

# 多粒子方位角关联与核媒质状态方程\*

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, 哈尔滨 150006)

D. KEANE

(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

在 Beckmann 方法的基础上, 本文给出了一种定量分析高能重离子碰撞中多粒子方位角关联的新方法. 分别采用 Beckmann 方法和这种新方法, 分析了 Bevalac 流光室中的  $1.2A$  GeV Ar + KCl 实验中核子的多粒子方位角关联, 并和 VUU 模型的理论预言作了比较. 新方法能够检测核媒质态方程的软硬度.

## 一、引 言

人们研究高能重离子碰撞的目的之一就是要了解高温度、高密度的核媒质的特性, 确定核媒质的状态方程. 迄今为止, 理论预言和实验研究结果都表明: 在重离子碰撞末态, 粒子的集合流变量是唯一地研究核媒质的压缩特性的有效的观测量<sup>[1]</sup>. 为了深入地研究集合流, 充分利用在反应末态测得的多粒子信息是十分必要的. 人们曾提出椭圆张量法<sup>[2]</sup>、横向动量分析法<sup>[3]</sup>、方位角分布函数法<sup>[4]</sup>和粒子对关联法<sup>[5]</sup>来分析集合流. 在这些方法中, 集合流参量分别是流角、粒子的横向动量在反应平面内投影的平均值和末态粒子按方位角分布的最大非对称性. 它们各自从不同的侧面描述了集合流的特征. Beckmann 方法<sup>[6]</sup>是基于对碰撞事件中的多粒子关联的研究来分析集合流的, 该方法能够充分地利用测得的多粒子横向动量信息. 但由于缺少一个适宜的反映集合流特征的参量, 人们至今还不曾把它应用于核媒质态方程的研究. 因此, 本文首先应用 Beckmann 方法来分析反应  $1.2A$  GeV Ar + KCl 中核子的多粒子方位角关联, 并将实验结果与 VUU 模型的理论预言进行比较. 然后, 发展 Beckmann 方法, 提出一种定量地研究高能重离子碰撞中的多粒子方位角关联的新方法, 并应用这种新方法检测核媒质状态方程的软硬度.

本文 1991 年 9 月 26 日收到.

\* 国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金和美国国家科学基金资助.

## 二、VUU 模型和实验简介

VUU 模型<sup>[1]</sup>是基于 Vlasov-Uehling-Uhlenbeck (VUU) 量子输运方程建立起来的,它并不是该方程的直接数值解,而是它的蒙特卡罗模拟。VUU 模型的核心是内核级联模型<sup>[2]</sup>,同时还假设核子在运动中会受到核媒质所形成的平均势场的作用,并考虑了泡利不相容原理对核子-核子之间碰撞散射截面的修正。在不考虑动量相关的条件下,在 VUU 模型中所采用的定域密度相关的平均场为:

$$U(\rho) = a\rho + b\rho^c, \quad (1)$$

$\rho$  是核子密度,  $a, b, c$  是常数,  $a$  和  $b$  由核平衡条件决定,  $c$  由核媒质压缩模数决定。相应于  $c = 2$  和  $c = 7/6$ , 核媒质的压缩模数分别为  $K = 380\text{MeV}$  和  $K = 200\text{MeV}$ , 通常分别称为“硬核媒质”与“软核媒质”。

在实验上,本文对 Bevalac 流光室内的  $1.2A$  GeV Ar + KCl 实验进行分析,采用带电粒子多重数大于 30 的事件共 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  $0-3.6\text{fm}$  之间。关于实验的详尽描述可参考文献[9]。在理论上,本文采用 VUU 模型模拟反应  $1.2A$  GeV Ar + KCl 时,在“软核媒质”与“硬核媒质”两种情况下所产生的事件数分别为实验样本的 5 倍。在进行理论分析之前,为了能够得到有意义的结果,还应对 VUU 数据进行处理。在处理的过程中,我们主要考虑粒子鉴别的失误、轨迹的漏测、靶的吸收以及核子能量的损失等因素<sup>[3,5]</sup>。

## 三、应用 Beckmann 方法的分析

Beckmann 方法是通过研究在质心系中向前与向后发射的两粒子群内、这两粒子群之间以及在整体事件中的多粒子方位角关联来分析集合流的。在这种方法中,Beckmann 等人首先定义了如下的多粒子变量:

$$W_s = \frac{\sum_i^{m_s} p_i^x}{\sum_i^{m_s} |p_i^x|}, \quad (2)$$

$$W_s = |W_s|, \quad (3)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left[ \frac{W_f \cdot W_b}{W_f \cdot W_b} \right], \quad (4)$$

其中  $s = f, s = b, s = g$  分别表示向前发射、向后发射的粒子群和整体事件;  $m_s$  表示相应粒子群内带电粒子的数目;  $p_i^x$  表示  $m_s$  个粒子中的第  $i$  个粒子的横向动量。然后引入了下述关联函数  $\Delta(W_s)$ 、 $R(W_s)$  和分布函数  $F$ :

$$\Delta(W_s) = D(W_s) - B(W_s), \quad (5)$$

$$R(W_s) = \frac{D(W_s) - B(W_s)}{D(W_s) + B(W_s)}, \quad (6)$$

$$F = D(\alpha), \quad (7)$$

其中  $D(W_i)$  和  $B(W_i)$  分别表示实验事件和背景事件的  $W_i$  的分布;  $D(\alpha)$  表示实验事件的  $\alpha$  的分布. 相应于每一个实验事件, 在 0 到  $2\pi$  之间均匀而随机地重新定义事件中各个粒子的方位角, 而保持它们的极角和横向动量值的大小不变, 就得到其背景事件. 在背景事件中, 粒子之间没有由集合流引起的多粒子方位角关联<sup>[6]</sup>.

图 1 所示为  $D(W_i)$  与  $B(W_i)$  的实验结果. 图中空心圆和实心圆分别表示  $B(W_i)$  和  $D(W_i)$  的实验数据, 实线和虚线分别表示相应于  $B(W_i)$  和  $D(W_i)$  的实验数据的最佳拟合曲线. 根据(2)式和(3)式,  $W_i$  的大小能够反映出向前发射的粒子群中粒子的数目及其横向动量在  $W_i$  所定义的方位角方向上倾向发射程度的总体效果.  $W_i$  越大, 则这种倾向发射的总体效果越大, 即多粒子方位角关联越强, 集合流效应越显著, 反映在  $D(W_i)$  曲线上, 即  $W_i$  的最可几值也越大. 由于从每一碰撞事件和背景事件计算得的随机变量  $W_i$  的大小还会受到粒子鉴别的失误、轨迹的漏测、靶的吸收以及核子能量的损失等实验因素的影响, 所以, 仅根据  $D(W_i)$  的计算结果 ( $W_i$  的最可几值) 无法准确地判断反应中是否产生了集合流, 这也是图 1 中的  $B(W_i)$  所示的  $W_i$  的最可几值不为零的原因. 图 1 所示的  $D(W_i)$  与  $B(W_i)$  的差别表明: 在碰撞两核的质心系中向前发射的粒子群内, 粒子之间有由于集合流引起的多粒子方位角关联; 在该反应中产生了集合流.

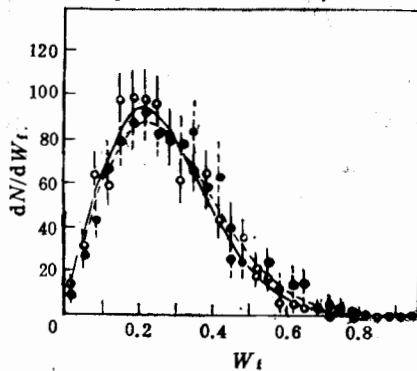


图 1 碰撞 1.2A GeV Ar + KCl 的  $D(W_i)$  和  $B(W_i)$  的实验曲线  
—○—  $B(W_i)$  —●—  $D(W_i)$

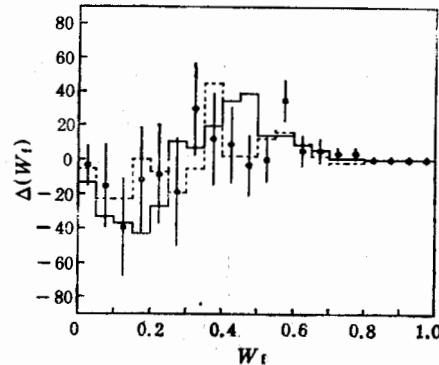


图 2 碰撞 1.2A GeV Ar + KCl 的多粒子方位角关联函数  $\Delta(W_i)$   
—hard —soft

图 2 给出了关联函数  $\Delta(W_i)$  的实验数据, 同时分别用实线直方图和虚线直方图标明了 VUU 模型硬核媒质及软核媒质的相应曲线. 可以看到, VUU 模型能够在理论上预言集合流的多粒子方位角关联, 但是在目前实验统计的精度范围内, 还不能将该模型在软核媒质与硬核媒质两种情形下的理论预言跟实验结果明显地区分开来. 我们还分别计算了在整个事件中的多粒子方位角关联函数  $\Delta(W_i)$ 、在碰撞两核的质心系中向前与向后发射的两粒子群之间方位角关联的分布函数  $F$ , 并将理论预言与实验结果作了比较. 我们的结论是: Beckmann 方法检测到反应 1.2A GeV Ar + KCl 中集合流的存在, 但由于实验统计的限制, 不能给出定量的关于核媒质状态方程的信息.

#### 四、发展后的 Beckmann 方法及相应的数据分析

为了能够在现有的事件统计下,从多粒子方位角关联的角度来定量地研究横向集合流,以便获得定量的关于高温、高密度条件下核媒质态方程的信息,本文作了如下的尝试。

首先引入变量  $\nu$ ,以描述多粒子方位角关联对 Beckmann 变量贡献的大小,其定义为:

$$\nu = W^E - W^B \quad (8)$$

其中  $W^E$  和  $W^B$  分别表示实验事件和对应的背景事件的 Beckmann 变量。由于  $W^E$ 、 $W^B \in [0, 1]$ ,所以  $\nu \in [-1, +1]$ 。然后,为了观察随机变量  $\nu$  的统计特征,引入如下的分布函数:

$$N(\nu) = \kappa \frac{dn}{d\nu}, \quad (9)$$

即  $N(\nu)$  定义为事件数按照  $\nu$  的分布,式中的  $\kappa$  为归一化常数。

由于根据实验数据计算得的分布函数  $N(\nu)$  的曲线呈高斯形状,又由于高斯分布是随机事件的一种常见的分布,可假设其为高斯函数:

$$N(\nu) = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{(\nu - \lambda)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (10)$$

则用高斯函数拟合来自实验数据的  $N(\nu)$  便可求得  $\lambda$  和  $\sigma$ 。  $C_0$  是归一化因子,  $\lambda$  与  $\sigma$  分别表示  $\nu$  的最可几值和均方差。在此,作为分布函数曲线的特征值,  $\lambda$  和  $\sigma$  分别表示相对于背景事件而言,多粒子方位角关联对 Beckmann 变量的贡献的最可几效果与扩展程度。

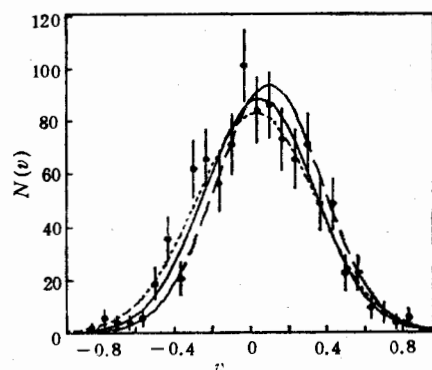


图3 碰撞 1.24 GeV Ar + KCl 的  $N(\nu)$  拟合曲线(快度截断为  $y \geq 0.75 y_{\text{beam}}$ )

——hard -----soft

以往的研究结果<sup>[3-5]</sup>表明,在  $y \geq 0.75 y_{\text{beam}}$  这个快度区间上,特征参量对集合流和核媒质态方程都具有较高的灵敏度。又因为在此快度区间上, VUU 模型能够给出和实验符合得非常好的单举分布,并且探测器的有效性较好,所以由该区间的粒子出发来唯象地研究核媒质的压缩特性能够得到更有意义的结论。因此,本文采用分布函数  $N(\nu)$  对  $y \geq 0.75 y_{\text{beam}}$  上核子的多粒子方位角关联进行分析。在图3中,给出了分布函数  $N(\nu)$  的实验拟合曲线(实线),同时分别用点虚线和虚线表明了 VUU 模型硬核媒质及软核媒质的相应曲线。表1给出

了拟合结果。在表1中所给出的三个曲线拟合的置信度都在1.0附近,这证明在现有的实验条件和事件统计下,本文就多粒子方位角关联特性所作的先验高斯假定是合理的。对应于图3中三条曲线的  $\lambda$  都大于零,这一方面说明这群粒子之间有方位角关联,使得它

表 1 碰撞 1.2A GeV Ar + KCl 中的  $\lambda$  和  $\sigma$  值及置信度  $\chi^2/\text{NDF}$   
(快度截断为  $y \geq 0.75 y_{\text{beam}}$ )

	实 验	VUU 模型	
		硬核媒质	软核媒质
$\lambda$	$0.05 \pm 0.01$	$0.10 \pm 0.01$	$0.03 \pm 0.01$
$\sigma$	$0.29 \pm 0.01$	$0.28 \pm 0.01$	$0.31 \pm 0.01$
$\chi^2/\text{NDF}$	24/30	29/30	27/30

们在方位上有一个倾向的发射方向,另一方面也表明 VUU 模型能够在理论上预言这种多粒子方位角关联的存在。另外,由列于表 1 的  $\lambda$  和  $\sigma$  值以及图 3 可以看到:在 VUU 模型的理论框架下, $\lambda$  和  $\sigma$  的实验值是介于理论的两种预言值之间。因此,在现有的实验统计下,本文所发展的新方法可以检测核媒质态方程的软硬度。

由于压缩模量  $K$  由 200MeV 增加到 380MeV 时, $\lambda$  值约增加 2 倍,因而对于通过研究集合流来确定核媒质态方程而言, $\lambda$  是一个对核媒质态方程较为敏感的参量。

## 五、结 论

应用 Beckmann 方法以及本文所给出的新方法,我们分析了 1.2A GeV Ar + KCl 碰撞的实验事件及 VUU 模型的理论模拟事件。在现有的事件统计下所得到的结论如下:(1)应用 Beckmann 方法的分析测量到在反应中集合流的存在,但由于事件的统计数目较低,没有得到定量的有关核媒质状态方程的信息。(2)在本文给出的新方法中,通过数值拟合求得  $\lambda$  和  $\sigma$  这两个反映多粒子方位角关联特性的参量,从而对横向集合流给出了一种定量的描述。采用该方法的分析表明:在 VUU 模型的理论框架下,特征参量  $\lambda$  是对核媒质态方程较为敏感的参量,核媒质的压缩模量大约是介于 200MeV—380MeV 之间。

## 参 考 文 献

- [1] K. H. Kampert, *J. Phys.*, **G15**(1989), 691.  
刘亦铭,核物理动态,**6**(1989),30.
- [2] M. Gyulassy et al., *Phys. Lett.*, **110B**(1982), 135.  
P. Danielewicz and M. Gyulassy, *Phys. Lett.*, **129B**(1983), 283.
- [3] P. Danielewicz and G. Odyniec, *Phys. Lett.*, **157B**(1985), 146.  
D. Keane et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 1447.
- [4] G. M. Welke et al., *Phys. Rev.*, **C38**(1988), 2101.  
H. H. Gutbrod et al., *Phys. Lett.*, **216B**(1989), 267.
- [5] 王山等,高能物理与核物理,**14**(1990),907.  
S. Wang et al., *Phys. Rev.*, **C44**(1991), 1097.
- [6] P. Beckmann et al., *Mod. Phys. Lett.*, **A2**(1987), 163.  
P. Beckmann et al., *Mod. Phys. Lett.*, **A2**(1987), 169.  
S. M. Kiselev, *Phys. Lett.*, **216B**(1989), 262.
- [7] H. Kruse et al., *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 289.

- J. J. Molitoris et al., *Phys. Rev.*, **C37**(1988), 1014.  
[8] J. Cugnon, *Phys. Rev.*, **C22**(1980), 1885.  
[9] S. Y. Fung et al., *Phys. Rev. Lett.*, **40**(1978), 292.  
D. Beavis et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 2443.

## Multi-Particle Azimuthal Correlations and the Nuclear Equation of State

LIU QINGJUN    JIANG YUZHEN    WANG SHAN    LIU YIMING

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

D. KEANE

(*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

Based on the Beckmann method, a new quantitative method for the study of multi-particle azimuthal correlations is proposed. Collisions of 1.2A GeV Ar+KCl in the LBL streamer chamber are analyzed with this new method and the original Beckmann method, respectively. The experimental results have been compared with the Vlasov-Uehling-Uhlenbeck model predictions for different nuclear equations of state. Using the new method, the incompressibility of nuclear matter can be estimated.