frac{1}{2}^+)$	8.0 – 10.0	12.0 ± 0.2	(44 – 79)%	11.50 ± 0.11	0.68 ± 0.15
$\Omega_{bbc}(\frac{3}{2}^+)$	8.0 – 10.0	12.0 ± 0.2	(45 – 80)%	11.49 ± 0.11	0.39 ± 0.09
$\Omega_{bbb}(\frac{3}{2}^+)$	10.0 – 12.0	15.3 ± 0.2	(45 – 79)%	14.83 ± 0.10	0.68 ± 0.16
$\Omega_{ccc}(\frac{3}{2}^-)$	5.1 – 7.1	5.8 ± 0.2	(44 – 80)%	5.11 ± 0.15	0.24 ± 0.04
$\Omega_{ccb}(\frac{1}{2}^-)$	7.2 – 9.2	9.0 ± 0.2	(46 – 79)%	8.36 ± 0.13	0.57 ± 0.11
$\Omega_{ccb}(\frac{3}{2}^-)$	7.3 – 9.3	9.0 ± 0.2	(47 – 79)%	8.36 ± 0.13	0.32 ± 0.06
$\Omega_{bbc}(\frac{1}{2}^-)$	9.5 – 11.5	12.2 ± 0.2	(46 – 77)%	11.62 ± 0.11	0.86 ± 0.17
$\Omega_{bbc}(\frac{3}{2}^-)$	9.5 – 11.5	12.2 ± 0.2	(47 – 78)%	11.62 ± 0.11	0.49 ± 0.10
$\Omega_{bbb}(\frac{3}{2}^-)$	11.4 – 14.0	15.5 ± 0.2	(48 – 80)%	14.95 ± 0.11	0.86 ± 0.17

- $\frac{1}{2}^{\pm}$ 和 $\frac{3}{2}^{\pm}$ 三重重子的质量（最小减除重夸克质量） [Z.G.Wang, Commun.Theor.Phys.58(2012)723]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	pole	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$
$\bar{\Omega}_{ccc}(\frac{3}{2}^+)$	4.6 – 6.4	5.4 ± 0.2	(42 – 79)%	4.76 ± 0.14	0.20 ± 0.04
$\bar{\Omega}_{ccb}(\frac{1}{2}^+)$	6.3 – 8.3	8.2 ± 0.2	(42 – 78)%	7.61 ± 0.13	0.47 ± 0.10
$\bar{\Omega}_{ccb}(\frac{3}{2}^+)$	6.4 – 8.4	8.2 ± 0.2	(43 – 79)%	7.60 ± 0.13	0.26 ± 0.05
$\bar{\Omega}_{bbc}(\frac{1}{2}^+)$	8.0 – 10.0	11.0 ± 0.2	(43 – 78)%	10.47 ± 0.12	0.68 ± 0.15
$\bar{\Omega}_{bbc}(\frac{3}{2}^+)$	8.0 – 10.0	11.0 ± 0.2	(44 – 78)%	10.46 ± 0.12	0.39 ± 0.09
$\bar{\Omega}_{bbb}(\frac{3}{2}^+)$	10.0 – 12.0	13.9 ± 0.2	(45 – 78)%	13.40 ± 0.10	0.66 ± 0.15
$\bar{\Omega}_{ccc}(\frac{3}{2}^-)$	5.1 – 7.1	5.6 ± 0.2	(44 – 80)%	4.88 ± 0.15	0.24 ± 0.04
$\bar{\Omega}_{ccb}(\frac{1}{2}^-)$	7.2 – 9.2	8.4 ± 0.2	(45 – 78)%	7.74 ± 0.13	0.57 ± 0.11
$\bar{\Omega}_{ccb}(\frac{3}{2}^-)$	7.3 – 9.3	8.4 ± 0.2	(46 – 78)%	7.73 ± 0.13	0.32 ± 0.06
$\bar{\Omega}_{bbc}(\frac{1}{2}^-)$	9.5 – 11.5	11.2 ± 0.2	(45 – 75)%	10.60 ± 0.12	0.84 ± 0.17
$\bar{\Omega}_{bbc}(\frac{3}{2}^-)$	9.5 – 11.5	11.2 ± 0.2	(46 – 76)%	10.59 ± 0.11	0.47 ± 0.10
$\bar{\Omega}_{bbb}(\frac{3}{2}^-)$	11.4 – 14.0	14.1 ± 0.2	(46 – 78)%	13.52 ± 0.11	0.82 ± 0.16

6 P-波重重子的质量

- 明确引进P-波 [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.C75(2015)359]

	$T^2(\text{GeV}^2)$	$\sqrt{s_0}(\text{GeV})$	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^4)$
$\Lambda_c(2625) (J_\alpha^1)$	$1.6 - 2.0$	3.3 ± 0.1	2.62 ± 0.18	0.041 ± 0.014
$\Lambda_c(2625) (J_\alpha^2)$	$1.8 - 2.2$	3.3 ± 0.1	2.61 ± 0.18	0.072 ± 0.022
$\Xi_c(2815) (J_\alpha^1)$	$1.6 - 2.2$	3.5 ± 0.1	2.83 ± 0.17	0.065 ± 0.022
$\Xi_c(2815) (J_\alpha^2)$	$1.8 - 2.4$	3.5 ± 0.1	2.83 ± 0.17	0.113 ± 0.034

- 明确引进P-波，尝试确认LHCb的新 Ω_{CSS} 态 [Z.G.Wang, Eur.Phys.J.C77(2017)325]

currents	J_{jl}^P	$M(\text{GeV})$	$\lambda(10^{-1}\text{GeV}^4)$	assignments
J^1	$\frac{1}{2}^-_0$	3.05 ± 0.11	2.34 ± 0.50	$\Omega_c(3050)$
J_μ^1	$\frac{3}{2}^-_1$	3.06 ± 0.11	1.03 ± 0.23	$\Omega_c(3066/3090)$
J_μ^2	$\frac{3}{2}^-_2$	3.06 ± 0.10	2.47 ± 0.47	$\Omega_c(3066/3090)$
$J_{\mu\nu}$	$\frac{5}{2}^-_2$	3.11 ± 0.10	1.07 ± 0.17	$\Omega_c(3119)$

- 不明确引进P-波，确认LHCb的新 Ω_{cSS} 态 [Z.G.Wang et al, arXiv:1706.09401]

	J^P	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^3)$	(expt) (MeV)
$\Omega_c(1S)$	$\frac{1}{2}^+$	$2.70^{+0.11}_{-0.13}$	$1.09^{+0.17}_{-0.15} \times 10^{-1}$	2695.2
$\Omega_c(1S)$	$\frac{3}{2}^+$	$2.76^{+0.11}_{-0.12}$	$0.64^{+0.09}_{-0.08} \times 10^{-1}$	2765.9
$\Omega_c(1P)$	$\frac{1}{2}^-$	$3.02^{+0.12}_{-0.07}$	$0.90^{+0.13}_{-0.10} \times 10^{-1}$? 3000.4
$\Omega_c(1P)$	$\frac{3}{2}^-$	$3.09^{+0.08}_{-0.06}$	$0.29^{+0.04}_{-0.04} \times 10^{-1}$? 3090.2
$\Omega_c(2S)$	$\frac{1}{2}^+$	$3.09^{+0.11}_{-0.12}$	$0.82^{+0.09}_{-0.09} \times 10^{-1}$? 3090.2
$\Omega_c(2S)$	$\frac{3}{2}^+$	$3.12^{+0.12}_{-0.12}$	$0.37^{+0.03}_{-0.04} \times 10^{-1}$? 3119.1
$\Omega_c(2P)$	$\frac{1}{2}^-$	$3.40^{+0.10}_{-0.10}$	$0.91^{+0.09}_{-0.09} \times 10^{-1}$	
$\Omega_c(2P)$	$\frac{3}{2}^-$	$3.46^{+0.10}_{-0.11}$	$0.27^{+0.04}_{-0.03} \times 10^{-1}$	

7 D-波重重子的质量

- 明确引进D-波 [Z.G.Wang, arXiv:1705.07745]

	(L_ρ, L_λ)	J^P	$M(\text{GeV})$	$\lambda(\text{GeV}^5)$	(expt) (MeV)
Ξ_c	(0,2)	$\frac{5}{2}^+$	$3.09^{+0.13}_{-0.15}$	$3.73^{+0.89}_{-0.85} \times 10^{-2}$	3076.94/3079.9
Ξ_c	(0,2)	$\frac{3}{2}^+$	$3.06^{+0.11}_{-0.13}$	$1.47^{+0.37}_{-0.35} \times 10^{-1}$	3055.1
Λ_c	(0,2)	$\frac{5}{2}^+$	$2.88^{+0.18}_{-0.29}$	$2.47^{+0.89}_{-0.92} \times 10^{-2}$	2881.5
Λ_c	(0,2)	$\frac{3}{2}^+$	$2.83^{+0.15}_{-0.24}$	$0.84^{+0.32}_{-0.33} \times 10^{-1}$	2856.1
Ξ_c	(2,0)	$\frac{5}{2}^+$	$3.25^{+0.10}_{-0.11}$	$1.42^{+0.31}_{-0.27} \times 10^{-1}$	
Ξ_c	(2,0)	$\frac{3}{2}^+$	$3.23^{+0.10}_{-0.11}$	$2.50^{+0.56}_{-0.50} \times 10^{-1}$	
Λ_c	(2,0)	$\frac{5}{2}^+$	$3.22^{+0.10}_{-0.12}$	$1.37^{+0.30}_{-0.28} \times 10^{-1}$	
Λ_c	(2,0)	$\frac{3}{2}^+$	$3.22^{+0.11}_{-0.11}$	$2.50^{+0.56}_{-0.51} \times 10^{-1}$	
Ξ_c	(1,1)	$\frac{5}{2}^+$	$3.23^{+0.11}_{-0.11}$	$6.02^{+1.22}_{-1.09} \times 10^{-2}$	
Ξ_c	(1,1)	$\frac{3}{2}^+$	$3.22^{+0.10}_{-0.11}$	$1.53^{+0.35}_{-0.31} \times 10^{-1}$	
Λ_c	(1,1)	$\frac{5}{2}^+$	$3.23^{+0.10}_{-0.11}$	$6.01^{+1.22}_{-1.09} \times 10^{-2}$	
Λ_c	(1,1)	$\frac{3}{2}^+$	$3.21^{+0.11}_{-0.11}$	$1.53^{+0.35}_{-0.32} \times 10^{-1}$	

8 结论

- 区分正负字称重子的贡献，系统计算了重重子、双重重子、三重重子的基本质量谱，对于已发现粒子，和实验数据符合很好，同时对于未发现粒子质量做出理论预言。
- 论文发表后，到目前为止，实验上所观测到的重子，和QCD求和规则的预言，在误差范围内符合的很好，当然中心值有一定的偏差。
- 本方法突出优点：区分正负字称重子的贡献，干净利落，没有相互污染。

谢谢大家， 欢迎批评指正！