

158GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中的 J/ψ 抑制现象研究

姜志进¹⁾ 李强

(上海理工大学理学院 上海 200093)

摘要 在 Blaizot 等人建立的模型基础上,我们考虑了核-核碰撞中的参与者数与核子-核子碰撞数的起伏效应对 J/ψ 产生的影响,并对 NA50 合作组在入射动量为 158GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中的实验数据进行了分析,理论结果与实验数据符合的很好.

关键词 J/ψ 奇异抑制 横能量起伏 参与者数起伏 核子-核子碰撞数起伏

1 引言

近年来,核-核碰撞中的 J/ψ 抑制现象一直是高能实验与理论物理研究的重要课题之一,因为该现象被认为是夸克胶子等离子体形成的一个重要信号^[1].

J/ψ 抑制现象首先在较轻入射核(如:氧核或硫核)诱发的核反应中被观察到^[2],不过所观察到的抑制现象可归因于一种所谓的核吸收效应^[3-5](一种存在于质子-核碰撞中的 J/ψ 抑制效应).然而在 Pb-Pb 碰撞中所观察到的强的抑制现象却不能完全由核吸收效应予以合理的解释^[6],据此原因,人们称其为“奇异抑制”,并由此引发出各种理论模型^[17-13].

最近,NA50 合作组公布的一组入射动量为 158GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中的新数据^[14]使得 J/ψ 抑制现象进一步得到关注,这组数据表明,J/ψ 的产生几率随其横能量呈双阶梯抑制形式,第一阶梯处在 $E_T \leq 40\text{GeV}$ 的范围内,第二阶梯处在 $E_T \geq 100\text{GeV}$ 的范围内,如图 1 中的圈与点所示.为了解释这一实验现象,Blaizot 等人曾假设^[15]:当夸克胶子等离子体中的能量密度大于某一临界值 ϵ_c (模型中的一参数)时,J/ψ 产生将 100% 地被抑制,基于这一假设,并考虑到横能量的起伏效应,他们得到的结果如图 1 中的虚线示.

本文将在 Blaizot 等人工作的基础上,进一步考

虑核-核碰撞中的参与者数与核子-核子碰撞数的起伏效应(这两种效应在 Blaizot 等人的工作中曾被忽略掉)对 J/ψ 产生的影响,并对 NA50 实验数据作重新分析.由后面的讨论可以看到,考虑到这两种起伏效应后,上述实验现象可以得到满意的解释.

2 核-核碰撞中的横能量分布

核-核碰撞中的横能量分布可由许多理论模型予以描述,如几何模型^[16],受伤核子模型^[17]及多源模型^[18]等等.不过,这里将采用文献[19]中的横能量分布模型,因为该模型较好地处理了参与者数与核子-核子碰撞数的起伏问题.为完整起见,下面对该模型的主要内容作简单介绍.

文献[19]假定:在核-核碰撞中,弹与靶核中的参与者构成末态粒子生成源,且各参与者衰变产生末态粒子的强度与横能量分布相同.实验表明,各参与者的横能量分布可由 Γ 函数

$$f(E_T) = \frac{k^{k/2}}{\Gamma(k/2)} \frac{E_T^{k/2-1}}{\langle E_T \rangle_{\text{NN}}^{k/2}} \exp(-kE_T / \langle E_T \rangle_{\text{NN}}) \quad (1)$$

很好地予以描述,其中 k 为一常数,对于赝快度区 $1.1 \leq \eta \leq 2.3$ (NA50 数据中的横能量测量时所使用的赝快度窗口^[20]),可取 $k = 1$,而 $\langle E_T \rangle_{\text{NN}}$ 为核子-核子碰撞中的平均横能量.

假设在碰撞参数为 b 的某次核-核碰撞中,共有 μ 个参与者,则其横能量分布应为 $f(z)$ 的 μ 重卷

积,其结果为

$$P_{AA}(E_T, \mu) = \frac{k^{k\mu/2}}{\Gamma(k\mu/2)} \frac{E_T^{k\mu/2-1}}{\langle E_T \rangle_{NN}^{k\mu/2}} \exp(-kE_T/\langle E_T \rangle_{NN}). \quad (2)$$

上式亦为一 Γ 函数,代表 μ 一定(或核子-核子碰撞数一定)时的横能量分布.然而, μ (或核子-核子碰撞数)在每次碰撞中的取值是不确定的、有起伏,假设 μ 的几率分布函数为 $W_{AA}(b, \mu)$,则对于碰撞参数为 b 的任意一次核-核碰撞,参与者数为 μ 的横能量分布应为

$$P_{AA}(E_T, b, \mu) = W_{AA}(b, \mu) P_{AA}(E_T, \mu). \quad (3)$$

由(2),(3)两式可知,碰撞产生的平均横能量为

$$\langle E_T \rangle(b) = \frac{\mu}{2} \langle E_T \rangle_{NN}. \quad (4)$$

另外,对于一定的 μ (或一定数目的核子-核子碰撞),弹或靶核中的参与者数也是不确定的,也有起伏.假设对于某次核-核碰撞,弹核中有 α 个参与者,则靶核中应有 $\mu - \alpha$ 个,显然 α 应处于

$$1 \leq \alpha \leq \mu - 1 \quad (5)$$

的范围内.若假定 α 与 $\mu - \alpha$ 的几率分布函数分别为 $W_{A_p}(b, \alpha)$ 与 $W_{A_t}(b, \mu - \alpha)$,其中 A_p 与 A_t 分别代表弹与靶核的质量数,则

$$W_{AA}(b, \mu) = \sum_{\alpha=1}^{\mu-1} W_{A_p}(b, \alpha) W_{A_t}(b, \mu - \alpha), \quad (6)$$

按照文献[19],

$$W_A(b, \nu) = \frac{Q_A(b, \nu)}{\int d^2b \sum_{\nu} Q_A(b, \nu)}, \quad (7a)$$

其中

$$Q_A(b, \nu) = \sigma_{NN}^{\text{in}} \frac{T_A^{\nu}(b)}{\nu!} \exp[-T_A(b)], \quad (7b)$$

$\sigma_{NN}^{\text{in}} = 32\text{mb}$ 是非弹核子-核子碰撞截面,

$$T_A(b) = \int dz \rho_A(z, b), \quad (7c)$$

为核厚度函数,

$$\rho_A(r) = \frac{\rho_0}{1 + \exp\left(\frac{r - r_0}{a}\right)}, \quad (7d)$$

为原子核的核子数密度,其中 $\rho_0 = 0.17\text{fm}^{-3}$, $a = 0.53\text{fm}$, $r_0 = 1.1A^{1/3}\text{fm}$.

而实验上所观察到的核-核碰撞中的横能量分布应为

$$P_{AA}(E_T) = \int d^2b \sum_{\mu \geq 2} P_{AA}(E_T, b, \mu). \quad (8)$$

这就是考虑了弹与靶核中参与者数与核子-核子碰

撞数起伏效应后的横能量分布.

3 核-核碰撞中的 J/ψ 产生

本文开始已指出,这里将采用 Blaizot 等人提出的模型^[15]来分析核-核碰撞中的 J/ψ 产生问题.

按 Blaizot 等人的模型^[15],在碰撞参数为 b 的某次核-核碰撞中,横能量为 E_T 的 J/ψ 产生几率为

$$P(\text{J}/\psi | E_T, b) = \sigma_{\text{J}/\psi}^{\text{NN}} \int d^2s T_{A_p}^{\text{eff}}(s) T_{A_t}^{\text{eff}}(s - \mathbf{b}) S(E_T, \mathbf{s}, \mathbf{b}), \quad (9)$$

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

$$T_A^{\text{eff}}(\mathbf{s}) = \frac{1}{\sigma_{\text{abs}}} (1 - \exp(-\sigma_{\text{abs}} T_A(\mathbf{s}))) \quad (10)$$

为核有效厚度函数,代表一个 $c\bar{c}$ 对免遭核吸收而生成一个 J/ψ 的几率. σ_{abs} 为核子对 J/ψ 的吸收截面,而(9)式中的 $S(E_T, \mathbf{s}, \mathbf{b})$ 项代表 J/ψ 的奇异抑制部分,它具有形式

$$S(E_T, \mathbf{s}, \mathbf{b}) = \Theta\left(n_c - \frac{E_T}{\langle E_T \rangle(\mathbf{b})} n_{\text{part}}(\mathbf{s}, \mathbf{b})\right), \quad (11)$$

其中 n_c 是一正比于能量密度 ϵ_c 的参数. $\langle E_T \rangle(\mathbf{b})$ 是碰撞参数为 b 时 E_T 的平均值,按前面提到的横能量分布模型^[19],它应由(4)式确定.而上式中的

$$n_{\text{part}}(\mathbf{s}, \mathbf{b}) = T_{A_p}(\mathbf{s}) [1 - \exp(-\sigma_{NN}^{\text{in}} T_A(\mathbf{s} - \mathbf{b}))] + T_{A_t}(\mathbf{s} - \mathbf{b}) [1 - \exp(-\sigma_{NN}^{\text{in}} T_A(\mathbf{s}))] \quad (12)$$

是碰撞参数为 b 时,在与碰撞轴垂直的平面上 s 处的参与者数密度.

(9)式仅给出了横能量为 E_T 的 J/ψ 的产生几率,而 J/ψ 的横能量在每次碰撞中是不确定的、有起伏,按前面介绍过的横能量分布模型^[19],一定 b 下的 E_T 几率分布函数由(3)式确定,所以对于碰撞参数为 b 的任意一次核-核碰撞,横能量为 E_T 的 J/ψ 的产生几率应为

$$P(\text{J}/\psi | E_T, b, \mu) = P_{AA}(E_T, b, \mu) P(\text{J}/\psi | E_T, b), \quad (13)$$

而实验上观察到的 J/ψ 产生几率应为

$$P(\text{J}/\psi | E_T) = \int d^2b \sum_{\mu \geq 2} P(\text{J}/\psi | E_T, b, \mu). \quad (14)$$

它包含了 3 种起伏效应: E_T 起伏效应,参与者数起伏效应以及核子-核子碰撞数起伏效应,如前所述,后两种起伏效应在 Blaizot 等人的工作中曾被忽略

掉^[15].

对于核-核碰撞中的 Drell-Yan 对产生几率 $P(DY|E_T)$, 可用如上同样的方法得到, 只需将 (13) 式中的 $P(J/\psi|E_T, b)$ 用

$$P(DY|E_T, b) = \sigma_{DY}^{NN} \int d^2s T_{A_p}(s) T_{A_t}(s-b) \quad (15)$$

代替即可, 其中 σ_{DY}^{NN} 是核子-核子碰撞中的 Drell-Yan 对产生截面.

完成 (14) 式及 $P(DY|E_T)$ 的数值计算, 我们得到如图 1 中的实线所示的结果. 在计算中, 与其他文献一样^[14, 15, 21], $\sigma_{J/\psi}^{NN}/\sigma_{DY}^{NN}$ 与 σ_{abs} 分别取值 53.5 与 6.4 mb, $n_c = 3.5$ (较文献 [15] 中的用值小了 0.2), $\langle E_T \rangle_{NN} = 0.5 \text{ GeV}$ (较文献 [21] 中的用值大了 0.39 GeV).

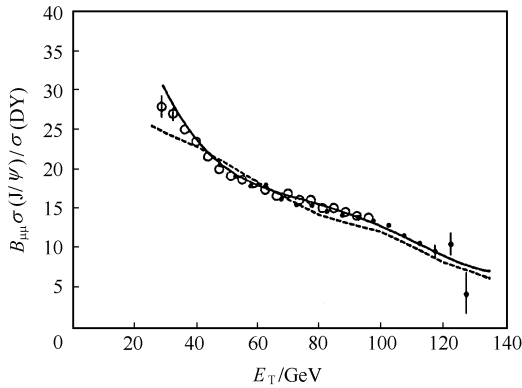


图 1 158 GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中, J/ψ 与 Drell-Yan 对产生几率之比随横能量 E_T 的变化关系

○ 实验数据, 由 NA50 合作组分别于 1996 与 1998 年测量得到,
 Blaizot 等人的计算结果, —— 本文的计算结果.

由图 1 可以看出, 在整个 E_T 范围内, 理论计算与实验结果符合的非常好, 特别是在 $E_T \geq 100 \text{ GeV}$ 的范围内, 许多理论模型^[7-12] 给出的结果较实验数据的下降速度要慢得多, 而本文给出的结果准确的显示出一个快速下降阶梯, 而在 $E_T \geq 130 \text{ GeV}$ 的区域内, 计算结果趋于饱和, 这是可以理解的, 因为在该区域内, 碰撞参数 b 趋于零, 所以 J/ψ 与 Drell-Yan 对的产生几率将趋于 $b=0$ 时的极限.

由图 1 可以看出, 相对于 Blaizot 等人的结果, 修改后的模型在低横能区 ($E_T \leq 40 \text{ GeV}$) 给出了较小的 J/ψ 抑制效应, 从而很好的再现了实验上观察到的第一个 J/ψ 抑制阶梯, 而在高横能区 ($E_T \geq 100 \text{ GeV}$), 两模型都给出了快速下降的第二个 J/ψ 抑制阶梯.

4 结论

本文在 Blaizot 等人建立的模型基础上, 考虑了核-核碰撞中除 E_T 外的其他两种起伏效应: 参与者数与核子-核子碰撞数的起伏效应对 J/ψ 产生的影响, 所得结果在整个 E_T 范围内很好地反映了实验事实. 理论计算不仅很好地再现了数据中出现在 $E_T \leq 40 \text{ GeV}$ 范围内的第一个抑制阶梯, 亦准确地再现了 $E_T \geq 100 \text{ GeV}$ 范围内的第二个抑制阶梯, 在 $E_T \geq 130 \text{ GeV}$ 的范围内, 计算结果趋于一常数, 该常数即为 $b=0$ 时的极限. 由此可见, 按 Blaizot 等人的 J/ψ 奇异抑制假说, 在 158 GeV/c 的 Pb-Pb 碰撞中, 夸克胶子等离子体环境确已形成.

参考文献 (References)

- 1 Matsui T, Satz H. Phys. Lett., 1986, **B178**: 416
- 2 Baglin C et al. Phys. Lett., 1991, **B255**: 459
- 3 Alde D et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **66**: 133
- 4 Capella A, Casado J A, Pajares C et al. Phys. Lett., 1988, **B206**: 354
- 5 Cerschel C, Hüfner J. Z. Phys., 1992, **C56**: 171
- 6 NA50 Collab. (Abreu M C et al). Phys. Lett., 1997, **B410**: 337
- 7 Capella A et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 2080
- 8 Armesto N, Capella A, Ferreiro E G. Phys. Rev., 1999, **C59**: 395
- 9 Spieles C et al. Phys. Rev., 1999, **C60**: 54901
- 10 Geiss J et al. Phys. Lett., 1999, **B117**: 31
- 11 QIU J W, Vary J P, ZHANG X F. Phys. Rev. Lett., 2002, **88**: 232301

- 12 Nardi M, Satz H. Phys. Lett., 1999, **B442**: 14
- 13 Blaizot J P, Ollitrault J Y. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**: 1703
- 14 NA50 Collab. (Abreu M C et al). Phys. Lett., 2000, **B477**: 28; Nucl. Phys., 2002, **A698**: 127c
- 15 Blaizot J P, Dinh P M, Ollitrault J Y. Phys. Rev. Lett., 2000, **85**: 4012
- 16 Chaudhuri A K. Nucl. Phys., 1990, **A515**: 736
- 17 NA57 Collab. (Antinori F et al). Eur. Phys. Journ., 2000, **C18**: 57
- 18 LIU Lian-Sou, MENG Ta-Chung, PAN Ji-Cai et al. Phys. Rev., 1988, **D38**: 3405
- 19 JIANG Zhi-Jin, LI Jia-Rong. IL NUOVO CIMENTIO, 1989, **A102**: 771
- 20 NA50 Collab. (Abreu M C et al). Phys. Lett., 1999, **B450**: 2456
- 21 Chaudhuri A K. Phys. Rev., 2001, **C64**: 054903

Study of J/ψ Suppression in Pb-Pb Collisions at 158GeV/c

JIANG Zhi-Jin¹⁾ LI Qiang

(Science College, Shanghai Science & Technology University, Shanghai 200093, China)

Abstract On the basis of model proposed by Blaizot et al. , we take into account the effects on J/ψ suppression in AA collisions of the number fluctuations of participants and NN collisions, and analyze the data of the NA50 Collaboration in Pb-Pb collisions at 158GeV/c. The theoretical results fit the data well.

Key words J/ψ anomalous suppression, transverse energy fluctuation, the number fluctuation of participants, the number fluctuation of NN collisions