

相对论重离子碰撞中集合流的 横向运动关联*

刘亦铭 张伟刚 霍雷 王山

(哈尔滨工业大学理论物理教研室 哈尔滨 150006)

D. Keane

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

S. Y. Chu S. Y. Fung

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

1993年4月14日收到

摘 要

本文对 $1.2 A\text{GeV Ar} + \text{Ba}_2$ 和 $2.1 A\text{GeV Ne} + \text{NaF}$ 碰撞的 Bevalac 流光室 4π 实验数据进行了集合流横向运动关联特性的研究。研究表明,末态粒子的横向运动不仅存在粒子分布的方位角关联,而且还存在横向动量模的关联; $\text{Ar} + \text{Ba}_2$ 碰撞实验中粒子分布的方位角关联、横向动量模关联和横向运动关联都分别强于 $\text{Ne} + \text{NaF}$ 碰撞实验中相对应的各种关联;对于这两组碰撞实验,粒子分布的方位角关联相对横向动量模关联在横向运动关联中起着主要作用。

关键词 集合流,横向运动关联,粒子分布的方位角关联,横向动量模关联。

1 引 言

相对论重离子碰撞产生的集合侧向流为核媒质态方程的研究提供了重要信息。迄今为止,根据末态粒子的动量分布,人们已经提出了多种研究集合侧向流的方法。如椭球张量法^[1,2]、横向动量法^[3-5]、Beckmann 等人提出的方法^[6-8]以及方位角分布函数法^[9,10]。最近, Wang 等人提出了通过粒子的集体关联研究集合流的思想,建立了方位角关联函数方法^[11,12]。Jiang 等人进一步发展了这种方法,提出了高阶集合流关联的概念,建立了方位角高阶关联函数方法,并且首次定量地推测了集合流的“集体性”^[13]。集合侧向流的“强度”和“集体性”是描述集合流性质的两个不可分割的方面,它们与末态粒子的非对称横向运动密切相关^[13]。但描述末态粒子的横向运动应包括粒子方位角的分布和横向动量模的

* 中国国家自然科学基金、高等学校博士点专项基金、美国国家科学基金资助。

分布两个方面。例如：对于末态粒子的方位角分布是完全对称的事件（这是一个可能的极端情况），集合流的性质将由末态粒子横向动量模分布的非对称性决定。在非零碰撞参数的相对论核-核碰撞实验中，末态粒子之间存在方位角关联^[11-13]。那么，粒子之间是否存在横向动量模的关联？若存在这种关联，怎样定量地研究这种关联？对这些问题的探讨是集合流研究领域中有意义的课题。

本文分析的实验数据取自 1.2 AGeV Ar + Ba₂ 与 2.1 AGeV Ne + NaF 碰撞的 Bevalac 流光室 4 π 实验；关于实验的详尽描述可见参考文献[14,15]。对于 Ar+Ba₂ 碰撞，共得到带电粒子的多重数大于 30 的事件 786 个；对于 Ne + NaF 碰撞，共得到带电粒子的多重数大于 13 的事件 2707 个。对应于简单的几何图象，前者碰撞参数的范围是 0—6.0fm；后者碰撞参数的范围是 0—5.0fm。

本文首先分析了上述两种实验事件中粒子的方位角关联特性，然后考虑粒子的横向动量模关联，对两个实验事件中粒子的横向动量模关联作了比较；推广粒子对方位角关联函数的概念，定义了粒子的横向运动关联函数，比较了两个实验事件中粒子的横向运动关联特性。最后，给出了本文的结论。

2 粒子分布的方位角关联

对于非零碰撞参数的核-核碰撞事件，在一定的快度 (y) 范围内，重子的方位角具有非对称性，其方位角 ϕ 的分布函数为^[9]

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

下面的分析中，在快度 $y_{1ab} \geq 0.75y_{b,cm}$ 的区间^[9-12]研究粒子的横向运动特性。Wang 等人在文献[11,12]中指出，在相对论重离子碰撞中，当研究集合侧向流引起的粒子方位角关联效果时，可以认为两个末态粒子方位角的几率分布是互相独立的，并且满足(1)式。在一个碰撞事件中，两个末态粒子方位角分别是 ϕ_1, ϕ_2 的几率为：

$$\frac{d^2\sigma}{d\phi_1 d\phi_2} = A^2(1 + \lambda \cos \phi_1)(1 + \lambda \cos \phi_2), \quad (2)$$

则碰撞事件中任意两个末态粒子方位角差为 ϕ 的几率^[11,12]为：

$$P(\phi) = A^2(1 + 0.5\lambda^2 \cos \phi). \quad (3)$$

利用 π 干涉学处理关联函数的方法^[16]，粒子对的方位角关联函数定义为：

$$C(\phi) = \frac{P(\phi)}{PM(\phi)}, \quad (4)$$

其中， $PM(\phi)$ 是在蒙特卡罗事件中方位角差为 ϕ 的粒子对分布几率。同一碰撞事件中的两个粒子组成相关粒子对，蒙特卡罗事件中的两个粒子组成非相关粒子对。这里采用的蒙特卡罗事件是由不同实验事件(多重数相同)的轨迹随机组合而产生的^[3,11,12]，在这样的事件中，粒子的方位角分布应是均匀的。方位角关联函数 $C(\phi)$ 的计算，就是计算具有方位角差 ϕ 的相关粒子对与非相关粒子对数目的比值。

不同于其它集合流的分析方法^[1-10]，Wang 等人提出的方位角关联函数^[11,12]不需要知

道碰撞事件中任何有关反应平面的信息. 这个特点的直接结果是, 方位角关联函数方法克服了在其它方法中需要一个事件一个事件估计反应平面的困难, 消除了估计反应平面关于真实反应平面的离散对集合流分析结果的影响. 同时, 这个方法能够最小化与检测器的接收度、有效性等因素有关的其它系统误差. 因而, 方位角关联函数对重离子碰撞动力学提供了一种简单有效的检测手段^[17].

图 1 中的实心圆是对两种实验事件计算的 $C(\phi)$. 计算时, 为消除库仑相互作用及全同粒子的量子统计的影响, 使用文献[11]的方法, 去掉动量差 $|p_1 - p_2| \leq 50 \text{ MeV}/c$ 的粒子对. 这种粒子对的数目在实验样本中占总粒子对数目的比例是: 对 $\text{Ar} + \text{BaI}_2$ 碰撞为千分之六; 对 $\text{Ne} + \text{NaF}$ 为千分之四. 由蒙特卡罗事件构成非相关的粒子对作为背景, 统计数目是相关粒子对数目的十倍. 应用(3)式对图 1 中两种实验事件的 $C(\phi)$ 值进行拟合, 参数 λ 的拟合值分别为:

$$\lambda = 0.67 \pm 0.03, \chi^2/NDF = 5/13,$$

对于 $\text{Ar} + \text{BaI}_2$ 碰撞;

$$\lambda = 0.31 \pm 0.05, \chi^2/NDF = 7/13, \text{ 对于 } \text{Ne} + \text{NaF} \text{ 碰撞.}$$

图 1 中的实线为 $C(\phi)$ 的拟合曲线.

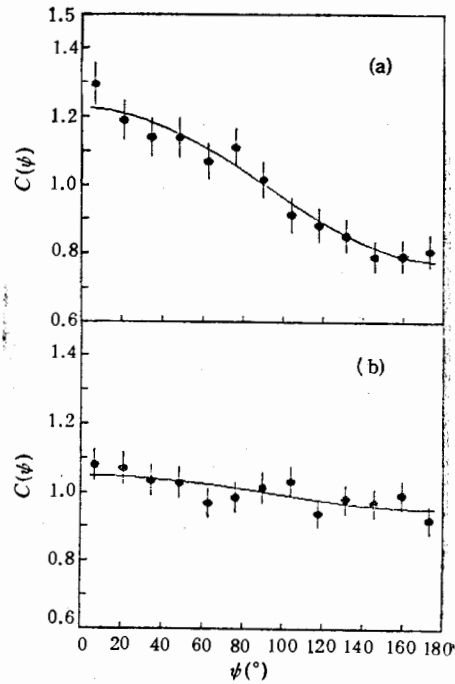


图 1 两种实验事件中粒子的方位角关联函数 $C(\phi)$

(a) $\text{Ar} + \text{BaI}_2$ 碰撞; (b) $\text{Ne} + \text{NaF}$ 碰撞. 快度范围在 $y_{1ab} \geq 0.75 y_{\text{beam}}$ 区间.

3 横向动量模的方位角关联

末态粒子横向动量的分布由粒子的方位角和横向动量模的大小两种因素决定. 那么, 末态粒子的横向动量模的分布是否具有非对称性呢? 为此, 计算了上述两种实验事件中方位角 ϕ 的粒子平均横向动量模 $\langle p^i \rangle(\phi)$, 其中方位角 ϕ 是粒子横向动量与事件估计反应平面的夹角, $0 \leq \phi \leq \pi$. 事件的估计反应平面由矢量 \mathbf{Q}_v 与入射轴的方向确定^[3-5].

$$\mathbf{Q}_v = \sum_{\mu \neq \nu} \omega_\mu \mathbf{p}_\mu^i, \quad (5)$$

其中

$\omega_\mu = \pm 1$ 对于快度 $y_{1ab} - y_{\text{CM}} \geq \pm \delta$ 的重子;

$\omega_\mu = 0$ 对于快度 $|y_{1ab} - y_{\text{CM}}| \leq \delta$ 的重子以及所有 π 介子.

式中 $\mu \neq \nu$ 消除了自相关效应的影响, \mathbf{p}_μ^i 是事件中第 μ 个粒子的横向动量, y_{CM} 是系统的质心快度. 图 2 显示了计算的结果, $\langle p^i \rangle(\phi)$ 的分布在整个 ϕ 区间具有较明显的非对称性, 粒子之间存在横向动量模的关联.

为了定量描述这种关联, 本文对于碰撞事件中方位角差为 ϕ 的第 i 个粒子对构成变

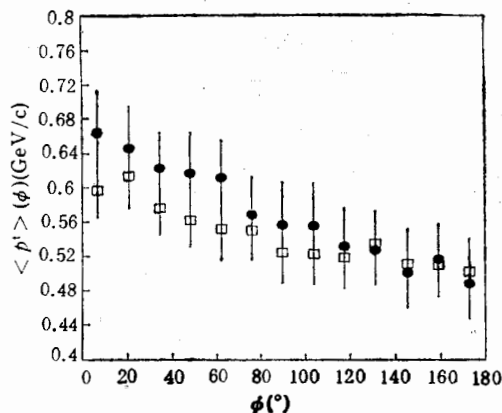


图2 两种碰撞实验中方位角 ϕ 的粒子
平均横向动量模 $\langle p^t \rangle(\phi)$.
快度范围在 $y_{lab} \geq 0.75 y_{beam}$ 区间.
 \square Ne + NaF, \bullet Ar + BaI₂.

量 $W_{i,\phi}$:

$$W_{i,\phi} = \frac{p_a^t \cdot p_b^t}{\langle p^t \rangle^2}, \quad (6)$$

式中 p_a^t, p_b^t 分别为这个粒子对中两个粒子的横向动量模,

$$\langle p^t \rangle = \frac{\sum_{i=1}^M p_i^t}{M}$$

为事件中粒子的平均横向动量, M 为事件的重数, i 为粒子的标号.如果粒子对中两个粒子的横向动量模都等于事件中粒子的平均横向动量,则变量 $W_{i,\phi} = 1$ 表示有一个方位角差为 ϕ 的粒子对;如果粒子的横向动量模偏离事件中粒子的平均横向动量 $\langle p^t \rangle$,则变量 $W_{i,\phi}$ 表示考虑了粒子横向动量模关联贡献后方位角差为 ϕ 的加权粒子对数.

设碰撞事件中粒子横向动量间夹角为 ϕ 的粒子对数目为 $n(\phi)$,变量 $W_{i,\phi}$ 的平均值可以写为:

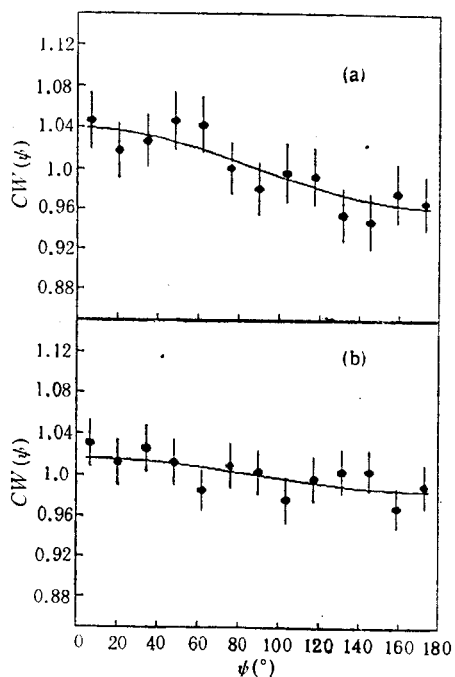
$$\langle W_{i,\phi} \rangle(\phi) = \frac{\sum_{i=1}^{n(\phi)} W_{i,\phi}}{n(\phi)}, \quad (7)$$

式中对方位角差为 ϕ 的 $n(\phi)$ 个粒子对求和. $\langle W_{i,\phi} \rangle(\phi)$ 排除了方位角关联引起的具有方位角差 ϕ 的粒子对数目的变化,反映了粒子横向动量模的关联.

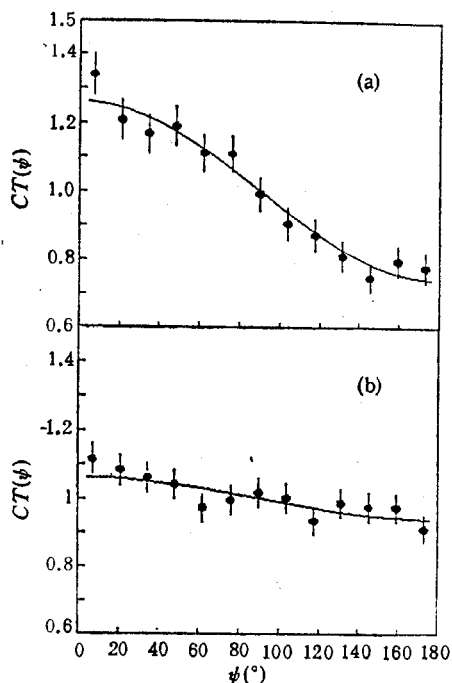
采用类似方位角关联函数的定义方法,定义粒子的横向动量模关联函数为:

$$CW(\phi) = \frac{\langle W_{i,\phi} \rangle(\phi)}{\langle WM_{i,\phi} \rangle(\phi)}, \quad (8)$$

式中的 $\langle WM_{i,\phi} \rangle(\phi)$ 是采用(7)式对蒙特卡罗事件的计算结果.图3中的实心圆是对两种实验事件计算的 $CW(\phi)$ 值.背景粒子对的数目和相关粒子对数目的比值,以及消除粒子之间库仑相互作用和全同粒子量子统计效应影响的方法相同于第2节中粒子方位角关联的分析.

图 3 实验事件粒子的横向模关联函数 $CW(\psi)$

(a) Ar + BaI₂ 碰撞; (b) Ne + NaF 碰撞.
快度范围在 $y_{1,ab} \geq 0.75y_{beam}$ 区间.

图 4 实验事件粒子的横向运动关联函数 $CT(\psi)$

(a) Ar + BaI₂ 碰撞; (b) Ne + NaF 碰撞.
快度范围在 $y_{1,ab} \geq 0.75y_{beam}$ 区间.

由图 3, $CW(\psi)$ 的分布形式看出, 可以假设 $\langle W_{i,\psi} \rangle(\psi)$ 具有如下的函数形式:

$$\langle W_{i,\psi} \rangle(\psi) = B^2(1 + 0.5\lambda_p^2 \cos \psi). \quad (9)$$

应用(9)式对图 3 中的两种实验事件的 $CW(\psi)$ 值进行拟合, 结果为:

$$\lambda_p = 0.28 \pm 0.04, \chi^2/NDF = 6/13, \text{ 对于 Ar + BaI}_2 \text{ 碰撞;}$$

$$\lambda_p = 0.18 \pm 0.05, \chi^2/NDF = 7/13, \text{ 对于 Ne + NaF 碰撞.}$$

图 3 中的实线为 $CW(\psi)$ 的拟合曲线. 置信度 χ^2/NDF 的值表明了采用(9)式的拟合函数形式是合理的. 由 $\lambda_p > 0$ 可知, 在上述两种实验事件中, 末态粒子之间存在着横向动量模的关联. Ar + BaI₂ 碰撞实验中的横向动量模关联强于 Ne + NaF 碰撞实验中相应的关联.

4 粒子的横向运动关联

末态粒子的横向运动不仅存在粒子分布的方位角关联, 而且还存在横向动量模的关联. 因此, 通过粒子的横向运动分析集合流时, 只有同时计及这两种关联, 才能对粒子的横向运动关联做出完整的描述.

当仅仅考虑粒子分布的方位角关联时, 在方程(4)中计算具有方位角差为 ψ 的粒子对数目, 使用赋值方程 $N(\psi) = N(\psi) + 1$; 在同时考虑粒子分布方位角关联和横向动量模关联的横向运动分析中, 计算方位角差为 ψ 的, 考虑了粒子横向动量模关联后的加权粒

子对数目,新的赋值方程是

$$N(\phi) = N(\phi) + W_{i,\phi}. \quad (10)$$

定义粒子的横向运动关联函数为:

$$CT(\phi) = \frac{PW(\phi)}{PWM(\phi)}, \quad (11)$$

其中 $PW(\phi)$ 和 $PWM(\phi)$ 分别是采用(10)式计算的在实验事件和蒙特卡罗事件中方位角差为 ϕ 的加权粒子对数目。粒子横向运动关联函数 $CT(\phi)$ 的计算,就是在计及了粒子横向动量模关联后,计算具有方位角差为 ϕ 的相关加权粒子对与非相关加权粒子对数目的比值。

图4中的实心圆是对两种实验事件计算的 $CT(\phi)$ 值。蒙特卡罗事件构成的非相关粒子对数目和实验事件中相关粒子对数目的比值,消除影响两个末态粒子方位角几率分布独立性假定的技术处理相同于前两节中对粒子分布的方位角关联或动量模关联的讨论。

由(7)式可以看到,在碰撞事件中计及粒子横向动量模关联后具有方位角差 ϕ 的加权粒子对的分布几率 $PW(\phi)$, 和仅仅考虑粒子分布的方位角关联而未计及横向动量模关联的粒子对分布几率 $P(\phi)$ 之间有下列关系式:

$$PW(\phi) = \xi \langle W_{i,\phi} \rangle (\phi) \cdot P(\phi), \quad (12)$$

其中 ξ 为归一化因子。于是,根据(3)式和(9)式,(12)式可以写为

$$PW(\phi) = \xi A^2 B^2 (1 + 0.5 \lambda_p^2 \cos \phi) (1 + 0.5 \lambda^2 \cos \phi).$$

略去 $\lambda^2 \lambda_p^2 \cos^2 \phi$ 项,则

$$\begin{aligned} PW(\phi) &\simeq \kappa^2 [1 + 0.5(\lambda_p^2 + \lambda^2) \cos \phi] \\ &= \kappa^2 (1 + 0.5 \lambda_t^2 \cos \phi), \end{aligned} \quad (13)$$

式中 $\kappa^2 = \xi A^2 B^2$, $\lambda_t^2 = \lambda_p^2 + \lambda^2$ 。(13)式同时包含了粒子的方位角关联和横向动量模的关联信息,因子 λ_t 的大小全面反映了粒子横向动量分布的非对称程度。

应用(13)式对图4中两种实验事件的 $CT(\phi)$ 数据进行拟合,结果为:

$$\lambda_t = 0.72 \pm 0.03, \chi^2/NDF = 7/13, \text{ 对 Ar + BaI}_2 \text{ 碰撞};$$

$$\lambda_t = 0.36 \pm 0.05, \chi^2/NDF = 10/13, \text{ 对于 Ne + NaF 碰撞}.$$

图4中的实线为 $CT(\phi)$ 的拟合曲线。

可以看到对于这两组碰撞实验,粒子分布的方位角关联相对横向动量模关联在横向运动关联中起着主要作用。

5 结 论

在相对论重离子碰撞中,末态粒子的横向运动不仅存在着粒子分布的方位角关联,而且存在着横向动量模的关联。粒子分布的方位角关联、横向动量模关联和横向运动关联的强弱程度可分别由描述非对称性的参数 λ 、 λ_p 和 λ_t 描述。对于 1.2 AGeV Ar + BaI₂ 和 2.1 AGeV Ne + NaF 碰撞的 Bevalac 流光室实验数据的分析表明,前者的三种关联都分别强于后者相对应的各种关联;对于这两组碰撞实验,粒子分布的方位角关联相对横向动量模关联在横向运动关联中起着主要作用。方位角关联函数、横向动量模关联函数

和横向运动关联函数各自从不同的角度反映粒子横向集合流运动的特点。不同于传统集合流的分析, 这些关联函数的突出优点是不需要对估计反应平面的离散进行修正, 因而对消除反应平面估计引起的系统误差提供了重要的途径。三种横向关联函数的直接性, 以及在未来高统计实验中的精确性将在重离子碰撞动力学的定量检测中起着重要的作用。

参 考 文 献

- [1] M. Gyulassy, K.A. Frankel and H. Stöcker, *Phys. Lett.*, **110B**(1982) 185.
- [2] P. Danielewicz and M. Gyulassy, *Phys. Lett.*, **129B**(1983) 283.
- [3] P. Danielewicz and G. Odyniec, *Phys. Lett.*, **157B**(1985) 146.
- [4] K.G.R. Doss et al., *Phys. Rev. Lett.*, **57**(1986) 302.
- [5] D. Keane et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988) 1447.
- [6] P. Beckmann et al., *Mod. Phys. Lett.*, **A2**(1987) 163.
- [7] S.M. Kiselev, *Phys. Lett.*, **216B**(1989) 262.
- [8] 刘庆军等, 高能物理与核物理, **16**(1992) 801.
- [9] G.M. Welke et al., *Phys. Rev.*, **C38**(1988) 2101.
- [10] H.H. Gutbrod et al., *Phys. Lett.*, **216B** (1989) 267.
- [11] S. Wang et al., *Phys. Rev.*, **C44**(1991) 1091.
- [12] 王山等, 高能物理与核物理, **14**(1990) 907.
- [13] J. Jiang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992) 2739.
- [14] D. Beavis et al., *Phys. Rev.*, **C33**(1986) 1113.
- [15] M. Vient, Ph.D. Thesis, University of California Riverside, 1988.
- [16] Y.M. Liu et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986) 1667.
- [17] R.A. Lacey et al., *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993) 1224.

Transverse Motion Correlations of Collective Flow in Relativistic Heavy Ion Collisions

Liu Yiming Zhang Weigang Huo Lei Wang Shan

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006)

D. Keane

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

S. Y. Chu S. Y. Fung

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

Received on April 14, 1993

Abstract

With 4π data for 1.2A GeV Ar+Ba₂ and 2.1A GeV Ne+NaF collisions at the Bevalac streamer chamber, the transverse motion correlations arising from collective flow are studied include azimuthal correlations and correlations of transverse momentum magnitude. The azimuthal correlations of particle distribution, the correlations of transverse momentum magnitude and transverse motion in collisions of Ar+Ba₂ are stronger than the corresponding ones in collisions of Ne+NaF respectively. Comparing with the correlations of transverse momentum magnitude, the azimuthal correlations dominate correlations of transverse motion in two experimental samples.

Key words collective flow, transverse motion correlations, azimuthal correlations of particle distribution, correlations of transverse momentum magnitude.