

文章编号:1008-1542(2011)05-0409-04

在 CQM 模型下研究 $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_{sJ}(1968, 2112) + \pi^0$ 的强衰变

赵树民, 黄德宝, 张印杰, 张建军, 张逸宁

(河北大学物理科学与技术学院, 河北保定 071002)

摘要: 伴随着新的 D 介子不断被发现, 奇异介子的族谱也变得丰富起来, 利用组份夸克模型研究了强衰变过程 $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_s(1968) + \pi^0$ 和 $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_s^*(2112) + \pi^0$ 。讨论了 $D_{s1}^*(2710)$ 这个存在争议的粒子, 计算结果支持它由 c 和 \bar{s} 组成, 属于 H 类型的双重态 $(0^-, 1^-)$, 自旋-宇称为 $J^P = 1^-, j^s = 1/2$ 。这对粲介子族谱的研究有重要意义。

关键词: 强衰变; CQM 模型; 双重态

中图分类号: O572.33 文献标志码: A

Study on strong decays of $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_{sJ}(1968, 2112) + \pi^0$ in CQM Model

ZHAO Shu-min, HUANG De-bao, ZHANG Yin-jie, ZHANG Jian-jun, ZHANG Yi-ning

(Department of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding Hebei 071002, China)

Abstract: With the observation of new D mesons, the spectrum of the charmed-strange state becomes abundant. We investigated the strong decays of $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_s(1968) + \pi^0$ and $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_s^*(2112) + \pi^0$ in the CQM model, and discussed the newly discovered meson $D_{s1}^*(2710)$. Our numerical results suggest that the newly discovered meson belongs to H doublet $(0^-, 1^-)$ and is made up of c and \bar{s} , whose spin parity is $J^P = 1^-$ and $j^s = 1/2$. It is very useful to the research of the charm spectroscopy.

Key words: strong decay; CQM model; doublet

随着实验进展和理论研究的深入, 物理学家对奇异粒子产生极大兴趣, 纷纷对其进行了深入研究, 进一步促进了 D 物理的发展。2007 年 BaBar 实验组 (BaBar Collaboration) 通过分析 $e^+e^- \rightarrow D^*K$ 过程, 发现了一个新的介子 $D_{s1}(2710)$, 并且给出了其质量和衰变总宽度: $m(2710) = 2710 \pm 2_{-12}^{+7}$ MeV, $\Gamma(2710) = 149 \pm 7_{-39}^{+52}$ MeV^[1]。Belle 实验组 (Belle Collaboration) 证实了存在 $D_{s1}(2710)$ 这种粒子, 同时给出了该种粒子的质量和总衰变宽度: $m(2710) = 2708 \pm 9_{-11}^{+10}$ MeV, $\Gamma(2710) = 108 \pm 23_{-36}^{+31}$ MeV^[2]。BaBar 实验组 (BaBar Collaboration)^[3] 认为 $D_{s1}(2710)$ 的自旋-宇称为 $J^P = 1^-$, 仅在质量上和实验很吻合。有研究人员则认为 $D_{s1}(2710)$ 可能是 $D_s(2^3S_1)$ 和 $D_s(1^3D_1)$ 的一个混合态^[4-5]。由于这是新发现的粒子, 其各方面的性质有待实验的进一步探测和验证, 笔者认为 $D_{s1}(2710)$ 由 $c\bar{s}$ ^[6] 构成, 其自旋-宇称为 $J^P = 1^-$, 在此基础上, 研究了它的 2 个强衰变过程。希望所得结果在以后的实验上可以探测到, 进而加深对这种粒子的认知。

收稿日期: 2011-05-03; 修回日期: 2011-09-01; 责任编辑: 王士忠

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11047002); 河北省自然科学基金资助项目(A2011201118)

作者简介: 赵树民(1978-), 男, 河北乐亭人, 副教授, 博士, 主要从事粒子物理方面的研究。

1 夸克介子模型(CQM)简介

CQM 模型在 EBERT^[7] 等的基础上由 POLOSA^[8] 给予了进一步的丰富和发展, CQM 模型以有效拉氏量为基础描述了夸克和介子之间的相互作用, 该模型结合了 HQET 和轻夸克的手征对称性。拉氏量可以表示为^[9]

$$L_{\text{CQM}} = \bar{\chi}[\gamma \cdot i\partial + \nu]\chi + \bar{\chi}\gamma \cdot A\gamma_5 - m_q \bar{\chi}\chi + \frac{f_\pi^2}{8} \text{Tr}[\partial^\mu \Sigma \partial_\mu \Sigma^+] + \bar{h}_\nu(i\nu \cdot \partial)h_\nu - \quad (1)$$

$$[\bar{\chi}(\bar{H} + \bar{S} + i\bar{T}^\mu \frac{\partial_\mu}{\Lambda_\chi})h_\nu + h.c.] + \frac{1}{2G_3} \text{Tr}[(\bar{H} + \bar{S})(H - S)] + \frac{1}{2G_4} \text{Tr}[\bar{T}^\mu T_\mu]。$$

这里的 H, S 和 T 表示双重态 $(0^-, 1^-), (0^+, 1^+)$ 和 $(1^+, 2^+)$, 它们的表达式为

$$H = \frac{1+\nu}{2} \sqrt{[P_\mu^* \gamma^\mu - P\gamma_5]}, S = \frac{1+\nu}{2} \sqrt{[P_{1\mu}^* \gamma^\mu \gamma_5 - P_0]}, \quad (2)$$

$$T^\mu = \frac{1+\nu}{2} \{ P_2^{*\nu} \gamma_\nu - \sqrt{\frac{3}{2}} P_{1\nu}^* \gamma_5 [g^{\mu\nu} - \frac{1}{3} \gamma^\mu (\gamma^\mu - \nu^\mu)] \}。 \quad (3)$$

其中 $P, P_\mu^*, P_0, P_{1\mu}^*$ 分别表示这些介子的消失算符。

2 理论推导

D_{s1}^* (2710), D_s (1968) 和 D_s^* (2112) 与轻夸克和重夸克的耦合可以表示为^[9]

$$\frac{1+\nu}{2} \sqrt{M_1 Z_H} \not{\epsilon}_1, \quad \frac{1+\nu}{2} \sqrt{M_2 Z_H} \gamma_5, \quad \frac{1+\nu}{2} \sqrt{M_3 Z_H} \not{\epsilon}_2。 \quad (4)$$

其中: ϵ_1, ϵ_2 表示 D_{s1}^* (2710) 和 D_s^* (2112) 的极化矢量, M_1, M_2 和 M_3 分别表示 D_{s1}^* (2710), D_s (1968) 和 D_s^* (2112) 的质量。重整化常数 Z_H 在文献[10]中给出, 其具体表达式为

$$Z_H^{-1} = (\Delta_H + m_s) \frac{\partial I_3(\Delta_H)}{\partial \Delta_H} + I_3(\Delta_H)。 \quad (5)$$

图 1 为 D_{s1}^* (2710) $\rightarrow D_s$ (1968) + π^0 和 D_{s1}^* (2710) $\rightarrow D_s^*$ (2112) + π^0 强衰变过程的夸克图, 细线表示轻夸克, 粗线表示重夸克。根据手征对称性轻夸克仅仅和 η 耦合。

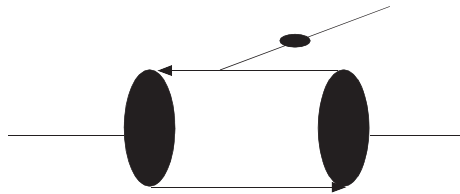


图 1 D_{s1}^* (2710) $\rightarrow D_{sj}$ (1968, 2112) + π^0 衰变的夸克图

Fig. 1 Diagram of decays D_{s1}^* (2710) $\rightarrow D_{sj}$ (1968, 2112) + π^0

D_{s1}^* (2710) $\rightarrow D_s$ (1968) + π^0 和 D_{s1}^* (2710) $\rightarrow D_s^*$ (2112) + π^0 的强衰变矩阵元可以表示为

$$M_A [D_{s1}^* (2710) \rightarrow D_s (1968) + \pi^0] = \langle \pi^0 | L_{\text{mixing}} | \eta \rangle \frac{i}{m_\eta^2 - m_\pi^2} \langle \eta | D_s (1968) | L_{\text{CQM}} | D_{s1}^* (2710) \rangle, \quad (6)$$

$$M_B [D_{s1}^* (2710) \rightarrow D_s^* (2112) + \pi^0] = \langle \pi^0 | L_{\text{mixing}} | \eta \rangle \frac{i}{m_\eta^2 - m_\pi^2} \langle \eta | D_s^* (2112) | L_{\text{CQM}} | D_{s1}^* (2710) \rangle。 \quad (7)$$

式中: L_{mixing} 为描述 $\eta - \pi^0$ 混合机制的拉氏量, $L_{\text{mixing}} = \frac{m_\pi^2}{2\sqrt{3}} \frac{\tilde{m}_\mu - \tilde{m}_d}{\tilde{m}_\mu + \tilde{m}_d} \pi^0 \eta$, 其中 $\tilde{m}_i (i = \mu, d, s)$ 表示流夸克的质量^[11]。

L_{mixing} 来自赝标八重态的低能有效拉氏量中的质量项^[11]: $L_{\text{mass}} = \frac{m_\pi^2 f_\pi^2}{4(\tilde{m}_\mu + \tilde{m}_d)} \text{Tr}[\xi m_q \xi + \xi^\dagger m_q \xi^\dagger]$,

其中 m_q 是轻夸克中的组份夸克质量^[8] 矩阵元。

在 CQM 模型下式(6)和式(7)中的强衰变矩阵元表示为

$$\langle \eta D_s(1968) | L_{CQM} | D_{s1}^*(2710) \rangle = (-1) \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{Z_H M_2 Z_H M_1} i^6 \frac{N_c}{2f_\pi} \int \frac{d^4 l}{(2\pi)^4} \times \frac{\text{Tr}[(\not{l} + m_s) \not{q}' \gamma_5 (\not{l} + \not{q}' + m_s) \gamma_5 \frac{1 - \not{y}}{2} \not{\epsilon}'_1]}{(l^2 - m_s^2)^2 (\nu \cdot l + \Delta_H)}, \quad (8)$$

$$\langle \eta D_s^*(2112) | L_{CQM} | D_{s1}^*(2710) \rangle = (-1) \sqrt{\frac{3}{2}} \sqrt{Z_H M_3 Z_H M_1} i^6 \frac{N_c}{2f_\pi} \int \frac{d^4 l}{(2\pi)^4} \times \frac{\text{Tr}[(\not{l} + m_s) \not{q}' \gamma_5 (\not{l} + \not{q}' + m_s) \not{\epsilon}'_2 \frac{1 + \not{y}}{2} \not{\epsilon}'_1]}{(l^2 - m_s^2)^2 (\nu \cdot l + \Delta_H)}. \quad (9)$$

经过一系列的简化,得到费曼振幅的平方为

$$|\langle \eta D_s(1968) | L_{CQM} | D_{s1}^*(2710) \rangle|^2 = \frac{8M_1 M_2 Z_H^2}{3f_\pi^2} (m_s(m_s - 2\Omega_2) + \Omega_3 + 2\Omega_4)^2 (M_1 - \omega M_2)^2, \quad (10)$$

$$|\langle \eta D_s^*(2112) | L_{CQM} | D_{s1}^*(2710) \rangle|^2 = \frac{8M_1 M_3 Z_H^2}{3f_\pi^2} \times (\Omega_1 m_s^2 - 2\Omega_2 m_s + \Omega_3 - 2\Omega_4)^2 [(1 + \omega^2)M_1^2 - 2(\omega^3 + \omega)M_1 M_3 + (\omega^2 - 1)M_3^2]. \quad (11)$$

式(10)、式(11)中的 $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$ 具体表达如下:

$$\Omega_1 = I_4(\Delta), \Omega_2 = -I_2 - \Delta I_4(\Delta), \Omega_3 = \frac{4}{3}(\Delta_H - m_s)I_2 + \frac{1}{3}I_3(\Delta) + \frac{1}{3}(\Delta_H^2 - m_s^2)I_4(\Delta), \Omega_4 = \frac{1}{3}(m_s - \Delta_H)I_2 - \frac{1}{3}I_3(\Delta) + \frac{1}{3}(m_s^2 - \Delta_H^2)I_4(\Delta). \quad (12)$$

其中:

$$I_2 = -\frac{iN_c}{16\pi^4} \int \frac{d^4 k}{(k^2 - m^2)} = \frac{iN_c}{16\pi^2} \Gamma(0, \frac{m^2}{\Lambda^2}, \frac{m^2}{\mu^2}), \quad (13)$$

$$I_3(\Delta) = -\frac{iN_c}{16\pi^4} \int \frac{d^4 k}{(k^2 - m^2)(\nu \cdot k + \Delta + i\epsilon)} = \frac{iN_c}{16\pi^{3/2}} \int_{\frac{1}{\Lambda^2}}^{\frac{1}{\mu^2}} \frac{ds}{s^{\frac{3}{2}}} e^{-s(m^2 - \Delta^2)} [1 + \text{erf}(\Delta\sqrt{s})], \quad (14)$$

$$I_4(\Delta) = \frac{iN_c}{16\pi^4} \int \frac{d^4 k}{(k^2 - m^2)(\nu \cdot k + \Delta + i\epsilon)} = \frac{iN_c}{16\pi^{3/2}} \int_{\frac{1}{\Lambda^2}}^{\frac{1}{\mu^2}} \frac{ds}{s^{\frac{3}{2}}} e^{-s(m^2 - \Delta^2)} [1 + \text{erf}(\Delta\sqrt{s})], \quad (15)$$

$$\Gamma(\alpha, x_0, x_1) = \int_{x_0}^{x_1} dt e^{-t} t^{\alpha-1}, \text{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z dx e^{-x^2}. \quad (16)$$

通过式(17)可以计算出这 2 个过程的强衰变宽度,进而计算得到其分支比(R):

$$\Gamma = \frac{1}{8\pi} |M_{A,B}|^2 \frac{|\mathbf{P}|}{M_1^2}. \quad (17)$$

3 数值计算

参数的具体取值为 $M_1 = 2.536 \text{ GeV}, M_2 = 1.968 \text{ GeV}, M_3 = 2.112 \text{ GeV}, m_s = 0.5 \text{ GeV}, \mu = 0.593 \text{ GeV}, |\mathbf{P}| = \frac{M_1^2 - M_2^2}{2M_1}, \Delta_H, Z_H$ 的值源自文献[10]。参数取值和数值结果见表 1。

表 1 参数取值和数值结果

Tab.1 Parameters and numerical results

Δ_H/GeV	Z_H/GeV	分支比(R_1)	分支比(R_2)
0.5	3.99	4.90×10^{-9}	1.91×10^{-8}
0.6	2.69	3.93×10^{-9}	1.76×10^{-8}
0.7	1.74	3.12×10^{-9}	1.61×10^{-8}

表 1 中的 R_1 和 R_2 分别表示 $D_{s1}^*(2710)$ 到 $D_s(1968)$ 和 $D_s^*(2112)$ 的分支比,随着模型中参数的调整,得到了相应的数值结果。从定性分析来看,参数在一定范围内变化,得到结果的数量级没有发生改变。

4 结 论

结合重夸克有效理论(HQET)和轻夸克的手征对称性,利用组份夸克介子模型(CQM)研究了 $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_s(1968) + \pi^0$ 和 $D_{s1}^*(2710) \rightarrow D_s^*(2112) + \pi^0$ 的强衰变过程。同时也考虑了 $\eta\pi^0$ 的混合机制^[11],认为 $D_{s1}^*(2710)$ 是由 $c\bar{s}$ 组成的介子^[12],其自旋-宇称为 $J^P = 1^-, S^P = \frac{1}{2}^-$,属于 $H(0^-, 1^-)$ 双重态。数值计算所得的衰变宽度很小,这是因为强衰变是一个同位旋破坏的过程。 f_π 表示破坏程度,在文献^[13]中给予了很好的讨论。 $D_{s1}^*(2710)$ 的强衰变直接放出一个 π^0 介子,这也是一个 OZI 禁戒的过程^[14]。在这种情况下,研究其电磁相互作用就变得尤为重要,通过计算它的辐射衰变可能有更大收获,在以后的工作中值得进一步研究。

参考文献:

- [1] AUBERT B, KARYOTAKIS Y, LEES A T, et al. Study of D_{S1} decays to $D^* K$ in inclusive e^+e^- interactions[J]. Phys Rev D, 2009, 80: 092003.
- [2] BRODZICKA J. Observation of a new D_{S1} meson in $B^+ \rightarrow \bar{D}_0 D_0 K^+$ decays [J]. Phys Rev Lett, 2008, 100: 092001.
- [3] AUBERT B. Observation of a new D_S meson decaying to DK at a mass of 2.86 GeV/c²[J]. Phys Rev Lett, 2006, 97: 22-25.
- [4] CLOSE F E, OMAS C E, KHINA O, et al. Canonical interpretation of the $D_{S1(2860)}$ and $D_{S1(2690)}$ [J]. Phys Lett B, 2007, 647: 159-163.
- [5] LI D M, MA B, LIU Y H. Understanding masses of $c\bar{s}$ states in regge phenomenology[J]. Eur Phys J C, 2007, 51: 359-365.
- [6] LI D M, MA B. Implication of BaBar's new data on the $D_{S1(2710)}$ and $D_{S1(2860)}$ [J]. Phys Rev D, 2010, 81: 14-21.
- [7] EBERT D, FELDMANN T, REINHARDT H. Extended Nijl model for light and heavy mesons with Q_q out thresholds[J]. Phys Lett B, 1996, 388: 154-160.
- [8] POLOSA A D. The CQM model[J]. Riv Nuovo Cim, 2000, 23(11): 1-75.
- [9] LUO Z G, CHEN X L, LIU X, et al. Semileptonic decays of $B_{S1}^0, B_{S2}^0, B_{S0}^0$ and B_{S1}^+ [J]. Eur Phys J C, 2009, 60: 403-411.
- [10] ZHAO S M, ZHANG Y J, YAN Y L, et al. Study of semileptonic decays $B_S \rightarrow D_{S2(2536)} l\nu$ and $B_S \rightarrow D_{S2(2573)} l\bar{\nu}$ in the CQM model[J]. Chin Phys C, 2008, 32: 603-607.
- [11] CHO P, WISE M B. Remarks on $D_S^* \rightarrow D_S \pi^0$ decay[J]. Phys Rev D, 1994, 49: 26-33.
- [12] 汤叔梗,马银峰,白占国. 量子色动力学(QCD)求和定则在密物质的结果[J]. 河北科技大学学报(Journal of Hebei University of Science and Technology), 2005, 26(2): 96-102.
- [13] WEINBERG S. The Quantum Theory of Fields[M]. New York: Cambridge University Press, 1996.
- [14] OKUBO S. Meson and unitary symmetry model[J]. Phys Lett, 1963, 5: 16-23.

向本期载文的审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 23 篇。这些论文的发表是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。对此,本编辑部特向这些专家表示敬意,对他们的辛勤劳动表示感谢。

本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排列):

陈增强 程久龙 丁 锋 蒋少松 李新福 李 媛 梁艳春
林伟国 刘勇弟 潘高田 仇计清 史兰香 汤叔梗 辛 峰
杨晓冬 杨秀萍 张付祥 张建华 张 宁 张锁江 张 越

(本刊编辑部)