

重离子反应出射碎片之间激发能分配的研究

王正大

(中国科学院近代物理研究所,兰州)

摘要

根据相干表面激发模型(CSEM)^[1-3],本文对于重离子反应出射碎片之间激发能分配作了分析.对于 $E_{\text{Lab}} = 476\text{MeV}$ 的 $^{56}\text{Fe} + ^{238}\text{U}$ 反应和 $E_{\text{Lab}} = 1565\text{MeV}$ 的 $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ 反应,本文讨论了出射碎片之间激发能分配的计算结果.

一、双核之间的相互作用

像通常一样原子核的集体形变自由度可以通过写出如下的在 \hat{r} 方向的原子核半径引入:

$$R_i(\hat{r}) = R_i^{(0)} \left[1 + \sum_{n\lambda\mu} \alpha_{n\lambda\mu}^{(i)} Y_{\lambda\mu}^*(\hat{r}_i) \right], \quad (1)$$

描述原子核简谐振动的 Hamiltonian 量可以表示如下:

$$H_{\text{vib}}(i) = \sum_{n\lambda\mu} \left(\frac{1}{2} C_{n\lambda}^{(i)} |\alpha_{n\lambda\mu}^{(i)}|^2 + \frac{1}{2D_{n\lambda}^{(i)}} |\prod_{n\lambda\mu}^{(i)}|^2 \right), \quad (2)$$

这里 $C_{n\lambda}^{(i)}$ 和 $D_{n\lambda}^{(i)}$ 是恢复力和质量参数,它们可以从单声子态的激发能和单声子态与基态之间的电磁跃迁矩阵元提取出来

$$E_{n\lambda} - E_0 = \hbar \sqrt{\frac{C_{n\lambda}}{D_{n\lambda}}}, \quad (3)$$

$$S_n = \left(\frac{3A(R^0)^\lambda}{4\pi} \right)^2 (2\lambda + 1) \frac{\hbar^2}{2D_{n\lambda}}. \quad (4)$$

双核之间的核位可以表示如下^[3]:

$$U_n = 4\pi\gamma\bar{R}_{cn}b\Phi(s/b), \quad b = 1\text{fm}, \quad \gamma = 1\text{MeV/fm} \quad (5)$$

$$S = r - \sum_i R_i^{(0)} \left[1 + \sum_{n\lambda\mu} \alpha_{n\lambda\mu}^{(i)} Y_{\lambda\mu}^* \left(\frac{\pi}{2}, \phi - \phi_i \right) \right], \quad (6)$$

这里 γ 是表面张力系数, b 是表面厚度, S 是双核表面之间的最小距离, \bar{R}_{cn} 是平场曲率半径, \bar{R}_{cn} 与在包含 S 的两个相互垂直平面中最靠近两个点的双核表面曲率 $\bar{R}^{\perp\perp}$ 有关

$$k_{in}^{\parallel} = \frac{2 \left[R_i \left(\frac{\pi}{2}, \phi_0 \right) - \cos(\phi_n - \phi_0) R_i \left(\frac{\pi}{2}, \phi_n \right) \right]}{\left[R_i \left(\frac{\pi}{2}, \phi_n \right) \sin(\phi_n - \phi_0) \right]^2}, \quad (7)$$

$$k_{in}^{\perp} = \frac{2 \left[R_i \left(\frac{\pi}{2}, \phi_0 \right) - \cos \left(\theta_n - \frac{\pi}{2} \right) R_i(\theta_n, \phi_0) \right]}{\left[R_i(\theta_n, \phi_0) \sin \left(\theta_n - \frac{\pi}{2} \right) \right]^2}, \quad (8)$$

$$\bar{k}_i^{\parallel} = \frac{1}{N} \sum_1^N k_{in}^{\parallel}, \quad (9)$$

$$\bar{k}_i^{\perp} = \frac{1}{N} \sum_1^N k_{in}^{\perp}. \quad (10)$$

$$\bar{R}_{c\mu} = [(\bar{k}_1^{\parallel} + \bar{k}_2^{\parallel})(\bar{k}_1^{\perp} + \bar{k}_2^{\perp})]^{-1/2}. \quad (11)$$

函数 $\Phi(s/b)$ 已经被参数化, 并仅仅与双核表面最靠近距离有关

$$\Phi(\zeta) = \begin{cases} -3.437 \exp \left(-\frac{\zeta}{0.75} \right), & \text{if } \zeta \geq 1.5; \\ -0.5(\zeta - 2.54)^2 - 0.085(\zeta - 2.54)^3, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

双核之间的库仑相互作用如下:

$$U_c = \frac{z_1 z_2 e^2}{r} + 3z_1 z_2 e^2 \sum_{\lambda\mu} \frac{(R_1^0)^\lambda}{2\lambda + 1} \frac{1}{r^{\lambda+1}} \alpha_{\lambda\mu}^*(1) Y_{\lambda\mu}^*(\hat{r}_1) \\ + 3z_1 z_2 e^2 \sum_{\lambda\mu} \frac{(R_2^0)^\lambda}{2\lambda + 1} \frac{1}{r^{\lambda+1}} \alpha_{\lambda\mu}^*(2) Y_{\lambda\mu}^*(\hat{r}_2), \quad (13)$$

双核之间由于核子转移引起的表面摩擦力可以表示为^[10]:

$$\mathbf{F}_f = E_r \mathbf{V}_r + F_t \mathbf{V}_t. \quad (14)$$

这里 F_r 和 F_t 分别是径向和切向摩擦系数, 表示如下:

$$F_r = F_r^0 \left(\frac{\partial U_n}{\partial r} \right)^2, \quad (15)$$

$$F_t = F_t^0 \left(\frac{\partial U_n}{\partial r} \right)^2, \quad (16)$$

$$F_r^0 = 4.0 \times 10^{-23} [\text{sec/MeV}],$$

$$F_t^0 = 0.01 \times 10^{-23} [\text{sec/MeV}].$$

原子核表面振动和自身旋转对于摩擦力的影响, 反映在径向速度和切向速度的计算中:

$$\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_{rc} - \sum_i \mathbf{V}_{rai}, \quad (17)$$

$$\mathbf{V}_t = \mathbf{V}_{tc} - \sum_i \mathbf{V}_{tsi} - \sum_i \mathbf{V}_{roti}. \quad (18)$$

$$V_{roti} = r \cdot \dot{\phi}_i \cdot \frac{R_i}{R_1 + R_2}, \quad (19)$$

$$V_{r,ai} = \frac{1}{N_1 + N_2} \left[\sum_{n=1}^{N_1} \dot{R}_i \left(\frac{\pi}{2}, \phi_n \right) \cos(\phi_n - \phi_0) + \sum_{n=1}^{N_2} \dot{R}_i(\theta_n, \phi_0) \cos\left(\theta_n - \frac{\pi}{2}\right) \right], \quad (20)$$

$$V_{t,ai} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \dot{R}_i \left(\frac{\pi}{2}, \phi_n \right) \sin(\phi_n - \phi_0). \quad (21)$$

$$i = 1, 2$$

这里 $V_{r,c}$ 和 $V_{t,c}$ 分别是双核质心之间相对运动的径向和切向速度, $V_{r,oi}$ 是双核表面的旋转速度, $V_{r,ai}$ 和 $V_{t,ai}$ 是双核表面在最靠近点的平均振动速度的径向和切向分量。

质量转移引起的耗散能是擦摩力所作的功:

$$E_{\text{tra.s.dis}}(t) = \int_{-\infty}^t (F_r V_r^2 + F_t V_t^2) dt, \quad (22)$$

表面振动阻尼所引起的耗散能可以表示如下:

$$E_{\text{vib.dis}}^{(i)}(t) = \int_{-\infty}^t \sum_{n\lambda\mu} \frac{\gamma_{n\lambda}^{(i)}}{(D_{n\lambda}^{(i)})^2} |\Pi_{n\lambda\mu}^{(i)}(t')|^2 dt'. \quad (23)$$

由质量转移引起的耗散能在出射碎片之间的分配,被假定与碎片的质量成比例。

二、重离子碰撞的动力学方程

描述双核碰撞的动力学方程,可以通过构成双核系统的 Hamiltonian 量和 Rayleigh 函数建立起来:

$$H = \frac{p_r^2}{2\mu} + \frac{p_\theta^2}{2\mu r^2} + \frac{p_\phi^2}{2\mu r^2 \sin^2 \theta} + \frac{p_{\phi_1}^2}{2J(1)} + \frac{p_{\phi_2}^2}{2J(2)} + U_c + U_n + H_{\text{vib}1} + H_{\text{vib}2}, \quad (24)$$

$$R_{ay} = R_{r,c} + R_{\text{vib}}, \quad (25)$$

$$R_{r,c} = \frac{1}{2} F_r V_r^2 + \frac{1}{2} F_t V_t^2, \quad (26)$$

$$R_{\text{vib}} = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{n\lambda\mu} \frac{2\gamma_{n\lambda}^{(i)} D_i^{(i)}}{\hbar} |\dot{\alpha}_{n\lambda\mu}(i)|^2. \quad (27)$$

这里 H 是系统的 Hamiltonian 量, R_{ay} 是 Rayleigh 函数, $R_{r,c}$ 和 R_{vib} 分别描述由于相对运动和表面振动引起的耗散, H 描述的是保守力场, R_{ay} 描述的是耗散力场。

根据 Hamilton 运动方程可以推导出描述相对运动部分的方程如下:

$$\dot{r} = \frac{p_r}{m_{aA}}, \quad (28)$$

$$\dot{p} = \frac{1}{m_{aA}} \left[\frac{p_\phi^2}{r^3 \sin^2 \theta} + \frac{p_\theta^2}{r^3} \right] - \frac{\partial(U_n + U_c)}{\partial r} - F_r \cdot V_r, \quad (29)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{m_{oA}} \frac{p_{\phi}}{r^2 \sin^2 \theta}, \quad (30)$$

$$\dot{p}_{\phi} = - \frac{\partial(U_n + U_c)}{\partial \phi} - F_t \cdot V_t \cdot r, \quad (31)$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{m_{oA}} \frac{p_{\theta}}{r^2}, \quad (32)$$

$$\dot{p}_{\theta} = \frac{1}{m_{oA}} \frac{p_{\phi}^2 \cos \theta}{r^2 \sin \theta} - \frac{\partial(U_n + U_c)}{\partial \theta} + M_{\theta}. \quad (33)$$

描述双核自身转动的方程:

$$\dot{\phi}_i = \frac{p_{\phi_i}}{J(i)}, \quad (34)$$

$$\dot{p}_{\phi_i} = - \frac{\partial(U_n + U_c)}{\partial \phi_i} + F_t \cdot V_t \cdot r \cdot \frac{R_i}{R_1 + R_2}, \quad (35)$$

$$i = 1, 2$$

由于如下关系成立:

$$\frac{\partial}{\partial \phi} (U_n + U_c) = - \frac{\partial}{\partial \phi_1} (U_n + U_c) - \frac{\partial}{\partial \phi_2} (U_n + U_c), \quad (36)$$

自然保持了角动量守恒,即轨道角动量的减少等于双核自转角动量的增加.

$$\dot{p}_{\phi} = - \sum_{i=1}^2 \dot{p}_{\phi_i}. \quad (37)$$

原子核刚性转动惯量可以近似表示如下:

$$\begin{aligned} J(i) \approx & \frac{2}{5} A_i (R_i^0)^2 \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{5}{4\pi}} x_{20}^{(i)} - \frac{5}{2\pi} \right. \\ & \cdot \sum_{\lambda\mu} [(x_{\lambda\mu}^2 + y_{\lambda\mu}^2)(\lambda 200 | \lambda 0)(\lambda 2\mu 0 | \lambda \mu) \\ & + (x_{\lambda\mu} x_{\lambda-2,\mu} + y_{\lambda\mu} y_{\lambda-2,\mu}) \left(\frac{2\lambda-3}{2\lambda+1} \right)^{1/2} ((\lambda-2)200 | \lambda 0) \\ & \cdot ((\lambda-2)2\mu 0 | \lambda \mu) + (x_{\lambda\mu} x_{\lambda+2,\mu} + y_{\lambda\mu} y_{\lambda+2,\mu}) \left(\frac{2\lambda+5}{2\lambda+1} \right)^{1/2} \\ & \left. \cdot ((\lambda+2)200 | \lambda 0)((\lambda+2)2\mu 0 | \lambda \mu) \right], \end{aligned} \quad (38)$$

$$i = 1, 2$$

描述原子核表面振动的运动方程如下:

$$\dot{\alpha}_{n\lambda\mu}^{(i)} = \frac{1}{D_{n\lambda}^{(i)}} \pi_{n\lambda\mu}^{(i)*}, \quad (39)$$

$$\dot{\pi}_{n\lambda\mu}^{(i)} = -C_{n\lambda}^{(i)} (\alpha_{n\lambda\mu}^{(i)})^* - \gamma_{n\lambda}^{(i)} \frac{\pi_{n\lambda\mu}^{(i)}}{D_{n\lambda}^{(i)}} - \frac{\partial(U_n + U_c)}{\partial \alpha_{n\lambda\mu}^{(i)}}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{\partial}{\partial \alpha_{n\lambda}^{(i)}} \left(\frac{p_{\phi 1}^2}{2J(1)} + \frac{p_{\phi 2}^2}{2J(2)} \right) - F_r \cdot V_r \cdot \frac{\partial V_{r,ii}}{\partial \alpha_{n\lambda}^{(i)}} \\
 & - F_t \cdot V_t \cdot \frac{\partial V_{t,ii}}{\partial \alpha_{n\lambda}^{(i)}} \quad i = 1, 2
 \end{aligned} \quad (40)$$

三、讨 论

关于出射碎片激发能分配的问题, 相干表面激发模型只假定由质量转移引起的耗散能量在双核之间的分配与碎片的质量成比例。由于 CSEM 包含了双核表面振动和集体旋转, 保守力、库仑力和核力可以引起振动和转动, 保守力导致的双核之间激发能的分配, 并不与原子核的质量成比例。对于 $E_{L,ab} = 476\text{MeV}$ 的 ${}^{56}\text{Fe} + {}^{238}\text{U}$ 反应, 图 1 显示出作为总的能量损失的函数的轻重碎片之间激发能分配的比率。两条虚线表示激发能分配按热量平衡条件分配, 这与按质量比率分配相同, 和按等量分配, 即轻重碎片激能相等。本文理论计算值(空三角)与实验测量值(实圈)是基本符合的。以前用 CSEM 计算得到的理论值(空圈), 由于计算中忽略了核位中平均曲率半径对于形变参数的微分项, 所以偏离实验值较大^[13]。对于 $E_{L,ab} = 1565\text{MeV}$ 的 ${}^{86}\text{Kr} + {}^{208}\text{Pb}$ 反应, 图 2 给出了作为总的能量损失的函数的轻碎片激发能和总的激发能的比率。虚线表示激发能分配与质量成比例, 空三角, 实圈与空圈表示的物理量与图 1 相同。本文的计算值与实验值也基本符合。对于 ${}^{86}\text{Kr} + {}^{208}\text{Pb}$ 反应, 入射能量比较大, 随着总的能量损失增加, 炮弹和靶核相互靠近时间较长, 由核子交换导致的耗散力所作的功在激发能中占了主要部分, 因而激发能的分配趋向与碎片质量成比例(图 2)。对于 ${}^{56}\text{Fe} + {}^{238}\text{U}$ 反应, 入射能量较小, 由于库仑排斥双核靠近停留时间短, 靠近距离也不如 ${}^{86}\text{Kr} + {}^{208}\text{Pb}$ 反应短, 由核子交换引起的耗散力所作

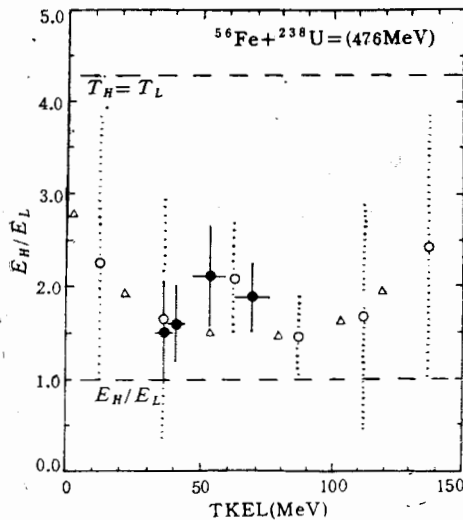


图 1

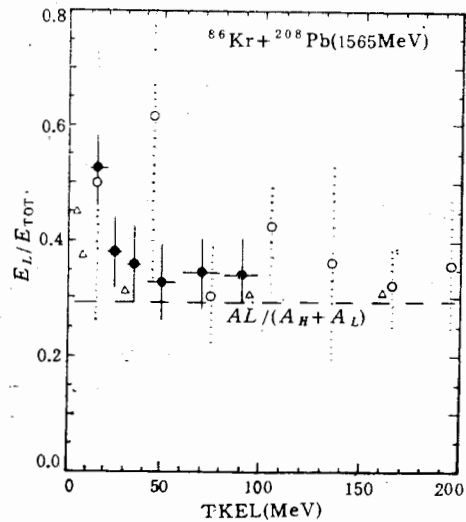


图 2

的功在激发能中只占小部分,大部分是保守力、库仑力和核力产生的激发能,在总的能量损失达到 50MeV 之后,激发能的分配并不与质量成比例(图 1)^[11,12].

参 考 文 献

- [1] R. A. Broglia, C. H. Dasso and A. Winther, *Phys. Lett.*, **B53**, (1974) 301; *Phys. Lett.*, **B61** (1976), 113.
- [2] R. A. Broglia, C. H. Dasso, G. Pollarolo and A. Winther, *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978) 707; *Phys. Rev. Lett.*, **41** (1978), 25.
- [3] R. A. Broglia, O. Civitarese, C. H. Dasso and A. Winther, *Phys. Lett.*, **B73** (1978) 405.
- [4] R. A. Broglia, C. H. Dasso and A. Winther, in Nuclear Structure and Heavy Ion Collision, Proceedings of the International School of physics "Enrico Fermi", Course LXXVII, edited by R. A. Broglia, C. H. Dasso and R. Ricci (North-Holland, Amsterdam, 1981), P. 327 and Ref. Therein.
- [5] R. A. Broglia, C. H. Dasso, G. Pollarolo and A. Winther, *Phys. Rep.*, **C48** (1978), 351.
- [6] C. H. Dasso and G. Pollarolo, *Comm. Com. Phys.*, **50** (1988), 341—366.
G. Pollarolo, A Simple Model For Deep Inelastic Reactions. Proceeding of the International School of Heavy Ion Physics, Erice, Italy, October 1986, Plenum, In press.
- [7] C. H. Dasso, M. Iozano and G. Pollarolo, *Phys. Rev.*, **C32** (1985), 2195.
- [8] R. A. Broglia, G. Pollarolo, C. H. Dasso and T. Dossing, *Phys. Rev. Lett.*, **43**(1979), 1649.
- [9] J. Blocki, J. Randrup, W. J. Swiatecki and T. C. Tang, *Ann. Phys.*, **105**(1977), 427.
- [10] D. H. E. Gross and H. Kalinowski, *Phys. Rep.*, **45C** (1978), 175.
- [11] R. Vanden Bosch, A. Lazzarini, D. Leach, D. K. Lock, A. Ray and A. Seamster, *Phys. Rev. Lett.*, **52**(1984), 1964.
- [12] H. Solhbach, H. Freiesleben, P. Braun-Munzinger, W. F. W. Schneider, D. Schull, B. Kohlmeier and F. Puhlhofer: *Phys. Lett.*, **153B** (1985), 386.
- [13] The Response of nuclei under extreme conditions edited by R. A. Broglia and G. F. Bertsch (plenum publishing corporation, 1988) P 237.

A STUDY OF EXCITATION ENERGIES SHARING BETWEEN FRAGMENTS IN HEAVY-ION REACTIONS

WANG ZHENGDA

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

ABSTRACT

In this paper the excitation energies sharing between fragments in heavy-ion reaction were analysed based on Coherent Surface Excitation Model (CSEM). For $^{56}\text{Fe} + ^{238}\text{U}$ at $E_{\text{L}\cdot\text{a}\cdot\text{b}} = 476$ MeV and $^{86}\text{Kr} + ^{208}\text{Pb}$ at $E_{\text{L}\cdot\text{a}\cdot\text{b}} = 1565$ MeV reactions, a comparison between experimental data and calculated values has been made.