

AGS和RHIC能区核-核碰撞中的领头 粒子效应与双柱模型*

刘福虎¹⁾

(山西大学物理电子工程学院 太原 030006)

摘要 在总结双柱模型计算结果的基础上,用该模型对交变梯度同步加速器(AGS)和相对论性重离子对撞机(RHIC)能区核-核碰撞中的领头粒子效应进行了统一分析.结果表明:在AGS和RHIC能区,不同中心性核-核碰撞中带电粒子(赝)快度分布的不同,主要由领头粒子的贡献影响;如果扣除领头粒子的贡献,不同中心性核-核碰撞中带电粒子的(赝)快度分布有相同的形状.

关键词 AGS和RHIC能区 核-核碰撞 领头粒子效应 双柱模型

1 引言

在核-核碰撞中,有些末态粒子的动量与碰撞前相比变化很小,这些粒子称为领头粒子.从核-核边缘碰撞到中心碰撞,领头粒子效应对末态粒子(赝)快度分布的影响很大,以致有人认为边缘碰撞和中心碰撞的反应机制可能不同.

如果在中心碰撞中形成了理论上预言的夸克-胶子等离子体(夸克物质),认为边缘碰撞和中心碰撞的反应机制不同是可以理解的,这时对两类碰撞过程自然需要不同的理论解释.事实上,在目前的加速器能区,还没有令人信服的证据表明夸克物质已经形成,边缘碰撞和中心碰撞对应的不同(赝)快度分布应有相同的理论予以解释.

在描述高能碰撞过程的热(火球)模型^[1, 2]的基础上,笔者曾提出了热化柱模型^[3],并和合作者对该模型进行了发展^[4-6].随着RHIC的成功运行,笔者又和合作者将单柱模型发展为双柱模型^[7-10],成功解释了一系列实验数据.

本文将对双柱模型的计算结果进行总结分析,并应用该模型对目前加速器能区核-核碰撞中末态粒子的(赝)快度分布进行统一描述.不管是对固定靶实验还是对对撞机实验,不管是对边缘碰撞还是对中心

碰撞,双柱模型都能给出与实验数据符合的末态粒子的(赝)快度分布.

2 双柱模型

描述高能核-核碰撞中末态粒子(赝)快度分布的双柱模型^[7-10],是在热化柱模型^[3-6]的基础上发展起来的.事实上,热化柱模型可以看成是双柱模型的一个特例.尽管双柱模型可以在文献[7-10]中找到,但为了使该模型的表述紧凑条理,更臻完善,同时为了保持本篇带有总结性质的文章的完整性,下面对双柱模型进行简要介绍.

在核-核碰撞中,射弹核和靶核相互瞄准的部分称为反应体,其余不参加强烈碰撞的部分称为旁观体.由于碰撞能量高,在反应体中,来自射弹核的部分和来自靶核的部分会相互穿过,从而形成热化柱.更仔细考虑,热化柱又分为射弹柱和靶柱两部分,分别对应射弹核和靶核反应体的贡献.考虑到领头粒子,末态粒子的来源有4个:射弹柱,靶柱,射弹领头粒子,靶领头粒子.

在快度空间,设射弹柱位于 $[y_{P\min}, y_{P\max}]$,其中心位于 y_{PC} ;靶柱位于 $[y_{T\min}, y_{T\max}]$,其中心位于 y_{TC} ;碰撞系统的质心位于 y_C .在射弹柱和靶柱中,具有相同

2005-10-20 收稿

*国家自然科学基金(10275042, 10475054)资助

1) E-mail: fuhuliu@163.com; liufh@mail.sxu.cn

快度 y_x 的点构成一个发射面(发射源). 在发射源静止系, 设粒子各向同性发射, 且直角坐标系中的动量分量 p_x^* , p_y^* , p_z^* 为高斯型, 宽度均为 $\sigma = \sqrt{mT}$, 这里 m 和 T 分别为粒子的质量和发射源的温度.

核-核碰撞的基元过程是核子-核子碰撞. 从对称性考虑, 射弹柱和靶柱相对 y_C 的偏移量是相同的. 定义

$$y_{PC} - y_C = y_C - y_{TC} \equiv \Delta y, \quad (1)$$

$$y_{P \max} - y_{P \min} = y_{T \max} - y_{T \min} \equiv 2\delta y, \quad (2)$$

领头粒子相对 y_C 的偏移量设为 Dy . y_x 的取值范围, 对射弹柱为 $[\Delta y - \delta y, \Delta y + \delta y]$, 对靶柱为 $[-\Delta y - \delta y, -\Delta y + \delta y]$, 对射弹领头粒子为 Dy , 对靶领头粒子为 $-Dy$. 在对称的核-核碰撞中, 若设射弹领头粒子和靶领头粒子的贡献均为 k , 则射弹柱和靶柱的贡献均为 $(1-2k)/2$.

在发射源静止系, 粒子的赝快度表示为

$$\eta^* = -\ln \tan\left(\frac{\theta^*}{2}\right) = -\ln \tan\left(\frac{1}{2} \arctan \frac{p_T^*}{p_z^*}\right), \quad (3)$$

式中 θ^* 是粒子的发射角, $p_T^* = \sqrt{p_x^{*2} + p_y^{*2}}$ 是粒子的横动量. 快度表示为^[11]

$$y^* = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sqrt{p_T^{*2} \cosh^2 \eta^* + m^2} + p_T^* \sinh \eta^*}{\sqrt{p_T^{*2} \cosh^2 \eta^* + m^2} - p_T^* \sinh \eta^*} \right). \quad (4)$$

在质心系或实验室系, 粒子的快度为

$$y = y^* + y_x. \quad (5)$$

赝快度为^[11]

$$\eta = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{\sqrt{m_T^2 \cosh^2 y - m^2} + m_T \sinh y}{\sqrt{m_T^2 \cosh^2 y - m^2} - m_T \sinh y} \right), \quad (6)$$

式中 $m_T = \sqrt{p_T^{*2} + m^2}$ 是粒子的横质量.

用解析方法计算的过程比较复杂, 这里给出用 Monte Carlo 方法计算的步骤: a) 根据 k 的大小, 决定粒子是射弹领头粒子还是靶领头粒子; 如果不是领头粒子, 则决定粒子是产生于射弹柱还是产生于靶柱. b) 根据粒子的动量分量在发射源静止系服从高斯分布的假定, 由公式(3)决定 η^* . c) 根据公式(4)–(6)决定快度或赝快度值.

3 与实验结果的比较

在与实验结果比较时, 把 k , T , Δy , δy , Dy 均看成参数, 通过 χ^2 检验, 由实验数据决定它们的值. 图1给出了8AGeV (AGS能区)的 Au-Au碰撞中不同中心性事例对应的末态质子的快度 ($y - y_{cm}$) 的分布 (dN/dy),

这里 y 是实验室系的快度, y_{cm} 是碰撞系统的质心在实验室系的快度. 图中实心圆圈是E917合作组的实验结果, 空心圆圈是从对称性考虑得到的^[12], 方块, 三角和曲线是双柱模型的计算结果^[10]. 在计算中, 取 $T = 160 \text{ MeV}$, $\Delta y = \delta y = 0.575$ (或 $\Delta y = 0, \delta y = 1.150$), $Dy = 1.150$, 从中心性为0—5%到39%—81%, k 依次取0.050, 0.090, 0.120, 0.170和0.240. 可以看出, 计算结果与实验结果符合. 因为在模型中取了 $\Delta y = \delta y$ (或 $\Delta y = 0$), 即射弹柱和靶柱在沿入射方向上连为一体(或射弹柱和靶柱在沿垂直于入射方向上观测无错位), 说明在较低的AGS能区, 双柱模型退化为单柱模型. 为了描述实验数据的统计涨落, 对中心性为0—5%和5%—12%两组数据, 分别取模拟粒子数为 10^5 进行计算比较, 得到的结果见图1中的方块和三角. 可见, 双柱模型也能近似描述统计涨落.

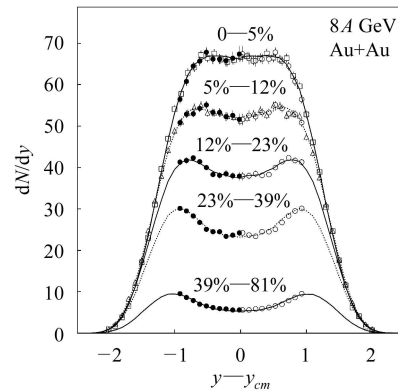


图1 8AGeV Au-Au碰撞中不同中心性事例对应的末态质子的快度分布

●为E917合作组的实验结果, ○为从对称性考虑得到的^[12], □, △和—为双柱模型的计算结果^[10].

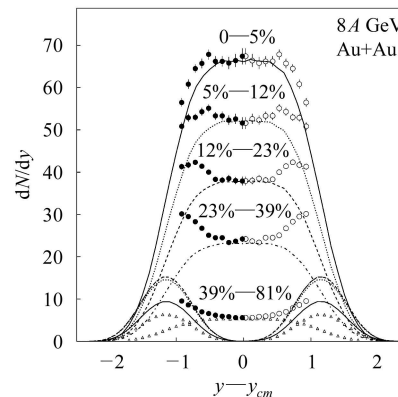


图2 图题, 图示同图1(双柱的贡献和领头粒子的贡献分别给出)

为了更清楚地体现领头粒子的贡献, 图2给出了与图1对应的双柱和领头粒子各自的贡献. 图中实验点的意义同图1. 对应不同中心性的事例, 用不同类型

的曲线表明了双柱的贡献(中心区)和相应领头粒子的贡献(碎裂区). 如果扣除领头粒子的贡献, 不同中心性事例对应的归一化快度分布有相同的形状.

图3是质心系能量为200AGeV (RHIC能区)的Au-Au对撞中, 不同中心性事例相应的末态带电粒子的赝快度分布. 图中圆圈和方块是BRAHMS合作组用不同探测器测得的实验结果^[13], 曲线是双柱模型的计算结果^[9]. 在计算中, 取 $T = 220\text{MeV}$, $\Delta y = 1.620$, $\delta y = 1.560$, $Dy = 4.000$, 从中心性为0—5%到40%—50%, k 依次取0.070, 0.075, 0.080, 0.082, 0.084和0.086. 可以看出, 计算结果与实验结果符合. 因为在模型中取了 $\Delta y > \delta y$, 即射弹柱和靶柱之间有间隔, 说明在较高的RHIC能区, 可能需要双柱模型.

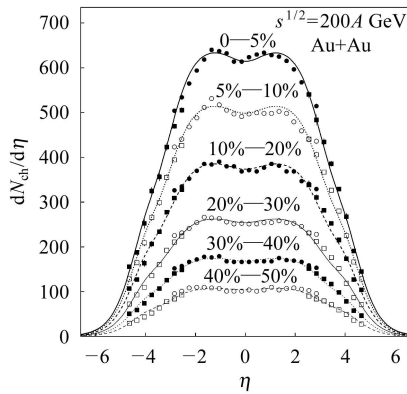


图3 质心系能量为200AGeV Au-Au碰撞中不同中心性事例对应的末态带电粒子的赝快度分布 ●, ○, ■, □为BRAHMS合作组的实验结果^[13], 曲线为双柱模型的计算结果^[9].

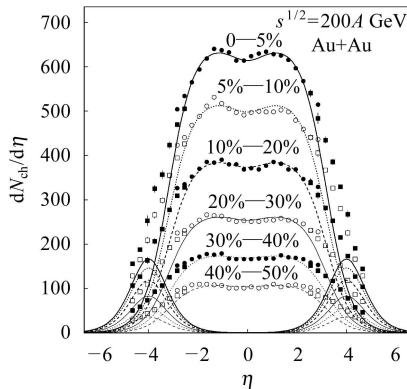


图4 图题, 图示同图3(双柱的贡献和领头粒子的贡献分别给出^[9])

为了更清楚地体现领头粒子的贡献, 图4给出了与图3对应的双柱和领头粒子各自的贡献. 图中实验

点的意义同图3. 对应不同中心性的事例, 用不同类型的曲线表明了双柱的贡献(中心区)和相应领头粒子的贡献(碎裂区)^[9]. 如果扣除领头粒子的贡献, 不同中心性事例对应的归一化赝快度分布有相同的形状.

4 结论与讨论

双柱模型对目前能区的核-核碰撞过程是适用的. 不同中心性事例对应的不同(赝)快度分布, 是由领头粒子的贡献引起的. 领头粒子实际上就是参加者核子中动量改变较小者, 而产生粒子主要是 π 介子和少量K介子及其他粒子. 参加者核子中动量改变较小者归于领头粒子区, 而动量改变较大者则和产生粒子一起归于非领头粒子区. 模型中的 k 值描述了领头粒子的贡献, 因为入射核子中的一部分成了领头粒子, 所以 k 值反映的核子数应小于入射核子的数目.

在AGS和RHIC能区, 我们注意到 Δy 和 δy 的取值与碰撞的中心性无关. 如果用 $2(\Delta y + \delta y)$ 描述双柱的总长度, 则可以说, 柱长与碰撞的中心性无关. Δy 与 δy 之间的关系可以是: $\Delta y = \delta y$ (或 $\Delta y = 0$ 但 $\delta y \neq 0$), $\Delta y < \delta y$ (或 $\Delta y \neq 0$ 但 $\Delta y < \delta y$), $\Delta y > \delta y$. 第一种情况意味着射弹柱和靶柱在沿入射方向上连为一体(实际上相当于单柱)(或二柱在沿垂直于入射方向上观测无错位), 第二种情况意味着二柱之间有重叠, 第三种情况意味着二柱之间有间隔.

计算结果表明, 在AGS能区(入射能量为8AGeV时), $\Delta y = \delta y = 0.575$ (或 $\Delta y = 0$, $\delta y = 1.150$), 这意味着射弹柱和靶柱在沿入射方向上连为一体(或二柱在沿垂直于入射方向上观测无错位), 这时双柱模型退化为单柱模型. 在RHIC能区(质心能量为200AGeV时), 计算表明, $\Delta y = 1.620 > \delta y = 1.560$, 这意味着射弹柱和靶柱之间有间隔, 似乎需要双柱模型. 但也有另外的解释, 因为RHIC能区赝快度分布在 $\eta = 0$ 附近的微弱下降, 也可能是由于从快度到赝快度的变换引起的, 这也不排除在该能区存在中心柱的可能性.

高能核-核碰撞过程是非常复杂的, 特别是随着碰撞能量的提高, 末态出现大量粒子^[14, 15], 这时用严格的理论进行计算分析会变得非常困难, 而用模型进行唯象分析不失为一种有效的手段^[16-18]. 本工作计及了领头粒子效应, 用双柱模型对AGS和RHIC能区核-核碰撞中带电粒子的(赝)快度分布进行了统一描述, 虽然显得粗糙, 但却是一种有益的尝试.

参考文献(References)

- 1 Westfall G D, Gosset J, Johansen O J et al. Phys. Rev. Lett., 1976, **37**: 1202—1205
- 2 D'innocenzo A, Ingrosso G, Rotelli P. Nuovo Cimento, 1980, **A55**: 417—436
- 3 LIU Fu-Hu. Acta Phys. Sin. (Overseas edition), 1998, **7**: 321—326
- 4 LIU Fu-Hu, Panebratsev Y A. Nucl. Phys., 1998, **A641**: 379—385
- 5 LIU Fu-Hu, Panebratsev Y A. Phys. Rev., 1999, **C59**: 1193—1195
- 6 LIU Fu-Hu, Panebratsev Y A. Phys. Rev., 1999, **C59**: 1798—1801
- 7 LIU Fu-Hu. Phys. Rev., 2002, **C66**: 047902-1—047902-3
- 8 LIU Fu-Hu. Phys. Lett., 2004, **B583**: 68—72
- 9 LIU Fu-Hu, ZHANG Dong-Hai, DUAN Mai-Ying. Euro. Phys. Lett., 2003, **61**: 736—741
- 10 LIU Fu-Hu. Acta Phys. Pol., 2004, **35**: 2429—2437
- 11 Wong C Y. Introduction to High-Energy Heavy-Ion Collisions. Singapore: World Scientific, 1994. 24—25
- 12 Back B B, Betts R R, CHANG J et al (E917 Collaboration). Phys. Rev., 2002, **C66**: 054901-1—054901-10
- 13 Bearden I G, Beavis D, Besliu C et al (BRAHMS Collaboration). Phys. Rev. Lett., 2002, **88**: 202301-1—202301-4
- 14 MENG Cai-Rong, LI Xiao-Lin, DUAN Mai-Ying. HEP & NP, 2004, **28**: 1165—1169 (in Chinese)
(孟彩荣, 李晓琳, 段麦英. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 1165—1169)
- 15 JIANG Zhi-Jin, LI Qiang. HEP & NP, 2004, **28**: 846—849 (in Chinese)
(姜志进, 李强. 高能物理与核物理, 2004, **28**: 846—849)
- 16 YUAN Xian-Bao, FENG Sheng-Qin. HEP & NP, 2005, **29**: 371—375 (in Chinese)
(袁显宝, 冯笙琴. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 371—375)
- 17 YONG Gao-Chan, LI Bao-An, ZUO Wei. HEP & NP, 2005, **29**: 366—370 (in Chinese)
(雍高产, 李保安, 左维. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 366—370)
- 18 FENG Ao-Qi, WU Yuan-Fang. HEP & NP, 2005, **29**: 766—769 (in Chinese)
(冯傲奇, 吴元芳. 高能物理与核物理, 2005, **29**: 766—769)

Leading Particle Effect and the Two-Cylinder Model in Nucleus-Nucleus Collisions at AGS and RHIC Energies^{*}

LIU Fu-Hu¹⁾

(Department of Physics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract Based on our previous work, leading particle effects in nucleus-nucleus collisions at the Alternating Gradient Synchrotron (AGS) and Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) energies are uniformly analyzed by using the two-cylinder model. The results show that the differences in the (pseudo)rapidity distributions of the charged particles in nucleus-nucleus collisions with different centralities are mainly affected by the contributions of leading particles. If the contribution of leading particles is neglected, the charged particle (pseudo)rapidity distributions in nucleus-nucleus collisions with different centralities would have the same shape.

Key words AGS and RHIC energies, nucleus-nucleus collisions, leading particle effect, two-cylinder model

Received 20 October 2005

^{*}Supported by NSFC (10275042, 10475054)

¹⁾E-mail: fuhuliu@163.com; liufh@mail.sxu.cn