

相对论性重离子碰撞中负粒子的 横动量和赙快度分布

刘福虎

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

孙汉城

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

1993年10月29日收到

摘 要

基于三火球模型和强子共振态衰变图象,得到了相对论性重离子碰撞中负粒子的横动量和赙快度分布,并与200和60GeV/N ^{16}O 与Au相互作用的有关实验结果作了比较。

关键词 重离子碰撞,负粒子,横动量,赙快度。

1 引 言

相对论性重离子碰撞(RHIC)可以在极短时间内,在原子核尺度范围内实现极高温度和极高密度。研究在这种特殊条件下的物理规律,不仅可以了解极端条件下的核物质特性,探索夸克胶子等离子体(QGP)相变,而且可为早期宇宙演化过程进行实验模拟开辟新途径。当前,RHIC物理的研究已经成为核物理学的重要前沿。

在RHIC研究中,实验发现末态负粒子的横动量谱具有两温度结构^[1-4]。许多模型,如化学平衡模型和统计弦碎裂模型等^[5],都只能给出 $p_T > 0.2\text{GeV}/c$ 范围的横动量谱,对低 p_T 部分则不能解释。如何解释RHIC中负粒子的横动量谱,已引起一些研究者的注意。

最近,基于自由 π 介子发射和重子共振态束缚 π 介子发射的两温度结构的动能谱与1GeV/N能量下的实验结果符合^[6]。受这种观点的启发,本文在三火球模型^[7,8]的框架下,得到了RHIC中负粒子的横动量谱,同时还得到了赙快度分布。

2 模 型

根据强子-强子碰撞的三火球模型^[7,8],强子是由价夸克、海夸克和胶子形成的广延

系;在高能碰撞中,两个强子相互穿透,在碎裂区形成两个产生粒子的源,分别称为射弹火球(射弹发射源)和靶火球(靶发射源);同时,由于胶子和海夸克的相互作用,在中心区也形成一个产生粒子的源,称为中心火球(中心发射源)。

因为核子-核碰撞及核-核碰撞的基元过程是核子-核子碰撞,可以对核子-核碰撞及核-核碰撞过程提出以下三源发射图象:

对核子-核碰撞,射弹发射源是入射核子携带的由多次激发形成的大火球,中心发射源是入射核子穿透一串靶核子时形成的由多个中心火球连成的火球串,靶发射源是一串靶核子携带的由多个一次激发形成的小火球连成的火球串.对核-核碰撞,射弹发射源、中心发射源和靶发射源都包含多个大火球串。

在初级近似下,认为每个发射源所包含的多个火球在短时间内会由于传递能量达到热平衡,这样每个发射源都是一个热力学平衡态.在发射源静止系,可以假设所有粒子都各向同性发射,但在碰撞质心系,粒子的发射不是各向同性的。

对核-核碰撞中的射弹发射源和靶发射源,由于射弹和靶的相对性,它们具有相同的激发程度,相应相同的发射源温度.但随着时间的推移,在射弹发射源和靶发射源中,产生粒子会与领头粒子相互作用,产生一些强子共振态,由这些强子共振态衰变出的产生粒子相应较低的发射源温度.在这两个发射源中,没有与领头粒子作用的产生粒子相应较高的发射源温度.这样在射弹发射源和靶发射源中,从激发程度看,产生粒子来自两个源中激发程度不同的两类局部区域.对中心发射源,由于不存在产生粒子与领头粒子之间的相互作用,中心发射源具有的温度最高。

从纵向运动学考虑,上述三个发射源相对于实验室系速度的从小到大依次为靶发射源、中心发射源和射弹发射源,由它们产生的粒子的最可几快度值是依次增大的.从靶发射源或射弹发射源中激发程度不同的两类局部区域发射的粒子的归一化横快度分布只与靶发射源或射弹发射源的运动速度有关,与两类局部区域的激发程度无关。

3 公式描述及与实验结果的比较

在各自静止系每个源都各向同性地发射粒子的假设条件下,取末态粒子的动量分量 p_x, p_y 和 p_z 均服从高斯分布,且分布宽度相等.对靶发射源和射弹发射源中激发程度较低的局部区域(有强子共振态产生),其产生粒子的动量分量分布宽度记为 σ_1 ,对两源中激发程度较高的局部区域(没有强子共振态产生),其产生粒子的动量分量分布宽度记为 σ_2 ,中心发射源产生粒子的相应值记为 σ_3 .取归一化形式,有:

$$f_{i,p_{x,y,z}}(p_{x,y,z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left(-\frac{p_{x,y,z}^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

式中 $i = 1, 2, 3$. 易知横动量 p_T 服从瑞利分布:

$$f_{i,p_T}(p_T) = \frac{p_T}{\sigma_i^2} \exp\left(-\frac{p_T^2}{2\sigma_i^2}\right). \quad (2)$$

实验观测到的横动量分布,是不同分布宽度的3个瑞利分布之和

$$f_{p_T}(p_T) = \sum_{i=1}^3 A_i f_{i,p_T}(p_T), \quad (3)$$

式中 A_i 是第 i 个分布的贡献占 3 个分布贡献之和的比率, 具体数值可由探测器的接收范围确定, 即由实验测定的赝快度分布通过曲线拟合确定。

在发射源静止系, 发射角为 θ^* 的粒子的赝快度 η^* 为:

$$\eta^* = -\ln \operatorname{tg} \theta^*/2, \quad (4)$$

在实验室系, 该粒子的赝快度 η 为:

$$\eta = -\ln \operatorname{tg} \theta/2, \quad (5)$$

式中 θ 是实验室系中粒子的发射角, η 和 η^* 的关系为:

$$\eta \approx \eta^* + \eta_j = \eta^* - \ln[\gamma_j(1 - \beta_j)], \quad (6)$$

式中 γ_j 和 β_j 分别是第 j 个发射源相对于实验室系的洛仑兹因子和速度, $j = 1, 2$ 和 3 分别表示靶发射源、中心发射源和射弹发射源。由(1)式得, 在发射源静止系粒子的角分布为:

$$f_0(\theta^*) = \frac{1}{2} \sin \theta^*. \quad (7)$$

由(4)、(6)两式得:

$$\theta^* = 2 \operatorname{arctg} e^{-(\eta - \eta_j)}. \quad (8)$$

由(7)、(8)两式得到实验室系测得的第 j 个源发射出的粒子的赝快度分布为:

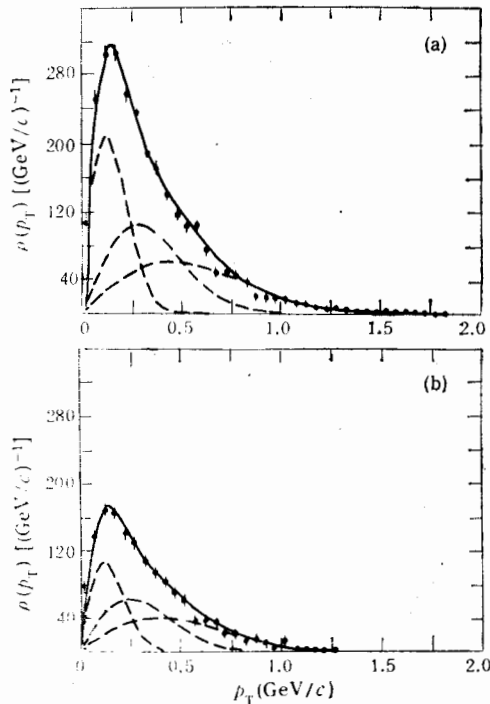


图 1 200 GeV/N $^{16}\text{O-Au}$ (a)和 60 GeV/N $^{16}\text{O-Au}$ (b) 中心碰撞的簇射负粒子横动量分布
实验数据取自文献[9], 曲线是本文结果。

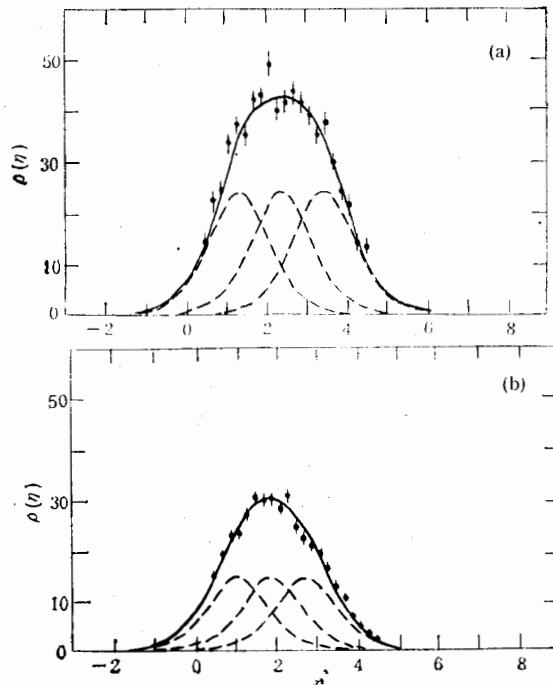


图 2 200 GeV/N $^{16}\text{O-Au}$ (a)和 60 GeV/N $^{16}\text{O-Au}$ (b) 中心碰撞的簇射负粒子赝快度分布
实验数据取自文献[9], 曲线是本文结果。

$$f_{i,\eta}(\eta) = \frac{1}{2\text{ch}^2(\eta - \eta_i)} \quad (9)$$

设第 j 个源发射的粒子数占总粒子数的比为 B_j , 则总的赙快度分布可表示为:

$$f_\eta(\eta) = \sum_{j=1}^3 B_j f_{j,\eta}(\eta). \quad (10)$$

图1是 200GeV/N ^{16}O -Au 和 60GeV/N ^{16}O -Au 中心碰撞的簇射负粒子横动量分布. 实验数据取自文献[9], 曲线是根据(3)式拟合得到的. 归一化条件 $\int \rho(p_T) dp_T = \int \langle n_- \rangle f_{p_T}(p_T) dp_T = \langle n_- \rangle$, 式中 $\rho(p_T)$ 是横动量密度, $\langle n_- \rangle$ 是负粒子平均多重数.(3)式中的 A_i 和 σ_i 是一组较难从理论上确定的参量, 作为一种粗略估计, 取 $A_1 = A_2 = A_3 = 1/3$, 对图 1(a), 取 $\sigma_1 = 0.125\text{GeV}/c$, $\sigma_2 = 0.27\text{GeV}/c$, $\sigma_3 = 0.44\text{GeV}/c$, 对图 1(b), 取 $\sigma_1 = 0.12\text{GeV}/c$, $\sigma_2 = 0.25\text{GeV}/c$, $\sigma_3 = 0.40\text{GeV}/c$, 拟合得到的结果见图中的曲线, 图中同时给出了三个瑞利分布各自的贡献和它们的和. 可以看到, 基于强子共振态衰变和三火球模型的横动量分布与高能核-核碰撞的实验结果符合.

图2是 200GeV/N ^{16}O -Au 和 60GeV/N ^{16}O -Au 中心碰撞的簇射负粒子赙快度分布. 实验数据 ($0.45 < \eta < 4.55$) 取自文献[9], 曲线是根据(10)式拟合得到的. 归一化条件 $\int \rho(\eta) d\eta = \int \langle n_- \rangle f_\eta(\eta) d\eta = \langle n_- \rangle$, 式中 $\rho(\eta)$ 是赙快度密度. 对强子-强子碰撞, (10)式中的 B_j 在质心系能量 \sqrt{s} 为十几 GeV 时约等于 $1/3$, 对本文所讨论的能区, 也取 $B_1 = B_2 = B_3 = 1/3$. (10)式中的 η_i 可由能、动量守恒确定^[10], 本文为简单起见, 用(10)式拟合实验数据, 通过 χ^2 检验确定 η_i 值. 对图 2(a) 取 $\eta_1 = 1.37$, $\eta_2 = 2.42$, $\eta_3 = 3.47$, 对图 2(b) 取 $\eta_1 = 1.10$, $\eta_2 = 1.95$, $\eta_3 = 2.80$, 拟合得到的结果见图中的曲线, 图中同时给出了三个发射源各自的贡献和它们的和. 可以看到, 基于三火球模型的赙快度分布与高能核-核碰撞的实验结果符合.

4 讨 论

上述横动量分布中的宽度 σ_i 与相应产生粒子发射源的温度 T_i 有关, 根据文献[11]可知, 发射源温度 $T_i = \sigma_i^2/m$, 这里 m 是产生粒子的质量. 由于发射源的激发程度很高, 相对论效应不容忽视, 在讨论发射源温度时, 将 m 看作运动质量. 又由于每个产生粒子相对于发射源静止系的洛仑兹因子 γ 不同, 取平均值 $\bar{\gamma}$. $\bar{\gamma} \approx \bar{E}/m_0 \approx \bar{p}/m_0$, 式中 \bar{E} 、 \bar{p} 和 m_0 分别是产生粒子的平均能量、平均动量和静止质量. 由(1)式可得出在发射源静止系中产生粒子的动量 p 为麦克斯威尔分布^[12], 进一步可求出 $\bar{p} = 2\sqrt{2/\pi}\sigma_i$, $T_i \approx \sqrt{\pi/2} \cdot \sigma_i/2$.

对图 1(a), 可求出三个瑞利分布相应的温度分别是 78、169 和 276MeV, 对图 1(b), 这三个温度值分别是 75、157 和 251MeV. 可以看到, 在射弹发射源和靶发射源中, 不管是产生强子共振态的局部区域, 还是没产生强子共振态的局部区域, 发射源的温度都低于理论预言形成夸克物质所需要的临界温度 (200MeV), 而对中心发射源, 其温度已达到

这个值。文献[13]也指出,中心火球的温度已达到 200MeV 以上,这与本文的结论在量级上是一致的。

作者感谢赵维勤、蔡勤和萨本豪等教授的建议和讨论。

参 考 文 献

- [1] T. W. Atwater, P. S. Freier and J. I. Kapusta, *Phys. Lett.*, **B199** (1987) 30.
- [2] J. Schukraft (Helios Collaboration), *Nucl. Phys.*, **A498** (1989) 79.
- [3] J. W. Harris (NA35 Collaboration), *Nucl. Phys.*, **A498** (1989) 133.
- [4] L. Chkhaidze et al., *Z. Phys.*, **C54** (1992) 179.
- [5] H. W. Barz et al., *Phys. Lett.*, **B254** (1991) 332.
- [6] Baoan Li and Wolfgang Bauer, *Phys. Lett.*, **B254** (1991) 335.
- [7] Liu Lianshou and Meng Tachung, *Phys. Rev.*, **D27** (1983) 2640.
- [8] Chou Kuangchao, Liu Lianshou and Meng Tachung, *Phys. Rev.*, **D28** (1983) 1080.
- [9] H. Strobele et al. (NA35 Collaboration), *Z. Phys.*, **C38** (1988) 89.
- [10] W. Q. Chao, C. S. Gao and Y. L. Zhu, *Nucl. Phys.*, **A514** (1990) 734.
- [11] K. B. Bhalla et al., *Nucl. Phys.*, **A367** (1981) 446.
- [12] 刘福虎、许国发, *高能物理与核物理*, **17**(1993)494.
- [13] J. Rafelski, H. Rafelski and M. Danos, *Phys. Lett.*, **B294** (1992) 131.

Transverse Momentum and Pseudorapidity Distributions of Negative Particles in Relativistic Heavy Ion Collisions

Liu Fuhu

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

Sun Hancheng

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

Received on October 29, 1993

Abstract

Based on the three-fireball model and the picture of hadronic resonance decays, the transverse momentum and pseudorapidity distributions of negative particles in relativistic heavy ion collisions are obtained and compared with the experimental results of 200 and 60 GeV/N ^{16}O -Au interactions.

Key words heavy ion collisions, negative particle, transverse momentum, pseudorapidity.