

双重子态 $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 的结构*

戴连荣¹⁾ 傅瑶²⁾ 刘忠佐 王印 佟蕾 李春然

(辽宁师范大学物理系 大连 116029)

摘要 在共振群的框架下,研究了双重子 $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 的结构,研究结果表明在推广手征 $SU(3)$ 夸克模型下,它仍然是一个深束缚的双重子束缚态.

关键词 双重子 矢量介子交换 推广手征 $SU(3)$ 夸克模型

1 引言

量子色动力学(QCD)已被公认为描述强相互作用的基本理论,但对于如何处理中低能区的非微扰效应,迄今还没有有效的方法来解决,而双重子是研究非微扰 QCD 效应的理想场所. 自从 1977 年 Jaffe 利用 MIT 袋模型,预言了第一个双重子态—H 粒子^[1]以来,人们利用各种夸克模型,预言了许多可能的双重子态. 就模型理论而言,主要困难在于如何准确地描述非微扰 QCD 效应. 目前已经发展了多个与 QCD 相容的理论模型,如 MIT 袋模型^[2],介子云袋模型^[3],孤立子模型^[4],组分夸克模型(CQM)^[5-10]等. 组分夸克模型是比较成功的模型之一,但在早期的组分夸克模型中,只用单胶子交换描述核力的短程部分和唯象的禁闭势描述核力的长程禁闭行为,模型中缺乏核力的中程吸引作用. 描述此效应的一个有效方法是引入夸克和手征场的耦合. Riska 和 Glozman 等通过夸克手征场耦合对重子谱作了广泛的研究^[11],得到了改进的重子谱. 张宗焯等^[12, 13]引入了夸克和标量介子及赝标介子九重态手征场的耦合,得到了满足手征对称性要求的手征 $SU(3)$ 夸克模型. 这样做不仅使模型本身在理论上更具有 QCD 精神,而且能很好地描述 NN 散射相移^[13], YN 散射截面^[13]以及 KN 散射^[14]等物理量. 而我们都知,在核力的重子层次研究中,短程相互作用是由矢量介子交换提供的,而手征 $SU(3)$ 夸克模型短程相互作用是由单胶子交换提供的. 为了

在夸克层次上研究矢量介子交换作用,我们提出了推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型^[15],并应用到 NN 散射过程. 结果表明,可以用矢量介子交换代替单胶子交换来描述短程相互作用. 事实上,对带有五个奇异夸克的双重子态 $(\Xi^*\Omega)_{ST=0,1/2}$ 的研究已经有很多工作,如文献^[16]认为 $(\Xi^*\Omega)_{ST=0,1/2}$ 双重子态和 $(\Omega\Omega)_{ST=00}$ 双重子态一样,都是深度束缚态. 它们的 $\langle P_{36}^{sf_c} \rangle$ 都是 $-1/9$,这一特殊对称性对形成束缚态是非常有利的. 如果重子间的相互作用有一定强度的吸引特性,就不但可以形成束缚态,而且有可能形成尺度相对较小且束缚较深的双重子束缚态. 文献^[17]中在推广的夸克退禁闭色屏蔽模型中对 $(\Xi^*\Omega)_{ST=0,1/2}$ 也做了研究,结果表明它是一个束缚态. 本文将在推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型下,应用共振群方法,进一步研究 $(\Xi^*\Omega)_{ST=0,1/2}$ 的结构.

2 推广手征 $SU(3)$ 夸克模型

推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型是在张宗焯等人早期工作^[12, 13]的基础上,进一步引入了夸克和矢量手征场的耦合,它的相互作用拉氏量为

$$\mathcal{L}_I^v = -ig_{chv}\bar{\psi}\gamma_\mu\varphi_\mu\cdot\tau\psi - i\frac{f_{chv}}{2M_P}\bar{\psi}\sigma_{\mu\nu}\partial_\nu\varphi_\mu\cdot\tau\psi. \quad (1)$$

重子-重子系统的哈密顿量可写为

$$H = \sum_i T_i - T_G + \sum_{i<j} V_{ij}, \quad (2)$$

* 国家自然科学基金(10675058)资助

1) E-mail: dailr@lnmu.edu.cn

2) E-mail: fuyaoyiyi521@163.com

$$V_{ij} = V_{ij}^{conf} + V_{ij}^{OGE} + V_{ij}^{ch}. \quad (3)$$

T_i 是体系总的动能; T_G 是质心运动的动能; $\sum_i T_i - T_G$ 是除去质心运动以后, 体系相对运动的动能. V_{ij} 包括夸克间的所有相互作用. V_{ij}^{conf} 是禁闭势, 它描述的是长程 NPQCD 效应, V_{ij}^{OGE} 是单胶子交换势(OGE), 描述短程的微扰效应. V_{ij}^{ch} 代表夸克和手征场的耦合相互作用. 在手征 $SU(3)$ 夸克模型中, V_{ij}^{ch} 包括标量介子交换势 V_{ij}^s 和赝标量介子交换势 V_{ij}^{ps} .

$$V_{ij}^{ch} = \sum_{a=0}^8 V_{s_a}(\mathbf{r}_{ij}) + \sum_{a=0}^8 V_{ps_a}(\mathbf{r}_{ij}), \quad (4)$$

在推广手征 $SU(3)$ 夸克模型中, V_{ij}^{ch} 包括标量介子交换势 V_{ij}^s , 赝标量介子交换势 V_{ij}^{ps} 及矢量介子交换势 V_{ij}^v ,

$$V_{ij}^{ch} = \sum_{a=0}^8 V_{s_a}(\mathbf{r}_{ij}) + \sum_{a=0}^8 V_{ps_a}(\mathbf{r}_{ij}) + \sum_{a=0}^8 V_{v_a}(\mathbf{r}_{ij}), \quad (5)$$

交换势的具体形式可参考文献[15]. 在计算中, 实际上可调的参数只有两个, 即夸克波函数的宽度 b 和 σ 介子质量. 计算中轻夸克质量取为 $m_u = 313\text{MeV}$, 奇异夸克质量取为 $m_s = 470\text{MeV}$. 由实验测定的质子电荷方均根半径决定谐振子基下夸克波函数的宽度 b_u . 根据动力学真空自发破缺机制, 调节 m_σ , 使之满足氦核的结合能. η 和 η' 介子是单态 η_1 和八重态 η_8 之间的混合, 混合角 $\theta^{PS} = -23^\circ$; ω 和 ϕ 介子是单态 ω_1 和八重态 ω_8 之间的混合, 混合角 $\theta^V = -54.7^\circ$. 对于标量和赝标介子九重态的夸克手征耦合常数 g_{ch} 由下式决定:

$$\frac{g_{ch}^2}{4\pi} = \left(\frac{3}{5}\right)^2 \frac{g_{NN\pi}^2}{4\pi} \frac{m_u^2}{M_N^2}, \quad (6)$$

其中 $g_{NN\pi}^2/4\pi$ 取实验值 13.67. 对于矢量九重态, 有矢量耦合和张量耦合两个耦合常数, 取值和文献[15]一样, 分别为 $g_{chv}=2.351$ (参数 I) 和 $g_{chv}=1.972$ (参数 II). 除了 σ 介子, 其他介子质量取实验值. 当上面的手征场参数固定后, OGE 耦合常数和禁闭势强度可以由 N, Λ , Σ , Ξ 和稳定条件定出. 模型参数的具体数值见表 1, 它能很好地拟合重子基态能量, 氦核的结合能及 NN 散射相移等物理量, 此模型参数也被用来研究介子和重子相互作用[18].

3 结果与讨论

本文在推广手征 $SU(3)$ 夸克模型下, 利用表 1 中的模型参数, 计算了 $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 双重子的结合能和相应的方均根半径, 结果见表 2. 可以看出, 在原来的手征 $SU(3)$ 夸克模型和推广手征 $SU(3)$ 夸克模型下,

$\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 都是深度束缚的双重子态.

表 1 模型参数及相应的氦核结合能

	手征 $SU(3)$ 夸克模型		推广手征 $SU(3)$ 夸克模型	
		参数 I	参数 II	
b_u/fm	0.5	0.45	0.45	
$g_{nn\pi}$	13.67	13.67	13.67	
g_{ch}	2.621	2.621	2.621	
g_{chv}	0	2.351	1.972	
f_{chv}/g_{chv}	0	0	2/3	
m_σ/MeV	595	535	547	
g_u^2	0.766	0.056	0.132	
g_s^2	0.846	0.203	0.250	
$a_{uu}/(\text{MeV}/\text{fm}^2)$	46.6	44.5	39.1	
$a_{us}/(\text{MeV}/\text{fm}^2)$	58.7	79.6	69.2	
$a_{ss}/(\text{MeV}/\text{fm}^2)$	99.2	163.7	142.5	
a_{uu}^0/MeV	-42.4	-72.3	-62.9	
a_{us}^0/MeV	-36.2	-87.6	-74.6	
a_{ss}^0/MeV	-33.8	-108.0	-91.0	
$E_b(\text{氦核})/\text{MeV}$	2.13	2.19	2.14	

表 2 $\Xi^*\Omega$ 双重子结合能和方均根半径 $E_b = -(M_{\Xi^*} + M_\Omega - E_{\Xi^*\Omega_{(0,1/2})})/\text{MeV}$

模型	$\Xi^*\Omega(L=0)$	\bar{R}/fm
手征 $SU(3)$ 夸克模型	117.1	0.68
推广手征 $SU(3)$ 夸克模型(参数 I)	91.8	0.67
推广手征 $SU(3)$ 夸克模型(参数 II)	105.7	0.66

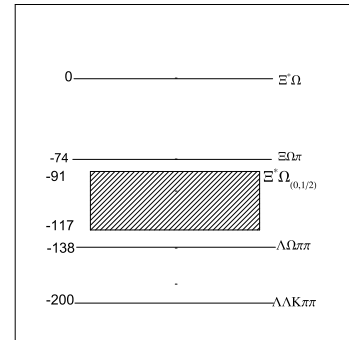


图 1 $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 系统的能级图

考虑矢量介子场耦合后, 即在推广手征 $SU(3)$ 夸克模型下, OGE 的耦合常数 g_u^2 和 g_s^2 大大减少, 这意味着推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型短程相互作用机制主要来源于矢量介子交换效应, 而原来的手征 $SU(3)$ 夸克模型短程相互作用机制是 OGE 效应. 在推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型下, 考虑了矢量场的张量耦合后, 双重子的结合能变大些. 分析表明在推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型下, 矢量介子 K^* 和 ϕ 提供了更多的排斥效应, 但因为 σ 介子质量减小而提供了更强的吸引效应, 所以与手征 $SU(3)$ 夸克模型相比较, 双重子的结合能基本不变, 即定性的结果却是相同的. 计算表明, 用推广

的手征 $SU(3)$ 夸克模型预言的 $\Xi^*\Omega$ 双重子态的质量仍然低于 $\Xi\Omega\pi$ 强衰变道的阈能, 表明这个态是一个窄宽度的深度束缚的双重子态.

4 总结

本文在推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型下, 对可能的双重子 $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 束缚态进行了研究. 在推广的手征

$SU(3)$ 夸克模型下, 短程相互作用主要来源于矢量介子交换效应, 而手征 $SU(3)$ 夸克模型中短程相互作用来源于单胶子交换作用, 两种模型的短程相互作用机制完全不同. 但研究表明, 在推广的手征 $SU(3)$ 夸克模型下 $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ 仍然是一个质量有可能低于 $\Xi\Omega\pi$ 强衰变道的阈能的窄宽度的深度束缚的双重子态, 与文献[16]预言的定性结果是相同的.

参考文献(References)

- 1 Jaffe R L. Phys. Rev. Lett., 1977, **38**: 195
- 2 Chodos A et al. Phys. Rev., 1974, **D9**: 3471
- 3 Thomas A W. Adv. Nucl. Phys., 1984, **13**: 1
- 4 Friedberg R, Lee T D. Phys. Rev., 1977, **D15**: 1694
- 5 de Rujula A, Georgi H, Glashow S L. Phys. Rev., 1975, **D12**: 147
- 6 Oka M, Yazaki K. Prog. Theor. Phys., 1981, **66**: 556
- 7 Faessler A et al. Phys. Lett., 1982, **B112**: 201
- 8 Faessler A, Fernandez F, Lübeck G et al. Nucl. Phys., 1983, **A402**: 555
- 9 ZHANG Z Y, Bräuer K, Faessler A et al. Nucl. Phys., 1985, **A443**: 557
- 10 Fernandez F, Valcarce A, Straub U et al. J. Phys., 1993, **G10**: 2013
- 11 Glazman L Ya, Riska D O. Phys. Rep., 1996, **268**: 263
- 12 ZHANG Z Y, YU Y W, SHEN P N et al. HEP & NP, 1996, **20**: 393(In Chinese)
(张宗焯, 余友文, 戴连荣等. 高能物理与核物理, 1996, **20**: 393)
- 13 ZHANG Z Y, YU Y W, SHEN P N et al. Nucl. Phys., 1997, **A625**: 59
- 14 YANG S, SHEN P N, ZHANG Z Y et al. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 146
- 15 DAI L R, ZHANG Z Y, YU Y W et al. Nucl. Phys., 2003, **A727**: 321
- 16 LI Q B, SHEN P N. Phys. Rev., 2000, **C62**: 028202
- 17 PANG H R, PING J L, WANG F et al. Phys. Rev., 2004, **C69**: 065207
- 18 HUANG F, ZHANG Z Y. Phys. Rev., 2005, **C72**: 024003

Structure of $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ Dibaryon*

DAI Lian-Rong¹⁾ FU Yao²⁾ LIU Zhong-Zuo WANG Yin TONG Lei LI Chun-Ran

(Department of Physics, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract The structure of $\Xi^*\Omega_{(0,1/2)}$ is studied in the extended chiral $SU(3)$ quark cluster model in which vector meson exchange are included using the resonating group method. It is shown that the system is still a deeply bound state.

Key words dibaryon, vector meson exchange, the extended chiral $SU(3)$ quark model

* Supported by National Natural Science Foundation of China (10675058)

1) E-mail: dailr@lnmu.edu.cn

2) E-mail: fuyaoyiyi521@163.com