

## 57MeV/u $^{64}\text{Zn} + ^{27}\text{Al}$ 反应中集体流的研究\*

贺智勇<sup>1)</sup> J. Peter<sup>2)</sup> J.C. Angelique<sup>2)</sup> G. Bizard<sup>2)</sup> R. Brou<sup>2)</sup> D. Cussol<sup>2)</sup>  
A. Kerambrun<sup>2)</sup> J.P. Patry<sup>2)</sup> R.Regimbart<sup>2)</sup> J.C. Steckmeyer<sup>2)</sup> B. Tamain<sup>2)</sup>  
E. Vient<sup>2)</sup> G. Auger<sup>3)</sup> C. Cabot<sup>3)</sup> E. Crema<sup>3)</sup> A. Peghaire<sup>3)</sup> F. Saint-Laurent<sup>3)</sup>  
M. Gonin<sup>4)</sup> K. Hagel<sup>4)</sup> R. Wada<sup>4)</sup> P. Eudes<sup>5)</sup> C. Lebrun<sup>5)</sup> E. Rosato<sup>6)</sup>  
Y. El Masri<sup>7)</sup>

- 1) (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)
- 2) (LPC Caen, ISMRA, IN2P3-CNRS, F-14050 Caen, France)
- 3) (GANIL, BP5027, F-14021 Caen, France)
- 4) (Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, TX77843, USA)
- 5) (LPN, Universite de Nantes, 44072 Nantes Cedex 03, France)
- 6) (Dipartimento di Scienze Fisiche, Universita di Napoli, I-80125 Naples, Italy)
- 7) (UCL, Louvain-la-Neuve, Belgium)

1993年4月19日收到

### 摘 要

报道了利用  $4\pi$  带电粒子阵列测量的 57MeV/u 的  $^{64}\text{Zn}$  轰击  $^{27}\text{Al}$  反应中的集体物质流。各事件的碰撞参数分类采用平均平行速度方法,反应平面的确定采用横向动量分析方法。实验观察到在反应平面内的集体横向动量(边流参数)随着碰撞参数和粒子产物而变化。

**关键词** 集体流,碰撞参数,平均平行速度,反应平面,横向动量分析。

### 1 引 言

利用重离子碰撞可以产生高温高密度的核物质,甚至模拟宇宙产生初期的状态。在重离子核-核碰撞中有大量核子和集团发射,这些核子和集团在反应平面内的直接集体运动(集体流)最能体现出相互作用的特征。研究集体流最早是在高能重离子碰撞中开始的<sup>[1]</sup>,并已有大量实验证据。在高能区,相互作用以核子-核子碰撞占主导,粒子受压缩区内的排斥力而散射到正角,集体流显示为正值。相反,在几十 MeV/u 的中能区,相互作用以吸引的平均场占主导,碎片被偏转到负角而将显示出负流。随着轰击能从低至高的变化,相互作用由平均场为主逐渐转向两体碰撞为主,集体流也将从负逐渐向正变化。用理论计算结合实验结果来系统地研究核物质集体流,可以研究反应动力学、热核物质的粘滞

\* 中国科学院留学经费择优支持基金资助。

性和压缩性、以及核物质状态方程。

在中能区,集体流的实验研究还不多。C. A. Ogilvie 等人<sup>[2]</sup>研究了中心碰撞下的 $^{40}\text{Ar}$  轰击 $^{51}\text{V}$  出射的轻粒子 (P、d、t、 $\alpha$ 、Li) 的集体流, J. P. Sullivan 等人<sup>[3]</sup>研究了 $^{40}\text{Ar}$  轰击 $^{27}\text{Al}$  出射的质子、 $\alpha$  粒子的集体流。本实验选用 $^{64}\text{Zn}$  轰击 $^{27}\text{Al}$ , 其系统总电荷均略高于前二者,采用与 $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$  实验中类似的测量和分析方法,来观察集体流在该反应中是否存在或消失,并进一步研究集体流大小随碰撞参数和出射碎片的变化规律。

## 2 实验概况

实验是在法国 GANIL 加速器上进行的,采用  $57\text{MeV/u}$  的 $^{64}\text{Zn}$  束轰击 $^{27}\text{Al}$  靶。和 $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$  反应的研究<sup>[3]</sup>一样,带电粒子的探测和鉴别是由近  $4\pi$  测量的两套多重探测器完成的。前角  $3^\circ - 30^\circ$  间由塑料闪烁体墙 MUR<sup>[4]</sup> 覆盖,中后角  $30^\circ - 150^\circ$  间用塑料闪烁体桶 TONNEAU<sup>[5]</sup> 覆盖(文献[3]中,只用了 TONNEAU 的一半覆盖  $30^\circ - 90^\circ$  之间)。两套多重探测器均能很好地测量出粒子的速度,也能很好地分辨出所有粒子的位置 ( $\theta, \varphi$ )。探测器的粒子鉴别是通过测量粒子的飞行时间和在闪烁体中的能损来进行的,  $Z = 1 - 8$  的粒子均能分开,粒子的质量根据其电荷值来确定。  $Z > 8$  的粒子无法分辨开。对于 $^{64}\text{Zn} + ^{27}\text{Al}$  这样轻的逆反应系统,中后角出射的  $Z > 8$  的重碎片几乎没有,它们主要在前角出射。因此,与文献[3]相比,主要的改进是在前角增加了七套大立体角的半导体硅望远镜(靶距  $65\text{cm}$ , 面积为  $100\text{mm}^2 - 2500\text{mm}^2$  不等)来测量重碎片。其中五套置于  $4.3^\circ, 7.3^\circ, 10.9^\circ, 16.0^\circ, 22.0^\circ$ , 另两套在  $28.5^\circ$ 。每套望远镜均由薄片  $\Delta E$  ( $300$  或  $500\mu\text{m}$ ) 和厚片  $E$  ( $3$  或  $6\text{mm}$ ) 组成。粒子的鉴别通过测量在  $\Delta E$  中的能损和  $E$  中的能量进行。七套望远镜均能鉴别到  $Z = 30$  的粒子。实验数据的获取是以望远镜作触发的,即只有当七套望远镜探测到碎片时, $4\pi$  探测器测到的该事件的所有粒子才被记录下来。

## 3 数据分析

### 3.1 好事件的挑选

对集体流的研究需要探测每个事件中的所有粒子。在该探测系统中,没有测量中子,由于前角  $0^\circ$  至  $3^\circ$  间缺乏探测器,一部分带电粒子也被丢失了。因此,数据分析的第一步是扔掉那些信息测量不全的事件。图 1 所示为测到的每个事件的多重性和总平行动量间的二维等高图,其中横坐标为一事件中所测到的总平行动量与弹核动量之比。图中低多重性-低平行动量那个峰是信息测量不全的事件(坏事件),需要扔掉。这些事件大多是周边反应事件,即一大块类弹碎片在  $0^\circ$  至  $3^\circ$  间逃掉了。因此,要求探测粒子的总平行动量大于弹核动量的  $55\%$ ,如图中虚线所示。这样,保留了中心碰撞和半周边碰撞事件,扔掉了一些周边碰撞事件。

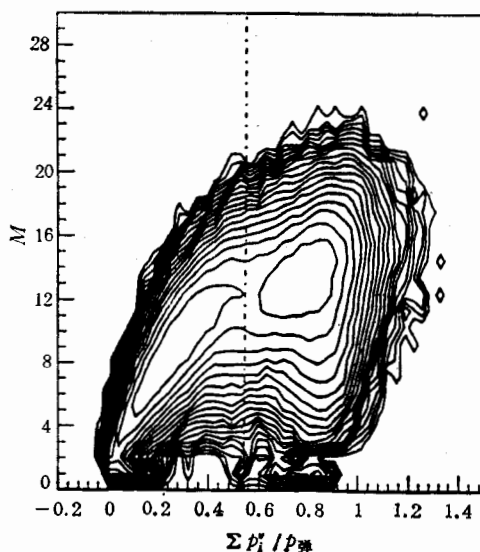


图1 事件的多重性和总平行动量间的二维等高图

### 3.2 根据碰撞参数对事件进行分类

该实验测量的一大优点是精确地测出了粒子的速度。与文献[3]数据处理一样,我们利用平均平行速度方法来确定事件的碰撞参数。平均平行速度  $v_{av}$  定义为<sup>[6]</sup>:

$$v_{av} = \frac{\sum_{i=1}^M m_i \gamma_i v_i \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^M m_i \gamma_i}, \quad (1)$$

式中  $m_i$  是质量,  $v_i$  是实验室系速度,  $\theta_i$  是实验室系极角,  $\gamma_i$  是相对论约化因子,  $M$  为该事件测到的粒子数。对于周边碰撞,弹核参加反应的部分较小,类靶碎片及其发射出的粒子低于探测器的速度阈而探测不到,得到的  $v_{av}$  接近弹核速度  $v_p$ 。对于中心碰撞,靶核中几乎所有核子都和弹核参加了反应,均能被探测到,得到的  $v_{av}$  接近于质心系速度  $v_{cm}$ 。 $v_{av}$  从  $v_{cm}$  向  $v_p$  的变化,代表碰撞逐渐从中心向周边的变化。把  $v_{cm}$  至  $v_p$  间的区间分成若干小段,其碰撞参数值则根据每小段的截面来获得 ( $d\sigma = 2\pi b \cdot db$ )。用该方法得到的碰撞参数的误差(半高宽)约为 1.5fm。文献[6]中详细地描述了  $v_{av}$  以及与其它确定碰撞参数的方法的比较。

### 3.3 反应平面的确定

集体流的实验确定是根据横向动量在反应平面内的投影。人们通常利用 P. Danielewicz 等人发展起来的横向动量分析技术<sup>[7]</sup>来确定反应平面。依据这一方法,定义了一矢量  $Q_i$ <sup>[8]</sup>

$$\mathbf{Q}_i = \sum_{j=1}^M w_j (\mathbf{p}_j^\perp + m_j \mathbf{v}_j^b), \quad (2)$$

式中  $\mathbf{p}_j^\perp$  和  $m_j$  为粒子  $j$  的横向动量矢量和质量,  $M$  为粒子的多重性. 权重因子  $w_j$  的选择是为了减少  $\mathbf{Q}_i$  与真实反应平面间的偏差.

包含矢量  $\mathbf{Q}_i$  和束流轴的平面即为粒子  $i$  的反应平面. 在(2)式的求和中不包括粒子  $i$ , 以防自动关联. 根据动量守恒, 式中加入了反冲速度修正项  $\mathbf{v}_i^b$ :

$$\mathbf{v}_i^b = \mathbf{p}_i^\perp / (m_{\text{sys}} - m_i), \quad (3)$$

此处  $m_{\text{sys}}$  为弹核质量与靶核质量之和. 由此便得到粒子  $i$  在反应平面内的横向动量投影  $p_i^{\parallel}$ :

$$p_i^{\parallel} = \mathbf{Q}_i \cdot \mathbf{p}_i^\perp / |\mathbf{Q}_i|. \quad (4)$$

#### 4 实验结果和讨论

图 2 给出了 57MeV/u  $^{64}\text{Zn} + ^{27}\text{Al}$  反应中的  $\alpha$  粒子在碰撞参数分别为 0—2, 2—3,

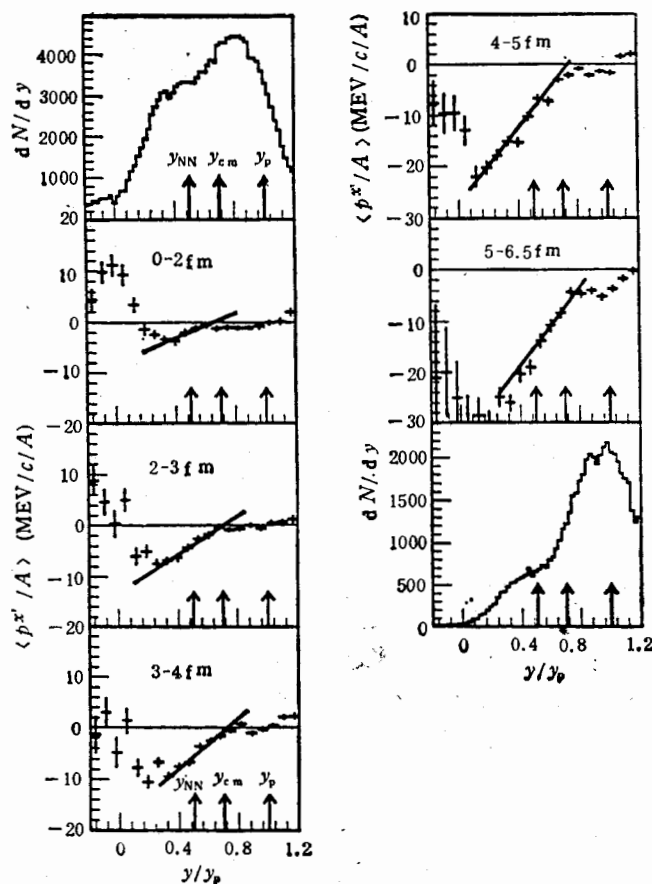


图 2 在不同的碰撞参数下, 57MeV/u  $^{64}\text{Zn} + ^{27}\text{Al}$  反应中  $\alpha$  粒子在反应平面内的横向动量  $\langle p^{\parallel}/A \rangle$  随粒子快度的变化规律.

3—4, 4—5, 5—6.5fm 时,  $\langle p^*/A \rangle$  随快度  $y$  的变化规律. 快度  $y$  的定义为

$$y = \frac{1}{2} \ln[(E + p_{\parallel})/(E - p_{\parallel})]$$

(其中粒子能量  $E$  和粒子平行动量  $p_{\parallel}$  均以光速  $c$  为单位). 图中的三个箭头  $y_{NN}, y_{cm}, y_P$  分别代表核子-核子快度, 质心系快度和弹核快度. 从图中可清楚地观察到集体运动的特征: 在  $y_{NN}$  附近, 参加者的  $\langle p^*/A \rangle$  随着快度线性递增, 如图中的斜线所示. 并且其斜率随着碰撞参数的变化而变化. 在大的快度附近, 大部分粒子是从旁观者平衡核发射来的, 其横向动量包括了边流、反弹和大的热运动, 这导致  $\langle p^*/A \rangle$  随快度的变化变得平缓. 在小的快度附近, 由于旁观者类靶核粒子的发射以及探测阈的影响,  $\langle p^*/A \rangle$  随快度的变化也变得不规则化. 图中附上了在 0—2fm (对应中心碰撞) 和 5—6.5fm (对应周边碰撞) 处,  $\alpha$  粒子的快度分布. 在中心碰撞中, 快度分布明显地存在着两种成份: 一种来自于“参加者”的前平衡发射粒子, 其峰位在中速  $y_{NN}$  附近; 另一种来自于“旁观者”平衡核(类弹源)发射的粒子, 其峰位的快度略低于弹核快度. 在周边碰撞中, “参加者”成份减少了, 粒子主要来自于类弹源成份. 集体流研究的是在  $y_{NN}$  附近的参加者成份.

图 2 所示的为正流, 即  $\langle p^*/A \rangle$  随快度的增加而增加. 这是由于实验测量的值为流的绝对值, 用横向动量分析技术测得的流总是正流. 对  $Z = 1$  和  $Z = 3$  的粒子, 同样观察

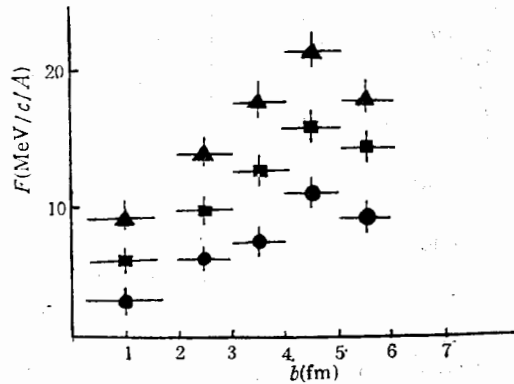


图 3 流参数  $F$  随碰撞参数的变化规律

● 代表  $Z = 1$  粒子, ■ 代表  $Z = 2$  粒子,  
▲ 代表  $Z = 3$  粒子.

到了以上类似的集体流效应. 为了更详细地研究集体流随碰撞参数和出射碎片的关系, 定义流参数等于  $y_{NN}$  处的斜率乘以  $(y_p - y_{NN})^{[3]}$ , 如图 2 中的 4—5fm 图所示. 图 3 显示了  $Z = 1, 2, 3$  粒子的流参数随碰撞参数  $b$  的变化趋势. 实验测量的误差也标在图上: 横坐标的误差代表每个实验点的碰撞参数范围, 纵坐标的误差表示从图 2 中提取流参数时的误差. 图 3 中显示的为集体流的测量值, 由于实验中反应平面确定的不精确性以及  $4\pi$  探测器探测阈和死角的影响, 测量值和真实值会有很大的偏差. J.P.Sullivan 等人<sup>[9]</sup>利用蒙特卡洛模拟比较了这两种因素的影响, 发现偏差主要来自于反应平面确定上的误差. 对于真实值为  $40\text{MeV}/c/A$  的集体流, 实验测量值为  $20\text{MeV}/c/A$ . 为了消除反应平面误差上的影响, 人们<sup>[8,9]</sup>把每事件随机地分成两组而得到两个反应平面, 计算出两平面间的夹角  $d\phi$ , 将测量值乘以修正因子  $1/\langle \cos \frac{1}{2} d\phi \rangle$  即得到集体

流的修正值. 在本实验中, 每事件中均测得一重碎片而不可能均等地分成两组来得到修正因子. 因此, 图 3 只给了未经修正的测量值, 在理论计算和实验结果的比较中应注意这一点, 例如在理论计算中也加入反应平面的确定和探测阈的筛选.

从图 3 可以清楚地看到, 在中心碰撞中集体流较小, 随着  $b$  的增大流在增大, 在半中

心半周边碰撞中 ( $b = 4-5\text{fm}$ ) 流最大, 在周边碰撞中流又变小了。这和 J.P. Sullivan 等人得到的结果是类似的。对于  $^{64}\text{Zn} + ^{27}\text{Al}$  反应系统, 擦边碰撞参数约为  $8\text{fm}$ 。由于探测器前角  $0^\circ$  至  $3^\circ$  间存在死区,  $b \geq 6.5\text{fm}$  的周边碰撞事件因信息测量不全而给丢弃掉了。对  $Z = 1$  粒子, 测得集体流最大值为  $11\text{MeV/u}$ , 略小于  $65\text{MeV/u}$   $^{40}\text{Ar} + ^{27}\text{Al}$  中的测量值 ( $14\text{MeV/u}$ )<sup>[3]</sup>, 这是由于集体流的大小亦随入射能和反应系统的变化而变化。图 3 还清楚地显示了  $Z = 2$  粒子的集体流比  $Z = 1$  粒子的流值大, 这和 J.P. Sullivan 等人<sup>[3]</sup>测到的结果是相同的。对  $Z = 3$  粒子, 测得其集体流又大于  $Z = 2$  粒子的流值, 说明集体流大小随着碎片电荷的增加而增加。对于这种现象, 从前的解释<sup>[3,10]</sup>普遍认为是由于热运动减小了集体运动在反应平面内的投影: 在热平衡条件下, 碎片的热能是均分的而与碎片大小无关。因此, 碎片越重, 单位核子的热能越低, 对流的影响越小。然而, 该解释的可疑之处是随机的热运动不会改变  $p^*/A$  的平均值, 从而也不会改变流参数的大小。因此, 我们认为是库仑排斥作用使得流值随  $Z$  增加。这有待于理论的进一步检验和研究。

## 5 结 论

利用近  $4\pi$  测量的两套带电粒子多重探测器再配以七套半导体硅望远镜, 测量了  $57\text{MeV/u}$   $^{64}\text{Zn} + ^{27}\text{Al}$  碰撞中出射的产物。结果表明, 该反应在测量的碰撞参数范围内都存在着集体流, 且集体流的大小随着碰撞参数和出射粒子种类而变化。

本文作者之一(贺智勇)在法国 LPC Caen 工作期间得到沈文庆研究员的有益指导和帮助, 谨表示衷心的感谢。

## 参 考 文 献

- [1] G. Buchwald et al., *Phys. Rev.*, **C28**(1983)2349.
- [2] C.A. Ogilvie et al., *Phys. Rev.*, **C42**(1990)R10.
- [3] J.P. Sullivan et al., *Phys. Lett.*, **B249**(1990)8.
- [4] G. Bizard et al., *Nucl. and Inst. Meth.*, **A244**(1986)489
- [5] A.Peghaire et al., *Nucl. and Inst. Meth.*, **A295**(1990)365.
- [6] J. Peter et al., *Nucl. Phys.*, **A519**(1990)611.
- [7] P.Danielwicz and G. Odynice, *Phys. Lett.*, **B157**(1985)146.
- [8] C. A. Ogilvie et al., *Phys. Rev.*, **C40**(1989)2592.
- [9] J.P. Sullivan et al., *Nucl. Phys.*, **A540**(1992)275.
- [10] K.G. Doss et al., *Phys. Rev. Lett.*, **59**(1987)2720.

## Study of Collective Flow for $^{64}\text{Zn}+^{27}\text{Al}$ Collisions at 57 MeV/u

He Zhiyong<sup>1)</sup> J. Peter<sup>2)</sup> J.C. Angelique<sup>2)</sup> G. Bizard<sup>2)</sup> R. Brou<sup>2)</sup> D. Cussol<sup>2)</sup>  
A. Kerambrun<sup>2)</sup> J.P. Patry<sup>2)</sup> R. Regimbart<sup>2)</sup> J.C. Steckmeyerr<sup>2)</sup> B. Tamain<sup>2)</sup>  
E. Vient<sup>2)</sup> G. Auger<sup>3)</sup> C. Cabot<sup>3)</sup> E. Crema<sup>3)</sup> A. Peghaire<sup>3)</sup> F. Saint-Laurent<sup>3)</sup>  
M. Gonin<sup>4)</sup> K. Hagel<sup>4)</sup> R. Wada<sup>4)</sup> P. Eudes<sup>5)</sup> C. Lebrun<sup>5)</sup> E. Rosato<sup>6)</sup> Y.El Masri<sup>7)</sup>

1) (Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou 730000)

2) (LPC Caen, ISMRA, IN2P3-CNRS, F-14050 Caen, France)

3) (GANIL, BP5027, F-14021 Caen, France)

4) (Cyclotron Institute, Texas A & M University, College Station, TX77843, USA)

5) (LPN, Universite de Nantes, 44072 Nantes Cedex 03, France)

6) (Dipartimento di Scienze Fisiche, Universita di Napoli, I-80125 Naples, Italy)

7) (UCL, Louvain-la-Neuve, Belgium)

Received on April 19, 1993

### Abstract

The collective matter flow in the  $^{64}\text{Zn}-^{27}\text{Al}$  reaction at 57MeV/u is measured in terms of a  $4\pi$  charged particle array. The events as a function of the impact parameter are sorted by using the average parallel velocity method. The reaction plane is determined by means of the transverse momentum analysis method. It is observed that the collective transverse momentum in the reaction plane (sideward flow parameter) varies with the impact parameter and produced particles.

**Key words** collective flow, impact parameter, average parallel velocity, reaction plane, transverse momentum analysis.