

# 三分裂中的级联裂变模式

吴和宇 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

1993年2月18日收到

## 摘 要

用统计模型分析级联裂变,假设复合核首先分裂为两裂变碎片,其质量分布与实验分布一致,跟踪所有质量上可能的裂变碎片和所有能量上可能的衰变过程,统计裂变碎片再次裂变的几率,证明级联裂变模式基本上与三分裂的实验相符,复合核系统的激发能越高,裂片的质量越大,再裂的几率也就越大。

**关键词** 三分裂,级联裂变,统计衰变宽度,衰变链。

## 1 引 言

质量对称三分裂为本文主要研究对象(后简称为三分裂),它的机制不能简单地同蒸发或裂变过程伴随轻粒子发射联系起来。在三块质量相当的裂片出射的过程中,核的形状变化复杂得多。通常认为复合核三分裂形变可能有三种方式,即拉长形成双脖子模式、级联裂变模式和品字型三级模式。Strutinsky<sup>[1]</sup>研究了平衡拉长模式,发现 $x \geq 0.7$ 时平衡态双脖子不能形成;Diehl<sup>[2]</sup>比较了拉长型和品字型三分裂的位能曲面,发现拉长型在能量上占优势;戴光曦<sup>[3]</sup>利用旋转三叶回旋体形状加入核表面张力与核温度的关系,分析了品字型三分裂的位能曲面,发现这种模式也是可能的。本文讨论级联裂变过程并与实验结果比较。

复合核三分裂的实验<sup>[4-6]</sup>大都采用云母固体径迹探测器,它只能给出三分裂相对二分裂的激发函数,发现三分裂与二分裂比( $P_{32}$ )随激发能和 $Z^2/A$ 的增加而增加,但不能给出三分裂的裂片的时序关系等信息,所以很难确定三分裂的模式。

## 2 理论描述

### 2.1 裂片的质量分布和激发能分布

重粒子诱发裂变都是质量对称分布,为一高斯型单峰。W. U. Schroder<sup>[7]</sup>分析了裂片的质量分布与激发能的关系,发现裂片的质量非对称性的起伏随激发能的升高而增加,与裂变核的质量或可裂变参数无关。对大量系统来说,包括裂变位垒 $B_f = 0$ 的分波( $l \geq l_{\text{临界}}$ )的准裂变数据拟合裂片的质量分布半宽 $\sigma$ 满足:

$$\frac{\sigma}{A} = \frac{(E_{sc}^* - 35)^{1/4}}{12.5}, \quad (1)$$

其中断点激发能  $E_{sc}^*$  可由质心系激发能  $E_{CM}^*$ , 裂变位垒  $B$  表示为:

$$E_{sc}^* = E_{CM}^* - B. \quad (2)$$

复合核的激发能  $E^*$  在两裂片激发能  $E_1^*, E_2^*$ , 复合核裂变前发射粒子、 $\gamma$  发射带走的能量  $E_{rad}$ , 裂变的形变、库仑、表面、转动、振动在内的集体能变化  $E_{col} = E_{col1} + E_{col2} - E_{col0}$  (其中  $E_{col0}, E_{col1}, E_{col2}$  分别为复合核和两碎片的集体能以及两裂片动能  $E_{k1}, E_{k2}$  之间分配:

$$E^* = E_{CM} + Q = E_{rad} + E_1^* + E_2^* + E_{col} + E_{k1} + E_{k2}, \quad (3)$$

$$E_{k1} + E_{k2} = \langle E_k \rangle = 0.1189 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + 7.5 \text{MeV}, \quad (4)$$

其中  $E_{CM}$  为复合核形成反应系统质心能,  $Q$  为复合核形成的  $Q$  值. 假定两裂片在分开后的核温度一致, 即裂片激发能的分配正比于它们的质量分配

$$\frac{E_1^*}{E_2^*} = \frac{M_1}{M_2}. \quad (5)$$

## 2.2 用统计模型处理轻粒子蒸发和裂变的竞争

激发态的核通过发射中子、质子、 $\alpha$  粒子和裂变的方式进行退激. 在统计模型中, 通过适当的相空间可得到各种衰变的分宽度  $\Gamma_i$ , 并直接与衰变几率相联系,  $\Gamma = \sum \Gamma_i$  决定了核的稳定性. 这种统计假定只有在所有自由度弛豫时间与  $\hbar/\Gamma$  之比非常小时, 这种近似才是合理的. 高激发核裂变的典型时间为  $1500 \text{fmC}^{-1}$ , 要求统计模型的  $\Gamma \leq 5 \text{MeV}$ . 而统计衰变宽度随激发能呈指数式增长,  $\Gamma_n = 1 \text{MeV}$ , 激发能约为  $100 \text{MeV}$  (详细的计算与衰变系统的质量和自旋有关), 激发能远高于  $100 \text{MeV}$  时, 裂变的时间过渡特征非常明显, 轻粒子特别是中子的发射几率优于裂变, 轻粒子发射远比统计预言的高. 统计模型不能处理复合核的轻粒子蒸发和裂变的竞争, 但复合核裂变经过一次退激, 裂片的激发能减少, 可用分宽度来分析裂片发射中子、质子、 $\alpha$  粒子和再裂的几率. 由费米能级密度公式得分宽度<sup>[8]</sup>:

$$\Gamma_n = \frac{A^{2/3}(E^* - B_n)}{\pi a_n K_n \exp[2(a_n E^*)^{1/2}]} \exp(2\sqrt{a_n(E^* - B_n)}), \quad (6)$$

$$\Gamma_p = \frac{A^{2/3}(E^* - B_p - V_p)}{\pi a_p K_p \exp[2(a_p E^*)^{1/2}]} \exp(2\sqrt{a_p(E^* - B_p - V_p)}), \quad (7)$$

$$\Gamma_\alpha = \frac{A^{2/3}(E^* - B_\alpha - V_\alpha)}{\pi a_\alpha K_\alpha \exp[2(a_\alpha E^*)^{1/2}]} \exp(2\sqrt{a_\alpha(E^* - B_\alpha - V_\alpha)}), \quad (8)$$

$$\Gamma_f = \frac{2\sqrt{a_f(E^* - B_f)} - 1}{4\pi a_f \exp[2(a_f E^*)^{1/2}]} \exp(2\sqrt{a_f(E^* - B_f)}), \quad (9)$$

其中  $B_n, B_p, B_\alpha$  为核质量表<sup>[9]</sup>和小液滴模型核质量<sup>[10]</sup>得到的结合能, 库仑位垒  $V = \frac{Z'(Z - Z')e^2}{r_0[(A - A')^{1/3} + A'^{1/3}]}$ ,  $K$  为一常数  $\frac{\hbar^2}{g m_N r_0^2}$ ,  $g, r_0, m_N$  为发射粒子简并度、核半径参数

和核子质量,能级密度参数  $a_n/A = 0.120 + 0.00917S$ ,  $A$  为质量数,  $S$  为壳修正能,能级密度参数对不同出射道略有不同<sup>[11]</sup>,  $a_t/a_n = 1.20$ ,  $a_\alpha/a_n = 1.08$ ,  $a_p/a_n = 1$ .

### 2.3 级联裂变几率

一个激发态的核衰变到平衡态的核的步骤很多,在轻粒子发射的衰变链中,选择元素  $(A, Z)$ , 各衰变链彼此耦合,其方程组:

$$\frac{d}{dt} P_{AZ}(t) = \sum_{\substack{A' > A \\ Z' > Z}} \Gamma_{A'Z'-AZ} P_{A'Z'}(t) - \sum_{\substack{A' < A \\ Z' < Z}} \Gamma_{AZ-A'Z'} P_{AZ}(t) - \Gamma_t P_{AZ}(t), \quad (10)$$

这里  $P_{AZ}(t)$  是  $t$  时刻核占据  $(AZ)$  态的几率,  $\Gamma_{AZ-A'Z'}$  是通过轻粒子发射从  $(AZ)$  衰变到  $(A'Z')$  的宽度,需要用网络法或 Monte Carlo 方法进行复杂计算.

级联裂变过程中只考虑第一次分裂后裂片的衰变过程. 具有激发能的碎片,可以通过蒸发轻粒子或再次裂变进一步退激,特别是一些非对称裂变过程产生的质量较大的裂片具有较大的裂变几率. 复合核经过一次裂变退激,裂变碎片激发能小,裂变碎片再次裂变时的位垒比较高,只要衰变到一定程度,再次裂变的几率就非常小了,不需要对所有的态进行跟踪,跟踪到蒸发 5 个核子或 2 个  $\alpha$  粒子就足够了,并不必全部考虑,过程可以简化.

裂片形成时,质量、电荷、能量具有一定分布  $P_l(A_0, Z_0, E_0)$ ,  $l$  表示形成初级裂片的状态,它的衰变路径可以是不一样的,可以是只蒸发不裂变,可以是直接裂变,也可以是蒸发一定的轻粒子后再裂变. 即使蒸发粒子的顺序不同,总的裂变效果也不相同,各种衰变路径还可以彼此相交,但不同方式形成的态,各步带走的激发能不相同,所以态的裂变几率与路径有关,其本质是与态的激发能有关. 裂片的态  $i(A, Z, E^*(A, Z), l)$  具有  $K$  个可能衰变分支,其再次裂变的几率为:

$$W_{ii}^f = \frac{\Gamma_{ii}^f}{\sum_K \Gamma_{ii}^K}, \quad (11)$$

其中求和是对所有  $K$  求和,三分裂的几率:

$$P_{st} = \sum_l P_l W_l = \sum_l \sum_i \frac{\Gamma_{il}^f}{\sum_c \Gamma_{il}^c} \prod_{k=i} \frac{\Gamma_{kl}^z}{\sum_s \Gamma_{kl}^s}, \quad (12)$$

其中上标为衰变方式,下标表示衰变路径和状态,第一个分式给出初态  $l$  的某一子态  $i$  裂变占所有衰变的比重,第二个分式和连续积给出初态  $l$  的核经过  $k$  次衰变到  $i$  态形成  $i$  态的几率,  $Z$  表示从  $l$  到  $i$  的非裂变衰变方式,  $C, S$  分别是态  $i, k$  的所有可能的衰变方式,  $f$  为裂变衰变.

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 多裂与能量的释放

原子核分裂成为几个大小相等部分的过程是否可能,在于这个过程是吸热还是放热,

放热过程是使核处于较低的能量状态,即更加稳定的状态,放热过程是开放的衰变道。这里只用了液滴模型考虑了初态和末态的性质,没有考虑裂变的位垒高度和裂变几率。

随着核电荷数的增加,多裂释放的能量可能超过二分裂释放的能量。在  $Z^2/A$  为 22.77 时,三分裂过渡到释放能量的过程;在  $Z^2/A$  为 34.01 时,四分裂过渡到释放能量的过程;在  $Z^2/A$  大于 30.52 时,三分裂退激比二分裂更彻底。复合核的质量  $A$  的增加分裂成为多块的过程在趋势上成为可能。

### 3.2 级联三分裂

$^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  系统的级联三分裂研究主要是对中心碰撞过程进行的,其线动量满足 Volia 线动量公式。入射能升高,  $\langle LMT \rangle$  减少,激发能  $E^*$  缓慢地升高。

图 1 是初级裂变碎片再分裂的几率与初级裂片的质量关系,即随着裂片质量的增加,级联裂变的几率迅速增加。在低激发能时这种增加更加迅速,它跨越了十多个数量级,此时的级联裂变主要是质量大的碎片的贡献。随着入射能增加,级联裂变的几率增加了,另一方面可能发生级联裂变的碎片质量范围变得宽得多了。随着入射能的进一步增加,级联裂变的几率不再明显变化,它与线动量转移不完全,激发能渐近饱和,裂变的时间过渡明显,中子和轻粒子的多重性上升带走了许多的激发能有关。质量大于 180 的核,激发能高,再分裂的几率为 1.0 是合理的。

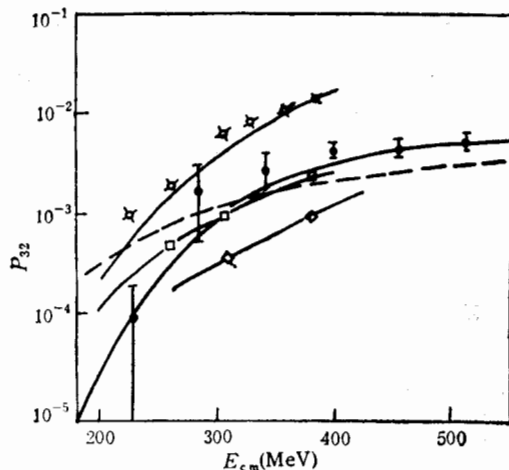


图 2 三分裂激发函数的实验与理论比较

$\times$   $^{40}\text{Ar} + ^{238}\text{U}$ ,  $\square$   $^{40}\text{Ar} + ^{209}\text{Bi}$ ,  $\diamond$   $^{40}\text{Ar} + ^{197}\text{Au}$ ,  
 $\circ$   $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$

周边碰撞的激发能低,计算用中心碰撞的能量关系势必增加计算值;二是周边碰撞类熔合核裂片质量分布受壳效应影响较大,使裂片质量分布展宽;三是三分裂核核温度较高,温

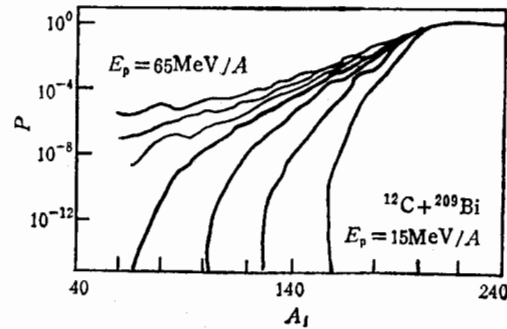


图 1 裂片再裂的几率与裂片的质量

### 3.3 级联三分裂激发函数与实验比较

级联三分裂不仅可以预言三分裂几率随激发能升高而升高,还可以预言它随复合核的可裂性的增加而增加。

图 2 中的点为实验测量值<sup>[4,6]</sup>,虚线为用(1)式给出的质量分布半宽对  $^{12}\text{C} + ^{209}\text{Bi}$  系统级联裂变的  $P_{32}$  比,在实验的误差内大都基本符合,只是在低能时预言的结果偏大。对于别的系统级联裂变理论值比实验值偏高主要有三方面的原因:一是三分裂主要来自于中心碰撞的类熔合核,它的裂片质量大激发能高,而

度对裂变质量分布影响较大。用参数化式:

$$\frac{\sigma}{A} = \frac{(E_{tc}^* - 35)^{G1}}{G2} \quad (13)$$

使用参数如表1。

表1 裂变质量分布参数

	C + Bi	Ar + Au	Ar + Bi	Ar + U
G1	0.26	0.26	0.30	0.90
G2	100	66	70	1940

用级联裂变方式可对各系统拟合很好,如图2中的实线。这种简单的级联衰变能较好地拟合实验数据,说明了三分裂可能就是这种衰变方式的结果。

级联裂变和拉长模式的最大困难是如何解释实验中观察到的大多数三裂片之间的夹角(投影角)近似为 $120^\circ$ 。如果级联裂变的两次分裂时间差大,裂片达到平衡后再裂,则裂片之间的夹角应是随机的;如果两次分裂时间短,则不会失去记忆,就可解释为:断点后裂片在裂前拉长方向出现一凸起部分,集体的恢复力使它恢复为球形,它对其它方向产生一应力,只有垂直于恢复力方向裂变可能性较大,如果这一部分集体运动动能使裂片有一定几率跨过位垒进行级联裂变,三碎片相互为一大角可与实验一致。

## 4 结 束 语

用统计模型的理论证明了级联裂变是一种可能的三分裂方式,它无需要像其它模式一样要跨越一个很高的分裂位垒。它除用裂变质量分布的经验公式外,未作别的假设,能正确估计三分裂相对于二分裂的几率的数量级。

由于模型过于简单,只是在数量级上估计级联裂变几率,只有在合理调整裂变的质量分布宽度后,才能较准确地拟合实验数据。要证明级联裂变存在,需要精确的电子学测量,需要对各种模式的动力学计算相比较。

## 参 考 文 献

- [1] V. M. Strutinsky and N. Y. Lyashenko, *JETP (Sov. Phys.)*, **16**(1963) 418.
- [2] Herbert Diehl and Walter, Greiner, *Nucl. Phys.*, **A229**(1974) 29.
- [3] 戴光曦,高能物理与核物理,**16**(1992)651.
- [4] 吴和宇、戴光曦、蔡薇等,高能物理与核物理,**17**(1993)680.
- [5] V. P. Perehygin and N. H. Shadieva, *Nucl. Phys.*, **A127**(1969) 577.
- [6] R. L. Fleischer and P. B. Price, *Phys. Rev.*, **143**(1966) 943.
- [7] W. U. Schroder and J. R. Huizenga, *Nucl. Phys.*, **A502**(1989) 473.
- [8] James Rayford Nix, *Nucl. Phys.*, **81**(1966)61.
- [9] M. S. Antony and J. Britz, *Atomic Data And Nucl. Data Tables*, **34**(1986) 279.
- [10] W. D. Myers, *Droplet Model of Atomic Nuclei*, New York, Plenum 1977.
- [11] Huge Delagrange, *Phys. Rev.*, **C16**(1977)706.

## Ternary Fission with Cascade Fission Model

Wu Heyu    Dai Guangxi

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

Received on February 18, 1993

### Abstract

Probability of cascade fission was studied within frame of statistical liquid-drop model and compared with result of ternary fission experiment, it increases with existed energy of compound nuclear system or mass of fission fragment increasing.

**Key words** Ternary fission, cascade fission, width of statistical decay, decay chain.