

由重离子引起的融合裂变和准裂变过程中断点拉长度研究的一个简单模型

王正大 徐树威 廖容之

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文假定在断裂过程中碎片相对运动动能可以忽略,绝热近似条件得到满足,并且碎片只有旋转对称的四极形变,从而得到决定断点处碎片运动的三个方程。求解这一简单的代数方程组,可以得到断点拉长度,并得到出射碎片的总动能。计算结果与重离子引起的融合裂变和准裂变(深部非弹性散射的全阻尼)过程中出射碎片的平均总动能的许多实验资料符合。

前 言

对于重离子引起的融合裂变和准裂变(深部非弹性散射的全阻尼)过程,研究其断点拉长度是一个有趣的课题。实验事实说明,尽管入射炮弹动能很不一样,融合裂变出射碎片的平均总动能基本上是不变的。所以人们一般认为出射碎片的总动能基本上取决于断裂时碎片的相互作用势能(主要是库仑能),而断裂时碎片的径向初始动能可以忽略。至于准裂变,本身就意味着碎片分离前,系统的径向相对运动动能已经完全转化为内部激发能了。此外,实验测得的碎片动能要比两个球形碎片相切时的库仑能低得多,所以人们认为碎片在断裂时被拉长了。基于这些事实,作者假设: 1. 断裂时碎片径向的相对运动动能可以忽略; 2. 断裂时碎片只发生四极形变,而且对称轴就在两核心的连结线上; 3. 碎片处于高激发态,壳效应被洗刷,液滴模型是一个很好的近似。根据这三条假设我们找到了一种简便的计算方法,可以定量地求出断裂时碎片的拉长度和出射碎片的总动能,并且与实验测得的碎片平均动能作了比较。

计 算 方 法

断裂时,由于碎片间相对径向运动动能可以忽略,径向速度十分缓慢,所以把相对径向运动自由度(r)与碎片的形变自由度分开处理的绝热近似是合适的。即是说,对于一个固定的 r 位置,两个碎片在时间上完全来得及调整自己的形状,使整个系统的位能处于最低状态。在数学上则表达为满足极值的必要条件:

$$\frac{\partial U(r, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_1} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U(r, \alpha_1, \alpha_2)}{\partial \alpha_2} = 0, \quad (2)$$

其中 U 为系统的总位能, r 是两碎片质心的相对距离, α_1, α_2 分别表示碎片的四极形变参数。当然,断点的另一个条件应该是:

$$r = R_1(1 + \alpha_1) + R_2(1 + \alpha_2), \quad (3)$$

此处, R_1 和 R_2 分别表示两碎片为球形时的核半径。根据液滴模型,系统的总位能可以表示为:

$$U = U_c + U_N + U_d + U_{ce} \quad (4)$$

式中库仑势

$$U_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \left[1 + \frac{3}{5} \frac{1}{r^2} \sum_{i=1}^2 R_i^2 \alpha_i + \frac{12}{35} \frac{1}{r^2} \sum_{i=1}^2 R_i^2 \alpha_i^2 + \frac{54}{25} \frac{1}{r^4} \alpha_1^2 \alpha_2^2 R_1^2 R_2^2 + \frac{18}{35} \frac{1}{r^4} \sum_{i=1}^2 R_i^4 \alpha_i^2 \right] \quad (5)$$

需要特别说明的是,上述库仑势表式在满足条件 $r \geq R_1(1 + \alpha_1) + R_2(1 + \alpha_2)$ 时适用。核势

$$U_N = -2\pi(\gamma_1 + \gamma_2)r_0 \frac{A_1^{1/3} A_2^{1/3}}{A_1^{1/3} \left[\frac{(1 + \alpha_2)}{\left(1 - \frac{\alpha_2}{2}\right)^2} + A_2^{1/3} \frac{(1 + \alpha_1)}{\left(1 - \frac{\alpha_1}{2}\right)^2} \right]} \times \begin{cases} \frac{5}{3} \left(1 + \frac{S}{S_0}\right) \exp\left(-\frac{8}{5} \frac{S}{S_0}\right) & S \geq 0 \\ \frac{5}{3} - \frac{S}{S_0} - \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 & S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

此处

$$S = r - [R_1(1 + \alpha_1) + R_2(1 + \alpha_2)],$$

$$S_0 = 1\text{fm},$$

离心势

$$U_{ce} = \frac{L(L + 1)\hbar^2}{\left[2\mu r^2 + \frac{2}{5} A_1 R_1^2 \left(1 + \frac{\alpha_1}{2}\right) + \frac{2}{5} A_2 R_2^2 \left(1 + \frac{\alpha_2}{2}\right) \right]} \quad (7)$$

形变能

$$U_d = \sum_{i=1}^2 4\pi\gamma_i R_i^2 [0.4(1 - x_i)\alpha_i^2 - 0.0381(1 + 2x_i)\alpha_i^3], \quad (8)$$

式中所有的液滴模型参数均为传统参数^[1]

$$\left. \begin{aligned} \text{半径参数 } r_0 &= 1.2\text{fm}, \\ \text{表面能参数 } \gamma_i &= 0.99 \left[1 - 1.78 \left(\frac{N_i - Z_i}{A_i} \right)^2 \right] \text{MeV} \cdot \text{fm}^2, \\ \text{可裂变参数 } x_i &= Z_i^2 / 45 A_i, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

J. Wilczynski^[2] 从液滴模型出发,曾得到了两个球形核接触时相互作用的核力表达式.我们所用的核势和核力是在这个基础上,由本文作者推广得到的[见附录],它可以适用原子核具有四极形变的情况.

将(3)式代入(1)、(2)两式,得到一个关于 α_1, α_2 的简单的代数方程组.

这个方程组的解,就是我们所求的断点碎片的拉长形变参数 $\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}$.出射碎片总动能 \bar{E}_k 为

$$\bar{E}_k = U_c(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}) + U_N(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}) + U_{cc}(\alpha_1^{(0)}, \alpha_2^{(0)}, L_f)$$

在计算离心势时,碎片分离时的相对运动角动量 L_f 是根据粘着模型估计的,由于形成融合反应和深部非弹性散射的入射道角动量分布在一个区域之内,所以 L_f 只是一个平均值,这样计算是有误差的,但是它在确定形变时只是一个可以忽略的微小项,而在计算位能时,离心能仅占总位能的百分之几.比如,在我们计算的 $620\text{MeV } ^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag}$ 反应离心能算最大,此时总位能为 $120\text{--}150\text{MeV}$,而离心能仅占 10MeV 左右.

本工作对裂变研究只适合 $S \geq 0$ 情况,而 $S < 0$ 情况是极复杂的.此时,流体不可压缩及低能核反应体积守恒条件受到破坏,本工作的研究不涉及到这种情况.

虽然我们采用的位势只适合 $S \geq 0$ 情况,但它并不影响我们确定断点的形变.由于在断点可以认为 S 等于一个无限小的正数 $S = +\delta$,这样我们的位势是完全适用的.若 $+\delta = 10^{-4}\text{fm}$,由此计算得到的断点形变就可以认为非常接近真实的断点形变了.这种研究形变的方法已有人采用过^[8].

计算结果与结论

我们计算了 $^{12}\text{C}, ^{16}\text{O}$ 等重离子和 α 粒子引起融合裂变反应中形成七种不同复合核的出射碎片总动能和对称裂变时拉长形变参数 α^0 ,并与实验测得的平均总动能^[3]作了比较(见表1).在实验误差范围内,理论值与实验值基本相符.

我们还计算了 $73\text{MeV } ^{12}\text{C} + ^{197}\text{Au}$ 生成的复合核 ^{209}At 裂变时,碎片总动能随重碎片质量变化的曲线(图1),并与本所实验^[4]测得的碎片平均总动能作了比较.由图1可见,理论值比实验值略低 $3\text{--}5\text{MeV}$,也大致相符.

我们还计算了 $500\text{MeV } ^{86}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$ 准裂变过程出射碎片的总动能(230MeV),轻重碎片的拉长形变参数分别为 $0.42, 0.81$,与实验测得的等高图^[5]相比(图2),理论计算的总动能值(图中水平虚线)正好穿过轻碎片全阻尼群的峰值部位.

特别有趣的是,我们计算了 $620\text{MeV } ^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag}$ 准裂变碎片总动能和两个互补碎片的拉长度(α_1, α_2).并与实验测得的^[6] J. Wilczynski 的等高图作了比较(图3).图中比擦边角要大的角度方向,等高线逐渐变平,特别是对于碎片电荷(Z)远离弹核电荷($Z = 22, Z = 28$)的情况,表现尤为明显,这是典型的能量全阻尼的特征.理论计算的出射碎片的总动能(图中水平虚线),从大角度部位来看,正好穿过等高线的峰值部位.

由以上的计算结果与实验结果相比,我们可以得到两个初步的结论:1.在重离子引起的融合裂变和准裂变过程中,断点形变基本上是四极形变.碎片被拉长了,描写拉长度的形变参数一般在 $0.4\text{--}0.6$ 之间,还是比较大的.2.我们所提供的简便计算方法,可以被

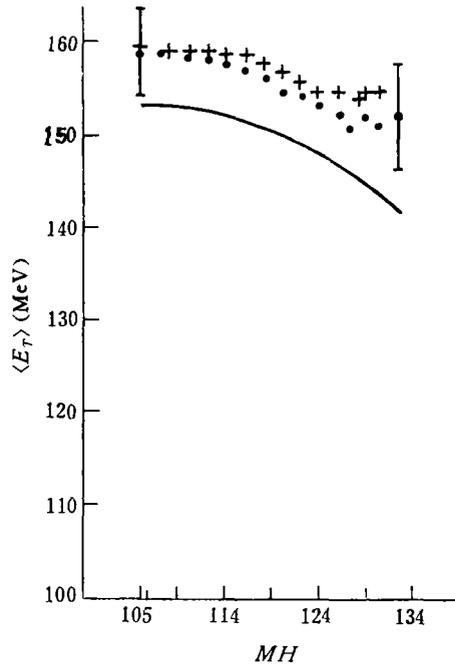


图 1

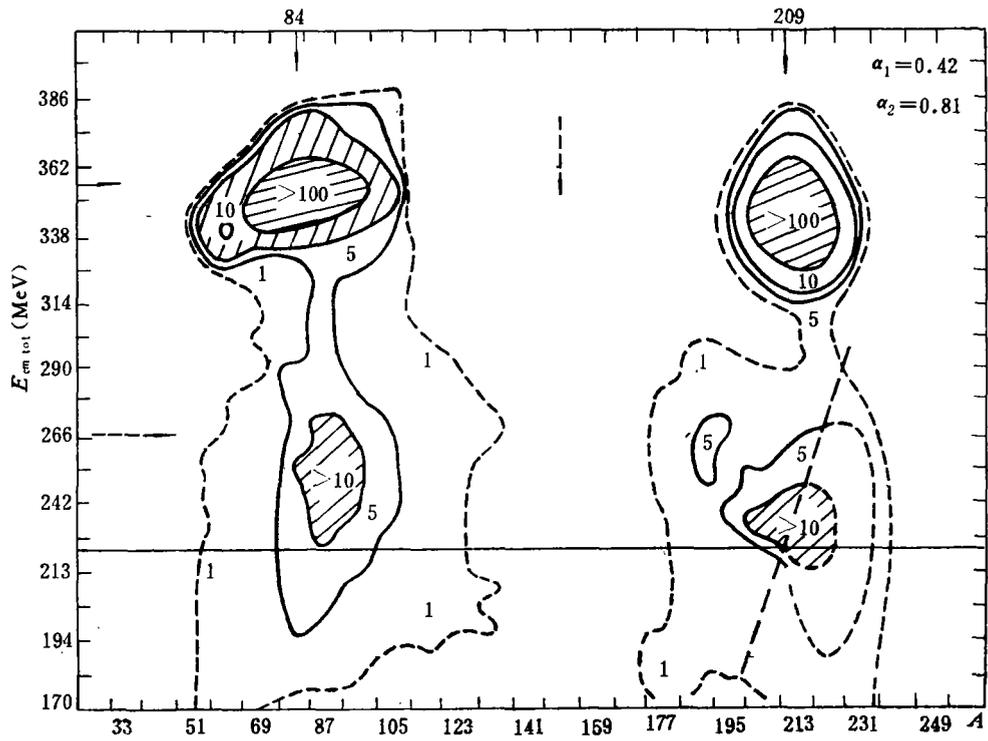


图 2

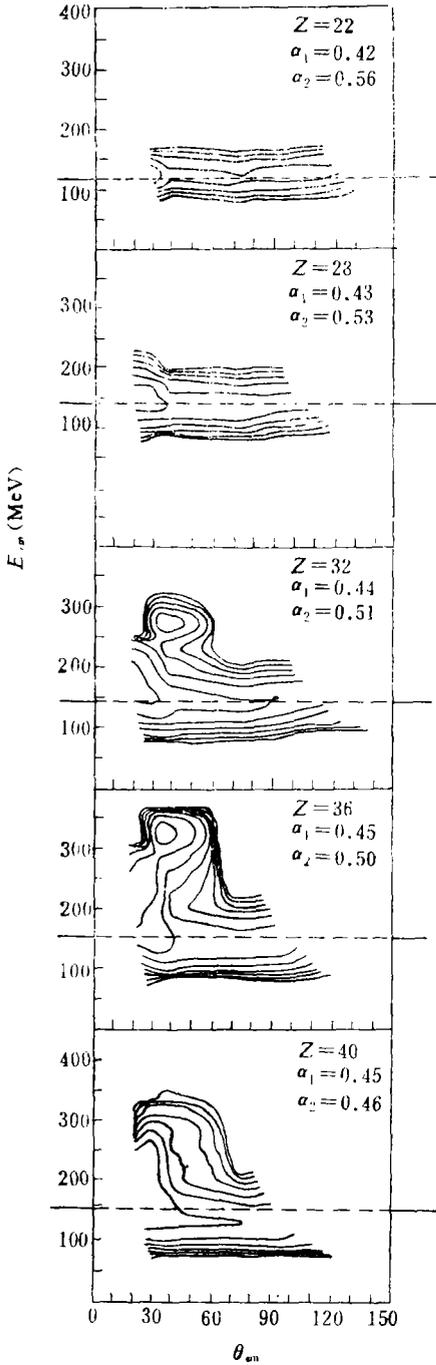


图 3

用来估算碎片的总动能。

表 1

复合核	反应	E_L (MeV)	\bar{E}_k (实) (MeV)	\bar{E}_k (理) (MeV)	$\alpha^{(0)}$
^{18}Os	$^{174}\text{Yb} + ^{12}\text{C}$	109	127 ± 6		0.44
		125	129 ± 6		
^{18}Os	$^{170}\text{Er} + ^{16}\text{O}$	120	124 ± 6	120	0.44
		136	124 ± 6		
		151	128 ± 6		
		166	127 ± 6		
^{18}Pb	$^{182}\text{W} + ^{16}\text{O}$	102	144 ± 5	140	0.46
		115	144 ± 5		
		127	146 ± 5		
		144	146 ± 5		
		165	147 ± 5		
^{230}Th	$^{226}\text{Ra} + \alpha$	22.1	160 ± 2	162	0.47
		27.1	160 ± 2		
		30.8	165 ± 3		
		33.7	165 ± 4		
^{238}U	$^{232}\text{Th} + \alpha$	21.4	172.5 ± 3.2	168	0.47
		21.8	169.1 ± 2.0		
		22.1	171.4 ± 2.0		
		25.7	168.2 ± 2.0		
		29.5	167.0 ± 2.0		
		33.0	170.5 ± 3.5		
^{242}Pu	$^{238}\text{U} + \alpha$	65.0	168.0 ± 4.5	174	0.48
		25.7	176.0 ± 3.2		
		27.8	175 ± 5		
		29.4	173 ± 4		
		30.4	175 ± 5		
		32.6	175 ± 5		
		33.0	174.7 ± 3.5		
		34.2	177 ± 5		
35.6	176.5 ± 5				
^{250}Cf	$^{238}\text{U} + ^{12}\text{C}$	125	183.2 ± 4	187	0.49
		166	192.7 ± 4.6		
^{256}No	$^{240}\text{Pu} + ^{16}\text{O}$	166	192.7 ± 4.6	199	0.52

附 录

两个球形核相互之间的核势(接近势)为^[17]

$$U_N = -2\pi(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \times \begin{cases} \frac{5}{3} \left(1 + \frac{S}{S_0}\right) \exp\left(-\frac{8}{5} \frac{S}{S_0}\right) & S \geq 0 \\ \frac{5}{3} - \frac{S}{S_0} - \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 & S < 0 \end{cases}$$

此处 γ_1 和 γ_2 分别是两个球形核的表面张力系数, R_1 和 R_2 分别是两个球形核半径, S 是两个核表面之间的距离, 令 r 为两核心之间距离

$$S = r - (R_1 + R_2), \quad S_0 = 1\text{fm}.$$

两个球形核接触相互作用核力为

$$F_N = \frac{dU_N}{dr} \Big|_{r=R_1+R_2} = 2\pi(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

这个核力公式由 J. Wilczynski 从液滴模型推导得出, 他的推导方式如下

$$F_N = \gamma_1 \frac{dS_1}{dr} \Big|_{r=R_1+R_2} + \gamma_2 \frac{dS_2}{dr} \Big|_{r=R_1+R_2} = 2\pi(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

此处 S_1 和 S_2 是两核表面积. 假设两个核发生四级形变, 并且两个椭球的对称轴与两椭球的中心连线重合, 类似 J. Wilczynski 的推导, 我们得到两个椭球接触的核力为

$$F_N = 2\pi(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_1 R_2}{\left[R_1 \frac{(1 + \alpha_2)}{(1 - \frac{\alpha_2}{2})^2} + R_2 \frac{(1 + \alpha_1)}{(1 - \frac{\alpha_1}{2})^2} \right]}.$$

于是我们可以得到两个四级形变核之间的核势为

$$U_N = -2\pi(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_1 R_2}{\left[R_1 \frac{(1 + \alpha_2)}{(1 - \frac{\alpha_2}{2})^2} + R_2 \frac{(1 + \alpha_1)}{(1 - \frac{\alpha_1}{2})^2} \right]} \times \begin{cases} \frac{5}{3} \left(1 + \frac{S}{S_0}\right) \exp\left(-\frac{8}{5} \frac{S}{S_0}\right) & S \geq 0 \\ \frac{5}{3} - \frac{S}{S_0} - \left(\frac{S}{S_0}\right)^2 & S < 0 \end{cases}$$

值得注意的是, 这里 S 表示两个椭球面之间的距离

$$S = r - [R_1(1 + \alpha_1) + R_2(1 + \alpha_2)], \quad S_0 = 1\text{fm}$$

当两个变形参数为零时, 可以自然过渡到球形接近势

$$U_N(0, 0) = U_N,$$

并且自然有

$$F_N(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{dU_N(\alpha_1, \alpha_2)}{dr} \Big|_{r=R_1(1+\alpha_1)+R_2(1+\alpha_2)}.$$

参 考 文 献

- [1] V. M. Strutinsky, *Nucl. Phys.*, **A95**(1967), 420.
- [2] J. Wilczynski, *Physics and Chemistry of Fission*, **2**(1973), 269.
- [3] R. Vandenfoach and J. R. Huizenga, "Nuclear Fission", 1973, p. 290, Table X-1.
- [4] 余掬生等, 原子核物理(庐山会议文集)(1978), p. 136.
- [5] F. Hanappe et al., *Phys. Rev. Lett.*, **32**(1974), 738.
- [6] European Conference on Nuclear Physics with heavy ions, Cern (rance) 6-10, September, (1976), p. 136, Fig. 22.
- [7] E. Seglie et al., *Phys. Rev.*, **C11**(1975), 1227.
- [8] R. Beringer, *Phys. Rev. Lett.*, **8**(1967), 1006.

A SIMPLE MODEL FOR STUDYING THE STRETCH AT SCISSION POINT IN FUSION-FISSION AND QUASI- FISSION INDUCED BY HEAVY-IONS

WANG ZHENG-DA XU SHU-WEI MIAO RONG-ZHI

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Assuming that the kinetic energy of relative radial motion of fragments can be neglected during the scission process, so that the adiabatic approximation condition is assumed to be fulfilled, and the fragments have rotationally symmetric quadrupole deformation only. We have obtained three equations, which govern the motion of the fragments at scission point. Solving these simple algebra equations, we can obtain the scission point stretch, and evaluate the total kinetic energy of the emitted fragments. The calculated results are in agreement with most experimental data for the average total kinetic energy of fragments for heavy nuclei, which are emitted in the process of fusion-fission and quasi-fission i.e. complete damping process of DIS induced by heavy-ions.