

高能重离子碰撞中末态粒子的关联度 与集合侧向流*

张 伟 刚

(广西工学院教务处 柳州 545005)

摘要 提出了关联度概念,采用粒子群关联函数方法对 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar + BaI₂ 碰撞事件中关联度不同的粒子对集合侧向流的作用进行了研究. 研究表明:关联度是描述集合侧向流性质的一个重要参量. 少数关联度较大的粒子(或碎片)可以产生集合侧向流效应,但高阶集合流关联却不受其支配,而是关联度不同的多数粒子(或碎片)集体贡献的结果.

关键词 集合侧向流 粒子群关联 高阶集合流关联 关联度

1 引言

相对论重离子碰撞实验中,对末态粒子形成的集合侧向流(以下简称集合流)研究是探讨核-核碰撞过程的动力学机制、检验各种微观模型有效性的重要途径^[1]. 根据末态粒子的动量分布,人们已经建立了多种有效的集合流分析方法,在理论研究与实验分析上均取得了重大进展. 具有代表性的方法如椭圆张量法^[2,3]、横向动量分析法^[4-8]、方位角分布函数法^[9,10]、方位角关联函数法^[11-13]、横向运动关联函数法^[14,15]以及粒子群关联函数法^[16,17]等. 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^[13-15]. 对粒子横向运动非对称性的描述既与“流参量”的选取有关,也与坐标系的选择有关. 如以流方向为 z 轴建立坐标系,则观测到的方位角分布的非对称性为最小^[18,19].

方位角关联函数法建立了通过粒子的横向集体关联研究集合流的思想,为从横向上定量分析集合流的性质(如强度与集体性)开辟了新的途径.

文献 [14, 15] 对 2.1A GeV Ne + NaF 和 1.2A GeV Ar + BaI₂ 碰撞实验的研究结果表明,这两组碰撞实验中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

1998-02-27收稿, 1998-07-20收修改稿

* 广西自然科学基金资助(项目编号:桂科青9811016)

着主要作用;并且,在相应的集合流分析中,采用非对称性参数 λ 和 λ_p 来定量描述粒子分布的方位角关联和横向动量模关联的强弱程度.

文献 [13]采用唯象的方法,定量研究了粒子分布的方位角关联对高阶集合流关联的作用.然而,由于只是利用了末态粒子的方位角信息而没有计及粒子的横向动量模因素,因而不能检测横向动量模对集合流的作用程度.

文献 [8]和 [16]虽然计及了粒子方位角和横向动量模两种因素,但未将其分离开来分析,因而也不能检测这两种因素对集合流及高阶集合流关联的作用程度.因此,寻求一种好的参量并采用适当的分析方法定量研究关联强弱程度不同的粒子对集合流及高阶集合流关联的作用,从而进一步揭示高阶集合流关联与集体性之间的内在联系是集合流研究领域中有意义的课题.

本文首先对实验事件及理论模型进行简介;然后,提出关联度概念,产生关联度不同的蒙特卡罗模拟事件;进而,对比分析实验事件中关联度不同的粒子对集合流及高阶集合流关联的作用;最后,给出本文的结论.

2 实验事件及理论模型简介

实验上,本文对 Bevalac 流光室的 4π 实验事件 $1.2A$ GeV Ar + BaI₂ 反应进行分析.关于实验的详尽描述可参见文献 [20]. 对于 Ar + BaI₂ 碰撞,共得到带电粒子的多重数大于 30 的事件 786 个. 对应于简单的几何图象,

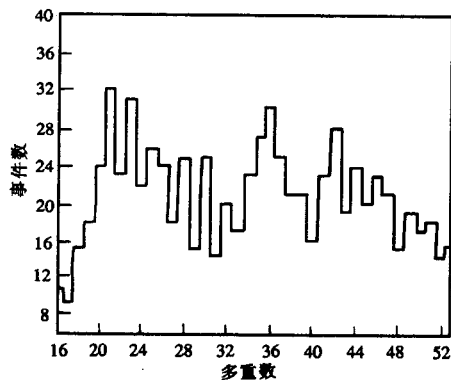


图1 经极角截断后Ar+BaI₂实验事件核子多重数的分布

其碰撞参数的范围是 0—6.0fm. 为了避免粒子质量鉴别的失误、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,对实验数据进行了极角截断:本文取 $\theta_{\text{lab}} > 8^\circ$ [11,17]. 于是,相应于该截断下的核子多重数 M 的取值范围为 16—53,平均多重数 $\langle M \rangle = 24$. 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.

理论上,本文采用 Cascade 模型 [21] 模拟实验中的集合流事件. 由于该模型没有包括在核-核碰撞中的压缩效果,故在其产生的碰撞事件中,集合流的效应很弱. 因此,在与实验事件比较之前,必须对 Cascade 事件进行处理 [8,16,17]. Cascade 模型是一个完全微观的核子-核子碰撞模型,它忽略了平均场的效果和量子效应,把核子作为一个经典的客体,该客体按相对论运动学沿直线轨道运动. 如果一个核子与另一个核子的距离小于 $\sqrt{\sigma_{\text{Total}}/\pi}$,它们之间将发生碰撞. 其中 σ_{Total} 是在实验中测量的自由粒子总截面. 对于每一次散射,动量和能量是守恒的,但是角动量不守恒. 已经证明,角动量不守恒的累积效果是小的 [22]. 在 Bevalac 能量区域, Cascade 模型是第一个与实验资料进行比较的完全微观的模型,近年来在集合流集体性分析中亦得到了很好的应用 [8,16,17].

3 关联度及蒙特卡罗模拟事件

在相对论重离子碰撞中, 末态粒子之间存在着多种形式的关联. 以往的碰撞事件分析表明, 粒子关联不是单个行为, 而是多数粒子的集体贡献^[11-17]. 因此, 反映粒子关联的量应与粒子对有关. 为了统一描述这些关联, 探讨高阶集合流关联的起因, 本文提出关联度的概念.

3.1 粒子关联度

末态粒子的横向运动不仅存在方位角关联, 而且还存在横向动量模的关联. 因此, 针对末态粒子的横向运动, 其关联度的形式化描述应该包括该粒子对的方位角(或方位角差)与横向动量模两种因素.

在多重数为 M 的碰撞事件中, 任取二个粒子构成一个粒子对. 设粒子对中两个粒子的横向动量模分别为 p_a^i 和 p_b^i , 方位角分别为 ϕ_a 、 ϕ_b , 则该粒子对的方位角差为 $\psi = |\phi_b - \phi_a|$. 为了定量描述粒子的关联性质, 本文定义碰撞事件中方位角差为 ψ 的第 i 个粒子对的关联度为

$$\beta_{i,\psi} = (p_a^i p_b^i) / \langle p^i \rangle^2, \quad (1)$$

其中 $\langle p^i \rangle$ 为碰撞事件中粒子的平均横向动量:

$$\langle p^i \rangle = (\sum p_k^i) / M, \quad (k = 1, 2, \dots, M), \quad (2)$$

在相对论核-核碰撞末态, 如果粒子对中的横向动量模都等于事件中粒子的平均横向动量, 则关联度 $\beta_{i,\psi} = 1$ 表示有一个方位角差为 ψ 的粒子对, 这时粒子之间的关联仅为方位角关联; 如果粒子的横向动量模偏离事件中粒子的平均横向动量 $\langle p^i \rangle$, 则关联度 $\beta_{i,\psi} \neq 1$ 表示考虑了粒子横向动量模关联后方位角差为 ψ 的加权粒子对数, 这时粒子之间的关联可以视为将粒子横向动量模加权后的方位角关联. 于是, 关联度 $\beta_{i,\psi}$ 越大, 则在该方位角差 ψ 范围内的加权粒子对数越多, 粒子之间的关联亦越强; 反之亦反. 据此, 通过研究 $\beta_{i,\psi}$, 可以定量分析整个 ψ 区间上的粒子关联性质. (1)式与文献 [14, 15] 中定义的变量 $W_{i,\psi}$ 的形式是一致的.

关联度的形式化描述可以有多种选择, 它既与“流参量”的形式有关, 也与坐标系的选择相关. 在一般情况下, 关联度的形式化表述可能比较复杂. 但在某些特定情况下, 依据问题的性质亦可选择少量或者单一的流参量简化关联度的表述形式. 于是, 关联度的定义形式与坐标系的选择, 将会直接影响对实验事件集合流的分析结果. 一般而言, 关联度越高, 则粒子之间的关联越强, 其值的大小表征了末态粒子在“流参量”相空间中相互聚集的程度. 对于特殊情况(如选取粒子对的方位角差作为流参量来定义关联度), 则可以通过适当的变换(如使关联度反比于粒子对的方位角差), 使关联度的数学形式满足上述要求.

3.2 产生蒙特卡罗模拟事件

蒙特卡罗方法是集合流研究中的重要方法. 在对比分析实验事件之前, 需产生蒙特卡罗模拟事件. 首先, 利用 Cascade 模型产生 5 倍于实验样本的无集合流的蒙特卡罗事件, 具体方法详见文献 [16]; 然后, 按照一定的条件, 对粒子的方位角与横向动量模进行唯象变换, 产生唯象集合流事件.

在多重数为 M 的无集合流的蒙特卡罗事件中, 随机地选取二个粒子构成一个粒子对, 其关联度 $\beta_{i,\psi}$ 如 (1) 式所示. 对于该粒子对, 按照以下步骤进行唯象变换:

(1) 角变换: 按照文献 [13] 所提出的方法, 如果该粒子对的方位角差 ψ 满足 $\pi/2 \leq \psi \leq \pi$, 则随机地旋转其中一个粒子的方位角.

(2) 模变换: 当粒子对的关联度 $\beta_{i,\psi} \leq 1$ 时, 对于该粒子对中小于或等于平均横向动量 $\langle p^{\perp} \rangle$ 的粒子, 将其横向动量模在反应平面内的投影叠加大小为 $f_0 p^{\text{low}}$ 的集体定向运动分量^[8, 13, 16, 17]. f_0 是控制集合流强度的参量, 文中取 $f_0 = 350 \text{ MeV}^{[17]}$, 关于 f_0 和 p^{low} 的确定方法参见文献 [8, 13, 16, 17].

于是, 经上述二次唯象变换, 可产生同时计及方位角关联与横向动量模关联的唯象集合流事件. 显然, 若取 $f_0 = 0$, 即为文献 [13] 的方法.

模变换的实质在于, 对具有某一关联度 (如 $\beta_{i,\psi} \leq 1$) 的粒子, 可将其横向动量模关联的作用转化为加权后的方位角关联之中; 这使得在方位角相空间中研究粒子横向动量模的关联成为可能, 且为研究粒子横向动量模的关联对集合流及高阶集合流关联的作用带来了方便.

4 对实验事件及蒙特卡罗事件的分析

在本文中, 分析关联度不同的粒子对集合流及高阶集合流关联的作用, 是通过比较粒子群关联函数的蒙特卡罗结果与实验数据而唯象地确定的.

4.1 粒子群关联函数

采用文献 [16] 提出的粒子群关联函数法对实验事件及蒙特卡罗事件进行分析. 这种方法的主要思想是: 将多重数为 M 的碰撞事件随机地分成 N 个粒子群, 各粒子群中的粒子数尽量一致. 对于每个粒子群, 定义群矢量为:

$$\mathbf{Q}_i = \left(\sum_{j=1} \omega_j p_j^{\perp} \right), \quad (i = 1, 2, \dots, N), \quad (3)$$

其中 p_j^{\perp} 为第 i 个粒子群中第 j 个粒子的横向动量, ω_j 的意义参见文献 [16, 17]. 因为 N 个 \mathbf{Q}_i 矢量对应着 N 个方位角 $\phi(\mathbf{Q}_i)$, 于是定义 N 粒子群关联角变量为:

$$\psi_N = \left(\prod \Delta\phi \right)^{1/K}, \quad K = (1/2)N(N-1), \quad (4)$$

其中 $\Delta\phi = \cos^{-1}[(\mathbf{Q}_i \cdot \mathbf{Q}_j) / (|\mathbf{Q}_i| \cdot |\mathbf{Q}_j|)]$, $0 \leq \Delta\phi \leq \pi$. 乘积符号 Π 是对 N 个粒子群可能形成的全部 K 个 $\Delta\phi$ 进行求积. 于是, 定义 N 粒子群关联函数为:

$$CS(\psi_N) = PS(\psi_N) / PSM(\psi_N), \quad (5)$$

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 ψ_N 的分布几率. 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^[4, 11-13]. 由 (4) 式可知, 角变量 ψ_N 包含了粒子的方位角和横向动量的大小两个方面的信息. 当关联阶 N 变化时, 通过对比分析实验事件与蒙特卡罗模拟事件的 $CS(\psi_N)$ 分布, 可以定量研究粒子关联度与集合流之间的相互关系.

4.2 两种事件的对比分析

图 2 中 $N = 2-10$ 的带误差的圆点是对实验事件计算的 $CS(\psi_N)$. $N = 10$ 是实验样

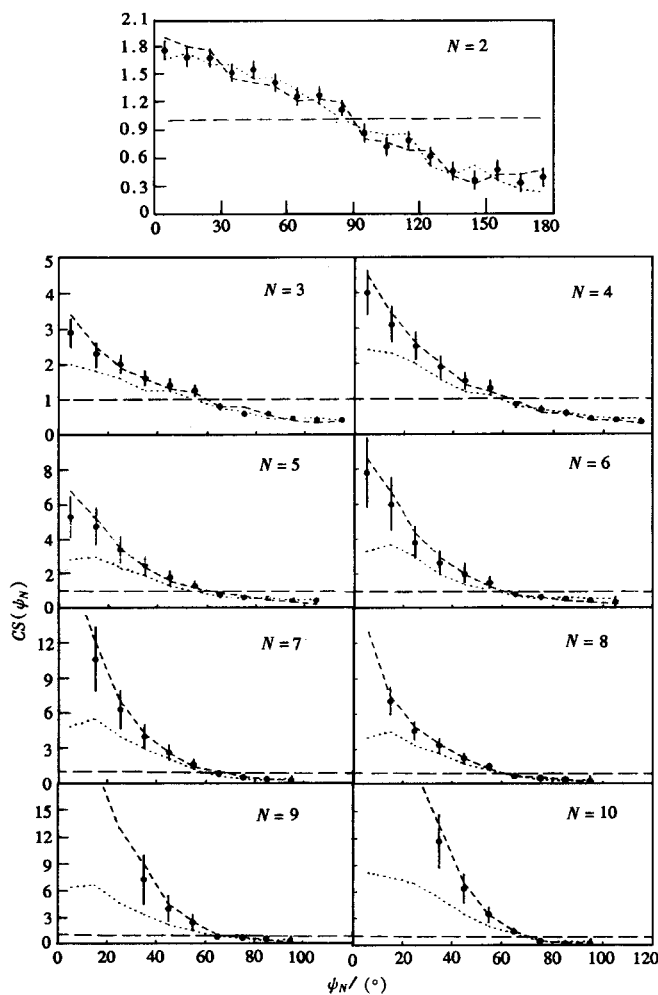


图2 $N=2-10$ 时关联函数 $CS(\psi_N)$ 的实验数据与蒙特卡罗数据的比较

●为实验数据; -----为唯象集合流数据; ----为集体性 $\alpha=85\%$ 时的蒙特卡罗数据.

本分析所允许的最大值. 由于 $N = 9, 10$ 时的实验事件的 $CS(\psi_N)$ 值在 $0 \leq \psi_N \leq \pi/6$ 区间内的误差超过了 80%. 因此, 在图 2 中, 对于 $N = 9, 10$ 的实验事件 $CS(\psi_N)$ 分析, 去掉了这部分的计算点. 关联函数 $CS(\psi_N)$ 的分布包含了所有直到 N 粒子群关联的累积效应, 它在 $0 \leq \psi_N \leq \pi/2$ 区间上的分布较整个 $0 \leq \psi_N \leq \pi$ 区间上的分布更明显地反映了 N 粒子群的关联程度.

对于加入唯象集合流以前的 Cascade 事件, 经计算 $CS(\psi_N) \approx 1$. 这一结果表明: 内核级联模型预言的集合流对 $CS(\psi_N)$ 随 ψ_N 变化的贡献可以忽略不计. 因此, 可以认为 $CS(\psi_N)$ 的特征主要是由集合流的强度、集体性的大小决定的. 那么, $CS(\psi_N)$ 是否与粒子的关联度有关系呢? 如果有, 关系又如何? 为了定量分析, 我们首先使唯象集合流事件与实验事件的 $CS(\psi_2)$ 的分布在统计误差范围内相符合; 然后, 将 $N = 3-10$ 时两种事件的 $CS(\psi_N)$ 的分布进行对比分析. 图 2 中 $N = 2-10$ 的虚线是对唯象集合流事件计算的 $CS(\psi_N)$, 虚线对应点的误差大约是实验点误差的一半.

研究表明, 按照本文 3.2 节介绍的方法, 经二次变换后产生的唯象集合流事件中, 当唯象变换具有关联度较大 ($\beta_{i,\psi} > 1$) 的粒子数占事件总粒子数的比率约为 30% 时, 即可使唯象集合流事件与实验事件的 $CS(\psi_2)$ 的分布在统计误差范围内相符合. 这说明, 唯象变换具有关联度较大 ($\beta_{i,\psi} > 1$) 的粒子数占事件总粒子数的比率有一个下界, 当唯象变换达到这一下界值时, 即可以产生与实验事件 $CS(\psi_2)$ 分布相一致的集合流效应. 但是, 仅仅从低阶关联函数 $CS(\psi_2)$ 的分布不能区分集合流效应是由少数关联度较大的粒子(或碎片)产生的, 还是由关联度不同的多数粒子(或碎片)集体贡献的结果. 为此, 在保持关联度 $\beta_{i,\psi} > 1$ 的粒子数占事件总粒子数的比率 30% 不变的基础上, 继续分析 $CS(\psi_N)$ 的变化. 当 $N = 3-10$ 时, 在 $0 \leq \psi_N \leq \pi/2$ 区间内, 两种事件 $CS(\psi_N)$ 的差值随着关联阶 N 的增大而迅速增大, 二者在此区间上 $CS(\psi_N)$ 的分布具有明显的差异. 这说明了一个重要事实: 少数关联度较大的粒子(或碎片)可以产生集合流效应, 但高阶集合流关联却不受其支配. 显然, 通过对比分析高阶粒子群关联函数 $CS(\psi_N)$, 可以判明集合流效应是来自于少数关联度较大的粒子的作用还是关联度不同的多数粒子集体的贡献.

另一方面, 按照文献 [16] 提出的方法, 我们产生了集体性为 a 的蒙特卡罗模拟事件. 调整 a 值, 在关联阶 $N = 2-10$ 的范围内, 使蒙特卡罗模拟事件的 $CS(\psi_N)$ 分布与实验事件的 $CS(\psi_N)$ 分布在统计误差范围内相一致. 分析表明: 该实验事件集合流的集体性 a 约在 80%—95% 之间. 并且, 两种实验事件的 N 粒子群关联函数 $CS(\psi_N)$ 的分布形式, 与文献 [16] 中的图 3 相类似. 作为实例, 图 2 用折线标出了集体性 a 为 85% 时对蒙特卡罗模拟事件计算的 $CS(\psi_N)$, 折线对应点的误差大约是实验点误差的一半. 经计算推知, 当 $a = 85\%$ 时, 在参与集体定向运动的粒子中, 关联度较大 ($\beta_{i,\psi} > 1$) 的粒子数与关联度较小 ($\beta_{i,\psi} \leq 1$) 的粒子数的比率约为 3.3:6.7. 这充分说明: 高阶集合流关联不受少数关联度较大的粒子(或碎片)支配, 而是关联度不同的多数粒子(或碎片)集体贡献的结果.

5 结论

本文提出了关联度概念, 基于文献 [13], 建立了一种新的唯象集合流事件模拟方法.

该模拟方法同时考虑了粒子分布的方位角关联和横向动量模关联. 采用粒子群关联函数方法对 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar + BaI₂ 碰撞中关联度不同的粒子对集合流的作用进行了研究. 研究表明: 少数关联度较大的粒子(或碎片)可以产生集合流效应, 但高阶集合流关联却不受其支配, 而是关联度不同的多数粒子(或碎片)集体贡献的结果. 通过将实验事件与蒙特卡罗模拟事件的高阶粒子群关联函数 $CS(\psi_N)$ 进行对比分析, 可以将二者区别开来.

采用文献 [16] 提出的方法, 通过与蒙特卡罗结果进行比较, 推测 1.2A GeV Ar + BaI₂ 实验事件集合流的集体性约在 80%—95% 之间.

关联度是描述集合流性质的一个重要参量, 其形式化描述既与“流参量”的形式有关, 也与坐标系的选择相关. 粒子关联度描述了末态粒子之间关联的性质, 它表征了粒子之间关联的强弱程度; 集合流的集体性揭示了参与集体定向运动的粒子数的百分比率, 它表征了粒子集体关联的范围; 集合流的强度反映了末态粒子集体定向运动的性质, 它表征了粒子集体关联的强弱程度. 集合流的强度、集体性、关联度从不同的层面揭示了集合流的性质. 集合流的强度反映了集合流的外在属性, 而集合流的集体性、关联度则揭示了集合流的内在本质. 因此, 深入探讨关联度的形式化表述将是集合流研究中的重要课题, 而定量分析上述三者之间的相互关系将对集合流的深入研究产生重要影响.

参 考 文 献

- 1 Stöcker H, Greiner W. Phys. Rep., 1986, **137**:277; Bertsch G F, Gupta S Das. Phys. Rep., 1988, **160**:189; Kampert K H, J. Phys., 1989, **G15**:691; Wang S et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **14**:2646
- 2 Gyulassy M, Fraenkel K A, Stöcker H, Phys. Lett., 1982, **110B**:185
- 3 Danielwicz P, Gyulassy M. Phys. Lett., 1983, **129B**:283
- 4 Danielwicz P, Odyniec G. Phys. Lett., 1985, **157B**:146
- 5 Doss K G R et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **57**:302
- 6 Beckmann P et al. Mod. Phys. Lett., 1987, **A2**:163
- 7 Liu Qingjun et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1992, **16**:801
(刘庆军等. 高能物理与核物理, 1992, **16**:801)
- 8 Liu Qingjun et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1993, **17**:912
(刘庆军等. 高能物理与核物理, 1993, **17**:912)
- 9 Welke G M et al. Phys. Rev., 1988, **C38**:2101
- 10 Cutbrod H H et al. Phys. Lett., 1989, **216B**:267
- 11 Wang S et al. Phys. Rev., 1991, **C44**:1091.
- 12 Wang Shan et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1990, **14**:907
(王 山等. 高能物理与核物理, 1990, **14**:907)
- 13 Jiang J et al. Phys. Rev. Lett., 1992, **68**:2739
- 14 Liu Yiming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1994, **18**:167
- 15 Liu Yiming et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1994, **18**:511
(刘亦铭等. 高能物理与核物理, 1994, **18**:511)
- 16 Zhang Weigang. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1997, **21**:911
(张伟刚. 高能物理与核物理, 1997, **21**:911)
- 17 Zhang Weigang. Guangxi Sciences, 1997, **4**:251
(张伟刚. 广西科学, 1997, **4**:251)

- 18 Huo Lei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, **20**:311
(霍雷等. 高能物理与核物理, 1996, **20**:311)
- 19 Huo Lei et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1996, **20**:812
(霍雷等. 高能物理与核物理, 1996, **20**:812)
- 20 Beavis D et al. Phys. Rev., 1986, **C33**:1113
- 21 Cugnon J et al. Nucl. Phys., 1982, **A379**:553
- 22 Bertsch G F, Gupta S Das. Phys. Rep., 1988, **160**:189

Correlative Degree and Collective Sideward Flow of Final State Particles in High Energy Heavy Ion Collisions *

Zhang Weigang

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

Abstract A concept of correlative degree is proposed in this paper. Using the method of particle-group correlation's function, the effects of the particles with different correlative degrees on collective sideward flow are studied for 1.2A GeV Ar + BaI₂ collisions at the Bevalac stream chamber. Our studies indicate that correlative degree is an important parameter on describing collective sideward flow properties. The minority of correlative particles (or fragments) with larger correlative degrees can produce the effect arising from the collective sideward flow, but the effect arising from high-order collective flow correlations can not be dominated by these minority of particles (or fragments). It is results from the collective contribution of the majority of collective particles (or fragments) with various correlative degrees.

Key words collective sideward flow, particle-group correlations, high-order collective-flow correlations, correlative degree

Received 27 February 1998, Revised 20 July 1998

* Supported by the Youth Science Foundation of Guangxi Province of the People's Republic of China under Contract/Grant No. GSY-9811016