

# 2.1A GeV Ne+NaF 碰撞中的粒子群 关联与集体性<sup>\*</sup>

张 伟 刚

(广西工学院教务处 柳州 545005)

1996-12-18收稿

## 摘 要

提出了粒子群关联概念,并以此建立了一种检测集合流的新方法。采用新方法对 2.1A GeV Ne + NaF 碰撞的 Bevalac 流光室  $4\pi$  实验事件粒子群的关联进行了研究。通过与蒙特卡罗结果进行比较,推测该实验事件集合流的集体性约在 75%—95% 之间。

**关键词** 集合流, 集体性, 横向运动关联, 粒子群关联。

## 1 引 言

相对论重离子碰撞实验的主要目的之一就是研究核媒质在高温度、高密度状态下的特性, 得到核媒质态方程。自从 W. Schied 等人于 1974 年首次在理论上预言了集合流的存在, 并指出可以通过研究集合流获得有关核媒质态方程的信息以来, 根据末态粒子的动量分布, 人们已经提出了多种研究集合流的方法。如椭球张量法<sup>[1, 2]</sup>、横向动量分析法<sup>[3-6]</sup>、方位角分布函数法<sup>[7, 8]</sup>、方位角关联函数法<sup>[9, 10]</sup>、方位角高阶关联函数法<sup>[11]</sup>、横向运动关联函数法<sup>[12, 13]</sup>以及 Beckmann 等人<sup>[14-16]</sup>提出的方法等。在上述诸方法中, 流参量从各自不同的侧面反映了集合流的“强度”(集合流的强弱程度)特性。1992 年, Jiang 等人把方位角关联函数法<sup>[9, 10]</sup>发展为方位角高阶关联函数法<sup>[11]</sup>, 通过定义末态粒子的“集体性”(在末态中, 参加集体定向运动的粒子数与该事件的多重数的比率), 揭示了集合流的另一个本质特性。并且, 他们利用末态粒子方位角的高阶关联效应, 首次定量地推测了 Bevalac 流光室 0.4GeV Ar + Pb 碰撞中集合流的“集体性”。

集合流的“强度”从量的方面反映了集合流的特征, 而集合流的“集体性”则从更深的层次上反映了集合流的本质, 它们是描述集合流性质的两个不可分割的方面, 并且与末态粒子的非对称横向运动密切相关<sup>[11-13]</sup>。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分布两个方面, 这可以通过方位角关联函数<sup>[9, 10]</sup>、横向动量模

关联函数<sup>[6, 12, 13]</sup>和横向运动关联函数<sup>[12, 13]</sup>分别进行定量描述。为了分析集合流的“强度”与“集体性”，需要选择能够充分地利用末态粒子各种信息的适宜参量，研究末态粒子集体关联的特性。上述研究表明：在非零碰撞参数的相对论核-核碰撞事件中，末态粒子之间存在诸如方位角关联、横向动量模关联、横向运动关联等。那么，粒子群之间是否也存在关联？能否利用这种关联分析集合流的强度与“集体性”呢？这些问题的探讨对于深入研究集合流的本质、定量分析集合流的“强度”与“集体性”具有非常重要的意义。

本文首先分析文献[3, 14]的方法，提出粒子群关联概念；然后，定义碰撞事件中两个粒子群的关联函数，对实验事件进行分析；进而，对多个粒子群关联进行研究，分析了实验事件集合流的强度；最后，通过与蒙特卡罗结果进行比较，推测了该实验事件集合流的集体性。

## 2 实验简介

本文分析的实验数据取自 2.14 GeV Ne + NaF 碰撞的 Bevalac 流光室 4π 实验事件。

关于实验的详细描述可见参考文献[17, 18]。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，其碰撞参数的范围是 0—5.0 fm。为了避免粒子质量鉴别失误、靶的吸收和粒子能量的损失等实验因素对分析结果的影响，我们对实验数据进行了极角截断：取  $\theta_{\text{lab}} > 4^\circ$ <sup>[18]</sup>，于是，相应的多重数取值范围为 4—23。图 1 给出了经上述极角截断后实验事件的核子多重数  $M$  的分布。

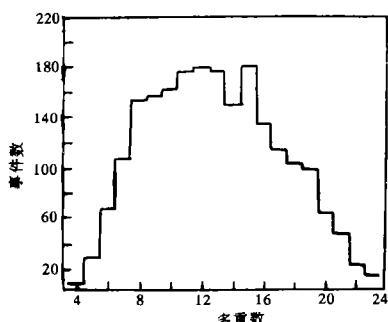


图 1 经极角截断后 Ne+NaF 实验事件的核子多重数分布

## 3 两个粒子群之间的关联

将多重数为  $M$  的碰撞事件随机地分成两个粒子群，两个粒子群中的粒子数尽量一致。利用每个粒子群中各个粒子的横向动量  $\mathbf{p}^{\perp}$  构成矢量  $\mathbf{Q}_i$ ：

$$\mathbf{Q}_i = \sum_{j=1}^M \omega_j \mathbf{p}_j^{\perp}, \quad (i = 1, 2), \quad (1)$$

式中  $\omega_j = \pm 1$  对于快度为  $y - y_{\text{CM}} > \delta$  或  $< -\delta$  的重子；

$\omega_j = 0$  对于快度为  $|y - y_{\text{CM}}| \leq \delta$  的重子以及所有的  $\pi$  介子。

$y_{\text{CM}}$  是系统的质心快度。 $\delta$  的选取是为了去掉质心快度附近的粒子，以避免这些粒子对集合流分析结果产生的影响。本文研究的实验事件样本取  $\delta = 0.2$ ，这相当于去掉了反应中约 23% 探测到的核子。矢量  $\mathbf{Q}_i$  的大小和方向表征了该粒子群的横向动量分布在某个方向上的集中程度。

在多重数为  $M$  的碰撞事件中，两个粒子群矢量  $\mathbf{Q}_1$  与  $\mathbf{Q}_2$  之间的夹角  $\psi$  的分布几率为：

$$PS(\psi) = dN / d\psi, \quad (2)$$

其中  $\psi = \cos^{-1}[(\mathbf{Q}_1 \cdot \mathbf{Q}_2) / (\|\mathbf{Q}_1\| \cdot \|\mathbf{Q}_2\|)]$ ,  $0 \leq \psi \leq \pi$ 。采用类似方位角关联函数的定义方

法<sup>[9, 10]</sup>。定义两个粒子群之间的关联函数为:

$$CS(\psi) = PS(\psi) / PSM(\psi), \quad (3)$$

式中  $PSM(\psi)$  是在蒙特卡罗事件中, 两个粒子群矢量  $\mathbf{Q}_1$  与  $\mathbf{Q}_2$  之间的夹角  $\psi$  的分布几率。按文献 [3] 的方法, 这里采用的蒙特卡罗事件是由不同实验事件(多重数相同)的轨迹随机组合产生的<sup>[3, 10, 11]</sup>。在这样的事件中, 两个粒子群矢量  $\mathbf{Q}_1$  与  $\mathbf{Q}_2$  之间的夹角  $\psi$  的分布是均匀的。两个粒子群之间的关联函数之计算, 就是计算具有方位角差为  $\psi$  的相关粒子群对数目与非相关粒子群对数目的比率。图 2 中带误差的圆点是对实验事件计算的  $CS(\psi)$  结果。

由图 2 可见, 关联函数  $CS(\psi)$  在小  $\psi$  区间上的值较大, 而在大  $\psi$  区间上的值较小, 末态粒子群之间存在关联。这种分析方法实质上是将碰撞事件中粒子的横向运动信息(横向动量模的大小与方位角)约化为两个横向动量矢量  $\mathbf{Q}_1$  和  $\mathbf{Q}_2$ , 通过对矢量  $\mathbf{Q}_1$  和  $\mathbf{Q}_2$  的分析, 研究粒子群之间的关联特性。这种方法可以归并为横向运动关联函数法<sup>[6, 12, 13]</sup>。上述分析方法与 1985 年 Danielewicz 和 Odyniec<sup>[3]</sup>对集合流分析的方法相类似。

与此类似, Beckmann 等人<sup>[14]</sup>将碰撞事件中的粒子在质心系中分为向前及向后发射的两个粒子群, 利用变量  $W_i$ ( $W_i$  的定义及说明详见参考文献 [14])研究粒子群之间的关联。采用文献 [3, 14] 的分析方法虽然可以检测实验事件中集合流的“强度”, 然而, 由于所用的变量包含了对所有粒子横向动量的求和, 仅考虑事件中两个粒子群之间的关联, 对实验事件信息的利用率不够充分, 因而在检测集合流的“集体性”信息方面存在较大的困难。为了解决这一困难, 应当对实验事件所包含的信息进行充分地利用, 探索检测集合流的敏感变量。实践证明, 研究多个粒子群之间的关联是解决这一问题的有效途径。

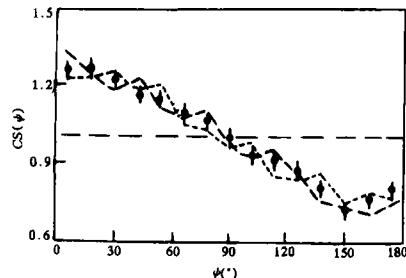


图 2 两个粒子群之间的关联函数  $CS(\psi)$   
黑圆点是对实验事件的计算结果; 虚线是对模拟集合流的蒙特卡罗事件  $\alpha=75\%$  的计算结果;  
折线是对模拟集合流的蒙特卡罗事件  $\alpha=95\%$  的计算结果。

## 4 多个粒子群之间的关联

现在, 将两个粒子群之间的关联推广到多个粒子群之间的关联。

设碰撞事件的多重数为  $M$ , 现将其随机地分成  $N$  个粒子群, 各粒子群中的粒子数尽量一致。则每一个粒子群为该碰撞事件的一个子集  $\Omega_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。定义每个子集  $\Omega_i$  的矢量为:

$$\mathbf{Q}_i = \sum_{j=1}^K \omega_j \mathbf{p}_j^i, \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (4)$$

其中  $\mathbf{p}_j^i$  为第  $i$  个粒子群中第  $j$  个粒子的横向动量,  $\omega_j$  的意义与 (1) 式相同。因为  $N$  个  $\mathbf{Q}_i$  矢量对应  $N$  个方位角  $\varphi(\mathbf{Q}_i)$ , 于是定义  $N$  个粒子群之间的关联角变量为:

$$\psi_N = \left( \prod_{i=1}^N \Delta \varphi_i \right)^{1/N}, \quad K = (1/2)N(N-1), \quad (5)$$

其中  $\Delta\varphi$  为同一碰撞事件中任意两个粒子群构成的矢量  $\mathbf{Q}_i$  和  $\mathbf{Q}_j$  之间的夹角, 且  $\Delta\varphi = \cos^{-1}[(\mathbf{Q}_i \cdot \mathbf{Q}_j) / (|\mathbf{Q}_i| \cdot |\mathbf{Q}_j|)]$ ,  $0 \leq \Delta\varphi \leq \pi$ . 乘积符号  $\prod$  是对  $N$  个粒子群可能形成的全部  $K$  个  $\Delta\varphi$  进行求积.

与两个粒子群关联函数的定义方法类似, 定义  $N$  个粒子群的关联函数为:

$$CS(\psi_N) = PS(\psi_N) / PSM(\psi_N), \quad (6)$$

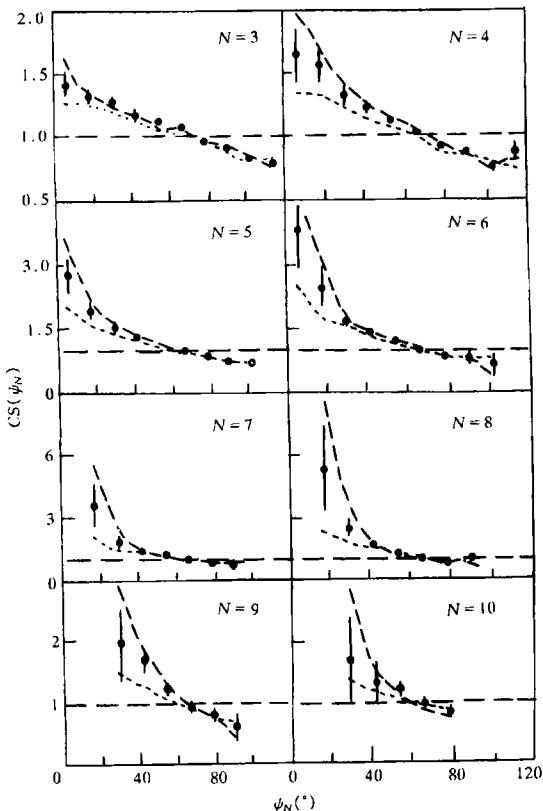


图3 多个粒子群之间的关联函数  $CS(\psi_N)$  ( $N=3-10$ )  
黑圆点是对实验事件的计算结果; 虚线是对模拟集合流的  
蒙特卡罗事件  $\alpha=75\%$  的计算结果; 折线是对模拟集合流的  
蒙特卡罗事件  $\alpha=95\%$  的计算结果.

图3中, 对于  $N=9, 10$  的  $CS(\psi_N)$  分析, 去掉了这部分的计算点. 在下面进一步分析中, 将通过与蒙特卡罗结果进行比较, 推测实验事件集合流的“集体性”.

## 5 对实验事件“集体性”的分析

为揭示碰撞事件中有多少粒子参加了集体定向运动, 按照 Jiang 等人的方法<sup>[11]</sup>, 定义“集体性”参量  $\alpha$  为

$$\alpha = (M_1 / M) \times 100\%, \quad (7)$$

其中  $M$  是事件的多重数,  $M_1$  是该事件中参加集体定向运动的粒子数. 检测集合流的“集

其中  $PS(\psi_N)$  和  $PSM(\psi_N)$  分别表示实验事件和蒙特卡罗事件按  $\psi_N$  的分布几率. 由  $\psi_N$  的定义可知, 对于每一个碰撞事件,  $\psi_N$  不仅与粒子的方位角有关, 而且与粒子横向动量的大小有关,  $\psi_N$  包含较多的信息. 通过对整个  $0 \leq \psi_N \leq \pi$  区间上关联函数  $CS(\psi_N)$  的分布研究, 可以对集合流的强度与“集体性”进行定量地分析. 图3中  $N=3-10$  的带误差的圆点是对实验事件计算的  $CS(\psi_N)$ , 其核子的平均多重数  $\langle M \rangle = 16$ . 注意, 关联函数  $CS(\psi_N)$  在  $0 \leq \psi_N \leq \pi/2$  区间上的分布较整个区间上的分布更明显地反映了粒子群之间的关联程度. 随  $N$  值的增大,  $CS(\psi_N)$  与 1 的差值迅速增加, 因此, 可以用  $|CS(\psi_N) - 1|$  定量地检测粒子群之间的关联强度.  $CS(\psi_N)$  的分布包含了所有直到  $N$  个粒子群之间关联的累积效应. 受实验事件统计性的影响,  $N=10$  是实验样本分析所允许的最大值.  $N=9, 10$  时的  $CS(\psi_N)$  值在  $0 \leq \psi_N \leq \pi/6$  区间内的误差超过了 80%. 因此, 在

体性”方法是通过将  $N(N=2-10)$  个粒子群之间关联函数的蒙特卡罗结果与实验数据分析结果相比较而唯象地确定。具体步骤如下：

### 5.1 产生无集合流的蒙特卡罗事件

(1) 利用内核级联模型<sup>[19]</sup>, 产生碰撞参数为零的 Cascade 事件并进行挑选. 在这些事件中, 由于未包含核媒质态方程的效应, 因此没有集合流;

(2) 对所产生的 Cascade 事件分别进行相应上述实验事件的极角截断. 截断后, 经检验 Cascade 事件与实验事件多重数  $M$  的分布、单举横动量分布、快度分布是吻合的;

(3) 对应于实验事件, 因其碰撞参数  $b$  的范围是 0—5.0 fm, 故可以在  $b$  的范围内均匀而随机地重新定义 Cascade 事件的碰撞参数, 使之 5 倍于实验样本事件.

### 5.2 产生“集体性”为 $\alpha$ 的蒙特卡罗事件

在多重数为  $M'$  的 Cascade 事件中随机地选出  $M_1$  个粒子, 对每个粒子的横向动量在反应平面内的投影叠加大小为  $f_0 p_i^{\text{flow}} / \alpha$  的集体定向运动分量<sup>[11]</sup>. 其中  $f_0$  是控制流强弱的参量,  $i$  是粒子的序号, 且  $i \in [4, 23]$ ,  $\alpha = M_1 / M'$ . 下面对有关参数进行具体说明. 本文采用的  $p_i^{\text{flow}}$  形式如下<sup>[20]</sup>:

$$p_i^{\text{flow}} = A_i B_i u_i |\cos(\varphi_i)|, \quad (8)$$

其中  $A_i$  是第  $i$  个粒子的质量数,  $B_i$  定义为:

$$B_i = \sin^{2/3}(b / b_{\max}), \quad (9)$$

其中  $b$  是事件的碰撞参数,  $b_{\max} = R_p + R_t$ ,  $R_p$  和  $R_t$  分别是入射核与靶核的半径,  $u_i$  是在质心中第  $i$  个粒子的快度与入射核快度的比值,  $\varphi_i$  是该粒子横向动量与反应平面之间的夹角, (8)式唯象地描述了横向集合流对碎片的质量、快度、该碎片相对于反应平面的方位角以及碰撞参数之间的依赖关系. 当然, 这种描述不是唯一的, 然而, 这种表述却保证了每个事件的动量和能量守恒, 并和现有的实验数据近似一致<sup>[11, 20]</sup>.

确定  $f_0$  的方法是: 通过计算模拟集合流事件的每个核子横向动量在反应平面内投影的平均值随快度的分布  $\langle p_{\perp}^x \rangle$  或者  $CS(\psi_2)$  的分布, 使之与实验事件的  $\langle p_{\perp}^x \rangle$  或者  $CS(\psi_2)$  的分布相一致, 从而确定参数  $f_0$  的大小. 在本文中,  $f_0 = 200 \text{ MeV}$ .

### 5.3 推测实验事件集合流的“集体性”

调整参数  $\alpha$ , 在  $N=3-10$  的范围内, 使模拟几何流事件的  $CS(\psi_N)$  的分布与实验事件的  $CS(\psi_N)$  分布在现有的实验精度范围内相一致, 其结果如图 2 和图 3 中的折线及虚线所示. 折线及虚线对应点的误差大约是实验点误差的一半. 于是, 由图 2、图 3 得结论,  $\alpha$  的取值即为实验事件集合流“集体性”的推测值. 分析表明:  $\alpha$  的取值范围为 75%—95%.

另一方面, 采用文献 [11] 与 [16] 所介绍的方法, 比较了实验事件与蒙特卡罗事件的  $N$  粒子方位角关联函数  $C(\psi_N)$  与  $N$  粒子横向关联函数  $F(V_N)$ . 结果表明: 在估计的误差范围内,  $\alpha$  不小于 75%.

## 6 结 论

在相对论重离子碰撞末态,不仅粒子之间存在关联,而且粒子群之间也存在关联。基于文献 [3, 14] 方法,本文提出了粒子群关联概念,并以此建立了一种检测集合流的新方法。采用新方法对  $2.1A \text{ GeV Ne} + \text{NaF}$  碰撞的 Bevalac 流光室  $4\pi$  实验事件粒子群的关联进行了研究。通过与蒙特卡罗结果进行比较,推测该实验事件集合流的集体性约在 75%—95% 之间。由于“集体性”信息反映了集合流的本质特征,因此,寻求对“集体性”检测敏感的参量和提高其检测精度的方法已经成为集合流研究领域中非常有意义的课题。本文的研究结果,为深入探讨集合流的本质,定量检测其“强度”和“集体性”(更为狭窄的范围)提供了有效途径。

本项研究曾得到哈尔滨工业大学理论物理教研室的帮助,在此致谢!

## 参 考 文 献

- [1] M. Gyulassy *et al.*, *Phys. Lett.*, **110B**(1982)185.
- [2] P. Danielewicz, M. Gyulassy, *Phys. Lett.*, **129B**(1983)283.
- [3] P. Danielewicz, 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] 张伟刚, 广西工学院学报, **5**(1994)51.
- [7] G. M. Welke *et al.*, *Phys. Rev.*, **C38**(1988)2101.
- [8] H. H. Cutbrod *et al.*, *Phys. Lett.*, **216B**(1989)267.
- [9] S. Wang *et al.*, *Phys. Rev.*, **C44**(1991)1091.
- [10] 王山等, 高能物理与核物理, **14**(1990)907.
- [11] J. Jiang *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992)2739.
- [12] Liu Yiming *et al.*, *High Energy Phys. and Nucl. Phys.*, **18**(1994)167.
- [13] 刘亦铭等, 高能物理与核物理, **18**(1994)511.
- [14] P. Beccman *et al.*, *Mod. Phys. Lett.*, **A2**(1987)163;  
S. M. Kiselev, *Phys. Lett.*, **215B**(1989)262.
- [15] 刘庆军等, 高能物理与核物理, **16**(1992)801.
- [16] 刘庆军等, 高能物理与核物理, **17**(1993)912.
- [17] M. Vient, Ph. D. Thesis University of California Riverside, 1988.
- [18] 张伟刚, 硕士学位论文, 哈尔滨工业大学, 1993 年 3 月.
- [19] 张伟刚, 广西工学院学报, **7**(1996)5.
- [20] A. F. Barghouty *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A535**(1991)715.

## Particle-Group Correlations and Collectivity for 2.1A GeV Ne + NaF Collision

Zhang Weigang

(*Dean's Office of Guangxi College of Technology, Liuzhou 545005*)

Received 18 December 1996

### Abstract

A concept of particle-group correlations is proposed in this paper. In accordance with the new concept, a new method of collective flow measurement is constructed. Using the new method, the particle-group correlations arising from collective flow are studied with  $4\pi$  data for 2.1A GeV Ne + NaF collisions at the Bevalac streamer chamber. Comparing with the Monte Carlo results, the collectivity of the particles in the final state of this collision is inferred in the range from 75% to 95%.

**Key words** collective flow, collectivity, transverse motion correlations, particle-group correlations.