

# 夸克质量对正负电子湮灭中单举过程的影响

王丽芝<sup>1</sup>, 祁 烁<sup>1</sup>, 刘魁勇<sup>2</sup>, 杨 坤<sup>1</sup>, 成泰民<sup>1</sup>

( 1 沈阳化工学院数理系, 辽宁 沈阳 110142)

( 2 辽宁大学物理系, 辽宁 沈阳 110036)

[摘要] 在 3 种方案下考虑夸克质量改变对正负电子湮灭中双粲夸克对的单举过程的影响. 第一种方案, 选取固定长程矩阵元; 第二种方案, 采用线性势模型计算长程矩阵元; 第三种方案, 由实验抽取长程矩阵元. 发现随夸克质量的减小, 单举过程的截面有显著增大.

[关键词] 非相对论量子力学, 粲夸克偶素, 单举过程

[中图分类号] O412 [文献标识码] A [文章编号] 1001-4616(2008)04-0066-03

## Effect of Quark Mass for the Exclusive Process in $e^+e^-$ Annihilation

Wang Lizi<sup>1</sup>, Qi Shuo<sup>1</sup>, Liu Ku Yong<sup>2</sup>, Yang Kun<sup>1</sup>, Cheng Taimin<sup>1</sup>

( 1. Department of Mathematics and Physics Shenyang Institute of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

( 2. Department of Physics Liaoning University, Shenyang 110036, China)

**Abstract** The effect of quark mass for the exclusive process in  $e^+e^-$  annihilation is investigated under three scenarios. The first scenario, the fixed long-distance matrix was chosen. The second scenario, the fixed long-distance matrix was calculated through linear potential model. The third scenario, the fixed long-distance matrix was extracted from the experimental data. The cross section of the exclusive processes was found increased significantly with the quark mass decreasing.

**Key words** non-relativistic quantum chromodynamics, charmonium, exclusive process

对重味强子物理的研究是人们认识强相互作用的重要窗口, 重夸克偶素的产生和衰变与微扰量子色动力学和非微扰量子色动力学都有密切的联系. 因此对重味强子的产生、衰变和质量谱的研究一直是粒子物理研究领域的热点和前沿课题.

### 1 $e^+e^- \rightarrow J/\psi + c\bar{c}$ 过程产生截面的计算

在 NRQCD 因子化框架下, 如图 1:

$\bar{e}^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow \gamma^* \rightarrow c\bar{c}(\text{}^{2S+1}L_J)(p) + c(p_c) + \bar{c}(p_{\bar{c}})$  过程的散射振幅可由下式来描述<sup>[1]</sup>

$$\begin{aligned} A(\bar{e}^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow c\bar{c}(\text{}^{2S+1}L_J)(p) + c(p_c) + \bar{c}(p_{\bar{c}})) = \\ \sqrt{C_L} \sum_{L_S Z} \sum_{S_1 S_2} \sum_{j k} \langle S_1; S_2 | SS_Z \rangle \langle LL_Z; SS_2 | JJ_Z \rangle \langle 3j; \bar{3}k | 1 \rangle A(\bar{e}^-(p_1) + e^+(p_2) \rightarrow \\ c\left(\frac{p_c}{2}; s_1\right) + \bar{c}\left(\frac{p_{\bar{c}}}{2}; s_2\right) + c(p_c; s_3) + \bar{c}(p_{\bar{c}}; s_4) \quad (L = S). \end{aligned} \quad (1)$$

考虑色单态的情形, 其中  $c\bar{c}(\text{}^{2S+1}L_J)$  是  $c\bar{c}$  在短程形成的中间态, 该中间态最终会在长程过程演化到某一粲夸克偶素. 对于色单态的情形系数  $C_L$  是与粲夸克束缚态的径向波函数的零点值相关的. 对于  $S$  态有

$$C_S = \frac{1}{4\pi} |R_S(0)|^2, \quad (2)$$

收稿日期: 2008-02-05

基金项目: 国家自然科学基金 (10647138)、辽宁省教育厅科学技术研究基金 (20060667) 资助项目.

通讯联系人: 王丽芝, 讲师, 研究方向: 理论物理研究. E-mail: qiqishuo@126.com

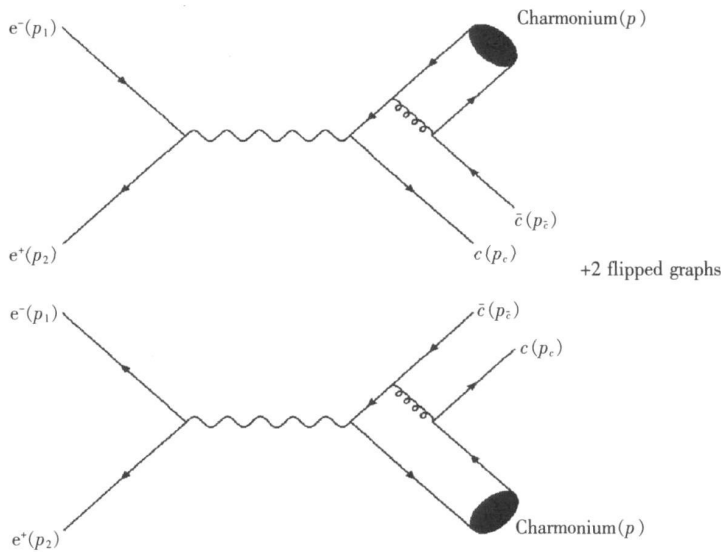


图 1  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{Charmonium} + c\bar{c}$  过程的费曼图

Fig.1 Feynman diagrams for  $e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{Charmonium} + c\bar{c}$

自旋投影算符定义如下<sup>[2]</sup>

$$P_{SS_Z}(p; q) \equiv \sum_{S_1 S_2} \langle S_1 S_2 | SS_Z \rangle v \left( \frac{p}{2} + q, s_1 \right) u \left( \frac{p}{2} - q, s_2 \right). \quad (3)$$

下面列出在计算中要用到的自旋投影算符

$$P_{00}(p, 0) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \gamma_5 (\not{p} + M), \quad (4)$$

$$P_{1S_Z}(p, 0) = \frac{1}{2\sqrt{2}} \not{\epsilon}(S_Z) (\not{p} + M), \quad (5)$$

其中  $M$  为粲夸克偶素的质量, 在非相对论近似下等于  $2m_c$ .

应用如下微分截面公式<sup>[3]</sup>

$$\frac{d\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow \text{charmonium} + c\bar{c})}{dz} = \frac{4C_L \alpha^2 \alpha_s^2}{8m_c} \left[ S(z) + \frac{\alpha(z)}{3} \right], \quad (6)$$

其中  $L = S$  表示  $S$  波粲夸克偶素的产生. 在计算中用到的输入参数在下式给出

$$m_e = 0, m_c = 1.5 \text{ GeV}, \alpha_s(2m_c) = 0.26, \alpha = \frac{1}{137}. \quad (7)$$

粲夸克偶素零点波函数的值为<sup>[4]</sup>

$$|R_S(0)|^2 = 0.81 \text{ GeV}^3. \quad (8)$$

当选取质心系能量为 Belle 和 BaBar 的质心系能量  $\sqrt{s} = 10.6 \text{ GeV}$  时, 得到的总截面为

$$\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma^* \rightarrow J/\psi + c\bar{c}) = 148 \text{ fb}, \quad (9)$$

与  $e^+e^- \rightarrow J/\psi + c\bar{c}$  过程产生截面的测量值 ( $\sim 0.9 \text{ pb}$ )<sup>[5,6]</sup> 有很大差距.

## 2 质量 $m_c$ 的改变对截面的影响

为解决理论预言与实验数据的矛盾, 我们采用 3 种方案讨论夸克质量的改变对正负电子湮灭中粲偶素单举产生的影响.

第 1 种方案我们采用固定长程矩阵元的方法. 这相当于夸克对在产生后强子化到某 1 强子态的几率不随夸克质量改变. 我们将所得结果列于表 1 中.

从表中数据可以看出, 粲夸克质量  $m_c$  对截面的影响是很大的, 改变粲夸克质量  $m_c$ , 单举过程截面随质量  $m_c$  的减小而增大, 当  $m_c = 1.0 \text{ GeV}$  时, 理论值趋于实验值.

表 1 对固定的长程矩阵元, 粲夸克质量  $m_c$  改变对单举过程截面的影响  
Table 1 Effect of charm quark mass for the exclusive process cross section based on the fixed long-distance matrix elements

粲夸克质量 (单位: GeV)	$\sigma(e^+e^-\rightarrow J/\psi+c\bar{c})$ (单位: pb)
1.6	0.103
1.5	0.148
1.4	0.210
1.3	0.297
1.2	0.421
1.1	0.601
1.0	0.868

表 2 线性势模型下, 粲夸克质量  $m_c$  改变对单举过程截面的影响  
Table 2 Effect of charm quark mass for the exclusive process cross section based on the linear potential model

粲夸克质量 (单位: GeV)	$\sigma(e^+e^-\rightarrow J/\psi+c\bar{c})$ (单位: pb)
1.6	0.161
1.5	0.216
1.4	0.287
1.3	0.377
1.2	0.493
1.1	0.645
1.0	0.847

第 2 种方案我们选取由线性势模型下计算  $S$  波零点波函数的方法得到矩阵元. 在线性势模型下, 波函数零点值正比于约化质量  $\mu_r$ , 且当  $m_c = 1.84\text{ GeV}$  时,  $|R_s(0)|^2 = 1.454\text{ GeV}^{4/3}$ , 由此, 在选取不同夸克质量的情况下, 我们可以得到相应的长程矩阵元. 其它参数仍为  $m_c = 0$ ,  $\alpha_s(2m_c) = 0.26$ ,  $\alpha = \frac{1}{137}$  得到的截面如表 2 所示.

从表中数据可以看出, 在这种情况下, 单举过程截面随粲夸克质量  $m_c$  减小而迅速增大, 且当  $m_c = 1.0\text{ GeV}$ , 单举过程的理论值与实验值非常接近.

第 3 种方案我们考虑如文献 [7] 中的长程矩阵元的选取,

$$\begin{aligned}\langle 0|O_1(^1S_0^c)|0\rangle &= 0.132m_c^2 \\ \frac{\langle 0|O_1(^3S_1^c)|0\rangle}{3} &= 0.13m_c^2\end{aligned}$$

在此方案下, 得到单举过程的截面如表 3 所示:  
从表中数据可以看出, 选取不同夸克质量  $m_c$  时, 单举过程截面随粲夸克质量  $m_c$  减小而增大, 但变化幅度不大, 当  $m_c = 1.0\text{ GeV}$ , 理论值与实验值也存在较大差异.

3 结论

本文在 3 种方案下讨论了粲夸克质量  $m_c$  的改变对粲夸克偶素单举产生的影响. 我们发现, 对于单举过程质量变化会带来较大影响. 尤其是对单举过程在取夸克质量为  $1.0\text{ GeV}$  的情况下, 在选取固定长程矩阵元的情况下, 理论计算值与实验值趋于一致.

表 3 从实验拟合数据中抽取长程矩阵元后, 粲夸克质量  $m_c$  改变对单举过程截面的影响

Table 3 Effect of charm quark mass for the exclusive process cross section based on the fixed long-distance matrix extracted from the experimental data

粲夸克质量 (单位: GeV)	$\sigma(e^+e^-\rightarrow J/\psi+c\bar{c})$ (单位: pb)
1.6	0.0895
1.5	0.113
1.4	0.139
1.3	0.170
1.2	0.205
1.1	0.246
1.0	0.294

[参考文献]

[1] Ko P, Lee J, Song H S. Color octet mechanism in  $\Upsilon + p \rightarrow J/\psi + X$  [J]. Phys Rev D, 1996, 54(7): 4312-4325.  
[2] Cho P, Leibovich A K. Color octet quarkonia production [J]. Phys Rev D, 1996, 53(1): 150-162.  
[3] Cho P, Leibovich A K. Color singlet  $\phi_c$  production at  $e^+e^-$  colliders [J]. Phys Rev D, 1996, 54(11): 6690-6695.  
[4] Eichten E J, Quigg C. Quarkonium wave functions at the origin [J]. Phys Rev D, 1995, 52(3): 1726-1728.  
[5] Belle Collaboration, Abe K, Aso T, et al. Observation of double  $cc$  production in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} \approx 10.6\text{ GeV}$  [J]. Phys Rev Lett, 2002, 89: 142001-1-7.  
[6] Belle Collaboration, Abe K, Asakura T, et al. Production of prompt charmonia in  $e^+e^-$  annihilation at  $\sqrt{s} \approx 10.6\text{ GeV}$  [J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(5): 052001-1-6.  
[7] Quigg C, Rosner J L. Quarkonium level spacings [J]. Phys Lett B, 1977, 71: 153-157.

[责任编辑: 顾晓天]