

相对论重离子碰撞中 J/ψ 吸收截面的分析*

刘 波^{1) 2)} 赵维勤^{1) 2)}

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

1993 年 2 月 16 日收到

摘 要

用几何模型计算了相对论重离子碰撞中产生的 J/ψ 在核物质中的吸收长度。由此导得的 J/ψ 在 A-A 碰撞中的吸收截面比在 h-A 过程中明显增大。通过对 $\langle p_T^2 \rangle$ 与初态相互作用长度的关系的分析, 说明了本文结果与过去工作不同的原因。

关键词 J/ψ 产额压低, 吸收长度, 吸收截面

1 引 言

作为夸克-胶子等离子体形成的可能信号, 在相对论重离子碰撞中 J/ψ 产额的压低吸引了理论与实验物理学家两方面的注意。在理论上预言 QGP 形成会引起 J/ψ 产额压低^[1]之后, CERN 的 NA38 合作组首先在实验上观测到这一压低^[2]。然而, 一些不引入 QGP 形成的物理假设也能相当好地解释这一压低现象^[3]。比如: 假定 J/ψ 在穿过核物质时被吸收, 能说明 J/ψ 压低与横能 E_T 的关系; 引入部分子之间的初态相互作用可以解释 J/ψ 产额对横动量 $\langle p_T^2 \rangle$ 的依赖性。文献[4]对所有已知的高能强子-核 (h-A) 与核-核 (A-A) 碰撞中 J/ψ 压低的数据进行了系统的分析。他们认为, 用一个吸收截面的值 $\sigma_{\text{abs}} \sim 6\text{mb}$ 就能用吸收机制解释所有 J/ψ 产额压低的实验结果。

但是, 要对吸收截面进行可靠的估算, 需要对 J/ψ 的吸收长度给以恰当的定义与计算。吸收长度是 J/ψ 在核物质中穿过, 并经历吸收的距离。它是一个与碰撞的几何有关的参量, 依赖于两个相撞核的大小及碰撞的中心性。另外, 如果考虑 J/ψ 有一定的形成时间, 吸收截面 σ_{abs} 还应当与时间有关。实际上, 人们对于在硬的 J/ψ 产生过程中的形成时间的看法并不一致^[5]。为了便于与过去工作的结果相比较, 本文中假定产生的 J/ψ 穿过核物质时的吸收截面为一常数, 即不考虑 J/ψ 的形成时间, 以便获得有关吸收

* 国家自然科学基金资助。

1) 中国科学院理论物理研究所客座研究人员。

2) CCAST 成员。

长度的简单而清晰的描述。

本文在第二部分给出吸收长度的定义及其对相撞核大小、碰撞参数 b 或横能 E_T 的依赖关系, 由此分析了相对论核-核碰撞中产生的 J/ψ 在核内的吸收截面, 并与 h-A 过程的结果进行比较, 指出在核-核过程中, 这一吸收截面的值明显高于 h-A 过程中所得的结果。第三部分仔细分析了 J/ψ 的横动量与能量密度及吸收长度的关系; 说明我们所得 J/ψ 吸收截面与过去的结果不同的原因在于, 原来吸收长度的计算中引入了不恰当的简化假设。最后, 在第四部分中对我们的结果作了进一步的讨论。

2 J/ψ 的吸收长度和吸收截面

考虑一个入射核 B 与一个靶核 A 在某确定的碰撞参数间隔 $\Delta b (b_1 < b < b_2)$ 内的碰撞 (B 与 A 同时也表示这两个核的原子序数), 如果不考虑 J/ψ 在核内的吸收, 其产生几率应正比于 $\bar{I}_0(\Delta b)$:

$$\bar{I}_0(\Delta b) = \frac{1}{\int_{\Delta b} d^2b} \int_{\Delta b} d^2b \int d^2s \int dz \rho_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}, z) \cdot \int dz' \rho_A(\mathbf{s}, z'), \quad (1)$$

其中 $\rho_i(\mathbf{s}, z)$ 是核子在核内的密度分布, 归一化取为

$$\int \rho_i(\mathbf{r}) d\mathbf{r} = i, \quad (i = A \text{ 或 } B).$$

引入 J/ψ 与核内核子作用的吸收截面 σ_{abs} 后, 观测到 J/ψ 的几率则正比于 $\bar{I}(\Delta b)$,

$$\begin{aligned} \bar{I}(\Delta b) = & \frac{1}{\int_{\Delta b} d^2b} \int_{\Delta b} d^2b \int d^2s \int dz \rho_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}, z) \cdot \int dz' \rho_A(\mathbf{s}, z') \\ & \cdot \exp \left[-\frac{B-1}{B} \sigma_{\text{abs}} \int_{-\infty}^z \rho_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}, z_1) dz_1 \right. \\ & \left. - \frac{A-1}{A} \sigma_{\text{abs}} \int_z^{\infty} \rho_A(\mathbf{s}, z_2) dz_2 \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

由于吸收很弱, $\bar{I}(\Delta b)$ 可近似表示为

$$\bar{I}(\Delta b) \simeq \bar{I}_0(\Delta b) \exp[-\sigma_{\text{abs}} \rho_0 (\bar{L}_A(\Delta b) + \bar{L}_B(\Delta b))], \quad (3)$$

其中 ρ_0 是平均的核内核子密度。并且, 上式中还引入了 J/ψ 在核 B 与 A 中的平均吸收长度, 定义如下:

$$\begin{aligned} \bar{L}_B(\Delta b) = & \frac{1}{\bar{I}_0(\Delta b)} \cdot \frac{1}{\int_{\Delta b} d^2b} \int_{\Delta b} d^2b \int d^2s \int dz \rho_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}, z) \int dz' \rho_A(\mathbf{s}, z') \\ & \cdot \int_{-\infty}^z \frac{B-1}{B\rho_0} \rho_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}, z_1) dz_1, \\ \bar{L}_A(\Delta b) = & \frac{1}{\bar{I}_0(\Delta b)} \cdot \frac{1}{\int_{\Delta b} d^2b} \int_{\Delta b} d^2b \int d^2s \int dz \rho_B(\mathbf{s} - \mathbf{b}, z) \int dz' \rho_A(\mathbf{s}, z') \end{aligned}$$

$$\int_{s'}^{\infty} \frac{A-1}{A\rho_0} \rho_A(s, z_2) dz_2. \quad (4)$$

$\bar{L}_i(\Delta b)$, ($i = A$ 或 B) 就是在这一特定的碰撞参数间隔 Δb 中, 产生的 J/ψ 在这两个核中通过, 并经历吸收的平均距离。类似地, 也可以对确定的碰撞参数 b 定义吸收长度

$$L(b) = L_A(b) + L_B(b).$$

其定义式与(4)式很类似, 只是没有对 b 的某个间隔作平均。图1所示即为几种不同相撞核的 J/ψ 吸收长度 L 对碰撞参数 b 的依赖关系。计算中, 假定核内核子均匀分布, 核半径 $R_A = r_0 A^{1/3}$, 并取 $r_0 = 1.2 \text{fm}$ 。这时, 平均核子密度为

$$\rho_0 = \left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \right)^{-1}.$$

在 B 核比 A 核小得多的情况下, $b = 0$ 的吸收长度近似为

$$L(0) \approx \frac{3}{4} \frac{B-1}{B} R_B + \frac{A-1}{A} R_A \quad (B \ll A). \quad (5)$$

对碰撞参数 b 取平均后, 得到平均吸收长度为^[6]

$$\bar{L} = \frac{3}{4} \frac{B-1}{B} R_B + \frac{3}{4} \frac{A-1}{A} R_A. \quad (6)$$

对于 $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 碰撞, $L(0) \approx 10.2 \text{fm}$, $\bar{L} = 8.3 \text{fm}$ 。吸收长度应唯象地与各种物理观测量相联系, 上面的两个量可以作为对各种不同唯象分析的一个检验。

基于参加者-旁观者几何模型, 不同横能 E_T 间隔的数据可以与不同碰撞参数 b 的间隔相对应。模型假定, 事例中产生的横能 E_T 正比于两个相撞核重叠区内所包含的核子, 即参加者核子的数目。而参加者核子数目与碰撞参数 b 的关系从几何图象即可算得。图2所示即为两种相撞核参加者数目与碰撞参数 b 的关系。这样, 就建立了横能 E_T 与碰撞参数 b 之间一一对应的关系。因此, 在某横能间隔 $\Delta E_T (E_{T1} < E_T < E_{T2})$ 内的数据即等价于在相应碰撞参数间隔 $\Delta b (b(E_{T2}) < b < b(E_{T1}))$ 内的数据。这样, 相应的吸收长

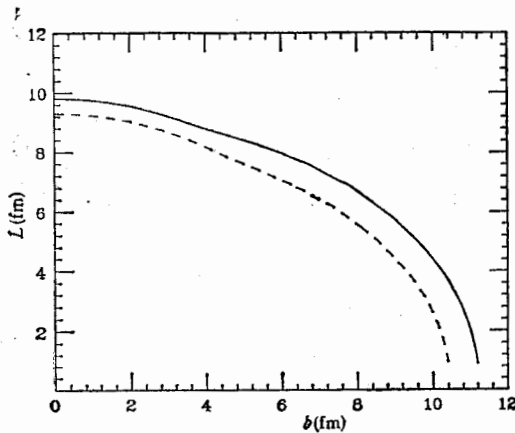


图1 不同相撞核吸收长度 $L(b) = L_A(b) + L_B(b)$ 与碰撞参数 b 的关系

图中自上而下两条曲线为 $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 与 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 的结果。

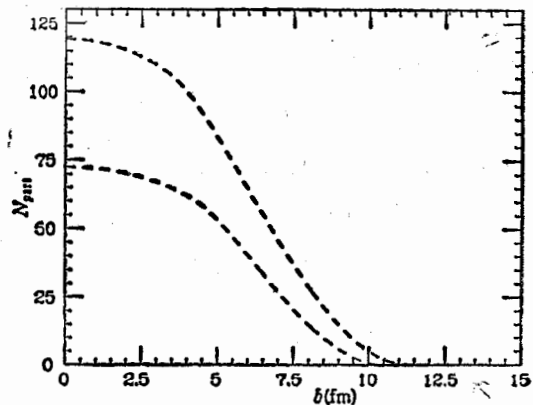


图2 不同相撞核参加者核子数目 $N_{part}(b)$ 与碰撞参数 b 的关系

图中曲线为 $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ (上) 与 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ (下) 的结果。

度 $\bar{L}_{\Delta E_T} = \bar{L}(\Delta b)$ 就可以用(4)式进行计算。NA38^[6] 获得了不同相撞核在 200GeV/N 的 J/ψ 产生截面与连续质量区内 μ 对产生截面比值 $R = B\sigma_{J/\psi}/\sigma_c$ 的数据。综合分析 NA38 的数据, 得到 $\ln R$ 与 $\bar{L}_{\Delta E_T} = \bar{L}(\Delta b)$ 的线性符合如图 3 所示, 符合所得 J/ψ 的吸收截面为 $\sigma_{abs}^{\Delta\Delta} = 8.9 \pm 0.5 \text{mb}$ 。这个数值明显高于 h-A 碰撞中符合 J/ψ 产生数据所得的吸收截面的值 $\sigma_{abs}^{\Delta\Delta} = 6.2 \pm 0.3 \text{mb}$ ^[4]。因此, 我们的分析似乎表明, 在 A-A 过程中可能存在附加的吸收 J/ψ 的效应。比如, 在 A-A 碰撞中, 伴随系统运动的 (comoving) 产生的强子(或部分子)物质可能与 J/ψ 作用^[7], 引起附加的吸收。而这一效应在 h-A 过程中则不那么重要。值得指出的是, 我们所得的结果与文献[4]进行的类似分析有明显差别, 文献[4]所得 A-A 过程的 J/ψ 吸收截面为 $\sigma_{abs}^{\Delta\Delta} = 6.9 \pm 1.0 \text{mb}$, 与 h-A 过程的结果基本相同。因而, 他们下结论说, h-A 与 A-A 碰撞中 J/ψ 的压低可以用同一 J/ψ 吸收截面描述。

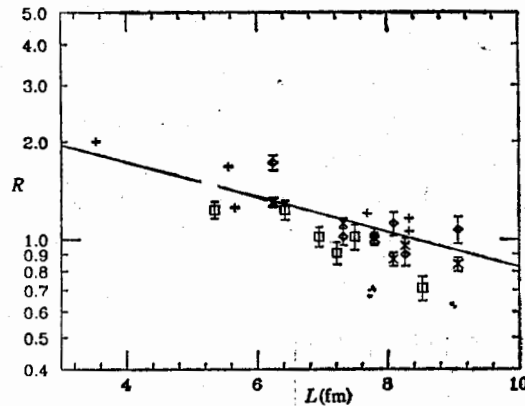


图 3 J/ψ 产生截面与连续区 μ 对产生截面比值与吸收长度的关系
数据分别为无偏过程(+), $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 不同横能间隔(□), $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ 不同横能
间隔于 1987 年(◇)及 1990 年(×)的结果^[6]。

3 p_T 依赖性的分析

本文所得的吸收截面明显大于文献[4]的结果。其原因在于, 我们对吸收长度的计算更为合理。为说明这一点, 对 J/ψ 压低的横动量 p_T 依赖性作一仔细的讨论。NA38 曾对此进行了细致的分析^[8]。他们用 Bjorken 计算能量密度 ϵ 的公式

$$\epsilon = \frac{3\langle E_T^2 \rangle}{\Delta y \tau_0 \bar{S}}, \quad (7)$$

得到不同平均横能 $\langle E_T^2 \rangle$ 时的能量密度 ϵ , 并得到 J/ψ 的横动量 $\langle p_T^2 \rangle$ 与能量密度 ϵ 存在相当好的线性关系。上式中 \bar{S} 是两相撞核重叠的横截面积, $\tau_0 = 1 \text{fm}/c$, Δy 是测量横能的快速度间隔。由某特定横能下参加者核子的数目 N_{part} , 文献[8]又引入了一个平均几何厚度 $L_G(E_T^2)$:

$$N_{part} = E_T^2 / \bar{\epsilon}_T^2 = \rho_0 L_G(E_T^2) \bar{S}, \quad (8)$$

式中 $\bar{\epsilon}_T^2$ 是每个参加者核子提供的平均横能。他们简单假定初态部分子相互作用长度

$L_i(E_T^0)$ 与 $L_G(E_T^0)$ 成正比:

$$L_G(E_T^0) = 2 \cdot 8/9 \cdot L_i(E_T^0), \quad (9)$$

从而得到 $L_i(E_T^0)$ 与 ϵ 成正比。这样,由 $\langle p_T^2 \rangle$ 与 ϵ 的线性关系,自然就导得了 $\langle p_T^2 \rangle$ 与 $L_i(E_T^0)$ 的线性关系。基于文献[8]的分析,文献[4]假定初态相互作用长度与 J/ψ 的吸收长度相同,因而直接从测得的 J/ψ 的横动量 $\langle p_T^2 \rangle$ 估算 J/ψ 的吸收长度,认为这两个量保持正比关系,即使对高横能处的数据也不例外。

但是,不同 E_T 间隔的 J/ψ 吸收长度或初态部分子相互作用长度应当用(4)式进行计算,其中包含了产生 J/ψ 的硬胶子作用过程的权重。权重的大小取决于相互作用点两个核的核子密度剖面函数的乘积,因而是碰撞参数 b 的函数。而(9)式只是对碰撞参数 b 取平均后才成立。图4所示即为用(4)式计算的 $L(E_T^0)$ 与 ϵ 间的关系。与文献[8]给的 $L_i(E_T^0)$ 与 ϵ 的线性关系(图中虚线所示)相比,在高横能(即高能量密度)区,实际的相互作用长度显然低于线性关系给出的值。相应地,图5所示为 $\langle p_T^2 \rangle$ 与 $L(E_T^0)$ 的关系。显然,简单地从 p -A 过程得到的 $\langle p_T^2 \rangle$ 与 $L(E_T^0)$ 的线性关系外推并不符合 A-A 碰撞的结果,在大的 $L(E_T^0)$ 处这一偏差更为明显。这个结果表明,高横能的 A-A 碰撞事例中 J/ψ 横动量的增大除初态部分子相互作用之外,可能还存在其它的机制;另一方面,也说明文献[4]用 $\langle p_T^2 \rangle$ 与 $L(E_T^0)$ 的正比关系从 $\langle p_T^2 \rangle$ 的实验值估算吸收长度,所得的值在高横能处就会比实验值大。这正是文献[4]得到较小的 J/ψ 吸收截面的原因。实际上,对于最高的横能间隔,文献[4]所得的吸收长度已经大于 $b=0$ 时吸收长度的上限值 $L(0)$,而这显然是不合理的。

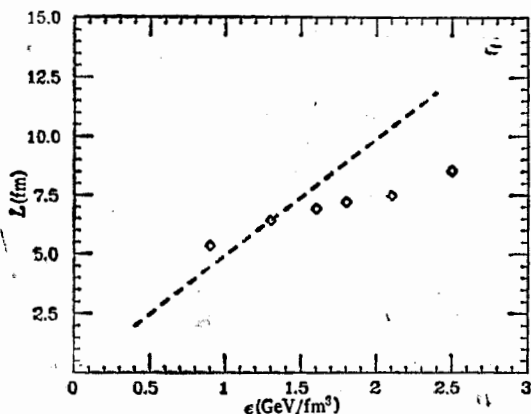


图4 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ 碰撞,初态相互作用长度 $L_i(E_T^0)$ 与能量密度 ϵ 的关系
虚线为文献[8]的结果。

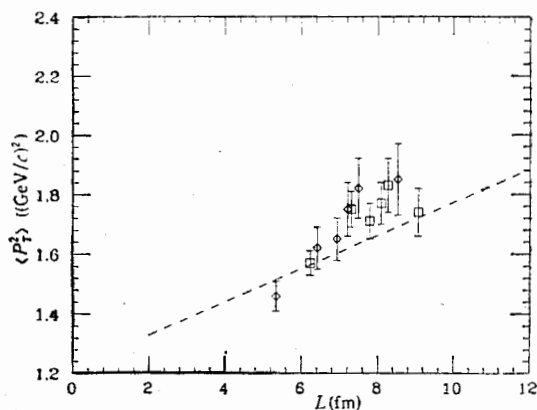


图5 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$ (\diamond)与 $^{32}\text{S} + ^{238}\text{U}$ (\square) 碰撞,
 $\langle p_T^2 \rangle$ 与 $L(E_T^0)$ 的关系
虚线为文献[8]的结果。

4 小 结

当然,仅仅用简单的吸收机制不可能最终判断, J/ψ 产额压低的机制在 A-A 过程与 p -A 过程中是否有所不同。实际上,还有其它的因素,诸如胶子的遮蔽效应等^[9]也会对 J/ψ 产额的压低起作用。但是,我们的结果至少显示,即使只考虑吸收与部分子初态

相互作用,数据分析已表明 h-A 过程与 A-A 过程存在明显差别。

我们的工作正确估算了不同横能间隔的吸收长度。由此分析实验数据所得的 A-A 过程中 J/ψ 的吸收截面明显高于在 h-A 过程中相应的值。这似乎表明,在 A-A 过程中,除了 p-A 过程中原已存在的 J/ψ 被靶核中核子的吸收之外,可能还存在其它的增加 J/ψ 产额压低效应的因素。比如, A-A 碰撞所达到的能量密度很高,这时核物质的性质可能发生变化;伴随系统运动的新产生的强子物质可能提供附加的吸收源;甚至有可能出现了向夸克物质的相变等等。因此,有必要从实验、理论两方面进一步探索 J/ψ 产额压低的物理原因。

参 考 文 献

- [1] C. Baglin et al. (NA38 Collab.), *Phys. Lett.*, **B220**(1989)471.
- [2] T. Matsui and H. Satz, *Phys. Lett.*, **B178**(1986)416.
- [3] O. Drapier et al. (NA38 Collab.), *Nucl. Phys.*, **A544**(1992)209c.
- [4] C. Gerschel and J. Hüfner, *Z. Phys.*, **C56**(1992)171.
- [5] S.J. Brodsky and A.H. Müller, *Phys. Lett.*, **B206**(1988)285; J. Hüfner and M. Simbel, *Phys. Lett.*, **B258**(1991)465.
- [6] C. Baglin et al. (NA38 Collab.), *Phys. Lett.*, **B255**(1991)459; C. Racca, 私人通信.
- [7] S.J. Brodsky, *Nucl. Phys.*, **A544**(1992)223c.
- [8] C. Baglin et al. (NA38 Collab.), *Phys. Lett.*, **B262**(1991), 362; **B268**(1991) 453; *Nucl. Phys.*, **A544**(1992)95c.
- [9] S. Gupta and H. Satz, *Phys. Lett.*, **B283**(1992)439.

Analysis of J/ψ Absorption Cross Section in Relativistic Heavy Ion Collisions

Liu Bo Zhao Weiqin

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

Received on February 16, 1993

Abstract

Based on geometric model the absorption length of produced J/ψ in nuclear matter for relativistic heavy ion collisions is calculated. The absorption cross section σ_{abs} of J/ψ deduced in A-A collisions is considerably higher than that in h-A processes. The reason of obtaining this result different from former works is also discussed in terms of analysing the relation between $\langle p_T^2 \rangle$ and the initial interaction length.

Key words J/ψ suppression, absorption length, absorption cross section.