

高能重离子碰撞中末态粒子的极角分布*

霍 雷 刘亦铭 张卫宁 蒋玉桢

(哈尔滨工业大学物理系 哈尔滨 150001)

D. Keane

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

S. Y. Fung

(Department of Physics, University of California, Riverside, CA 92521)

1995-05-30 收稿

摘 要

在反应平面内不同极角方向为 z 轴的质心坐标系中, 分析了末态粒子方向角分布的非对称性, 建立了一种确定集合侧向流流角的方法. 在以流方向为 z 轴的质心坐标系中研究了 Bevalac 流光室 $1.2\text{A GeV Ar} + \text{KCl}$ 、 $1.2\text{A GeV Ne} + \text{NaF}$ 和 $2.1\text{A GeV Ne} + \text{NaF}$ 三种反应中末态粒子的极角分布, 对末态粒子非对称发射部分所占的比例及其在流方向的集中程度做出了定量的估计.

关键词 集合侧向流, 反应平面, 流角.

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侧向流分析方法^[2-9]. 1989年 Welke 等人^[4]利用方位角分布函数方法对集合侧向流进行了分析, 认为末态粒子方位角分布的最大非对称性是一个对核媒质态方程敏感的参量. 方位角关联函数方法建立了通过粒子的横向集体关联研究集合侧向流的思想, 从横向上定量分析了集合侧向流的集体性^[6,7]. 由于方位角分布只是集合侧向流在垂直入射束轴的平面上的投影, 即使方位角分布相同的事件, 其集合流的性质也可能存在差别, 因此仅对末态粒子的非对称横向运动特征进行分析不能充分反映集合流提供的全部信息. 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.

实验上, 本文分别对 Bevalac 流光室的三种碰撞实验: (a) $1.2\text{A GeV Ar} + \text{KCl}$, (b) $1.2\text{A GeV Ne} + \text{NaF}$ 和 (c) $2.1\text{A GeV Ne} + \text{NaF}$ 进行分析. 对于实验 (a), 得到多重数大于 30 的事件 571 个; 对于 (b)、(c), 分别得到多重数大于 13 的事件 850 和 2217 个. 关

* 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.

于实验的详细描述可参考文献[10,11].

2 方位角分布

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两原子核的连心线与入射束方向确定的.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,流方向与入射束轴间的夹角即为流角.

在实验中,每一事件的反应平面都是未知的.利用椭球张量法^[2]虽然可以同时估计出事件的反应平面和流角,但这种方法受统计涨落的影响较大.文献[3]指出,即使对于随机均匀分布的粒子,当粒子数目较少时,椭球张量分析也将给出一个“反应平面”及有限大小(大小依赖于粒子数目,具有统计不定性)的“集合流流角”.

利用横向动量法可以较椭球张量法更好地对事件的反应平面进行估计^[3,12,13].对第 μ 个粒子定义矢量^[3]:

$$Q_\mu = \sum_{\mu \neq \nu} \omega_\nu p_\nu^i, \quad (1)$$

式中 p_ν^i 表示第 ν 个被检测粒子的横向动量; $\omega_\nu = \pm 1$ (对于快度 $|y_{\text{lab}} - y_{\text{cm}}| \geq \delta$ 的重子)和0(对于快度 $|y_{\text{lab}} - y_{\text{cm}}| < \delta$ 的重子以及所有的 π 介子);求和时 $\mu \neq \nu$ 消除了自相关的影响. Q_μ 与入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,末态粒子的方位角为:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{p_y}{p_x} \right), \quad (2)$$

在一定的快度(y)范围内,末态粒子的方位角分布函数为^[4]:

$$\frac{d\sigma}{d\phi} = A(1 + \lambda \cos\phi). \quad (3)$$

由此可以定义参量 R 来描述末态粒子方位角分布的最大非对称性:

$$R = \frac{1 + |\lambda|}{1 - |\lambda|}. \quad (4)$$

在快度 $y > 0.75y_{\text{beam}}$ 的区域,对Bevalac流光室的三种碰撞实验:(a) 1.24 GeV Ar+KCl, (b) 1.24 GeV Ne+NaF 和 (c) 2.14 GeV Ne+NaF,末态粒子的方位角分布如图1所示.用方程(3)分析图中的数据,对于实验(a), (b)和(c),参数 λ 的拟合值分别为 0.20 ± 0.02 、

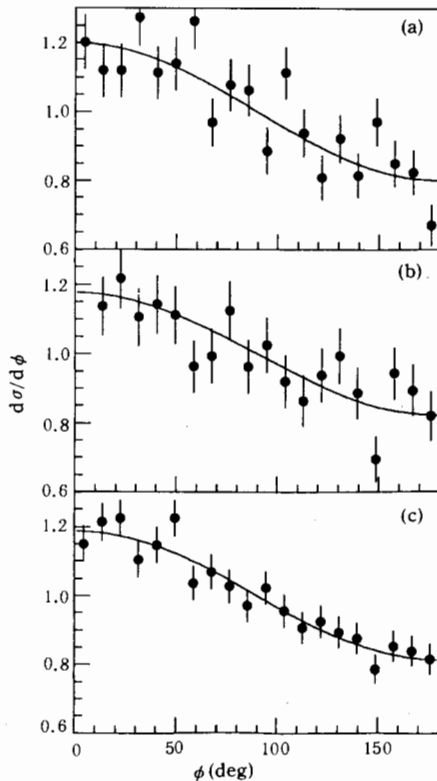


图1 Bevalac 流光室三种不同碰撞实验 (a) 1.24 GeV Ar+KCl, (b) 1.24 GeV Ne+NaF 和 (c) 2.14 GeV Ne+NaF 的末态粒子方位角分布 ($y > 0.75y_{\text{beam}}$).

0.18 ± 0.02 和 0.19 ± 0.02 ; 相应的方位角最大非对称性 R 值分别为 1.50 ± 0.08 、 1.44 ± 0.07 和 1.47 ± 0.07 . 在实验的统计误差范围内, 三种实验的横向非对称性是一致的.

3 流角的确定

当流角不为零时, 在以入射束轴为 z 轴的质心坐标系中观测, 末态粒子的方位角分布具有明显的非对称性. 显然, 对这种非对称性的描述与 z 轴的选择有关, 如果以流方向为 z 轴建立坐标系, 观测到的方位角分布的最大非对称性应为最小. 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, 比较不同坐标系中末态粒子方位角分布的最大非对称性, 由最大非对称性极小的条件确定集合侧向流的流角.

对不同碰撞的实验数据, 分别计算在不同的角度 θ_z (新坐标系 z 轴与入射束方向的夹角) 时末态粒子方位角分布的最大非对称性 R , 在快度 $y > 0.75y_{\text{beam}}$ 的区域, 结果如图 2 所示. 根据图中的数据分布, 可以使用抛物线函数对其拟合, 得到流角的测量值 Θ_e . 分别是: 实验 (a) 为 $4.55 \pm 0.17^\circ$, 实验 (b) 为 $3.10 \pm 0.14^\circ$ 和实验 (c) 为 $2.35 \pm 0.08^\circ$. 三种实验的流角存在明显的差别, 系统质量越大、碰撞能量越低, 流角越大. 这一结果与以往人们对高能核-核碰撞实验的分析相一致^[2,14,15].

由于估计反应平面与真实反应平面间的夹角 φ_r 是一离散变量^[3], 导致流角的测量值 Θ_e 较其真实值 Θ_F 偏低, 存在一个系统偏差. 假设 φ_r 的分布函数是高斯函数^[4,6]

$$N(\varphi_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \Delta\varphi} \exp\left(\frac{-\varphi_r^2}{2\Delta\varphi^2}\right), \quad (5)$$

式中 $\Delta\varphi$ 为 φ_r 的均方根值. 由于事件的真实流方向应在真实反应平面内, 而测量到的流方向在估计反应平面内, 由方程(5)可以得到, 流角的测量值与流角的真实值间满足方程:

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

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.

对实验(a)、(b)和(c), $\Delta\varphi$ 值分别约为 55° 、 73° 和 71° , 流角的真实值分别约为(a) 7.2° 、(b) 6.9° 和(c) 5.1° , 测量值较真实值分别偏低约 37%、55% 和 54%.

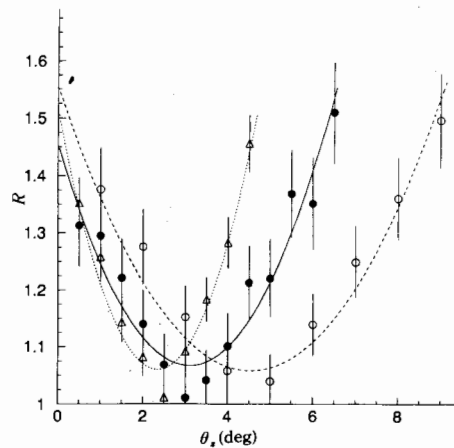


图 2 方位角分布最大非对称性 R 随 θ_z 的变化 ($y > 0.75y_{\text{beam}}$)

- 1.24 GeV Ar + KCl
- 1.24 GeV Ne + NaF
- △ 2.14 GeV Ne + NaF

4 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. 但利用横向动量法得到估计反应平面后, 可以在估计反应平面内给出测量到的流方向, 取测量出的流方向为 z 轴建立质心坐标系, 称之为“流轴坐标系”. 图 3 给出了在流轴坐标系中末态粒子的极角分布, 图中的符号 \circ 、 \bullet 和 \triangle 分别对应于实验(a)、(b)和(c). 由于对称性,

对 $\theta > \frac{\pi}{2}$ 的粒子, 计算时其极角取为 $\pi - \theta$.

可以看出, 在 $\cos\theta < 0.7$ 的区域, 末态粒子的极角分布接近于均匀; 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, 集合侧向流的性质主要体现在 $\cos\theta > 0.8$ 的区域.

为定量描述图 3 中的数据分布, 可以将事件的总截面分为对称和非对称发射两部分. 对称发射部分, 极角分布是均匀的, 即

$$\frac{dN_1}{d\cos\theta} \propto 1.$$

非对称发射部分是以流方向为中心的, 假定其为高斯分布, 即

$$\frac{dN_2}{d\theta} \propto \exp(-A^2\theta^2),$$

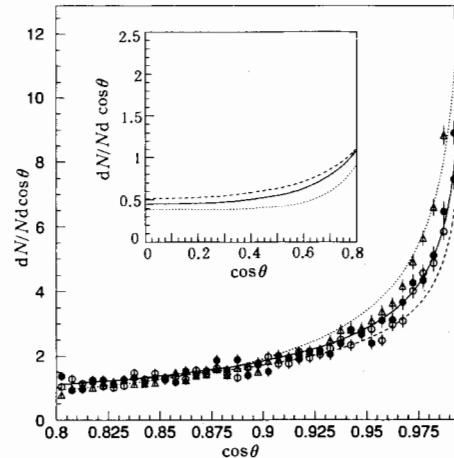


图 3 流轴坐标系中末态粒子的极角分布

图中的曲线为拟合结果.

-----1.2A GeV Ar + KCl;

——1.2A GeV Ne + NaF

.....2.1A GeV Ne + NaF.

式中 A 为常数, 它描述了非对称发射粒子在流方向的分布宽度, A 值越大, 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. 在流轴坐标系中, 归一化的末态粒子极角分布可以写成

$$\frac{dN}{N d\cos\theta} = \kappa + \frac{B}{\sin\theta} \exp(-A^2\theta^2), \quad (6)$$

式中 N 为末态粒子总数. 常数 κ 给出了末态粒子中, 各向同性发射部分所占的比例. 因此, 如果定义参量:

$$\Lambda = 1 - \kappa,$$

则 Λ 描述了末态粒子极角分布的非各向同性程度. 若末态粒子的发射不具有倾向性, 不形成集合侧向流, 角分布将是均匀的, Λ 值为零; 末态粒子极角分布的非对称程度越高, Λ 值越接近于 1.

用方程(6)对图 3 中的数据加以拟合, 得到的参量值见表 1. 表 1 中的数据可以根据简单的物理图象唯象地加以解释: 在核-核碰撞的初期, 入射核的动能转化为热能和压缩势能, 核媒质达到最大压缩阶段的压缩势能能使末态粒子的发射具有倾向性, 形成集合流;

表1 末态粒子极角分布的特征参量

	1.24GeV Ar+KCl	1.24GeV Ne+NaF	2.14GeV Ne+NaF
A	1.29 ± 0.04	1.44 ± 0.04	1.85 ± 0.03
B	0.74 ± 0.02	0.92 ± 0.02	1.32 ± 0.02
Λ	0.50 ± 0.01	0.56 ± 0.01	0.61 ± 0.01
χ^2 / NDF	286 / 200	236 / 200	378 / 200

另一方面, 膨胀阶段粒子间的碰撞将破坏这种倾向性. 对于 1.24GeV 能量下的两种碰撞, Ar+KCl 系统的质量大, 参与的核子数多, 核子间碰撞的平均次数也多, 在倾向性发射的粒子中, 有较多的粒子由于碰撞使其动量方向偏离流方向, 因而非对称发射的粒子在流方向分布的较宽, 相应的 Λ 和 A 值较小. 对于相同质量的两种碰撞, 2.14GeV 碰撞的能量大, 核子的平均自由程较大, 倾向性发射部分受破坏的程度小, 因此非对称发射的粒子在流方向的分布较窄, 相应的 Λ 和 A 值较大.

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最大非对称性为极小的条件确定了事件的流角. 对 Bevalac 流光室 1.24GeV Ar+KCl, 1.24GeV Ne+NaF 和 2.14GeV Ne+NaF 三种碰撞实验, 末态粒子集合侧向流流角的测量值分别为: $4.55 \pm 0.17^\circ$ 、 $3.10 \pm 0.14^\circ$ 和 $2.35 \pm 0.08^\circ$. 由于估计反应平面的离散, 流角的测量值与真实值间存在一个系统偏差, 较真实值分别偏低约 37%、55% 和 54%. 在以入射束轴为 z 轴的质心坐标系中观测, 末态粒子方位角分布的最大非对称性 R 不仅与事件的流角有关, 还与粒子在流方向的集中程度有关. 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 Bevalac 流光室三种碰撞实验的分析表明, 尽管 1.24 GeV Ar+KCl 碰撞的流角最大, 2.14GeV Ne+NaF 碰撞的流角最小; 但由于前者的 A 值最小, 末态粒子在流方向分布的宽度最大, 后者的 A 值最大, 末态粒子在流方向分布最集中, 结果在以入射束轴为 z 轴的质心坐标系中观测时, 三种实验的末态粒子方位角分布并无明显差别.

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] P. Beckmann *et al.*, *Mod. Phys. Lett.*, **A2** (1987) 163.
 - [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] 刘亦铭等, 高能物理与核物理, **18** (1994) 511.
[9] M. Elaasar *et al.*, *Phys. Rev.*, **C49** (1994) R10.
[10] M. Vient, Ph. D. Thesis, University of California Riverside, 1988;
D. Beavis *et al.*, *Phys. Rev.*, **C27** (1983) 2443.
[11] D. Keane *et al.*, *Phys. Rev.*, **C37** (1988) 1447.
[12] H. H. Gutbrod *et al.*, *Phys. Lett.*, **216B** (1989) 267.
[13] J. Y. Ollitrault, *Phys. Lett.*, **B**, to be published.
[14] D. L'Hote, *Nucl. Phys.*, **488A** (1988) 457c.
[15] G. Peilert, H. Stocker, W. Greiner, *Phys. Rev.*, **C39** (1989) 1402.

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

Huo Lei Liu Yiming Zhang Weining Jiang Yuzhen

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

D. Keane

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

S. Y. Fung

(Department of Physics, University of California, Riverside, Ca 92521)

Received 30 May 1995

Abstract

The anisotropy of azimuthal distribution for the final state particles in the center-of-mass coordinate systems where the z axis is rotated to various polar angles in the reaction plane is studied. A method to determine the flow angle is proposed. Studying the polar angle distributions for collisions of 1.2A GeV Ar+KCl, 1.2A GeV Ne+NaF and 2.1A GeV Ne+NaF at the Bevalac streamer chamber in the coordinate systems with the z axis rotated to the flow angles, we can estimate the fraction of the anisotropic emission particles to all the final state particles and the degree of concentration around the flow direction quantitatively.

Key words collective sideward flow, reaction plane, flow angle.