

夸克蜕定域色屏蔽模型、双夸克模型和五夸克态 Θ^+

龚丽英, 黄虹霞, 平加伦

(南京师范大学物理科学与技术学院, 210097, 江苏, 南京)

[摘要] 将夸克蜕定域色屏蔽模型和双夸克模型结合起来, 研究了五夸克共振态 Θ^+ . 计算结果表明, 正、负宇称态都存在等效吸引, 但在能够描述重子谱和重子-重子相互作用的要求下, 得到的能量偏高, 并且负宇称态的能量低于正宇称态.

[关键词] 夸克蜕定域色屏蔽模型, 双夸克模型, 五夸克态 Θ^+

[中图分类号] O572.33, **[文献标识码]** A, **[文章编号]** 1001-4616(2005)03-0047-05

Quark-Delocalization, Color-Screening Model, Diquark Model and Pentaquark Θ^+

Gong Liying, Huang Hongxia, Ping Jialun

(School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, 210097, Nanjing, China)

Abstract: The QDCSM and diquarks model are used for the calculation of pentaquark resonance Θ^+ . The results show that there are effective attractions both in the positive and negative parity states. Under the requirement that the model can describe the baryon spectroscopy and baryon-baryon interactions, the energy of Θ^+ calculated is higher than the value of the measured one. The energy of negative parity state is lower than that of the positive one.

Key words: quark-delocalization color-screening model, diquark model, pentaquark Θ^+

0 引言

微扰 QCD 已被高能物理实验所证实, 而低能物理: 强子结构, 强子相互作用, 夸克-胶子系统 etc. 难于直接从 QCD 中计算出来, 还依赖于有效的理论模型来解决. 夸克模型在强子谱和强子相互作用上取得了相当的成功. 但 QCD 理论能够容纳更多的状态: 四夸克, 五夸克, 六夸克等多夸克系统, 还有夸克-胶子混杂系统. 如何构造有效的模型来研究多夸克系统仍是一个未解决的问题. 特别是近两年来对于五夸克系统, 实验上有了较大的进展. 迄今为止, 有 14 个实验组宣称发现了一个五夸克态 Θ^+ ^[1], 其能量为 1 540 MeV, 可衰变为核子和 K 介子, 衰变宽度小于 25 MeV, 其同位旋和自旋分别为 0 和 1/2, 夸克组成为 $uudd\bar{s}$, 另有一个实验声称找到了 Θ^+ 的同伴 Ξ^{*-} ^[2], 还有实验报道发现了 Θ^+ 存在的证据^[3]. 另外在四夸克态和六夸克态方面, 实验上也发现了一些迹象. 但也有一些实验没有观测到 Θ^+ . 理论上, 至今还没有一个模型在能描述重子性质和重子相互作用的同时说明实验现象.

本工作就是将夸克蜕定域色屏蔽模型和 Jaffe-Wilczek 的双夸克 (Diquark) 模型结合起来, 看是否能够得到五夸克共振态 Θ^+ . 夸克蜕定域色屏蔽模型 (QDCSM) 是 20 世纪 90 年代初由 Wang F 等人提出处理重子-重子相互作用和双重子系统的组份夸克模型, 它考虑了夸克间的相互作用与夸克所处的状态有关, 并将各种不同色结构的耦合效应应用色屏蔽来近似. 模型中一个重要的特点是允许多夸克系统通过自身的动力学效应来选择一个合理的结构^[4]. 它能用很少的参数较好地描述重子性质和重子-重子相互作用^[5], 应用于双重子系统, 得到了一些有意义的结果^[6,7]. 双夸克概念最早是由 Gell-Mann 提出来的, 虽然其形成机

收稿日期: 2005-02-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90103018).

作者简介: 龚丽英, 女, 1979—, 硕士研究生, 主要从事强子物理的学习与研究. E-mail: lygong2004@hotmail.com

万方数据

制和存在与否仍然不清楚,但在强子物理中已经得到了许多应用并取得了一定的成功.最近 Jaffe-Wilczek 将它应用于五夸克系统,将 Θ^+ 中的两个 u 夸克和两个 d 夸克组合成两个同位旋和自旋都为零、颜色为反对称的 ud 夸克对, Θ^+ 具有三角形结构.在此基础上,他们估算了 Θ^+ 的能量^[8].在估算时,仅考虑了色磁相互作用和一个组态.本文就是基于 QDCSM,考虑较为完整的哈密顿量和所有可能的组态,对三角形结构的五夸克态作定量计算.

1 计算方法

QDCSM 的细节可参考文献[6,9].这里给出系统的哈密顿量,波函数及必需的方程.三夸克体系的哈密顿量和通常的势模型一样,对于五夸克体系,它的哈密顿量为:

$$H_5 = \sum_{i=1}^5 (m_i + \frac{p_i^2}{2m_i}) - T_{CM} + \sum_{i < j=1}^5 (V_{ij}^C + V_{ij}^G),$$

其中

$$T_{CM} = \frac{1}{2M} (\sum_{i=1}^5 p_i)^2, M = \sum_{i=1}^5 m_i$$

$$V_{ij}^C = \begin{cases} -a_c \lambda_i \cdot \lambda_j r_{ij}^2, & \text{当 } i, j \text{ 在同一团内时} \\ -a_c \lambda_i \cdot \lambda_j \frac{1 - e^{-\mu r_{ij}}}{\mu}, & \text{当 } i, j \text{ 不在同一团内时} \end{cases}$$

$$V_{ij}^G = \alpha_s \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{4} \left[\frac{1}{r_{ij}} - \frac{\pi}{2} \delta(r_{ij}) \left(\frac{1}{m_i^2} + \frac{1}{m_j^2} + \frac{4\sigma_i \cdot \sigma_j}{3m_i m_j} \right) \right]$$

式中, m_i, p_i, r_{ij} 分别代表夸克的质量,动量和夸克之间的距离. T_{CM} 为质心动能, V_{ij}^C 是囚禁势, a_c 是囚禁势的强度, V_{ij}^G 是单胶子交换势, α_s 是强相互作用的耦合常数, λ 是盖尔曼矩阵, σ 是泡利矩阵.

三角形结构的五夸克系统如图 1 所示,其基函数可表示为:

$$\Psi_{sq}^{ij} = \mathcal{A} \{ [\psi_{2q}^i(12) \psi_{2q}^j(34)]_{w_c M_{I_4} M_{S_4}}^{[c_4] I_4 S_4} \psi_q(5) \}_{w_c M_I M_S}^{[222] 0 \frac{1}{2}},$$

$$\psi_{2q}^i = [\varphi_i(1) \varphi_i(2)]_{\chi_c^{[c_2]} w_{c_2} (12) \chi_\tau^{I_2 M_{I_2} (12) \chi_s^{S_2 M_{S_2} (12)},$$

$$\psi_{2q}^j = [\varphi_r(3) \varphi_r(4)]_{\chi_c^{[c'_2]} w_{c'_2} (34) \chi_\tau^{I_2 M_{I_2} (34) \chi_s^{S_2 M_{S_2} (34)},$$

$$\psi_q = \varphi_u(5) \chi_c^{[c] w_c (5) \chi_\tau^{I_1 M_{I_1} (5) \chi_s^{S_1 M_{S_1} (5)},$$

其中 \mathcal{A} 为反对称化算符: $\mathcal{A} = \frac{1}{\sqrt{6}} [1 - 4P_{13} + P_{13}P_{24}]$, 括号表示

Clebsh-Gordan(CG) 系数耦合. i, j 为二夸克团的对称性指标(见表

1). 根据 Θ^+ 的量子数,我们可以确定四夸克系统的量子数: $[c_4] = [211], I_4 = 0, S_4 = 0$ 或 1 , 进一步可以推出 2 个二夸克团的可能组合(见表 1).

表 1 二夸克团的对称性指标和四夸克系统的道的编号

i	1	2	3	4				
$[\nu_2][c_2] I_2 S_2$	$[2][2] 10$	$[2][2] 01$	$[2][11] 11$	$[2][11] 00$				
k	1	2	3	4	5	6	7	
$(ij) S_4$	$(\bar{13}) 1$	$(\bar{24}) 1$	$(33) 1$	$(\bar{1}\bar{3}) 1$	$(\bar{24}) 1$	$(33) 0$	$(44) 0$	

组合共有 7 种,其中第 7 种组合就是 Jaffe-Wilczek 所处理的组态.表中的 $(\bar{i}\bar{j})$ 和 $(\hat{i}\hat{j})$ 分别表示左右二夸克团的对称和反对称组合:

$$\Psi_{sq}^{\bar{i}\bar{j}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{sq}^{ij} + \Psi_{sq}^{ji}),$$

$$\Psi_{sq}^{\hat{i}\hat{j}} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_{sq}^{ij} - \Psi_{sq}^{ji}).$$

φ 为单粒子轨道波函数,在 QDCSM 中是蜕定域的:

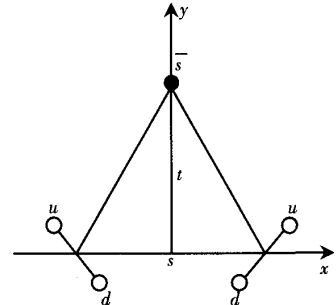


图 1 五夸克系统的三角形结构

$$\begin{aligned}\varphi_l &= \frac{\phi_L + \varepsilon_1 \phi_R + \varepsilon_2 \phi_U}{N_l(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}, N_l(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \sqrt{\langle \varphi_l | \varphi_l \rangle}, \\ \varphi_r &= \frac{\phi_R + \varepsilon_1 \phi_L + \varepsilon_2 \phi_U}{N_r(\varepsilon_1, \varepsilon_2)}, N_r(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = \sqrt{\langle \varphi_r | \varphi_r \rangle}, \\ \varphi_u &= \frac{\phi_U + \varepsilon_3 \phi_L + \varepsilon_3 \phi_R}{N_u(\varepsilon_3)}, N_u(\varepsilon_3) = \sqrt{\langle \varphi_u | \varphi_u \rangle},\end{aligned}$$

其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 为蜕定域参数, 它们的大小由系统的动力学性质通过变分方法确定. ϕ 为高斯波函数(定域单粒子波函数):

$$\begin{aligned}\phi_L(r) &= \left(\frac{1}{\pi b^2}\right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{1}{2b^2}(r+\frac{s}{2})^2}, \\ \phi_R(r) &= \left(\frac{1}{\pi b^2}\right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{1}{2b^2}(r-\frac{s}{2})^2}, \\ \phi_U(r) &= \left(\frac{1}{\pi b^2}\right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{1}{2b^2}(r-t)^2},\end{aligned}$$

其中, s 为两个二夸克团之间的距离, t 为反夸克 \bar{s} 到两个二夸克团连线中点的距离.

我们采用绝热近似来计算五夸克系统的能量. 在单道情况下, 对每一 s 和 t , 五夸克系统的能量可以定义为:

$$E_5 = \langle \Psi_{5q}^k | H | \Psi_{5q}^k \rangle / \langle \Psi_{5q}^k | \Psi_{5q}^k \rangle,$$

其中蜕定域参数通过变分条件

$$\frac{\partial E_5}{\partial \varepsilon_i} = 0, i = 1, 2, 3$$

确定. 在多道耦合情况下, 需要解哈密顿量在 $\{\Psi_{5q}^k, i = 1, \dots, 7\}$ 上的本征方程, 得到五夸克体系的能量和相应的波函数.

2 结果与讨论

表 2 为利用单重子谱和氦核的质量定出的模型参数, 这组参数能较好地描述重子谱, 重子-重子相互作用和氦核的性质.

表 2 模型参数

$m_u/(\text{MeV})$	$m_d/(\text{MeV})$	$m_s/(\text{MeV})$	$a_c/(10^{30} \text{MeV}/\text{m}^2)$	α_s	$b/(10^{-15} \text{m})$	$\mu/(10^{30} \text{m}^{-2})$
313	313	560	25.13	1.54	0.603	1.0

基于以上模型及参数, 我们计算了 $\mu = 0, \varepsilon = 0; \mu = 1, \varepsilon = 0; \mu = 0, \varepsilon \neq 0$ 及 $\mu = 1, \varepsilon \neq 0$ 四种情况时五夸克体系的能量. 利用 4 个非奇异夸克的轨道对称性, 再加上第 5 个夸克 \bar{s} 的负宇称性, 我们可以推出第 1、2、3 道的宇称为负, 第 4、5、6、7 道的宇称为正, 由于宇称为好量子数, 所以以下我们将正负宇称态分开讨论.

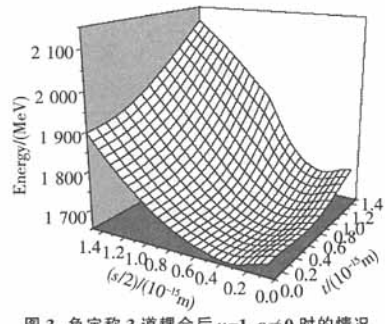
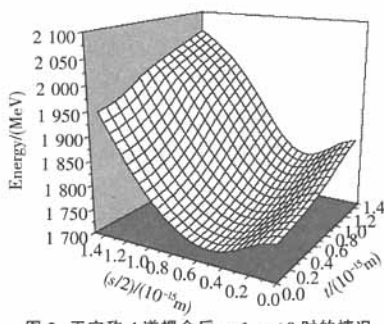
表 3 给出了每个单道以及 2 组正负宇称道耦合后的最低能量. 其中 7 道耦合后的能量与 3 道耦合是一致的, 所以在表中略去. 从表中可以看到, 当 $\mu = 1, \varepsilon \neq 0$ 时, 负宇称态的第 2 道的能量最低: 1 651.80 MeV, 并且道耦合后的最低能量(1 651.48 MeV) 与其相差不大, 说明道耦合影响不大. 从 ε 取值来看, 三角形底部两团保持分开, 顶部 \bar{s} 夸克与底部 ud 夸克团有融合(组成 $ud\bar{s}$) 的趋势. 对于正宇称态, 第 7 道的能量最低(这一道正对应于 Jaffe-Wilczek 所处理的组态): 1 780.46 MeV, 道耦合后的最低能量为 1 711.99 MeV, 与单道结果相比, 有了较大变化, 说明此时道耦合是重要的. 同时 ε 取值告诉我们, 三角形底部两团仍然保持分开, 顶部 \bar{s} 夸克与底部 ud 夸克团融合的趋势不是很强. 这样的结果表明, 五夸克态 Θ^+ 倾向于取总的宇称为负的结果. 这与 Jaffe-Wilczek 的估算结果有所不同. 他们认为 Θ^+ 大约在 1 540 MeV 左右, 为正宇称态.

表 3 4 种情况下单道和道耦合后的最低能量

	宇称	道指标	$s/(10^{-15}\text{m})$	$t/(10^{-15}\text{m})$	ε_1	ε_2	ε_3	$E_{\min}/(\text{MeV})$
$\mu = 1, \varepsilon \neq 0$	负	1	0.8	0.7	0.99	0.99	0.99	1 666.78
		2	0.7	0.6	0.0	0.4	0.99	1 651.80
		3	0.8	0.7	0.99	0.99	0.99	1 666.78
	正	3 道耦合	0.7	0.7	0.0	0.4	0.99	1 651.48
		4	1.2	0.9	0.7	0.99	0.99	2 066.46
		5	1.1	0.1	0.0	0.5	0.4	1 833.20
		6	1.4	0.7	0.6	0.99	0.8	1 970.27
		7	1.4	0.1	0.0	0.4	0.4	1 780.46
$\mu = 0, \varepsilon \neq 0$	负	1	0.2	0.1	0.9	0.9	0.8	1 851.99
		2	0.4	0.1	0.0	0.1	0.99	1 847.54
		3	0.2	0.1	0.9	0.99	0.8	1 851.98
	正	3 道耦合	0.2	0.1	0.9	0.9	0.6	1 834.91
		4	0.6	0.6	0.9	0.99	0.99	2 386.24
		5	0.4	0.1	0.0	0.0	0.99	2 085.28
		6	1.0	0.1	0.7	0.99	0.3	2 218.11
		7	0.8	0.1	0.0	0.0	0.8	1 994.30
$\mu = 1, \varepsilon = 0$	负	1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 713.05
		2	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	1 664.00
		3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 748.19
	正	3 道耦合	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	1 660.87
		4	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	2 174.35
		5	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	1 847.98
		6	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	2 106.80
		7	1.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 821.21
$\mu = 0, \varepsilon = 0$	负	1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 857.60
		2	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	1 850.16
		3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 856.65
	正	3 道耦合	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	1 848.10
		4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	2 406.22
		5	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	2 089.98
		6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	2 246.13
		7	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	1 998.56
$\mu = 1, \varepsilon = 0$	负	1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 857.60
		2	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	1 850.16
		3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 856.65
	正	3 道耦合	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	1 848.10
		4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	2 406.22
		5	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	2 089.98
		6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	2 246.13
		7	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	1 998.56
$\mu = 0, \varepsilon = 0$	负	1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 857.60
		2	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	1 850.16
		3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	1 856.65
	正	3 道耦合	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	1 848.10
		4	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	2 406.22
		5	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	2 089.98
		6	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	2 246.13
		7	0.8	0.1	0.0	0.0	0.0	1 998.56

由表 3 可看出 4 种情况存在一定的差异:引入 $\mu = 1$ 后并容许夸克蜕定域,可将能量压低 200—700 MeV.

图 2 和图 3 分别给出了道耦合后的正、负宇称最低能态的能量随距离 s, t 的变化情况. 很清楚系统存在等效吸引,这是形成共振态的必要条件.



为了比较,图 4 给出了 $\mu = 0, \varepsilon = 0$ 的结果(负宇称态),此时能量是单调变化,有形成五夸克团的趋

势,其能量远高于我们模型的计算机结果.

3 总结

对五夸克体系,我们采用夸克蜕定域色屏蔽模型计算了 Jaffe-Wilczek 利用双夸克模型提出的具有三角形结构的 Θ^+ . 我们发现能量最低态的 Θ^+ 宇称为负,与 Jaffe-Wilczek 的结果不同. 虽然我们的结果(通过引入夸克蜕定域和色屏蔽)和传统夸克模型相比,能量得到了较大的压低,但我们得到的能量值仍然偏高. 计算还表明对于能量最低态道耦合效应不大. 在 KN 计算中,我们得到了类似的结论^[10]. 夸克蜕定域和色屏蔽效应能否代替多道耦合这是一个十分值得研究的问题. 我们的计算还表明五夸克体系有形成 $ud-ud\bar{s}$ 两团的趋势,与文献[11]的结构类似. 五夸克系统存在与否,具有什么样的结构,需要实验与理论的进一步发展. 我们可以通过调节参数 μ 、改善空间结构使夸克有更大的自由度(如采用正四面体或其它模型)、采用动力学计算等方法得到更好的结果.

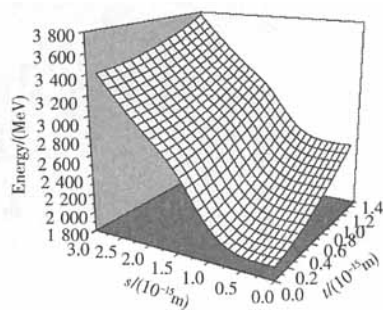


图4 负宇称3道耦合后 $\mu=0, \epsilon=0$ 时的情况

[参考文献]

- [1] Nakano T, Ahn D S, Ahn J K, *et al.* Evidence for a narrow $S = +1$ baryon resonance in photoproduction from the Neutron [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(1): 012002-1—012002-4.
- [2] Alt C, Anticic T, Baatar B, *et al.* Evidence for an exotic $S = -2, Q = -2$ baryon resonance in proton-proton collisions at the CERN SPS [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 92(4): 042003-1—042003-5.
- [3] Aktas A, Andreev V, Anthonis T, *et al.* Evidence for a narrow anti-charmed baryon state [J]. *Phys Lett B*, 2004, 588(1—2): 17—28.
- [4] Pang Hourong, Ping Jialun, Wang Fan, *et al.* High strangeness dibaryons in the extended quark delocalization and color screening model [J]. *Phys Rev C*, 2004, 69(6): 065207-1—065207-11.
- [5] Ping Jialun, Wang Fan, Goldman T. Effective baryon-baryon potential in the quark delocalization and color screening model [J]. *Nucl Phys A*, 1999, 657(1): 95—109.
- [6] Wang Fan, Ping Jialun, Wu Guanghan, *et al.* Quark delocalization, color screening model and dibaryons [J]. *Phys Rev C*, 1995, 51(6): 3411—3420.
- [7] Wu Guanghan, Teng Lijiang, Ping Jialun, *et al.* Quark delocalization, color screening, and $N-N$ intermediate range attraction: P-waves [J]. *Phys Rev C*, 1996, 53(3): 1161—1166.
- [8] Jaffe R, Wilczek F. Diquarks and exotic spectroscopy [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(23): 232003-1—232003-4.
- [9] Ping Jialun, Wang Fan, Goldman T. d' dibaryon in the quark-delocalization, color-screening model [J]. *Phys Rev C*, 2000, 62(5): 054007-1—054007-6.
- [10] Ping Jialun, Qing Di, Wang Fan, *et al.* Understanding pentaquarks with various quark models [J]. *Phys Lett B*, 2004, 602(3—4): 197—204.
- [11] Karliner M, Lipkin H J. A diquark-triquark model for the KN pentaquark [J]. *Phys Lett B*, 2003, 575(3—4): 249—255.

[责任编辑:丁蓉]