

高能重离子碰撞中末态粒子 分布的非对称性*

霍雷 刘亦铭 张卫宁

(哈尔滨工业大学物理系 哈尔滨 150001)

D. Keane H. Liu

(Department of Physics, Kent State University, Kent, Ohio 44242)

1995-10-30 收稿

摘 要

对 Bevalac 1.2A GeV Au+Au 碰撞实验, 根据以流方向为 z 轴的质心坐标系中末态粒子方位角分布的非对称性为极小的条件, 确定了事件中五种质量范围 ($A=1, 2, 3, 4, 5-8$) 末态粒子的集合侧向流流角. 在以流方向为 z 轴的质心坐标系中研究了不同质量末态粒子极角分布, 结果表明质量越大的粒子在流方向分布得越集中, 侧向流的“流”值越大.

关键词 质量数, 侧向流, 流角, “流”(flow).

1 引 言

高能重离子碰撞中, 末态粒子形成的集合侧向流反映了核媒质在高温、高密度状态下的特性, 为核媒质态方程的研究提供了重要的信息^[1]. 近十年来, 根据末态粒子的动量分布, 人们建立了许多有效的集合流分析方法, 如椭球张量法^[1, 2]、横向动量分析法^[3]、方位角分布函数方法^[4, 5]以及方位角关联函数方法^[6, 7]等. 椭球张量分析虽然可以给出侧向流的流角, 但其分析结果受统计涨落以及探测器接收性能的影响较大^[3, 8, 9]. 对末态粒子横向动量及方位角分布的分析主要研究了粒子的非对称横向运动特征, 不能充分反映集合侧向流提供的全部信息. 寻找能够反映末态粒子纵向分布信息的参量, 从极角分布来研究集合流的特性, 推测有关核媒质态方程的信息是一个很有意义的课题.

本文分析的实验数据取自 Bevalac 的 1.2A GeV Au+Au 碰撞实验, 所用的探测器为时间投影室 (TPC), 此实验于 1992 年末完成. 与其它探测器相比, TPC 具有较均匀的粒子接收性能、较高的粒子鉴别能力和较高的数据统计性. 分析时我们依据末态粒子的多重数选取了近对心碰撞事件^[10], 事件的重子多重数范围取为 $0.6M_{\max} < M < 0.9M_{\max}$,

*国家自然科学基金、美国国家科学基金、高等学校博士点专项基金资助.

其中 M_{\max} 为重子多重数 M 分布平台半高度的上限值. 关于实验的详细描述可参考文献 [10—12].

2 流角的确定

对于非零碰撞参数的核-核碰撞, 事件的反应平面是由碰撞前二原子核的连心线与人射束方向确定的. 集合侧向流表现为末态粒子倾向于沿反应平面内某一特定方向 (流方向) 出射, 流方向与人射束轴间的夹角即为流角. 实验事件的反应平面是未知的, 利用横向动量法可以对事件的反应平面进行估计^[3,8]. 对第 μ 个粒子定义矢量^[3]

$$\mathbf{Q}_\mu = \sum_{v \neq \mu} \omega(y'_v) \mathbf{p}_v^t, \quad (1)$$

式中 p_v^t 表示第 v 个被检测粒子的横向动量; $\omega(y'_v)$ 为与粒子快度有关的权重因子, 取为^[12] $\omega(y'_v) = \min(1, y'_v/0.8)$, 其中 y'_v 为质心坐标系中第 v 个末态粒子的快度与入射束快度的比值 $(y_v/y_{\text{beam}})_{\text{CM}}$. 求和时 $v \neq \mu$ 消除了自相关的影响. \mathbf{Q}_μ 与人射束方向确定的平面称为估计反应平面, 将其定义为 xoz 平面.

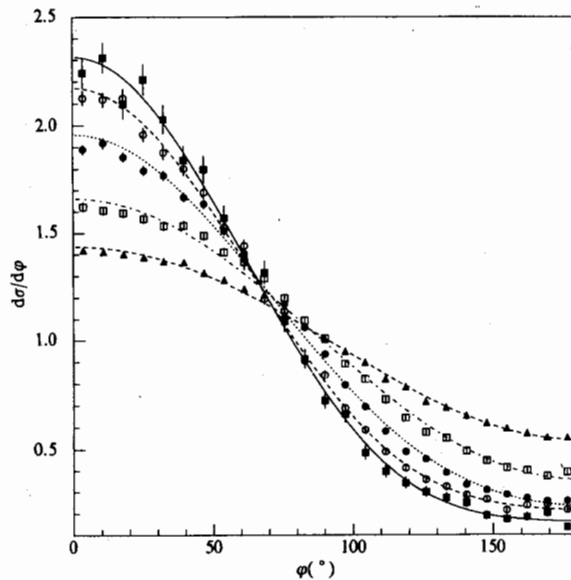


图1 在以入射束方向为 z 轴的质心坐标系中, 不同质量末态粒子的方位角分布

图中的符号 ▲ □ ● ○ ■ 分别代表质量数为 1, 2, 3, 4 和 5—8 的末态粒子.

由于侧向流的存在, 末态粒子的方位角分布具有明显的非对称性^[4]. 图1给出了在实验室快度 $y > 0.75y_{\text{beam}}$ 的区域不同质量末态粒子在以入射束方向为 z 轴的质心坐标系 (以下称为束轴坐标系) 中的方位角分布, 可以看出, 质量数越大的粒子, 方位角非对称程度越高, 流的效果越明显. 图中的数据可以用函数^[12]

$$\frac{d\sigma}{d\varphi} = A(1 + \lambda \cos\varphi + \lambda' \cos(2\varphi)) \quad (2)$$

描述, 参数 λ 表征了末态粒子方位角分布的非对称程度. 对于五种质量数范围的粒子, λ 的拟合值分别为 0.45 ± 0.01 , 0.65 ± 0.01 , 0.86 ± 0.01 , 0.98 ± 0.01 和 1.08 ± 0.01 , 图中的曲线为拟合曲线.

显然, 对方位角分布非对称性的描述与 z 轴方向的选择有关, 如果以流方向为 z 轴建立坐标系, 观测到的方位角分布的非对称性应为最小. 因此, 可以在反应平面内取不同的方向为 z 轴建立新的质心坐标系, 比较不同坐标系中粒子方位角分布的非对称性, 满足非对称性为极小条件的坐标系的 z 方向即为流的方向^[13].

利用椭球张量法测量流角时, 要求对每一事件建立一个椭球张量^[1, 2], 由于探测器对不同快度末态粒子的探测性能不均匀, 因而测量结果受探测器性能的影响较大^[9]. 利用方位角分布非对称性 λ 为极小的条件测量流角, 只需要计算快度较大的末态粒子的方位角分布非对称性, 探测器探测性能的不均匀对流角的测量结果影响很小. 另外, 当事件的多重数较低或者单独对事件中质量较大的粒子测量流角时, 大的统计涨落将对椭球张量法的测量结果产生严重影响^[3, 8]; 但利用上面方法, 由于将不同事件按估计反应平面叠加在一起进行分析, 在很大程度上降低了统计涨落的影响. 对前面五组质量数的粒子, 在快度 $y > 0.75y_{beam}$ 的区域, 根据 λ 值为极小的条件测量出的流角 Θ_c 值分别为 $16.8 \pm 0.1^\circ$, $17.0 \pm 0.1^\circ$, $12.0 \pm 0.1^\circ$, $7.8 \pm 0.1^\circ$ 和 $6.0 \pm 0.1^\circ$. 核-核反应过程中, 早期的压缩形成了大的压缩势能梯度, 使得粒子在出射时受到强的横向力作用, 获得一定数量的横向动量, 其动量方向与入射束方向发生偏离^[14-17]. 质量较大的粒子具有较大的纵向动量, 运动方向的偏离程度较小, 因而流角的测量值也较小.

由于估计反应平面与真实反应平面间的夹角 φ , 是一离散变量^[3], 导致流角的测量值 Θ_c 较其真实值 Θ_F 偏低, 存在一个系统偏差. 假设 φ 的分布函数是高斯函数, 则流角的测量值与真实值间满足方程^[13]:

$$\tan\Theta_F = \tan\Theta_c \exp\left(\frac{\Delta\varphi^2}{2}\right),$$

计算出 $\Delta\varphi$ 值 (计算方法见文献 [3]) 后, 便可对流角的真实值 Θ_F 进行估计. 对 1.2A GeV Au+Au 碰撞实验, $\Delta\varphi$ 值约为 16° , 流角的测量值较真实值偏低约 4%.

3 末态粒子的极角分布

对实验事件, 由于不能获得真实反应平面因而无法给出真实的流方向, 但在估计反应平面内可以对不同质量的粒子分别给出测量的流方向. 以测量到的流方向为 z 轴建立质心坐标系, 称之为“流轴坐标系”. 图 2 给出了在流轴坐标系中末态粒子的极角分布. 由于实验室系中 TPC 的极角接收范围约为 $0^\circ - 70^\circ$, 因此在计算时我们仅计及了质心系中极角满足 $\cos\theta > 0.5$ 的末态粒子. 可以看出, 在 $\cos\theta$ 较小的区域, 末态粒子的极角分布变化缓慢, 接近于均匀; 在 $\cos\theta > 0.8$ 的区域, 极角分布出现明显的非对称

性. 这表明在 高能重离子碰撞中, 集合流的性质主要体现在 $\cos\theta > 0.8$ 的区域.

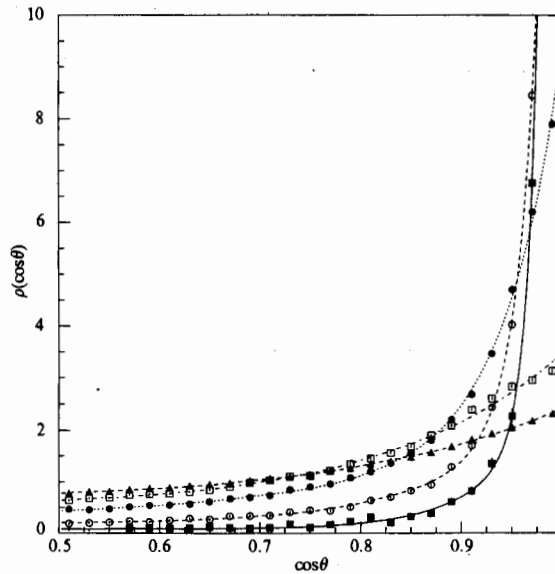


图2 流轴坐标系中, 不同质量末态粒子的极角分布

图中的曲线为拟合结果, 符号▲□●○■分别对应质量数为 1, 2, 3, 4 和 5—8 的末态粒子.

对于非零碰撞参数的核-核碰撞, 核媒质达到最大压缩阶段的压缩势能使末态粒子的发射具有倾向性, 形成集合流. 集合流中末态粒子的发射以流方向为中心, 假定其极角分布符合高斯分布, 即

$$\rho_1(\cos\theta) \propto \exp\left(-\frac{\theta^2}{\beta_1^2}\right),$$

式中参数 β_1 描述了粒子在流方向的分布宽度, 其值越小, 粒子在流的方向分布得越集中, 事件的动量空间形状在流的方向越长.

另一方面, 倾向性出射的粒子中, 有一部分在膨胀阶段经历多次散射, 这些粒子的发射虽然仍以流方向为中心, 但其极角分布变宽甚至成为各向同性分布. 因此, 为定量描述图 2 中的数据分布, 在流轴坐标系中, 对一定质量数范围的末态粒子, 可以将其归一化的极角分布写成

$$\rho(\cos\theta) = \kappa + \alpha_1 \exp\left(-\frac{\theta^2}{\beta_1^2}\right) + \alpha_2 \exp\left(-\frac{\theta^2}{\beta_2^2}\right), \quad (3)$$

常数 κ 给出了一定质量数范围的末态粒子中, 各向同性发射部分所占的比例. β_2 反映了在流方向出射的、在膨胀阶段经历多次散射的粒子的极角分布宽度. 因此, 方程 (3) 中的参数 β_2 应当大于 β_1 .

用方程 (3) 拟合图 2 中的数据, 得到的结果如表 1 所示. 表中的结果可以根据简

单的物理图象唯象地加以解释:核-核反应过程中,核子间频繁发生碰撞,参与碰撞次数越多的核子,其动能转化为热能的份额就越多,在相空间的分布范围越大,与其它核子结合成复合碎片(质量数大于1)的可能性越小,因此质量较大的粒子,受无规热运动的影响较小^[4],集合侧向流形成时,在流方向的分布更加集中,相应的 β_1 值较小.另一方面,膨胀阶段粒子间的碰撞将破坏其发射的倾向性,对集合流的末态观测产生影响.由于反应中发射的粒子数目随粒子质量数的增大而迅速减少,对质量较大的粒子,膨胀阶段的散射主要发生在它们与质量较小的粒子之间.因此,质量数越小的粒子,膨胀阶段的多次散射使其动量对流方向的偏离越大,相应的 β_2 越大.对于质量数为1和2的粒子,由于其质量小,经多次散射的粒子的动量呈各向同性的均匀分布,给出较大的 κ 值,而非对称部分粒子的极角分布近似为单高斯分布.

表1 末态粒子极角分布的特征参量

质量数	1	2	3	4	5—8
κ	0.66 ± 0.01	0.52 ± 0.02	0.19 ± 0.09	0.18 ± 0.02	0.08 ± 0.01
α_1	1.77 ± 0.01	2.96 ± 0.02	7.72 ± 0.22	28.1 ± 0.4	73.4 ± 3.2
β_1 (deg)	36.6 ± 0.5	33.7 ± 0.4	19.1 ± 0.4	11.5 ± 0.2	8.48 ± 0.27
α_2	0.	0.	1.50 ± 0.17	2.64 ± 0.37	3.56 ± 0.91
β_2 (deg)	0.	0.	44.1 ± 3.4	26.9 ± 1.4	20.0 ± 1.6
χ^2	0.6	3.4	1.9	1.2	1.2

4 横向动量分析

末态粒子在流轴坐标系中的极角分布描述了集合流的纵向分布特征,对末态粒子横向动量的分析^[2]从另一个侧面研究了流的性质.在束轴坐标系中将末态粒子的横向动量在估计反应平面上投影,可以得到反应平面内每核子平均横向动量 $\langle p_x / A \rangle$.通常将末态粒子的 $\langle p_x / A \rangle$ 值的快度分布曲线在中间快度区的斜率定义为“流”^[9, 10, 18],如果用 y' 的三次多项式描述该分布^[10, 14],则其一阶项的系数即为“流”.在对0.2A GeV Au+Au碰撞的Plastic Ball实验^[9, 15]及其QMD模型的模拟结果^[14, 16]进行分析时发现,电荷数越大的粒子,其“流”值也越大.

TPC具有较高的粒子鉴别能力和数据统计性,我们可以分别确定1.2A GeV Au+Au碰撞中不同质量末态粒子的“流”值.图3(a)—(e)分别给出了质量数为1, 2, 3, 4和5—8的末态粒子的 $\langle p_x / A \rangle$ 值随粒子快度的变化.可以看出,五组粒子均呈现出典型的“S”形分布.因为对于质心系中向前发射的粒子,TPC的探测效率最好,图中的分布对 $y' = 0$ 点并不完全对称^[10].对图3中五种质量数范围的粒子,“流”的拟合值分别为 0.22 ± 0.01 , 0.25 ± 0.01 , 0.28 ± 0.01 , 0.43 ± 0.01 和 0.51 ± 0.02 ,拟合曲线如图中的实线所示.

集合侧向流的流角较大并不表示其“流”值也一定较大,在对150—800A MeV

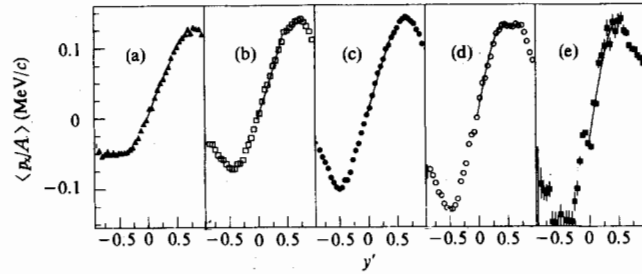


图3 不同质量末态粒子的 $\langle p_x/A \rangle$ 值随粒子快度的变化

图中符号 \blacktriangle \square \bullet \circ \blacksquare 分别对应质量数为 1, 2, 3, 4 和 5—8 的末态粒子.

Au+Au 碰撞的 Plastic Ball 实验的末态粒子侧向流进行分析时发现^[9], 尽管流角随入射能量的增加而减小, 但其“流”值却随入射能量的增加而增大. 我们对 1.2A GeV Au+Au 碰撞中不同质量末态粒子流特性的分析结果表明, 质量数越大的粒子, 测量到的“流”越大, 但其流角却较小. 小的流角倾向于给出较小的“流”值; 粒子在流方向分布得越集中, 其空间关联越强, 则倾向于给出较大的“流”值. 比较图 2 和图 3 可以看出, 质量较大的粒子具有较大“流”值的一个重要原因是其在流方向的分布更加集中.

需要指出的是, 虽然质量越大的粒子流效果越明显, 但随着粒子质量的增加, 在中间快度区出射的几率也越来越小, 质量较大时, 已无法利用 $\langle p_x/A \rangle$ 分布在中间快度区域的斜率来定义“流”^[14], 但利用极角分布对集合流的描述仍然有效.

5 结 论

本文根据在反应平面内以流方向为 z 轴的质心坐标系中, 末态粒子方位角分布的非对称性为极小的条件确定了 Bevalac 时间投影室 1.2A GeV Au+Au 碰撞实验中不同质量数末态粒子的集合侧向流流角. 对于质量数分别为 1, 2, 3, 4 和 5—8 的末态粒子, 流角的测量值分别为: $16.8 \pm 0.1^\circ$, $17.0 \pm 0.1^\circ$, $12.0 \pm 0.1^\circ$, $7.8 \pm 0.1^\circ$ 和 $6.0 \pm 0.1^\circ$. 粒子的质量越大, 其流角的测量值越小. 在以流方向为 z 轴的质心坐标系中对末态粒子的极角分布进行研究, 可以对末态粒子发射的非对称性及其在流方向的集中程度做出定量的描述. 对不同质量数末态粒子研究结果表明, 质量越大的粒子, 其发射在流方向的分布越集中, 侧向流的“流”值也越大.

参 考 文 献

- [1] M. Gyulassy, K. A. Fraenkel, H. Stocker, *Phys. Lett.*, **110B** (1982) 185.
- [2] H. A. Gustafsson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **52** (1984) 1590.
- [3] P. Danielewicz, G. Odyniec, *Phys. Lett.*, **157B** (1985) 146.
- [4] G. M. Welke *et al.*, *Phys. Rev.*, **C38** (1988) 2101.
- [5] 刘亦铭等, 高能物理与核物理, **18** (1994) 511.

- [6] S. Wang *et al.*, *Phys. Rev.*, **C44**(1991) 1091; 王山等, 高能物理与核物理, **14**(1990) 907.
- [7] J. Jiang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1992) 2739.
- [8] H. H. Gutbrod *et al.*, *Phys. Lett.*, **B216**(1989) 267.
- [9] H. H. Gutbrod, A. M. Poskanzer, H. G. Ritter, *Rep. Prog. Phys.*, **52**(1989) 1267.
- [10] D. Keane *et al.*, Results from the EOS time projection chamber at the Bevalac, Hot and Dense Nucl. Matter, Edited by W. Greiner *et al.*, Plenum Press, New York, 1994.
- [11] M. L. Gilkes *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **73**(1994) 1590.
- [12] S. Wang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **74**(1995) 2646.
- [13] 霍雷等, 高能物理与核物理, **20**(1996) 311.
- [14] G. Peilert *et al.*, *Phys. Rev.*, **C39**(1989) 1402.
- [15] B. V. Jacak, *Nucl. Phys.*, **A488**(1988) 325c.
- [16] J. Aichelin *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A488**(1988) 437c.
- [17] J. Janicke, J. Aichelin, *Nucl. Phys.*, **A547**(1992) 542.
- [18] K. G. R. Doss *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986) 302.

Anisotropic Distribution of Final State Particles in High Energy Heavy Ion Collisions

Huo Lei Liu Yiming Zhang Weining

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

D. Keane H. Liu

(Department of Physics, Kent State University, Kent, Ohio 44242)

Received 30 October 1995

Abstract

The flow angles for the final state particles with five kind of mass number ($A=1, 2, 3, 4$ and $5-8$) are determined for $1.2A$ GeV Au+Au collisions at the Bevalac by minimizing the azimuthal anisotropy in the center-of-mass coordinate systems where the z axis is rotated to various polar angles in the reaction plane. The study of the polar angle distributions for the final state particles with different mass in the systems with the z axis rotated to the flow angles indicates that the degree of concentration around the flow direction and the flow value increase with increasing mass number of the particles.

Key words mass number, sideward flow, flow angle, flow.