

核形变对 J/ψ 压低的效应*

萨本豪^{1,2,1)} 陆中道^{1,2)} 苏宗涤¹⁾

1(中国原子能科学研究院 北京 102413)

2(兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

摘要 用强子和弦级联模型, JPCIAE, 研究(200A GeV)U + U 中心碰撞中核形变对 J/ψ 压低的效应. 结果表明:在两形变核的长轴都沿束流方向的碰撞中, J/ψ 压低因子约为两长轴都垂直于束流方向碰撞时的二分之一.

关键词 核形变 J/ψ 介子 J/ψ 压低 JPCIAE 模型

由于色屏蔽效应, J/ψ 将会在相对论性核-核碰撞形成的夸克-胶子等离子体(QGP)中解离, 从而导致该碰撞中 J/ψ 产额的降低. 于是 J/ψ 压低被预言为相对论性核-核碰撞中是否有 QGP 形成的一个重要的诊断信号^[1].

在欧洲核子研究中心, CERN 的相对论性核子-核^[2]以及核-核^[3,4]碰撞中果真观察到了 J/ψ 产额比同能量下质子-质子碰撞的几何迭加要低的现象. 核子和共运者(comover)吸收机制^[5-16]能解释上述实验中轻的弹核, 如 p-A, O-U 和 S-U 碰撞的实验结果; 但是重的弹核, 如 Pb-Pb, 碰撞中观察到的 J/ψ 反常压低^[4]能否用上述核吸收机制解释依然看法分歧^[17-19], 而且已出现基于 QGP 效应的解释^[12,13,16,20,21].

人们也用输运模型仔细研究相对论性核-核碰撞中 J/ψ 的产生和吸收^[22-29]. 虽然这些输运模型互相有差别, 但是它们却共同认为:欲解释 Pb-Pb 碰撞中 J/ψ 反常压低, 除核吸收外尚需引入新机制. 文献[25,26]发现:引入 J/ψ 先驱者 $c\bar{c}$ 态在初始高密弦物质的色电场中离解的机制也能解释 Pb-Pb 碰撞中 J/ψ 反常压低. 因此, 有关研究必须进一步深入.

文献[30]建议研究形变核碰撞中的 J/ψ , 因为在这种碰撞中有大的空间不对称性, 于是有可能从未态 J/ψ 的方位角分布研究 J/ψ 压低. 文献[31]报道了形变核在 AGS 能量(约每核子 15 GeV/c)的核-核碰撞中起作用的结果:两核长轴都沿束流方向(长-长)的碰撞中初始最高核密度比两长轴都垂直于束流方向(短-短)碰撞约大 38%, 而且碰撞经历的时间也长些.

2000-09-07 收稿

国家自然科学基金(19975075), 核工业基金(Y7197A0108)和兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心基金资助

1) 中国科学院理论物理研究所客座研究员

倘若相对论性核-核碰撞初始的高能量密度物质是 QGP 物质, J/ψ 将因色屏蔽而离解; 但若是弦物质则将因色电场而离解. 无论那种情形都可期望: 长-长碰撞的 J/ψ 压低要比短-短碰撞厉害. 本文将用强子-弦级联模型, JPCIAE, 研究 SPS 能量 (约每核子 200 GeV/c) U-U 碰撞中的上述效应. JPCIAE 是 JETSET, PYTHIA 和 China Institute of Atomic Energy 的缩写; JETSET 和 PYTHIA 是瑞典 LUND 软件包^[32], 用以描写相对论性强子-强子碰撞; 我们将其推广并应用于相对论性核-核碰撞. 在文献[24, 26]中我们已成功地用 JPCIAE 描述了 SPS 能量下球形核碰撞的 J/ψ 压低数据. 下面将看到, 由于能量密度和碰撞时间的增加, 长-长碰撞下色电离解引进的 J/ψ 压低将比短-短碰撞厉害得多.

在 JPCIAE 模型中核-核碰撞被描写为强子-强子碰撞的几何迭加, 不过用通常两体碰撞的办法^[33-35]考虑了产生粒子间及其和参加者核子还有旁观者核子间的末态相互作用. 本文所用的 JPCIAE 版本包括了 J/ψ 的产生 (通过 PYTHIA) 和消灭. 若强子-强子碰撞的质心能量 $\geq 4\text{GeV}$ 该碰撞就由 PYTHIA 描写, 否则按通常两体碰撞处置. 若强子-强子碰撞的质心能量大于 10 GeV, 调用的 PYTHIA 子程序还打开了 J/ψ 产生道

$$g + g \rightarrow J/\psi + g, \quad (1)$$

其中 g 指强子中的胶子.

本版本的 JPCIAE 模型中, J/ψ 压低机制包括了: 核吸收 (重子和介子), 领头核子能量衰减和 J/ψ 先驱者 $c\bar{c}$ 态在弦色电场中的解离^[26]; 因此总的 J/ψ 压低因子可表示为

$$S_{\text{tot}}^{J/\psi} = S_{\text{abs}}^{J/\psi} \times S_{\text{den}}^{J/\psi} \times S_{\text{dis}}^{J/\psi}, \quad (2)$$

其中 $S_{\text{abs}}^{J/\psi}$, $S_{\text{den}}^{J/\psi}$ 和 $S_{\text{dis}}^{J/\psi}$ 分别指上述三机制的压低因子. 文献[28]中也引入头两种机制以描写质子-核碰撞中 J/ψ 压低. 至于 JPCIAE 模型的详情可参阅[24, 26].

假设 U-U 碰撞中弹和靶核子初始是均匀地分布于相应核的椭球内; 椭球半长轴 $a = R\left(1 + \frac{2}{3}\delta\right) = 8.4\text{fm}$, 半短轴 $b = R\left(1 - \frac{1}{3}\delta\right) = 6.5\text{fm}$; R 是相应球核半径 7.0 fm, $\delta = 0.29$ 是 U 核形变参数^[36]. 其他模型参数和过去^[24, 26]一样, 即产生粒子固有形成时间 $\tau = 1.2\text{fm}/c$, J/ψ 被重子和介子吸收截面分别为 $\sigma_{J/\psi-B}^{\text{abs}} = 6\text{mb}$ 和 $\sigma_{J/\psi-M}^{\text{abs}} = 3\text{mb}$, 另外 J/ψ 在弦色电场中离解的有效系数 $c_s = 6 \times 10^{-7}\text{GeV}^{-1}$.

图 1 给出 200 A GeV/c U-U 中心碰撞中碰撞核不同取向情况下 J/ψ 总压低因子, 横轴标志 B-B (短-短), T-B (长-短) 和 T-T (长-长) 分别指弹和靶两核的两短轴, 一长轴一短轴, 和两长轴都沿束流方向的情形. 为了比较, 图中也给出了把两核都视为球形核的结果 S-S (球形). 由图可见: 从 B-B 到 S-S 到 T-B 再到 T-T J/ψ 压低因子越来越小. 此结果定性地可由两碰撞核互相穿透时间以及参加者核子数随核取向的改变来理解^[30, 37]. 因是中心碰撞, 4 种碰撞几何下参加者核子数大致相同; 而 B-B, S-S, T-B 和 T-T 4 种碰撞几何的穿透时间则分别为 $t^{\text{B-B}} = 2b/(\beta\gamma)$, $t^{\text{S-S}} = 2R/(\beta\gamma)$, $t^{\text{T-B}} = (a+b)/(\beta\gamma)$ 和 $t^{\text{T-T}} = 2a/(\beta\gamma)$, 其中 β 和 γ 分别指核子-核子质心系中的速度和劳仑兹因子. 若定义球形几何的穿透时间为 1 则有 $t^{\text{B-B}}:t^{\text{S-S}}:t^{\text{T-B}}:t^{\text{T-T}} = 0.93:1.0:1.07:1.2$. 从此估计得 T-T 碰撞 J/ψ 压低因子比 B-B 小 30%, 它与由图读得的相应百分数 28% 相近.

图 1 还给出了取向几何对各个压低机制的效应. 由图可见 T-T 碰撞的核吸收比 B-B

B 约强 21% . 但 T-T 碰撞因领头核子能量衰减效应只引起比 B-B 多 5% 的压低, 因为 J/ψ 大多产生于第一次核子-核子碰撞. 更甚者是此图看不到取向几何对弦色电场中 J/ψ 离解的效应. 那是因为文献[26]中假设 J/ψ 先驱者 c c̄ 对, 在初始稠密的弦物质中色电离解的几率是简单地比例于入射能量和碰撞系统的中心度以及大小, 即

$$P_d = c_s \sqrt{S_{NN}} \exp\left(-\frac{b}{R_L}\right)^2 \frac{AB}{R_L} \quad (3)$$

($S_{\text{dis}}^{J/\psi} = 1 - P_d$), 式中 $\sqrt{S_{NN}}$ 是初始核子-核子质心系能量, b 是核-核碰撞参数, R_L 是弹核(质量数为 A) 和靶核(质量数为 B) 中大者的半径. 此假设是基于 LUND 模型中的弦连续激发图像: 色电场是沿着弦通过核子-核子(核子-弦或弦-弦)碰撞而不断建立起来的; 弦经历的上述碰撞越多, 沿弦的色电场越强, J/ψ 在其中离解的可能性越大. 因此可以期望: 碰撞的初始能量密度越高, J/ψ 压低得越厉害. 然而简单的参数化形式(3)却没很好地反映这一思想, 作为暂时的补救措施先通过(3)式中的离解系数 c_s 作文章; 因为前面的计算中对不同碰撞几何都用同样的有效离解系数 c_s 而不顾不同几何下初始弦物质稠密程度(初始能量密度)不同的事实.

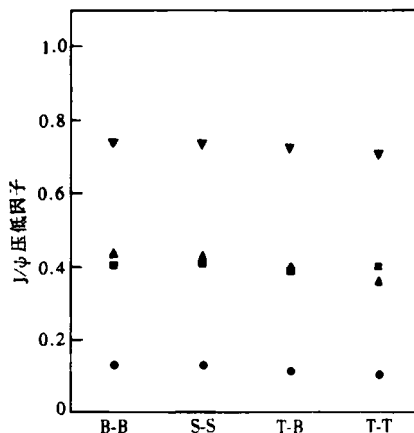


图 1 (200A GeV/c)U + U 中心碰撞中形变轴取向不同情况下 J/ψ 压低因子

● S_{tot} , ▲ S_{abs} , ▼ S_{des} , ■ S_{dis} ;
 $R = 7\text{fm}$, $a = 1.2R$, $b = 0.93R$.

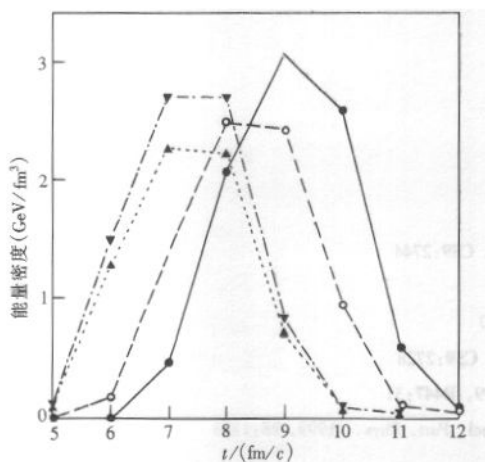


图 2 (200A GeV/c)U + U 中心碰撞中形变轴取向不同情况下中心能量密度的时间发展

● T-T, ○ S-S, ▲ B-B, ▼ T-B.

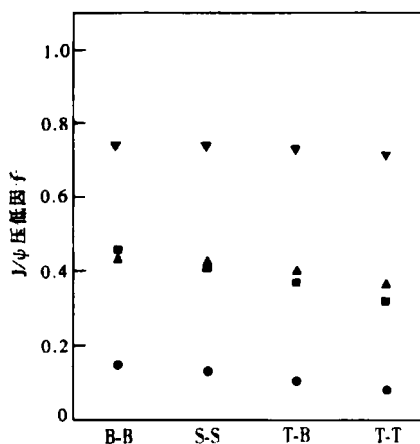


图 3

图示同图 1, 但假设有效色电离解系数与初始能量密度有关, 详见文.

图 2 给出计算得的不同碰撞几何下靶核中心附近半径为 2fm 的球内局域能量密度随时间的变化(时间零点定于首次核子-核子碰撞). 由图可见: 譬如 T-T 碰撞能达到的最大能量密度比 B-B 约大 35%. 因此令 T-T, T-B 和 B-B 碰撞时(3)式中的有效色电离

解因子乘以 1.2, 1.07 和 0.93 重新计算;得到的结果给在图 3 中. 由此图可见:形变核几何取向对 J/ψ 色电场离解的效应比核吸收和领头粒子能量衰减都强得多. 现在 T-T 碰撞 J/ψ 压低几乎比 B-B 小两倍. 这些结果显然有助于判断相对论性核-核碰撞的初始阶段是否有非强子稠密物质(QGP)形成.

当然,实验上如何确定形变核取向以及理论上对 J/ψ 在弦色电场中离解的深入研究等都有待进一步研究.

参考文献 (References)

- 1 Matsui T, Satz H. Phys. Lett., 1986, **B178**:416
- 2 Badier J et al, NA3 Collab. Z Phys., 1981, **C11**:195; 1983, **C20**:101
- 3 Baglin C et al, NA38 Collab. Phys. Lett., 1989, **B220**:471; 1990, **B251**: 465; 1991, **B255**: 459; 1991, **B270**: 105; 1995, **B345**: 617
- 4 Gonin M, NA50 Collab. Nucl. Phys., 1996, **A610**:404c
- 5 Capella A, Casado J A, Pajares C et al. Phys. Lett., 1988, **B206**:354
- 6 Gerschel C, Huefner J. Phys. Lett., 1988, **B207**:253
- 7 Gavin S, Gyulassy M, Jackson A. Phys. Lett., 1988, **B207**:257
- 8 Vogt R, Prakash M, Koch P et al. Phys. Lett., 1988, **B207**:263
- 9 Neubauer D, Sailer K, Mueller B et al. Mod. Phys. Lett., 1989, **A4**:1627
- 10 Gavin S, Vogt R. Nucl. Phys., 1990, **B345**:104
- 11 Gerschel C, Huefner J. Nucl. Phys., 1992, **A544**:513c
- 12 WANG C Y. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:196; Nucl. Phys., 1996, **A610**:434c
- 13 Blaizot J-P, Ollitrault J-Y. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:1703
- 14 Kharzeev D. Nucl. Phys., 1996, **A610**:418c
- 15 Gavin S, Vogt R. Nucl. Phys., 1996, **A610**:442c
- 16 Kharzeev D, Nardi M, Satz H. Phys. Lett., 1997, **B405**:14
- 17 Gavin S, Vogt R. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:1006
- 18 Armesto N, Capella A. Phys. Lett., 1998, **B430**:23
- 19 Vogt R. Phys. Lett., 1998, **B430**:15
- 20 Shuryak E, Teaney D. Phys. Lett., 1998, **B430**:3
- 21 Hammon N, Gerland L, Stoecker H et al. Phys. Rev., 1999, **C59**:2744
- 22 Cassing W, Ko C M. Phys. Lett., 1997, **B396**:39
- 23 Cassing W, Bratkovskaya E L. Nucl. Phys., 1997, **A623**:570
- 24 SA Ben-Hao, TAI An, WANG Hui et al. Phys. Rev., 1999, **C59**:2728
- 25 Geiss J, Greiner C, Bratkovskaya E I. et al. Phys. Lett., 1999, **B447**:31
- 26 SA Ben-Hao, Amand Faessler, TAI An et al. J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 1999, **25**:1123
- 27 Kahana D E, Kahana S H. Phys. Rev., 1999, **C59**:1651
- 28 Gale C, Jeon S, Kapusta J. Phys. Lett., 1999, **B459**:455
- 29 Spieles C, Vogt R, Gerland L et al. Phys. Rev., 1999, **C60**:054901
- 30 Shuryak E V. Phys. Rev., 2000, **C61**:034905
- 31 LI Bao-An. Phys. Rev., 2000, **C61**:021903
- 32 Sjostrand T. Comp. Phys. Comm., 1994, **82**:74
- 33 Cugnon J, Mizutani T, Vandermeulen J. Nucl. Phys., 1981, **A352**:505
- 34 Bettsch G F, Das Gupta S. Phys. Rep., 1988, **160**:189
- 35 SA Ben-Hao, TAI An. Comp. Phys. Comm., 1995, **90**:121; 1999, **116**:353

36 Bohr A, Mottelson B. Nuclear Structure. Benjamin, New York, 1975, Vol. II, 133

37 LIU H, Panitkin S, XU N. Phys. Rev., 1999, C59:348

Nuclear Deformation Effect on the J/ψ Suppression*

SA Ben-Hao^{1,2,1)} LU Zhong-Dao^{1,2} SU Zong-Di¹

1(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

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

Abstract The nuclear deformation effect on the J/ψ suppression in U-U central collisions at 200A GeV/c is investigated based on the hadron and string cascade model, JPCIAE. We found that the J/ψ suppression is nearly decreased by a factor of two, if the major axes of both deformed nuclei are changed from along the beam direction, to the perpendicular the beam direction.

Key words nuclear deformation, J/ψ meson, J/ψ suppression, JPCIAE model

Received 7 September 2000

* Supported by National Natural Science Foundation of China (19975675), Nuclear Industry Foundation of China (Y7197A0108) and Center of Theoretical Nuclear Physics of Lanzhou Heavy Ion Accelerator National Laboratory of China

1) Guest Research Professor of Institute of Theoretical Physics, The Chinese Academy of Sciences