

实验验证激发能在 3MeV/u 的热核级联 通过断点进行裂变

吴和宇 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1994年2月3日收到

摘 要

用相对库仑速度的最小化过程来分析热核三块大质量碎片出射的衰变过程,用它处理 $\text{Ar}(25\text{MeV/u}) + \text{Au}, \text{Bi}, \text{Tb}$ 反应,对中心碰撞形成的激发能为 3MeV/u 热核出射的三重裂变碎片进行运动学分析,数据处理的结果显示了关联的三重大质量碎片是来源于级联的二体分裂,同时质心系三裂变碎片平面的法线角分布与级联通过断点的裂变假设下的角分布相符。

关键词 热核,级联裂片发射,瞬发三分裂,裂变总动能,三裂角分布,库仑速度。

1 引 言

费米能区的重离子核碰撞产生的高激发能、高自旋的热核是当今研究的热点。热核的衰变是一个很重要的课题,它不仅反映热核的非稳定性,同时也给出热核的性质。的确,在这样的反应能区新的衰变道导致了許多大质量碎片和轻粒子的出射,对 25MeV/u $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ 反应,中心碰撞形成的类复合核发射粒子的多重性高达 40 左右,这显著地区别于低能区以轻粒子蒸发和复合核的裂变为主要的过程。对三重以上的大质量产物,因为可能来自于裂变,故称为三重裂变事件和四重性裂变事件。大量的实验证明了瞬时出射的多重碎裂发生在激发能为 $4-5\text{MeV/u}$ 的激发核,激发能在此以下复合核不可能瞬发多体出射,然而我们在 1990 年的实验中不仅观测了 $^{12}\text{C}(47.5\text{MeV/u}) + ^{197}\text{Au}, ^{209}\text{Bi}, ^{159}\text{Tb}$ 的三重裂变事件,而且给出了相对角度为 120° , 相对速度平均为 3.5cm/ns 的实验结果^[1], 测量了 $^{12}\text{C}(45\text{MeV/u}, 40\text{MeV/u}, 35\text{MeV/u}, 30\text{MeV/u}, 25\text{MeV/u}, 20\text{MeV/u})$ 几个能量点轰击 ^{209}Bi 三重裂变事件相对于二裂几率和激发函数^[2], 并作了一些理论计算,形变位势的计算,发现级联裂变在瞬发多重碎裂能区以下比品字形,拉长双脖子形占明显的优势^[3,4]。

我们关心瞬发多重碎裂到普通低能蒸发的过渡区,大质量多体出射的机制。多重性裂变碎片是否来自于级联裂变,或者来自于瞬时性多级形变的裂变,或者某种级联裂变到瞬时性多级形变的裂变的过渡。最近把一些研究集体流的数据进行了三体研究,结果^[5-7]

显示与本文相关能区的大质量三体事件均可用级联的二体出射的裂变来解释。HIRFL提供的人射束流,在非完全熔合形成的激发剩余核正好满足这一能区的研究。

本文企图用关联事件的运动学关系来判选热核的衰变方式,用它进行出射碎片的时间顺序的关系分析。假定三体裂变来源于级联出射的裂变,首先注意到级联出射的裂变在第一次裂变中出射的碎片与第二次出射的碎片是不均权的,运动学上存在差异。对非对称裂变的级联出射,三体中重的碎片出射的时间先后不同,同样的库仑排斥,三体出射的总动能是不同的。如果认为是级联地通过断点的裂变过程,即两次裂变通过断点先后时间差大于 $200\text{fm}/c$,两次出射的裂变轴是随机关联的,第二次裂变的相对速度在裂变核的质心系中为库仑速度,而第一次出射的不再裂的碎片与第二次裂变的碎片之间的相对速度无论在那个质心系中都不是库仑速度。法国 GANIL Ar + Au(30MeV/u)的 4π 探测器测量了在 $30^\circ < \theta < 150^\circ$,质量大于 20 的重碎片,它的三重性事件分析结果也证明了这种级联发射方式^[7]。但我们的实验方案选取出射角 $50^\circ < \theta < 150^\circ$,彻底去掉了因深度非弹性碰撞(DIC)的类弹粒子的库仑排斥发射并伴有跟随裂变的三体影响,这种出射也正符合于这种运动学关系,分析结果证明了裂变级联发射的假设,并用三体的级联出射裂变角分布与实验角分布进行了符合。

2 分析原理

2.1 级联和瞬发三体出射总动能(TKE)的差异

对于大家熟悉的二体裂变,激发能耗散在裂变的形变势和部分以激发能的形式分配在裂片中,裂片的动能主要产生于裂片之间的库仑排斥能,并形成与激发能无关的库仑排斥速度 $v_{\text{FF}} = 2.3\text{cm}/\text{ns} - 2.1\text{cm}/\text{ns}$ ^[8]。而品字型三体出射的裂变事件,形变需要耗散很大的激发能,故不妨假定,到断点时裂变碎片的动能为 0,靠其库仑排斥力分开,形成的 TKE 由断点时的库仑势给出,总动能也与激发能无关。级联发射的裂变考虑 TKE 时, TKE 的大小与两次裂变的夹角无关。

表 1 给出了 $r_c = 1.6\text{fm}$ 时, ^{238}X 核的品字型三分裂和级联发射裂变在不同的质量对称性下的总动能,质量对称瞬发三分裂与级联发射三分裂的 TKE 差别达 32MeV,随着质量非对称性的增加,瞬发三分裂与级联发射三分裂的 TKE 均减小,但瞬发裂变的 TKE 始终高于级联发射三分裂 20—30MeV,而级联发射三分裂 TKE 也因出射的先后顺序

表 1 不同对称性下 ^{238}X 核品字型、级联三分裂总动能(MeV)

A_1 Z_1	A_2 Z_2	A_3 Z_3	品字型	级联三分裂		
				I	II	III
99 38	99 38	99 38	448.86	414.44	414.44	414.44
99 38	91 34	107 42	447.05	413.86	412.87	411.94
99 38	83 30	115 46	441.06	410.16	408.32	406.36
99 38	75 26	123 50	432.46	403.28	400.43	397.72
99 38	67 22	131 54	419.55	393.15	387.42	385.98
99 38	59 18	139 58	402.74	379.64	375.13	371.10
99 38	51 14	147 62	381.85	362.62	357.42	353.02

方式不同而不同,这种不同从对称时的 0MeV 增加到非对称时的 10MeV.

TKE 的分析并不意味着实验上可以利用这种差异来分辨这些不同的出射方式. 一方面实验上的诸多不确定因素,随机影响着 TKE 的测量,不可能精确度很高地定出 TKE 的大小,另一方面,由于断点形状的涨落,不可能精确地给出一个有效库仑半径,即理论的 TKE 大小也难以定准. 然而这种分析证明了确实存在运动学的差异.

2.2 相对速度的差异确定出射的先后

从图 1 的矢量关系中,可以看出,如果级联先出射裂片 1 的速度 v_1 ,反冲核 4 的速度 v_4 ,4 级联裂成 2 和 3,故相对速度 v_{14} 和 v_{23} 均为库仑速度 v_{FF} . 而相对速度 v_{13} 和 v_{12} 不仅与各裂片质量对称性相关而且与级联出射裂变的相对夹角 θ 有关.

首先将测量的三体事件的碎片按其质量的相对大小标记为重碎片,中重碎片和轻碎片三种. 如果三个碎片产生于两次无关的两体分裂,则事件可以分为三类,第一类 I 为轻的碎片来源于第一次分裂(即碎片 1),而重的碎片和中重碎片则来源于第二次分离(碎片 2、3),第二类 II 和第三类 III 分别为中重碎片和重碎片来源于第一次分裂(碎片 1),而其余两碎片来源于第二次分离(碎片 2、3).

我们建立判断种类的一个量 P ,用相对库仑速度 v_{14c} 表示第一次分离, v_{23c} 表示第二次分离,它们都是由库仑推力产生的库仑速度,在非对称裂变变时与电荷和质量相关

$$P = [v_{14} - v_{14c}(A_1Z_1; A_4Z_4)]^2 + [v_{23} - v_{23c}(A_2Z_2; A_3Z_3)]^2$$

假定所有的三体事件都是来源于级联出射过程,则任何一个三体关联事件属于三类中的一类,实验室系中方便地给出 v_1, v_2, v_3 , 矢量合成可以再构出 v_{14} 和 v_{23} ,对三类事件可以计算出 P_I, P_{II}, P_{III} ,显然最小值 P_i 的种类 i 是最可几的,因为:

(1) 相对速度差分布 $v_{14} - v_{14c}$ 和 $v_{23} - v_{23c}$ 对于最可几 i 类是在 0 附近,应该在 0 附近成峰,如果不是第 i 类,相对速度差不为 0,平方和显然较大.

(2) 相对速度差分布的宽度被解释为物理上的统计涨落和实验过程的不确定性.

3 分析结果与讨论

裂变的过渡时间为 1000fm/c,这远小于电子学可测量的精度 ns,用运动学的差异成功地给出了级联出射过程碎片的时间先后关系,并能给出不同质量出射先后几率的相对布居,给出多体出射的内在机制.

图 2、3、4 给出 Ar(25MeV/u) + Bi、Au、Tb 三个系统在最可几级联出射模式下相对速度差分布,这种分布在图中对称且平均值在 0 附近,为了比较非直接库仑排斥相对速度

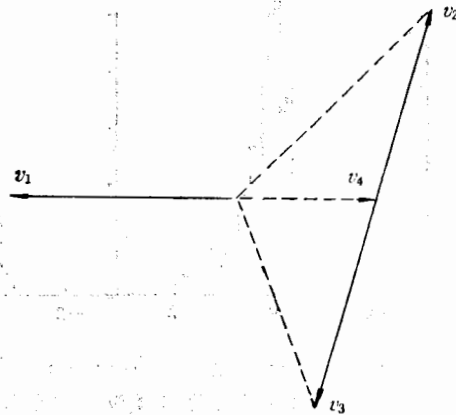


图 1 级联出射裂变碎片速度矢量图

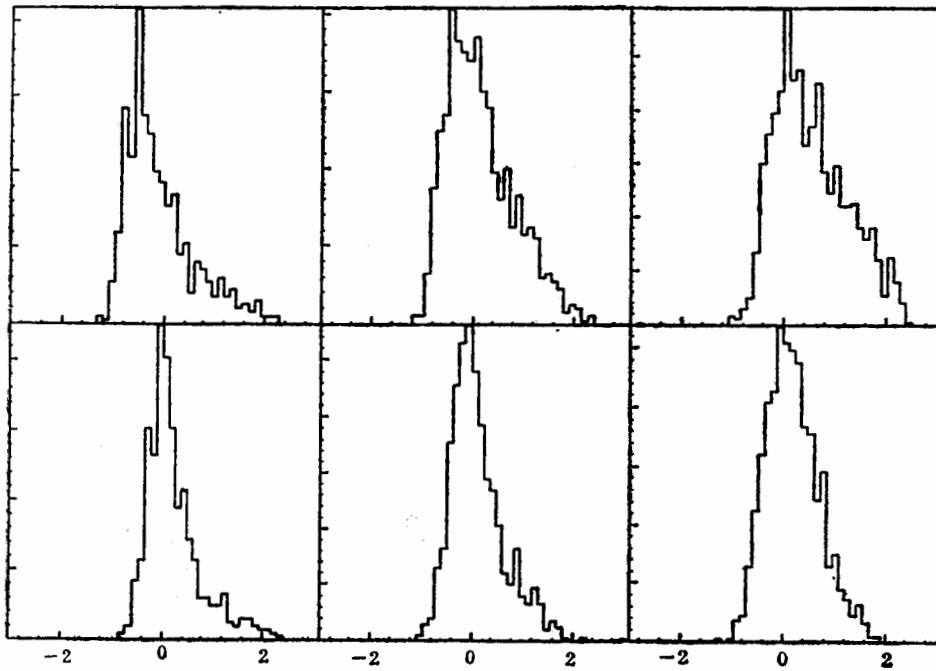


图2 Ar + Bi 系统, $\nu_{14} - \nu_{14c}$ (第一次裂变), $\nu_{23} - \nu_{23c}$ (第二次裂变)分布
左为 I 类级联, 中为 II 类级联, 右为 III 类级联. 上为级联第一步, 下为级联第二步.

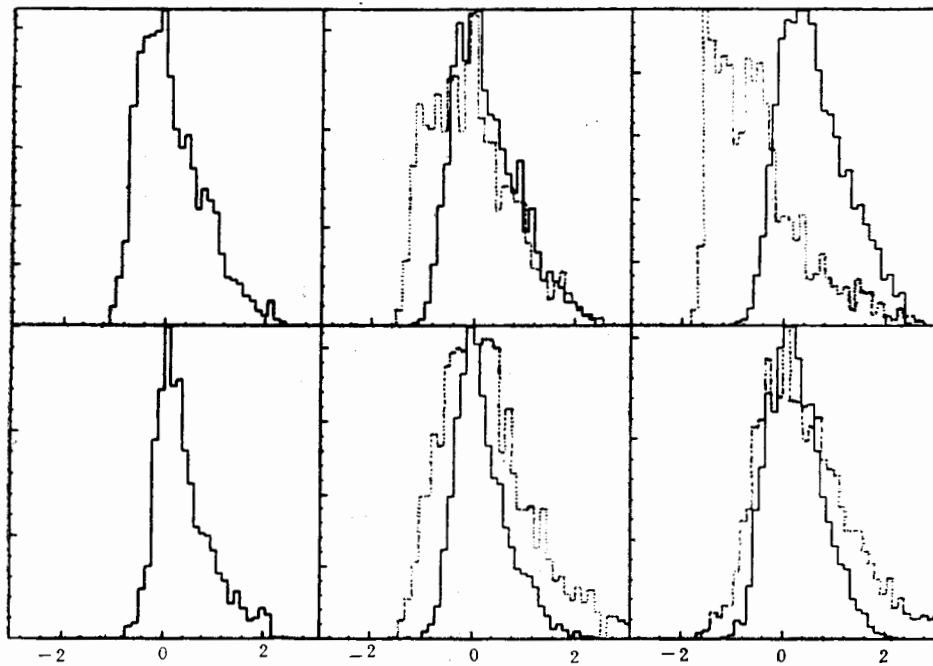
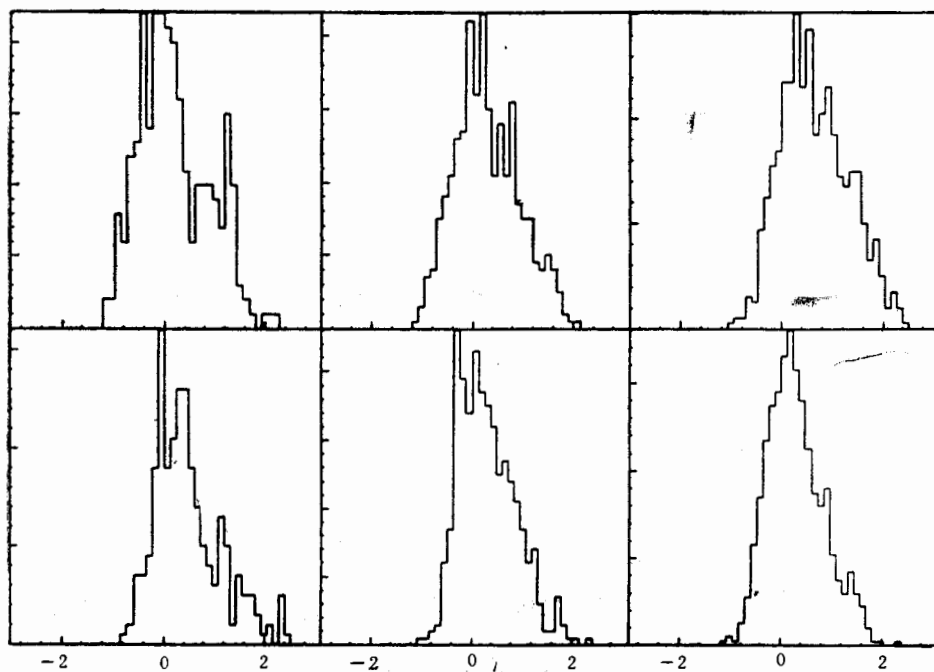


图3 Ar + Au 系统, $\nu_{14} - \nu_{14c}$, $\nu_{23} - \nu_{23c}$ 分布
说明同图2, 虚线为最可几 I 级联下级作为 II、III 级联结果.

图4 Ar + Tb 系统 $v_{14} - v_{14c}, v_{23} - v_{23c}$ 分布

说明同图2.

对相对速度差分布的影响,图3还给出了在最可几I类级联下,仍然按II或III类级联计算相对速度差,即把 v_{12} 或 v_{13} 作为库仑速度 v_{FF} , 其分布如图(虚线), 因为矢量合成时相加或相消,速度大体仍以0为中心,但分布宽度显然增加了,分布变得不对称,从而证明了这种分析方式的合理性.

相对库仑速度用系统的 Viola 的 TKE 公式可以给出,这种方法给出了裂变核的最可几的对称裂变的相对动能,它与裂变核的可裂变性有关,但与裂变的质量非对称性无关^[6]. 如果考虑到这种对称性对精度的影响,采用对称裂变 TKE 的 Viola 值来确定断点的有效库仑作用半径,用与核的 A 和 Z 相关的库仑势计算出库仑速度,结果使相对速度差分布的半宽度变小了,这样考虑裂变非对称性更为合理些.

表2 不同种类的跟随裂变出射模式 $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}, ^{197}\text{Au}, ^{189}\text{Tb}$ 系统占有态百分比

各态几率	Ar + Bi (25MeV/u)	Ar + Au (25MeV/u)	Ar + Au ^[7] (30MeV/u)	Ar + Tb (25MeV/u)
第一类 I	48.0%	52.1%	45%	50.5%
第二类 II	31.9%	29.0%	36%	28.8%
第三类 III	21.1%	18.9%	25%	20.5%

三类级联出射的相对布居的百分比如表2, 25MeV/u Ar + Au、Bi、Tb 三种反应系统的布居比大致差不多.这种布居比与类熔合核的单核子激发能有关,与类复合核的可裂变性也有关系,在这一激发能区,级联出射的裂变首先以出射一质量较小的碎片为主,随着

入射能进一步升高,用数据^[7]说明中重碎片和重碎片首先出射的几率也明显地上升。可以推测热核单核子激发能在 1.5MeV/u 以下时,主要是蒸发轻粒子和裂变退激;激发能为 $1.5\text{—}2.5\text{MeV/u}$ 时,中等质量碎片的出射(大的非对称性裂变)迅速上升,并在该碎片出射后进行裂变,形成对称性较差的三体裂变;在激发能为 $2.5\text{—}4\text{MeV/u}$ 时,出射的中等质量碎片质量增加,形成以对称为主的三体裂变碎片;在以后工作中我们还将给出 $4\text{—}5.5\text{MeV/u}$ 激发能的重核级联出射裂变的级联时间差逐渐减小,出射的碎片数增加而过渡到瞬发多重碎裂。

25MeV/u 的 $\text{Ar} + \text{Bi}$ 和 $\text{Ar} + \text{Au}$ 形成的激发能近似相等, $\text{Ar} + \text{Bi}$ 裂变类复合核的可裂变性高,首先出射重和中重碎片的几率大; $\text{Ar} + \text{Tb}$ 一方面激发能较高, II、III 类几率有增加的趋势,而裂变类熔合核可裂性却减少,二者作用的结果,使各类几率居于 $\text{Ar} + \text{Au}$ 、 Bi 两系统之间。

4 角分布检验

在系统质心系中,三体裂变不象二体裂变具有固定的裂变轴作为裂变方向,首先我们

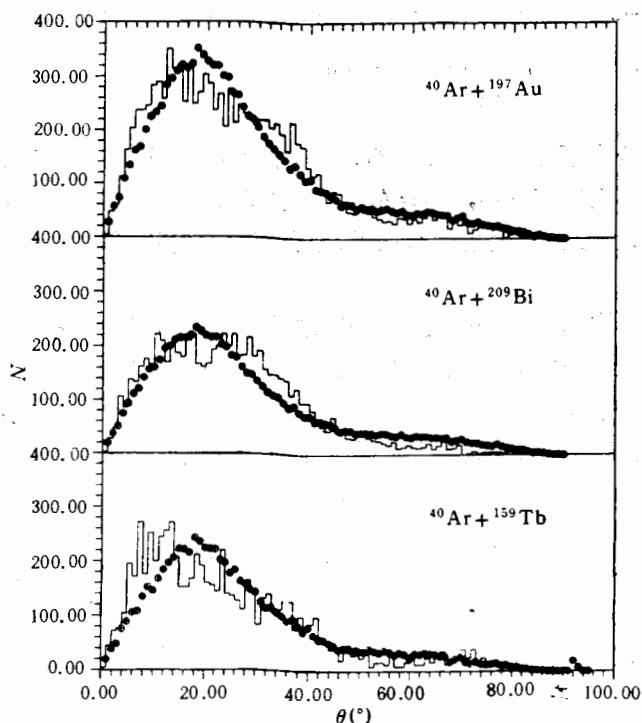


图5 三裂变方向角分布

直方为实验测量的结果,点为级联模型在有效探测空间模拟结果。

角动量直接影响形变,三体出射速度矢量平面的法线与自旋相关,会造成裂变方向各向异性。

依以上分析,用 Monte-Carlo 方法产生模拟的三分核裂变事件,使它来源于级联的

定义三体速度矢量的三个顶点所在的平面为三分裂变的裂变平面,裂变是在这样一个平面内进行的,定义裂变平面的法线与束流方向的夹角为三分裂变的方向角 θ 。

重离子反应形成的类复合核的二体裂变,具有强烈的各向异性,质心系中以 $1/\sin\theta$ 分布,这是因为裂变核具有较高的自旋角动量。三体裂变的级联出射裂变和品字型瞬发裂变模式中,级联裂变的第一次裂变方向与核的自旋相关,假定裂片具有一定自旋,第二次裂变只与第一次裂变轴的夹角有一定的取向关系,由于裂片自旋取向的差异,三体的速度矢量平面的法向与原始核的自旋无关;瞬发品字型三体形变时,

分裂过程,随机选取二体裂变方向,并使它具有实验给定的质量分布和速度分布,大量的三体事件经过实验探测器过滤,即能被记录事件的裂变方向积累成谱如图5中的点,与实验测量的三体裂变方向角分布(直方图)进行比较,结果发现三个反应系统两者符合相当好,这说明实验三分裂取向与级联三分裂取向一致,这与运动学分析结果正好自洽。

5 结 论

在实验给出的信息中,我们有足够的证据证明 25MeV/u $^{40}\text{Ar}+^{197}\text{Au}$ 、 ^{157}Tb 、 ^{209}Bi 三系统的类熔合核的三体裂变事件来源于级联出射的裂变过程:

(1) 在统计和实验误差范围内,实验的相对速度分布很好地由级联发射的相对速度分布再现。

(2) 不同级联出射裂变模式的占有态正好符合于随激发能升高,从蒸发到对称裂变的过渡的特征,可以注意到首先发射较小碎片的几率最大,并随入射能升高,这种类似于大质量蒸发过程的出射也增加,质量也增加到与其它两裂片没有区别,首先出射中质量或大量碎片的几率增加,到最后三类出射占有态几率相同。

(3) 裂变角分布也证明了级联裂变的假设,从另一个侧面证明了运动学分析的正确性。

(4) 级联出射的裂变与级联裂变是两个不同的概念,前者指裂片出射(裂变通过断点)存在时间差,后者是指相继裂变过程。实验数据运动学给出裂变形变两次通过断点有一较大的时间差,意味着两次裂片出射裂变形变也存在时间差。级联裂变要经过两次裂变弛豫时间,许多人担心由于大量轻粒子蒸发很难跨越第二次裂变形变位势。但第一次裂变后,裂片具有梨形形状,其形变势引起裂片的多极振荡,并慢慢变为激发能,这部分形变能不易被轻粒子蒸发带走。在振荡过程中,裂片的激发能很容易跨越一个较低的位势进行裂变。原始核激发能越高,裂片分配的激发能也越高,再裂的几率也越大,甚至可能在第一次裂变未到达断点时第二次裂变的形变已经开始。

我们认为在较低激发态热核的多体出射是级联出射过程,有证据显示高激发能的多体出射是瞬发行为,以后我们将用角关联技术分析这之间的过渡特征。

参 考 文 献

- [1] Dai Guangxi et al., *China. Journl. Nucl. Phys.*, **15** (1993) 101.
- [2] Wu Heyu, Dai Guangxi et al., *China. Journl. Nucl. Phys.*, **15**(1993) 185. 吴和宇、戴光曦,高能物理与核物理,**17**(1993)680.
- [3] 吴和宇、戴光曦,高能物理与核物理,**18**(1994)729.
- [4] 吴和宇、戴光曦,物理学报,**43**(1994)540.
- [5] A. Badala et al., XXVIII Int. Meeting on Nuclear physics, Bormio, (1990) 314.
- [6] M. Louvel et al., Proceedinys of Nikko workshop, Japan (1991).
- [7] G. Bizard D. Durand A. Genoax—Lubain Preprint LPCC91—10 (submit to Physics Letters).
- [8] V. Viola et al., *Phys Rev.*, **C31** (1985) 1550.

A Test of Sequential Decay of Hot Nuclei Around 3MeV/u Excitation Energy

Wu Heyu Dai Guangxi

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

Received on February 3, 1994

Abstract

The decay properties of excited nuclei corresponding to about 3MeV/u excitation energy formed in incomplete fusion reactions ^{40}Ar (25MeV/u) + ^{209}Bi , ^{197}Au , ^{159}Tb are analysed. The sequential decay of nuclei by large fragments is identified using a minimization procedure of relative velocity difference with coulomb repulsion velocity. It is shown that three fragments originate from two successive independent binary splittings. This result is also supported by the fact, that the experimental angular distribution of ternary fragments is nicely reproduced by sequential decay.

Key words hot nuclei, cascade fission emission, prompt ternary fission, fission total kinetic energy, angle distribution of ternary fission, coulomb repulsion velocity.