

# 强子与弦级联模型中 $J/\psi$ 核压低\*

萨本豪

(中国原子能科学研究院 北京 102417)

台安

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

王辉 刘泮河

(中国原子能科学研究院 北京 102417)

**摘要** 用建立在 LUND 模型特别是 PYTHIA 事件产生器基础上的描写极端相对论性核-核碰撞的强子和弦级联模型——JPCIAE 研究了入射能量为 200A GeV 的 pA 和 BA 碰撞的最小偏畸事件中  $J/\psi$  的核压低. 用两组  $J/\psi$  和强子形成时间合理的数值分别由正常模拟和类 Glauber 式模拟得到的  $J/\psi$  核压低因子可与 NA38 的相应 pA 和 BA 碰撞的数据相比较, 但 NA50Pb + Pb 碰撞的数则解释不了. 另外, 正常模拟和类 Glauber 式模拟间的差别, 进而动力学模拟和 Glauber 理论间的差别不容忽视. 仔细研究了强子形成时间对  $J/\psi$  核压低的敏感效应. 结果还表明: 对于  $J/\psi$  核压低来说, 介子吸收在 pA 碰撞中也起作用犹如在 BA 碰撞中一样.

**关键词** 强子与弦级联模型 JPCIAE 事件产生器 最小偏畸事件  $J/\psi$  核压低

十多年前文献 [1] 中建议用相对论性核-核碰撞中  $J/\psi$  粒子产额的压低来诊断该反应中是否形成过夸克-胶子等离子体 (QGP). 此建议促成了不少实验 [2-4]. 这些实验测量  $J/\psi$  粒子产额是通过测量衰变的双轻子的办法. 它们果然观测到从 pA 到 BA 碰撞中  $J/\psi$  产额的压低现象. 迄今, 除在 158A GeV/c Pb + Pb 碰撞中观测到的  $J/\psi$  反常核压低外, 所有正常压低的实验数据都能用 Glauber 理论 (吸收模型) 来解释 [5-14]. 但是 Pb + Pb 碰撞中  $J/\psi$  反常压低的机制仍然是争论的热点 [9-15].

最近 [16, 17] 用协变输运办法研究  $J/\psi$  核压低. 他们宣称: 不必引入 QGP 就能解释从 pA 到 BA 包括 Pb + Pb 的  $J/\psi$  核压低数据. 然而不但他们的结论有待商榷而且像他们所用

1998-04-13 收稿

\* 国家自然科学基金和核工业基金资助

的这种动力学方法中的许多动力学要素,如形成时间的效应等,都需要作进一步的研究.

本文建议了一个描写相对论性核-核碰撞的强子和弦级联模型 JPCIAE,它是建立在 LUND 模型特别是 PYTHIA 事件产生器<sup>[18]</sup>的基础上. 为检验模型和程序首先用它计算 200A GeV 的 pp、pA 和 BA 反应中负粒子多重性以及负粒子和参加者质子的快度和横动量分布,并与相应的实验数据<sup>[19,20]</sup>作比较. 进而用它研究 J/ψ 核压低以及某些动力学要素的效应. 结果表明:本模型能较好再现从 pA 到 BA 所有 J/ψ 正常压低的 NA38 数据<sup>[2,3]</sup>,但描写不了 NA50 的 Pb + Pb 数据<sup>[4]</sup>. 结果还表明:产生粒子形成时间对 J/ψ 核压低有非常重要的影响,另外介子吸收在 pA 碰撞中也起着与 BA 碰撞类似的作用. 结果也表明:完整考虑产生粒子再散射的情形(正常模拟)和只考虑 J/ψ 和其它产生粒子再散射的情形(类 Glauber 式模拟)有不容忽略的差别.

在 JPCIAE 中模拟是在实验系进行的. 坐标空间原点取在靶核中心,束流方向取作 z 轴. 时间原点取在弹和靶核在 z 轴方向的距离为零的时刻,因而碰撞时间可为负值.

碰撞核在它自身静止系中被描写为半径为  $1.05A^{1/3}$  (A 指核子数)的球,其核子的空间分布由 Woods-Saxon 分布随机抽样产生. 弹核子带有每核子的人射动量,靶核子则认为是静止的;也就是说这儿忽略了 Fermi 运动和核的平均场,因为感兴趣的是相对论性能量. 对于弹核子还作了 Lorentz 收缩.

接着根据碰撞对最小逼近原则,即最小逼近距离要小于或等于  $\sqrt{\sigma_{\text{tot}}/\pi}$  ( $\sigma_{\text{tot}}$  是碰撞对的总截面),计算碰撞时间. 于是初始碰撞表可由所有初始核子碰撞对(其中一个为弹核子另一个是靶核子)及相应的碰撞时间构成.

如果由碰撞表选出的具有最小碰撞时间的碰撞对(强子-强子碰撞)的质心系能量  $\sqrt{S}$  大于或等于 4GeV 就有两根弦形成并执行 PYTHIA 以得到末态强子,否则无弦形成并执行通常的散射过程<sup>[21-23]</sup>. 接着粒子表和碰撞(时间)表都要更新,这时它们不但含有弹和靶核子也含有产生的强子. 到碰撞(时间)表空了时,一个模拟历史即告结束.

PYTHIA 中已考虑了许多部分子-部分子(部分子指夸克或胶子) QCD 硬过程,包括 J/ψ 产生

$$g + g \rightarrow J/\psi + g, \quad (1.3 \times 10^{-5} \text{mb}). \quad (1)$$

用户可根据自己的需要选取这些硬过程. 我们设计了一个从 PYTHIA 原有选择(default,  $\sqrt{S} \geq 4\text{GeV}$ )到有 J/ψ 硬产生选择( $\sqrt{S} \geq 10\text{GeV}$ )的开关. 必须指出:任何有用户自行选择的操作(包括本文选择 J/ψ 硬产生)实际上都是一种偏畸抽样技巧;它加强了所特殊选择的那些过程的出现几率. 作为纠偏上述开关的转换由一个几率随机决定,此几率等于参数化的 J/ψ 核产生截面

$$\sigma_{\text{NN} \rightarrow J/\psi + X} = d \left(1 - \frac{C}{\sqrt{S}}\right)^{12} \quad (2)$$

( $C = 3.097\text{GeV}$ ,  $d = 2.37/B_{\mu\mu}$  nb,  $B_{\mu\mu} = 0.0597$  是 J/ψ 到双轻子的分支比)乘以常数;该常数需保证每一模拟事件中只大约产生一个 J/ψ, 以与实验情况相近<sup>[2]</sup>.

必须指出:在原 JETSET(它和 PYTHIA 一块执行并处理弦的碎裂)中每次核子-核子

碰撞后领头粒子都丢失了一半的入射能量;但是相对论性核-核碰撞实验表明:每次核子-核子碰撞后领头粒子只丢失小部分能量,只最后一次与靶核子碰撞时才丢失入射能量的一半.所以把领头粒子的能量损失改由阻止率(stopping law)<sup>[25,26]</sup>随机抽样.

表 1 给出 200GeV pp 和 pA 反应中负粒子多重性的 JPCIAE 结果及其与 NA35 实验结果<sup>[19,20]</sup>的比较,表 2 给的是 200A GeV BA 反应的相应比较.由表 1 和表 2 可见:理论与实验的符合是比较好的.

表1 200A GeV能量下最小偏畸pp和pA碰撞中电荷多重数

	p+p	p+S	p+Ag
NA35 data	2.85±0.3	5.7±0.2	6.2±0.2
JPCIAE	2.84	4.91	5.81

表2 200A GeV能量下BA中心碰撞中电荷多重数

	S+S	S+Ag
NA35 data	98±3	170±8
JPCIAE	107	173

图 1 的上半部给出 200A GeV S + S 中心碰撞和 N + N 最小偏畸事件中负粒子快度分布的 JPCIAE 结果及其与相应实验结果<sup>[19,20]</sup>的比较;图 1 下半部给的则是 S + S 中心和边缘碰撞中参加者质子快度分布的比较.200A GeV S + S 中心碰撞中负粒子和参加者质子横动量分布的比较则分别给在图 2 上和下半部分中.从这两图再次看到:理论与实验符合得相当好.

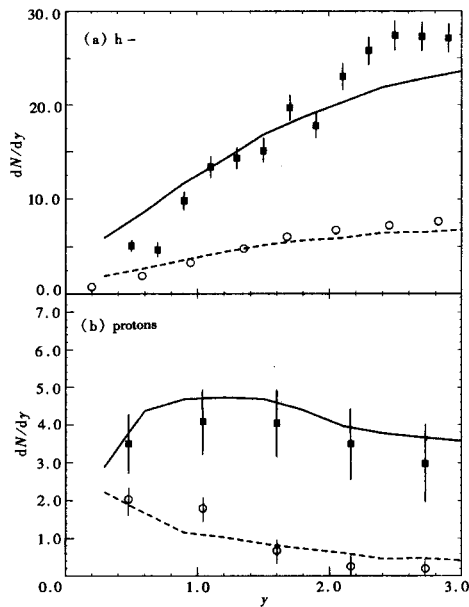


图 1 (a)  $h^-$  和 (b) 参加者质子的快度分布  
为便于比较, N + N 的数据和相应理论结果均乘以 10.  
(a) ■ S + S central Exp.; ○ N + N min. bias Exp.;  
—— S + S JPCIAE; --- N + N JPCIAE. (b) ■ S + S central Exp.; ○ S + S periph. Exp.;  
—— S + S central JPCIAE; --- S + S periph. JPCIAE.

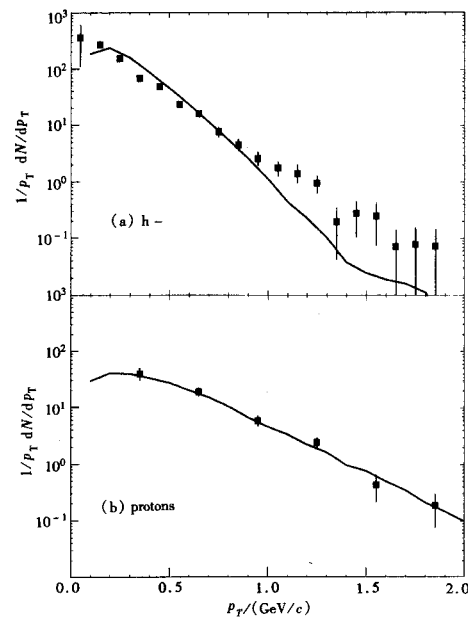


图 2 (a)  $h^-$  和 (b) 参加者质子的横动量分布  
■ S + S central Exp.; —— S + S JPCIAE.

进而我们看  $J/\psi$  核压低的结果. 因为我们目的是揭露 NA38 和 NA50 数据背后的物理, 而不在于尽可能好地符合实验, 所以先是有根据地取两组参数计算能量都规范到 200A GeV 的所有有实验数据的 pA 和 BA 最小偏畸碰撞的  $J/\psi$  核压低因子, 并与相应实验结果作比较 (参见图 3). 这里实验的  $J/\psi$  压低因子定义为<sup>[17]</sup>:

$$S_{\text{exp}}^{J/\psi} = \left( \frac{B_{\mu\mu} \sigma_{\text{BA}}^{J/\psi}}{\sigma_{\text{DY}, 2.9-4.5\text{GeV}}^{J/\psi}} \right) / \left( \frac{B_{\mu\mu} \sigma_{\text{pd}}^{J/\psi}}{\sigma_{\text{DY}}^{J/\psi}} \right) \quad (3)$$

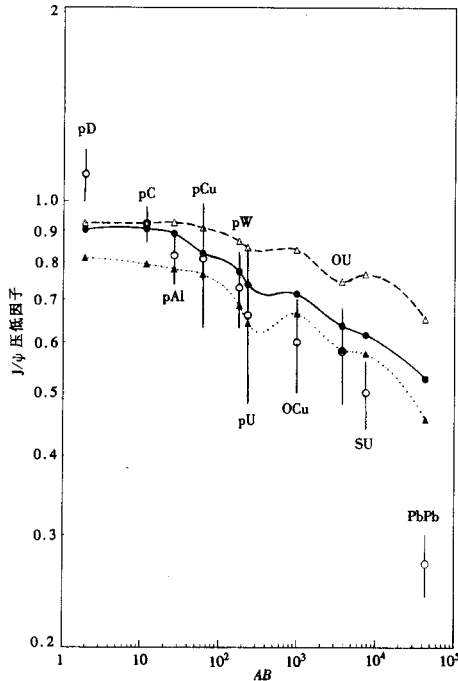


图3 200A GeV能量下最小偏畸pA和BA碰撞中 $J/\psi$ 压低因子

○Exp.; —●— JPCIAE1; ---△--- JPCIAE2;  
···▲··· JPCIAE3.

因为  $J/\psi$  产额是通过它的双轻子衰变而测得而 Drell-Yan 过程则给出双轻子不变质量谱的本底. 理论的定义则为<sup>[17,27]</sup>:

$$S_{\text{theo}}^{J/\psi} = \frac{M_{J/\psi}}{M_{J/\psi}(0)} \quad (4)$$

$M_{J/\psi}(0)$  指起始的  $J/\psi$  多重数, 而  $M_{J/\psi}$  指有了末态相互作用后的多重数. 图 3 中带误差棒的空心点是实验结果 (直接引自文献 [27]); 实点是参数组 1: 介子形成时间  $\tau_M = 1.2\text{fm}/c$  和  $J/\psi$  形成时间  $\tau_{J/\psi} = f_{J/\psi} \times \tau_M$  ( $f_{J/\psi} = 0.5$ ) 的正常模拟的结果; 实三角是参数组 2:  $\tau_M = 0.8\text{fm}/c$  和  $f_{J/\psi} = 0.5$  的类 Glauber 式模拟的结果; 空三角则是参数组 1 的类 Glauber 式模拟的结果. 核子的形成时间都假设为零. 由于  $J/\psi$ -强子作用截面依然是个未解决好的问题<sup>[28,29]</sup> 我们像通常一样假设:  $\sigma_{J/\psi-B}^{\text{abs}} = 6\text{mb}$  而  $\sigma_{J/\psi-M}^{\text{abs}} = 3\text{mb}$  (B 和 M 分别指重子和介子, 下同), 因而程序中用的相应总截面分别为:  $\sigma_{J/\psi-B}^{\text{tot}} = 7.2\text{mb}$  和  $\sigma_{J/\psi-M}^{\text{tot}} = 4\text{mb}$ . 考虑的  $J/\psi$  和重子 (B) 及介子 (M) 相互作用有



从图 3 可见: 参数组 1 的正常模拟结果以及参数组 2 的类 Glauber 式模拟结果和相应实验结果都还可以相比较; 不过 Pb+Pb 的结果则不然; 但是类 Glauber 式模拟则需用较小些的介子形成时间, 因为强子的冻结时间 (freeze-out) 在类 Glauber 式模拟中短于正常模拟, 这又是由于前者未考虑强子 (除  $J/\psi$  外) 间的再作用. 比较都用参数组 1 的正常模拟结果与类 Glauber 式模拟结果 (即图 3 中的实点与空三角), 不难看出: 正常模拟与类 Glauber 式模拟进而动力学模拟和 Glauber 理论间的差别不容忽视. 当然两者的差别也与形成时间有关.

表 3 给出  $f_{J/\psi}$  固定为 0.5 而改变  $\tau_M$  用正常模拟算得的 200A GeV p + Al, p + Cu, p + U, O + Cu 和 O + U 反应中  $J/\psi$  压低因子; 表 4 给的则是固定  $\tau_M = 1.2$  改变  $f_{J/\psi}$  的相应结

果. 由此两表可见: J/ψ 压低因子对介子和 J/ψ 的形成时间非常敏感. 在同样的介子和 J/ψ 形成时间下无论在 pA 或 BA 碰撞中 J/ψ 压低因子都随靶质量的加大而减小. 在  $1 + A^{1/3}$  (对于 pA 碰撞) 近似等于  $B^{1/3} + A^{1/3}$  (对于 BA 碰撞, 这里 B 和 A 又分别指弹和靶核质量数) 情形下 pA 碰撞中 J/ψ 压低因子大于 BA 碰撞, 因为在 pA 碰撞中产生的强子少于 BA 碰撞.

表3 200A GeV 能量下 p+Al, p+Au, p+Ag, p+U, O+Cu 和 O+U 碰撞中 J/ψ 压低因子 ( $f_{J/\psi} = 0.5$ )

$\tau_M$ (fm/c)	p+Al	p+Cu	p+Ag	p+U	O+Cu	O+U
0.2	0.220	0.194	0.180	0.122	0.144	0.103
0.5	0.435	0.403	0.369	0.314	0.313	0.246
1.2	0.888	0.836	0.779	0.738	0.713	0.635

表4 200A GeV 能量下 p+Al, p+Au, p+Ag, p+U, O+Cu 和 O+U 碰撞中 J/ψ 压低因子 ( $\tau_M = 1.2 \text{ fm/c}$ )

$f_{J/\psi}$	p+Al	p+Cu	p+Ag	p+U	O+Cu	O+U
0.25	0.538	0.496	0.472	0.453	0.389	0.343
0.50	0.888	0.836	0.799	0.738	0.713	0.635
0.75	0.943	0.932	0.921	0.859	0.832	0.773

为了检验相同入射能量下 pA 碰撞中介子对 J/ψ 压低起的作用是否不同于 BA 碰撞, 引入因子

$$f_M = \frac{S_{\text{theo}}^{\text{无}M} - S_{\text{theo}}^{\text{有}M}}{S_{\text{theo}}^{\text{无}M}}, \quad (7)$$

表 5 给出参数组 1 下用正常模拟计算得的上述六反应中  $f_M$  的结果. 从此表可见: 在 pA 碰撞中介子对 J/ψ 压低的作用是不容忽略的, 其作用随靶质量之增而增; 此结论与<sup>[6-13, 16, 17]</sup>相一致. 对于一定的弹核介子对 J/ψ 压低的影响主要决定于靶核的质量数, 无论 pA 或 BA 碰撞都是这样.

表 5 200A GeV 能量下 p+Al, p+Au, p+Ag, p+U, O+Cu 和 O+U 碰撞中  $f_M$  因子 ( $\tau_M = 1.2 \text{ fm/c}$  和  $f_{J/\psi} = 0.5$ )

reaction	p+Al	p+Cu	p+Ag	p+U	O+Cu	O+U
$S_{\text{theo}}^{\text{without}M}$	0.903	0.865	0.875	0.810	0.772	0.706
$S_{\text{theo}}^{\text{with}M}$	0.888	0.836	0.799	0.738	0.713	0.635
$f_M$	0.0166	0.0335	0.0869	0.0889	0.0764	0.101

最后需要指出, 本文的计算没有让产生的  $\rho(\omega)$  介子衰变, 所以最大地估计了介子对 J/ψ 的吸收作用, 从而说明 Pb + Pb 碰撞中的 J/ψ 反常吸收是无法用强子吸收模型来解释的. 考虑  $\rho(\omega)$  介子的衰变后介子对 J/ψ 的吸收影响将是我们下一步研究的内容.

作者感谢黄卓然、许恕、李国强和李保安等先生的有益讨论.

## 参 考 文 献

- 1 Matsui T, Satz H. Phys. Lett., 1986, **B178**:416
- 2 NA3 Collab, Badier J et al. Z. Phys., 1983, **C20**:101
- 3 NA38 Collab, Baglin C et al. 1989, **B220**:471; 1990, **B251**:465, 472; 1991, **B255**:459; 1991, **B270**:105; 1995, **B345**:617
- 4 NA50 Collab, Gonin M et al. Nucl. Phys., 1996, **A610**:404c
- 5 Anderson R L et al. Phys. Rev. Lett., 1977, **38**:263
- 6 Gerschel C, Hufner J. Phys. Lett., 1988, **B207**:253
- 7 Gavin S, Vogt R. Nucl. Phys., 1990, **B345**:104
- 8 Gerschel C, Hufner J. Nucl. Phys., 1992, **A544**:513c
- 9 Wong C Y. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:196
- 10 Blaizot J P, Ollitrault J Y. Phys. Rev. Lett., 1996, **77**:1703
- 11 Kharzeev D. Nucl. Phys., 1996, **A610**:418c
- 12 Wong C Y. Nucl. Phys., 1996, **A610**:434c
- 13 Gavin S, Vogt R. Nucl. Phys., 1996, **A610**:442c
- 14 Kharzeev D, Nardi M, Satz H. Phys. Lett., 1997, **B405**:14
- 15 Gavai R V, Gupta S. Phys. Lett., 1997, **B408**:397
- 16 Cassing W, Ko C M. Phys. Lett., 1997, **B396**:39
- 17 Cassing W, Bratkovskaya E L. Nucl. Phys., 1997, **A623**:570
- 18 Sjostrand T. Comp. Phys. Commu., 1994, **82**:74
- 19 NA35 Collab, Alber T et al. Z. Phys., 1994, **C64**:195
- 20 NA35 Collab, Bachler J et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **72**:1419
- 21 Cugnon J, Mizutani T, Vandermeulen J. Nucl. Phys., 1981, **A352**:505
- 22 Bertsch G F, Das Gupta S. Phys. Rep., 1988, **160**:189
- 23 Sa Ben-Hao, Tai An. Comp. Phys. Commu., 1995, **90**:121; *ibid*, 1999, **116**:353
- 24 Lourenco C. Nucl. Phys., 1996, **A610**:552c
- 25 Kinoshita K, Minaka A, Sumiyoshi H. Prog. Theor. Phys., 1980, **63**:1268
- 26 Wong C Y, Lu Zhong-Dao. Phys. Rev., 1989, **D39**:2606
- 27 Hwa R C, Piacutet J, Piacutet N. Phys. Rev., 1997, **C56**:432
- 28 Kharzeev D, Satz H. Phys. Lett., 1994, **B334**:155
- 29 Wong C Y, Wong C W. Phys. Rev., 1998, **D57**:1838

## $J/\psi$ Suppression in a Hadron and String Cascade Model\*

Sa Benhao

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Tai An

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Wang Hui     Liu Fenghe

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

**Abstract** The proposed hadron and string cascade model, JPCIAE, for ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions based on the LUND model and the PYTHIA event generator especially, is used to investigate the  $J/\psi$  suppression due to the nuclear absorption of a  $J/\psi$  in minimum bias pA and BA collisions at 200A GeV energy. With the different sets of reasonable formation time for hadron and  $J/\psi$  the results of  $J/\psi$  suppression factor from both the usual scenario and the Glauber-like simulations are comparable with all the NA38 pA and BA data, except the NA50 data of Pb + Pb collisions. However, the difference between the usual scenario and the Glauber-like simulation, hence the difference between the dynamical simulation and Glauber theory, can not be ignored. The sensitive effect of the hadron formation time on the  $J/\psi$  suppression is studied in detail. The results seem to denote that for the  $J/\psi$  suppression the meson absorption plays a role in pA as well as in BA collisions.

**Key words** hadron and string cascade model, JPCIAE event generator, minimum bias event,  $J/\psi$  suppression

---

Received 13 April 1998

\* Supported by the National Natural Science Foundation of China and the science Foundation of Chinese Nuclear Industry