

# 30MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 反应中前角区 复杂碎片的来源\*

贺智勇 李祖玉 段利敏 张保国 戴光曦

靳根明 符彦飏 王宏伟

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 在前角测量了 30MeV/u  $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$  反应中两裂片符合下的轻粒子和复杂碎片,利用线性动量转移和总横向动量方法对三体符合事件进行了碰撞参数分类.实验结果表明,在中心碰撞中复杂碎片主要来自于平衡类靶核的统计发射,并伴随有非平衡中速成份;而周边碰撞中前角区复杂碎片主要来自于弹核碎裂成份.在半中心碰撞中则存在类弹、类靶和中速三种成份.

**关键词** 复杂碎片 碰撞参数 线性动量转移 统计蒸发 弹核碎裂 中速成份

## 1 引言

中能区(10—100MeV/u)重离子反应中一个主要的特征是大量复杂碎片( $Z \geq 3$ )(也叫中等质量碎片)的出射,且其产额随着轰击能量的升高而增加.研究碎片的起源是探讨中能区核反应机制的重要手段.中能区核物质相互作用由吸引的平均场相互作用占主导向排斥的核子-核子相互作用占主导过渡,使反应机制和衰变产物变得相当复杂.中能区出射的复杂碎片中既包括类似于低能区出射的深部非弹性耗散成份或类靶蒸发成份,又包括有类似于高能区出射的碎裂成份,同时还包括非平衡发射成份.如何区分不同来源的复杂碎片,以及研究随着轰击能量的升高各种来源的竞争和过渡,尤其是随着轰击能量升高复杂碎片从相继两体发射向多重碎裂过渡等,这些成了目前中能区重离子碰撞中的一大特点.为此,国际上正在兴建  $4\pi$  多重探测器并对此进行研究,国内也利用兰州重离子加速器提供的中能重离子束进行了大量的研究.例如,江栋兴教授等人利用 25MeV/u 的  $^{40}\text{Ar}$  轰击  $^{159}\text{Tb}$  和  $^{nat}\text{Ag}$  靶,观察到后角出射的复杂碎片来自于类靶平衡热核的

1997-01-29收稿

\* 国家自然科学基金(19675053)和中国科学院基金资助

蒸发,而前角出射的复杂碎片来源很复杂<sup>[1,2]</sup>.由于前角区出射的碎片可能来自于类弹、类靶及非平衡发射等成份,详细地研究前角区复杂碎片的发射源需要有碰撞参数的分类.对于轻反应系统,P.Pawlowski等人研究了 $35\text{MeV}/u$ 的 $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ 对称系统中衰变产物( $Z > 1$ )的发射源,观测到在周边碰撞中衰变产物明显地来自于类弹和类靶两个源,而中心碰撞则为单个源的发射<sup>[3]</sup>.对于重反应系统,D. R. Bowman等人研究了 $50\text{MeV}/u$ 的 $^{129}\text{Xe} + ^{\text{nat}}\text{Cu}$ 反应<sup>[4]</sup>,T. M. Hamilton等人研究了 $70\text{MeV}/u$ 的 $^{84}\text{Kr} + ^{197}\text{Au}$ 反应<sup>[5]</sup>,观测到在周边碰撞中衰变产物来自于类弹、类靶和中速源三个源,而在中心碰撞中这三源图象消失,代之以单源发射.本文选择利用轻弹核轰击重靶核的 $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ 非对称系统,研究了裂变过程中前角出射的复杂碎片的来源,并探讨周边碰撞和中心碰撞复杂碎片发射的差异.

## 2 实验概况

实验是在兰州重离子加速器(HIRFL)的大靶室终端(长6m,直径2.4m)上进行的,采用 $30\text{MeV}/u$ 的 $^{40}\text{Ar}$ 束轰击 $311\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 厚的 $^{159}\text{Tb}$ 靶.束流强度 $10\text{--}20\text{nA}$ .为了大面积地探测前角区出射的轻粒子和复杂碎片,在前角 $\theta_{\text{lab}} = 11^\circ\text{--}22^\circ$ 间安装了一套由13个 $\Delta E - E$ 望远镜组成的探测器阵列进行粒子鉴别<sup>[6]</sup>,这13套望远镜的 $\theta$ 角分别为: $11^\circ$ (共1套)、 $15^\circ$ (共4套)、 $17^\circ$ (共3套)、 $20^\circ$ (共4套)、和 $22^\circ$ (共1套),该阵列距靶心650mm,阵列中心与束流方向夹角 $\theta = 17^\circ$ .该阵列中每一套望远镜均由一块 $200\mu\text{m}$ 厚的硅片做 $\Delta E$ 测量和一块50mm厚的BGO做 $E$ 测量,有效探测面积为 $\phi 17\text{mm}$ .实验中采用 $\Delta E - E$ 方法鉴别粒子,结果表明该阵列能分辨出p, d, t,  $\alpha$ 等轻粒子和 $Z \geq 3$ 的中等质量碎片.探测器测量轻粒子和IMF的能量阈分别为:4.75( $^1\text{H}$ )、19( $^4\text{He}$ )、38( $^7\text{Li}$ )、57.5( $^9\text{Be}$ )、80( $^{11}\text{B}$ )、103( $^{12}\text{C}$ )、130( $^{14}\text{N}$ )、158( $^{16}\text{O}$ )、193( $^{19}\text{F}$ )、222( $^{20}\text{Ne}$ )、258( $^{23}\text{Na}$ )、290( $^{24}\text{Mg}$ )和329MeV( $^{27}\text{Al}$ )等.对于 $Z \geq 13$ 的碎片,由于探测器的能量阈较高而没有记录.

此外,围绕束流和靶安装了10块大面积位置灵敏型平行板雪崩计数器(PPAC),用于探测反应中出射的两裂变碎片.这10块PPAC分为前角6块和中后角4块两组.前角6块对称地安装在束流轴周围,覆盖的极角 $\theta$ 为 $30^\circ\text{--}60^\circ$ ,方位角为 $0^\circ\text{--}360^\circ$ .后角4块覆盖的极角为 $70^\circ\text{--}100^\circ$ ,其中两块放在水平面方向并面对面地围绕在靶周围,另两块则放在这两块的上方.这10块PPAC均具有好的时间分辨和位置分辨.4mm的位置分辨导致 $\theta, \phi$ 角分辨为 $0.7^\circ$ ,而时间分辨好于500ps.利用裂片与复杂碎片间的时间差可确定出裂片的飞行时间:

$$TOF = T - T_0 + t_0 + C, \quad (1)$$

式中, $T$ 为PPAC测到裂片的时间, $T_0$ 为望远镜阵列测到复杂碎片的时间, $t_0$ 为复杂碎片从靶到阵列的飞行时间,根据复杂碎片的能量 $E$ 、质量 $m$ 和飞行距离 $L$ 导出, $t_0 = L\sqrt{m/2E}$ .常数 $C$ 为PPAC和望远镜阵列间的相对延迟差.公式(1)假设了裂变碎片和IMF同时从靶出发,由于裂变时间和热核发射IMF的时间均小于 $10^{-19}\text{s}$ ( $10^{-7}\text{ps}$ ),远小于探测器的时间分辨,故这种假设是可以的.

### 3 周边碰撞下复杂碎片的来源

在中能重离子碰撞中,有多种确定碰撞参数的方法<sup>[7-10]</sup>,本文使用线性动量转移 ( $LMT$ )和总横向动量方法来确定碰撞参数.总横向动量<sup>[8,9]</sup>定义为所有衰变产物的横向动量之和: $p^\perp = \Sigma p_i^\perp = \Sigma m_i v_i^\perp$ .很显然,在中心碰撞中碰撞激烈, $p^\perp$ 值大;周边碰撞中 $p^\perp$ 值小. $LMT$ 的实验确定常常由非完全熔合出射的两裂变碎片信息来确定,设两碎片以 $v_1$ 和 $v_2$ 速度以及 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 角的方向飞行,从折叠角 $\theta_1 + \theta_2$ 可定出 $LMT$ <sup>[10]</sup>:

$$LMT = \frac{v_1 v_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{v_{cm}(v_1 \sin\theta_1 + v_2 \sin\theta_2)}, \quad (2)$$

式中 $v_{cm}$ 为非完全熔合核的质心速度,可通过两裂片的质量和速度来确定.由于PPAC没有精确地测量裂片的质量,裂片质量只能从运动学方程来得到,因此 $LMT$ 值具有一定的误差,本文只利用 $LMT$ 区分中心碰撞和周边碰撞事件.在中心碰撞中弹核和靶核结合的部分多,弹核转移给靶核的线性动量多, $LMT$ 较大并趋于1;周边碰撞中弹核只有一小部分与靶核结合, $LMT$ 小并趋于0.

图1(a)显示了30MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>159</sup>Tb反应中测量的 $LMT$ 值, $LMT$ 的峰位和宽度除了与轰击能量和反应系统有关外,还与探测器的布局有关.从图1(a)中还可看到 $LMT$ 分布存在两个峰:一个峰峰位在 $LMT \approx 0.7$ 附近,主要来自于中心碰撞事件,反应出射的两裂片主要由前角6套PPAC探测到;另一峰峰位在 $LMT \approx 0.35$ 附近,对应于周边碰撞事件,出射的两裂片中一块由前角6套PPAC探测到,另一块由后角4套PPAC探测到.

图1(b)显示了30MeV/u<sup>40</sup>Ar + <sup>159</sup>Tb反应中测量的总横向动量谱,以及 $LMT < 0.5$ 、 $LMT = 0.5-0.7$ 和 $LMT > 0.7$ 时的总横向动量谱.与图1(a)中 $LMT$ 分布类似,实验测到的三体符合数据多数为中心碰撞事件,总横向动量谱在 $\Sigma p_i^\perp \approx 6500 \text{ MeV}/c$ 成峰(对应中心碰撞).对比 $LMT > 0.7$ 和 $LMT < 0.5$ 时总横向动量分布可知:高 $LMT$ 值对应高 $\Sigma p_i^\perp$ 值,低 $LMT$ 值对应低 $\Sigma p_i^\perp$ 值,表明本实验利用 $LMT$ 和 $\Sigma p_i^\perp$ 确定碰撞参数具有较好的协调性.

图2显示了 $\theta = 15^\circ$ 处探测到的 $\alpha$ 粒子和Li碎片能谱.图2(a, e)两图为周边碰撞( $LMT < 0.4$ )下的 $\alpha$ 粒子和Li碎片能谱, $\alpha$ 粒子能谱中明显地存在高能弹核碎裂和低能耗散两种成份;而Li碎片能谱中高能成份更加明显.随着 $LMT$ 的增大或碰撞参数的减少,能谱中的高能成份明显减少.在中心碰撞 $LMT > 0.8$ 时 $\alpha$ 粒子和Li碎片能谱中只剩下低能耗散成份(见图2(d, h)).

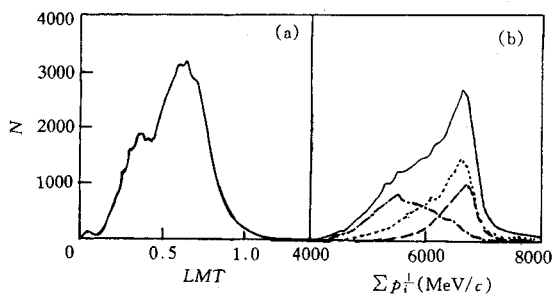


图1 实验测量的总线性动量转移  $LMT$  分布 (a), 总横向动量  $\Sigma p_i^\perp$  分布 (b)

(b)中——为总的 $\Sigma p_i^\perp$ 谱 ---  $LMT > 0.7$ ,  
 .....  $LMT = 0.5-0.7$ , - · -  $LMT < 0.5$ .

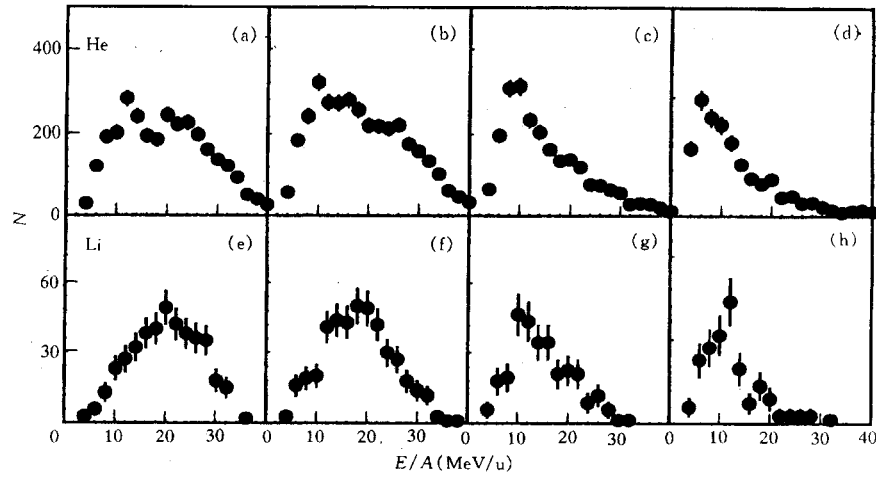


图 2 不同  $LMT$  值下的轻粒子 He 和复杂碎片 Li 的实验室系能谱  
从左至右  $LMT$  分别为  $LMT < 0.4$ 、 $0.5-0.6$ 、 $0.7-0.8$ 、和  $> 0.8$ 。

为了研究周边碰撞中的弹核碎裂成分,图 3 显示了  $LMT < 0.4$  时  $\theta = 15^\circ$  处复杂碎片的平行速度  $v_{\text{par}}$  谱. 图中的实线为弹核碎裂中平行速度谱的高斯分布:

$$y = a_1 e^{-(x-a_2)^2 / (2a_3^2)}, \quad (3)$$

式中  $a_1$  和  $a_2$  分别为高斯分布的峰值和峰位,  $a_3$  为平行速度分布宽度.  $a_1$  和  $a_2$  保持与实验测量的平行速度谱的峰位一致, 而分布宽度  $a_3$  与弹核碎裂动量分布宽度一致. 根据 A. S. Goldhaber 的独立粒子统计理论, 弹核碎裂中碎片的平行动量分布宽度  $\sigma_{\text{par}}$  与碎片质量  $A_f$  有下述关系式:

$$\sigma_{\text{par}}^2 = \sigma_0^2 A_f (A_p - A_f) / (A_p - 1), \quad (4)$$

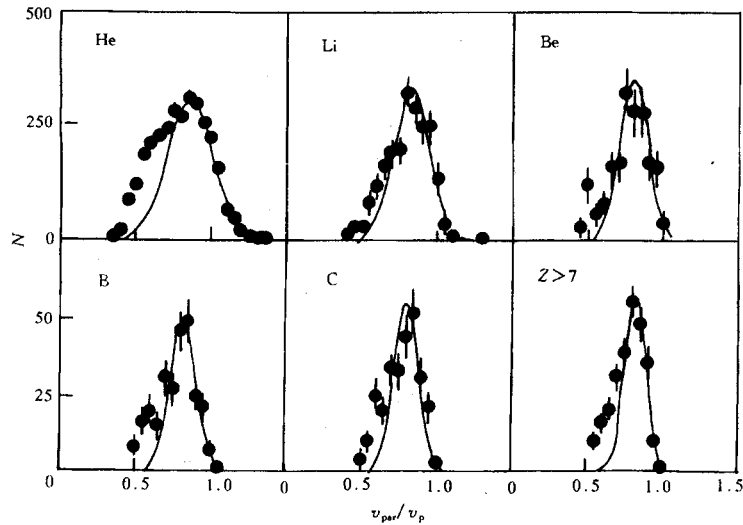


图 3  $\theta = 15^\circ$  处周边碰撞中 ( $LMT < 0.4$ ) 复杂碎片的平行速度谱  $v_{\text{par}}$   
● 为实验结果, — 为高斯分布拟合曲线。

式中,  $A_p$  为弹核质量数,  $\sigma_0$  为弹核碎裂动量分布约化宽度. 在相对论能区中,  $\sigma_0 \approx 90\text{MeV}/c$ . 在中能区重离子碰撞中, 略小于  $90\text{MeV}/c$ <sup>[11]</sup>. 在  $30\text{MeV}/u^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$  反应中, 本实验选取  $\sigma_0 = 75\text{MeV}/c$ , 利用 (4) 式便得到平行动量分布宽度  $\sigma_{\text{par}}$ , 进而得到平行速度分布宽度  $a_3 = \sigma_{\text{par}}/m$ . 比较图 3 中的实验数据和高斯拟合曲线可知, 前角区周边碰撞中出射的复杂碎片主要来自于  $^{40}\text{Ar}$  弹核的碎裂, 碎片的速度分布可以用 Goldhaber 统计理论较好地解释. 图 3 中碎片的平行速度谱中有少量中速碎片, 其  $v_{\text{par}} \approx 0.5v_p$ ,  $v_p$  为弹核速度, 这些中速碎片可能来自于反应中的耗散过程, 如深部非弹反应等.

#### 4 中心碰撞下复杂碎片的来源

为了严格地选取对头碰撞事件, 本实验从 10 多万个三体符合事件中挑选出  $LMT \geq 0.8$  且总横向动量  $\Sigma p_i^\perp > 6000\text{MeV}/c$  的事件. 图 4 显示了实验测到的  $\theta = 15^\circ - 17^\circ$  处复杂碎片的能谱, 图中的实线为统计蒸发模型 Gemini 的理论计算结果. Gemini 程序<sup>[12]</sup>是将复合核的衰变过程处理成相继的两体衰变, 采用蒙特卡罗技术模拟复合核的相继衰变过程直至最终产物不能继续衰变为止. 在每一步衰变中, 均对所有可能的两体衰变(从蒸发中子、蒸发质子到对称裂变)进行了考虑. 在每一步衰变以后,  $Z > 2$  的复杂碎片均能继续衰变直至耗尽全部激发能为止. 与所有的统计模型一样, Gemini 程序不能描述复合核的形成过程, 复合核的电荷  $Z_0$ 、质量数  $A_0$ 、激发能  $E^*$  和最大自旋  $J_{\text{max}}$  需要在计算中直接给定. 由于  $LMT \geq 0.8$ , 对于  $30\text{MeV}/u^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$  反应选取  $Z_0 = 80$  和  $A_0 = 192$ .  $J_{\text{max}}$  值的选取参考 BASS 模型, 而激发能的选取参考了萨本豪教授等人在统计碎裂模型中非完全融合过程中激发能的选取方法.

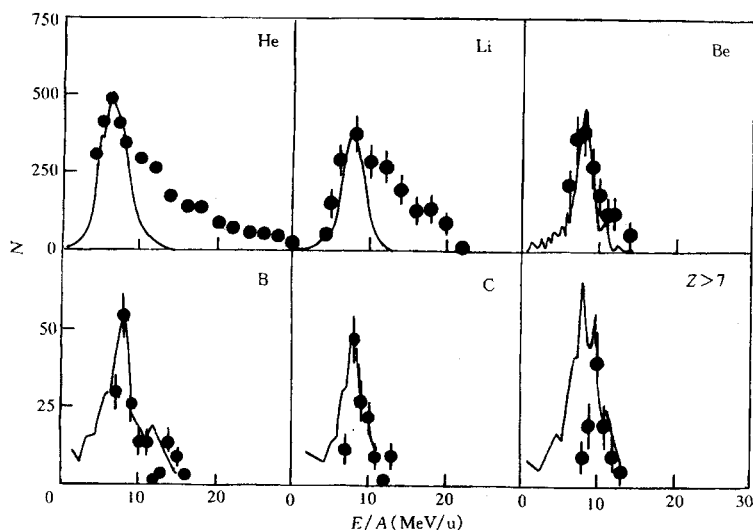


图 4  $\theta = 15^\circ - 17^\circ$  处中心碰撞中 ( $LMT > 0.8$ ,  $\Sigma p_i^\perp > 6000\text{MeV}/c$ ) 复杂碎片能谱

● 为实验结果, — 为 Gemini 统计蒸发理论计算结果.

从图 4 中实验结果和理论计算可知, 在中心碰撞中前角出射的复杂碎片主要来自于

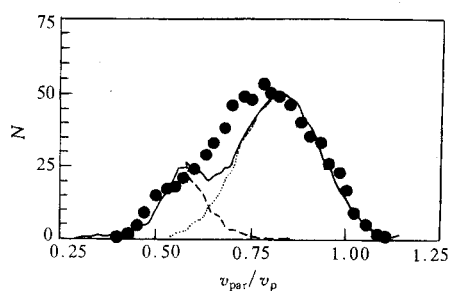


图 5  $\theta = 15^\circ$  处半中心碰撞 ( $LMT = 0.5-0.7$ ) Li 碎片平行速度谱  
 ● 为实验结果, --- 为 Gemini 计算的类靶蒸发成份, ..... 为弹核碎裂成份, — 为类弹和类靶成份之和.

类靶平衡热核的统计蒸发, 碎片的低能部分可以用相继两体衰变的统计蒸发来解释. 但前角出射的轻粒子 (He) 和轻碎片中仍包括有中速成分. 这些中速成分不能用统计蒸发来解释, 它们可能来自于前平衡发射, 即来自于弹核和靶核碰撞初期的发射. 随着复杂碎片质量的增加, 这些中速成分明显减少, 即较重的复杂碎片中很少有来自于前平衡发射的中速碎片, 复杂碎片主要来自于统计蒸发过程.

对于半中心碰撞的情况, 图 5 显示了  $LMT = 0.5-0.7$  时  $\theta = 15^\circ$  处测到的 Li 碎片平行速度  $v_{par}$  谱. 为了较好地描述 Li 碎片的来源, 图中用弹核碎裂成份和 Gemini 计算的类靶

统计蒸发成份进行了比较. 由图可以看出, 在半中心碰撞中前角出射的复杂碎片既有类弹碎裂成份和类靶蒸发成份, 还有中速成份. 这些中速成份不能用统计理论去解释, 它们可能来自于动力学过程. 最近, 我们利用两体关联技术提取了轻粒子<sup>[13]</sup>和复杂碎片<sup>[14]</sup>的发射时间, 观察到它们的发射时间与能量相关. 对于低能碎片, 其发射时间长于  $500\text{fm}/c$ , 实验结果表明低能碎片来自于统计蒸发过程, 与图 5 中 Gemini 模型的预言结果一致. 对于中速碎片, 其发射时间约  $100\text{fm}/c$ , 接近于动力学模型的预言值, 也接近于多重碎裂的发射时间<sup>[14]</sup>. 总之, 中能重离子碰撞中复杂碎片的来源仍需要从理论和实验上进行大量的研究. 复杂碎片是来自于统计过程还是动力学过程, 是来自于相继两体发射还是多重碎裂, 与碰撞参数、反应系统和束流能等有关.

## 5 结 论

通过测量两裂片符合下的复杂碎片发射, 研究了  $30\text{MeV}/u^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$  反应中不同碰撞参数下复杂碎片的来源. 对于特定的实验条件, 选用线性动量转移和总横向动量来确定碰撞参数是两种较好的方法, 且这两种方法具有很好的一致性. 实验结果表明, 前角出射的复杂碎片具有多种成份 (如类弹碎裂成份、类靶成份和中速成份). 各种成份所占的比例与碰撞参数有关, 其中周边碰撞中弹核碎裂成份占主导, 而中心碰撞中类靶蒸发成份占主导, 它们均能用统计理论较好地解释. 在各种碰撞参数中均能观察到少量中速成份的存在, 其中中心碰撞中中速成份随着碎片的增重而逐渐减少. 周边碰撞中这些中速碎片可能来自于深部非弹性碰撞过程, 中心碰撞和半中心碰撞中的中速成份可能来自于系统达到平衡前的非平衡发射, 它们的解释仍有待于理论上的进一步探讨.

## 参 考 文 献

- [1] Jiang Dongxing et al. Chinese Journal of Nucl. Phys., 1995, 17:223  
 [2] Qian Xing et al.. High Energy Phys. and Nuclear Phys. (in Chinese), 1996, 20:304

- (钱兴等. 高能物理与核物理, 1996, **20**:304)
- [ 3 ] P.Pawlowski et al. Phys. Rev., 1996, **C54**:R10
- [ 4 ] D.R.Bowman et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **70**:3534
- [ 5 ] T.M.Hamilton et al. Phys. Rev., 1996, **C53**:2273
- [ 6 ] Li Zuyu et al. Nucl. Inst. Meth., 1996, **A373**:198
- [ 7 ] He Zhiyong et al. Nucl. Phys., 1996, **A598**:248
- [ 8 ] J.Peter et al. Nucl. Phys., 1995, **A593**:95
- [ 9 ] J.C.Steckmeyer et al. Phys. Rev. Lett., 1996, **76**:4895
- [10] G.Klotz – Engmann et al. Nucl. Phys., 1989, **A499**:392
- [11] F.Rami et al. Nucl. Phys., 1985, **A444**:325
- [12] R.J.Charity et al. Nucl. Phys., 1988, **A476**:516; 1988, **A484**:371
- [13] He Zhiyong et al. Nucl. Phys., 1997, **A620**:214
- [14] He Zhiyong et al. Acta Physica Sinica (in Chinese), 1997, **46**:1312  
(贺智勇等. 物理学报, 1997, **46**:1312)

## Origins of the Forward Emission of Complex Fragments for $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$ Reaction at 30MeV / u

He Zhiyong Li Zuyu Duan Limin Zhang Baoguo Dai Guangxi  
Jin Genming Fu Yanbiao Wang Hongwei

(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

**Abstract** Light charged particles and complex fragments have been measured at forward angles in coincidence with two fission fragments for  $^{40}\text{Ar} + ^{159}\text{Tb}$  reaction at 25MeV / u. These three – body coincident events were sorted as a function of the impact parameter using linear momentum transfer and total transverse momenta methods. Equilibrium statistical emissions of complex fragments from quasi – target residues accompanied by non – equilibrium mid – rapidity components were found to dominate in central collisions, while projectile fragmentations were found to dominate in peripheral collision. Three components of complex – fragments from quasi – target, quasi – projectile and mid – rapidity sources were found in mid – central collision.

**Key words** complex fragments, impact parameter, linear momentum transfer, statistical emission, projectile fragmentation, mid – rapidity component