

化学非平衡夸克-胶子物质中等质量双轻子的产生^{*}

贺泽君^{1,2)†} 龙家丽¹⁾ 马国亮¹⁾ 马余刚¹⁾ 张家驹¹⁾ 刘 波³⁾

¹⁾中国科学院上海原子核研究所,上海 201800)

²⁾中国科学院近代物理研究所兰州重离子加速器国家实验室理论核物理中心,兰州 730000)

³⁾中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

(2002 年 11 月 14 日收到,2003 年 1 月 23 日收到修改稿)

研究了正在进行化学平衡的富重子夸克-胶子物质的双轻子产生,发现由于产生在 RHIC 能量的化学非平衡的富重子夸克-胶子物质冷却慢和高的初始温度,导致中等质量双轻子产生重大增强.因此,中等质量双轻子的增强可以是夸克-胶子物质形成的信号.同时,这个增强能补偿由于初始夸克化学势增加引起的双轻子抑制,因而双轻子产额的抑制不再是夸克-胶子物质产生的信号.

关键词:化学非平衡夸克-胶子物质,热聚夸克,双轻子

PACC:4775,2485

1. 引 言

Brookhaven 国家实验室的相对论重离子碰撞器(RHIC)和在 CERN 正在建造的大强子碰撞器(LHC)提供了在实验室中产生夸克-胶子物质(QGM)的可能.由于双轻子不会遭受到强的末态相互作用,能够保持 QGM 的信息,因而很多作者把双轻子作为 QGM 形成的信号来研究.

许多作者已经研究了中等质量区(1.0—2.9 GeV)的双轻子产生^[1,2].特别是 Gale 和 Li 把增强归结为介子-介子相互作用^[3].而 Lin 等人认为在 NA50 实验中观测到的增强是由末态再散射引起的^[4,5].文献[6—8]中基于一个描述热力学平衡的 QGM 演化的相对论流体力学模型,研究了中等质量区的双轻子产生.结果表明,由于相变对 QGM 演化的影响,推迟了 QGM 系统的演化过程,增加了 QGM 寿命.加上产生在 RHIC 能量的 QGM 有较高的初始温度,造成夸克相的贡献增强,计算的双轻子产额不仅明显地压倒了来自介子相互作用的双轻子产额,而且能与 Drell-Yan 本底相比.近年来,文献[9—11]指出,产生在 RHIC 能量的 QGM 有大的初始部分子密度(主要是胶子),部分子在短时间($\tau \approx 0.3$ —

0.7 fm)内受到许多次碰撞,于是系统可以达到热平衡.然而,要达到化学平衡,就需要更多的夸克和反夸克,于是损失能量,引起系统冷却加快.这样的系统可能达不到化学平衡.特别是考虑了 QGM 的横向膨胀后,大的速度梯度造成系统更离开化学平衡.文献[9—11]研究了在进行化学平衡的重子数为零的 QGM 双轻子产生,讨论了化学平衡在双轻子产生上的效应.

本文首先将零重子 QGM 化学平衡的描述推广到富重子 QGM 的情况,再研究双轻子的产生,揭示富重子 QGM 化学平衡在双轻子产生上的效应.

2. 理论框架

按照文献[9—13]本文也取造成化学平衡的主要反应过程为 $gg \rightleftharpoons ggg$ 和 $gg \rightleftharpoons q\bar{q}$. 部分子密度的演化可用一个主方程给出.对一个富重子的 QGM 系统,按文献[10,13]中的讨论,我们取因式化的 Fermi-Dirac 分布函数 $f_{(q\bar{q})}(p) = \lambda_{(q\bar{q})} [e^{(p\mp\mu_q)T} + 1]$ 描写夸克和反夸克在相空间的分布,取因式化的 Bose-Einstein 分布函数 $f_g(P) = \lambda_g (e^{P/T} - 1)$ 描写胶子在相空间的分布.这里 λ_q , $\lambda_{\bar{q}}$ 和 λ_g 分别为夸克、反夸

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10075071)国家自然科学基金重点项目(批准号:10135030)中国科学院知识创新工程重要方向性项目(批准号:KJ951-A1-101)国家重点基础研究发展规划(批准号:G2000FF400)及中国科学院领域前沿重大项目资助的课题.

[†] 永久联系人. E-mail: Hezj@sinr.ac.cn

克和胶子的逃逸因子. 考虑到取 $\lambda_q = \lambda_{\bar{q}}$ 并不改变系统演化的定性性质, 再结合主方程、能量-动量守恒方程和重子数守恒方程, 在纵向膨胀情况下, 得到一组描述重子数不为零的 QGM 系统的温度 T 、化学势 μ_q 、夸克和胶子的逃逸因子 λ_q 和 λ_g 演化的弛豫方程组

$$\frac{\dot{\lambda}_g}{\lambda_g} + 3 \frac{\dot{T}}{T} + \frac{1}{r} - R_3(1 - \lambda_g) + 2R_2 \left(1 - \frac{\lambda_q^2}{\lambda_g^2} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\dot{\lambda}_g}{\lambda_g} + \left(3 - \frac{\mu_q}{T} \right) \frac{\dot{T}}{T} + \frac{\dot{\mu}_q}{T} + \frac{1}{r} - R_2 \frac{a_1 \lambda_g}{b_1 \lambda_q} \left(1 - \frac{\lambda_q^2}{\lambda_g^2} \right) e^{-\mu_q/T} = 0, \quad (2)$$

$$\dot{\lambda}_q (1 - e^{-2\mu_q/T}) + \lambda_q (1 - e^{-2\mu_q/T}) \left(3 - \frac{\mu_q}{T} \right) \frac{\dot{T}}{T} + \lambda_q (1 + e^{-2\mu_q/T}) \frac{\dot{\mu}_q}{T} + \frac{1}{r} \lambda_q (1 - e^{-2\mu_q/T}) = 0, \quad (3)$$

$$a_2 \dot{\lambda}_g + b_2 \dot{\lambda}_q (e^{\mu_q/T} + e^{-\mu_q/T}) + \frac{4}{3} A_t \times \left[3 - \frac{3}{4} \frac{b_2}{A_t} \lambda_q (e^{\mu_q/T} + e^{-\mu_q/T}) \frac{\dot{\mu}_q}{T} \right] \frac{\dot{T}}{T} + b_2 \lambda_q (e^{\mu_q/T} + e^{-\mu_q/T}) \frac{\dot{\mu}_q}{T} + \frac{4}{3r} A_t = 0, \quad (4)$$

这里 $A_t = a_2 \lambda_q + b_2 (\lambda_q e^{\mu_q/T} + \lambda_{\bar{q}} e^{-\mu_q/T})$, $a_2 = 8\pi^2/15$, $b_2 = N_f (7\pi^2/40)$, $N_f = 2.5$ 为夸克味. 夸克产生率 R_2 和胶子产生率 R_3 按文献 [9, 10] 计算.

众所周知, 夸克相的双轻子产生率由下式给出:

$$\frac{dR}{d^4 P} = \int \frac{d^3 P_1}{(2\pi)^3} \frac{d^3 P_2}{(2\pi)^3} f_q(P_1) f_{\bar{q}}(P_2) \times v_{q\bar{q}} \sigma_{q\bar{q}}^{\text{II}} \delta^4(P - P_1 - P_2), \quad (5)$$

这里 $R = dN/d^4 x$ 为每单位时空辐射的总轻子对数, $v_{q\bar{q}}$ 为夸克与反夸克的相对速度, $\sigma_{q\bar{q}}^{\text{II}}$ 为 $q\bar{q} \rightarrow \text{II}$ 的反应截面. 采用因式化的 Fermi-Dirac 部分子分布函数 $f_{q\bar{q}}(P)$, 借助文献 [2, 6, 13—15], 得到来源于 $q\bar{q}$ 湮没的双轻子产额

$$\frac{dN}{dM^2 dY} = \frac{\alpha^2}{2\pi^2} F_q \int \sqrt{\frac{2\pi}{M_T}} \lambda_q \lambda_{\bar{q}} dM_T dr d\tau M_T r \tau \times \exp\left[-\frac{M_T}{T}\right] J_q(T, \mu_q), \quad (6)$$

Y , M 和 M_T 依次为双轻子快度、不变质量和横向质量, F_q 为 u, d 夸克的形状因子. 因子 $J_q(T, \mu_q)$ 由夸克相的温度和化学势决定.

文献 [6, 16, 17] 指出, 一个具有大的初始温度 (即 $T_i \text{max} \approx (1/3 - 1/2)m_c$) 的 QGM 系统, 可望获得大的热聚夸克产生, 这里聚夸克质量 $m_c \approx 1.20 \text{GeV}$. 照文献 [18] 的做法, 我们写聚夸克产生截面为 $\sigma_{c\bar{c}}(M) = \gamma_q \sigma_{q\bar{q} \rightarrow c\bar{c}} + \gamma_g \sigma_{gg \rightarrow c\bar{c}} \cdot \sigma_{q\bar{q} \rightarrow c\bar{c}}$ 和 $\sigma_{gg \rightarrow c\bar{c}}$ 分别为 $q\bar{q}$ 和 gg 的热聚夸克产生截面. 热聚夸克和胶子的简并因子依次为 $\gamma_q = N_f \times (2 \times 3)^3$ 和 $\gamma_g = (2 \times 3)^3/2$. 特别强调, 对于产生于 RHIC 能量的高初始温度的 QGM, 热聚夸克的产生以及它对双轻子的贡献应当考虑. 考虑到夸克的逃逸因子 λ_q 与胶子的逃逸因子 λ_g , 以及夸克的分布函数 $f_q(P)$ 与胶子的分布函数 $f_g(P)$ 不同, 应当用 $\gamma_g f_g(P_1) f_g(P_2) v_{gg} \sigma_{gg \rightarrow c\bar{c}}(M) + \gamma_q f_q(P_1) f_{\bar{q}}(P_2) v_{q\bar{q}} \sigma_{q\bar{q} \rightarrow c\bar{c}}(M)$ 代替 (5) 式中的 $\gamma_q f_q(P_1) f_{\bar{q}}(P_2) v_{q\bar{q}} \sigma_{q\bar{q} \rightarrow \text{II}}$ 去得到热聚夸克的产生. 这里 v_{gg} 为胶子间的相对速度.

3. 计算结果与讨论

对 $\text{Au}^{197} + \text{Au}^{197}$ 在 RHIC 能量作中心碰撞的情况, 取 Hijing 模型计算的初始值 $\tau_0 = 0.20 \text{fm}$, $T_0 = 0.57 \text{GeV}$, $\lambda_{g0} = 0.29$, $\lambda_{q0} = 0.02$, 解方程组 (1)–(4) 得到系统的温度、夸克化学势、逃逸因子 λ_q 和 λ_g 的演化. 图 1 曲线 1 和 2 依次对应初始化学势为 0.10 和 0.86 GeV 的化学势分布. 图 2 为相应的温度分布. 计算的温度和化学势是演化时间的减函数, 它反映了化学非平衡 QGM 纵向膨胀的基本特征. 人们已经知道零重子 QGM 转变为强子物质仅随着温度降低来实现, 相变发生在相图的温度轴上的特定点, 即临界温度 T_c 处. 然而在本工作中, 夸克化学势和温度都是时间的函数, 比起零重子的 QGM 系统, 则需要更长时间系统的值 (μ_q, T) 才能达到相边上的一个点发生相变. 这个效应必然会推迟演化过程, 造成系统的冷却变慢. 另一方面, 随初始夸克化学势的增加, 初始夸克也增加, 引起更多夸克碰撞, 于是夸克平衡化率上升, 同时计算表明夸克产生率 R_2 这时被抑制, 又引起夸克平衡化率下降. 但综合效应使夸克平衡化率仅稍有上升. 然而计算也表明胶子的产生率随初始化学势增加产生的抑制比夸克的强得多, 于是在部分子中占着大比例的胶子平衡化率的下降, 将引起系统少量能量损失, 系统的冷却率也随之下降. 于是, 可以看到, 对应着初始化学势为 0.86 GeV 的温度曲线 2 在初始化学势为 0.10 GeV 的

温度曲线 1 的上面.

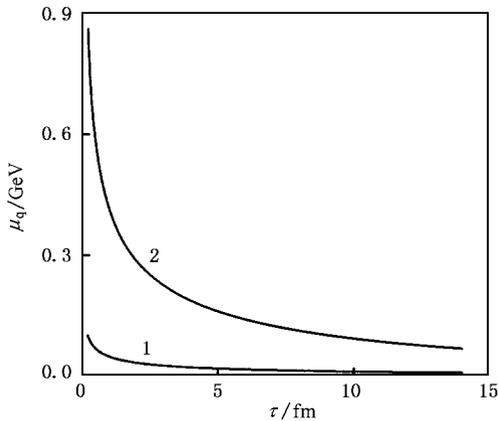


图 1 在初值 $\tau_0 = 0.20\text{fm}$, $T_0 = 0.57\text{GeV}$, $\lambda_{g\bar{g}} = 0.09$ 和 $\lambda_{q\bar{q}} = 0.02$ 计算的夸克化学势分布. 曲线 1 和 2 分别为初始夸克化学势 $\mu_{q0} = 0.10$ 和 0.86GeV 对应的分布

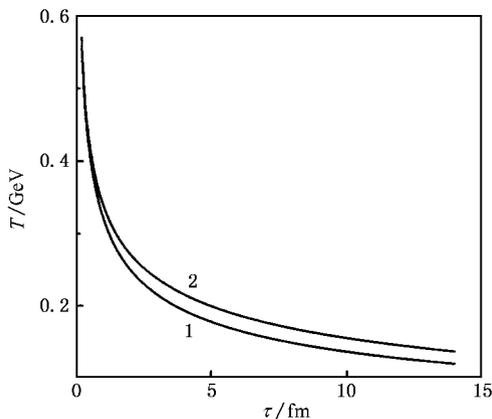


图 2 与图 1 相同条件下计算的温度分布

人们清楚知道,在热力学平衡的 QGM 系统中,双轻子产额随初始夸克化学势增加而抑制,先前已被诸多作者看作为 QGM 产生的信号.然而图 2 中已指出,初始夸克化学势增加,系统冷却变慢.这样的效应推迟了夸克相的冷却过程,夸克相的寿命增长,因而抬高了夸克相的贡献(特别是 $g\bar{g} \rightarrow c\bar{c}$,再 $c\bar{c} \rightarrow \bar{D}D$ 过程的贡献),甚至能补偿由于化学势增加引起的抑制.特别是对一个非常高的初始温度,这个效应尤为重要.因此,从图 3 能看到在 $T_0 = 0.57\text{GeV}$ 时, $\mu_{q0} = 0.86\text{GeV}$ 计算的双轻子产额 $dN/dM^2 dY$ (曲线 4) 在 $\mu_{q0} = 0.10\text{GeV}$ 计算的产额(曲线 3)之上.图 3 曲线 1 为在热力学平衡 QGM 系统中计算的双轻子产额.后者已经表明中等质量双轻子的增强由于 QGM 的贡献^[6],因而曲线 3 和 4 进一步表明中等质量双

轻子的增强是由于 QGM 的产生.图 3 也画出 $T_0 = 0.57\text{GeV}$, $\mu_{q0} = 0.10\text{GeV}$ 不计及粲夸克贡献的曲线 2,与曲线 3 比较也能清楚地看到粲夸克的贡献非常重要.

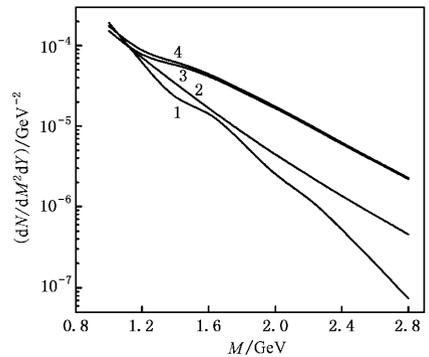


图 3 曲线 1 为在热力学平衡 QGM 系统中计算的双轻子产额 $dN/dM^2 dY$,曲线 2 为 $\mu_{q0} = 0.10\text{GeV}$ 不计及热粲夸克贡献在非化学平衡系统中计算的产额,曲线 3 和 4 化学势依次为 $\mu_{q0} = 0.10, 0.86\text{GeV}$ 时在化学非平衡 QGM 系统中计算的产额

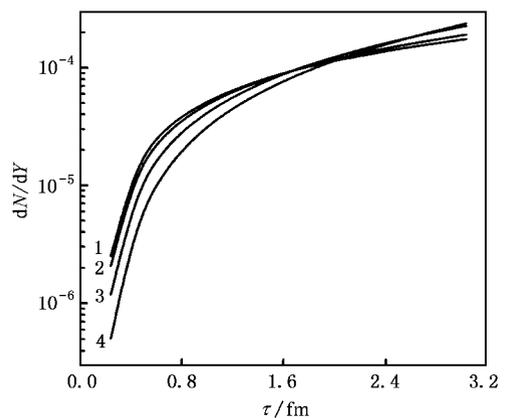


图 4 计算的 τ_0 到 τ 间总产额 dN/dY 随时间 τ 的变化. 曲线 1—4 依次对应初始夸克化学势 $\mu_{q0} = 0.00, 0.70, 1.40$ 和 2.10GeV

为了清楚地阐明双轻子产生与初始夸克化学势的关系,图 4 对不同初始夸克化学势示出 τ_0 到 τ 区间的总产额与演化时间 τ 的关系.曲线 1—4 依次对应初始化学势 $\mu_{q0} = 0.00, 0.70, 1.40$ 和 2.10GeV .在初始阶段由于系统冷却变慢在双轻子产生上的效应不太明显,产额随初始夸克化学势增加而抑制仍然显著.然而随演化时间的增加,冷却效应变得突出,

造成较大的初始夸克化学势对应着较高的产额,表明在化学非平衡的有限重子密度的 QGM 中双轻子产额不再是初始夸克化学势的单调下降函数.

随初始夸克化学势的增加,化学非平衡有限重子密度的 QGM 系统的冷却率下降,系统的寿命增长,加上系统的初始温度非常高,系统必然提供一个高的双轻子产额,尤其在中等质量区 $g\bar{g} \rightarrow c\bar{c}$ 贡献特

别大),因而在这个区域能得到双轻子增强的贡献.另一方面,这个效应能补偿甚至超过由初始夸克化学势增加而引起的双轻子抑制效应,造成双轻子产额随初始夸克化学势增加而增加.因此对于具有有限重子密度的化学非平衡的 QGM 系统,双轻子产额随初始夸克化学势的增加而抑制,不再是 QGM 形成的信号.

-
- [1] Ozaki S 1991 *Nucl. Phys. A* **525** 125c
- [2] Kampfer B *et al* 1995 *Z. Phys. A* **353** 71
- [3] Li Q G and Gale C 1998 *Phys. Rev. C* **58** 2914
- [4] Lin Z and Wang X N 1998 *Phys. Lett. B* **444** 245
- [5] Masera M 1995 *Nucl. Phys. A* **590** 93C
- [6] He Z J, Jiang W Z, Zhang J J and Liu B 2000 *Phys. Lett. B* **495** 317
- [7] He Z J, Jiang W Y, Zhu Z Y and Liu B 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 911 [in Chinese] 贺泽君、蒋维渊、朱志远、刘波 2000 物理学报 **49** 911]
- [8] He Z J, Zhou W J, Jiang W Y, Zhang J J and Liu B 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1312 [in Chinese] 贺泽君、周文杰、蒋维渊、张家驹、刘波 2002 物理学报 **51** 1312
- [9] Biro T S *et al* 1993 *Phys. Rev. C* **48** 1275
- [10] Levai B, Muller B and Wang X N 1995 *Phys. Rev. C* **51** 3326
- [11] Kampfer B, Pavlenko O P, Peshier A and Soff G 1995 *Phys. Rev. C* **52** 2704
- [12] Matsui T, Svetitsky B and McLerran L 1986 *Phys. Rev. D* **34** 783
- [13] Dutta D *et al* 1999 *Phys. Rev. C* **60** 14905-1
- [14] Cleymans J, Fingberg J and Redlich K 1987 *Phys. Rev. C* **35** 2153
- [15] He Z J, Zhang J J, Qiu X J and Chen J F 1987 *Nucl. Phys. A* **614** 552
- [16] Vogt R *et al* 1994 *Phys. Rev. D* **49** 3345
- [17] Gavin S, McGaughey P L, Ruushanen P V and Vogt R 1996 *Phys. Rev. C* **54** 2606
- [18] Shor A 1988 *Phys. Lett. B* **215** 375

Intermediate mass dilepton production in a chemically non-equilibrated quark-gluon matter^{*}

He Ze-Jun^{1,2)} Long Jia-Li¹⁾ Ma Guo-Liang¹⁾ Ma Yu-Gang¹⁾ Zhang Jia-Ju¹⁾ Liu Bo³⁾

¹⁾ *Shanghai Institute of Nuclear Research, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

²⁾ *Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*

³⁾ *Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*

(Received 14 November 2002 ; revised manuscript received 23 January 2003)

Abstract

We have studied dilepton production during the chemical equilibration of baryon-rich quark-gluon matter, and found that due to the slowing down of the cooling rate and the high initial temperature of the quark-gluon matter (QGM) produced at RHIC energies, the quark phase contribution to dileptons with intermediate masses is significantly heightened, thus, the enhancement of dileptons with intermediate masses should be an signal for the QGM formation. Since this enhancement can compensate the dilepton suppression caused by increasing the initial chemical potential, therefore, the dilepton suppression may not be a signal for the quark-gluon matter formation.

Keywords : chemically non-equilibrated quark-gluon matter, thermal charm quarks, dileptons

PACC : 4775, 2485

^{*} Project supported in part by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10075071), the Major Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10135030), the Major Project of Knowledge Innovation Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJCX2-N11), the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G2000FF400), and the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences.