

研究简报

由重离子引起的融合裂变及准裂变 过程中断点形变对碎片 激发能计算的影响

廖容之 王正大
(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

本文考虑了形变的影响,利用断点方程及等温条件,给出了重离子引起的融合裂变及准裂变过程中碎片激发能的估算公式。在碎片四极形变参数 $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ 时,回到人们熟知的公式

$$\frac{E_1^*}{E_2^*} = \frac{A_1}{A_2}$$

一、引 言¹⁾

出射碎片激发能的估计,是人们感兴趣的问题。通常的方法是,根据能损失的实验值,利用

$$\frac{E_1^*}{E_2^*} = \frac{A_1}{A_2}, \quad (1)$$

对两个碎片激发能进行分配。其缺点是没有考虑形变的影响;并且若没有能损实验值它就不能给出每一碎片各自的激发能。由于重离子反应中原子核的带电液滴性质,使得形变不可忽略,从而能损的估算也变得复杂了,碎片激发能分配不再遵循(1)式所示规律。断裂时碎片的形变能将随着碎片的飞离转化为它的单粒子激发能。

本文将沿用文献[1, 2]的方法,讨论碎片断点形变对激发能的影响,给出估算其大小的简单表示式。

二、公 式

大量的实验结果及理论分析指出,在重离子反应引起的各种物理量的弛豫过程中,往总是能量首先达到平衡。因此,我们有理由假定在断裂时刻两个碎片有相同的温度。

本文1984年4月13日收到。

1) 文中文字符号含义与文献[1, 3]保持一致,不另说明。

若我们简单假定碎片单粒子能级在费米面附近是等间距的,则由费米气体模型及量子统计容易证明,对断裂瞬间的碎片激发能 $E_{i_1}^*$, $E_{i_2}^*$ 有

$$\frac{E_{i_1}^*}{E_{i_2}^*} = \frac{g_1}{g_2} = \frac{A_1}{A_2} \quad (2)$$

由能量守恒条件,又有

$$\begin{cases} E_{ic} - \bar{E}_k + Q_{\text{ss}} = \sum_{j=1}^2 (E_{ij}^* + U_{d_j}) = \sum_{j=1}^2 (E_j^* + U_{d_{0j}}) & (3a) \\ \bar{E}_k = U_C + U_N + U_{Cl} & (3b) \end{cases}$$

这里, E_{ic} 是入射能(质心系), \bar{E}_k 是平均碎片总动能. $U_C, U_N, U_{Cl}, U_{d_j}$ 和 $U_{d_{0j}}$ 分别是库仑能、核能、离心能、形变能及碎片分离后剩余形变能. 已经有证据表明^[1,3], 这几种能量的计算是强烈地依赖于断点的碎片形变的. 由文献 [1, 4, 5]

$$\begin{cases} U_C = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \left[1 + \frac{3}{5} \frac{1}{r^2} \sum_{j=1}^2 R_j^2 \alpha_j + \frac{12}{35 r^2} \sum_{j=1}^2 R_j^2 \alpha_j^2 + \dots \right]; \\ U_N = 4 F_N d \left\{ 1 + \exp \frac{r - [R_1(1 + \alpha_1) + R_2(1 + \alpha_2)]}{d} \right\}^{-1}; \\ U_d = U_{d_1} + U_{d_2} = \sum_{j=1}^2 4 \pi r_j R_j [0.4(1 - x_j) \alpha_j^2]; \\ U_{Cl} = \frac{L(L+1) \hbar^2}{2(\mu r^2 + g_1 + g_2)}. \end{cases} \quad (4)$$

其中各参量的表示式是

$$\begin{cases} F_N = -2\pi(\gamma_1 + \gamma_2) \frac{R_1 R_2}{[R_1(1 + \alpha_2)^2 + R_2(1 + \alpha_1)^2]} \quad (\text{核力}); \\ \gamma_j = 0.99 \left[1 - 1.78 \left(\frac{N_j - Z_j}{A_j} \right)^2 \right] \quad (\text{表面能参数}); \\ g_j = \frac{m R_j^2}{5} [(1 + \alpha_j)^2 + (1 + \alpha_j)^{-1} - 2(1 + \alpha_j)^{-5/2}] \quad (j \text{ 碎片转动惯量}); \\ x_j = \frac{Z_j^2}{45 A_j} \quad (\text{可裂变参数}); \\ R_j = r_0 A_j^{1/3} = 1.2 A_j^{1/3} \quad (\text{碎片为球形时的核半径}) \end{cases} \quad (5)$$

A_j, N_j, Z_j —— j 碎片质量数、中子数、质子数; Q_{ss} ——基态反应 Q 值; r ——碎片质心距离; d ——核势弥散长度. α_j 是 j 碎片四极形变参数,它是独立于核温度的. 若断裂前系统的总位能是 U

$$U = U_C + U_N + U_{Cl} + U_d. \quad (6)$$

断裂时四极形变参数 α_j 由下面条件确定^{[1][3]}:

$$\begin{cases} \frac{\partial U(\alpha_1, \alpha_2, r)}{\partial \alpha_1} = 0; \quad \frac{\partial U(\alpha_1, \alpha_2, r)}{\partial \alpha_2} = 0 \\ r = R_1(1 + \alpha_1) + R_2(1 + \alpha_2) \end{cases} \quad (7)$$

由于 $\gamma_j(T) \approx \gamma_j \left(1 - \frac{T}{T_K}\right)$; 故当核温度 $T \ll T_K$ (T_K 是临界核温度) 时, i 碎片形变能仍可由它的基态形变能近似表示:

$$U_{d_i} \approx 4\pi\gamma_j R_j \cdot 0.4(1 - x_j)\alpha_j^2 \quad i = 1, 2 \quad (8)$$

最后由 (2) 及 (3a) 得到碎片激发能表示式:

$$\begin{cases} E_1^* = \frac{A_1}{A_1 + A_2} \left[E_{ic} - \bar{E}_k + Q_{EE} + \frac{(A_2 U_{d1} - A_1 U_{d2}) - (A_1 + A_2) U_{d01}}{A_1} \right], \\ E_2^* = \frac{A_2}{A_1 + A_2} \left[E_{ic} - \bar{E}_k + Q_{EE} + \frac{(A_1 U_{d2} - A_2 U_{d1}) - (A_1 + A_2) U_{d02}}{A_2} \right]. \end{cases} \quad (9)$$

在较高核温度 T 时, 对 (9) 的修正在附录中给出.

三、结果与讨论

按照公式 (2)–(9) 我们计算了五组反应 (令 $U_{d01} = U_{d02} = 0$): $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al} \rightarrow \text{N}, \text{B}, \text{Be}, \text{Li}$ (68 MeV)^[3]; $^{12}\text{C} + ^{\text{nat}}\text{Ca} \rightarrow \text{O}, \text{N}, \text{B-Be}, \text{Li}$ (68 MeV)^[3]; $^{86}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{86}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$ (500 MeV)^[6]; $^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag} \rightarrow ^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag}$ (620 MeV)^[7]; $^{16}\text{O} + ^{182}\text{W} \rightarrow ^{99}\text{Nb} + ^{99}\text{Nb}$ (127 MeV)^[8]. 结果见表 1, 2, 3 及图 1、2、3、4.

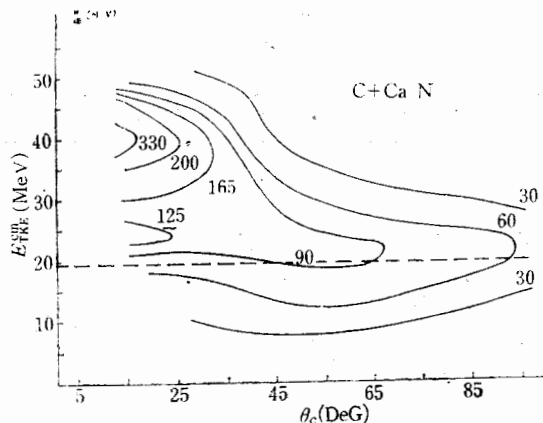


图 1 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al} \rightarrow \text{Be}$ (68 MeV) 的双微分截面等高图
-----理论全阻尼能量

由计算结果我们看到:

1. 这五组反应中断点形变系数是相当大的, $\alpha_{1,2}$ 一般都在 0.3–0.7 之间. 考虑了形变得到的理论平均碎片总动能 \bar{E}_k 与实验值的良好一致, 支持了计算中形变参数的可靠性. 图 1, 2 给出了 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al} \rightarrow ^8\text{Be}$ 及 $^{12}\text{C} + ^{\text{nat}}\text{Ca} \rightarrow ^{14}\text{N}$ 碎片双微分截面等高图^[3], 平均总动能理论值(虚线)正好穿过轻碎片全阻尼群峰值部位. 其它碎片也有类似结果^[3].

2. 由表 1, 表 2 计算下列值: $\beta_1 = \frac{E_1^*}{E_2^*}$, $\beta_2 = \frac{A_1}{A_2}$; $\Delta\beta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{\beta_2}$. 并按轻碎片质量数 A_1 画成折线 (见图 3 图 4). $\Delta\beta$ 反映了考虑形变后的激分能分配规律 (9) 对传统公式 (1) 的偏离: 在 C + Al 反应中为 33%–95%; 在 C + Ca 反应为 39%–146%, 这是

十分巨大的。

3. 公式(9)在下面两种情况下回到传统公式(1):

a) $\alpha_1 \rightarrow 0, \alpha_2 \rightarrow 0$. 这相当于小形变情况, 因此(1)式适用是显然的。

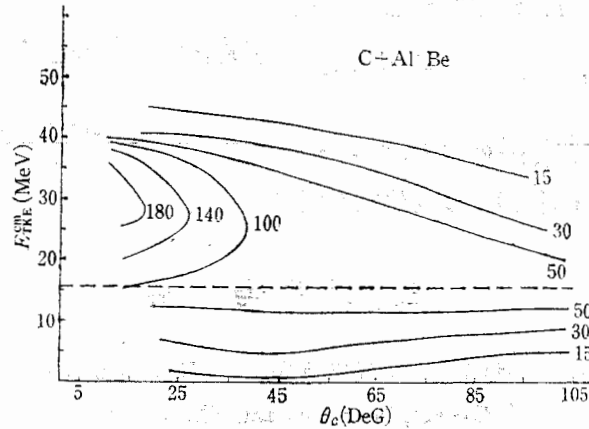


图2 $^{12}\text{C} + ^{40}\text{Ca} \rightarrow \text{N}$ (68 MeV) 的双微分截面等高图
——理论全阻尼能量

表 1

反 应	$^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ (68 MeV)			
	$^{14}\text{N} + ^{23}\text{Mg}$	$^{10}\text{B} + ^{29}\text{Si}$	$^8\text{Be} + ^{31}\text{P}$	$^6\text{Li} + ^{33}\text{S}$
α_1	0.40	0.42	0.43	0.45
α_2	0.35	0.32	0.31	0.30
\bar{E}_{k_2} , 理论 (MeV)	16.8	16.9	15.3	14.1
\bar{E}_{k_2} , 实验 (MeV)	≤ 17.5	≤ 17.0	≤ 15.5	≤ 12.5
E_1^* (MeV)	9.95	8.38	9.82	7.41
E_2^* (MeV)	13.4	14.4	24.2	20.9

表 2

反 应	$^{12}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$ (68.6 MeV)				
	$^{16}\text{O} + ^{36}\text{Ar}$	$^{14}\text{N} + ^{38}\text{K}$	$^{10}\text{B} + ^{42}\text{Sc}$	$^8\text{Be} + ^{44}\text{Ti}$	$^6\text{Li} + ^{46}\text{V}$
α_1	0.41	0.42	0.43	0.45	0.47
α_2	0.36	0.35	0.33	0.32	0.30
\bar{E}_{k_2} , 理论 (MeV)	20.8	19.5	17.8	14.3	12.3
\bar{E}_{k_2} , 实验 (MeV)	≤ 22.0	≤ 20.0	≤ 19.0	≤ 14.0	≤ 13.0
E_1^* (MeV)	12.3	9.38	7.19	9.15	6.97
E_2^* (MeV)	19.8	15.0	12.9	27.0	21.6

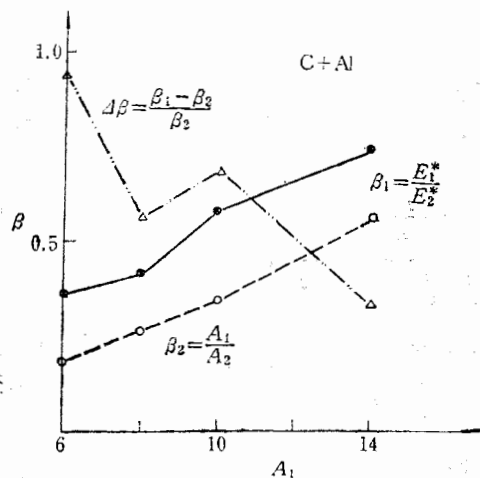


图 3 $^{12}\text{C} + ^{27}\text{Al}$ (68MeV) 中激分能分配对公式 (1) 的偏离

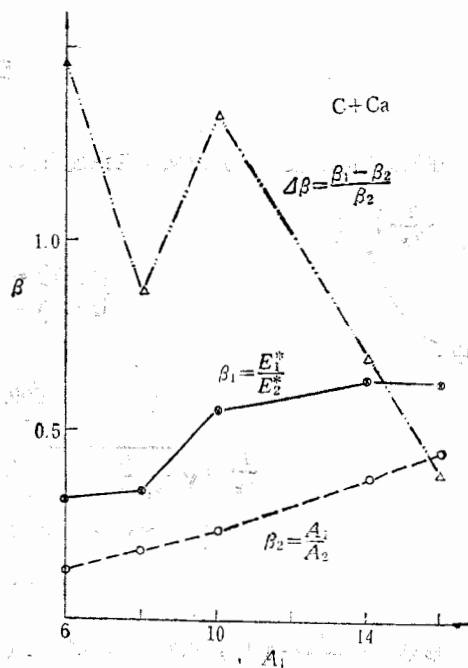


图 4 $^{12}\text{C} + ^{40}\text{Ca}$ (68MeV) 中激分能分配对公式 (1) 的偏离

表 3

反 应	$^{86}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$ (500MeV)	$^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag}$ (620MeV)	$^{16}\text{O} + ^{182}\text{W}$ (127MeV)
碎片	$^{86}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$	$^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag}$	$^{99}\text{Nb} + ^{99}\text{Nb}$
α_1	0.40	0.45	0.47
α_2	0.77	0.50	0.47
E_1^* (MeV)	37.84	87.31	40.32
E_2^* (MeV)	93.84	109.32	40.32
$\beta_1 = E_1^*/E_2^*$	0.40	0.80	1
$\beta_2 = A_1/A_2$	0.41	0.79	1
$\Delta\beta = (\beta_1 - \beta_2)/\beta_2$	0.02	0.01	0

$$b) \quad (E_{ic} - \bar{E}_k + Q_{gg}) \gg \frac{(A_2 U_{d1} - A_1 U_{d2}) - (A_1 + A_2) U_{d01}}{A_1},$$

$$\frac{(A_1 U_{d2} - A_2 U_{d1}) - (A_1 + A_2) U_{d02}}{A_2}.$$

作为例子,我们在表 3 给出了 $^{86}\text{Kr} + ^{209}\text{Bi}$, $^{86}\text{Kr} + ^{109}\text{Ag}$, $^{16}\text{O} + ^{182}\text{W}$ 的结果. 我们看到,形变参数都在 0.44—0.77 之间,是相当大的;但是 $\Delta\beta$ 却只在 0—2% 之间. 情况 b) 的存在增加了传统公式 (1) 的成功机会,然而这种成功却模糊了过程的物理实质.

4. 碎片激发能的讨论人们作得还不多, 本工作只是一个初步尝试.

附录

在较高的核温度 T 时, 形变能与温度有关. 由于 $\gamma_i(T) \approx \gamma_i \left(1 - \frac{T}{T_K}\right)$, 故 $U_{d_i}(T) \approx U_{d_i} \cdot$

$\left(1 - \frac{T}{T_K}\right)$, 故

$$\begin{cases} E_1^*(T) = E_1^* + \delta(T), & (\text{Aa}) \\ E_2^*(T) = E_2^* - \delta(T), & (\text{Ab}) \end{cases}$$

其中

$$\delta(T) = \frac{(A_2 U_{d_2} - A_1 U_{d_1})}{A_1 + A_2} \cdot \frac{T}{T_K}, \quad (\text{Ac})$$

$$\frac{T}{T_K} \approx \sqrt{\frac{A_1}{A_1 + A_2} \frac{F}{a_1}} / \left(T_K - \frac{1}{2F} \sqrt{\frac{A_1}{A_1 + A_2} \frac{F}{a_1}} \right) \quad (\text{Ad})$$

$$F \equiv (E_{ic} - \bar{E}_k + Q_{ss}) - (U_{d_1} + U_{d_2}), \quad (\text{Ae})$$

$$a_1 = \frac{6}{\pi^2 g_1}, \quad g_1 = \frac{3 A_1}{2 \theta_F}, \quad (\text{Af})$$

显然, 当 $\frac{T}{T_K} \rightarrow 0$ 时, $\delta(T) \rightarrow 0$, 则 $E_{1,2}^*(T) \rightarrow E_{1,2}^*$ 回到(9).

参 考 文 献

- [1] 王正大、徐树威、缪容之, 高能物理与核物理, 4(1980), 788.
- [2] Wang Zheng-da International Conference on Nuclear Physics, Florence, August 29-september 3, 1983, Vol. 1, contributed.
- [3] Xie Yuan-xiang et al., Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics, p. 579 (Florence August 29-september 3, 1983).
- [4] 郑蔓芃、王正大, 中国科学院近代物理研究所年报, 1981, p. 10.
- [5] 王正大等, 高能物理与核物理, 5(1981), 765.
- [6] F. Hanappe et al., Phys. Rev. Lett., 32 (1974), 738.
- [7] European Conference on Nuclear Physics with Heavy Ion, Cern (rance) 6—10, Septenfer, (1976), p. 136, Fig. 22.
- [8] R. Vandenfoach and J. R. Huizenga "Nuclear Fission" (1973), p. 290, Table X-1.

THE EFFECT OF DEFORMATION AT SCISSION POINT
FOR THE CALCULATION OF EXCITATION ENERGY
OF FRAGMENTS IN FUSION-FISSION AND
QUASI-FISSION INDUCED BY HEAVY-IONS

MIAO RONG-ZHI WANG ZHENG-DA

(*Institute of Modern Physics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

Taking into account of the effect of deformation and using the scission point equations and equal-temperature condition, the formula for estimating excitation energy of fragments in fusion-fission and quasi-fission induced by heavy-ions is obtained in this paper. When the quadrupole deformation coefficients $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, the equation returns to the well-known formula $E_1^*/E_2^* = A_1/A_2$.