

## $\psi'$ 在介质中的轻子衰变和辐射跃迁\*

刘波<sup>1,2,3</sup> 彭光雄<sup>1</sup> 沈彭年<sup>1,2,3</sup> 贺泽君<sup>4</sup>  
陈洪<sup>5</sup> 马维兴<sup>1,2,3</sup> 赵恩广<sup>3,2</sup> 卢宏超<sup>1</sup>

1(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

2(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心 兰州 730000)

3(中国科学院理论物理研究所 北京 100080)

4(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

5(西南师范大学物理系 重庆 400715)

**摘要** 在夸克势模型的框架下,用屏蔽质量与介质温度和密度的关系,研究了 $\psi'$ 在热力学介质中的轻子衰变和辐射跃迁.

**关键词** 色屏蔽 QGP 轻子衰变 辐射跃迁

### 1 引言

自从提出相对论重离子碰撞中的 $J/\psi$ 压低可作为夸克-胶子等离子体(QGP)形成的一个信号以来<sup>[1]</sup>,已经有许多实验在核-核碰撞中观察到 $J/\psi$ 和 $\psi'$ 的产额压低<sup>[2-4]</sup>.近年来 $J/\psi$ 和 $\psi'$ 压低现象引起了物理学家的广泛兴趣,对于核-核碰撞中的 $J/\psi$ 和 $\psi'$ 压低机制的研究和分析一直在深入地讨论和进行.在非相对论夸克势模型中, $J/\psi$ 和 $\psi'$ 被解释为( $c\bar{c}$ )的1S和2S束缚态.如果在核-核碰撞中形成了夸克-胶子等离子体,色屏蔽效应将减弱 $c$ 与 $\bar{c}$ 之间的作用.色屏蔽质量随系统温度的升高而增大,当温度足够高时,色屏蔽质量的倒数(即色屏蔽半径)将小于 $J/\psi$ 的半径,这时 $c\bar{c}$ 将不能结合成束缚态,而是与其周围的其它夸克或反夸克相互作用,形成 $D$ 和 $\bar{D}$ 介子,从而导致 $J/\psi$ 产额压低.由于 $J/\psi$ 产额压低与色屏蔽效应有关,所以 $J/\psi$ 的结合与分解可以提供介质温度和密度方面的信息.

作者<sup>[5]</sup>首先用夸克势模型研究了热力学环境中重味夸克共振态的分解,计算了重味夸克束缚态分解时的临界屏蔽质量.近来作者<sup>[6,7]</sup>用不同形式的夸克-反夸克相互作用位势研究了重味夸克共振态的结合与退禁闭,并用热场动力学方法计算了在有限温度和有限密度的介质中胶子的电屏蔽质量,得到色屏蔽质量与介质温度和密度的关系<sup>[8]</sup>.为了探索介质温度和密度方面的信息,作者<sup>[9]</sup>用不同形式的夸克-反夸克势模型研究了 $J/\psi$ 在热密介质中的轻子衰变宽度.

1999-08-10 收稿

\* 国家自然科学基金资助(19975053,19905011)

由于  $\psi'$  的半径比  $J/\psi$  的半径大, 在 QGP 环境中首先被分解<sup>[10]</sup>, 所以  $\psi'$  被认为是观察 QGP 形成信号的灵敏探针之一. 为了考察  $\psi'$  对介质温度和密度的敏感性, 本文用夸克-反夸克势模型和已经得到的屏蔽质量与温度和密度的关系<sup>[6-9]</sup>, 分析和研究  $\psi'$  在热密物质中的轻子衰变和辐射跃迁.

## 2 在热密介质中的轻子衰变宽度和辐射跃迁

在非相对论的夸克势模型中, 粲夸克偶素被描述为  $(c\bar{c})$  的束缚态. 作者<sup>[6,7]</sup> 用 KMS 和 erf 势研究了重味夸克共振态的分解, 两个势模型的主要区别是, 在零温度时, KMS 势没有色屏蔽:  $\mu_0(T=0, \rho=0)=0$ , 但 erf 势有色屏蔽:  $\mu_0(T=0, \rho=0)=0.1\text{GeV}$ . 这里  $T$  是温度,  $\rho$  是重子密度. 由于夸克-反夸克位势是屏蔽质量  $\mu$  的函数, 所以解薛定谔方程得到的波函数自然也是屏蔽质量  $\mu$  的函数. 在非相对论的势模型的框架下, 对于一个给出的  $\mu$  值, S 态的轻子衰变宽度可以写为

$$\Gamma(nS \rightarrow e^+ e^-)(\mu) = \frac{16\pi\alpha_e e_q^2}{M_{nS}^2(\mu)} |\psi_{nS}(0, \mu)|^2, \quad (1)$$

这里  $\alpha_e$  是精细结构常数,  $e_q$  是夸克电荷:  $e_q = \frac{2}{3}$ . 这里的零点波函数  $|\psi_{nS}(0, \mu)|$  与夸克-反夸克位势  $V(r, \mu)$  的关系可以表示为<sup>[11,12]</sup>

$$|\psi_{nS}(0, \mu)|^2 = \frac{m_{nS}}{4\pi} \int |\psi_{nS}(r, \mu)|^2 \frac{\partial V(r, \mu)}{\partial r} d^3r, \quad (2)$$

这里  $m_{nS}$  是夸克-反夸克系统的约化质量. 对于一个给定的  $\mu$  值, 电磁辐射 E1 跃迁率可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\Gamma_{E1}(^3S_1 \rightarrow ^3P_J)(\mu) = \frac{4}{27}\alpha_e e_q^2 (E_i(\mu) - E_f(\mu))^3 |\langle f | r | i \rangle|^2 (2J+1). \quad (3)$$

这里  $E_i(\mu)$  和  $E_f(\mu)$  是初末态质量,

$$\langle f | r | i \rangle = \int R_f(r, \mu) r R_i(r, \mu) r^2 dr, \quad (4)$$

这里径向波函数的归一化是

$$\int_0^\infty R_{n'l}(r) R_{n'l'}(r) r^2 dr = \delta_{nn'} \delta_{ll'}. \quad (5)$$

本文用文献[6-9]中给出的屏蔽质量  $\mu$  与介质温度和密度的关系, 估算在有限温度和有限密度的介质中,  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma(e^+ e^-)(T, \rho)$  和辐射跃迁率  $\Gamma_{E1}(T, \rho)$ .

## 3 结果与讨论

$\psi'$  在有限温度和有限密度的介质中的性质是大家更关注的, 原因是在 QGP 环境中,  $\psi'$  更容易分解, 是探测介质性质的敏感探针之一. 为此我们估算了  $\psi'$  在介质中的轻子衰变宽度  $\Gamma(e^+ e^-)$  和辐射跃迁率  $\Gamma_{E1}$ . 在计算中使用文献[6,7,9]中所用的参数:  $\alpha_{\text{eff}} = \frac{4}{3}\alpha_s =$

$0.471, \sigma = 0.192 \text{GeV}^2, m_c = 1.32 \text{GeV}, m_q = 10 \text{MeV}, \rho_0 = 0.17 \text{fm}^{-3}$ .

首先用 KMS 势和 erf 势计算了  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma(e^+e^-)$  随屏蔽质量  $\mu$  的变化关系, 结果给在图 1 和图 2 中, 实验点取自文献[14]. 由于实验是在零温度测量的, 在 erf 势中, 在  $T=0$  和  $\rho=0$  时,  $\mu_0 = 0.1 \text{GeV}^{[7,9]}$ ; 而在 KMS 势中:  $\mu_0 = 0^{[7,9]}$ , 因此在图 1 和图 2 中的零温位置是不同的. 对于这两个势来说, 在零温度时, 理论值都比实验值大. 这是由于我们所用的势模型还不够精细, 对于中长程的非微扰 QCD 效应考虑欠缺, 理论上计算的激发态未能反映真实的情况. 从图 1 和图 2 看到,  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma(e^+e^-)$  随  $\mu$  的增大而减小, 当  $\psi'$  分解时, 即  $\mu = \mu_c$  时 (对于 erf 势:  $\mu_c = 0.26 \text{GeV}^{[7]}$ , 对 KMS 势:  $\mu_c = 0.36 \text{GeV}^{[7]}$ ),  $\Gamma(e^+e^-)$  变成为零. 用文献[6,7,9]中给出的屏蔽质量  $\mu$  与温度和密度的关系, 计算了  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma(e^+e^-)$  随温度  $T$  和密度  $\rho$  的关系, 结果给在图 3 和 4 中, 对于 KMS 势, 在不同的重子密度情况下,  $\Gamma(e^+e^-)$  随  $T$  增大而减小; 对于 erf 势来说, 由于零温度时有色屏蔽,  $\psi'$  分解时所需要的临界屏蔽质量较小, 所以在图 4 中只给出  $N_f=0$  和  $N_f=3$  与  $\rho=0$  时的结果, 并且  $\Gamma(e^+e^-)$  随  $T$  的增大也是减小的.

其次, 用公式(3)计算了  $\psi'$  到  $\chi_c$  的辐射跃迁率  $\Gamma_{E1}$ . 对于不同的夸克势模型,  $\Gamma_{E1}$  随屏蔽质量  $\mu$  的变化关系给在图 5 中, 实线是 KMS 势给出的结果, 虚线是 erf 势给出的结果. 从图 5 中看到, 对于 KMS 势,  $\Gamma_{E1}$  随  $\mu$  的增大缓慢减小, 而对于 erf 势,  $\Gamma_{E1}$  随  $\mu$  的增大减小较快. 同样, 当  $\psi'$  分解时, 即  $\mu = \mu_c$  时,  $\Gamma_{E1}$  变为零.  $\Gamma_{E1}$  随温度和密度的变化关系给在图 6 和 7 中. 对于 erf 势来说, 由于零温度时有色屏蔽, 因此  $\psi'$  分解时所需要的临界屏蔽质量较小, 所以在图 7 中只给出  $N_f=0$  和  $N_f=3$  与  $\rho=0$  时的结果. 从图 6 和 7 中看到,  $\Gamma_{E1}$  随  $T$  的增大迅速减小. 从图 6 中可以看到, 对于 KMS 势来说, 当介质的密度达到核物质密度时,  $\Gamma_{E1}$  的强度迅速减小.

计算结果表明, 用 KMS 势和 erf 势模型, 计算在有限温度和有限密度的介质中的  $\psi'$  的轻子衰变和辐射跃迁, 所得到的结果是明显不同的. 这说明  $\psi'$  的轻子衰变宽度和辐射跃迁依赖于与屏蔽质量有关的夸克-反夸克相互作用势的形式. 但不同形式的位势都表明, 当温度升高时,  $\psi'$  的轻子衰变宽度和辐射跃迁率都减小, 当达到临界温度时,  $\psi'$  的轻子衰变宽度和辐射跃迁率都变为零. 由于  $\psi'$  的轻子衰变宽度和辐射跃迁率对介质的温度和

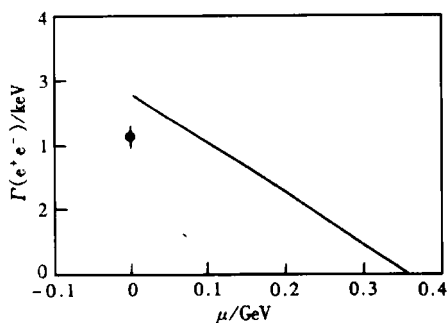


图 1 KMS 势给出的  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma$  随  $\mu$  的变化

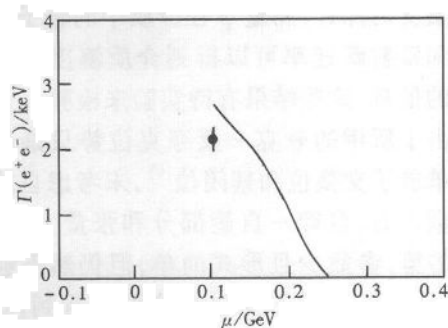


图 2 erf 势给出的  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma$  随  $\mu$  的变化

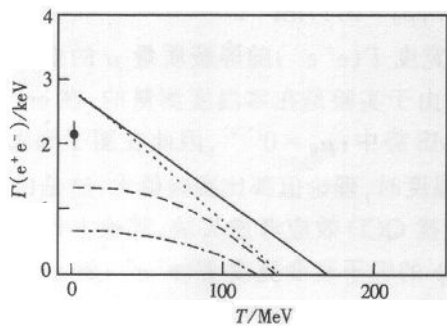


图 3 KMS 势给出的  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma$  对于不同的重子密度  $\rho$  随温度  $T$  的变化关系  
 ——  $N_f=0$ ; ----  $N_f=3, \rho=\rho_0$ ;  
 .....  $N_f=3, \rho=0$ ; - · - · -  $N_f=3, \rho=3\rho_0$ .

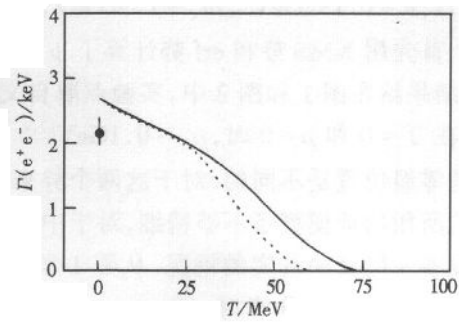


图 4 erf 势给出的  $\psi'$  的轻子衰变宽度  $\Gamma$  随温度  $T$  的变化关系  
 ——  $N_f=0$ ; .....  $N_f=3, \rho=0$ .

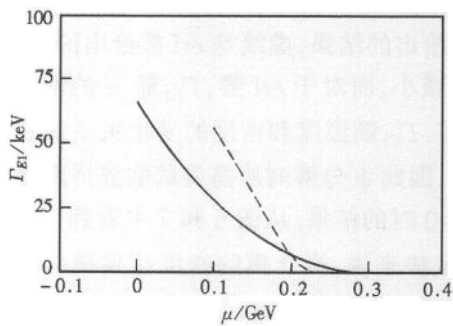


图 5 辐射跃迁率  $\Gamma_{E1}$  随  $\mu$  的变化  
 ——KMS, .....erf.

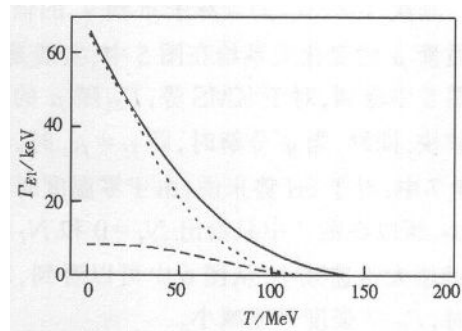


图 6 KMS 势给出的辐射跃迁率  $\Gamma_{E1}$  对于不同的重子密度  $\rho$  随温度  $T$  的变化关系  
 ——  $N_f=0$ ; .....  $N_f=3, \rho=0$ ; ----  $N_f=3, \rho=\rho_0$ .

密度是敏感的,因此  $\psi'$  在介质中的行为可作为介质温度的探针.测量  $\psi'$  在介质中的轻子衰变宽度和辐射跃迁率可以得到介质温度和密度方面的信息.这些结果有待实验来检验.

由于所用的夸克-反夸克位势只是最低次的单胶子交换位和禁闭位<sup>[9]</sup>,未考虑自旋-轨道耦合力、自旋-自旋部分和张量力部分.所用的势,参数少且形式简单,但仍然不够精细.但从计算结果的变化趋势可以看到,  $\psi'$  的轻子衰变宽度和辐射跃迁率对介质的温度和密度的变化是很敏感的.精细的计算将在今后的工作中进一步考虑.

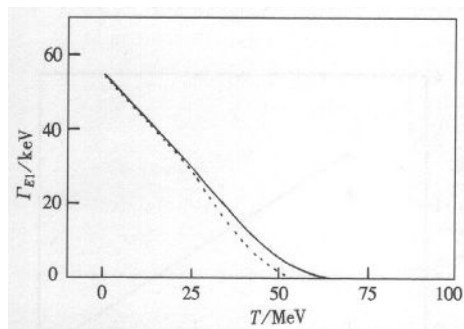


图 7 erf 势给出的辐射跃迁率  $\Gamma_{E1}$  随温度  $T$  的变化关系  
 ——  $N_f=0$ ; .....  $N_f=3, \rho=0$ .

## 参考文献 (References)

- 1 Matsui T, Satz H. Phys. Lett., 1986, **B178**:416—422
- 2 NA38 Collaboration. Nucl. Phys., 1994, **A566**:371C—374C, 77C—86C; NA38 Collaboration. Nucl. Phys., 1989, **A498**:249C—260C
- 3 NA38 Collaboration. Phys. Lett., 1989, **B220**:(3):471—478; NA38 Collaboration. Phys. Lett., 1991, **B262**:(2—3):362—368
- 4 Blaizot J P, Ollitrault J Y. Phys. Lett., 1996, **77**(9):1703—1706; NA50 Collaboration. Nucl. Phys., 1996, **A610**:404C—417C
- 5 Karsch F, Mehr M T, Satz H. Z. Phys., 1988, **C37**:617—622
- 6 LIU Bo, SHEN PengNian, JIANG HuanQing. Phys. Rev., 1997, **C55**(6): 3021—3025
- 7 LIU Bo, SHEN PengNian, JIANG HuanQing. HEP & NP (in Chinese), 1998, **22**:(6):556—563  
(刘波, 沈彭年, 姜焕清. 高能物理与核物理, 1998, **22**(6):556—563)
- 8 GAO Song, LIU Bo, ZHAO WeiQin. Phys. Lett., 1996, **B378**:23—28
- 9 LIU Bo, SHEN PengNian, JIANG HuanQing. Phys. Lett., 1998, **B437**:231—235
- 10 Nagamiya S. Nucl. Phys., 1994, **A566**:287C—298C
- 11 Martin A. Phys. Lett., 1986, **B70**(2):192—194
- 12 Eichten E, Gottfried K, Kinoshita T et al. Phys. Rev., 1978, **D17**(11):3090—3117
- 13 Jacobs S, Olsson M G, Suchyta C. Phys. Rev., 1986, **D33**(11):3338—3348
- 14 Particle Data Group. Eur. Phys. J., 1998, **C3**(1—4):1—794

### Leptonic Decay and Radiative Transition of $\psi'$ in Medium at Finite Temperature and Density

LIU Bo<sup>1,2,3</sup>, PENG GuangXiong<sup>1</sup>, SHEN PengNian<sup>1,2,3</sup>, HE ZeJun<sup>4</sup>,  
CHEN Hong<sup>5</sup>, MA WeiXing<sup>1,2,3</sup>, ZHAO EnGuang<sup>3,2</sup>, LU HongChao<sup>1</sup>

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

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

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

4(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

5(Department of Physics, Southwest Normal University, Chongqing 400715, China)

**Abstract** Leptonic decay and radiative transition of  $\psi'$  in medium at finite temperature and density are studied by using different quark-antiquark potentials. The behaviour of  $\psi'$  in the medium at finite temperature and density is obtained.

**Key words** color screening, QGP, leptonic decay, radiative transition

Received 10 August 1999

\* Supported by National Natural Science Foundation of China