

快报

# 重夸克偶素中的色屏蔽效应\*

董宇兵 余友文 王英才

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

### 摘 要

将夸克-反夸克的禁闭位选为含有色屏蔽效应的禁闭势, 计算了它对重夸克偶素  $c\bar{c}$  和  $b\bar{b}$  能谱的影响. 与通常选用的线性禁闭势相比, 含色屏蔽效应的禁闭势对  $\Psi(c\bar{c})$  的高激发能级的轨道角动量可给出不同的预言, 并且对  $\psi$  能级的轻子衰变宽度有明显的改进.

通常重夸克偶素的势模型计算是在线性禁闭势的基础上进行的. 1986年 E. Laerman 等<sup>[1]</sup>在格点规范计算中考虑了虚费米圈图的贡献后发现, 在  $q-\bar{q}$  间距离较大时其位势比线性势明显偏低, 这一效应被称为色屏蔽效, 他们用唯象势  $V_\mu(1 - e^{-\mu r})$  来表示含色屏蔽效应的禁闭势. 我们曾建议用误差函数形式  $V_\mu \text{erf}(\mu_0 r)$  来表示<sup>[2]</sup>. 这两种唯象势定性特点相似, 定量上有差别, 下面将要给出的是误差函数型禁闭位的计算结果.

还需特别指出的是, 当  $r$  大时禁闭势趋向常数并不意味着这时夸克将会从一个色单态集团中分离出来而使色显露. 其物理图象是禁闭在色单态集团  $(q_1\bar{q}_2)_{(00)}$  中的价夸克受到夸克海的作用后, 与海中的夸克  $q_3$ , 反夸克  $\bar{q}_4$  形成两个新的色单态集团, 即  $(q_1\bar{q}_2)_{(00)} \rightarrow (q_1\bar{q}_4)_{(00)}(q_3\bar{q}_2)_{(00)}$ , 因而此时的  $q_1$  与  $\bar{q}_2$  的间距将有可能变得很大, 它们之间不再有强的相互作用了. 对这效应在本工作中仅在  $q_1-\bar{q}_2$  间引进一个唯象势来表示它. 在计算中将一般采用的线性禁闭势换成含色屏蔽效应的唯象禁闭势, 求解  $q-\bar{q}$  相对运动的 schrodinger 方程, 来探讨它对重夸克偶素结构的影响. 为了研究色屏蔽效应对物理量影响的主要特点, 先不考虑其它修正, 而只是把  $(q_1\bar{q}_2)_{(00)}$  系统的哈密顿量写为:

$$H = B_0 + m_1 + m_2 + H_0 + H_1 \quad (1)$$

$$H_0 = -\frac{1}{2\mu}\nabla_r^2 - \frac{4\alpha_s}{3r} + \frac{32\pi\alpha_s}{9m_1m_2}\delta(r)\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 + V^{\text{conf}} \quad (2)$$

$$H_1 = \frac{4\alpha_s}{3m_1m_2r^3}(3s_1 \cdot rs_2 \cdot r - s_1 \cdot s_2) + \frac{1}{2m_1m_2r}\left(\frac{4\alpha_s}{r^2} - \frac{d}{dr}V^{\text{conf}}\right)\mathbf{L} \cdot \mathbf{S} \quad (3)$$

$$V^{\text{conf}} = V_\mu \text{erf}(\mu_0 r) \quad (4)$$

公式中所用的各量都是熟知的, 在此不再作说明. 在具体求解时如参考文献[3]那样, 将

本文1992年10月17日收到.

\* 国家自然科学基金资助. 中国科学院 LWTZ-1298经费资助.

$\delta(r)$ 用它的渐近式来代替

$$f(r) = \frac{1}{4\pi r_0^3} e^{-r/r_0}, \quad \lim_{r_0 \rightarrow 0} f(r) = \delta(r) \quad (5)$$

式中  $r_0$  取为  $r_0 = 0.08m^{-0.6} \text{fm}$ , 这里  $m$  用 GeV 为单位. 首先严格求解 Schrödinger 方程  $H_0\psi = E\psi$ , 并将  $H_1$  作一级微扰. 计算中共有五个参数, 在一定合理的范围内选定  $\alpha, m, \mu_0$  和  $V_\mu$  后, 对  $c\bar{c}$  系统  $B_c$  由符合  $J/\psi$  实验能量 3097MeV 定出. 对  $b\bar{b}$  系统  $B_b$  由符合  $\gamma$  的实验能级 9460MeV 定出. 我们计算了  $c\bar{c}$  和  $b\bar{b}$  系统的能谱, 结果发现对  $c\bar{c}$  系统的  $J^{PC} = 1^{--}$  能级性质的指定和轻子衰变这两个问题上与线性禁闭势的计算有明显不同, 而其它方面与线性禁闭势的结果相近. 现仅对有显著差别的结果作一讨论. 表1和表2是粲夸克偶素中  $J^{PC} = 1^{--}$  六条能级的能量, 能级的轨道角动量以及轻子衰变宽度理论与实验的比较. 本计算选用的两组参数是:

参数 I :  $m_c = 1.3\text{GeV}, \mu_0^{-1} = 2.0\text{fm}, V_\mu = 1.6\text{GeV}, \alpha_s = 0.39$

参数 II :  $m_c = 1.3\text{GeV}, \mu_0^{-1} = 2.0\text{fm}, V_\mu = 1.6\text{GeV}, \alpha_s = 0.50$

我们也做了取  $m_c = 1.8\text{GeV}$  时的相应计算, 其物理结果相似. 故只列出了  $m_c = 1.3\text{GeV}$  的计算结果.

表1 Charmonium  $J^{PC} = 1^{--}$  的能谱 (MeV)

实验 <sup>(5)</sup> MeV	A. Barchielli <sup>(4)</sup>	Y-Q chen et al. , <sup>(4)</sup>	$V_\mu \text{erf}(\mu_0 r)$	
			参数 I	参数 II
$J/\psi(1s)$ = $J/\psi(3097)$	$J/\psi(1s)$ = $J/\psi(3097)$	$J/\psi(1s)$ = $J/\psi(3097)$	$J/\psi(1s)$ = $J/\psi(3097)$	$J/\psi(1s)$ = $J/\psi(3097)$
$\psi(2s) = \psi(3685)$	$\psi(2s) = \psi(3685)$	$\psi(2s) = \psi(3686)$	$\psi(2s) = \psi(3688)$	$\psi(2s) = \psi(3673)$
$\psi(3770)$	$\psi(1D) = \psi(3766)$	$\psi(1D) = \psi(3803)$	$\psi(1D) = \psi(3769)$	$\psi(1D) = \psi(3763)$
$\psi(4040)$	$\psi(3s) = \psi(4056)$	$\psi(3s) = \psi(4098)$	$\psi(3s) = \psi(4013)$ $\psi(2D) = \psi(4069)$	$\psi(3s) = \psi(4024)$
$\psi(4160)$	$\psi(2D) = \psi(4158)$	$\psi(2D) = \psi(4176)$	$\psi(4s) = \psi(4220)$	$\psi(2D) = \psi(4067)$
$\psi(4415)$	$\psi(4s) = \psi(4407)$	$\psi(4s) = \psi(4443)$	$\psi(5s) = \psi(4408)$	$\psi(4s) = \psi(4396)$

从表1可知, 实验上只有最低的两条能级被指明其轨道态是  $s$  态. 线性禁闭势的计算结果如表的第2, 3列所示只能把  $\psi(4160)$  解释为  $2D$  态,  $\psi(4415)$  解释为  $4s$  态. 含色屏蔽应禁闭位参数 II 的计算与线性势相似, 而参数 I 的计算结果则不同, 它把  $\psi(4160)$  解释为  $4s$ , 把  $\psi(4415)$  解释为  $5s$  态. 这个结果对解释能级的  $e^+e^-$  衰变是很重要的. 表2中既给出了宽度的极对值也给出了相对比值. 宽度的理论计算仍有一定的近似, 但相对比值可视为更可信的物理量. 在实验上  $\psi(4040)$  和  $\psi(4160)$  的  $e^+e^-$  衰变宽度基本相同, 而理论上  $D$  波的  $e^+e^-$  衰变宽度将比  $S$  波的小一个量级, 因此若将  $\psi(4160)$  解释为  $2D$  态则在  $e^+e^-$  衰变问题上将出现严重的矛盾, 这个矛盾也无法通过  $2D$  与  $3s$  的耦合来解决. 而参数 I 的计算说明了, 只要参数选择适当, 在所考虑能区把色屏蔽效应充分表现出来就能把  $\psi(4160)$  解释为  $4s$ , 把  $\psi(4415)$  解释为  $5s$ . 从而在线性禁闭势计算中  $\psi(4160)$  衰变宽度太小,  $\psi(4415)$  态衰变宽度过大的问题都能得到很好地解决. 上述结果说明色屏蔽效应可能是一

表 2 Charmonium  $J^{PC} = 1^{-}1^{-}$  态的  $e^{+}e^{-}$  衰变宽度

实验 <sup>(6)</sup>	$V_{\mu} \text{erf}(\rho_{07})$						A. Berchielli et al., <sup>(5)</sup>	
	I		I		I		I	
	$\Gamma_{\text{th}}(e^{+}e^{-})$	$\Gamma_{\text{th}}/\Gamma_{J/\psi}$	$\Gamma_{\text{th}}(e^{+}e^{-})$	$\Gamma_{\text{th}}/\Gamma_{J/\psi}$	$\Gamma_{\text{th}}(e^{+}e^{-})$	$\Gamma_{\text{th}}/\Gamma_{J/\psi}$	$\Gamma_{\text{th}}(e^{+}e^{-})$	$\Gamma_{\text{th}}/\Gamma_{J/\psi}$
J/ $\psi = J/\psi(3097)$	$5.36 \pm 0.28$		3.79(1s)		5.02(1s)		3.12(1s)	
$\psi(2s) = \psi(3685)$	$2.14 \pm 0.27$	0.40	1.70(2s)	0.45	2.40(2s)	0.48	1.65(2s)	0.53
$\psi(3770)$	$0.24 \pm 0.05$	0.04						
$\psi(4040)$	$0.75 \pm 0.15$	0.14	0.99(3s)	0.26	1.60(3s)	0.32	1.10(3s)	0.35
$\psi(4160)$	$0.77 \pm 0.23$	0.14						
$\psi(4415)$	$0.47 \pm 0.1$	0.09	0.49(4s)	0.13	1.24(4s)	0.25	0.892(4s)	0.29

重要效应,是否正确还有待于实验的检验.

作者谨向张宗焯、何祚麻、庆承瑞和沈彭年教授致谢,感谢他们有益的讨论.

### 参 考 文 献

- [1] E. Laerman et al., *Phys. Lett.*, **B173**(1986), 437.
- [2] Dong Yu-bing and Yu You-wen, IHEP-TH-92-27; Zhang Zong-ye et al., IHEP-TH-92-28.
- [3] S. Ono and F. Schöberl, *Phys. Lett.*, **B118**(1982), 419.
- [4] A. Barchielli et al., *Nuovo Cimento*, **103A**(1990), 59; Yu-qi Chen and Yu-ping Kuang, *Phys. Rev.*, **D46**(1992), 1165. Y. B. Ding, J. He, S. O. Cai, D. H. Qin and K. T. Chao, in "Particles and Nuclear Physics", Proceedings of the International Symposium, Beijing, China, 1985. edited by N. Hu and C.-S. Wu (world Scientific, Singapore, 1987), P88.
- [5] Particle Data Group, *Phys. Rev.*, **D45 No 11- II** (1992), 1.

## The Color Screening Effect on Heavy Quarkonia

DONG YUBING, YU YOUWEN, WANG YINGCAI

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

### ABSTRACT

In this paper, by taking the confining potential with the color screening effect as a color confinement between quark and antiquark, the effect on heavy quarkonia ( $c\bar{c}$  and  $b\bar{b}$ ) is studied. It shows that the effect may give different predictions for orbital angular momentum of high excited energy levels of  $\psi(c\bar{c})$ , and make improvement in the widths of leptonic decay mode.