

# 高能重离子碰撞中正负电荷粒子比 单事例起伏研究\*

周代梅<sup>1,1)</sup> 蔡勖<sup>1</sup> 刘志毅<sup>2</sup> 陆中道<sup>2</sup> 萨本豪<sup>2</sup>

1 (华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

2 (中国原子能科学研究院 北京 102413)

**摘要** 用强子和弦级联模型, JPCIAE 及相应的 Monte Carlo 事例产生器, 研究相对论性核-核碰撞中有限快度区间内正负电荷粒子比单事例起伏与能量、中心度、共振态衰变及快度间隔的关系. JPCIAE 模型能够较好地符合 CERN/SPS 能区 Pb + Pb 碰撞的实验结果. 本文还用此模型预言了 RHIC 能区 Au + Au 碰撞和 ALICE 能区 Pb + Pb 碰撞中的正负电荷粒子比单事例起伏. 可以看出碰撞能量、中心度、共振态衰变及快度间隔对正负电荷粒子比单事例起伏的影响都不大.

**关键词** 相对论性核-核碰撞 正负电荷粒子比 单事例起伏 JPCIAE 模型

## 1 引言

研究相对论性重离子碰撞的重要目的之一是探寻新的物质形态, 夸克-胶子等离子体(Quark-Gluon Plasma (QGP)). 随着超相对论性重离子碰撞能量的提高, 粒子多重数增大, 单事例起伏分析方法成为可能. NA49 实验组对 CERN/SPS 能区能量为 158A GeV/c 的 Pb + Pb 碰撞实验最早实现了单事例分析<sup>[1-3]</sup>. 近来文献[4,5]建议: 有限快度区间中正负电荷粒子比的单事例起伏可以作为判定 QGP 是否形成的一个信号. 由于基本自由度的不同(在强子相, 电荷的基本单位为 1; 在 QGP 相, 电荷的基本单位则为 1/3)正负电荷粒子比( $N^+/N^-$ )的单事例起伏的大小在强子相与在 QGP 相有很大的不同, 热模型的预言是: 前者大约是后者的 2.5—4 倍. 超相对论量子分子动力学模型(UrQMD 模型)<sup>[6]</sup>研究过能量为 158A GeV/c 的 Pb + Pb 碰撞和 RHIC 全能量 Au + Au 碰撞中的正负电荷粒子比起伏<sup>[7]</sup>, 但是 UrQMD 模型未能够很好地描述 NA49 实验组给出的 SPS 能区 Pb + Pb 碰撞的最初实验结果<sup>[8]</sup>.

本文用强子和弦级联模型, JPCIAE 及相应的 Monte Carlo 事例产生器研究了相对论性核-核碰撞中电荷粒子比单事例起伏与能量、中心度、共振态衰变及快度间隔的依赖关

2002-01-08 收稿

\* 国家自然科学基金(10075035, 19975075)资助

1) E-mail: zdm@iopp.cnu.edu.cn

系. JPCIAE 模型能够较好地符合 CERN/SPS 能区 Pb + Pb 碰撞的实验结果<sup>[8]</sup>. JPCIAE 模型是无 QGP 的动力学模型, 此模型对 RHIC 能量下的 Au + Au 碰撞及 ALICE 能量下的 Pb + Pb 碰撞实验的预言, 可为 QGP 是否形成提供一些参考依据.

## 2 JPCIAE 模型

JPCIAE 模型<sup>[9]</sup>建立在描写强子碰撞的 PYTHIA 模型<sup>[10]</sup>基础上. 在 JPCIAE 模型中, 碰撞核内的核子随机分布在半径为  $1.12A^{1/3} + 0.54\text{fm}$  的球内, 核子的半径由 Woods-Saxon 分布随机抽样产生, 立体角在  $4\pi$  内均匀抽样产生. 每个核子给定束流动量(沿  $z$  轴), 在  $x$  轴和  $y$  轴上其初始动量为零. 当建立了初始粒子表后, 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  $\sqrt{\frac{\sigma_{\text{tot}}}{\pi}}$  ( $\sigma_{\text{tot}}$  是碰撞对总截面), 计算碰撞时间, 这样就建立了由所有初始核子碰撞对及相应的碰撞时间构成的初始碰撞表. 由初始碰撞表选出具有最小碰撞时间的碰撞对并对其进行最初碰撞. 执行了最初碰撞后, 粒子表和碰撞表都要更新, 更新后的碰撞表不仅有核子-核子之间的碰撞, 还有产生的粒子之间及产生的粒子与核子之间的碰撞. 下一次碰撞由更新后的碰撞表中具有最小碰撞时间的核子对执行, 如此重复下去, 直到碰撞表空了, 一个事件的模拟即告结束. 对于每个碰撞对, 如果质心系 (CMS) 能量大于一给定的截断值, 则假设碰撞中有弦产生, 调用 PYTHIA 来处理粒子的产生, 得到末态强子; 否则就按通常的两体散射处理<sup>[11-13]</sup>. 截断值 ( $= 4\text{GeV}$ ) 的选择要求 JPCIAE 能够再现核核 (AA) 碰撞中带电粒子的多重数分布. 可以看出 JPCIAE 模型不是核子-核子碰撞的简单叠加, 尚考虑了参加者核子、旁观者核子以及产生粒子之间的再散射. 模型细节参见文献[9].

## 3 正负带电粒子比单事例起伏

文献[4]中建议用以研究正负带电粒子比起伏的量是

$$D = \langle N_{ch} \rangle \langle (\delta R)^2 \rangle, \quad (1)$$

其中

$$\langle (\delta R)^2 \rangle = \langle R^2 \rangle - \langle R \rangle^2, \quad (2)$$

这儿  $\langle \dots \rangle$  表示对事件的平均,  $R = N^+ / N^-$ ,  $N_{ch} = N^+ + N^-$ ,  $N^+$ ,  $N^-$  是各事例中正、负带电粒子的数目. 文献[4]基于系统为巨正则系综及系统中净电荷为零的假设. 从热模型导出的夸克-胶子等离子体的  $D$  约为 1, 而  $\pi$  气体的  $D$  约为 4, 共振  $\pi$  气体的  $D$  约为 2.8. 在高能重离子碰撞实验和动力学模拟中, 上述假设都满足, 为了和热模型结果相比较, 需要对式(1)中  $D$  进行修正. 为了修正有限净电荷的存在, 引入因子  $C_\mu$ <sup>[7]</sup>

$$C_\mu = \frac{\langle N_\pm \rangle_{\Delta y}^2}{\langle N_\pm \rangle_{\Delta y}^2}, \quad (3)$$

为了巨正则系综假设需引入修正因子  $C_y$ <sup>[7]</sup>,

$$C_y = 1 - \frac{\langle N_{ch} \rangle_{\Delta y}}{\langle N_{ch} \rangle_{total}}$$

于是  $D$  修正为

$$\tilde{D} = \frac{\langle N_{ch} \rangle_{\Delta y} \langle (\delta R)^2 \rangle_{\Delta y}}{C_\mu C_y},$$

式中  $\Delta y$  指所取快度区间间隔的大小, 'total' 表示全快度区间.

### 4 结果与讨论

图 1 给出了能量分别为 40, 80, 158 A GeV 的 Pb + Pb 碰撞中修正后的起伏因子  $\tilde{D}$  随快度间隔的变化关系. 在 JPCIAE 模型模拟中, 3 个碰撞能量下快度间隔的选择分别以 2.9, 3.2, 3.6 为中心, 横动量间隔为  $0.005 < P_T < 2.5$ , 此选择与 NA49 实验截断一致. 从图中可以看出, 在 SPS 能区的 3 个能量下的实验值和 JPCIAE 结果都在 4 附近, 然而 UrQMD 的结果却在 3 附近.

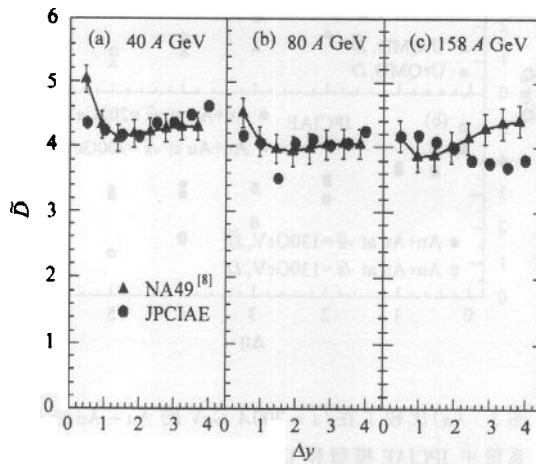


图 1 能量为 40, 80, 158 A GeV 的 Pb + Pb 碰撞中  $\tilde{D}$  随  $\Delta y$  的变化关系

图 2 比较了能量为 158 A GeV 的 Pb + Pb 碰撞系统中有无再散射和有无共振衰变(主要是  $\rho$  和  $\omega$ )时  $\tilde{D}$  随  $\Delta y$  的变化情况. 图中快度间隔以 3.0 为中心, 横动量间隔为  $0 < P_T < 5$ . 从图中可以看出, 再散射和共振态的衰变对荷电粒子比起伏的影响都很小.

图 3 给出了质心系能量  $\sqrt{s} = 130$  GeV 和 200 GeV 的 Au + Au 碰撞中荷电粒子比起伏(修正和未修正的)随快度间隔  $\Delta \eta$  变化关系的 JPCIAE 模型模拟的结果. JPCIAE 和 UrQMD 结果两者差别并不大. 从图 3(b)中可以看出, 不管是修正的还是未修正的荷电粒子比起伏的大小随能量的变化都不大. 修正后的起伏因子  $\tilde{D}$  随快度间隔的增大几乎保持不变, 而未修正的起伏因子  $D$  随快度间隔的增大而减小.

图 4 再次给出了  $\tilde{D}$  随大的能量变化情况的 JPCIAE 结果. 3 个实心方框从左到右分

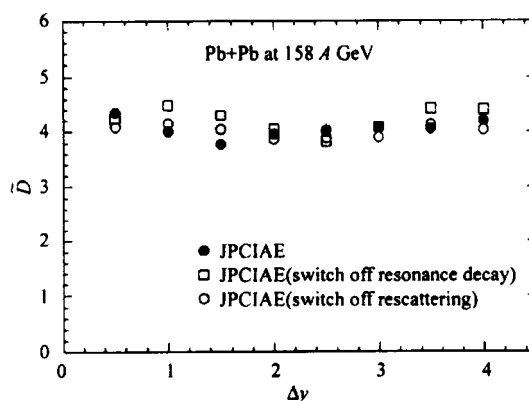


图 2 再散射和共振衰变对荷电粒子比的起伏的影响

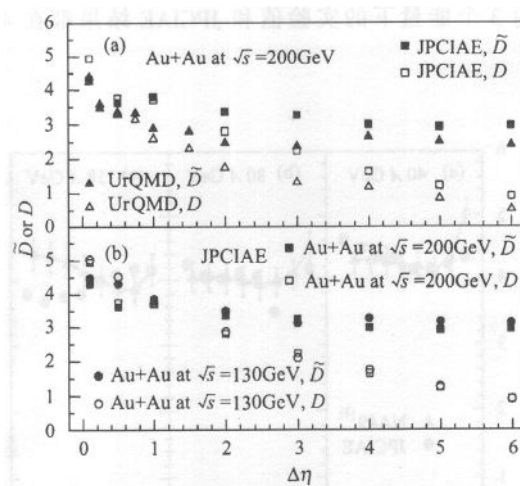


图 3 (a)比较了在 $\sqrt{s} = 200A$  GeV 的 Au + Au 碰撞系统中 JPCIAE 模型和 UrQMD 模型所预言的  $\tilde{D}$  和  $D$  随  $\Delta\eta$  的变化关系;(b) 比较了 $\sqrt{s} = 200A$  GeV 和  $\sqrt{s} = 130A$  GeV 的 Au + Au 碰撞中 JPCIAE 模型对  $\tilde{D}$  和  $D$  随  $\Delta\eta$  的变化关系的模拟结果

别对应于 RHIC 能区下  $\sqrt{s} = 56\text{GeV}, 130\text{GeV}, 200\text{GeV}$  的 Au + Au 碰撞 (3 个中心度都为 10%, 赝快度间隔都为  $-0.5 < y < 0.5$ )。从图中可以看出,在如此大的能量变化内,荷电粒子比的起伏  $\tilde{D}$  的变化仍然不大。

图 5 比较了能量为 158A GeV 的 Pb + Pb 碰撞 (图 5(a)) 和  $\sqrt{s} = 200\text{GeV}$  的 Au + Au 碰撞 (图 5(b)) 中  $\tilde{D}$  随中心度变化关系的 JPCIAE 模型结果 (实心圆圈) 和 UrQMD 模型 (实心方框) 结果。可以看出虽然 JPCIAE 模型的结果比 UrQMD 模型的结果稍大 (前者大约为 4, 后者约为 3), 但两种模型给出的  $\tilde{D}$  随碰撞参数的变化都很小。

总之,本文用强子-弦级联模型, JPCIAE, 讨论了能量、中心度、再散射和共振衰变对

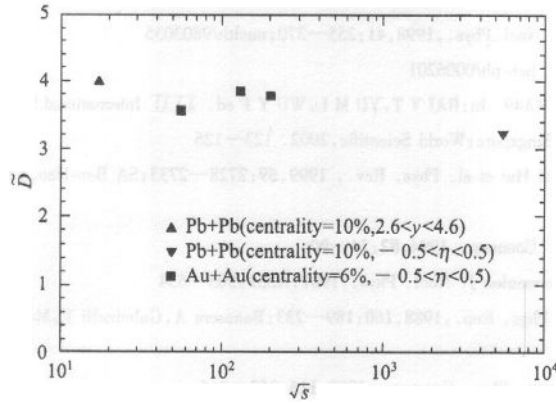


图 4 荷电粒子比的起伏的大小  $\hat{D}$  随能量的变化关系

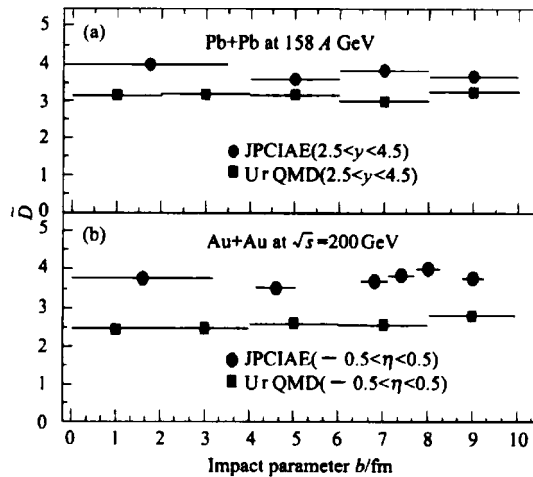


图 5  $\hat{D}$  随碰撞中心度变化关系的 JPCIAE 模型结果与 UrQMD 模型结果的比较

正负电荷粒子比单事例起伏的影响. 在不改变任何模型参数的情况下, JPCIAE 模型能够较好地符合 NA49 实验组给出的能量为 40, 80 和 158.4 GeV 下 Pb + Pb 碰撞的初步实验结果<sup>[8]</sup>; 同时也给出了 JPCIAE 模型对  $\sqrt{s_{NN}} = 56, 130$  和 200 GeV 的 Au + Au 碰撞及  $\sqrt{s_{NN}} = 5500$  GeV 的 Pb + Pb 碰撞模拟结果. 这些结果可作为上述那些碰撞中是否有 QGP 形成的参考. 我们的模拟研究看出: 能量、中心度、快度间隔及共振态衰变对修正后的荷电粒子比单事例起伏大小的影响都不大.

参考文献 (References)

- 1 Appelsäh H et al (NA49 Collab.). Phys. Lett., 1999, **B459**: 679—686
- 2 LIU F, TAI A, Gazdzicki M. Eur. Phys. J., 1999, **C6**: 649—654
- 3 Afanasiev S V et al (NA49 Collab.). Phys. Rev. Lett., 2001, **86**: 1965—1969
- 4 Jeon S, Koeh V. Phys. Rev. Lett., 1999, **83**: 5435—5438; 2000, **85**: 2076—2079

- 5 Asakawa M, Heinz U, Müller B. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **85**:2072—2075
- 6 Bass S A et al. *Prog. Part. Nucl. Phys.*, 1998, **41**:255—370; nuclth/9803035
- 7 Bleicher M, Jeon S, Koch V. *peh-ph/0006201*
- 8 Friese V. *New Results from NA49*. In: BAI Y T, YU M L, WU Y F ed. *XXXI International Symposium on Multiparticle Dynamics*. (2001 Datong, China) Singapore: World Scientific, 2002. 123—126
- 9 SA Ben-Hao, TAI An, WANG Hui et al. *Phys. Rev.*, 1999, **59**:2728—2733; SA Ben-Hao, TAI An, *Phys. Rev.*, 2000, **C62**:044905—044909
- 10 Sjöstrand T. *Comput. Phys. Commun.*, 1994, **82**:74—90
- 11 Cugnon J, Mizutain T, Vandermeulen J. *Nucl. Phys.*, 1981, **A352**:505—534
- 12 Bertsch G F, Das Gupta S. *Phys. Rep.*, 1988, **160**:189—233; Bonaera A, Gulminelli F, Molitoris J. *Phys. Rep.*, 1994, **243**:1—124
- 13 TAI An, SA Ben-Hao. *Comput. Phys. Commun.*, 1999, **116**:353—365

## Study of Event-by-Event Fluctuations in the Charged Particle Ratio in High Energy Heavy-Ion Collisions \*

ZHOU Dai-Mei<sup>1,1)</sup> CAI Xu<sup>1</sup> LIU Zhi-Yi<sup>2</sup> LU Zhong-Dao<sup>2</sup> SA Ben-Hao<sup>2</sup>

1 (Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

2 (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** Using a hadron and string cascade model, JPCIAE, and the corresponding Monte Carlo events generator, the behavior of the charged particle ratio event-by-event fluctuations in subsystem depending on energy, centrality, resonance decay and rapidity interval was investigated for Pb + Pb collisions at SPS and ALICE energies, and for Au + Au collisions at RHIC energies. The model results of charged particle ratio event-by-event fluctuations as a function of the rapidity interval in Pb + Pb collisions at SPS energies were comparable with the preliminary NA49 data. It turned out that the charged particle ratio fluctuation has no strong energy, centrality, resonance decay and rapidity interval dependences.

**Key words** relativistic nucleus-nucleus collisions, charged particle ratio, event-by-event fluctuations, hadron and string cascade model JPCIAE

---

Received 8 January 2002

\* Supported by NSFC (10075035, 19975075)

1) E-mail: zdm@iopp.ccnu.edu.cn