

$^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 的非完全熔合裂变 与跟随裂变*

戴光曦 漆玉金 郑纪文 刘巍 刘希明

(中国科学院近代物理所, 兰州)

陈源达 R. Stokstad J. Poulouit A. Harmon

D. Digregorio

(劳伦兹伯克利实验室, 美国)

摘 要

以 15.0 和 21.7 MeV/A 的 ^{28}Si 束轰击 ^{238}U 靶, 测量出裂变核在反应中得到的线动量转移 (LMT) 分布。从 LMT 分布上的不同区段, 将非完全熔合裂变 (ICF) 与跟随裂变 (SF) 分开; 并给出 SF 产额与总裂变产额的比值。从裂片在围绕反应平面上下的分布宽度, 讨论了粒子发射使裂片反冲的效应。

一、引 言

对易裂核 ^{238}U 与轻核或中量核在刚超过库仑位垒能量下的碰撞, 引起类铀核发生跟随裂变 (SF) 的现象已作过系统研究^[1,2]。在文[1, 2]的工作中, 以单核能为 5.4 和 6.0 MeV/A 的 ^{238}U 束, 轰击 ^{16}O 、 ^{27}Al 、 ^{48}Ca 、 ^{45}Sc 、 ^{58}Fe 、 ^{64}Ni 和 ^{89}Y 靶, 测出了 SF 截面的绝对值 σ_{SF} 。从计算出的反应截面 σ_{R} , 发现对应于幻数核的 $\sigma_{\text{SF}}/\sigma_{\text{R}}$ 与库仑参数 η 有一简单的经验公式:

$$\sigma_{\text{SF}}/\sigma_{\text{R}}(\%) = 0.37\eta - 13.6, \quad (1)$$

对于非幻数核, 该比值比(1)式给出的值要高一些; 换言之, (1)式给出了 $^{238}\text{U} + X$ 在位垒能区下的 SF 截面的下限值。由于库仑参数 η 的物理意义是碰撞核最接近距离上的波数的一半, 所以与 η 成比例的量应和库仑激发有关; 因而(1)式可以看成是准弹性碰撞而引起 SF 的截面表达式。在文[1, 2]的实验中, 对于 5.4 和 6.0 MeV/A 的能量, $^{238}\text{U} + ^{16}\text{O}$ 系统的 SF 截面为零。但是随着入射能增加, ^{16}O 与 ^{238}U 系统仍会出现较大的 SF 截面, 正如文献[3]所报道的。这时 ^{16}O 束能量很高, 达到 32.5 MeV/A。在甚至比 ^{16}O 还轻的 ^{14}N 与 ^{238}U 的系统, 在入射能为 10.0 MeV/A 时, SF 现象已经出现; 并且 σ_{SF} 随入射能增加而迅速增加^[4]。看来, 在文献[3]与[4]的工作中, 所涉及的 SF 反应, 是随着比准弹更强

本文 1989 年 6 月 8 日收到。

* 本工作为国家自然科学基金资助项目, 实验在美国 LBL 88 英寸回旋加速器上进行的。

烈的碰撞——深部非弹性碰撞——后发生的。当 ^{14}N 束能量更高, 达到 $45\text{MeV}/A$ 时, σ_{SF} 已经大于非完全熔合裂变 (ICF) 的截面, 成为裂变的主要出射道。在文献[5]的工作中, 测量 $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ 的系统, 当能量超过 $35\text{MeV}/A$ 后, ICF 完全消失, 只剩下 SF。所以与 ^{238}U 组合的反应系统, 或更一般的中重系统, SF 反应在中能区是普遍而重要的出射道。

本实验对两互补裂片做符合测量, 比起单裂片测量来说, 可以补充关于共线与共面的分布知识。从质心系共线分布可以得到裂变核的线动量转移 (LMT); 从共面分布可以估计出轻粒子发射的多重性。从许多重系统实验看到, 在入射能超过 $10\text{MeV}/A$ 以后, 出现非完全 LMT; 它与 ICF 相联系。本实验在入射能为 $15\text{MeV}/A$ 与 $21.7\text{MeV}/A$ 时进行了 ICF 测量, 也可给出 LMT 值。在文献[6]的工作中测到单核子转移线动量的上限为 $180 \pm 10\text{MeV}/c \cdot A$; 如果在全 LMT 时, 它对应的单核子入射能为 $17.4\text{MeV}/A$ 。

在文献[7]的工作中, 用大型载 Gd 液体闪烁体中子球测定 $^{20}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$ 反应的中子数谱。他们发现, 基于复合核 ($Z \geq 100$) 要形成并裂变, 只可能在冷熔合后裂变; 实验测到比 $Z < 100$ 系统的中子数谱多出 2 个额外中子。这额外中子发射是冷熔合的必要条件。本实验也来观察这种类似效应, 因为复合核 Z 值已高达 106。

二、实验方法与结果

实验是在 LBL 的 88 吋回旋加速器上进行的。 ^{28}Si 束进入 60 吋大散射室打在铝箔衬的铀靶上, 铀层厚度为 $500\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。裂变碎片被 6 块探测面积为 $25 \times 20\text{cm}^2$ 的双维位置灵敏雪崩室探测器记录, 用于飞行时间方式测量。其中 3 块置于 5° 到 74° , 另外 3 块置于 -60° 到 -169° 。将这两组裂片探测器进行符合, 定出关联裂片的 θ , φ 和速度 v 值。详细情况参看文献[8]。

实验测到两个关联裂片在实验室系的速度 v_1 和 v_2 , 分别具有发射角 θ_1 , φ_1 和 θ_2 , φ_2 ; 在对称裂变的假定下, 可以得到裂变母核接受弹核所转移的线动量 (LMT) 值, 和它与入射动量 p_0 的比值 lmt 。该比值可用测到的质心速度 V_{CM}^c 与从 p_0 算出的质心速度 V_{CM} 的比来代替:

$$\text{lmt} \approx \frac{V_{\text{CM}}^c}{V_{\text{CM}}} = \frac{v_1 v_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{V_{\text{CM}}(v_1 \sin \theta_1 + v_2 \sin \theta_2)} \quad (2)$$

15 和 $21.7\text{MeV}/A$ $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 系统的 lmt 分布显示在图 1 中。从图 1 可见, lmt 分布有两个峰: 其中一个的最可几值 $\langle \text{lmt} \rangle$ 接近 1, 它对应 ICF 事件; 另一个较小, 对应于 SF 事件。用双高斯曲线拟合后, 可将这两类不同的裂变事件分开。两条高斯曲线下的面积之比, 代表了 ICF 与 SF 产额的比值。对于 SF 事件, 类靶核反冲角很小 (约 $2^\circ - 3^\circ$), 所以实验的探测几何对于两类裂变大致相同; 这样产额比就近似等于截面比 $\sigma_{\text{SF}}/(\sigma_{\text{SF}} + \sigma_{\text{ICF}})$ 。它代表了 SF 在整个裂变截面所占的比份。在图 2 中显示了该比份随质心系入射能 E_{CM} 的变化关系, 即 SF 的相对激发函数。不过在图中只有两个测量点, 另外还给出 E_{CM} 接近库仑位垒时从式(1)算出的一个点。 $^{27}\text{Al} + ^{238}\text{U}$ 系统的 $\sigma_{\text{SF}}/\sigma_{\text{R}}$ 对 E_{CM} 的关系满足(1)式, 即下限值, 是由于 ^{27}Al 的中子数为 14, 可看成次壳层数。而 ^{28}Si 与 ^{27}Al 仅

差一个质子, ^{28}Si 是双“14”次壳层数的核, 所以也可用(1)式估计该成份. 在图2中的虚线是(1)式给出的结果, 即跟随着准弹性散射后的类靶核裂变. 而在 15.0 及 21.7 MeV/A 下实测的 SF 截面比, 比(1)式高出许多, 这是由于存在着跟随深部非弹性碰撞后的裂变. 所以图2实线与虚线之间的区域给出了与深部非弹性碰撞相关的截面.

SF 对应的最可几 lmt 值随入射能增加而减小. 如从 15 MeV/A 入射能时的 0.27, 减小到入射能为 21.7 MeV/A 时的 0.17. 若将 lmt 的不完全, 近似看成是由弹核质量转

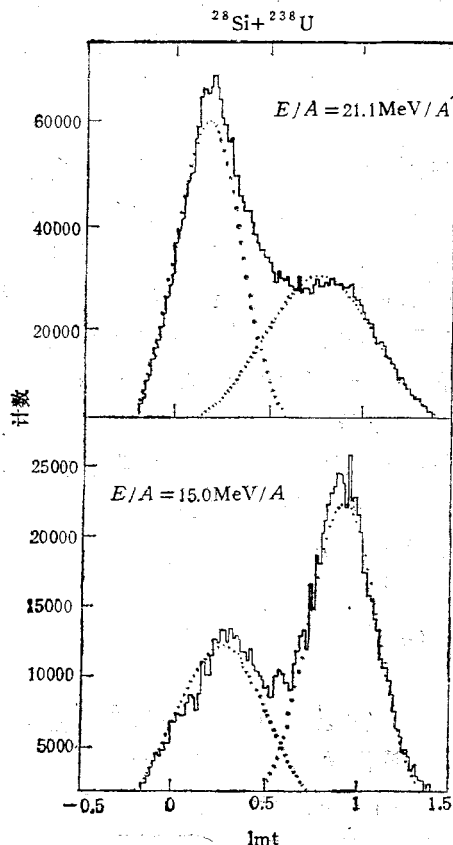


图1 对 15.0 MeV/A 和 21.7 MeV/A $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 系统测到的线动量转移到裂变核的值与入射动量的比值, lmt ; 该分布用双高斯曲线(虚线)拟合, 可给出两组裂变类型: ICF 与 SF

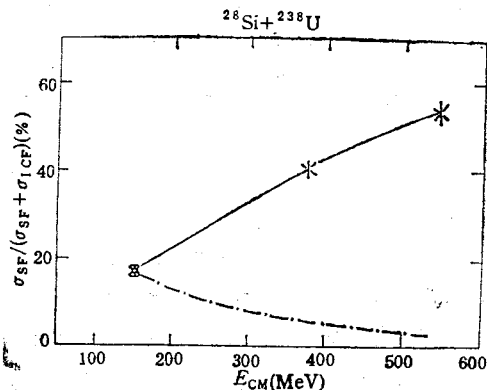


图2 $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 系统的跟随裂变产额与总裂变产额的比值 $Y_{\text{SF}}/(Y_{\text{SF}} + Y_{\text{ICF}})$ 与质心系入射能 E_{CM} 的关系; 图中实线为导视线, 其低能点与虚线是由文中(1)式计算的曲线, 它代表跟随准弹性散射后的裂变截面比值

移的不完全造成的, 这时可以算出跟随裂变核, 或类铀核的激发能分别为 103 MeV (对于 15 MeV/A 入射能) 和 105 MeV (对于 21.7 MeV/A 入射能). 最可几 lmt 随入射能增加而减小, 对于 $^{14}\text{N} + ^{238}\text{U}$ 的系统^[4] 也有类似情况; 这时跟随裂变对应的 $\langle lmt \rangle$, 在入射能从 10 MeV/A 增加到 30 MeV/A 时, 该值从 0.4 降到 0.1. 但是对不易裂靶, 如 ^{197}Au ^[5], 对于 $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 系统, 入射能在 10—21.7 MeV/A, SF 的 $\langle lmt \rangle$ 却保持一个常数 (0.33). 与之对比, 对 ^{238}U 的易裂靶, SF 的 $\langle lmt \rangle$ 是变化的, 但类铀核的激发能却大致为一常数. 易裂核与不易裂核对应的 SF 为何有这样的差别, 还有待于进一步探讨.

非完全熔合裂变 (ICF) 在 15 MeV/A $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 系统中已经开始出现 (见图 1), 这时最可几 lmt 值为 0.92. 当能量为 21.7 MeV/A 时, 该值降到 0.77. 算出这两个能量对应的最可几动量转移值, 分别为 154 和 155 MeV/A, 它们均稍小于文献 [4] 的测量值. 从 Viola 系统化公式

$$\text{Imt} = 1.273 - 0.092\sqrt{E/A}, \quad (3)$$

预示上述值分别为 0.92 和 0.84, 与测量值大体相当。

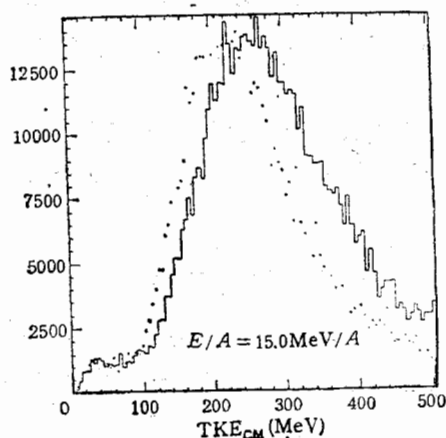


图 3 对 $15.0\text{MeV}/A$ $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 的裂变反应, 测到的裂片总动能 (TME) 分布; 图中虚线为用 ICF 的最可几 (Imt) 作修正后的 TKE 谱

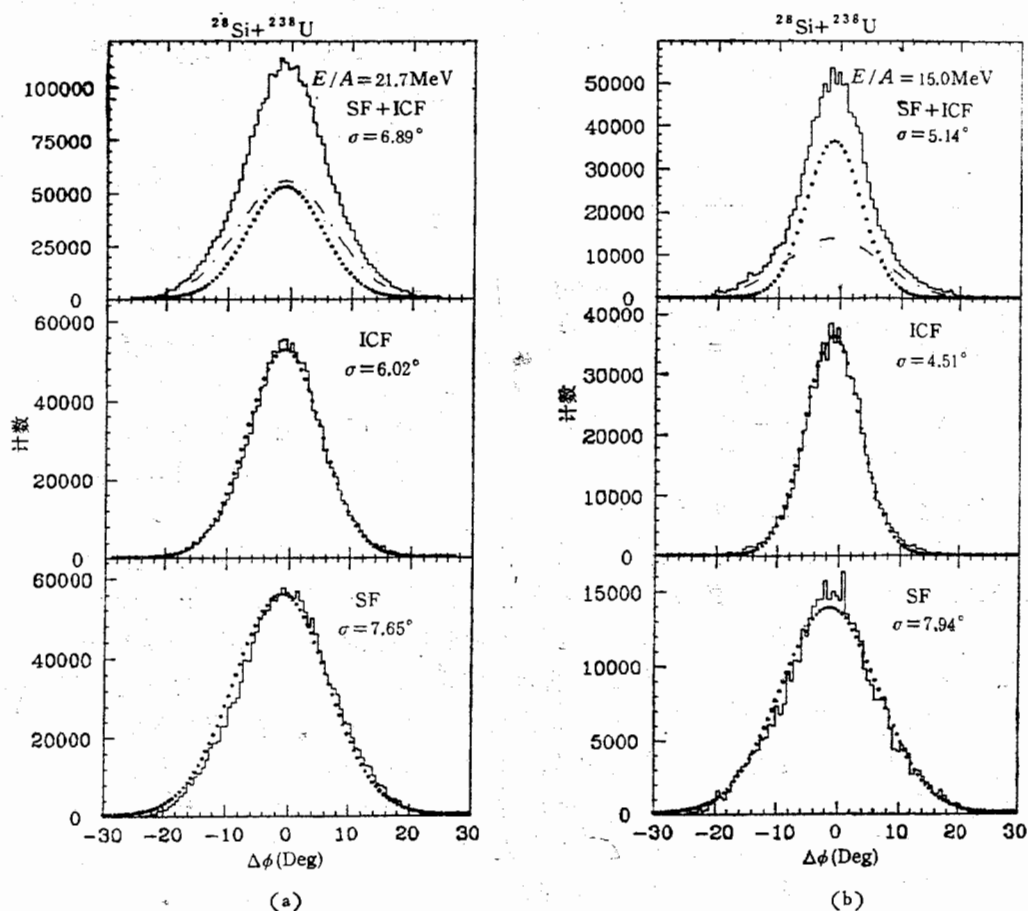


图 4 对 $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 系统在 $21.7\text{MeV}/A$ 入射能下 (a) 与 $15.0\text{MeV}/A$ 入射能下 (b), 测到的裂片围绕反应平面上的分布; 对每一个入射能分别显示了 SF、ICF 和二者之和的分布

线动量不完全转移, 将使数据再构后给出的裂变碎片总动能 (TKE) 偏大。例如在图 3 所显示的 TKE 分布, TKE 最可几值为 230MeV, 它比 Viola 系统化给出值^[9] 209 MeV 要大。但是如果考虑不完全 LMT 修正(简单地用 $\langle lmt \rangle$ 乘以入射粒子质量), 则给出的 TKE 分布用虚线显示在图 3 中。这时 TKE 最可几值与 Viola 系统化的值是一致的。

为了对裂片共面性进行测量, 以一个裂片偏离于反应平面的垂向分布来表征; 这反应平面是由互补裂片分飞方向和束流轴来决定的。在质心系里对这垂向分布用角度 $\Delta\varphi$ 表示, 其关系为:

$$\sin \Delta\varphi = \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \sin \theta_{CM1} \quad (4)$$

式中下标 1 和 2 分别对应于裂片和互补裂片。 $\Delta\varphi$ 的分布显示在图 4 中用高斯曲线拟合

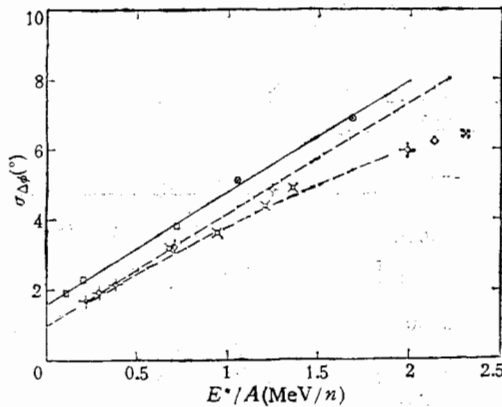
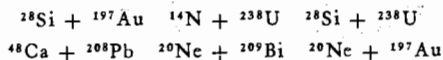


图 5 重离子反应中的“轻+重”系统, 实验测到的裂片脱面分布标准偏差 $\sigma(\Delta\varphi)$ 与单核子激发能的依赖关系, 图中点画线为蒸发理论对于 $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 反应的估算曲线



SF 的标准偏差 $\sigma_{SF}(\Delta\varphi)$ 大于 ICF 的。

在图 5 中显示了轻核打重靶系统的各个裂变反应所测出的脱面标准偏差 $\sigma(\Delta\varphi)$ 依赖于单核子激发能 E^*/A 的关系。从图可见, 对于 $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 和 $^{48}\text{Ca} + ^{208}\text{Pb}$ ^[10] 系统, 脱面宽度比其他较轻系统的要大。而且, 这两个系统的实验点似乎可用一条直线连接起来: $\sigma(\Delta\varphi) = a(E^*/A) + b$; 在此 a 与 b 分别为 3.07 和 1.63, $\sigma(\Delta\varphi)$ 以度为单位, E^*/A 以 MeV 为单位。对于其他较轻系统, a 与 b 分别为 2.81 和 1.11。这两条直线大致平行, 但前者比后者高出 0.5 度的宽度。有趣的是, 这两个反应系统的全熔合复合核, 它们的原子序数都大于 100。类似的情况在 V. Johnke 的工作^[9] 中也曾发现。该组测量了 $^{20}\text{Ne} + ^{238}\text{U} / ^{232}\text{Th}$ 等两个系统的裂变中子数谱。他们发现这时中子发射最可几数比起稍轻的系统要额外多出 2 个中子。作者认为, 这额外中子的发射是基于冷熔合裂变的要求。在 Z 大于 100 号元素时, 要形成复合核, 不能有太高的激发能。冷核形成条件要靠额外中子发射来退

$\Delta\varphi$ 分布后, 给出标准偏差 $\sigma(\Delta\varphi)$ 。从图可见, 对 21.7MeV/A 和 15MeV/A 两种入射能, 该偏差分别为 6.9° 和 5.1°。对于相同入射能, ICF 与 SF 被分开, 则前者的偏差比后者的脱面展宽(偏差)要窄。这种衡量脱面的标准偏差, 正好是裂变中轻粒子发射造成裂片在垂直反应平面上的反冲分量的量度。裂变核的自旋大致与反应平面垂直, 发射粒子带走一部分角动量, 所以粒子发射或反冲方向在反应平面内有最大几率; 但是, 垂直反应平面发射的几率是最小的。这种方向效应, 自旋愈大则愈显著。由于 SF 的裂变核, 其自旋低于 ICF 的裂变核自旋; 所以不管是裂前或裂后的发射粒子, 对 SF 的方向效应要弱些, 这样就使得

激。我们也曾用裂后中子蒸发的简单模型^[1]来预示图 5。发现所预示的曲线与较轻系统的实验点相一致,而低于上述两系统的实验点。按这简单模型所预示的值在图 5 中用点-短线表示。它对应蒸发中子、质子和 α 粒子的数目为 20.4、3.5 和 0.9(对 15MeV/A 情况), 25.2、5.9 和 1.9(对 21.7MeV/A 情况)。

三、结 束 语

利用大张角的探测器对两互补裂片进行符合测量,可以给出在质心系中的共线与共面偏离分布。质心系的共线的偏离主要来自线动量转移不同,而其宽度主要来自轻粒子发射反冲效应和裂片质量围绕对称点的分布。而对共面性的偏离分布,其宽度纯粹由反冲效应在垂直反应平面上的分量所决定。由线动量转移分布可将跟随裂变事件从总裂变事件中分离出来,从而给出 SF 相对激发函数。

跟随裂变对 21.7MeV/A $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ 系统,已超过裂变截面的一半以上,成为主要出射道。从 ^{238}U 靶与 ^{197}Au 靶相比,与周缘碰撞相关的 SF,对易裂靶其裂前激发能大体保持常数,而对不易裂靶,其 $\langle \text{Imt} \rangle$ 大体保持常数。这是很值得探讨的问题。

对于原子序数大于 100 的复合核裂变反应,观察到更宽的反冲分布,它可能与额外中子发射以及形成冷核的条件有关。

参 考 文 献

- [1] 戴光曦等,高能物理与核物理,9(1985),454.
- [2] Dai Guangxi (G. Dai), R. Bock, A. Gobbi et al., proc. Tsukuba Intern. symp. on H-I Fusion Reaction, (1984), 205.
- [3] Y. Chan, et al., LBL-23381, (1987).
- [4] M. Fatyga, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 55(1985), 1376.
- [5] S. Leray, et al., *Nucl. Phys.*, A425 (1984), 345.
- [6] M. Mostefai, et al., *J. Phys. Colloque*, C4, Suppl., 47 (1986), 361.
- [7] U. Jahnke, *J. Phys. Colloque* C4, Suppl., 47 (1986), 317.
- [8] 戴光曦等,高能物理与核物理, 5.5-22MeV/A $^{28}\text{Si} + ^{197}\text{Au}$ 系统的裂变测量,待发表.
- [9] V. E. Vioia, Jr., *Nucl. Data Sect.*, A1 (1966), 391, *Phys. Rev.*, C31 (1985), 1950.
- [10] R. Stokstad, 私人通讯;(1988).

INCOMPLETE AND SEQUENTIAL FISSION IN $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ SYSTEMS

DAI GUANGXI QI YUJIN ZHENG JIWEN LIU WEI LIU XIMING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, P. O. Box 31, Lanzhou)

Y. CHAN R. STOKSTAD J. POULIOT A. HARMON D. DIGREGORIO

(LBL, 1 Cyclotron Road Berkeley, California, CA-94720, USA)

ABSTRACT

The Linear Momentum Transfer (LMT) in $^{28}\text{Si} + ^{238}\text{U}$ system with incident energies of 15.0 and 21.7 MeV/A have been measured by fission partner fragments. By cutting different regions in LMT distribution, the Sequential Fission (SF) and the incomplete fusion fission events could be separated; as a result, the ratio of SF yield over total fission yield is obtained. Around the reaction plane, the standard deviation of fragment distribution, due to the recoil effect of particle emission on the fragment has been measured and discussed.