

胶子遮蔽和末态作用对 p-A 碰撞中粲偶素和 b 夸克偶素产额压低的贡献*

刘波¹⁾ 赵维勤¹⁾

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

1993 年 4 月 8 日收到

摘 要

本文用胶子结构函数的遮蔽效应和末态作用分析了在 p-A 碰撞中粲偶素和 b 夸克偶素产额压低的实验数据, 较好地描述了粲偶素和 b 夸克偶素产额的压低与 A 和 x_2 的关系.

关键词 胶子遮蔽, 末态吸收, 重夸克偶素产额压低.

作为夸克-胶子等离子体形成的可能信号之一, 相对论重离子碰撞中 J/ψ 产额压低吸引了理论与实验工作者两方面的兴趣. 在理论上预言 QGP 形成将导致 J/ψ 产额压低^[1]之后, NA38 合作组首先在实验上观测到这一压低^[2]. 一些人不引入 QGP 形成假设而用常规的物理机制也能较好地解释这一压低现象^[3]. 由于在强子-核 (h-A) 碰撞中不会有 QGP 形成, 因此有必要考察在 h-A 碰撞中存在的类似压低现象. 如果在核-核 (A-A) 和强子-核碰撞过程中的压低可以用相同的物理机制解释, 则在 A-A 碰撞过程中的压低也就不需要引入 QGP 形成假设了. 在这方面已有一些工作, 例如文献[3]用吸收机制分析了所有 h-A 和 A-A 过程中的压低材料, 而文献[4]用胶子遮蔽分析 h-A 过程中的压低现象. 我们认为, 在分析 h-A 和 A-A 过程中的压低现象时, 应该同时考虑这两种效应.

本文给出在 h-A 过程中粲偶素和 b 夸克偶素产额压低的一个恰当的描述: 首先在小 x 区, 在核中的胶子结构函数被遮蔽; 其次, 产生的粲偶素或 b 夸克偶素通过靶核时可以被吸收. 将这两种效应参数化, 通过符合 h-A 过程中的实验数据, 确定这两种效应的参数, 并讨论 A-A 碰撞中的压低现象.

在 h-A 碰撞中的粲偶素或 b 夸克偶素的产生率可以表示为下面三个因子的乘积: (1) 两个相互作用的部分子 i 和 j 的结构函数 $f_i^p(x_1)$ 和 $f_j^p(x_2)$; (2) $c\bar{c}$ (或 $b\bar{b}$) 通过部分子 i 和 j 的硬作用的产生截面 σ_{ij} ; (3) 在靶核中末态作用引起的吸收, 用 H_{ab}^A 表示. 因此, 产生率可以表示为:

$$I(\sqrt{s}, m, x_F) = \sum_{i,j} f_i^p(x_1) f_j^p(x_2) \sigma_{ij} H_{ab}^A, \quad (1)$$

* 国家自然科学基金部分资助.

1) CCAST 成员, 中国科学院理论物理所客座研究人员.

这里 m 是产生的粲偶素或 b 夸克偶素的质量; $x_F = p_{\parallel}/p_{\parallel 0}$ 是粲偶素或 b 夸克偶素的纵向动量分数; \sqrt{s} 是 $h-N$ 体系的质心能量; x_1 和 x_2 分别是在入射强子和靶核子中的两个部分的动量分数。作为第一步,只考虑对横动量 p_T 平均后的数据,所以在(1)式中没有包括 p_T 依赖关系。

假定胶子熔合是产生 $c\bar{c}$ (或 $b\bar{b}$) 的唯一机制,则在 $h-A$ 碰撞中的产生率可以写为:

$$f_g^h(x_1)f_g^A(x_2)\sigma_{gg}H_{ab}^A \quad (2)$$

对于 $h-p$ 碰撞, $H_{ab}^p = 1$, 取 $f_g^h(x_1)$ 和 σ_{gg} 不变化,则在 $h-A$ 碰撞中的产生率与 $h-p$ 碰撞中的产生率之比是:

$$R_{A/p}(\sqrt{s}, m, x_F) = f_g^A(x_2)/f_g^p(x_2) \cdot H_{ab}^A \quad (3)$$

以上 x_1, x_2 和 x_F 的关系是:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{2}(\sqrt{4m^2/s + x_F^2} + x_F), \\ x_2 &= \frac{1}{2}(\sqrt{4m^2/s + x_F^2} - x_F). \end{aligned} \quad (4)$$

按照等式(3),比值 $R_{A/p}$ 原来依赖于 A, \sqrt{s}, m 和 x_F , 现在只依赖于 A 和 x_2 。

若假设胶子的结构函数和夸克的一样,有类似的遮蔽和反遮蔽效应,则在靶核子中的胶子结构函数与自由核子的胶子结构函数的比可以参数化为^[4,5]:

$$f_g^A(x_2)/f_g^p(x_2) = \begin{cases} 1 + a \ln A \ln(x_2/0.08), & x_2 < 0.08, \\ 1 + b \ln A \ln(x_2/0.08) \ln(x_2/0.24), & 0.08 < x_2 < 0.3, \end{cases} \quad (5)$$

参数 $b = -0.1$ 取自文献[5], 在 $0.08 < x_2 < 0.3$ 区间它提供一个小的反遮蔽效应,对 J/ψ 压低的影响不大。 a 是描述胶子遮蔽效应的一个参数,它可以提供适当的 J/ψ 压低。

对于每一个靶核 A , 吸收因子 H_{ab}^A 可以如下计算^[3]:

$$H_{ab}^A = e^{-\sigma_{ab}\rho_0 L_A}, \quad (6)$$

这里 ρ_0 是靶核 A 中的平均核子密度, L_A 是吸收长度,即产生的粲偶素或 b 夸克偶素通过靶核时被吸收的距离。根据吸收机制,对于均匀的核子密度分布,吸收长度可如下计算^[3]:

$$L_A = \frac{A-1}{A} \frac{3}{4} R_A, \quad (7)$$

核半径 $R_A = r_0 A^{1/3}$, 在计算中取 $r_0 = 1.2 \text{ fm}$ 。吸收截面 σ_{ab} 是一个参数,通过符合粲偶素和 b 夸克偶素压低的实验材料确定。

用胶子遮蔽和吸收机制分析了 E772 合作组^[6]和 NA3 合作组^[7]发表的 $J/\psi, \psi'$ 和 Υ 压低的实验资料。在 $h-A$ 碰撞中的粲偶素或 b 夸克偶素的产生率与 $h-p$ 碰撞中的产生率之比是靶核子数 A 和胶子动量分数 x_2 的函数。实验上使用的最重的靶是 ^{184}W 和 ^{195}Pt 所以近似取 $A \sim 190$ 。按照等式(3),(5)和(6),在 $x_2 < 0.08$ 时,用下式符合 W 和 Pt 的实验数据:

$$R_{A/p}(x_2) = H_{ab}^A(1 + a \ln A \ln(x_2/0.08)), \quad (8)$$

得到两个未知的参数为:

$$\begin{aligned} a &= 0.037 \pm 0.002, \\ \sigma_{ab}^{hA} &= 2.6 \pm 0.2 \text{mb}. \end{aligned} \quad (9)$$

理论与实验的比较在图 1 中给出, 图中实线是我们的理论结果. 为了更清楚地比较两种机制的贡献, 吸收的结果在图中用虚线表示, 对于固定的 A , 在整个 x_2 区间, 吸收提供一个常数的压低. 从图中可以看到, 在 $x_2 < 0.08$ 时, 有胶子遮蔽, 在 $0.08 < x_2 < 0.3$, 有一个小的反遮蔽效应.

我们得到的吸收截面比文献[3]给出的结果小很多, 由于文献[3]的分析中没有包括胶子遮蔽效应, 所以他们得到的在 h-A 过程中的吸收截面是 $\sigma_{ab}^{hA} \sim 6.3 \text{mb}$.

用相同的参数, 对于 Fe 靶, 理论与实验的比较给在图 2 中, 图中实线是理论结果, 虚线只是吸收的贡献. 从图中看到, 理论与实验的符合是令人满意的, 由于 Fe 靶的 A 小, 所以在小 x_2 区与图 1 比较, 吸收和遮蔽的压低都比较弱.

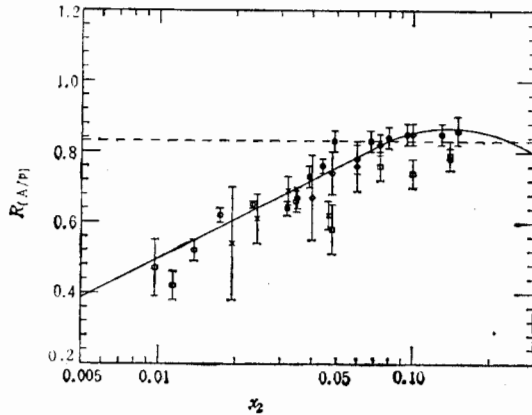


图 1 粲偶素和 b 夸克偶素在 h-A 碰撞中的产生率与 h-p 碰撞中的产生率的比值与 x_2 的关系. 实线是用 $A = 190, a = 0.037$ 和 $\sigma_{ab}^{hA} = 2.6 \text{mb}$ 计算的结果, 虚线是只考虑吸收机制的结果.

- J/ψ 800 GeV p-W
- × ϕ' 800 GeV p-W
- Y 800 GeV p-W
- J/ψ 200 GeV p-Pt
- ◇ J/ψ 200 GeV π -Pt
- J/ψ 280 GeV π -Pt

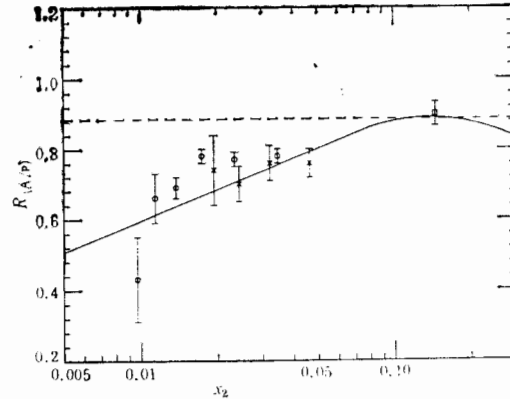


图 2 粲偶素和 b 夸克偶素在 h-A 碰撞中的产生率与 h-p 碰撞中的产生率的比值与 x_2 的关系. 实线是 $A = \text{Fe}$ 和用 $a = 0.037, \sigma_{ab}^{hA} = 2.6 \text{mb}$ 计算的结果, 虚线是只考虑吸收机制的结果.

- J/ψ 800 GeV p-Fe
- × ϕ' 800 GeV p-Fe
- Y 800 GeV p-Fe

为了更清楚说明比值 $R_{A/P}$ 与 A 的依赖关系, 在图 3 给出 $\langle x_F \rangle = 0.27$ 的粲偶素的 $R_{A/P}$ 与 A 的关系, 在图 4 给出 $\langle x_F \rangle = 0.2$ 的 b 夸克偶素的 $R_{A/P}$ 与 A 的关系. 对于几乎相同的 x_F 区域, 粲偶素压低要比 b 夸克偶素压低强. 按照我们的模型, 原因是由于粲偶素和 b 夸克偶素的质量差, 使得类似的 $\langle x_F \rangle$ 值相应于非常不同的 $\langle x_2 \rangle$. 例如, $\langle x_F \rangle = 0.27$ 时, 对于 J/ψ , 相应于 $\langle x_2 \rangle \sim 0.02$, 而对于 ϕ' , 相应于 $\langle x_2 \rangle \sim 0.03$, 胶子遮蔽效应在这个区域是相当强的; 但是对于 b 夸克偶素, $\langle x_F \rangle \sim 0.2$ 相应于 $\langle x_2 \rangle \sim 0.17$, 在这里只有一个小反遮蔽效应. 因此, 对粲偶素产额的较强压低是由于较大的胶子遮蔽效应造成的.

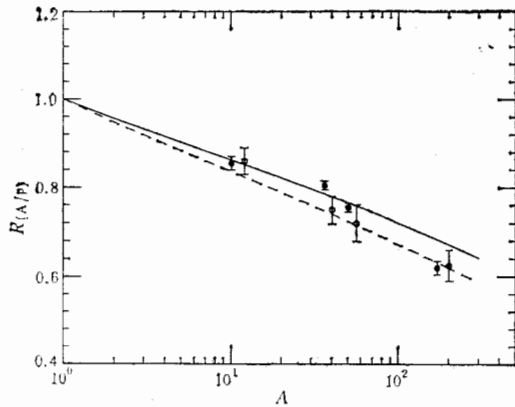


图3 $\langle x_F \rangle = 0.27$ 的粲偶素的 $R_{(A/p)}$ 与质量数 A 的关系

虚线是用 $a = 0.037$ 和 $\sigma_{\text{had}}^{\text{hA}} = 2.6\text{mb}$ 计算的对 J/ψ 的结果, 实线是对 ψ' 的结果.

● J/ψ ○ ψ'

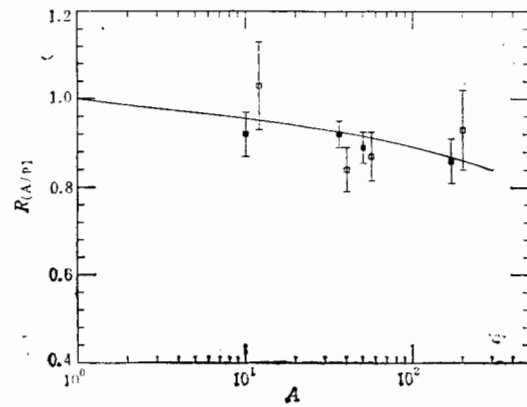


图4 $\langle x_F \rangle = 0.2$ 的 b 夸克偶素的 $R_{(A/p)}$ 与质量数 A 的关系

实线是用 $a = 0.037$ 和 $\sigma_{\text{had}}^{\text{hA}} = 2.6\text{mb}$ 计算的结果.

■ Υ_{1S} □ Υ_{2S+3S}

以下分析 NA38 合作组发表的在 $200\text{GeV}/N$ 的核-核碰撞的 J/ψ 压低的数据。入射核 B 与靶核 A 碰撞后, 当同时考虑胶子遮蔽与吸收机制时, J/ψ 产额与 p-p 碰撞时产额的比值可以表示为

$$R_{(AB)/(pp)} = \frac{f_g^A(x_2)f_g^B(x_1)}{f_g^p(x_2)f_g^p(x_1)} H_{ab}^{AB}, \quad (10)$$

其中, x_1 与 x_2 分别为入射核与靶核中参加作用的胶子在核内核子中的动量分数。它们可以通过(4)式与产生的 J/ψ 的 x_F 值相联系。NA38 合作组发表的 J/ψ 压低的数据是在 $0 < x_F < 0.5$ 的范围内测量的。取文献[8]提供的 x_F 分布的解析形式, 得 $\langle x_F \rangle \sim 0.15$, 由(4)式, 相应于 $\langle x_2 \rangle \sim 0.10$ 与 $\langle x_1 \rangle \sim 0.25$ 。由(5)式可知, 这时胶子的遮蔽因子

$$f_g^A(x_2)/f_g^p(x_2) \cdot f_g^B(x_1)/f_g^p(x_1) \quad (11)$$

仅提供一个很小的反遮蔽效应, 对于最重的相撞核 ($A = 238, B = 32$), (11)式的值约为 ~ 1.1 ; 对较轻的核, (11)式的值更接近于 1。因此, (10)式主要由 H_{ab}^{AB} , 即吸收因子提供 J/ψ 产额的压低。为了解释 NA38 合作组发表的 A-A 碰撞中 J/ψ 压低的数据, 又不引入吸收以外的其它机制, 所需的截面为 $\sigma_{ab} \sim 6.3\text{mb}^{[3]}$ 或 $8.9\text{mb}^{[9]}$ 。与我们在 h-A 过程中得到的结果 $\sigma_{ab}^{\text{hA}} \sim 2.6\text{mb}$ 比较, 在 A-A 碰撞中得到的较大的吸收截面似乎表明, 有其他的 J/ψ 压低机制存在。例如, 在 A-A 碰撞中伴随系统运动的新产生的强子物质或部分子物质 (Comoving hadronic matter or Comoving partonic matter) 可能提供附加的吸收源; 甚至需要引入夸克-胶子等离子体机制等等。我们的结果不同于文献[4]的结论, 文献[4]把 h-A 碰撞中的压低完全归因于胶子遮蔽, 甚至在 $x_2 \sim 0.1$ 也存在遮蔽效应, 这似乎是不合理的。按照现有的知识, 遮蔽效应只在 $x_2 \leq 0.05$ 是重要的。

对夸克遮蔽参数化时, 参数 $a \sim 0.02$ 可以符合实验资料^[9]。与可接受的夸克遮蔽参数化比较, 我们的分析表明在小 x_2 区胶子的遮蔽效应似乎更强。由于没有胶子遮蔽的直接测量, 尚需进一步的工作澄清: 在核中的胶子和夸克是否有不同的遮蔽? 在非常小的

x_2 区,除了胶子遮蔽之外,是否需要引入其他的机制?

参 考 文 献

- [1] T. Matsui and H. Satz, *Phys. Lett.*, **B178**(1986) 416.
- [2] C. Baglin et al. (NA38 Collab.), *Phys. Lett.*, **B220** (1989) 471; **B255** (1991) 459; *Nucl. Phys.*, **A544**(1992) 209c; C. Racca, Private communications.
- [3] C. Cerschel and J. Hüfner, *Z. Phys.*, **C56**(1992) 171.
- [4] S. Gupta and H. Satz, *Phys. Lett.*, **B283**(1992) 439.
- [5] R. C. Hwa and L. Lesniak, "Initial-state effect on J/ψ suppression in protonnucleus collisions", preprint OITS-492.
- [6] D. M. Alde et al. (E772 Collab.), *Phys. Rev. Lett.*, **66**(1991) 133, 2285; J. C. Peng, private communications.
- [7] J. Badier et al. (NA3 Collab.), *Z. Phys.*, **C20**(1983) 101.
- [8] C. Baglin et al. (NA38 Collab.), *Phys. Lett.* **B262**(1991) 362.
- [9] Chao Wei-Qin and Liu Bo, Absorption length and J/ψ suppression in relativistic heavy ion collisions, preprint BIHEP-TH-93-04.

Contribution Due to Gluon Shadowing and Final-State Interactions to Charmonium/Bottonium Suppression in h-A Collisions

Liu Bo Zhao Weiqin

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

Abstract

We analyse the data of charmonium/bottonium suppression in p-A processes by considering the gluon shadowing effect at small x and the final-state interactions in the target nucleus. An empirical parametrization of the shadowing effect of the gluon structure function is used. The A - and x_2 -dependence of the suppression in p-A collisions is well obtained based on above physical consideration.

Key words Gluon shadowing, final state absorption, heavy-quarkonium suppression.