

文章编号: 1007-4627(2000)01-0006-04

手征 $SU(3)$ 夸克模型与六夸克态的研究*

张宗焯, 余友文, 袁秀青

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要: 用手征 $SU(3)$ 夸克模型分析了 $(0s)^6$ 组态的六夸克态能量, 结果表明手征 $SU(3)$ 介子场可以对某些多奇异数的态提供较强的吸引作用. 进一步用共振群方法研究了 $(\Omega\Omega)_{0+}$ 及 $(\Omega\Xi)_{1+}$ 等多奇异数系统, 得到 $(\Omega\Omega)_0$ 是一个深度束缚的双重态.

关键词: 夸克模型; 六夸克态; 手征对称性

中图分类号: O572.33

文献标识码: A

1 引言

自从 1977 年 Jaffe^[1] 预言了由两个 u 夸克、两个 d 夸克和两个 s 夸克组成 $J^P = 0^+$ 、 $S = 0$ 、 $T = 0$ 及结合能为 81 MeV 的六夸克集团态, 即 H 粒子以来, 就引起了很多理论和实验工作者的兴趣, 开展了很多研究^[2-5], 其兴趣在于在低能区是否存在多夸克态. 遗憾的是至今在实验上仍未发现 H 粒子, 在理论上也无一个确切的预言, 不同的理论模型给出了不同的结果. 最近我们提出了手征 $SU(3)$ 夸克模型, 在这个模型中把夸克间的中程作用势归结为夸克间交换 $SU(3)$ 手征场的作用势. 用这个模型研究了 N-N(核子-核子)和 Y-N(超子-核子)相互作用的性质以及重子基态, 得到了与实验符合较好的结果^[6,7]. 本文的目的是用这个可以统一解释 N-N 和 Y-N 现有实验数据的模型, 研究所有轨道空间处于最低态的六夸克态的能量, 探讨在各种六夸克态中是否有某些六夸克态具有较大的结合能, 并进一步用共振群方法研究一些有兴趣的双重子态.

2 六夸克系统的 H 量

手征 $SU(3)$ 夸克模型中的 H 量为^[6]

$$H = \sum_i m_i + \sum_i T_i - T_G + \sum_{i < j} V_{ij},$$
$$V_{ij} = V_{ij}^{\text{conf}} + V_{ij}^{\text{OGE}} + V_{ij}^{\text{ch}},$$

$$V_{ij}^{\text{ch}} = V_{ij}^{\text{S}} + V_{ij}^{\text{PS}},$$

其中, V_{ij}^{conf} 为夸克间的禁闭势. 禁闭势有不同的形式, 不同禁闭势的计算其定性特点相似, 文中的数据是谐振子势的结果:

$$V_{ij}^{\text{conf}} = -a_{0ij} \lambda_i^c \cdot \lambda_j^c - a_{ij} r_{ij}^2 \lambda_i^c \cdot \lambda_j^c;$$

V_{ij}^{OGE} 为夸克间交换胶子场提供的的作用势,

$$V_{ij}^{\text{OGE}} = -\frac{1}{4} g_i g_j \lambda_i^c \cdot \lambda_j^c \left| \frac{1}{r_{ij}} - \frac{\pi}{2} \left| \frac{1}{m_i^2} + \frac{1}{m_j^2} \right| \cdot \delta(r_{ij}) - \frac{2\pi}{3m_i m_j} \sigma_i \cdot \sigma_j \delta(r_{ij}) \right|;$$

V_{ij}^{S} 和 V_{ij}^{PS} 分别表示由交换标量和赝标手征场提供的夸克间作用势,

$$V_{ij}^{\text{S}} = -\frac{g_{\text{ch}}^2}{4\pi} \frac{\Lambda_M^2 m_M}{\Lambda_M^2 - m_M^2} \left| Y(m_M r) - \frac{\Delta_M}{m_M} Y(\Lambda_M r) \right| \lambda_i^f \cdot \lambda_j^f,$$

$$V_{ij}^{\text{PS}} = -\frac{g_{\text{ch}}^2}{4\pi} \frac{1}{12m_q m_{q'}} \frac{\Lambda_M^2 m_M^3}{\Lambda_M^2 - m_M^2} \left| Y(m_M r) - \frac{\Delta_M^3}{m_M} Y(\Lambda_M r) \right| \sigma_i \cdot \sigma_j \lambda_i^f \cdot \lambda_j^f,$$

这里 m_q 为夸克质量, m_M 为手征场 M 的质量, Λ_M 为手征场 M 的截断质量, $\lambda_i^f \cdot \lambda_j^f$ 是味 $SU(3)$ 生成元的乘积

收稿日期: 1999-12-28

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19875059)

作者简介: 张宗焯(1935-), 女, 中国科学院院士, 研究员, 从事中高能核物理理论研究.

$$\lambda^f \cdot \lambda^f = \sum_{a=0}^8 \lambda_a^f \cdot \lambda_a^f .$$

从 H 量中可看到, 手征 $SU(3)$ 夸克模型是把夸克间的长程势选为 V_{ij}^{conf} , 短程势归为 V_{ij}^{OGE} , 中程势选为 V_{ij}^{c} 的模型, 这三部分势都有重要的作用^[6]. H 量中的参数是由 $N, \Delta, \Lambda, \Sigma, \Xi$ 等粒子基态能量及满足一定物理条件给出^[6], 在六夸克态的计算中不再有自由参数.

首先我们用这个 H 量计算了不同量子数 $(\lambda\mu)_s, T$ 和 S 的六夸克态能量. 六夸克集团态的波函数可写为

$$\Psi(q^6[3, 3]^{f_1, \sigma}(\lambda\mu)_{\epsilon}^s[2, 2, 2]^{\epsilon}; \epsilon\Lambda\nu, S, (00)^{\epsilon}) .$$

这表示一个坐标, 味空间为 $(\lambda\mu)_{\epsilon}$, 自旋为 S , 色空间单态耦合成全反对称的六夸克态的波函数, ϵ 是与奇异夸克数相联系的, 通常定义为奇异数 s , 对六夸克系统, $s = -1/3(6 + \epsilon)$, Λ 就是同位旋量子数 T . 为得到六夸克系统各态能量的稳定值, 计算中采用不同宽度的高斯波函数作为展开的基, 然后求解本征方程, 即

$$\Psi_A = \sum_i a_i \Psi_A(\omega), \quad \omega = \frac{1}{m_a b_i^2},$$

A 代表一组表征六夸克态的量子数, 求解

$$H \Psi_A = E_A \Psi_A .$$

当 6 个夸克都在 $(0s)$ 态上时, 不同 A 的态共有 56 个.

然后, 我们用共振群方法研究了 $(\Omega\Omega)_{0+}$ 及 $(\Xi\Omega)_{1+}$ 等有兴趣的双重子态.

3 计算结果与讨论

在这一节里将给出一些与讨论问题有关的计算结果. 一个令人感兴趣的问题是把所得六夸克态的能量与具有相同量子数的两个最轻的重子质量和做比较, 以讨论是否有可能存在六夸克集团的能量低于对应的两个重子态. 同时我们注意到在这些八重态和十重态的重子基态中, 它们的寿命是很不同的, 质子是稳定的, 中子的寿命也长达 15 min, 只能发生弱衰变的 $\Lambda, \Sigma^{\pm}, \Xi$ 和 Ω 的寿命都为 10^{-10} s

量级, 而可以发生强衰变的 $\Sigma^0, \Delta, \Sigma^*$ 和 Ξ^* 等粒子的寿命都小于 10^{-20} s. 为此, 把所做的比较分为几类来讨论. 一类是可比的两个重子都是核子, 第二类是所比的两个重子只能发生弱衰变, 第三类是所比的两个重子能发生强衰变. 表 1 列出了这几类情况的一些计算结果. 表中的第一列是标志六夸克态的量子数, 第二和第三列是手征 $SU(3)$ 夸克模型理论计算出的六夸克态的能量, 第四和第五列是可比的两个重子态以及它们的质量和, 第五列既给出了实验值, 同时也列出了用手征 $SU(3)$ 夸克模型在相同参数时得到的理论值. 由于计算中所采用的禁闭势强度是由核子的稳定条件定出的, 它与核子的尺度参数 b_0 有较强的关系. 为了讨论理论结果随参数的变化, 在表中列出了两组 b_0 的结果. $b_0 = 0.505$ fm 是在计算 $N-N$ 和 $Y-N$ 散射中所采用的^[6], $b_0 = 0.6$ fm 仍在核子尺度的合理范围之内, 是较大的极端情况.

表 1(a) 给出的是两个可比的两个重子都是核子的情况, 这时相应的六夸克态能量都相当高, 即使是在 $b_0 = 0.6$ fm 的情况下, 六夸克态能量也比两个核子的质量高 350~400 MeV. 表 1(b) 列出的是两个可比的两个重子只能发生弱衰变的一些有兴趣的结果. 其中 $s(\lambda\mu)_{TS}$ 为 $-2(00)_{00}$ 的态就是通常所说的 H 粒子. 可以看到, 除 H 粒子的能量与可比的两个重子的质量相差较小外, 还有 3 个态值得注意, 它们分别是 $-3(11)_{1/22}, -5(41)_{1/21}$ 及 $-6(60)_{00}$. 这里所采用的六夸克集团的处理方法虽然可以提供一些定性的特点, 但它过于简单, 当把模型空间扩大之后, 采用共振群方法求解两个 $(3q)$ 集团的系统, 就有可能得到束缚态.

由于这类可比的两个重子只能发生弱衰变, 当六夸克能量低于可比两个重子质量, 所得到的束缚态就有较长的寿命, 在实验中有可能被观察到, 这是一个很值得研究的问题.

表 1(c) 给出的是可比的两个重子中有一个可以发生强衰变的一些结果, 虽然这些六夸克态的能量一般只比相应的两个重子质量高几十至一百多 MeV, 扩大了模型空间之后是有可能得到其能量低于两个重子质量的结果. 但是由于相比的两个重子中有一个可发生强衰变, 因此仅比这两个重子的质量低仍然是一个宽度很大不易测量的态. 只有当能量低于发生强衰变产生 π 介子的阈能时, 才有可能在实验上观察到这种窄宽度的态. 从(c)中看到,

表 1 两个重子在不同情况下的计算结果

$s(\lambda\mu)TS$	6q 态的能量(MeV)		相比的两个重子		
	$b_u = 0.505 \text{ fm}$	$b_u = 0.6 \text{ fm}$	$M_{B1+} M_{B2}(\text{MeV})$		
	$a_{uu} = 54.3 \text{ MeV/fm}^2$	$a_{uu} = 8.2 \text{ MeV/fm}^2$	B_1B_2	理论	实验
<u>(a) 两个重子为核子</u>					
0(03)01	2 421	2 249	NN	1 878	1 878
0(22)10	2 500	2 298	NN	1 878	1 878
<u>(b) 两个重子都不能发生强衰变</u>					
- 1(11)1/21	2 520	2 365	$N\Lambda$	2 055	2 055
- 1(30)3/21	2 635	2 449	$N\Sigma$	2 132	2 132
- 2(00)00	2 519	2 398	$\Lambda\Lambda$	2 232	2 232
- 2(11)11	2 692	2 550	$N\Xi$	2 272	2 257
- 3(11)1/21	2 787	2 675	$\Lambda\Xi$	2 449	2 434
- 3(11)1/22	2 847	2 733	$N\Omega$	2 596	2 611
- 4(30)01	2 989	2 887	$\Xi\Xi$	2 666	2 636
- 5(41)1/21	3 290	3 200	$\Xi\Omega$	2 991	2 991
- 6(60)00	3 520	3 460	$\Omega\Omega$	3 314	3 344
<u>(c) 两个重子其中一个可发生强衰变</u>					
0(22)12	2 569	2 348	ΔN	2 176	2 171
- 1(11)1/22	2 612	2 429	$\Sigma^* N$	2 314	2 324
- 2(11)02	2 716	2 560	$\Xi^* N$	2 454	2 469
- 3(03)3/23	3 079	2 932	$\Delta\Omega$	2 894	2 904
- 4(22)12	3 143	3 025	$\Xi^* \Xi$	2 849	2 849
- 5(60)1/20	3 382	3 287	$\Xi^* \Omega$	3 172	3 202
<u>(d) 两个重子都能发生强衰变</u>					
0(03)03	2 615	2 373	$\Delta\Delta$	2 474	2 464
0(60)30	2 755	2 472	$\Delta\Delta$	2 474	2 464
- 1(03)1/23	2 752	2 520	$\Delta\Sigma^*$	2 612	2 617
- 1(60)5/20	2 864	2 602	$\Delta\Sigma^*$	2 612	2 617
- 2(03)13	2 908	2 713	$\Delta\Xi^*$	2 752	2 762

$s(\lambda\mu)TS$ 为 - 3(03)3/23 及 - 5(60)1/20 这两个态能量较低, 是值得扩大模型空间继续研究的。

表 1(d) 列出的是两个重子都可以发生强衰变的一些情况, 从表可见到确有几个态的能量 ($b_u = 0.6 \text{ fm}$) 低于两个相比的重子质量. 然而由于这两个重子都可发生强衰变, 所以只有当六夸克态的能量低于产生两个 π 介子强衰变的阈能时, 才有可能测到相应的窄宽度的态, 从(d)中可看到, $(\lambda\mu) = (03)$ 对称性的态能量较低, 是值得进一步探讨的。

在夸克势模型中, 对夸克间的相互作用有不同的选择. 表 2 给出了不同奇异数的某些态对夸克间相互作用取为 OGE, OGE+ $SU(2)$ 和 OGE+ $SU(3)$ 3 种结果的比较. 从表 2 可看到, OGE 势时 6q 态的能量最高, OGE+ $SU(2)$ 模型使 6q 态的能量

普遍降低 100 MeV, 而 OGE+ $SU(3)$ 模型的结果是使 $SU(2)$ 结果中某些态能量升高和某些态能量降低, 特别是 $s(\lambda\mu)TS$ 为 - 5(41)1/21 及 - 6(60)00 的能量值就更接近阈能, Ξ 和 Ω 又是弱衰变粒子. 因此这类多奇异数六夸克态更有可能在实验上被观察到. 多奇异数系统的这个特点是由 $SU(3)$ 手征场的特性决定的。

我们进一步对 $(\Omega\Omega)_{0+}$, $(\Xi\Omega)_{1+}$ 及 H 粒子等几个感兴趣的态做了共振群动力学方程的解, 所采用的参数与计算 N-N 散射和 Y-N 截面中的参数相同, 结果列于表 3. 从表 3 可以看到, 在手征 $SU(3)$ 模型中, H 粒子的能量是很接近于 $\Lambda\Lambda$ 阈能的, 这个结果与目前实验上的迹象是一致的. 然而对于多奇异数的 $(\Omega\Omega)_{0+}$ 和 $(\Xi\Omega)_{1+}$, 则都是束缚态,

表 2 夸克间不同作用势结果的比较

$s(\lambda\mu)TS$	6q 态的能量 (MeV)			相比的两个重子	
	OGE	OGE+ $SU(2)$	OGE+ $SU(3)$	$M_{B1+} M_{B2}$ (MeV)	
	$b_u=0.6$ fm	$b_u=0.6$ fm	$b_u=0.6$ fm	B1B2	实验
0(03)01	2 348	2 210	2 249	NN	1 878
0(03)03	2 478	2 350	2 373	$\Delta\Delta$	2 464
- 2(00)00	2 448	2 292	2 398	$\Lambda\Lambda$	2 232
- 3(03)3/23	3 026	2 869	2 932	$\Delta\Omega$	2 904
- 4(22)10	3 077	2 941	2 941	$\Xi\Xi$	2 636
- 5(41)1/21	3 371	3 243	3 200	$\Xi\Omega$	2 991
- 5(60)1/20	3 514	3 389	3 287	$\Xi^*\Omega$	3 202
- 6(60)00	3 692	3 573	3 460	$\Omega\Omega$	3 344

$(\Xi\Omega)_{1+}$ 是一个浅束缚态, $(\Omega\Omega)_{0+}$ 是一个深度束缚的六夸克态, 它的均方根半径只有 0.66 fm. 由于 $(\Omega\Omega)_{0+}$ 只能发生弱衰变, 因此它的寿命大约是在 10^{-10} s 的量级, 同时它携带的电荷为 -2. 所有这些特性, 都表示 $(\Omega\Omega)_{0+}$ 是一个人们非常感兴趣的双重子态. 我们预言这个双重子态存在, 并期待着在相对论重离子实验中能够找到它.

表 3 双重子态的共振群解

双重子态	sTS	结合能 (MeV)	均方根半径 (fm)
$H(\Lambda\Lambda + \Sigma\Sigma + N\Xi)^{[8]}$	- 200	- 2.0	1.4
$\Xi\Omega$	- 51/21	7.6	1.0
$\Omega\Omega$	- 600	116.3	0.66

参 考 文 献

[1] Jaffe R L. Perhaps a Stable Dihyperon. Phys Rev Lett, 1977, 38: 195~ 198.

[2] Balachandran A P, Barducci A, Luzzi F *et al.* Doubly Strange Dibaryon in the Chiral Model. Phys Rev Lett, 1984, 52: 887 ~ 890.

[3] Oka M, Shimizu K, Yazaki K. The Di-Hyperon State in the Quark Cluster Model. Phys Rev Lett, 1983, B130: 365; Oka, Shimizu K, Yazaki K. Hyperon-Nucleon and Hyperon-Hyperon Interaction in a Quark Model. Nucl Phys, A464: 700 ~ 716.

[4] Straub U, Zhang Zongye, Brauer K *et al.* Binding Energy of the Dihyperon in the Quark Cluster Model. Phys Lett, 1988, B200: 241~ 245.

[5] Imai K. Search for Double Strangeness Systems. Nucl Phys, 1993, A533: 667~ 674.

[6] Zhang Z Y, Yu Y W, Shen P N *et al.* Hyperon-nucleon Interactions in a Chiral $SU(3)$ Quark Model. Nucl Phys, 1997, A625: 59~ 70.

[7] 陈 洪, 张宗焯. 非奇异重离子谱的非微扰效应. 高能物理与核物理, 1996, 20: 937~ 944.

[8] Shen P N, Zhang Z Y, Yu Y W *et al.* J Phys, G-Nu 1999, 25: 1 806.

Chiral $SU(3)$ Quark Model and Study of Six Quark States*

ZHANG Zong-ye, YU You-wen, YUAN Xiu-qing

(Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: An analysis is made for the $(0s)^6$ six quark cluster states in the chiral $SU(3)$ quark model. The results show that for some multistrangeness states the chiral $SU(3)$ could offer more attraction. Further RGM dynamical calculation of the multistrangeness system $(\Omega\Omega)_{0+}$ and $(\Xi\Omega)_{1+}$ has been done. It shows that $(\Omega\Omega)_{0+}$ is a deeply bound state in the chiral $SU(3)$ quark model.

Key words: quark model; six quark state; chiral symmetry

* Foundation item: NSFC (19875059)