

$\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ 衰变及一个可能的 $b\bar{b}q\bar{q}$ 态*

郭奉坤^{1,5;1)} 沈彭年^{1,2,3,4} 姜焕清^{1,2,3,4,6} 平荣刚^{1,2}

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)
2 (中国高等科技中心 北京 100080)
3 (中国科学院理论物理研究所 北京 100080)
4 (兰州重离子国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)
5 (中国科学院研究生院 北京 100049)
6 (西南师范大学 重庆 400715)

摘要 利用手征么正方法研究了衰变 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$. 通过引入一个 $J^P = 1^+, I = 1$ 的中间态, 该衰变的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱和 $\cos\theta_\pi^*$ 角分布都能够得到很好的解释. 同时, 其他 $\Upsilon(nS)$ 各态之间的 $\pi^+\pi^-$ 跃迁也能得到很好的描述. 通过拟合 CLEO 的数据, 对这个态的质量和宽度作了预言. 该态的夸克组成应该是 $b\bar{b}q\bar{q}$.

关键词 手征么正理论 Υ 衰变 $\pi\pi S$ 波末态相互作用 四夸克态

1 引言

许多基于 QCD 的模型都预言了多夸克态的存在, 但是多年来实验上却没有得出相应的确切结论, 直到 2003 年关于可能的五夸克态 Θ^+ 的报道^[1]. 同时, $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ 的 $\pi\pi$ 衰变也得到人们的广泛关注. 与其他重夸克偶素的跃迁相比^[2-4], 这一跃迁的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱呈现出独特的双峰结构, 而且其角分布在 $\cos\theta_\pi^*$ 从 0 到 1 的区间的下降趋势也是使其区别于其他衰变的特点^[4]. 对于这一衰变, 已经提出了很多唯象模型^[5-11], 但是都不能给出令人满意的描述.

由于衰变产物中有两个 π 介子, 而且相空间限制其不变质量 $< 0.9\text{GeV}$, 两介子间的末态相互作用是不可忽略的. 我们将采用一种手征么正方法^[12]来描述末态 π 介子之间的 S 波末态相互作用. 手征么正方法^[12]的基本思想是: 应用耦合道的 Bethe-Salpeter 方程研究赝标介子之间(或介子与重子之间^[13])的相互作用, 并以手征微扰论(ChPT) 的领头阶振幅作为方程的核. 该方法只用动量截断一个参数, 就能够很好地拟合 1.2GeV 以下能区的介子-介子 S 波的散射数据, 并且能够动力学的产生 σ , $f_0(980)$ 和

$a_0(980)$ 等人们很感兴趣的标量粒子. 然而, 只引入 π 介子之间的末态相互作用仍不能很好地解释 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ 的实验数据^[14]. 引入级联衰变的机制 $\Upsilon(3S) \rightarrow X\pi \rightarrow \Upsilon(1S)\pi\pi$, 并采用唯象的方法计入 $\pi\pi S$ 波末态相互作用^[9]虽然可以很好地解释 CLEO 的实验数据, 但遗憾的是角分布的数据仍不能解释. 从夸克结构来看, 上述引入的中间粒子 X 应该具有 $b\bar{b}q\bar{q}$ 的组分.

2 理论计算

由于相空间的限制, 末态 π 介子的动量都局限在 0.9GeV 以下, π 介子之间的末态相互作用有明显的贡献. 我们将采用手征么正方法^[12]来处理 $\pi\pi$ 的 S 波末态相互作用, 并在考虑了直接项贡献的基础上, 进一

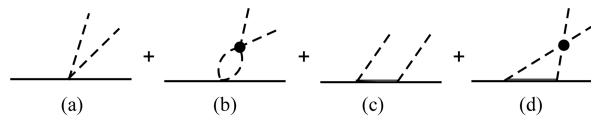


图 1 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ 费曼图

(a) 直接项树图; (b) 直接项 $\pi\pi$ 末态相互作用; (c) 级联项树图; (d) 级联项末态相互作用.

2005 - 03 - 21 收稿

* 国家自然科学基金(90103020, 10475089, 10435080, 10447130)和中国科学院知识创新计划(KJ9X2-SW-N02)资助

1) E-mail: guofk@mail.ihep.ac.cn

步考虑级联衰变的机制 $\Upsilon(3S) \rightarrow X\pi \rightarrow \Upsilon(1S)\pi\pi$ 的贡献. 需要计算的费曼图如图 1 所示, 其中 (a) 和 (b) 代表直接项的贡献, (c) 和 (d) 代表级联机制的贡献. (b) 和 (d) 中的黑点表示 $\pi\pi$ 之间的末态相互作用.

由于所研究的衰变涉及到的粒子是重夸克偶素以及作为 Goldstone 玻色子的 π 介子, 因此在耦合顶点 $V'V\pi\pi$ (V' , V 分别代表初末态重夸克偶素) 上考虑最低阶手征展开以及重夸克展开是合适的^[10]. 在 $\pi^+\pi^-$ 的质心系中, $V' \rightarrow V\pi\pi$ 直接项树图 (图 1(a)) 的衰变振幅可以写成^[6, 8, 10]

$$V_0 = -\frac{4}{f_\pi^2} [(g_1 p_1 \cdot p_2 + g_2 p_1^0 p_2^0 + g_3 m_\pi^2) \varepsilon^* \cdot \varepsilon' + g_4 (p_{1\mu} p_{2\nu} + p_{1\nu} p_{2\mu}) \varepsilon^{*\mu} \varepsilon'^\nu], \quad (1)$$

其中 f_π 是 π 介子衰变常量, p_1 和 p_2 分别是 π^+ 和 π^- 的四动量, ε' 和 ε 分别是初末态重夸克偶素的极化矢量, g_1, g_2, g_3, g_4 是耦合常数. 由于手征破缺标度 Λ_χ 以及重夸克质量的压低, g_4 项可以忽略^[10], 这一点在 S. Chakravarty 等人的讨论中得到了验证^[8]. 于是方程 (1) 简化为

$$V_0 = -\frac{4}{f_\pi^2} (g_1 p_1 \cdot p_2 + g_2 p_1^0 p_2^0 + g_3 m_\pi^2) \varepsilon^* \cdot \varepsilon'. \quad (2)$$

值得注意的是, 由于 Lorentz 变换, g_2 项中含有 D 波成分^[14-16]. 于是, V_0 可被分解为 $V_0 = V_{0S} + V_{0D}$, 其中 V_{0S} 和 V_{0D} 分别代表 S 波和 D 波成分.

对于级联过程 $\Upsilon(3S) \rightarrow X\pi \rightarrow \Upsilon(1S)\pi\pi$, 考虑简单的 S 波耦合顶点 $\Upsilon(nS)X\pi$, 其拉氏量可以写为

$$\mathcal{L}_X = g_{nX} \Upsilon_\mu X^\mu \phi. \quad (3)$$

其中 g_{nX} 是 $\Upsilon(nS)X\pi$ 顶点的耦合常数, Υ_μ, X^μ 和 ϕ 分别代表 $\Upsilon(nS)$, X 和 π 的场算符. 显而易见, X 的量子数应为 $J^P = 1^+, I = 1$. 级联机制树图的振幅可以写为

$$V_X^{\text{tree}} = g_{nm} \varepsilon'_\mu \varepsilon_\nu^* \left(\frac{-g^{\mu\nu} + p_{X+}^\mu p_{X+}^\nu / m_X^2}{p_{X+}^2 - m_X^2 + im_X \Gamma_X} + \frac{-g^{\mu\nu} + p_{X-}^\mu p_{X-}^\nu / m_X^2}{p_{X-}^2 - m_X^2 + im_X \Gamma_X} \right). \quad (4)$$

其中 $g_{nm} = g_{nX} \cdot g_{mX}$, m_X 和 Γ_X 分别是中间态 X 的质量和宽度, 它们将作为自由参数通过拟合 CLEO 的实验数据来确定^[3, 4], p_{X+} 和 p_{X-} 分别是 X^+ 和 X^- 的四动量.

以 $t_{\pi\pi, \pi\pi}^{I=0}$ 代表同位旋 $I = 0$, S 波 $\pi\pi$ 散射的总振

幅^[12], 通过同位旋分解可以得到 $\pi\pi \rightarrow \pi^+\pi^-$ 的振幅为

$$\langle \pi^+\pi^- | t | \pi^+\pi^- + \pi^-\pi^+ + \pi^0\pi^0 \rangle = 2t_{\pi\pi, \pi\pi}^{I=0}. \quad (5)$$

由于 D 波的共振区位于 1.2 GeV 以上, 在计算中可以忽略 $\pi\pi$ 的 D 波末态相互作用, D 波背景项由直接项树图中的 D 波成分 V_{0D} 提供. 在考虑了 $\pi\pi$ S 波末态相互作用后, 完整的跃迁振幅可以写为

$$t = V_0 + V_{0S} \cdot G \cdot 2t_{\pi\pi, \pi\pi}^{I=0} + V_X^{\text{tree}} + g_{nm} \varepsilon'_\mu \varepsilon_\nu^* G_X^{\mu\nu} \cdot 2t_{\pi\pi, \pi\pi}^{I=0}. \quad (6)$$

其中 G 和 $G_X^{\mu\nu}$ 分别是图 1(b), (d) 中两介子圈和三粒子圈传播子分别为

$$G = i \int \frac{dq^4}{(2\pi)^4} \frac{1}{q^2 - m_\pi^2 + i\varepsilon} \frac{1}{(p' - p - q)^2 - m_\pi^2 + i\varepsilon}, \quad (7)$$

和

$$G_X^{\mu\nu} = i \int \frac{dq^4}{(2\pi)^4} \frac{-g^{\mu\nu} + p_X^\mu p_X^\nu / m_X^2}{p_X^2 - m_X^2 + i\varepsilon} \times \frac{1}{q^2 - m_\pi^2 + i\varepsilon} \frac{1}{(p' - p - q)^2 - m_\pi^2 + i\varepsilon}, \quad (8)$$

其中 p' 和 p 分别为初末态重夸克偶素的四动量. 圈图的计算采取动量截断的正规化方式, 所取截断与 $\pi\pi$ 散射^[12]中的一致, 取为 $q_{\text{max}} = 1.1 \text{ GeV}$.

微分宽度可以表示为^[17]

$$\frac{d\Gamma}{dm_{\pi\pi} d\cos\theta_\pi^*} = \frac{1}{8M^2(2\pi)^3} \sum \sum |t|^2 |\mathbf{p}_1^*| |\mathbf{p}_3|, \quad (9)$$

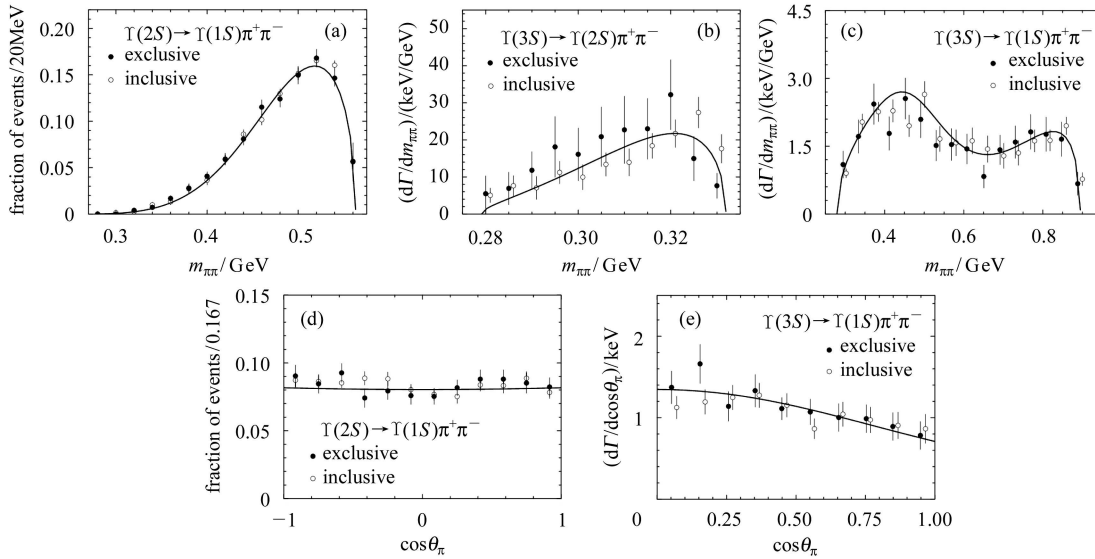
其中 $m_{\pi\pi}$ 是末态 $\pi^+\pi^-$ 的不变质量, θ_π^* 是 π^+ 在 $\pi^+\pi^-$ 质心系中的运动方向和 $\pi^+\pi^-$ 系统在实验室系中的运动方向的夹角, M 是初态粒子的质量, $|\mathbf{p}_1^*|$ 是 π^+ 在 $\pi^+\pi^-$ 质心系中的动量大小, $|\mathbf{p}_3|$ 则是末态重夸克偶素在实验室系中的动量大小. 由方程 (9), 可以分别计算衰变的不变质量谱以及角分布.

计算结果表明通过引入级联衰变的机制, 并用手征幺正方法处理 $\pi\pi$ 的 S 波末态相互作用, 衰变 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ 可以得到很好的描述. 同时, 其他各 $\Upsilon(nS)$ 态之间的 $\pi^+\pi^-$ 跃迁也同样能够得到解释. 拟合结果如图 2 所示, 所用参数见表 1.

表 1 最佳拟合时所用的参数

decay	g_1 / GeV	g_2/g_1	g_3/g_1	g_X / GeV^2	m_X / GeV	Γ_X / GeV
$2 \rightarrow 1$	0.0886	-0.230	0	-2.316		
$3 \rightarrow 2$	0.769	-0.230	0	-0.00418	10.080	0.655
$3 \rightarrow 1$	0.00546	-0.230	4.949	4.712		

注: 其中以 $n \rightarrow m$ 表示跃迁 $\Upsilon(nS) \rightarrow \Upsilon(mS)\pi^+\pi^-$.

图 2 $\Upsilon(nS) \rightarrow \Upsilon(mS)\pi^+\pi^-$ 的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱以及 $\cos\theta_\pi^*$ 分布

3 结果与讨论

利用手征幺正方法研究了衰变 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$. 通过引入一个 $J^P = 1^+, I = 1$ 的中间态, 该衰变的 $\pi^+\pi^-$ 不变质量谱和 $\cos\theta_\pi^*$ 角分布都能够得到很好的解释. 同时, 其他 $\Upsilon(nS)$ 各态之间的 $\pi^+\pi^-$ 跃迁也能得到很好的描述. 通过拟合 CLEO 的数据, 预言这个态的质量为 $m_X = 10.08\text{GeV}$, 宽度为 $\Gamma_X = 0.655\text{GeV}$. 虽然模型是在强子层次上的, 但仍然容许对 X 的结构做一个猜测. 由于 X 的同位旋为 1, 最低 Fock 空间应含有 $q\bar{q}$ ($q = u, d$), 而其质量大约为 10.08GeV , 宽度约为 0.655GeV , 最低 Fock 空间还应含有 $b\bar{b}$. 虽然 $b\bar{b}$ 可以湮没, 但是由于 X 的质量 $\sim 10\text{GeV}$, 如果是轻介子 $q\bar{q}$ ($q = u, d$) 的高激发态, 则会非常容易衰变, 其宽度会远大于 1GeV . 因此, 所引入的中间

态 X 的最低 Fock 空间应该是 $b\bar{b}q\bar{q}$. 它可能是一个四夸克态, 或 $B\bar{B}$ 束缚态, 束缚能为 $2m_B - m_X \approx 0.48\text{GeV}$.

应该注意, CLEO 的 Dalitz 图中并不能看到相应于 $\Upsilon(1S)\pi$ 的共振态^[4]. 在我们的工作中, 中间态 X 的质量是 10.08GeV , 虽然处于 Dalitz 图的范围之内 ($m_{\Upsilon(1S)\pi}$ 的范围是 $9.6\text{--}10.2\text{GeV}$), 但是由于其宽度 0.655GeV 较大, 因此在 Dalitz 图中的表现是很微弱的, 和 CLEO 的 Dalitz 图并不矛盾.

类似的机制已在文献[9]中被提出. 在文献[9]中, 所引入中间态粒子的质量是 $10.4\text{--}10.8\text{GeV}$, 能够较好地描述 $\Upsilon(nS)$ 衰变的 $\pi\pi$ 不变质量谱, 但不能描述 $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ 的 $\cos\theta_\pi^*$ 分布. 在我们的模型中, 如果采取文献[9]中的典型质量和宽度, $m_X = 10.5\text{GeV}$, $\Gamma_X = 0.15\text{GeV}$, 同样不能得到与实验相符的角分布.

参考文献(References)

- 1 Nakano T et al (LEPS Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2003, **91**: 012002
- 2 BAI J Z et al (BES Collaboration). Phys. Rev., 2000, **D62**: 032002
- 3 Butler F et al (CLEO Collaboration). Phys. Rev., 1994, **D49**: 40
- 4 Alexander J P et al (CLEO Collaboration). Phys. Rev., 1998, **D58**: 052004
- 5 ZHOU H Y, KUANG Y P. Phys. Rev., 1991, **D44**: 756
- 6 Chakravarty S, Ko P. Phys. Rev., 1993, **D48**: 1205
- 7 Chakravarty S, Kim S M, Ko P. Phys. Rev., 1993, **D48**: 1212
- 8 Chakravarty S, Kim S M, Ko P. Phys. Rev., 1994, **D50**: 389
- 9 Anisovich V V et al. Phys. Rev., 1995, **D51**: R4619
- 10 Mannel T, Urech R. Z. Phys., 1997, **C73**: 541
- 11 Lähde T A, Riska D O. Nucl. Phys., 2002, **A707**: 425
- 12 Oller J A, Oset E. Nucl. Phys., 1997, **A620**: 438; 1999, **A652**: 407
- 13 Oset E, Ramos A. Nucl. Phys., 1998, **A635**: 99
- 14 GUO F K, SHEN P N, CHANG H C et al. Nucl. Phys., 2005, **A761**: 269
- 15 Brown L, Cahn R. Phys. Rev. Lett., 1975, **35**: 1
- 16 YAN M L, WEI Y, ZHUANG T L. Eur. Phys. J., 1999, **C7**: 61
- 17 Eidelman S et al (Particle Data Group). Phys. Lett., 2004, **B592**: 1

Decay $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ and a Possible $b\bar{b}q\bar{q}$ State*

GUO Feng-Kun^{1,5;1)} SHEN Peng-Nian^{1,2,3,4} JIANG Huan-Qing^{1,2,3,4,6} PING Rong-Gang^{1,2}

1 (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

2 (CCAST(World Lab.), Beijing 100080, China)

3 (Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

4 (Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

5 (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

6 (Southwest China Normal University, Chongqing 400715, China)

Abstract The decay process $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ are re-visited using a Chiral Unitary Theory (ChUT) to include the important $\pi\pi$ S wave final state interaction (FSI). It is found that when an additional intermediate state with $J^P = 1^+$ and $I = 1$ is introduced, the $\pi\pi$ invariant mass spectrum and the $\cos\theta_\pi^*$ distribution in the $\Upsilon(3S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ process can simultaneously be well-explained, and a good description for other bottomonium $\pi^+\pi^-$ transitions can be obtained consistently. As a result, the mass and the width of the intermediate state are predicted to be $M_X = 10.08\text{GeV}$ and $\Gamma_X = 0.655\text{GeV}$, respectively. From the quark content analysis, this state should be a $b\bar{b}q\bar{q}$ state.

Key words chiral unitary theory, Υ decay, $\pi\pi$ S wave final state interaction, tetraquark state

Received 21 March 2005

*Supported by National Natural Science Foundation of China (90103020, 10475089, 10435080, 10447130) and CAS Knowledge Innovation Key-Project (KJCX2-SW-N02)

1) E-mail: guofk@mail.ihep.ac.cn