

手征 $SU(3)$ 夸克模型的六夸克集团态的研究*

余友文 张宗焯 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 $SU(3)$ 介子场可以对某些高奇异数的态提供较强的吸引作用, 这为进一步讨论是否有可能存在窄宽度的六夸克态提供了有用的信息.

关键词 夸克模型 六夸克态 手征对称性

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 $J^P = 0^+$, $S = 0$, $T = 0$, 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. 最近我们给出了 $SU(3)$ 手征夸克模型, 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 和 Y-N 相互作用的性质以及部分重子谱, 得到了与实验符合较好的结果^[6,7]. 本文的目的是用这个统一解释了 N-N 和 Y-N 现有一些实验数据的模型, 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. 当然结果有待于实验检验, 但是我们认为从一个能同时符合现有 N-N, Y-N 散射实验的夸克-夸克作用势出发来研究多夸克态的问题, 可能会得到一些更具有参考价值的信息.

2 六夸克态的波函数和 H 量

为了在波函数中考虑 u, d 夸克与 s 夸克质量差的效应, 夸克的径向部分是与味量子数相关的, 因此轨道空间与味空间不再能独立分开而必须联系在一起. 系统总的波函数将由轨道和味空间的 $SU(3)_u$, 自旋空间 $SU(2)_s$ 和色空间 $SU(3)_c$ 三部分构成. 由于六夸克

1998-07-22 收稿

* 国家自然科学基金资助项目

态是色单态, 色空间对称性为 $[2, 2, 2]$. 因此总的反对称的态, 其 $SU(3)_c \times SU(2)_s$ 空间的对称性必然是 $[3, 3]$. 一个六夸克集团态的波函数可写为:

$$\bar{\Psi}(q^6[3, 3]^{r,s} (\lambda\mu)_{\epsilon\Lambda}^f [2, 2, 2]^c; \in \Lambda v, S, (00)^c)$$

这表示了一个坐标、味空间为 $(\lambda\mu)_{\epsilon\Lambda}$, 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, 通常定义奇异数 ν , 对六夸克系统 $\nu = -\frac{1}{3}(6 + \epsilon)$,

Λ 就是同位旋量子数 T . 由于只考虑夸克处在轨道最低态的情况, 所以六夸克态的波函数可以用奇异数 ν , 同位旋 T 和自旋 S 来表征, 不同 ν , T , S 的态共有 56 个, 利用群论的 $f \cdot p$ 系数技术可以较简单地计算出它们的矩阵元.

$SU(3)$ 手征夸克模型中的 H 量为^[6]

$$\begin{aligned} H &= \sum_i m_i + \sum_i T_i - T_G + \sum_{i < j} V_{ij} \\ V_{ij} &= V_{ij}^{\text{conf}} + V_{ij}^{\text{OGE}} + V_{ij}^{\text{ch}} \\ V_{ij}^{\text{ch}} &= V_{ij}^S + V_{ij}^{\text{PS}} \end{aligned}$$

V_{ij}^{conf} 为夸克间的禁闭势. 禁闭势有不同的形式, 本工作做了不同禁闭势的计算其定性特点相似, 文章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, 取为:

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

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,

$$\begin{aligned} V_{ij}^S &= -\frac{g_{\text{ch}}^2}{4\pi} \cdot \frac{\Lambda_M^2 m_M}{\Lambda_M^2 - m_M^2} \left[Y(m_M r) - \frac{\Lambda_M}{m_M} Y(\Lambda_M r) \right] \lambda_i^f \cdot \lambda_j^f \\ V_{ij}^{\text{PS}} &= \frac{g_{\text{ch}}^2}{4\pi} \frac{1}{12m_{q_i} m_{q_j}} \cdot \frac{\Lambda_M^2 m_M^3}{\Lambda_M^2 - m_M^2} \left[Y(m_M r) - \frac{\Lambda_M^3}{m_M^3} Y(\Lambda_M r) \right] \sigma_i \cdot \sigma_j \lambda_i^f \cdot \lambda_j^f \end{aligned}$$

这里, m_q 为夸克质量, m_M 为手征场 M 的能量, 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

$$\lambda_i^f \cdot \lambda_j^f = \sum_{a=0}^8 \lambda_{ia}^f \lambda_{ja}^f.$$

从 H 量中可看到 $SU(3)$ 手征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}^{ch} 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.

用这个 H 量计算了不同量子数 $(\lambda\mu)_\nu$, T, S 的各六夸克态能量. 为得到六夸克系统各态能量的稳定值,在计算中采用不同宽度的高斯波函数做为展开的基,然后求解本征方程. 即,

$$\Psi_A = \sum_i a_i \Psi_A(\omega_i), \quad \omega_i = \frac{1}{m_0 b_i^2}$$

A 代表一组表征六夸克态的量子数,求解

$$H \Psi_A = E_A \Psi_A$$

当六个夸克都在 $(0s)$ 态上时,不同 A 的态共有 56 个.

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到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,以讨论是否存在六夸克集团的能量低于对应的两个重子态. 例如 $\nu = 0$, $(\lambda\mu)TS$ 为 $(03)01$ 的态,它所对应的两个最轻的重子就是两个核子 NN . 而 $\nu = 0$, $(\lambda\mu)TS$ 为 $(03)03$ 的态所对应的两个最轻的重子就是 $\Delta\Delta$. 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 分钟,只能发生弱衰变的 Λ, Σ^\pm, Ξ 和 Ω 的寿命都为 10^{-10}s 的量级,而可以发生强衰变的 $\Sigma^0, \Delta, \Sigma^*, \Xi^*$ 等粒子的寿命都短于 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的情况,另一类是所比的两个重子能发生强衰变的情况. 表 1 至表 4 分别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 $SU(3)$ 手征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 $SU(3)$ 手征夸克模型在相同参数时得到的理论值. 由于在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. $b_0 = 0.505\text{fm}$ 是在计算 NN 和 YN 散射中所采用的^[6], $b_0 = 0.6\text{fm}$ 仍在核子尺度的合理范围之内,是较大的极端情况. 下面来讨论从所得的结果中可以获取一些什么信息.

表 1 给出的是可比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 $b_0 = 0.6\text{fm}$ 的情况下,六夸克态能量也比两个核子的质量高 350 至 400MeV. 表 2 列出的是可比两个重子只能发生弱衰变的一些有兴趣的结果. 表中 $\nu(\lambda\mu)TS$ 为 $-2(00)00$ 的态就是通常所说的 H 粒子. 从表 2 中可看到除了 H 粒子的能量与可比的两个重子的质量相差较小以外,还有另外三个态值得注意,它们分别是 $-3(11)1/2 2$, $-5(41)1/2 1$ 及 $-6(60)00$. 在所采用的六夸克集团的处理方法虽然可以提供一些定性

表1 两个重子为核子的情况

$s(\lambda\mu)TS$	6q态的能量 (MeV)		相比的两个重子		
	$b_u=0.505$ fm	$b_u=0.6$ fm	B_1B_2	$M_{B_1}+M_{B_2}$ (MeV)	
	$a_{uu}=54.3\text{MeV}/\text{fm}^2$	$a_{uu}=8.2\text{MeV}/\text{fm}^2$		理论	实验
0(03)01	2421	2249	NN	1878	1878
0(22)10	2500	2298	NN	1878	1878

表2 两个重子都不能发生强衰变的情况

$s(\lambda\mu)TS$	6q态的能量 (MeV)		相比的两个重子		
	$b_u=0.505$ fm	$b_u=0.6$ fm	B_1B_2	$M_{B_1}+M_{B_2}$ (MeV)	
	$a_{uu}=54.3\text{MeV}/\text{fm}^2$	$a_{uu}=8.2\text{MeV}/\text{fm}^2$		理论	实验
-1(11)1/2 1	2520	2365	$N\Lambda$	2055	2055
-1(30)3/2 1	2635	2449	$N\Sigma$	2132	2132
-2(00)00	2519	2398	$\Lambda\Lambda$	2232	2232
-2(11)11	2692	2550	$N\Xi$	2272	2257
-3(11)1/2 1	2787	2675	$\Lambda\Xi$	2449	2434
-3(11)1/2 2	2847	2733	$N\Omega$	2596	2611
-4(30)01	2989	2887	$\Xi\Xi$	2666	2636
-5(41)1/2 1	3290	3200	$\Xi\Omega$	2991	2991
-6(60)00	3520	3460	$\Omega\Omega$	3314	3344

表3 两重子中有一个重子可发生强衰变的情况

$s(\lambda\mu)TS$	6q态的能量 (MeV)		相比的两个重子		
	$b_u=0.505$ fm	$b_u=0.6$ fm	B_1B_2	$M_{B_1}+M_{B_2}$ (MeV)	
	$a_{uu}=54.3\text{MeV}/\text{fm}^2$	$a_{uu}=8.2\text{MeV}/\text{fm}^2$		理论	实验
0(22)12	2569	2348	ΔN	2176	2171
-1(11)1/2 2	2612	2429	$\Sigma^* N$	2314	2324
-2(11)02	2716	2560	$\Xi^* N$	2454	2469
-3(03)3/2 3	3079	2932	$\Delta\Omega$	2894	2904
-4(22)12	3143	3025	$\Xi^* \Xi$	2849	2849
-5(60)1/2 0	3382	3287	$\Xi^* \Omega$	3172	3202

的特点,但它过于简单,当把模型空间扩大之后完全有可能得到束缚态.这方面的工作正在进行中.由于这类情况可比的两个重子只能发生弱衰变,当六夸克态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,在实验中有可能观察到,这是一个很值得研究的问题.

表3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

表4 两重子都能发生强衰变的情况

$\nu(\lambda\mu)TS$	6q态的能量 (MeV)		相比的两个重子		
	$b_u=0.505$ fm	$b_u=0.6$ fm	$M_{B_1} + M_{B_2}$ (MeV)		
	$a_{uu}=54.3\text{MeV}/\text{fm}^2$	$a_{uu}=8.2\text{MeV}/\text{fm}^2$	B_1B_2	理论	实验
0(03)03	2615	2373	$\Delta\Delta$	2474	2464
0(60)30	2755	2472	$\Delta\Delta$	2474	2464
-1(03)1/2 3	2752	2520	$\Delta\Sigma^*$	2612	2617
-1(60)5/2 0	2864	2602	$\Delta\Sigma^*$	2612	2617
-2(03)13	2908	2713	$\Delta\Sigma^*$	2752	2762

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. 在表3中可看到 $\nu(\lambda\mu)TS$ 为 $-3(03)3/2 3$ 及 $-5(60)1/2 0$ 这两个态能量较低,是值得扩大模型继续研究的.

表4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以发生强衰变,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. 从表中可看到 $(\lambda\mu) = (03)$ 对称性的态能量较低,是值得进一步探讨的.

表5 夸克间不同作用势结果的比较

$\nu(\lambda\mu)TS$	6q态的能量 (MeV)			相比的两个重子	
	OGE	OGE+SU(2)	OGE+SU(3)	$M_{B_1} + M_{B_2}$ (MeV)	
	$b_u=0.6\text{fm}$	$b_u=0.6$ fm	$b_u=0.6$ fm	B_1B_2	实验
0(03)01	2348	2210	2249	NN	1878
0(03)03	2478	2350	2373	$\Delta\Delta$	2464
-2(00)02	2448	2292	2398	$\Lambda\Lambda$	2232
-3(03)3/2 3	3026	2869	2932	$\Delta\Omega$	2904
-4(22)10	3045	2889	2893	$\Xi\Xi$	2636
-5(41)1/2 1	3265	3076	3040	$\Xi\Omega$	2991
-5(60)1/2 0	3514	3389	3287	$\Xi^*\Omega$	3202
-6(60)00	3692	3573	3460	$\Omega\Omega$	3344

在夸克势模型中,对夸克间的相互作用有不同的选择. 表5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)三种结果的比较. 从表5可看到OGE势时态的能量最高, OGE + SU(2)模型使态能量普遍降低一百多MeV,而OGE + SU(3)模型的结果是使SU(2)结果中某些态能量升高,某些态能量降低,特别是 $\nu(\lambda\mu)TS$ 为 $-5(41)1/2 1$ 及 $-6(60)00$ 的能量值就更接近阈能了, Ξ 和 Ω 又是弱衰变粒子,因此这类高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SU(3)手征场的特性决定的. SU(3)手征夸克模型预言这两个态可能是束缚态,这是一个很有兴趣的观点,也是检验模型有力的场所.

尽管我们的计算是仅在 $(0s)^6$ 空间中进行的简单分析,但是得到的这些定性特点可以启发我们对某些六夸克态进行深入的研究. 更确切的结论有待于扩大组态空间后更严格

的计算,模型的正确性更有待于实验检验.

参 考 文 献

- 1 Balachandran A P, Barducci A, Lizzi F et al. Phys. Rev. Lett., 1984, **52**:887
- 2 Oka M, Shimizu K, Yazaki K. Phys. Lett., 1983, **B130**:365; Nucl. Phys., 1987, **A464**:700
- 3 Straub U, Zhang Zongye, Bräuer K et al. Phys. Lett., 1988, **B200**:241
- 4 Imai K. Nucl. Phys., 1993, **A553**:667
- 5 Jaffe R J. Phys. Rev. Lett., 1977, **38**:195
- 6 Zhang Z Y, Yu Y W, Shen P N et al. Nucl. Phys., 1997, **A625**:59—70
- 7 Chen Hong, Zhang Zongye. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, **20**:937
(陈 洪, 张宗焯. 高能物理与核物理, 1996, **20**:937)

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

Yu Youwen Zhang Zongye Yuan Xiuqing

(*Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

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 states with higher strange number the chiral $SU(3)$ cloud offers more attraction. and these informations are useful to discuss if there exists some narrow width six quark states.

Key words quark model, six quark state, chiral symmetry

Received 22 July 1998

* Project supported by National Natural Science Foundation of China