

快报

自旋相关相对论修正对 重夸克偶素性质的研究*

董宇兵

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

1997-02-14 收稿

摘 要

自旋相关的相对论修正对有限温度下重夸克偶素的结合和分解的影响进行了讨论. 结果表明精细和超精细相互作用将影响对重夸克偶素性质的预言, 特别是对 η_c 和 J/ψ 起着明显的作用.

关键词 相对论修正, 重夸克偶素, 有限温度, 精细劈裂.

1 引 言

众所周知重夸克偶素在零温下的性质可由夸克势模型来描述, 其精细和超精细劈裂可由相互作用的相对论修正来解释^[1,2]. 对相互作用势的相对论约化将给出自旋有关和无关的相对论修正.

Matsui^[3]和 Karsch^[4]分别利用势模型研究了有限温度下重夸克偶素的结合和分解. 现在, 即将运行的 RHIC 使得对有限温度下重夸克偶素性质的计算越来越为人们所重视^[5]. 因为在夸克、胶子等离子体 (QGP) 环境中, 夸克和胶子会退禁闭, J/ψ 的产额也就相应地压低了. 由于 J/ψ 产额的压低被人们广泛地认为是 QGP 产生的一个信号, 这也使得理论上对 J/ψ 性质的研究为人们所关注.

在有限温度下, 色屏蔽与温度有关. 温度越高, 屏蔽越大^[6]. 因此在此情况下, 夸克和反夸克相互作用将为色屏蔽所修正. 在 Karsch, Mehr 和 Satz^[4,7]的工作中把有色屏蔽修正的禁闭位参数化为

$$V_{\text{conf}}(\mu(T), r) = \frac{\sigma}{\mu(T)} (1 - \exp(-\mu(T)r)), \quad (1)$$

其中 σ 是强度参数, $\mu(T)$ 是屏蔽质量, 是温度的函数. 体系的分离能定义为

$$E_{\text{dis}}(\mu) = m_Q + m_{\bar{Q}} + \frac{\sigma}{\mu} - E(\mu), \quad (2)$$

* 国家自然科学基金资助.

(2)式中 E 是本征能量. 体系的临界屏蔽质量可由如下条件定出

$$E(\mu_c) = 0; \quad \mu = \mu_c. \quad (3)$$

值得指出的是在以往的工作中^[4], 只是对 $c\bar{c}$, $b\bar{b}$ 组合态自旋平均能级的性质进行讨论. 实际上在重夸克的能谱中, J/ψ 和 η_c 的能差在 114MeV 左右. 同样对 $c\bar{c}$ 的 P 态 χ_{c0} (3416), χ_{c1} (3515) 和 χ_{c2} (3556) 也有明显的能差. 这些能差主要来自于相互作用中的自旋相关的精细和超精细劈裂相互作用. 当然这些相对论修正也会对有限温度下重夸克偶素有一定的影响. 对此问题的细致研究将会告诉我们具有确定量子数粒子, 如 J/ψ 或 η_c 的强化过程, 这类研究希望能在今后相对论重离子碰撞实验中得到检验.

2 相对论修正的计算

体系的哈密顿量可写为

$$H = H_0 + H_{\text{Re}}; \quad H_{\text{Re}} = H_{\text{Re}}^I + H_{\text{Re}}^D, \quad (4)$$

其中 H_{Re} 代表相对论修正, 它包括自旋无关 (H_{Re}^I) 和自旋相关 (H_{Re}^D) 的相对论修正. 当然自旋无关的修正项也会对重夸克偶素性质有明显的作用, 但是由于对禁闭位的了解并不十分清楚^[8], 本文暂不讨论它的影响, 而只考察自旋相关相对论修正的作用.

(4)式中零级哈密顿量为:

$$H_0 = \frac{p^2}{2\mu_{Q\bar{Q}}} + V_{\text{Conf}} + V_{\text{Coul}} + B_0 + m_Q + m_{\bar{Q}}, \quad (5)$$

其中 B_0 是零点能, $\mu_{Q\bar{Q}}$ 是约化质量, V_{Conf} 和 V_{Coul} 分别是标量线性禁闭位和矢量库仑位. 它们在有限温度下分别表示为(1)式和

$$V_{\text{Coul}} = -\frac{4}{3} \frac{\alpha_s}{r} \exp(-\mu(T)r). \quad (6)$$

(4)式中相对论修正项 H_{Re}^D 可写为

$$H_{\text{Re}}^D = H^{L \cdot S} + H^T + H^{SS}, \quad (7)$$

$$H^{LS} = AL \cdot S, \quad H^T = B(3\sigma_1 \cdot \hat{r} \sigma_2 \cdot \hat{r} - \sigma_1 \cdot \sigma_2), \quad H^{SS} = C\sigma_1 \cdot \sigma_2. \quad (8)$$

(8)式中自旋轨道力 H^{LS} , 张量力 H^T 和自旋自旋相互作用 H^{SS} 的系数 A, B, C 分别为

$$A = \frac{d}{dr} \left\{ \left[\frac{1}{m_Q m_{\bar{Q}}} + \frac{1}{4} (m_Q^{-2} + m_{\bar{Q}}^{-2}) \right] V_{\text{Coul}} - \frac{1}{4} (m_Q^{-2} + m_{\bar{Q}}^{-2}) V_{\text{Conf}} \right\}, \quad (9)$$

$$B = -\frac{1}{12m_Q m_{\bar{Q}}} \left(\frac{d^2}{dr^2} - \frac{d}{dr} \right) V_{\text{Coul}},$$

$$C = \frac{1}{6m_Q m_{\bar{Q}}} \Delta V_{\text{Coul}}$$

如果要严格地考虑相对论修正(7)式, 严格求解含有(7)式的薛定谔方程是必要的. 然

而在零温下,将会遇到 δ 类型的相互作用.利用下面的函数来模拟 δ 函数,

$$f(r) = \frac{1}{4\pi r_0^2} \exp(-r/r_0) / r, \quad \lim_{r_0 \rightarrow 0} f(r) = \delta(r). \quad (10)$$

这是由于 δ 型相互作用使得整个哈密顿量不存在束缚态.在计算中采用 Ono 和 Schöberl^[9]的参数 $r_0 = 0.08(2\mu_{\bar{q}q})^{-0.6}$ fm(其中 $\mu_{\bar{q}q}$ 以 GeV 为单位).

利用以下参数

$$\alpha_s = 0.354, \quad m_c = 1.32\text{GeV}, \quad m_b = 4.75\text{GeV}, \quad \sigma = 0.192\text{GeV}^2, \quad B_0 = 0 \quad (11)$$

严格求解含自旋相关相互作用(7)式的薛定谔方程.计算所得到的零温下能谱,均方根半径,以及体系在临界屏蔽质量和临界温度时的能谱均列于表 1 中.在表 1 中为了比较方便,也列出了 Karsch, Mehr 和 Satz^[4]的结果.为了更明显地体现相对论修正的作用,在图 1 中给出了 J/ψ 和 η_c 的分离能与屏蔽质量的关系,并与 Karsch^[4]等人的工作进行了比较.在图 2 到图 4 中,给出了重夸克偶素的均方根半径随屏蔽质量的关系,以及 η_c 和 J/ψ 径向波函数在 $\mu = 0$ 和 $\mu = 0.65\text{GeV}$ 时的行为.需要指出的是,图中所表现出 J/ψ 和 η_c 的性质差别反映了自旋相关的相对论修正的作用.

表 1 零温和有限温下重夸克偶素性质的计算结果

States	$T=0$		$T \neq 0$	
	$M(\text{MeV})$	$r_{\text{rms}}(\text{fm})$	$\mu_c(\text{GeV})$	$M(\mu_c, \text{MeV})$
$\eta_c(^1S_0, 2980)$	2985	0.400	0.720	2907
$J/\psi(^3S_1, 3097)$	3088	0.458	0.689	2918
$J/\psi(1S, 3068)^{[4]}$	3070	0.453	0.699	2915
$\eta_c(^2S_0, 3595)$	3617	0.829	0.365	3166
$\psi'(^3S_1, 3686)$	3700	0.882	0.354	3188
$\psi'(2S, 3663)^{[4]}$	3698	0.875	0.357	3177
$\chi_{c0}(^3P_0, 3415)$	3442	0.660	0.390	3121
$\chi_{c1}(^3P_0, 3510)$	3520	0.683	0.348	3170
$\chi_{c2}(^3P_0, 3556)$	3576	0.716	0.336	3202
$\chi_{c3}(^3P_1, 3550)^{[4]}$	3500	0.696	0.342	3198
$\gamma(^3S_1, 9460)$	9460	0.228	1.525	9617
$\gamma(1S, 9446)^{[4]}$	9445	0.226	1.565	9615
$\gamma'(2^3S_1, 10023)$	10011	0.510	0.660	9782
$\gamma'(2S, 10017)^{[4]}$	10004	0.509	0.671	9778
$\chi_{b0}(^3P_0, 9860)$	9872	0.396	0.572	9819
$\chi_{b1}(^3P_0, 9891)$	9900	0.406	0.563	9822
$\chi_{b2}(^3P_0, 9913)$	9911	0.420	0.546	9836
$\chi_{b3}(^3P_1, 9900)^{[4]}$	9897	0.408	0.558	9829

注:表中上标[4]表示这一行是文献[4]的结果.

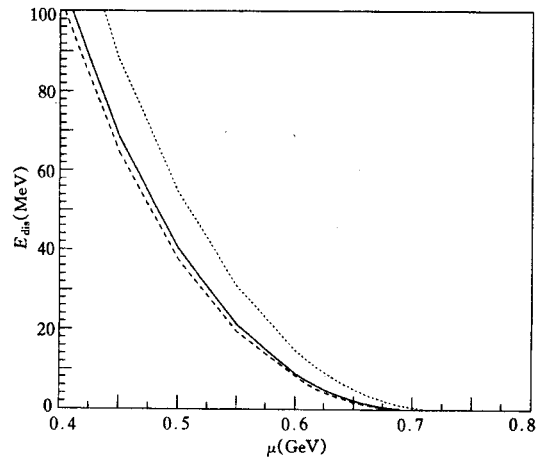


图 1 分离能与屏蔽质量的关系

.....和-----分别是考虑了自旋相关相对论劈裂对 η_c 和 J/ψ 的计算结果; ——是文献 [4] 对 $C\bar{C}$ 1S 态的计算结果

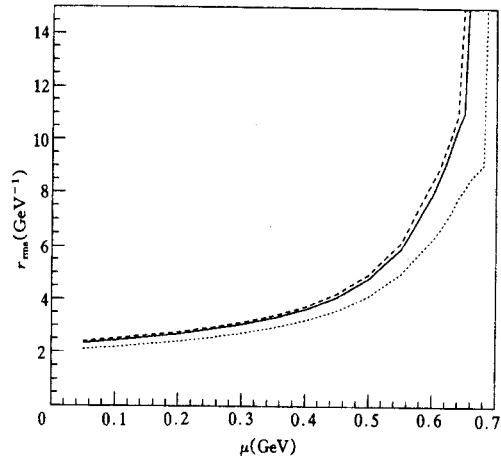


图 2 均方根半径与屏蔽质量的关系

(具体说明详见图 1)

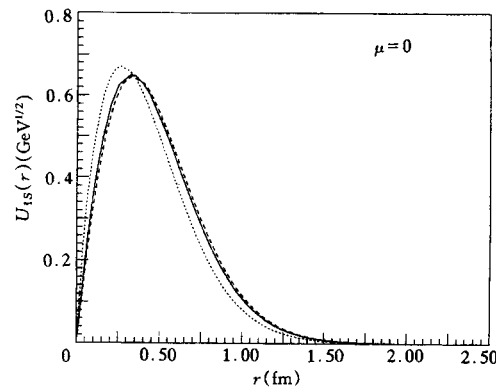


图 3 径向波函数 ($U(r) = rR(r)$) 在 $\mu = 0$ 时的行为
(具体说明见图 1)

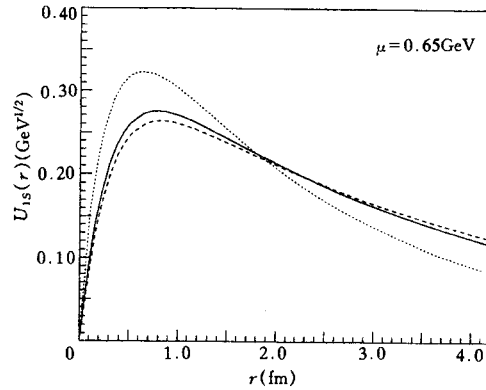


图 4 径向波函数在 $\mu = 0.65\text{GeV}$ 时的行为
(具体说明见图 1)

3 结 论

本文中自旋相关的相对论修正对 J/ψ 和 η_c 的影响已明显地表现在表 1 和图 1 至图 4 中. 可以看出这种修正对有限温度下重夸克偶素的结合与分解, 特别是对 J/ψ 和 η_c , 有明显的效应. 它给出 J/ψ 和 η_c 不同的临界屏蔽质量. 显然由于相对论修正对 J/ψ 和 η_c 的不同影响, J/ψ 的临界屏蔽质量要小于 η_c 的临界屏蔽质量. 如果考察 J/ψ 与 η_c 的均方根半径随 μ 的变化关系, 以及 $\mu = 0, 0.65\text{GeV}$ 两种情况下波函数的行为, 可发现有限温度下相对论修正的作用要强于零温时的作用.

虽然相对论修正的影响可从上面的计算和讨论中明显地看出,但对这些重夸克偶素的临界性质的直接测量却难以从现有的 SPS 实验中得到. 可以预计 η_c 和 J/ψ 性质上的差别,如均方根半径,临界屏蔽质量等会在它们的衰变模式,强子化过程中体现出来,可通过观测其在有限温度下的跃迁,衰变和剩余几率等得到一些启示. 期望在今后 RHIC 的相对论重离子碰撞中得到更多、更精确的观测以便对理论进行检验.

当然,自旋无关的相对论修正项也会对 J/ψ 的性质有一定的影响,但由于对禁闭位耦合性质尚不清楚,因此得到相对论自旋无关项有许多不确定因素. 故而对它的影响的考虑难以得到一个定量的结论.

参 考 文 献

- [1] S. N. Mukherjee, R. Nag, S. Sanyal *et al.*, *Phys. Rept.*, **231**(1993)201.
- [2] N. Lucha, F. F. Schöberl, D. Gromes, *Phys. Rept.*, **200**(1991)127.
- [3] T. Matsui, H. Satz, *Phys. Lett.*, **B178**(1986)416.
- [4] F. Karsch, M. T. Mehr, H. Satz, *Z. Phys.*, **C37**(1988)617, F. Karsch *et al.*, *Phys. Lett.*, **B213**(1988)505.
- [5] S. Nagemia, *Nucl. Phys.*, **A566**(1994)287c.
- [6] Cheuk-Yin Wong, Lali Chatterjee, Effects of Screening on Quark-Antiquark Cross Section in Quark-gluon Plasma, ORNL-CTP-96-01, hep-ph / 9604224, C. Y. Wong, Introduction to High-energy heavy-ion collision, World Scientific Publishing Company, 1994.
- [7] H. Satz, *Nucl. Phys.*, **A418**(1984)447c.
- [8] Y. B. Dong, *J. Phys.*, **G22**(1996)591; S. Deoghuria, S. Chakrabarty, *Z. Phys.*, **53**(1992)293; S. Ghosh, S. Mukherjee, *Modern Phys. Lett.*, **A4**(1989)1277; P. J. Franzini, *Phys. Lett.*, **B296**(1992)195,198; Y. B. Dong *et al.*, *J. Phys.*, **G20**(1994)73; **G21**(1995)889.
- [9] S. Ono, F. Schöberl, *Phys. Lett.*, **B118**(1982)419.

Spin-Dependent Relativistic Effect on Heavy Quarkonium Properties in Medium

Dong Yubing

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

Received 14 February 1997

Abstract

Spin-dependent relativistic effect on the binding and dissociation of the heavy quarkonium in a thermal environment is investigated. The result shows that the interactions could influence the heavy quarkonium properties in medium.

Key words relativistic correction, heavy quarkonium, thermal environment, hyperfine splitting.