

文章编号: 1007-4627(2011)04-0404-04

# 158 AGeV/c Pb-Pb 碰撞中的 J/Ψ 反常抑制现象研究\*

姜志进

(上海理工大学理学院, 上海 200093)

**摘要:** 在核吸收与随动者吸收理论的基础上, 给出了在有 QGP 相变情况下高能重离子碰撞中的 J/Ψ 微分产生截面, 并用其讨论了 CERN 的 NA50 合作组给出的入射动量为 158 AGeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中的 J/Ψ 反常抑制现象。理论较好地解释了实验结果。

**关键词:** J/Ψ 反常抑制; 核吸收; 随动者

**中图分类号:** O572.2      **文献标志码:** A

## 1 引言

J/Ψ 反常抑制是一个被普遍看好的夸克-胶子等离子体(Quark Gluon Plasma, 简称 QGP)相变的识别信号<sup>[1-2]</sup>。J/Ψ 是粲夸克 c 与反粲夸克  $\bar{c}$  的束缚态, 在有 QGP 相变产生时, 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, 而 c 夸克与  $\bar{c}$  反夸克又通过与轻夸克或轻反夸克结合, 产生像 D(c $\bar{u}$  和 c $\bar{D}$ ),  $\bar{D}$ ( $\bar{c}u$  和  $\bar{c}d$ ),  $D_s$ (c $\bar{s}$ ) 及  $\bar{D}_s$ ( $\bar{c}s$ ) 等轻的末态开粲介子<sup>[3]</sup>, 从而抑制了 J/Ψ 粒子的产生。这样, 我们就可将 J/Ψ 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 158 AGeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中<sup>[4]</sup>, 确已观察到 J/Ψ 反常抑制现象。该实验表明, J/Ψ 微分产生截面随横能量的分布呈二阶梯下降形式, 其中第一阶梯处在  $E_T \leq 45$  GeV 的范围内, 第二阶梯处在  $E_T > 100$  GeV 的范围内, 如图 1 中圈和点线所示。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>[5-7]</sup>, 另一类认为所观察到的实验现象与 QGP 相变无关, 而是由于碰撞产生的 J/Ψ 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>[8-11]</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/Ψ 的强作用理论, 不能给出图 1 中  $E_T > 100$  GeV 区域中的第二个下降阶梯。

本文将在 J/Ψ 强作用的核与随动者(Comovers)吸收理论的基础上, 在假设 QGP 相变在对心的 Pb-Pb 碰撞中已经产生的情况下, 给出了高能重离子碰撞中的 J/Ψ 微分产生截面。从后面的讨论可以看出, J/Ψ 的核吸收、随动者吸收与 QGP 抑制 3 种因素一起, 可对 NA50 合作组所观察到的 J/Ψ 反常抑制现象给出很好的描述。

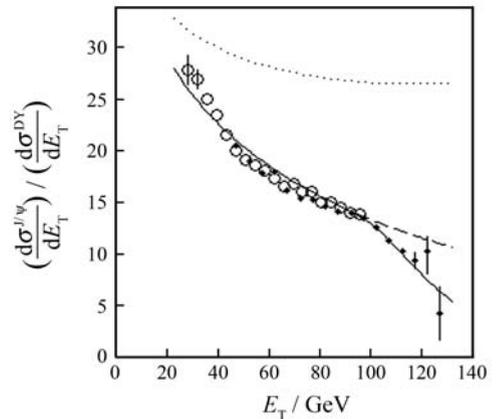


图 1 Pb-Pb 碰撞中 J/Ψ 微分产生截面随横能量的变化关系  
o 与 • 为实验数据, 由 NA50 合作组分别于 1996 与 1998 年测得<sup>[4]</sup>; 点线为核吸收理论计算结果; 虚线为核与随动者吸收理论计算结果; 实线为本文计算结果。

## 2 J/Ψ 的核与随动者吸收理论

J/Ψ 的核与随动者吸收理论在许多文献里都有描述<sup>[8-11]</sup>, 为了完整起见, 这里我们将对它们的主

\* 收稿日期: 2010-09-13; 修改日期: 2011-01-16

\* 基金项目: 上海市重点学科资助项目(S30501)

作者简介: 姜志进(1960—), 男, 山东乳山人, 教授, 博士, 从事重离子核物理理论研究; E-mail: Jzj265@163.com

要内容作以简单的介绍。

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



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

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/Ψ 抑制现象。按文献[5-6], 在碰撞参数为  $\mathbf{b}$  的核-核碰撞中, J/Ψ 粒子免遭核子离解而存活的几率为

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

其中  $s$  是 J/Ψ 粒子相对于弹核的位置矢量,  $\sigma_{\text{abs}} = 4.8 \text{ mb}^{[12]}$  为核子对 J/Ψ 粒子的吸收截面, 而

$$T(s) = \int \rho(s, z) dz \quad (2)$$

为核厚度函数,  $\rho(s, z)$  为原子核的核子数密度, 它通常取成 Woods-Saxon 分布形式

$$\rho(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp[(r - r_0)/a]}, \quad (3)$$

其中  $r_0$  和  $a$  为两个常数, 不同的文献对它们的取值不同<sup>[13-17]</sup>, 本文取<sup>[13]</sup>

$$r_0 = (1.19A^{1/3} - 1.61A^{-1/3}) \text{ fm}, \\ a = 0.54 \text{ fm}, \quad (4)$$

其中  $A$  为核的质量数, 而式(3)中的常数  $\rho_0$  由条件

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

确定。对于 Pb,  $A = 207$ , 则  $r_0 = 6.77 \text{ fm}$ ,  $\rho_0 = 0.15/\text{fm}^3$ 。

在核吸收模型中, 核-核碰撞中的 J/Ψ 微分产生截面为

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

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

$$P(E_T, \mathbf{b}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi q^2 a N_p(\mathbf{b})}} \times$$

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

其中  $q = 0.274 \text{ GeV}/c$  为每个参与者的平均横能量,  $a = 1.27$  为一无量纲参数,

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

是碰撞参数为  $\mathbf{b}$  时的核-核碰撞中的参与者数,

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

是  $s$  处单位面积内的参与者数,  $\sigma_{\text{NN}} = 41 \text{ mb}$  为核子-核子非弹性碰撞截面<sup>[18]</sup>, 对于没有形变且没有特殊取向的核,  $N(\mathbf{b})$  只依赖于  $\mathbf{b}$  的大小而与其方向无关, 这时  $N(\mathbf{b}) = N(b)$ 。  $d\sigma_{\text{abs}}^{J/\Psi}/(dE_T \sigma_{\text{NN}}^{J/\Psi})$  与  $E_T$  的变化关系由图 2 中的点线给出。

实验表明, 式(6)对于轻入射核所诱发的核反应(如: O-Cu, O-U, S-U)中的 J/Ψ 抑制现象的描述是成功的<sup>[11, 19]</sup>。但对重核, 它与实验结果的偏差就很大了, 如图 1 中的点线所示。图中纵坐标中的

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

为核-核碰撞中的 Drell-Yan 对微分产生截面,  $\sigma_{\text{NN}}^{\text{DY}}$  为核子-核子碰撞中的 Drell-Yan 对产生截面, 与其它文献一样<sup>[6]</sup>, 本文取  $\sigma_{\text{NN}}^{J/\Psi}/\sigma_{\text{NN}}^{\text{DY}} = 53.5$ 。图 2 中的虚-点线给出了  $d\sigma^{\text{DY}}/(dE_T \sigma_{\text{NN}}^{\text{DY}})$  随  $E_T$  的变化关系。

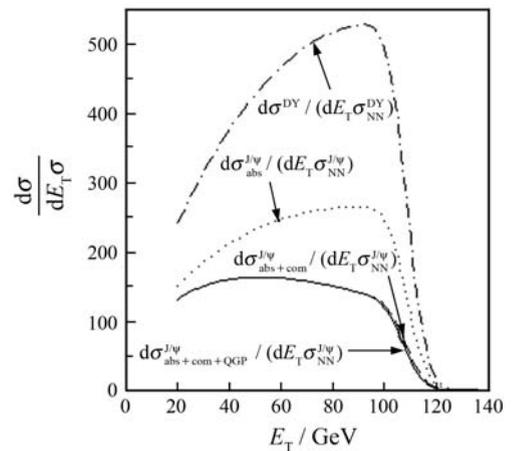


图 2  $d\sigma/(dE_T \sigma)$  随横能的变化关系

为了改善式(6)与实验结果的拟合情况, Capella 等<sup>[8, 10]</sup>认为: 核-核碰撞中产生的 J/Ψ 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  $\rho$  和  $\omega$ , 通过过程

$$J/\Psi + \begin{cases} \rho \\ \omega \end{cases} \rightarrow \bar{D} + D$$

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[20]知, 一个  $J/\Psi$  粒子免遭随动者吸收而存活的几率为

$$S_{\text{com}}(E_T) = \exp\left[-\sigma_{\text{com}} v m_0 \tau_0 \ln\left(\frac{R_T}{v\tau_0}\right)\right], \quad (11)$$

其中:  $\sigma_{\text{com}} = 4 \text{ mb}$  为随动者对  $J/\Psi$  粒子的吸收截面;  $v \approx 0.6$  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;  $R_T \approx R_A = 6.77 \text{ fm}$  为  $J/\Psi$  与随动者相互作用的横向区域的大小;  $n_0$  为随动者数密度, 它与横能量之间的关系为

$$n_0 = \frac{\bar{E}_T}{E_T(0)}, \quad (12)$$

其中  $\bar{n}_0 = 1.3/\text{fm}^3$ 。为了与图 1 中低横能量区域的实验数据相一致, 这里  $\bar{n}_0$  的取值相对于文献[20]大了  $0.3/\text{fm}^3$ , 而上式中的  $\bar{E}_T(0) = qN_p(0) = 108.73 \text{ GeV}$  为  $\mathbf{b}=0$  时的平均横能量。这样, 在考虑到随动者的吸收作用后, 式(6)变为

$$\frac{d\sigma_{\text{abs+com}}^{J/\Psi}}{dE_T} = \sigma_{\text{NN}}^{J/\Psi} \int d^2\mathbf{b} \int d^2\mathbf{s} \times S_{\text{abs}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) S_{\text{com}}(E_T) P(E_T, \mathbf{b}). \quad (13)$$

图 2 中的虚线给出了  $d\sigma_{\text{abs+com}}^{J/\Psi}/(dE_T\sigma_{\text{NN}}^{J/\Psi})$  随  $E_T$  的变化关系。而上式与式(10)之比随  $E_T$  的变化关系如图 1 中的虚线所示。由该图可以看出, 在考虑了随动者吸收后, 理论与实验在  $E_T \leq 100 \text{ GeV}$  的范围内符合得很好。但在  $E_T > 100 \text{ GeV}$  的区域内, 理论与实验间仍存在较大的差异, 而该区域内的下降阶梯是  $J/\Psi$  反常抑制现象的一个重要特征, 一个合理的理论模型, 应该能对该特征做出相应的解释。

### 3 QGP 对 $J/\Psi$ 产生的抑制

按照 Bjorken 设想<sup>[21]</sup>, 在 高能重离子碰撞中, 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。这是碰撞后的最初 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, 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。随着 QGP 体积的增大, 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, 将产生强子, 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析 (Freeze-out) 温度以下<sup>[22]</sup>, 全部 QGP 将被冻析成强子, 成为可测量的末态粒子。

如前面所述, 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, 产生质量较轻的末态开粲介子, 因此  $J/\Psi$  粒子不能与 QGP 共存, 后者对前者具有 100% 的抑制效应。也就是说, 与其它强子不同,  $J/\Psi$  不能在上面所述的第 4 过程中出现, 它只能在最后的第 5 过程中产生。

考虑到在对心的核-核碰撞中, 两核损失的能量将达最大, 因此 QGP 相变最易在对心的核-核碰撞中发生, 这样可以引入阶跃函数<sup>[5-6]</sup>

$$S_{\text{QGP}}(\mathbf{b}) = \Theta[N_{\text{pc}} - N_p(\mathbf{b})] \quad (14)$$

来描述 QGP 对  $J/\Psi$  产生的抑制效应, 其中  $N_{\text{pc}}$  为一常数, 用以描述两核碰撞的对心度, 本文取  $N_{\text{pc}} = 393$ ,  $N_p(\mathbf{b})$  由式(8)给出, 是碰撞参数为  $\mathbf{b}$  时的参与者数。

这样, 在考虑到 QGP 的式(14)抑制因子后, 式(13)应修改为

$$\frac{d\sigma_{\text{abs+com+QGP}}^{J/\Psi}}{dE_T} = \sigma_{\text{NN}}^{J/\Psi} \int d^2\mathbf{b} \int d^2\mathbf{s} S_{\text{abs}}(\mathbf{b}, \mathbf{s}) \times S_{\text{com}}(E_T) S_{\text{QGP}}(\mathbf{b}) P(E_T, \mathbf{b}). \quad (15)$$

图 2 中的实线给出了  $d\sigma_{\text{abs+com+QGP}}^{J/\Psi}/(dE_T\sigma_{\text{NN}}^{J/\Psi})$  随横能量  $E_T$  的变化情况, 上式与式(10)之比随  $E_T$  的变化关系由图 1 中的实线所示。由该图可以看出, 在  $E_T \leq 100 \text{ GeV}$  的范围内, 式(15)与实验的符合情况与式(13)的一样好; 在  $E_T > 100 \text{ GeV}$  的范围内, 符合情况却得到了显著的改善, 式(15)很好地描述了

该区域内的下降阶梯。

由图 1 或图 2 可以看出,  $S_{\text{QGP}}(\mathbf{b})$  对于  $E_T \leq 100$  GeV 区域内的 J/Ψ 产生没有什么抑制效应, 这是很显然的, 因为该区域对应于边缘或半边缘碰撞, QGP 相变还没有发生。

## 4 结论

本文在核与随动者吸收理论的基础上, 讨论了对心的核-核碰撞中有 QGP 相变发生时的 J/Ψ 粒子的产生问题。所得结果很好地描述了 NA50 合作组在入射动量为 158 AGeV/c 的 Pb-Pb 碰撞实验中所观察到的 J/Ψ 反常抑制现象, 准确地给出了  $E_T > 100$  GeV 区域内的第二下降阶梯。因此, 只有在同时考虑了核吸收、随动者吸收与 QGP 抑制 3 种效应时, NA50 合作组所观察到的实验现象才能得到合理的解释。

## 参考文献 (References):

- [1] Matsui T, Satz H. Phys Lett, 1986, **B178**: 416.  
 [2] Satz H. Rep Prog Phys, 2000, **63**: 1511.  
 [3] Wong C Y. Introduction to High-energy Heavy-ion Collisions. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002, 310–344(in Chinese).  
 (黄卓然. 高能重离子碰撞导论, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002, 310–344.)

- [4] Abreu M C, Alessandro B, Alexa C, *et al* (NA50 Collaboration). Phys Lett, 2000, **B477**: 28.  
 [5] Blaizot J P, Ollitrault J Y. Phys Rev Lett, 1996, **77**: 1703.  
 [6] Blaizot J P, Dinh P M, Ollitrault J Y. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 4012.  
 [7] Li Q, Jiang Z J, Xia H F. Acta Phys Sin, 2006, **55**: 5161(in Chinese).  
 (李强, 姜志进, 夏宏福. 物理学报, 2006, **55**: 5161.)  
 [8] Capella A, Ferreiro E G, Kaidalov A B. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 2080.  
 [9] Armesto N, Capella A, Ferreiro E G, *et al*. Nucl Phys, 2002, **A698**: 583c.  
 [10] Capella A, Casado J A, Pajares C. Phys Lett, 1988, **B206**: 354.  
 [11] Gerschel C, Hüfner J. Z Phys, 1992, **C56**: 171.  
 [12] Maiani L, Piccinini F, Polosa A D, *et al*. Nucl Phys, 2005, **A748**: 209.  
 [13] Werner K. Phys Rep, 1993, **232**: 87.  
 [14] Jiang Z J. Acta phys Sin, 2004, **53**: 1020(in Chinese).  
 (姜志进. 物理学报, 2004, **53**: 1020.)  
 [15] Liu F H, Ma Y Q, Duan M Y. Chin Phys, 2005, **14**: 2458.  
 [16] Eremin S, Voloshin S. Phys Rev, 2003, **C67**: 064905.  
 [17] Netrakanti P K, Mohanty B. Phys Rev, 2004, **C70**: 027901.  
 [18] Zhang B, Johnson D L. Nucl Phys, 2004, **A741**: 305.  
 [19] Baglin C, Baldisseri A, Bussière A, *et al*. (NA38 Collaboration). Phys Lett, 1991, **B255**: 459.  
 [20] Gavin S, Vogt R. Nucl Phys, 1996, **A610**: 442.  
 [21] Bjorken J D. Phys Rev, 1983, **D27**: 140.  
 [22] Tomášik B, Wiedemann U A. Phys Rev, 2003, **C68**: 034905.

# Investigations of J/Ψ AnomalousSuppressions in Pb-Pb Collisions at 158 AGeV/c\*

JIANG Zhi-jin<sup>1)</sup>

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

**Abstract:** On the basis of nuclear and comover absorption theories, we have derived out the differential cross section of J/Ψ production in high-energy heavy-ion collisions under the situation that QGP phase transition occurs, and analyzed the experimental data of NA50 Collaboration at CERN in Pb-Pb collisions at 158 AGeV/c. Our theory favors the data well.

**Key words:** J/Ψ anomalous suppression; nuclear absorption; comover

\* Received date: 19 Sep. 2010; Revised date: 16 Jan. 2011

\* Foundation item: Key Subject Foundation of Shanghai(S30501)

1) E-mail: jzj265@163.com