

## 两体衰变径迹\*

文万信 戴光曦 吴和宇 贺智勇 罗清政 段利敏

蔡薇 靳根明 李祖玉 张保国 漆玉金

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994-04-18 收稿

### 摘 要

在  $19\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$  反应中,云母片固体径迹探测器记录了几例连续两次衰变径迹.分析表明,这些事件两次衰变的时间间隔约为  $10^{-13}\text{s}$ .根据位垒穿透的 WKB 理论,这样的裂变是可能的.

**关键词** 级联衰变, 裂变, 固体径迹.

### 1 引 言

中能重离子反应中热核的产生和衰变是一个备受关注的问题.当激发能较低时,热核通常通过轻粒子伴随二裂进行衰变,而当激发能较高时,热核最终将衰变成许多碎片,即多重碎裂.复杂碎片是由两体衰变产生还是由瞬发碎裂产生?许多实验对此进行了研究.有人认为<sup>[1,2]</sup>随着激发能增高,两体衰变两次衰变时间间隔减小,多重碎裂由两体衰变转由瞬发碎裂产生.同时也存在跟随裂变的事件,在文献[3]中系统研究了  $^{238}\text{U}$  与各轻核碰撞后  $^{238}\text{U}$  的跟随裂变现象.这时轻核与铀作用后,使铀处于稍高于裂变位垒的激发态而发生裂变.

在实验中,我们用  $25\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar}$  束轰击  $^{209}\text{Bi}$  叠层靶,叠层靶由镀  $^{209}\text{Bi}$  的五片白云母片组成,云母片之间夹有降能铝箔,每组云母片和铝箔使轰击能降低约  $3\text{MeV/u}$ ,云母片为径迹探测器.云母片厚度为  $10\text{--}19\text{mg/cm}^2$ .束流垂直照射在叠层靶上,云母片镀 Bi 面朝着束流方向.实验在兰州重离子研究装置(HIRFL)上完成.

云母片在  $300^\circ\text{C}$  温度下退火 10h 以提高云母径迹探测器的质量甄别阈,之后用 HF 酸做了常规腐蚀.经过高温退火处理后,  $^{40}\text{Ar}$  以及质量数小于 40 的粒子径迹可望去除,但是 Ar 离子仍在云母片上留下浅坑.处理后的云母片在 700 倍显微镜下进行了观察和照相.观察到的径迹大多数为典型的二裂、三裂和个别四裂径迹,除此之外,还观察到了几例比较特别的事例.这类特别的事例将在下面详述.

\* 国家自然科学基金资助项目.

## 2 实验结果及数据分析

奇异径迹的特别事例出现在 Bi 靶的第三个云母片上 (对应  $19\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$  反应)。图 1 中的 (a)、(b) 和 (c) 就是三个这种特别事例的照片。它们由一个 Y 形头端及一个尾端组成并有两个分裂点。而典型的裂变 (包括二裂、三裂和多重裂变) 径迹只有一个分裂点<sup>[4-6]</sup>。

径迹(a)可能是类靶核分裂的三裂事件,也可能是融合核两体衰变形成的三裂事件。从反应机制方面考虑,有两种情况可能导致这样的结果: 1) 跟随裂变,即由周边碰撞引起,靶核向弹核转移少数核子后类靶核发生裂变。这时,第一分裂点前的径迹为类弹的径迹,分裂点之间的径迹为类靶核的径迹,第二分裂点后面的径迹为类靶核裂变碎片的径迹。2) 级联裂变,即由融合核两体裂变形成,即第一分裂点周围的径迹为融合核裂变碎片的径迹(第一次裂变也可能是准裂变过程),第二分裂点后面的径迹为融合核一个碎片的裂变碎片的径迹。径迹(b)和径迹(c)也都是三裂事件,但其中的一个碎片在飞行一段时间后又发射一个复杂碎片或被其它粒子散射。

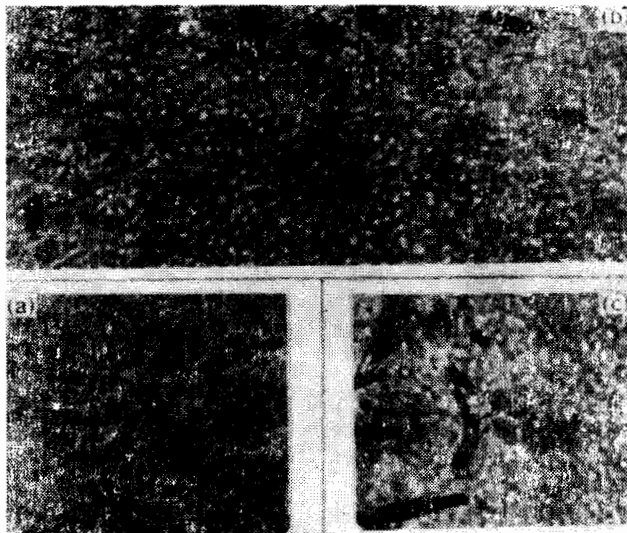


图 1  $19\text{MeV}/A^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$  反应奇异裂变径迹照片

事件(b)和(c)的三裂部分是实际径迹在垂直于束流方向平面上的投影,仅从照片上看到的径迹长度和夹角还不足以确定各个碎片对应的质量和速度。这里主要对事件(a)作一些分析和讨论。

事件(a)的 Y 部分的实际径迹在同一平面上,这个平面与垂直于束流方向上平面的夹角不大,否则的话, Y 部分就会接近于 T 型。基于上述两体衰变的考虑,则可以对事件(a)作一些定量分析。介于两分裂点之间的不稳定碎片裂前的飞行距离为  $11.6\mu\text{m}$ ,该碎片再次裂变后,其两个碎片在介质中的射程分别为  $5.2\mu\text{m}$  和  $9.0\mu\text{m}$ ,两碎片速度矢量与母核速度矢量的夹角分别为  $59^\circ$  和  $44^\circ$ 。

在布喇格峰的低能侧,对于裂变情况能损与射程关系可运用 LSS 理论<sup>[5]</sup>,由此得到离子初始速度  $v$  与在介质中的射程  $R$  的关系,

$$v = \frac{51.6}{mM} \frac{z^{7/6} Z}{(z^{2/3} + Z^{2/3})^{3/2}} R, \quad (1)$$

其中  $m, z$  和  $M, Z$  分别为离子和介质的原子数和质量数。碎片的荷质比可以取作裂变原子核的荷质比。原子核二裂碎片的初始速度  $v_1$  和  $v_2$  与在介质中的射程  $R_1$  和  $R_2$  有如下

关系:

$$\frac{v_1}{v_2} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^{1/6} \left(\frac{z_2^{2/3} + Z^{2/3}}{z_1^{2/3} + Z^{2/3}}\right)^{3/2} \frac{R_1}{R_2}. \quad (2)$$

另外,从“重离子射程和阻止本领表”(Range and Stopping-Power Tables for Heavy Ions)<sup>[6]</sup>中可以看出,如果离子电荷数相差不大,初始速度相同的两种离子在同一介质中的射程相差也不大。此外,由于是第二次裂变的碎片,而且每个径迹对应的原子核质量数不小于40, $z_1$ 和 $z_2$ 的差别也不可能太大,因此, $v_1/v_2 \approx R_1/R_2$ 。

二裂变两碎片的相对速度取作 Viola 速度,即 $|v_1 - v_2| = v_0 = 2.4\text{cm/ns}$ (见图2)。

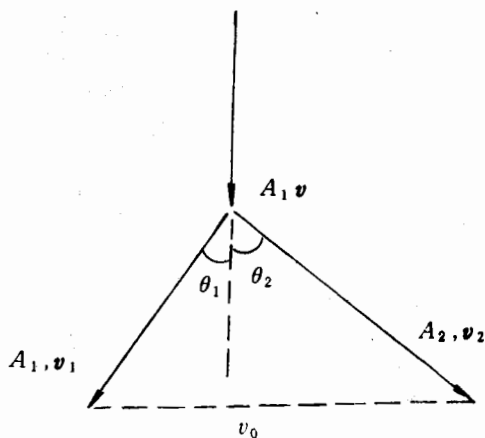


图2 二裂示意图

根据动量守恒定律,我们得到碎片的速度和质量为,

$$\left\{ \begin{aligned} a_1 &= \frac{A_1}{A} = \left[ 1 + \frac{R_1 \sin \theta_1}{R_2 \sin \theta_2} \right]^{-1}, \\ a_2 &= \frac{A_2}{A} = \left[ 1 + \frac{R_2 \sin \theta_2}{R_1 \sin \theta_1} \right]^{-1}, \\ v &= v_0 \frac{a_1 a_2 \xi_1 \xi_2}{[a_1^2 a_2^2 \xi_1^2 \xi_2^2 - 2 a_1 a_2 \xi_1 \xi_2 \xi]^2}^{1/2}, \\ v_1 &= \frac{v}{a_1 \xi_1}, \\ v_2 &= \frac{v}{a_2 \xi_2}. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

其中 $A = A_1 + A_2$ 为裂前原子核的质量, $v$ 为其速度。 $\xi_i = \sin \theta_i (\cot \theta_1 + \cot \theta_2)$ ,  $\xi = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 。

代入相关数据,我们得到碎片质量为 $A_1/A = 0.59$ , $A_2/A = 0.41$ ,速度为 $v_1 = 1.09\text{cm/ns}$ , $v_2 = 1.91\text{cm/ns}$ ,不稳定碎片在裂变发生时的速度为 $v = 0.90\text{cm/ns}$ 。根据(2)式,得到不稳定碎片的初始速度约为 $2.7\text{cm/ns}$ 。因此,不稳定碎片在裂前的飞行时间为 $6.5 \times 10^{-13}\text{s}$ 。这一寿命量级远远大于目前实验得到的复合核的寿命,即复合核寿命一般为 $10^{-19}\text{s}$ ,最长不超过 $10^{-15}\text{s}$ 。

根据以上数据,可对第一次裂变作一些定量分析。根据动量守恒定律,改变两个裂片的质量数并且考虑反应能(采用实验 $Q$ 值)和取裂片的激发能在裂变位垒附近,在裂变轴和束流方向夹角作各种可能变化时,计算表明当不稳定碎片的初始速度为 $2.7\text{cm/ns}$ 时,不稳定碎片的质量数约为112,与束流方向的夹角约为 $75^\circ$ ;另一裂片的速度约为 $2.5\text{cm/ns}$ ,与束流方向的夹角约为 $55^\circ$ 。

上述分析说明事例(a)很可能是一个级联两次裂变,而且每次裂变基本上都是对称裂变,其中第一次裂变可能是准裂变或复合核裂变。

原子核从鞍点形变到断点的裂变时间一般为 $5 \times 10^{-21}\text{s}$ ,但从平衡形变(或球形)发展到鞍点形变的时间因原子核的质量和激发能而变化,一般长于 $5 \times 10^{-20}\text{s}$ 。中等质量的原子核很难发生裂变,但如果其本身具有一定的激发能,则裂变就有可能发生。以 $^{114}\text{In}$ 为例,其对称裂变位垒(用卡西尼压卵形体计算得到)如图3所示,从图可见裂变位垒约为 $40\text{MeV}$ 。根据位垒穿透的WKB理论,得到 $^{114}\text{In}$ 对称裂变平均寿命随穿越位垒

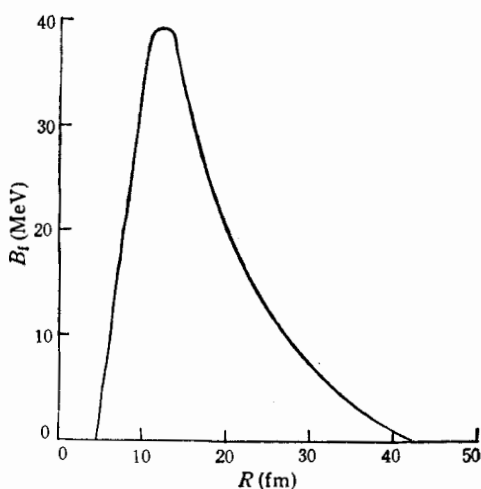


图 3  $^{114}\text{In}$  对称裂变位垒  
横坐标为两裂片质心之间的距离。

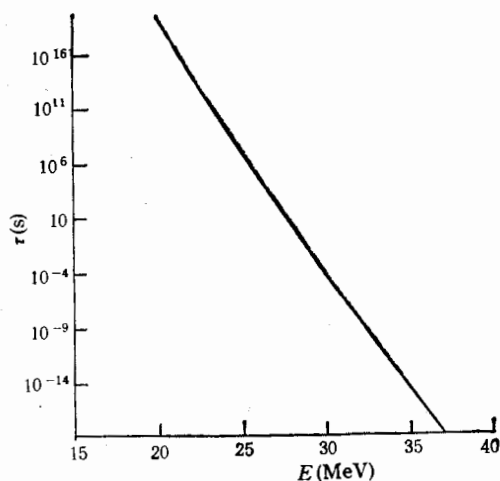


图 4  $^{114}\text{In}$  对称裂变平均寿命随动能变化的曲线

能量变化的曲线(图 4)。由图 4 可以看出, 裂变平均寿命变化范围很大, 时间间隔为  $10^{-13}\text{s}$  的两体裂变对应的相对运动动能为  $34\text{MeV}$ , 它比位垒低  $6\text{MeV}$  左右。

### 参 考 文 献

- [1] P. A. Gottschalk, G. Grawert, P. Vater R. Brandt, *Physics Review*, **C27**(1983)2703.
- [2] P. Vater, H. J. Becker, R. Brandt, H. Freiesleben, *Nuclear Instruments and Method*, **147**(1977) 271.
- [3] 戴光曦等, 高能物理与核物理, **9**(1985)454.
- [4] 吴和宇、戴光曦、蔡薇, 高能物理与核物理, **17**(1993)680.
- [5] D. Guerreau, GANIL, P93 18.
- [6] A. Badala, G. Bizard, R. Bongault, et al, LPC CAEN LPC90-01.
- [7] J. Lindhard, M. Scharff, H. E. Schiott, Kgl. Danske Videnskab, *Selakab, Mat. Fys. Meld.*, **14** (1963)33.
- [8] L. C. Northcliffe, R. E. Schilling, *Nuclear Data Tables*, **A7**(1970)233.

## Tracks of Binary Decay

Wen Wanxin    Dai Guangxi    Wu Heyu    He Zhiyong    Luo Qingzheng  
Duan Limin    Cai Wei    Jin Genming    Li Zuyu    Zhang Baoguo    Qi Yujin

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

Received 18 April 1994

### Abstract

The tracks of a few successive decay events in the reaction of  $19\text{MeV/u } ^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$  are observed in muscovite sheets as solid track detectors. It is deduced that the time interval between two successive decays of these events is about  $10^{-13}\text{s}$ . From calculation based on the WKB approximation for barrier penetration it is believed that such successive fission is possible.

**Key words** binary decay, fission, solid tracks.