

充足的束
稳定的束
AMY 组簇

一种新的重夸克偶素唯象势

林和芬 宋孝同

(杭州大学物理系)

何 炬

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文在夸克势模型已有工作的基础上,借助 QCD 和实验方面的启示,提出一种新的唯象势模型.在两体薛定谔方程基础上,利用数值计算方法求解了重夸克偶素 $c\bar{c}$ 、 $b\bar{b}$ 和 $t\bar{t}$ 系统的能谱、轻子衰变和电磁跃迁宽度.大多数理论结果与实验数据很好地符合.

一、引 言

自从七十年代发现 J/ψ 和 Υ 粒子以来,人们在理论上对重夸克偶素进行了大量的探讨^[1-6],试图解释重夸克偶素谱及其它性质.其中非相对论势模型方法是一最为常用的方法.

势模型的基本假定:(1)能级和波函数满足两体非相对论薛定谔方程.(2)位势的主要部分是中心位势.(3)位势与味道无关,并体现 QCD 导出的性质.

迄今为止,人们已提出了多种势模型.其中几种常用而较为成功的势模型是: Cornell 势^[4], Martin 势^[5], Richardson 势^[6]等等.大体说来,这些模型有不少成功之处,能较准确地说明 J/ψ 和 Υ 家族的质量谱,但某些辐射衰变宽度的计算值与实验相差 2—3 倍.本文通过引入一新的位势模型期望理论与实验符合的情况得到改善.在第二部分,讨论了平方根迭加势的提出.第三部分,计算了 $c\bar{c}$ 、 $b\bar{b}$ 及 $t\bar{t}$ 偶素体系的质量谱、轻子衰变宽度、电磁跃迁宽度以及其它一些性质.第四部分是总结和讨论.

二、平方根迭加势

QCD 理论是目前最有希望的描述强相互作用的理论.因此,它是我们提出势模型的理论基础.我们知道, QCD 是一个非阿贝尔的规范理论,其耦合系数是跑动的.当夸克间的动量交换 Q^2 在几个 GeV^2 区域时,仅考虑单胶子交换图的贡献是不够的,此时还需

本文 1986 年 5 月 5 日收到.

oup³⁾

n in the
liminary
been tes-
Methylel,
sampling

Zhu Guo

Zhen-an

计及多胶子交换图的贡献,尤其是双圈图的贡献.对同一 Q^2 值,双圈图给出的 α_s 比单圈图给出的要小,那么是否可以设想考虑至更高级的效应会使 α_s 值下降更多.这样,其效果将使单胶子交换势的奇异性得到减弱. W. Buchmüller 等^[7]对这问题已有过较细致的讨论.

另一方面,根据矢量介子轻子衰变宽度的一个近乎普适的经验定律

$$\Gamma(V \rightarrow l\bar{l})/e_q^2 \simeq \text{const.}, \quad (2.1)$$

而根据 Van Royen-Weisskopf 衰变宽度公式^[11]

$$\Gamma(V \rightarrow l\bar{l}) = 16\pi\alpha^2 e_q^2 |\phi_n(0)|^2 / M_V^2, \quad (2.2)$$

其中, M_V 是矢量介子的质量. 因此,有

$$|\phi_n(0)|^2 \propto M_V^2. \quad (2.3)$$

如果假设位势的负幂部分为

$$V(r) = A(m)r^\delta, \quad (2.4)$$

m 是组成子夸克的质量. 那么可得

$$|\phi_n(0)|^2 \simeq [mA(m)]^{2/(\delta+2)}, \quad (2.5)$$

假定势与味道无关,那么只有当 $\delta = -\frac{1}{2}$ 时, $|\phi_n(0)|^2$ 与 M_V 的关系与经验定律要求的(2.3)式一致. 此时,负幂部分势可表成

$$V(r) = Ar^{-1/2}. \quad (2.6)$$

因此,可以建议一平方根反比形式的势来表达减弱后的单胶子交换势部分.

对大距离禁闭势部分,本文取平方根正比形式即 $V(r) \propto \sqrt{r}$. 这主要是出于对称性的考虑,同时也兼顾到夸克的禁闭性质而唯象引入.

综上所述,本文提出如下形式的平方根迭加势模型

$$V(r) = a\sqrt{r} - b/\sqrt{r}. \quad (2.7)$$

把该势代入两体薛定谔方程,用标准数值计算方法求解方程^[1]

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR(r)}{dr} \right) - \left[\frac{m_q}{\hbar^2} (E - V(r)) - \frac{l(l+1)}{r^2} \right] R(r) = 0. \quad (2.8)$$

我们调试参数使 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 偶素体系的 n^3s_1 态的质量与实验值^[8]同时得到最佳符合. 结果获得

$$\begin{aligned} a &= 1.15 \text{ GeV/fm}^{1/2}, & b &= 0.41 \text{ GeV}\cdot\text{fm}^{1/2}, \\ m_c &= 1.8 \text{ GeV}, & m_b &= 5.2 \text{ GeV}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

利用该组参数,本文计算了重夸克偶素体系的一系列性质. 下面分别讨论之.

三、重夸克偶素族计算结果

1. $c\bar{c}$ 、 $b\bar{b}$ 及 $t\bar{t}$ 体系的质量谱

1) 我们曾利用本文使用的计算程序重复过 Cornell 势的结果.

α_s 比单圈
这样, 其效
过较细致

表 1 平方根势模型对 $c\bar{c}$ 谱的预言: 质量、轻子衰变宽度比、均方根半径、均方速度, 以及与实验值和先前几种势模型理论预言值的比较

状态	质 量 (MeV)					$\Gamma_{e^+e^-(ns)}/\Gamma_{e^+e^-(1S)}$					$\langle r^2 \rangle^{1/2}$ (fm)	$\langle v^2 \rangle / C^2$
	实验数据	平方根势	Cornell	Martin	Richardson	实验数据	平方根势	Cornell	Martin	Richardson		
(2.1) 1S	3096.9 ± 0.1	3096.9*	3095*	3095*	3095*	/	/	/	/	/	0.38	0.19
(2.2) 1P	3521	3524.3	3522*	3502	3514						0.63	0.08
(2.3) 2S	3686.0 ± 0.1	3672.5	3684*	3687	3684*	0.45 ± 0.08	0.39	0.44	0.40	0.45	0.82	0.21
(2.4) 1D	3770 ± 3	3791.2	3810	3787	3799							
(2.5) 2P		3907.3			3950						1.05	0.14
(2.6) 3S	4030 ± 5	4017.2	4110	4032	4096	0.16 ± 0.04	0.24	0.31	0.25	0.32	1.23	0.22
(2.7) 2D	4159 ± 20	4090.4	4190	4092	4172							
(2.8) 3P		4185.6			4308						1.45	0.18
(2.9) 4S	4415 ± 6	4275.5	4460	4280	4440	0.11 ± 0.04	0.17	0.23	0.16	0.24	1.62	0.24
(2.7) 3D		4327.6										
(2.7) 4P		4409.5									1.83	0.21
(2.8) 5S		4486.9	4790				0.14	0.17			1.99	0.26

* 输入值。

定律要求

出于对称

符合。结

(2.9)

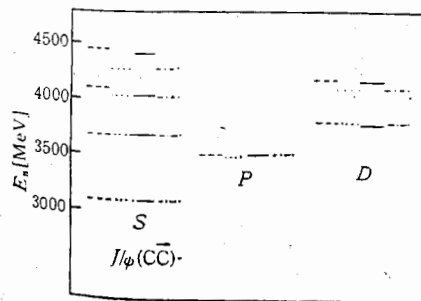


图 1 平方根势, Cornell 势, Martin 势对 $(c\bar{c})$ 三重态的计算结果与实验能级的比较
---Cornell...Martin — Experiment
---平方根势

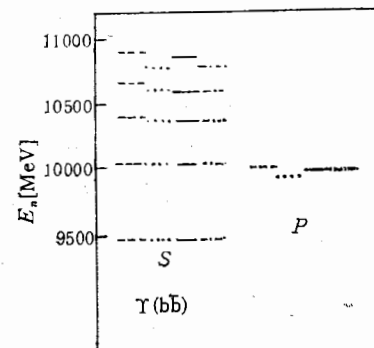


图 2 平方根势 Cornell 势, Martin 势对 $(b\bar{b})$ 三重态的计算结果与实验能级的比较
---Cornell...Martin — Experiment
---平方根势

表 2 平方根势模型对 $b\bar{b}$ 谱的预言: 质量、轻子衰变宽度比、均方根半径、均方速度, 以及与实验值和先前几种势模型理论预言值的比较

状态	质 量 (MeV)					$\Gamma_{e^+e^-(ns)}/\Gamma_{e^+e^-(1S)}$					$\langle r^2 \rangle^{1/2}$ (fm)	$\langle \frac{v^2}{C^2} \rangle$
	实验数据	平方根势	Cornell	Martin	Richardson	实验数据	平方根势	Cornell	Martin	Richardson		
1S	9460.0 ±1.3	9460.0*	9460*	9460*	9452*	/	/	/	/	/	0.22	0.068
1P	9900±3	9902.0	9960	9861	9888						0.37	0.027
2S	10023.4 ±0.3	10034.4	10050	10025	10007	0.46 ±0.03	0.43	0.36	0.51	0.42	0.49	0.067
1D		10161.6	10200		10137							
2P	10256±5	10260.6	10310	10360	10241						0.64	0.045
3S	10355.5 ±0.5	10355.8	10400		10338	0.33 ±0.03	0.28	0.25	0.35	0.30	0.75	0.070
2D		10432.5	10500		10421							
3P		10512.3	10600		10512						0.90	0.055
4S	10577.5 ±4	10588.9	10670	10600	10598	0.19 ±0.03	0.22	0.20	0.27	0.27	1.00	0.074
3D		10642.7	10750									
4P		10710.9									1.14	0.063
5S	10868±5	10776.0	10920	10760		0.14 ±0.01	0.18		0.21		1.24	0.078

* 输入值。

从平方根势(2.7)和参数(2.9)出发, 利用数值计算方法求解方程(2.8), 可以得到重夸克偶素体系的质量谱及其波函数。本文预言的 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 偶素体系的各种性质如质量谱、均方根半径及均方速度分别总结在表 1 和表 2 中。为了便于比较, 同时列出了部分现有的实验值及先前模型 Martin、Cornell、Richardson 势预言的理论值。

图 1 和图 2 是 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 谱的比较图。

从表 1 和图 1 看到, $c\bar{c}$ 偶素体系低能级 (如 1S、1P、2S 和 1D) 的理论值与实验数据符合得相当好, 但是高能级 (如 3S、2D 和 4S) 的理论值与实验值的符合程度就明显不如低能级。我们认为, 造成这种差异的原因主要是:

(1) 3S、2D 和 4S 这些能级均位于阈 3.726 GeV 之上, 而此时的 $c\bar{c}$ 态可以通过 OZI 规则允许的衰变成为粲粒子体系 (见图 3)。实际上, 此时 $c\bar{c}$ 间的禁闭力的作用已大大减弱。在一定的条件下, 正反 c 夸克可以脱离原来的束缚区域, 分别与新产生出来的轻夸克组成新的束缚系统, 自成体系。因此, 对于阈值以下能谱有效的简单势模型可能已不再适

表
状

用。
(
c \bar{c} g 态
(
是随
完全

又
况一
且相
合实
小
r < 0
根据
就可
50 Ge
(见表
(
还存
式的

$\alpha^{1/2} \langle \frac{v^2}{c^2} \rangle$	
22	0.068
37	0.027
49	0.067
64	0.045
75	0.070
90	0.055
00	0.074
14	0.063
24	0.078

导致重夸克量谱、均方根半径和均方速度
实验数据不如低能态 OZI 规则
已大大减小轻夸克已不再适

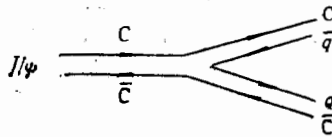


图 3 OZI 规则允许的衰变过程

表 3 平方根势模型对 $t\bar{t}$ 谱的预言: t 夸克质量为 40GeV, 45GeV 和 50GeV 时的 $t\bar{t}$ 质量谱, 以及 m_t 为 45GeV 时的轻子衰变衰宽度比、均方根半径和均方速度

状 态	$t\bar{t}$ 质量 (GeV)			$\frac{\Gamma_{e^+e^-}(ns)}{\Gamma_{e^+e^-}(1S)}$	$\langle r^2 \rangle^{1/2}$ (fm)	$\langle v^2/c^2 \rangle$
	$m_t = 40\text{GeV}$	$m_t = 45\text{GeV}$	$m_t = 50\text{GeV}$	$m_t = 45\text{GeV}$	$m_t = 45\text{GeV}$	$m_t = 45\text{GeV}$
1S	76.732	86.112	95.740	/	0.063	0.0106
1P	77.334	86.715	96.356		0.116	0.0036
2S	77.462	86.844	96.486	0.37	0.154	0.0086
2P	77.723	87.103	96.749		0.213	0.0053
3S	77.806	87.186	96.832	0.22	0.250	0.0081
3P	77.970	87.348	96.996		0.310	0.0060
4S	78.033	87.411	97.058	0.16	0.346	0.0079
4P	78.153	87.530	97.178		0.404	0.0064
5S	78.204	87.580	97.228	0.13	0.440	0.0079

用。为此, Cornell 组^[4]曾提出衰变道耦合模型, 但未得到满意的结果。

(2) Ono^[1] 认为实验上观察到的 3S、2D 和 4S 态不是纯粹的 $c\bar{c}$ 束缚态, 而是 $c\bar{c}$ 态和 $c\bar{c}g$ 态的混合态。

(3) 相对论修正的影响^[9,13]。虽然 $c\bar{c}$ 体系内部具有相当好的非相对论运动性质, 但是随主量子数的增加, 能级差(对基态而言)与夸克质量之比也随之增大, 相对论修正不能完全予以忽略。

对 $b\bar{b}$ 偶素体系, 理论预言值基本上与实验值符合(见表 2 和图 2)。不过, 与 $c\bar{c}$ 的情况一样, 高能态的符合程度比低能态差, 原因同上。只是产生 $B\bar{B}$ 的阈值是 10.550 GeV, 且相对论修正的影响也明显地比 $c\bar{c}$ 体系小得多。这大概是因为 $b\bar{b}$ 系统比 $c\bar{c}$ 系统更符合实验值的一个重要原因。

从势模型的观点看来, J/ψ 和 Υ 粒子能谱对位势的短程行为不大敏感, 特别是对 $r < 0.2\text{ fm}$ 的区域。为了进一步了解相互作用的近距性质, 需要研究更重的 t 夸克偶素。根据目前的实验数据推测, t 夸克的质量在 40 GeV 至 50 GeV 范围内^[10]。研究 $t\bar{t}$ 的性质, 就可分析出 $r = 0.1\text{ fm}$ 甚至更小距离上势的行为。本文分别对 $m_t = 40\text{ GeV}, 45\text{ GeV}, 50\text{ GeV}$ 时的 $t\bar{t}$ 偶素体系的质量作了预言, 并计算了 $m_t = 45\text{ GeV}$ 时 $t\bar{t}$ 偶素系统的性质(见表 3)。

(2.7)式的位势模型中没有涉及夸克自旋的作用。实际上, 除了中心部分的位势外, 还存在自旋-自旋相互作用, 自旋-轨道相互作用及张量力的作用。为此, 本文引入如下形式的与自旋相关的附加势

$$V_{ad} = (V'' + 2V'/r)(2s^2 - 3)/6m^2 + (3V' - s')L \cdot s/2m^2r \\ + (V'/r - V'')[3(s \cdot \hat{r})(s \cdot \hat{r}) - s^2]/6m^2. \quad (3.1)$$

其中, $s = s_1 + s_2$, m 是夸克质量, V 表示位势的矢量部分即负幂部分, $V' = dV/dr$, $V'' = d^2V/dr^2$, s 表示势的标量部分即禁闭部分. 利用 (3.1), 可以计算得到 $c\bar{c}$ 、 $b\bar{b}$ 及 $t\bar{t}$ 偶素体系 3P_J 态分裂(见表 4).

表 4 $c\bar{c}$ 、 $b\bar{b}$ 和 $t\bar{t}$ 偶素体系的 n^3P 态的精细分裂

状 态		$c\bar{c}$ 理论值 MeV	$c\bar{c}$ 实验值 MeV	$b\bar{b}$ 理论值 MeV	$b\bar{b}$ 实验值 MeV	$t\bar{t}$ 理论值 GeV
1P	1^3P_0	3464.2	3415.0 ± 1.0	9871.2	9872.9 ± 5.8	86.706
	1^3P_1	3511.9	3510.0 ± 0.6	9894.5	9894.5 ± 3.5	86.713
	1^3P_2	3543.8	3555.8 ± 0.6	9912.7	9914.6 ± 2.4	86.718
2P	2^3P_0	3866.2		10240.7		87.098
	2^3P_1	3898.7		10255.7	10253.7 ± 3.4	87.102
	2^3P_2	3920.8		10267.5	10271.0 ± 2.4	87.105
3P	3^3P_0	4152.9		10497.1		87.345
	3^3P_1	4178.5		10508.6		87.347
	3^3P_2	4196.3		10517.6		87.350
4P	4^3P_0	4381.9		10698.4		87.527
	4^3P_1	4403.5		10707.8		87.529
	4^3P_2	4418.7		10715.3		87.531

2. 轻子衰变过程

矢量介子 n^3S_1 态可以通过单光子中间态衰变为轻子对. 假如束缚矢量介子的内部运动可以看成是非相对论性的, n^3S_1 态的轻子衰变宽度公式^[11]为

$$\Gamma(n^3S_1 \rightarrow l^+l^-) = (16\pi\alpha^2 e_q^2 / M_{n_0}^2) |\psi_{n_0}(0)|^2 (1 + 2m_l^2 / M_{n_0}^2) (1 - 4m_l^2 / M_{n_0}^2)^{1/2}. \quad (3.2)$$

式中, α 为精细结构常数, e_q 为组成介子的夸克电荷 (以质子电荷为单位), 对 $c\bar{c}$ 和 $t\bar{t}$, $e_q = \frac{2}{3}$; 对 $b\bar{b}$, $e_q = -\frac{1}{3}$. M_{n_0} 为处于 n^3S_1 态介子的总质量, m_l 是轻子质量, $\psi_{n_0}(0)$ 是原点波函数.

考虑 QCD 一级辐射修正, (3.2) 式应改写为

$$\Gamma(n^3S_1 \rightarrow l^+l^-) = (16\pi\alpha^2 e_q^2 / M_{n_0}^2) |\psi_{n_0}(0)|^2 (1 - 16\alpha_s(M^2) / 3\pi). \quad (3.3)$$

α_s 是强耦合系数, 对于 $\alpha_s \sim 0.2-0.5$, 辐射修正因子达到 0.15—0.66, 这使理论计算带有很大的不确定性. 不过, 相对轻子衰变宽度 $\Gamma_{l^+l^-}(nS) / \Gamma_{l^+l^-}(1S)$ 基本上不受影响.

$c\bar{c}$ 、 $b\bar{b}$ 和 $t\bar{t}$ 偶素体系的相对轻子宽度以及相应的实验值^[8] 和 Cornell 等势的预言值均列在上面的表 1、表 2 和表 3 中. 可以看到, 本文预言的相对轻子宽度基本上在实验误差范围左右.

3. 辐射衰变过程

本文把放出光子的过程统称为辐射衰变过程. 先来看发生在重夸克偶素体系内部具有相同总夸克自旋三重态之间或三重态与单态之间的辐射跃迁过程即 $E1$ 和 $M1$ 跃迁过程. 自旋三重态 S 波和 P 波态间的跃迁宽度为

$$(3.1) \\ = dV/dr, \\ c\bar{c}, b\bar{b} \text{ 及 } t\bar{t}$$

$t\bar{t}$ 理论值 GeV
86.706
86.713
86.718
87.098
87.102
87.105
87.345
87.347
87.350
87.527
87.529
87.531

z 的内部运

$$(3.2) \\ \text{对 } c\bar{c} \text{ 和 } t\bar{t}, \\ \text{量, } \psi_n(0)$$

$$(3.3) \\ \text{理论计算带} \\ \text{影响的} \\ \text{的预言值} \\ \text{在实验误}$$

系内部具
1 跃迁过

表 5 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 偶素体系的电磁衰变宽度(单位: keV)

电磁衰变过程	$c\bar{c}$				$b\bar{b}$					
	实验值	平方根势	Cornell	Martin	Richardson	实验值	平方根势	Cornell	Martin	Richardson
$E1\ 1P(J=2) \rightarrow 1S$	450^{+279}_{-171}	381	398	394	497		36	26	36	34
$(J=1)$	<390	307	289	295	372		32	20	28	26
$(J=0)$	97 ± 38	218	141	141	178		27	13	18	17
$2S \rightarrow 1P(J=2)$	17 ± 5	31	33	33	39	1.81 ± 0.41	2.6	3.1	2.4	3.1
$(J=1)$	19 ± 5	36	45	45	54	1.75 ± 0.41	2.3	4.3	3.3	4.2
$(J=0)$	21 ± 6	26	50	51	61	1.04 ± 0.41	1.2	3.4	2.6	3.3
$3S \rightarrow 1P(J=2)$		0.28					7.4×10^{-3}			
$(J=1)$		0.20					5.0×10^{-3}			
$(J=0)$		0.085					1.9×10^{-3}			
$2P(J=2) \rightarrow 1S$		65					8.0			
$(J=1)$		61					7.7			
$(J=0)$		54					7.3			
$2P(J=2) \rightarrow 2S$		210					16			
$(J=1)$		162					14			
$(J=0)$		103					11			
$3S \rightarrow 2P(J=2)$		7					2.8			
$(J=1)$		41					2.5			
$(J=0)$		28					1.2			
$M1\ 1^3S_1 \rightarrow 1^1S_0$	0.50 ± 0.23	1.97	1.21	1.23						
$2^3S_1 \rightarrow 2^1S_0$	$0.43 - 2.8$	0.99			2.89					

$$\Gamma(^3S_1 \rightarrow ^3P_J + \gamma) = (4/27)(2J+1) \propto e_q^2 k^3 I^2, \quad (3.4)$$

$$\Gamma(^3P_J \rightarrow ^3S_1 + \gamma) = (4/9) \propto e_q^2 k^3 I^2. \quad (3.5)$$

其中,

$$I = \int_0^\infty r u_i(r) u_f(r) dr,$$

$u(r)$ 是约化波函数.

自旋三重态 3S_1 和单态 1S_0 间的 M1 跃迁宽度为

$$\Gamma(n^3S_1 \leftrightarrow n^1S_0) = (16/3)(2J_f + 1)(e_q^2/2m_q)^2 \propto k^3 |I|^2. \quad (3.6)$$

其中,

$$I = \int_0^\infty j_0\left(\frac{1}{2}kr\right) u_i(r) u_f(r) dr,$$

j_0 为零阶球贝塞尔函数.

本文对 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 偶素体系的 E1 和 M1 跃迁的理论预言值见表 5, 表 5 同时也列出了现有的实验值^[10]和 Cornell 等势的理论计算值^[12].

从表 5 可以看到:

(1) $c\bar{c}$ 体系的 $2^3S_1 \rightarrow 1^3P_J$ 过程的理论计算结果几乎比实验值大 80%, $1^3P_J \rightarrow 1^3S_1$ 过程的理论计算值与实验符合较好, 但 $1^3P_0 \rightarrow 1^3S_1$ 的理论计算宽度差不多要比实验值大一倍. 别的过程目前还无可用的实验数据. 导致理论值偏大的主要原因可能是相对论修正的影响.

(2) $c\bar{c}$ 体系 M1 跃迁宽度的理论预言值基本上与实验值一致.

(3) $b\bar{b}$ 偶素族 E1 跃迁过程 $2^3S_1 \rightarrow 1^3P_J$ 宽度的理论值比实验值稍大, 最大偏差在 25% 左右. 这是由于 $b\bar{b}$ 体系的非相对论近似程度比 $c\bar{c}$ 体系好.

对于矢量介子衰变到末态全部是光子的过程和衰变到光子和轻强子的过程, 本文作了粗略估计(表 6). 另外, 对于重夸克偶素衰变为轻强子的过程, 也作了估算, 结果见表 6.

表 6 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 体系的 n^3S_1 态到 $3\gamma, \gamma + \text{hadrons}$ 及 39 的衰变宽度

$c\bar{c}$ 衰变模式	理论宽度值 keV	实验宽度值 keV	$b\bar{b}$ 衰变模式	理论宽度值 keV	实验宽度值 keV
$\psi \rightarrow 3\gamma$	0.005	~ 0.004	$\Upsilon \rightarrow 3\gamma$	0.53×10^{-4}	
$\psi' \rightarrow 3\gamma$	0.0022		$\Upsilon' \rightarrow 3\gamma$	0.23×10^{-4}	
$\psi \rightarrow \gamma + \text{hadrons}$	9.83		$\Upsilon \rightarrow \gamma + \text{hadrons}$	1.08	
$\psi \rightarrow 39$	69.88	~ 50	$\Upsilon \rightarrow 39$	25.98	
$\psi' \rightarrow 39$	23.67	~ 100	$\Upsilon' \rightarrow 39$	10.67	

四、总结和讨论

在本文的工作中, 我们利用平方根迭加势系统地研究了重夸克偶素束缚系统的各种

$\Upsilon(\gamma)[\text{GeV}]$
 性质符合
 可以由于势的论势定的距离
 $b\bar{b}$ 系所以性质
 是偶
 开放
 α_s 的
 功的
 系更
 在这

(3.4)

(3.5)

(3.6)

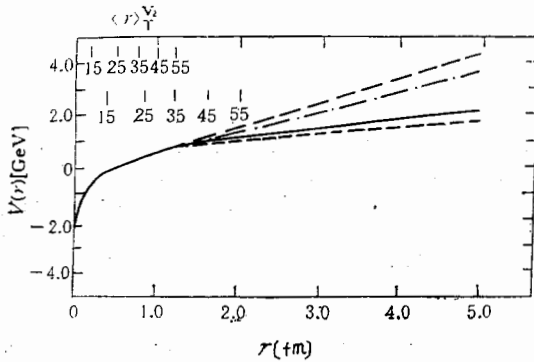


图 4 平移到 $r = 0.5 \text{ fm}$ 处四种势曲线的比较

---Cornell -·-Richardson ——平方根势
-----Martin

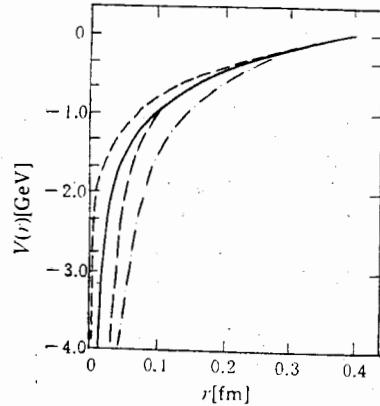


图 5 平行到 $r = 0.4 \text{ fm}$ 处四种势的短程行为

---Martin ——平方根势 ---Cornell
-·-Richardson

时也列出了

$1^3P_J \rightarrow 1^3S_1$
比实验值大
是相对论修

最大偏差在

程, 本文作
, 结果见表

实验宽度值
keV

性质, 并与几种较为成功的势模型相比, 在轻子衰变和辐射衰变宽度等方面改进了与实验符合的程度, 结果已在上面文章中列出。

从上述表 1 和表 2 中列出的四种势模型理论预言值间的比较以及与实验数据的比较可以看到, 四种势模型预言的 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 能谱除少数高能态外, 均与实验值很好符合。这是由于这些位势在 $0.3 \text{ fm} < r < 1 \text{ fm}$ 范围内的行为非常相似(见图 4)。因此, 尽管不同位势的大距离行为和小距离行为差别较大, 还是给出了一致的能谱。这一方面说明非相对论势模型用于重夸克偶素系统有一定的合理性, 但另一方面也表明非相对论势模型有一定的局限性。然而, 在中间距离上各种位势的一致性说明这种位势相当真实地反映了该距离范围内夸克、反夸克间的相互作用。

图 5 画出了四种势的短程行为。可以看到, 各种势的短程行为是不同, 但这对 $c\bar{c}$ 和 $b\bar{b}$ 系统的影响不大。因按本文的计算, 最小的 $b\bar{b}$ 偶素系统基态的均方根半径是 0.22 fm , 所以, 对于小距离势的真实性有待于进一步的实验结果。一般认为, 对 $t\bar{t}$ 组成的偶素体系性质的观察将能给我们提供更精确的有关夸克、反夸克间势的短程行为的知识。因此, $t\bar{t}$ 偶素体系的实验数据是对各种势模型的一个重要检验。

本文提出的平方根势模型的计算结果还有一些不确定因素值得进一步讨论:

(1) 开放道的影响。简单的势模型在开放道以上已不能很好地适用, 因此, 如何考虑开放道的影响, 尚需进一步探讨。

(2) QCD 辐射修正的不定性。这主要涉及是否考虑 QCD 辐射修正和强耦合参数 α_s 的取值问题。目前这还是个有争议的问题。

(3) 相对论修正的影响。以非相对论方法近似地处理重夸克偶素体系应该说是很成功的。体系的质量越大, 近似程度就越好。例如 $b\bar{b}$ 体系各种性质的理论预言值比 $c\bar{c}$ 体系更接近实验值。这反过来表明, 对 $c\bar{c}$ 体系相对论修正的影响是不可忽略的。不少人已在这方面作过努力。限于经费, 本文未能对此进行计算。

作者对黄涛同志和丁亦兵同志的热情帮助和支持表示衷心感谢。

系统的各种

参 考 文 献

- [1] Seiji Ono, *Phys. Rev.*, **D28**(1983), 558.
 [2] G. Bhanot and S. Rudaz, *Phys. Lett.*, **78B**(1978), 119.
 [3] H. Krasemann and S. Ono, *Nucl. Phys.*, **B154**(1979), 283.
 [4] E. Eichten, K. Gottfried, T. Kinoshita, K. D. Lane, and T. M. Yan, *Phys. Rev.*, **D17**(1978), 3090; **D21**(1980), 313; **D21**(1980), 203; See also E. Eichten et al., *Phys. Lett.*, **34**(1975), 369.
 [5] A. Martin, *Phys. Lett.*, **93B**(1980), 338; **100B**(1981), 511; S. N. Jena, *Phys. Rev.*, **D28**(1983), 2326.
 [6] J. L. Richardson, *Phys. Lett.*, **82B**(1979), 272.
 [7] W. Buchmüller and S.-H. H. Tye, *Phys. Rev.*, **D24**(1981), 132.
 [8] Particle properties data booklet (printed at CERN) (1984).
 [9] R. Mcclary et al., *Phys. Rev.*, **D28**(1983), 1692.
 [10] Rosner, the Proceeding of 1985 International Symposium on Interaction for Leptons and Photons at High Energies, Kyoto, Japan.
 [11] R. Van Royen & V. Weisskopf, *Nuovo Cimento*, **50**(1967), 617.
 [12] P. Falkensteiner et al., *Z. Phys.*, **C23**(1984), 275.
 [13] E. Etlm and L. Schülke, *Il Nuovo Cimento*, **77A**(1983), 347; Lars Bergstrom et al., *Phys. Lett.*, **80B**(1979), 242.

A NEW POTENTIAL MODEL

LIN HE-FEN SONG XIAO-TONG

(Hangzhou University)

HE JU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

A new phenomenological potential model on interaction between quark and antiquark is proposed by the hint of QCD and experimental data. Spectroscopies, leptonic decay and electromagnetic transition widths of the heavy quarkonia, $c\bar{c}$, $b\bar{b}$ and $t\bar{t}$, are calculated using non-relativistic Schrödinger equation with numerical method. The most results of the model are well consistent with experimental data.

等
和
粒
子
是
粒
本
文
动
量
部
分
象
中
问
题
四
节
辐
射

的本

1)