

# 高能重离子碰撞中的 $J/\psi$ 反常抑制现象

李 强<sup>†</sup> 姜志进 夏宏福

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

(2005 年 10 月 27 日收到 2006 年 1 月 9 日收到修改稿)

对 NA50 合作组给出的入射动量为 158A GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中的  $J/\psi$  反常抑制现象进行了分析. 在  $J/\psi$  的核与随动者吸收理论基础上, 假设了 QGP 相变在对心 Pb-Pb 碰撞中的产生及 QGP 环境对  $J/\psi$  粒子 100% 的吸收效应, 从而改进了高能重离子碰撞中的  $J/\psi$  微分产生截面, 理论较好地解释了实验结果.

关键词:  $J/\psi$  反常抑制, 核吸收, 随动者, 夸克-胶子等离子体

PACC: 2485

## 1. 引 言

$J/\psi$  反常抑制是一个被普遍看好的夸克-胶子等离子体(QGP)相变的识别信号<sup>[1,2]</sup>.  $J/\psi$  是粲夸克  $c$  与反粲夸克  $\bar{c}$  的束缚态, 在 QGP 相变温度<sup>[3,4]</sup> (100—200 MeV) 下, 处于 QGP 中的  $c\bar{c}$  系统将被解体为分离的  $c$  夸克与  $\bar{c}$  反夸克. 然后,  $c$  夸克与  $\bar{c}$  反夸克通过与轻夸克或轻反夸克结合, 产生像  $D(c\bar{u})$  和  $\bar{D}(\bar{c}u)$ ,  $D_s(c\bar{s})$  及  $\bar{D}_s(\bar{c}s)$  等质量比较轻的末态开粲介子, 从而抑制了  $J/\psi$  粒子的产生. 这样, 我们就可以将  $J/\psi$  的反常抑制现象作为 QGP 相变的识别信号.

在 CERN 的 NA50 合作组所做的入射动量为 158A GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中<sup>[5]</sup>,  $J/\psi$  反常抑制现象确已观察到. 该实验表明,  $J/\psi$  微分产生截面随横能量的分布呈双阶梯下降形式, 其中第一下降阶梯处在  $E_T \leq 45$  GeV 的范围内, 第二下降阶梯处在  $E_T \geq 100$  GeV 的范围内, 如图 3 中的圈和点线示. 这样的结果曾引发了一场对其产生原因的理论大讨论. 所提出的理论大致可分为两类, 一类认为所观察的实验现象是由于 QGP 相变所致<sup>[6-9]</sup>; 另一类认为所观察的实验现象与 QGP 相变无关, 而是由于碰撞产生的  $J/\psi$  粒子在穿越碰撞区域的过程中, 与周围介质的强作用所致<sup>[10-17]</sup>. 两类理论都取得了一定的成功, 但也存在一些问题, 特别是基于  $J/\psi$  的强作用理论, 不能给出图 3 中的第二个下降阶梯.

本文将在  $J/\psi$  强作用的核与随动者(Comovers)吸收理论的基础上, 假设在对心的 Pb-Pb 碰撞中有 QGP 产生且 QGP 物质对  $J/\psi$  粒子有 100% 的抑制效应, 给出了高能重离子碰撞中的  $J/\psi$  微分产生截面. 从后面的讨论可以看出,  $J/\psi$  的强作用与 QGP 相变因素一起, 可对 NA50 合作组所观察到的  $J/\psi$  反常抑制现象给出很好的描述.

## 2. $J/\psi$ 的强作用抑制模型

$J/\psi$  的核与随动者吸收理论在许多文献里都有描述<sup>[10-17]</sup>, 为了完整起见, 这里我们将对它们的主要内容作以简单介绍.

核吸收理论首先是人们为了解释质子-核碰撞中的  $J/\psi$  抑制现象时提出来的. 质子-核碰撞中产生的  $J/\psi$  粒子在穿越核介质的过程中, 要与其中的核子  $N$  发生强作用而有如下反应:

$$J/\psi + N \rightarrow D + \bar{D} + X, \quad (1)$$

从而导致  $J/\psi$  产额的下降, 由于这种下降是由于  $J/\psi$  与核中的核子碰撞所致, 所以称  $J/\psi$  的这种抑制效应为核吸收效应.

后来, 人们又将该理论加以推广, 试图用以描述核-核碰撞中的  $J/\psi$  抑制现象. 按文献 [10, 18], 在碰撞参数为  $b$  的核-核碰撞中, 两核碰撞区域内在相对于  $A$  核中心为  $s$  处的一个  $J/\psi$  粒子免遭核子离解而存活的几率为

<sup>†</sup> E-mail: listrong6@sohu.com

$$S_{\text{abs}}(\mathbf{b}, s) = \frac{\{1 - \exp[-AT_A(s)\sigma_{\text{abs}}]\}\{1 - \exp[-BT_B(\mathbf{b}-s)\sigma_{\text{abs}}]\}}{AB\sigma_{\text{abs}}^2 T_A(s)T_B(\mathbf{b}-s)}, \quad (2)$$

其中  $\sigma_{\text{abs}} = 4.8 \text{ mb}^{[19]}$  为  $J/\psi$  与核子碰撞而被离解的截面, 称为核吸收截面,  $T_A$  与  $T_B$  分别为弹、靶两核的厚度函数, 其定义为

$$T(s) = \int \rho(s, z) dz, \quad (3)$$

其中  $\rho(s, z)$  为原子核的核子数密度, 它通常取成 Woods-Saxon 分布形式, 即

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - r_0)/a]}, \quad (4)$$

其中  $r_0, a$  为两个常数, 不同的文献对它们的取值不同<sup>[20-23]</sup>, 本文取  $r_0 = 1.1 A^{1/3} \text{ fm}$ ,  $a = 0.53 \text{ fm}^{[20]}$ , 其中  $A$  为核的质量数, 而(4)式中的常数  $\rho_0$  由条件

$$\int_V \rho(r) dV = A, \quad (5)$$

确定. 对于铅核 Pb 来说,  $A = 207$ , 则  $r_0 = 6.5 \text{ fm}$ ,  $\rho_0 = 0.17 / \text{fm}^3$ . 图 1 给出了铅核的核子数密度与其半径的关系. 由该图可以看出, 铅核内的核子主要集中在核内半径  $r \leq 5 \text{ fm}$  的范围内, 且该区域内的核子数密度几乎保持不变, 处处近似为  $\rho_0$ , 超过该范围, 核子数密度将急剧下降, 到达  $r = r_0 = 6.5 \text{ fm}$  处, 已降至  $\rho_0/2$ , 在  $r \geq 10 \text{ fm}$  时, 核子已经不存在了. 这里, 为简单起见, 我们近似取<sup>[24-26]</sup>  $\rho(r) \approx \rho_0 = 0.17 / \text{fm}^3$ .

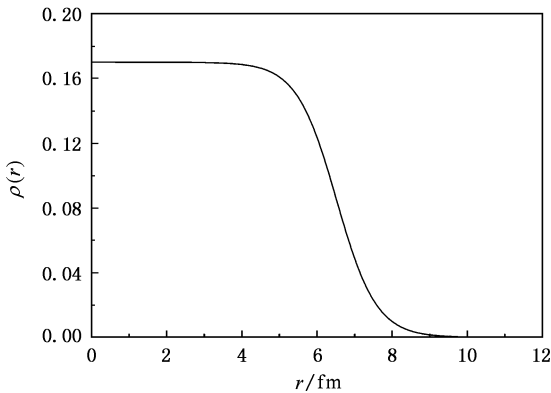


图 1 铅核的核子数密度与其半径  $r$  的关系

在核吸收模型下, 核-核碰撞中的  $J/\psi$  微分产生截面为

$$\frac{d\sigma_{\text{abs}}^{J/\psi}}{dE_T} = \sigma_{\text{NN}}^{J/\psi} \int d^2 \mathbf{b} \int d^2 s S_{\text{abs}}(\mathbf{b}, s) P(E_T, \mathbf{b}), \quad (6)$$

其中  $\sigma_{\text{NN}}^{J/\psi}$  为核子-核子碰撞中的  $J/\psi$  粒子产生截面,

$$P(E_T, \mathbf{b}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi q^2 a N_p(\mathbf{b})}} \exp\left[-\frac{(E_T - qN_p(\mathbf{b}))^2}{2q^2 a N_p(\mathbf{b})}\right], \quad (7)$$

是碰撞参数为  $\mathbf{b}$ 、参与者数为  $N_p(\mathbf{b})$  时的横能量分布<sup>[7]</sup>, 其中  $q = 0.274 \text{ GeV}$  为每个参与者的平均横能量,  $a = 1.27$  为一无量纲参数,

$$N_p(\mathbf{b}) = \int d^2 s n_p(\mathbf{b}, s), \quad (8)$$

其中

$$n_p(\mathbf{b}, s) = T_A(s) \{1 - \exp[-\sigma_{\text{NN}} T_B(\mathbf{b}-s)]\} + T_B(\mathbf{b}-s) \{1 - \exp[-\sigma_{\text{NN}} T_A(s)]\}, \quad (9)$$

是碰撞参数为  $\mathbf{b}$  时, 在两核碰撞区域内距 A 核中心为  $s$  处单位面积内参与碰撞的核子数,  $\sigma_{\text{NN}} = 40 \text{ mb}$  为核子-核子非弹性碰撞截面<sup>[27]</sup>, 对于没有变形且没有特殊取向的核,  $N(\mathbf{b})$  只依赖于  $b$  的大小而与其方向无关, 这时  $N(\mathbf{b}) = N(b)$ . 图 2 给出参与者数与碰撞参数的关系.

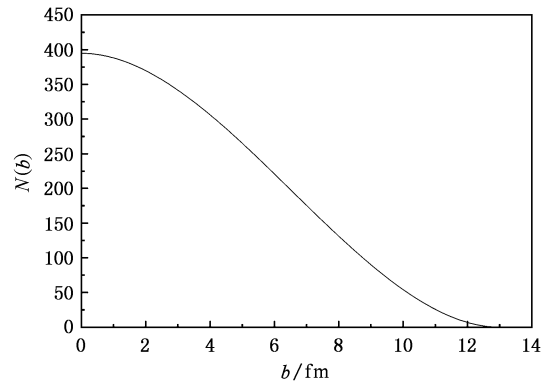


图 2 参与者数  $N(b)$  与碰撞参数  $b$  的关系

实验表明, (6) 式对于轻入射核诱发的核反应 (如: O-Cu, O-U, S-U) 中的  $J/\psi$  抑制现象的描述是成功的<sup>[17, 28]</sup>. 但对于重核, 它与实验结果的偏差就很大了, 如图 3 中的点线示. 图中纵坐标中的

$$\frac{d\sigma^{\text{DY}}}{dE_T} = \sigma_{\text{NN}}^{\text{DY}} \int d^2 \mathbf{b} \int d^2 s T_A(s) \times T_B(\mathbf{b}-s) P(E_T, \mathbf{b}), \quad (10)$$

为核-核碰撞中的 Drell-Yan 对微分产生截面<sup>[7]</sup>,  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{DY}}$  为核子-核子碰撞中的 Drell-Yan 对产生截面, 本文取<sup>[7]</sup>  $\sigma_{\text{NN}}^{J/\psi} / \sigma_{\text{NN}}^{\text{DY}} = 53.5$ .

为了改善(6)式与实验结果的拟合情况,

Capella 等人认为<sup>[10]</sup>, 核-核碰撞中产生的  $J/\psi$  粒子在穿越碰撞区域的过程中, 不但要与核子发生强作用, 亦要与末态强子  $\rho, \omega$  通过过程

$$J/\psi + \left\{ \begin{array}{l} \rho \\ \omega \end{array} \right\} \rightarrow \bar{D} + D, \quad (11)$$

发生强作用而被离解, 从而使  $J/\psi$  粒子的产额进一步降低. 能与  $J/\psi$  粒子发生上述反应的粒子被称为“随动者”(Comovers), 它们的快度与  $J/\psi$  粒子的相近(这也是“随动者”一词称谓的由来). 由文献[29]知, 一个  $J/\psi$  粒子免遭随动者吸收而存活的几率为

$$S_{\text{com}}(E_T) = \exp\left[-\sigma_{\text{com}} v n_0 \tau_0 \ln\left(\frac{R_T}{v\tau_0}\right)\right], \quad (12)$$

其中  $v \approx 0.6$  为  $J/\psi$  与随动者间的相对速度,  $\tau_0 \approx 1 \text{ fm}/c$  为随动者的形成时间.  $R_T \approx R_A$  为  $J/\psi$  与随动者相互作用的横向区域的大小,  $\sigma_{\text{com}} = 4 \text{ mb}$  为随动者对  $J/\psi$  粒子的吸收截面,  $n_0$  为随动者数密度, 它与横能量之间有关系

$$n_0 = \bar{n}_0 \frac{E_T}{E_T(0)}, \quad (13)$$

其中  $\bar{n}_0 = 1/\text{fm}^3$ ,  $E_T(0) = qN_p(0) = 108 \text{ GeV}$  为碰撞参数  $b = 0$  时的平均横能量. 这样, 在考虑到随动者的吸收作用后, (6) 式变为

$$\frac{d\sigma_{\text{abs+com}}^{J/\psi}}{dE_T} = \sigma_{\text{NN}}^{J/\psi} \int d^2 \mathbf{b} \int d^2 \mathbf{s} S_{\text{abs}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) S_{\text{com}}(E_T) \mathcal{P}(E_T, \mathbf{b}). \quad (14)$$

图 3 中的虚线给出了上式的数值计算结果. 由图可见, 在考虑了随动者吸收后, 理论与实验的符合情况有了很大的改善. 但在  $E_T \geq 100 \text{ GeV}$  区域内不能给出实验上观察到的第二个下降阶梯, 而该下降阶梯是  $J/\psi$  反常抑制的一个重要特征, 一个合理的理论模型, 应该能对该特征作出解释.

### 3. QGP 环境下的 $J/\psi$ 抑制

我们认为, 要合理解释 NA50 合作组的实验现象, 需要假设在对心的 Pb-Pb 碰撞中有 QGP 相变产生.

按照 Bjorken 设想<sup>[30]</sup>, 在 高能 Pb-Pb 对心碰撞中, 若有 QGP 产生, 则强子的产生将经历如下 5 个过程: 1) 非平衡的 QGP 相. 这是 Pb-Pb 对心碰撞中的最初 QGP 产物, 它们集聚在质心 ( $z = 0$ ) 附近的一个非常小的空间范围内, 具有非常高的密度与温度, 并处于急速膨胀的状态, 与之相比, 夸克与胶

子的热运动可被忽略; 2) QGP 热平衡过程相. 随着 QGP 体积增大, 其密度与温度将迅速下降, 膨胀速度亦变缓, 夸克与胶子的热运动将处于主导地位, QGP 将逐渐趋于热平衡; 3) 热平衡 QGP 相. 经平衡过程后, QGP 达到热平衡, 这时我们就可以采用流体力学或统计力学的方法, 借助于热力学参量, 如温度、压强、密度等对 QGP 进行描述; 4) QGP 与强子共存相. 随着 QGP 的不断膨胀, 其体积不断增加, 温度不断下降, 当温度下降到一定程度时, 将有强子产生, 这时 QGP 与强子将共处一相; 5) 纯强子相. 当 QGP 的温度进一步降至“冻结”温度以下, 全部 QGP 将被“冻析”成强子, 成为可测量的末态粒子.

由引言部分的讨论知, 在有 QGP 产生的情况下, 构成  $J/\psi$  粒子的  $c\bar{c}$  系统将被解体为分离的  $c$  夸克与  $\bar{c}$  反夸克. 这些被离解的  $c$  夸克与  $\bar{c}$  反夸克再通过与轻夸克或轻反夸克结合, 产生如  $D, \bar{D}, D_s$  及  $\bar{D}_s$  等质量较轻的末态开壳介子, 因此我们进一步假设, 在对心的 Pb-Pb 碰撞中, 若有 QGP 相变产生, 则末态将不可能有  $J/\psi$  粒子产生, 也就是说, QGP 彻底地抑制了  $J/\psi$  粒子的生成. QGP 虽然形成时间比随动者的形成时间要早, 但是存在时间<sup>[31]</sup>却足够与强子共同起作用. 这样我们就可以引入一个阶跃函数

$$S_{\text{QGP}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) = \Theta(n_c - n_p), \quad (15)$$

来描述 QGP 对  $J/\psi$  产生的这种 100% 的抑制效应, 其中  $n_c$  为一参数, 本文取  $n_c = 4.41 \text{ fm}^{-2}$ ,  $n_p(\mathbf{b}, \mathbf{s})$  由(9)式给出, 其取值与 Pb-Pb 碰撞的对心度有关, 随着对心度的增大 ( $b$  减小), 其值将增大.

这样, 在考虑到 QGP 的(15)式抑制因子后, (14)式应修改为

$$\frac{d\sigma_{\text{abs+com+QGP}}^{J/\psi}}{dE_T} = \sigma_{\text{NN}}^{J/\psi} \int d^2 \mathbf{b} \int d^2 \mathbf{s} S_{\text{abs}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) \times S_{\text{com}}(E_T) S_{\text{QGP}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) \mathcal{P}(E_T, \mathbf{b}). \quad (16)$$

上式即为在核、随动者及 QGP 三方吸收下的  $J/\psi$  微分产生截面. 它与(14)式相比多了一个抑制因子  $S_{\text{QGP}}(\mathbf{b}, \mathbf{s})$ , 这使得两式所反映出的物理意义有很大不同. (14)式表示  $J/\psi$  粒子在整个对心度范围内都有产生, 产生后的  $J/\psi$  粒子将遭受核与随动者的吸收; 而(16)式, 由于存在抑制因子  $S_{\text{QGP}}(\mathbf{b}, \mathbf{s})$ , 所以该式表示  $J/\psi$  粒子仅在非对心的 Pb-Pb 碰撞中产生并遭受与(14)式相同的吸收过程.

完成(16)式的数值计算, 我们得到如图 3 中的

实线所示的结果. 由该图可以看出, 该式不但在中低横能量区与(14)式给出的结果一样好, 在  $E_T \geq 100$  GeV 的高横能量区, 该式亦很好地再现了  $J/\psi$  反常抑制的第二个下降阶梯.

图 3 中的理论曲线是很好理解的. 在非对心的 Pb-Pb 碰撞中(相应于图 3 中的  $E_T < 100$  GeV 区域), 由于没有 QGP 产生, 这样(16)式中的抑制因子  $S_{\text{QGP}}(b, s)$  不起作用, 所以(16)式与(14)式相同, 因此两式给出了完全相同的理论曲线; 但对于对心碰撞(相应于图 3 中的  $E_T \geq 100$  GeV), 由于有 QGP 产生, 所以(16)式中抑制因子  $S_{\text{QGP}}(b, s)$  将起作用, 完全抑制了这类过程中  $J/\psi$  粒子的产生, 使得  $E_T \geq 100$  GeV 的  $J/\psi$  粒子仅来源于非对心 Pb-Pb 碰撞, 因此相对于(14)式其产额大大降低了, 从而导致了第二个下降阶梯的出现.

由图 3 可以看出, 在  $E_T \leq 40$  GeV 的低横能量区, 有几个实验点符合的不是太好, 理论较实验显示出更强的抑制效应. 产生这种现象的主要原因是由于我们将(4)式中的  $\rho(r)$  近似取成常数  $\rho_0 = 0.17/\text{fm}^3$ , 而实际上如图 1 所示, 原子核边缘部分的核子数密度远小于  $\rho_0$ , 所以对于边缘碰撞(对应于低  $E_T$  区), 实际的  $J/\psi$  抑制效应会比本文给出的要小得多. 因此, 我们预期, 若改用(4)式的  $\rho(r)$  做计算, 在  $E_T \leq 40$  GeV 的横能量区中的  $J/\psi$  抑制要小的多, 理论与实验的拟合情况将得到显著改善. 而  $\rho(r)$  的这种改变, 对中、高横能量区的拟合情况不会产生多大影响.

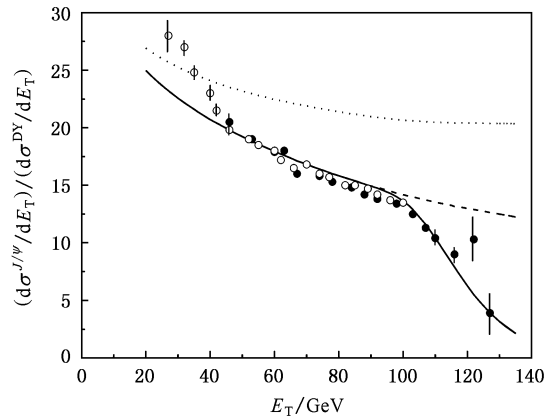


图 3 Pb-Pb 碰撞中  $J/\psi$  微分产生截面随横能量的变化关系  
○与●为实验数据, 由 NA50 合作组分别于 1996 与 1998 年测得; 点线为核吸收理论计算结果; 虚线为核与随动者吸收理论计算结果; 实线为本文计算结果

## 4. 结 论

在核与随动者吸收理论的基础上, 假设了 QGP 相变在对心 Pb-Pb 碰撞中的产生及 QGP 环境对  $J/\psi$  粒子 100% 的抑制效应, 得到核-核碰撞中  $J/\psi$  粒子的微分产生截面, 结果很好地描述了 NA50 合作组在入射动量为  $158A$  GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞实验中所观察到的  $J/\psi$  反常抑制现象, 准确地再现了  $E_T \geq 100$  GeV 区域内的第二下降阶梯. 因此, 从本文的角度来看, 在 NA50 合作组的实验中, QGP 在 Pb-Pb 对心碰撞中已经产生.

- [ 1 ] Matsui T, Satz H 1986 *Phys. Lett. B* **178** 416  
 [ 2 ] Satz H 2000 *Rep. Prog. Phys.* **63** 1511  
 [ 3 ] Satz H 1984 *Nucl. Phys. A* **418** 447c  
 [ 4 ] Braun-Munzinger P, Heppe I, Stachel J 1999 *Phys. Lett. B* **465** 15  
 [ 5 ] Abreu M C *et al* (NA50 Collaboration) 2000 *Phys. Lett. B* **477** 28; 2002 *Nucl. Phys. A* **698** 127c  
 [ 6 ] Blaizot J P, Ollitrault J Y 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1703  
 [ 7 ] Blaizot J P, Dinh P M, Ollitrault J Y 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 4012  
 [ 8 ] Nardi M, Satz H 1999 *Phys. Lett. B* **442** 14  
 [ 9 ] Chaudhuri A K 2002 *Phys. Lett. B* **527** 80  
 [ 10 ] Capella A *et al* 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2080  
 [ 11 ] Armesto N, Capella A *et al* 2002 *Nucl. Phys. A* **698** 583  
 [ 12 ] Qiu J W, Vary J P, Zhang X F 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 232301-1  
 [ 13 ] Alde D M *et al* 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 133  
 [ 14 ] Capella A, Casado J A, Pajares C *et al* 1988 *Phys. Lett. B* **206** 354  
 [ 15 ] Gerschel C, Hüfner J 1992 *Z. Phys. C* **56** 171  
 [ 16 ] Chaudhuri A K 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 232302  
 [ 17 ] Chaudhuri A K 2004 *Nucl. Phys. A* **734** 53  
 [ 18 ] Armesto N, Capella A *et al* 1998 *Phys. Lett. B* **430** 23  
 [ 19 ] Maiani L, Piccinini F, Polosa A D, Riquer V 2005 *Nucl. Phys. A* **748** 209  
 [ 20 ] Chaudhuri A K 2001 *Phys. Rev. C* **64** 054903  
 [ 21 ] De B, Bhattacharyya S 2005 *Phys. Rev. C* **71** 024903  
 [ 22 ] Pi H 1992 *Comput. Commun.* **71** 173  
 [ 23 ] Frois B, Bellicard J B, Cavedon J M *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **38** 152  
 [ 24 ] Jiang Z J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1020 (in Chinese) [姜志进 2004 物理学报 **53** 1020]

- [ 25 ] Vogt R 2002 *Phys. Lett. B* **430** 15
- [ 26 ] Cortese P , Alessandro B *et al* ( NA50 Collaboration ) 2003 *Nucl. Phys. A* **715** 679c
- [ 27 ] Zhang B , Johnson D L 2004 *Nucl. Phys. A* **741** 305
- [ 28 ] Baglin C *et al* ( NA38 Collaboration ) 1991 *Phys. Lett. B* **255** 459
- [ 29 ] Gavin S , Vogt R 1996 *Nucl. Phys. A* **610** 442
- [ 30 ] Bjorken J D 1983 *Phys. Rev. D* **27** 140
- [ 31 ] Vogt R 2005 *Nucl. Phys. A* **752** 447c

## $J/\psi$ anomalous suppression in high-energy heavy-ion collisions

Li Qiang Jiang Zhi-Jin Xia Hong-Fu

( College of Science , University of Shanghai for Science and Technology , Shanghai 200093 , China )

( Received 27 October 2005 ; revised manuscript received 9 January 2006 )

### Abstract

We have analyzed the experimental data obtained by NA50 Collaboration in Pb-Pb collisions at 158A GeV/c. By assuming the QGP phase transition in central Pb-Pb collisions and its 100% suppression to  $J/\psi$ , we correct the differential cross section of  $J/\psi$  production in high-energy heavy-ion collisions based on the theory of  $J/\psi$  absorption by nucleons and comovers. The theoretical result fits the experimental data well.

**Keywords :**  $J/\psi$  anomalous suppression , nuclear absorption , comovers , quark-gluon plasma

**PACC :** 2485