

X(3872)的 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变

董新平¹, 姬鹏飞², 魏科伟³

(1. 许昌学院 电气信息工程学院, 河南 许昌 461000; 2. 平顶山学院 电气信息工程学院, 河南 平顶山, 467000;
3. 安阳师范学院 物理与电气工程学院, 河南 安阳 455000)

摘要:利用³P₀衰变模型对 X(3872)的 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变宽度进行了计算和分析. 计算结果表明, 将 X(3872) 视为 1⁺⁺ 粲偶素时得到的衰变宽度与实验结果以及其它理论模型得到的计算结果一致. 这对进一步理解 X(3872) 的特性提供有益的帮助.

关键词: X(3872); ³P₀ 衰变模型; 衰变

中图分类号: O572

文献标志码: A

自从 X(3872) 首次在实验^[1] 中被发现并得到确认^[2-4] 以来, 引起了人们持续的关注和兴趣, 但是对于它的确切解释仍然需要更多的实验事实. 对于 X(3872) 的本质, 理论分析认为 X(3872) 除了可能是传统的粲偶素之外, 还可能是奇异态如分子态^[5]、四夸克态^[6-7] 等. 研究表明 X(3872) 作为粲偶素的可能量子数 J^{PC} 为 1⁺⁺ 或 2⁻⁺^[8-9]. 最新的实验研究通过对 X(3872) 的总角动量、宇称等性质的分析指出其量子数可以确定为 1⁺⁺, 并排除了 2⁻⁺ 的安排^[10]. 利用³P₀ 模型对 X(3872) 衰变宽度的研究也给出了与此一致的结果^[11]. 对于 X(3872) 的 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变宽度, 通过 B 介子的 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变得到的结果为 3.0^{+1.0}_{-0.9} MeV^[12], Bell 实验组得到的结果是 3.9^{+2.8}_{-1.0} MeV^[13]. 为了进一步理解和解释 X(3872) 的特性, 本文利用最新的实验数据以及³P₀ 衰变模型对 X(3872) 的和 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变进行分析和计算, 研究结果将为进一步确定 X(3872) 的性质提供有益帮助.

1 X(3872)的 $\bar{D}^{*0}D^{*0}$ 二体衰变模型

³P₀ 模型也称为夸克对产生模型^[14-16], 在研究介子和重子的二体衰变中得到广泛应用. ³P₀ 模型的要点是基于真空中夸克对产生的二体衰变. 该模型假设在介子强衰变过程中, 从真空产生的夸克对与衰变的初始介子重新组合后形成 2 个新的末态介子. 在这种 A → BC 类型的二体衰变模式中, 定义转化算符

$$T = -3\gamma \sum_m \langle 1, m; 1, -m | 0, 0 \rangle \chi_{1-m}^{34} \omega_0^{34} \varphi_0^{34} \int d\vec{p}_3 d\vec{p}_4 \delta(\vec{p}_3 + \vec{p}_4) Y_l^m \left(\frac{\vec{p}_3 - \vec{p}_4}{2} \right) b_l^{\dagger}(\vec{p}_3) d_l^{\dagger}(\vec{p}_4), \quad (1)$$

其中, γ 是表示夸克对从真空中产生几率的参数.

介子的波函数采用莫克介子态^[17]

$$\begin{aligned} |A(n_A^{2S_A+1} L_A J_A M_{J_A}) (\vec{P}_A)\rangle &= \sqrt{2E_A} \sum_{M_{L_A} M_{S_A}} \langle L_A M_{L_A} S_A M_{S_A} | J_A M_{J_A} \rangle \times \\ &\int d^3 \vec{p}_A \Psi_{n_A L_A M_{L_A}}(\vec{P}_A) \chi_{S_A M_{S_A}}^{34} \varphi_A^{12} \omega_0^{12} \times |q_1 \left(\frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{P}_A + \vec{p}_A \right) q_2 \left(\frac{m_2}{m_1 + m_2} \vec{P}_A - \vec{p}_A \right)\rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\vec{P}_A = \vec{p}_1 + \vec{p}_2$ 是总动量, $\vec{p}_A = (m_2 \vec{p}_1 - m_1 \vec{p}_2) / (m_1 + m_2)$ 是相对动量.

在介子 A 的质心系中, A → BC 衰变过程的螺旋振幅

$$\begin{aligned} M_{J_A M_{J_B} M_{J_C}}^{M_{L_A} M_{L_B} M_{L_C}}(\vec{P})_{\omega} &= \gamma \sqrt{8E_A E_B E_C} \sum_{M_{L_A} M_{S_A}, M_{L_B} M_{S_B}, M_{L_C} M_{S_C}, m} \langle L_A M_{L_A} S_A M_{S_A} | J_A M_{J_A} \rangle \times \\ &\langle L_B M_{L_B} S_B M_{S_B} | J_B M_{J_B} \rangle \langle L_C M_{L_C} S_C M_{S_C} | J_C M_{J_C} \rangle \langle 1m1 - m | 00 \rangle \times \langle \chi_{S_B M_{S_B}}^{14} \chi_{S_C M_{S_C}}^{32} | \chi_{S_A M_{S_A}}^{12} \chi^{34} \rangle \times \end{aligned}$$

收稿日期: 2015-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11147197)

作者简介(通信作者): 董新平(1970-), 男, 河南许昌人, 许昌学院讲师, 研究方向为高能物理, E-mail: dongxp@xcu.edu.cn.

$$[\langle \phi_B^{14} \phi_C^{32} | \phi_A^{12} \phi_0^{34} \rangle I(\vec{P}, m_1, m_2, m_3) + (-1)^{l+s_A+s_B+s_C} \langle \phi_B^{32} \phi_C^{14} | \phi_A^{12} \phi_0^{34} \rangle I(-\vec{P}, m_1, m_2, m_3)], \quad (3)$$

空间部分的积分为

$$I(\vec{P}, m_1, m_2, m_3) = \int d^3 p \psi_{B L_B M_{L_B}}^* \left(\frac{m_3}{m_1+m_2} \vec{p}_B + \vec{p} \right) \psi_{C L_C M_{L_C}}^* \left(\frac{m_3}{m_2+m_3} \vec{p}_B + \vec{p} \right) \times \psi_{A L_A M_{L_A}}(\vec{p}_B + \vec{p}) Y_l^m(\vec{p}). \quad (4)$$

该螺旋度算符可以转换为分波振幅

$$M^{LS} = \sum_{M_{J_B} M_{J_C} M_{S_M L}} \langle L M_L S M_S | J_A M_{J_A} \rangle \langle L_B M_{J_B} J_C M_{J_C} | S M_S \rangle \times \int d\Omega Y_{L M_L} M_{J_A}^{M_{J_A}} M_{J_B}^{M_{J_B}} M_{J_C}(\vec{P}). \quad (5)$$

在相对论相空间中, 二体衰变宽度 $\Gamma(A \rightarrow BC) = \frac{\pi P}{4M_A^2} \sum_{LS} |M^{LS}|^2$, 式中 $p = |\vec{p}| = \sqrt{[M_A^2 - (M_B + M_C)^2][M_A^2 - (M_B - M_C)^2]} / (2M_A)$.

计算中所用的动量空间中的谐振子波函数(SHO) $\psi_{nl}^{\text{SHO}}(\vec{p}) = R_{nl}^{\text{SHO}}(p) Y_{lm}(\Omega_p)$, 其中径向波函数为 $R_{nl}^{\text{SHO}} = (-1)^n (-i)^l \beta^{-\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{2n!}{\Gamma(n+L+\frac{3}{2})}} \left(\frac{p}{\beta}\right)^L e^{-\frac{p^2}{2\beta^2}} L_n^{L+\frac{1}{2}}\left(\frac{p^2}{\beta^2}\right)$, 式中 β 谐振子波函数 SHO 的计算参数, $L_n^{L+\frac{1}{2}}(p^2/\beta^2)$ 是连带拉盖尔多项式.

利用以上模型以及拟合的 3P_0 计算参数可以得到介子二体衰变宽度的数值结果.

2 数值计算和讨论

为了利用 3P_0 模型对 $X(3872)$ 的衰变宽度进行数值计算, 需要利用已知的二体衰变宽度的实验数据对模型的计算参数进行拟合. 文献[18]利用包括重介子偶素 $\Psi(3770)$ 和 $\Upsilon(4S)$ 在内的 34 个二体衰变的实验数据对 3P_0 模型的耦合强度 γ 进行了拟合. 拟合得到的结果为 $\gamma=8.9$. 为了进一步检验这个拟合结果对粲介子偶素是否适用, 对 PDG 中的部分粲介子偶素的二体 DD 衰变宽度以及衰变分支比进行计算. 计算结果以及相应的实验观测结果如表 1 所示. 根据计算结果, 取 $\gamma=8.9, \beta=0.55 \text{ GeV}$ 时可以利用 3P_0 模型合理再现列出粲介子偶素的强衰变实验数据. 因此本文采用此拟合结果对 $X(3872)$ 的衰变宽度进行数值计算.

表 1 cc 介子的 $\bar{D}^{*0} D^0$ 衰变宽度

衰变模式	衰变宽度计算值	衰变宽度实验值 ^[19]	衰变分支比	
	/MeV	/MeV	计算值	实验值 ^[19]
$\Gamma_1: \Psi(3770) \rightarrow D^+ D^-$	25.4	27.5 ± 0.9	—	$\Gamma_1 = 9.8 \sim 12.8$
$\Gamma_2: \Psi(3770) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$	31.6	—	—	$\Gamma_2 = 12.5 \sim 16.2$
$\Gamma_3: \chi_{c2}(2P) \rightarrow D^+ D^-$	21.2	24 ± 6	$\Gamma_3/\Gamma_4 = 0.94$	$\Gamma_3/\Gamma_4 = 0.74 \pm 0.43 \pm 0.16$
$\Gamma_4: \chi_{c2}(2P) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$	22.6	—	—	—
$\Gamma_5: \Psi(4160) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$	6.1	70 ± 10	$-\Gamma_5/\Gamma_6 = 0.08$	$\Gamma_5/\Gamma_6 = 0.02 \pm 0.03 \pm 0.02$
$\Gamma_6: \Psi(4160) \rightarrow D^* \bar{D}^*$	75.1	—	—	—
$\Gamma_7: \Psi(4415) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$	0.17	-62 ± 20	$\Gamma_7/\Gamma_8 = 0.63$	$\Gamma_7/\Gamma_8 = 0.14 \pm 0.12 \pm 0.03$
$\Gamma_8: \Psi(4415) \rightarrow D^* \bar{D}^*$	0.27	—	—	—

进行数值计算时, $X(3872), D^0$ 和 D^{*0} 的质量分别取 $3871.69 \text{ MeV}, 2007.1 \text{ MeV}$ 和 1864.5 MeV . 假定 $X(3872)$ 是 2^{-+} 或 1^{++} 介子态, 利用方程(1)~(5)分别对这 2 种不同的量子数安排下 $X(3872)$ 的衰变宽度进行数值计算. 计算结果表明, 如果假设 $X(3872)$ 的量子数为 2^{-+} , 则 $\bar{D}^{*0} D^0$ 理论衰变宽度为 0.1 MeV ; 如果假设 $X(3872)$ 的量子数为 1^{++} , 则计算值 6.3 MeV . 由此可以看到, 与实验观测到的 $X(3872)$ 的 $\bar{D}^{*0} D^0$ 衰变宽度结果 $3.0 \text{ MeV}^{[12]}$ 和 $3.9 \text{ MeV}^{[13]}$ 相比, 将 $X(3872)$ 量子数安排为 1^{++} 可以得到与实验观测数据一致的结果. 如果将其量子数安排为 2^{-+} , 则得到的结果与实验数据相差较大. 因此根据计算结果, 将 $X(3872)$ 的量子数安排为 1^{++} 比安排为 2^{-+} 更为合理.

同时注意到 $X(3872)$ 的质量非常接近 $\bar{D}^{*0} D^0$ 的质量阈值. 在利用 3P_0 模型计算其 $\bar{D}^{*0} D^0$ 衰变宽度时, 其质量的取值对计算结果有较大影响. 根据 PDG 中给出的 $X(3872)$ 质量的观测值 $3871.69 \pm 0.17 \text{ MeV}$ 对 $X(3872)$ 的 $\bar{D}^{*0} D^0$ 衰变宽度与质量的关系进行分析, 计算结果如表 2 所示. 对数值计算结果的分析表明, 当 $X(3872)$ 的质量小于 3871.61 MeV 时所得到的衰变宽度为复数, 因此 $X(3872)$ 的质量不应小于 3871.61 MeV . 当 $X(3872)$ 的质量逐渐增加时, 衰变宽度随之增加. 因此从以上计算结果以及相应的量子数安排可以看出, 当 $X(3872)$ 的质量取 PDG^[19] 的平均值时将其安排为 $\chi_{c1}(2P)$ 粲偶素.

表 2 $X(3872)\bar{D}^{*0} D^0$ 衰变宽度与其质量的关系

M_X/MeV	3871.61	3871.62	3871.63	3871.64	3871.69	3871.85
Γ/MeV	2.1	3.0	3.6	4.2	6.3	10.5

3 结 论

利用 3P_0 模型对 $X(3872)$ 的 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变宽度进行了计算. 根据数值计算结果, 将 $X(3872)$ 的量子数安排为 1^{++} 时, 其 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变宽度为6.3 MeV, 与实验结果一致. 同时根据衰变宽度计算结果, $X(3872)$ 的质量与其 $\bar{D}^{*0}D^0$ 衰变宽度有密切关系. 计算结果为解释 $X(3872)$ 的衰变特性以及进一步确认其合理的介子态安排有提供有益的帮助.

参 考 文 献

- [1] Choi S K, Olsen S, Abe K, et al. Observation of a Narrow Charmonium-like State in Exclusive $BB+\pi^-J/\psi$ decays[J]. Phys Rev Lett, 2003,91:262001.
- [2] Acosta D, Affolder T, Ahn M H, et al. Observation of the Narrow State $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-in p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV[J]. Phys Rev Lett, 2004,93:072001.
- [3] Abazov V M, Abbott B, Abolins M, et al. Observation and Properties of the $X(3872)$ decaying to $J/\psi\pi^+\pi^-in p\bar{p}$ Collisions at $\sqrt{s}=1.96$ TeV[J]. Phys Rev Lett, 2004,93:162002.
- [4] Aubert B, Barate, R, Boutigny D, et al. Study of the B decay and measurement of the B branching fraction[J]. Phys Rev D, 2005,71:071103.
- [5] Tornqvist N A. Isospin breaking of the narrow charmonium state of Belle at 3872 MeV as a deuson[J]. Phys Lett B, 2004,590:209.
- [6] Maiani L, Piccinini F, Polosa A D, et al. Diquark-antidiquark states with hidden or open charm and the nature of $X(3872)$ [J]. Phys Rev D, 2005,71:014028.
- [7] Wang Zhi-Gang, Huang Tao. Analysis of the $X(3872)$, $Z_c(3900)$ and $Z_c(3885)$ as axial-vector tetraquark states with QCD sumrules [J]. Phys Rev D, 2014,89:054019.
- [8] Abulencia A, Acosta D, Adelman J, et al. Measurement of the Dipion Mass Spectrum in $X(3872) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-$ Decays[J]. Phys Rev Lett, 2006,96:102002.
- [9] Chung S U. General formulation of covariant helicity-coupling amplitudes[J]. Phys Rev D, 1998,57:431.
- [10] Aaij R, Abellan B C, Adeva B, et al. Determination of the $X(3872)$ Meson Quantum Numbers[J]. Phys Rev Lett, 2013,110:222001.
- [11] Ferretti J, Galatà G, Santopinto E. Quark structure of the $X(3872)$ and $\chi_b(3P)$ resonances[J]. Phys Rev D, 2014,90:054010.
- [12] Aubert B, Bona M, Boutigny D, et al. Study of resonances in exclusive B decays to $\bar{D}^{*0}D^{*0}K$ [J]. Phys Rev D, 2008,77:011102(R).
- [13] Aushev T, Zwahlen N, Adachi I, et al. Study of the $B \rightarrow X(3872)(\rightarrow \bar{D}^{*0}D^{*0})K$ decays[J]. Phys Rev D, 2010,81:034003(R).
- [14] Micu L. Decay rates of meson resonances in a quark model[J]. Nucl Phys B, 1969,10:521.
- [15] Roberts W, Silverstr-Brac B. General Method of Calculation of Any Hadronic Decay in the 3P_0 Model[J]. Few-Body Syst, 1992,11:171.
- [16] Blundell H G. Meson Properties in the Quark Model: A Look at Some Outstanding Problems[D]. Ottawa, Carleton University, 1996.
- [17] Hayne C, Isgur N. Beyond the wave function at the origin: Some momentum-dependent effects in the nonrelativistic quark model[J]. Phys Rev D, 1982,25:1944.
- [18] Lü Qi-Fang, Li De-Min. Understanding the charmed states recently observed by the LHCb and BABAR Collaborations in the quark model[J]. Phys Rev D, 2014,90:054024.
- [19] Olive K A, Agashe K, Amsler C, et al. The Review of Particle Physics[J]. Chin Phys C, 2014,38:090001.

$\bar{D}^{*0}D^0$ Decay of $X(3872)$

DONG Xinpings¹, JI Pengfei², WEI Kewei³

- (1. School of Electrical and Information Engineering, Xuchang University, Xuchang 461000, China;
2. School of Electrical and Information Engineering, Pingdingshan University, Pingdingshan 4671000, China;
3. College of Physics and Electrical Engineering, Anyang Normal University, Anyang 455000, China)

Abstract: The $\bar{D}^{*0}D^0$ decay of $X(3872)$ are investigated in the 3P_0 decay model. We find that the predicted decay widths of the $X(3872)$ can agree with the experimental data and other theoretical approaches, when $X(3872)$ is assigned as a 1^{++} charmonium. The calculation will be helpful for the further understanding of $X(3872)$.

Keywords: $X(3872)$; 3P_0 decay model; decay