



全重五夸克系统的质量谱 与衰变性质研究

报告人：梁志彪
导 师：钟显辉教授
单 位：湖南师范大学

2025强子物理和有效场论前沿讲习班
2025. 8. 22. 郑州

目录

1 研究背景与动机

2 研究方法

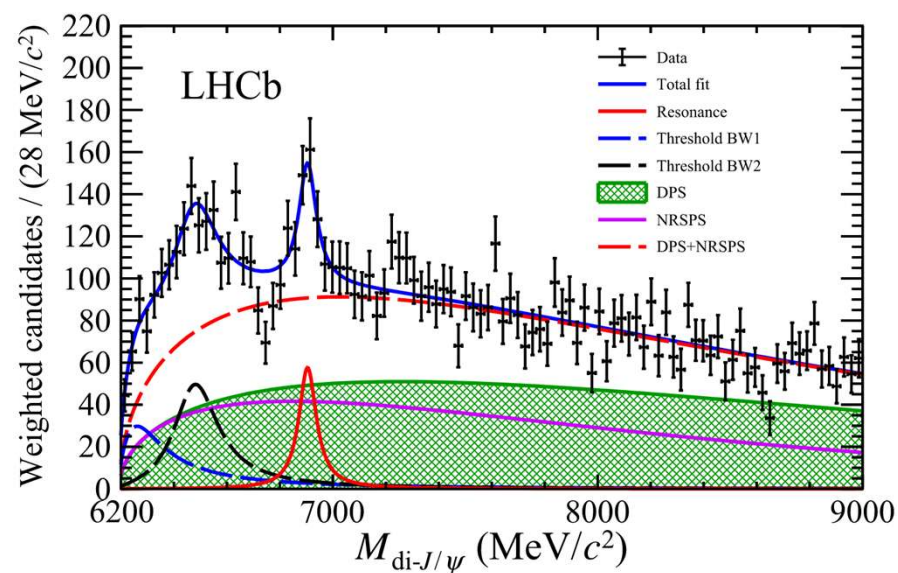
3 研究结果与分析

4 总 结

1

研究背景与动机

2020年LHCb合作组报道了他们在 $di - J/\psi$ 不变质量谱上发现的新粒子 $X(6900)$



$$m[X(6900)] = 6914 \pm 11 \text{ MeV}$$

$$\Gamma[X(6900)] = 137 \pm 21 \text{ MeV}$$

$cc\bar{c}c$ 态的发现证明了LHC在产生全重强子方面的强大能力，也表明全重五夸克应该存在。因此，人们可能会在即将进行的实验中观察到一些全重五夸克。

2

研 究 方 法

使用夸克模型研究全重五夸克系统的质量谱

哈密顿量由质量项与两体相互作用组成

$$H = \sum_i (m_i + T_i) - T_{cm} + \sum_{i < j} V_{ij}(r_{ij})$$

两体相互作用包括康奈尔势与自旋-自旋相互作用

$$V_{ij}(r_{ij}) = -\frac{3}{16}(\lambda_i \cdot \lambda_j) \left(br_{ij} - \frac{4\alpha_{ij}}{3r_{ij}} \right) - \frac{\alpha_{ij}}{4}(\lambda_i \cdot \lambda_j) \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma_{ij}^3 e^{-\sigma_{ij}^2 r_{ij}^2}}{\pi^{3/2}} \cdot \frac{16}{3m_i m_j} (\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j) \right]$$

按照对称性将全重五夸克系统分为了3类

$$\{1234\}\bar{5}: \{cccc\}\bar{c}, \{cccc\}\bar{b}, \{bbbb\}\bar{b}, \{bbbb\}\bar{c}$$

$$\{123\}4\bar{5}: \{ccc\}b\bar{b}, \{ccc\}b\bar{c}, \{bbb\}c\bar{c}, \{bbb\}c\bar{b}$$

$$\{12\}\{34\}\bar{5}: \{cc\}\{bb\}\bar{c}, \{bb\}\{cc\}\bar{b}.$$

使用 $SU(2)$ 的CG系数可以很快的得到五夸克的自旋波函数

$$\begin{aligned} & 2 \otimes 2 \otimes 2 \otimes 2 \otimes 2 \\ &= (3 \oplus 1) \otimes 2 \otimes 2 \otimes 2 \\ &= (4 \oplus 2 \oplus 2) \otimes 2 \otimes 2 \\ &= (5 \oplus 3 \oplus 3 \oplus 1 \oplus 3 \oplus 1) \otimes 2 \\ &= 6 \oplus 4 \oplus 4 \oplus 2 \oplus 4 \oplus 2 \oplus 2 \oplus 4 \oplus 2 \\ &= 6 \oplus 4 \oplus 4 \oplus 4 \oplus 4 \oplus 2 \oplus 2 \oplus 2 \oplus 2 \end{aligned}$$

$$S_1 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline \end{array} 5$$

$$S_2 = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 & 4 \\ \hline 5 & & & \end{array},$$

$$S_3 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline 4 & & \end{array} 5$$

$$S_4 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 4 \\ \hline 2 & & \end{array} 5,$$

$$S_5 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 4 \\ \hline 3 & & \end{array} 5$$

$$S_6 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline 4 & 5 & \end{array},$$

$$S_7 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 3 & 4 \\ \hline 2 & 5 & \end{array},$$

$$S_8 = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 4 \\ \hline 3 & 5 & \end{array}$$

$$S_9 = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 3 & 4 \end{array} 5,$$

$$S_{10} = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 3 \\ \hline 2 & 4 \end{array} 5.$$

使用 $SU(3)$ CG系数得到五夸克系统三个色单态。但并不像介子或重子的颜色波函数那样具有明确的对称性，其必定要与自旋波函数耦合

$$C_1 = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 4 \\ \hline 2 & \\ \hline 3 & \\ \hline \end{array} \otimes (5)_{\bar{3}}, \quad C_2 = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 3 & \\ \hline 4 & \\ \hline \end{array} \otimes (5)_{\bar{3}}, \quad C_3 = \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 3 \\ \hline 2 & \\ \hline 4 & \\ \hline \end{array} \otimes (5)_{\bar{3}}$$

使用一组显性相关高斯基展开空间波函数，但不同于传统的做法，我们根据不同系统的对称性使用不同的基矢。

$$\xi_1 = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2,$$

$$\xi_2 = \mathbf{r}_3 - \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2}{m_1 + m_2},$$

$$\xi_3 = \mathbf{r}_4 - \mathbf{r}_5,$$

$$\xi_4 = \frac{m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + m_3 \mathbf{r}_3}{m_1 + m_2 + m_3} - \frac{m_4 \mathbf{r}_4 + m_5 \mathbf{r}_5}{m_4 + m_5}.$$

传统的基矢： $\psi(\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4) = \exp(-a\xi_1^2 - b\xi_2^2 - c\xi_3^2 - d\xi_4^2)$

$$\psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3, \mathbf{r}_4, \mathbf{r}_5) = \exp\left(-\sum_{j>i}^5 a_{ij} \mathbf{r}_{ij}^2\right)$$

最后通过置换群耦合使波函数满足泡利原理。比如对于 $cccc\bar{c}, cccb\bar{b}, bbbb\bar{c}, bbbb\bar{b}$ 系统, 每个系统有一个 $J^P = 3/2^-$ 的态和一个 $J^P = 1/2^-$ 的态

$$1S_{\frac{3}{2}^-}(\{1234\}\bar{5}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(C_1S_3 + C_2S_4 - C_3S_5)$$

$$1S_{\frac{1}{2}^-}(\{1234\}\bar{5}) = \frac{1}{\sqrt{3}}(C_1S_6 + C_2S_7 - C_3S_8)$$

2 研 究 方 法

使用夸克重组模型计算全重五夸克系统的衰变宽度，夸克重组的动力学来自夸克之间的相互作用。

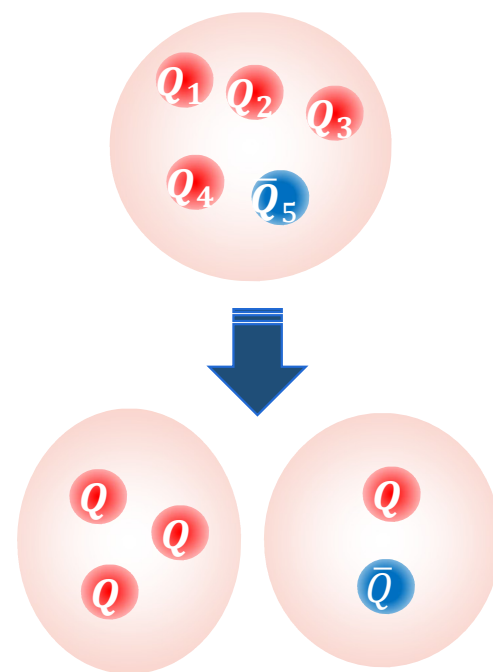
$$V_{ij} = \sum_{i < j} (V_{ij}^{conf} + V_{ij}^{SS})$$

两体衰变的衰变振幅

$$\mathcal{M}(A \rightarrow BC) = -\sqrt{(2\pi)^3} \sqrt{8M_A E_B E_C} \left\langle BC \left| \sum_{i < j} V_{ij} \right| A \right\rangle$$

$A \rightarrow BC$ 过程的宽度为

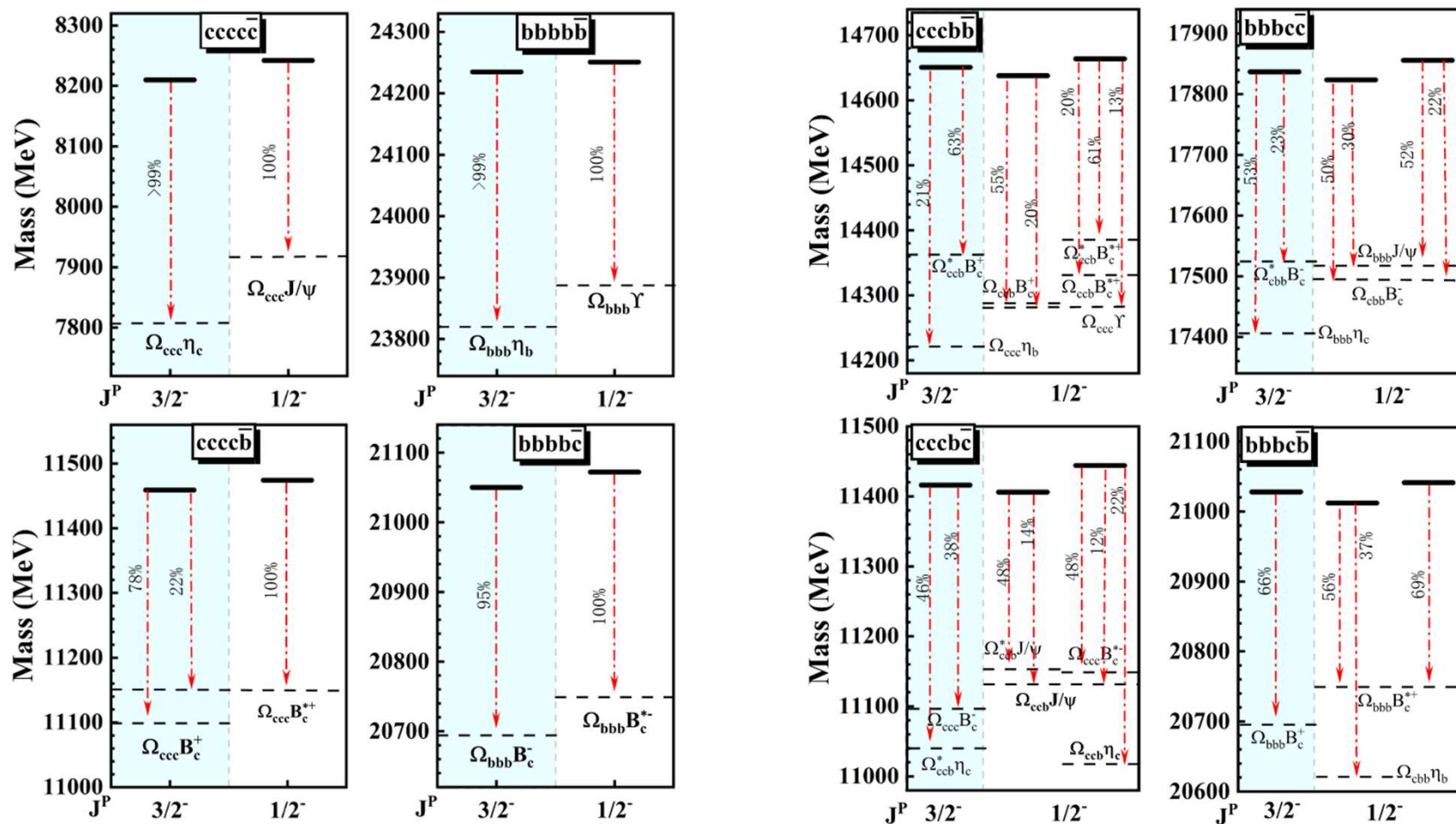
$$\Gamma = \frac{1}{2J_A + 1} \frac{|\mathbf{q}|}{8\pi M_A^2} |\mathcal{M}(A \rightarrow BC)|^2$$

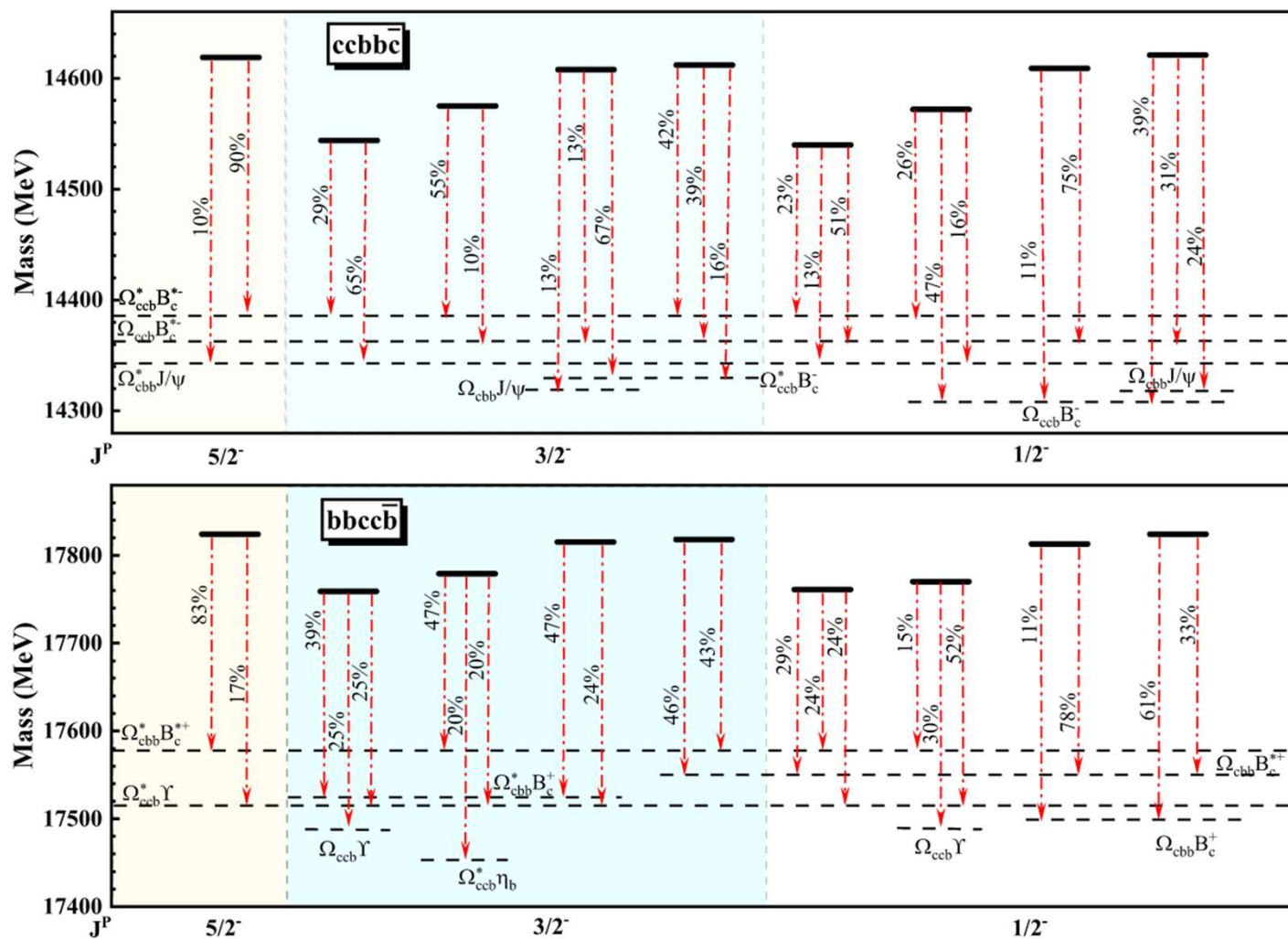


3

研究结果与分析

我们计算了五夸克的质量谱，哈密顿量中各部分的贡献，每个态的方均根半径与衰变宽度。





4

总

结

- 
- 1、使用显性相关高斯基系统得计算了全重五夸克系统的 $1S$ 态质量谱与方均根半径。并没有发现束缚的紧致全重五夸克态。
 - 2、利用夸克重组模型给出了主要的分解衰变通道和部分宽度比，这可能为未来的实验研究提供有用的参考。