

碰撞 1.2A GeV Ar+KCl 中的 n 粒子 横向关联与集体性

刘庆军 蒋玉桢 王 山 刘亦铭

(哈尔滨工业大学理论物理教研室 150006)

J. Jiang, D. Keane, Y. Shao

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

S. Y. Fung, S. Y. Chu

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

摘 要

我们给出了一种分析集合流的 n 粒子横向关联函数方法,把对 n 粒子方位角关联的研究和集体性的计算推广到能够同时利用横向动量大小和方位角信息的情形.对于确定集合流的集体性而言,这种方法比仅仅利用方位角信息的多粒子方位角关联方法更为敏感.采用这种新方法,分析了 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar+KCl 碰撞中 n 粒子的横向关联,与蒙特卡罗模拟结果的对比推算了该碰撞中末态粒子的集体性是介于 85%~95% 之间.

一、引 言

自 1974 年 Scheid^[1] 等人首次在理论上预言了集合流的存在,并指明通过研究集合流可以获得有关核媒质态方程的信息以来,人们相继提出椭球张量法^[2]、横向动量分析法^[3]、Beckmann 方法^[4]、方位角分布函数法^[5]以及粒子对关联法^[6]来分析集合流.迄今为止,大量的实验结果不但证明了集合流的存在,而且它们与理论模型预言的比较也增进了人们对核媒质态方程和相对论重离子反应机制的理解^[7].在上述诸方法中,流参量各自从不同的侧面反映了集合流的大小.最近, Jiang 等人^[8]发展了粒子对关联法,研究了 Bevalac 流光室 0.4A GeV Ar+Pb 碰撞中 n 粒子的方位角关联,推测了传统方法未曾揭示的集合流的一个基本特征——集体性.但文中 n 粒子方位角关联的研究和集体性的计算并没有利用横向动量大小的信息.本文的目的是把对 n 粒子方位角关联的研究和集体性的计算推广到能够同时利用横向动量大小和方位角信息的情形.为此,我们在第二节中给出了一种分析集合流的 n 粒子横向关联函数方法,其中的关联函数的自变量与 n 粒子横向动量大小和方位角都有关.在第三节中,对 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar+KCl 碰撞的

• 国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项基金和美国国家科学基金资助.

本文 1992 年 11 月 2 日收到.

实验事件作了简要的介绍,简述了本文产生蒙特卡罗模拟事件的方法.然后在第四节中,分析了该实验中 n 粒子的横向关联,并通过与蒙特卡罗模拟结果的比较推测了集体性的大小.最后,我们给出了本文的结论.

二、集体性和 n 粒子横向关联

相对论的核-核中心碰撞,会产生出高温度、高密度的火球态.假设在火球的质心系中向前发射的末态粒子数目是 M ,其中有 M_1 个粒子因核媒质态方程的作用而参与了集体定向运动.那么,集体性 α 定义为^[8]:

$$\alpha = (M_1/M) \cdot 100\%, \quad (1)$$

利用反应末态测得的横向动量矢量信息,人们基于如下的变量 W ,研究了 M 个粒子间的多粒子关联^[4,9]:

$$W = \left| \sum_{i=1}^M p_{\perp}(i) \right| / \sum_{i=1}^M |p_{\perp}(i)|, \quad (2)$$

其中的 $p_{\perp}(i)$ 表示第 i 个粒子的横向动量矢量. W 是集合流强度的一种度量,但是对横向动量求和的过程掩盖了该变量中所包含的有关集体性的信息.因此,应用文献[4]和文献[9]所介绍的方法不能确定集体性.

利用测得的方位角信息,文献[8]通过研究 M 个粒子中的 n 粒子方位角关联推算了集体性的大小.所选取的多粒子变量为:

$$\Psi_n = \left(\prod_{i=1}^n \Delta\phi \right)^{1/k}, \quad k = n(n-1)/2, \quad (3)$$

式中的乘积取遍由 n 个粒子构成的方位角差.

在本文中,为了把对 n 粒子方位角关联的研究、对集体性的计算推广到能同时利用横向动量的大小和方位角信息的情形,我们按照如下步骤来研究 M 个粒子中的 n 粒子横向关联.首先,在多重数为 M 的事件中挑选多重数为 n 的子事件,对于所挑选的每一个子事件计算如下的变量:

$$V_n = \left| \sum_{i=1}^n p_{\perp}(i) \right| / \sum_{i=1}^n |p_{\perp}(i)|, \quad (4)$$

其中的 $p_{\perp}(i)$ 表示第 i 个粒子的横向动量矢量. V_n 与 n 个粒子的横向动量的大小和方位角都有关,反映这群粒子的数目、横向动量的大小倾向发射程度的总体效果.然后分别计算从碰撞事件和背景事件中所挑选出的子事件按 V_n 的分布几率 $D(V_n)$ 和 $B(V_n)$,并参照干涉学中的关联函数^[10]定义,计算如下的 n 粒子横向关联函数:

$$F(V_n) = D(V_n)/B(V_n), \quad (5)$$

对于每个实验事件,在 0 到 2π 之间均匀而随机地重新定义事件中 M 个粒子的方位角而保持每个粒子的极角和横向动量大小不变,就得到相应的背景事件^[4].由于在背景事件中粒子间没有因集合流而引起的横向关联,因此考察 $F(V_n)$ 能够获得有关 n 粒子横向关联的信息.

从多重数为 M 的事件可构造 $\Xi = M! / (M-n)! n!$ 个 n 粒子的子事件.由于我们所

分析的样本的多重数是在一个较宽的区间上取值的,如果多重数不同的事件所贡献的每个 n 粒子的子事件的权重相同,那么,当 n 较大时,高多重数事件的贡献将远远地超过低多重数事件的贡献.为了克服这一困难,在实际的计算中,对多重数为 M 的事件所贡献的所有 n 粒子的子事件加权,权重因子为 M/\bar{M} ,从而保持每一个事件对最后结果的贡献正比于事件的多重数 $M^{[8]}$.

三、实验事件以及蒙特卡罗模拟事件

本文所分析的实验数据是来自于 Bevalac 流光室的 1.2AGeV Ar+KCl 碰撞,共有带电粒子多重数大于 30 的事件 571 个.对应于简单的几何图象,这些事件的碰撞参数的范围大约是在 0—3.6fm 之间.关于实验的详尽描述可参看文献[11,12].为了避免粒子质量鉴别的失误、靶的吸收、和粒子能量的损失这些实验因素^[13]对分析结果的影响,本文仅对火球质心系中向前发射的粒子群($y_{\text{Lab}} > y_{\text{c.m.}}$)进行 n 粒子横向关联分析,并且对该粒子群作了极角截断: $\theta_{\text{Lab}} \geq 5^\circ$.在下文中,相应于这些截断下的粒子多重数 M 的取值区间为 12—19,其平均值(\bar{M})为 15.

在本文中,实验样本的集体性将通过比较 n 粒子横向关联的蒙特卡罗结果与实验数据而唯象地确定.蒙特卡罗事件是按照文献[14]所介绍的横向集合流的参数化方法,在 Cascade^[15]事件中加入横向集合流而产生的.其步骤如下:

(1)在 0—3.6fm 这一碰撞参数区间上,产生统计数目两倍于实验样本的 Cascade 事件.在这些事件中,没有因核媒质态方程而产生的集合流.

(2)对 Cascade 事件作上述极角截断和快度截断.截断后,我们检验事件按照 M 的分布.这个分布与实验数据相吻合.

(3)对于所得到的多重数为 M 的事件,将其中每个粒子的横向动量在反应平面内的投影都叠加大小为 $f_0 p_i^{\text{flow}}$ 的集体定向运动分量^[8],这里的 f_0 是表征集合流强度的参数, i 是粒子的序号. p_i^{flow} 的表达式为^[14]:

$$p_i^{\text{flow}} = A_i B_{\text{in}} |\cos \phi_i|, \quad (7)$$

其中的 A_i 是第 i 个粒子的质量数; B 定义为:

$$B = \sin^{2/3}(\pi b/b_{\text{max}}), \quad (8)$$

式中的 $b_{\text{max}} = R_P + R_T$, R_P 和 R_T 分别表示入射核和靶核的半径, b 是该事件的碰撞参数; u_i 是在火球质心系下,粒子 i 的快度对入射束的快度的比值; ϕ_i 是这个粒子的横向动量跟反应平面之间的夹角.(7)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的依赖关系.这个描述能够保持每一事件的能量动量守恒,并和现有的实验数据近似一致^[8,14].当然,这种描述不是唯一的.调节参数 f_0 ,使得加入集体定向运动分量后的事件对集合流的描述(粒子对方位角关联函数 $C(\psi_2)$ ^[6]或者粒子横向动量在反应平面内投影的平均值作为快度的函数 $\langle p_{\perp}^2 \rangle(y)$ ^[3])与实验的结果基本一致.此时, f_0 的大小为 310MeV.

(4)为得到集体性为 α 、集合流强度为 f_0 的蒙特卡罗事件,我们在经步骤(2)得到的多重数为 M 的事件中,随机地选出 M_1 个粒子,并对每个挑选出的粒子(设其序号为 i),

将其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(按集体性的定义可得: $\langle M'_1 = \alpha M' \rangle^{[8]}$). 按照这种方式加入集体定向运动分量, 能够保证随着参数 α 变化, $C(\psi_2)$ 以及 $\langle p_\perp \rangle(y)$ 的蒙特卡罗结果仍与实验保持一致. 对于输入的 α 值, 若蒙特卡罗样本的横向关联函数 $F(V_n)$ 与相应的实验数据相符合, 那么这个 α 值就是该实验中末态粒子的集体性.

四、对实验事件和蒙特卡罗事件的分析

图 1(a)和图 1(b)分别表示 $n=9$ 和 $n=10$ 时, $F(V_n)$ 随 V_n 的变化情况. 其中的实心圆符号表示实验数据. 关联函数 $F(V_n)$ 的实验结果表明: $F(V_n)$ 的数值在 V_n 的定义域上并不是恒等于 1, 这说明在该反应的末态, 粒子间有横向关联. 另外, 当 $n \leq 9$ 时, $F(V_n)$ 是一个单调递增的函数, 并且随着 n 的升高, 它在 $V_n \approx 1$ 附近的数值变大; 当 $n=10$ 时, $F(V_n)$ 改变单调递增的性质, 在 $V_n \approx 1$ 附近开始下降.

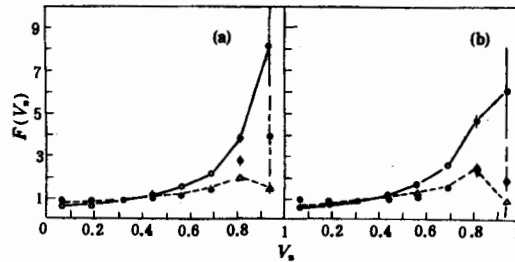


图 1 $F(V_9)$ (a 图)、 $F(V_{10})$ (b 图) 的实验数据与蒙特卡罗数据的比较

●表示实验数据; ○与△分别表示 $\alpha=95\%$ 和 $\alpha=85\%$ 时的蒙特卡罗数据.

对于加入唯象集合流以前的 Cascade 样本, $F(V_n) \approx 1$. 这一结果表明: 内核级联模型预言的集合流对 $F(V_n)$ 随 V_n 变化的贡献可以忽略不计. 因此, 可以认为 $F(V_n)$ 的特征仅仅是由集合流的强度, 集体性的大小决定的. 对于给定的 n , $F(V_n)$ 随着集体性、集合流强度的升高而变大. 对于给定集体性和集合流强度的样本, 随着 n 的升高, 存在着一个转折点 n_0 . 在 $n=n_0$ 时, 由于多粒子占有较大的相空间, $F(V_n)$ 改变单调递增性质, 在 $V_n \approx 1$ 附近, $F(V_n)$ 的数值开始下降.

保持 $f_0=310\text{MeV}$ 不变, 我们计算了 α 取不同值时 $F(V_n)$ 的蒙特卡罗结果, 并与实验数据进行对比. 图 1 中的空心圆符号(用实线连接)和空心三角符号(用虚线连接)分别表示在 $\alpha=90\%$ 和当 $\alpha=85\%$ 时 $F(V_n)$ 的蒙特卡罗数据. 计算结果表明: 当 $\alpha=85\%$ 时, $n_0=9$; 而图 1(a)则表明: 当 $\alpha=95\%$ 时 $n_0=10$. 所以, 函数 $F(V_n)$ 改变单调递增性质时的转折点 n_0 对集合流的集体性质是敏感的. 由图 1 我们结论, α 在 $85\% \sim 95\%$ 之间变化时, 在现有的实验精度的范围内, n 粒子横向关联的蒙特卡罗结果与实验数据相一致.

另一方面, 采用文献[8]所介绍的方法, 我们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 $C(\psi_n)$. 结果表明: 在估计误差的范围内, α 不小于 85% .

五、结 论

我们给出了一种分析集合流的 n 粒子横向关联函数方法. 该方法使用的变量类似 Beckmann 等人所使用的变量, 与 n 粒子的横向动量矢量的模以及它们的方位角都有关. 因而这个变量不仅包含有 n 粒子方位角的信息, 同时包含有 n 粒子横向动量模的信息. 我们把多重数为 M 的事件随机地选择成为 n 粒子的子事件群, 然后对于不同的阶数 n , 研究 n 粒子的横向关联. 从而把对横向动量求和过程中掩盖了的集体性的信息重新揭示出来. 本文所提出的方法把对 n 粒子方位角关联的研究和对集体性的计算推广到了能够同时利用横向动量的大小和方位角信息的情形.

在 n 的数值较低时, n 粒子子事件的关联函数 $F(V_n)$ 是一个单调递增的函数. 随着 n 的升高, 存在着一个转折点 n_0 , 使得在 $V_{n_0} \approx 1$ 附近, $F(V_{n_0})$ 的数值开始下降. 蒙特卡罗模拟结果表明, 该转折点对集合流的集体性是敏感的. 我们分析了 Bevalac 流光室 1.2A GeV Ar+KCl 碰撞中 n 粒子的横向关联, 将实验结果与蒙特卡罗模拟结果相比较推断出该反应中末态粒子的集体性约在 85%—95% 之间. 这一集体性的结果与仅仅使用方位角信息获得的结果 ($0.85 \leq \alpha \leq 1$) 相比较, 由于我们的分析除了包含方位角信息以外, 也包含了横向动量模的信息, 具有了更多的约束, 因而在事件统计数相同的条件下, 提供了更为狭窄的确定集体性的区间.

参 考 文 献

- [1] W. Scheid et al., *Phys. Rev. Lett.*, **21**(1974), 741.
- [2] M. Gyulassy et al., *Phys. Lett.*, **110B**(1982), 185.
H. A. Gustafsson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 1590.
- [3] P. Danielewicz, G. Odyniec, *Phys. Lett.*, **157B**(1985), 146.
- [4] P. Beckmann et al., *Mod. Phys. Lett.*, **A2**(1987), 163.
P. Beckmann et al., *Mod. Phys. Lett.*, **A2**(1987), 169.
- [5] G. M. Welke et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 2101.
- [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] H. Stocker, W. Greiner, *Phys. Rep.*, **137**(1986), 277.
G. F. Bertsch, S. Das Gupta, *Phys. Rep.*, **160**(1988), 189.
K. H. Kampert, *J. Phys.*, **G15**(1989), 691.
- [8] J. Jiang et al., *Phys. Rev. Lett.*, **68**(1992), 2739.
- [9] 刘庆军等, *高能物理与核物理*, **16**(1992), 801.
- [10] Y. M. Liu et al., *Phys. Rev.*, **C34**(1986), 1667.
- [11] S. Y. Fung et al., *Phys. Rev., Lett.*, **40**(1978), 292.
- [12] D. Beavis et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 2443.
- [13] M. Vient. Ph. D. Thesis, University of California, Riverside, (1988).
- [14] A. F. Barghouty, G. Fai, D. Keane, *Nucl. Phys.*, **A535**(1991), 715.
- [15] J. Cugnon et al., *Nucl. Phys.*, **A379**(1982), 553.

n -Particle Transverse Correlation and Collectivity for Collisions 1.2 A GeV Ar+KCl

LIU QINGJUN JIANG YUZHEN WANG SHAN LIU YIMING

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

J. JIANG D. KEANE Y. SHAO

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

S. Y. FUNG S. Y. CHU

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

ABSTRACT

A method of n -particle transverse correlation function for the study of collective flow is proposed, which extends both the study of n -particle azimuthal correlations and the estimation of collectivity to the study including the magnitudes as well as the azimuthal angles for all the n -particle transverse momentum vectors. This method is more sensitive to the collectivity of collective flow than the method based on multi-particle azimuthal correlations. Using the new method, n -particle transverse correlations are analyzed for collisions of 1.2 AGeV Ar+KCl in the Bevalac streamer chamber, and the results have been compared with a Monte-Carlo simulation, which show that the collectivity for this experiment is between 85% and 95%.