

# 轻系统耗散碰撞的动力学

沈文庆 乔卫民 葛凌霄 詹文龙 诸永泰

(中国科学院近代物理研究所,兰州)

## 摘 要

用包含六个自由度的运动学方程对轻系统耗散碰撞的动力学进行了计算。对角分布和反应时间,能量耗散和碎片形变等问题进行了讨论。

## 一、引 言

对于炮弹 ( $A \geq 40$ ) 轰击能在 5—10 MeV/u 的中重和重系统的深部非弹已作了广泛的研究<sup>[1]</sup>。对于  $A \leq 20$  作炮弹的轻系统也发现了有明显的深部非弹分量<sup>[2-4]</sup>。除了和重系统及中重系统有一致的性质外,轻系统的深部非弹表现出有强烈的核结构效应的影响。准弹和深部非弹分布在临界角动量和擦边角动量之间的少数几个分波,因此截面小。由于所涉及的总的核子数较少,轻系统对研究深部非弹的统计性质来说并不是太典型的。这些造成了研究轻系统深部非弹的困难,但是也使我们从轻系统深部非弹的研究中学到一些深部非弹的特殊知识,例如核结构效应的影响,和其它反应机制的竞争及耗散过程演变的细节。

我们已完成的用 5.7 MeV/u  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$  作炮弹轰击  $^{27}\text{Al}$  到  $^{64}\text{Ni}$  靶的轻系统深部非弹实验表明,深部非弹作为复合核和直接反应之间的一种中间过程,对轻系统确实也是一种重要的反应道。实验表明从一定的轰击能量开始,轻系统也产生深部非弹,其截面随轰击能增加而增加。除了和重系统及中重系统的深部非弹相似的一些特性外,轻系统的深部非弹还有自己的一些特性。

和重系统及中重系统一样,能量耗散是轻系统深部非弹的一个重要特征。随着相互作用时间增长,双核系统转动角逐渐增大(对我们研究过的轻系统深部非弹都在负偏转角出射),交换核子数增加,能量逐步耗散。但是对轻系统在全弛豫能量中除了库仑能外,离心能及核的剩余相互作用起很大作用,其中离心能常达到全弛豫能量的  $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ 。对能谱积分的角分布通常是在小角度前冲型的,且表现出有两个分量,它们有不同的斜率,小角度陡的分量大都来自准弹,大角度较平缓的分量大都来自深部非弹。根据角分布这个特性我们常可估计出准弹和深部非弹分量的截面(2)。不同 TKEL 间隔内或不同产物角分布呈现出随 TKEL 增加或转移核子数增加也逐渐变平坦的弛豫特性,据此可以导出深部

非弹的  
统核的  
做相反  
强的<sup>16</sup>  
深部非  
<sup>16</sup>O 这样  
对  
这种方  
力学过  
击能小  
用经典  
核子交  
算<sup>[9-11]</sup>。  
轨道计  
虑形变  
布,提耶

为  
学轨道  
自由度,即  
 $\theta$  及两个  
 $\theta, \theta_1, \theta_2$

式中核  
双核系  
方法求  
型求出  
图1  
及 Wint  
除了在角  
中加入了

非弹的平均相互作用时间,它在  $10^{-22}$  秒量级之内,比重系统和重系统小得多. 对轻系统核的结构效应有很大作用,在某些情况下导致系统向液滴模型势预言的核子漂移方向做相反的漂移,而且导致  $Z$  分布的宽度开始增加较慢,然后增加较快等结果<sup>[13]</sup>. 结构效应强的  $^{16}\text{O}$  炮弹引起的深部非弹产生的  $Z$  分布有强的结构,相对来说,以  $^{14}\text{N}$  为炮弹引起的深部非弹的  $Z$  分布就比较光滑,这也给存在核结构效应的影响提供了依据. 另外对于象  $^{16}\text{O}$  这样的有强的  $\alpha$  集团结构的炮弹,还可能开放象非完全深部非弹这样的新的反应道.

对于我们的轻系统深部非弹的实验数据,我们曾用简化的输运理论进行了拟合<sup>[14]</sup>. 这种方法可以给出轻系统深部非弹的一般倾向,但是不能深入了解轻系统耗散过程的动力学过程,当然也不能解释核结构效应产生的影响. 对于低轰击能的重离子反应(例如轰击能小于  $10\text{ MeV/A}$ ), 两碰撞核的相对速度与系统的费米速度相比是小的,因此可以用经典的耗散动力学来描述这种核反应过程. 对中重和重系统早已进行过不考虑形变和核子交换的动力学轨道计算<sup>[5-8]</sup>. 随后也进行了考虑形变及核子交换的动力学轨道计算<sup>[9-11]</sup>. 这些计算能拟合重系统及中重系统的实验数据. 但是很少对轻系统进行动力学轨道计算. 以我们实验测量过的  $80.6\text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  系统为例,我们对轻系统进行了考虑形变及核子交换的动力学轨道计算. 同时由这种轨道计算导出的偏转函数计算了角分布,提取了核反应的相互作用时间,并对反应过程中颈的演变和断点处形变进行了讨论.

## 二、计算方法和角分布

为了深入了解轻系统的耗散碰撞的动力学,我们运用考虑了形变及核子交换的动力学轨道计算的方法<sup>[10,11]</sup>来讨论我们的数据. 反应过程中体积守恒的形状可用三个宏观自由度,即两核相互作用距离  $s$ , 颈的大小  $\sigma$  及质量不对称性  $\Delta$  来描述,另外还有相对转动  $\theta$  及两个核的本征转动  $\theta_1, \theta_2$  三个描述转动的自由度. 一共用六个宏观自由度即  $\{s, \sigma, \Delta, \theta, \theta_1, \theta_2\}$  (用  $q = \{q_{ij} \ i = 1, 2, \dots, 6\}$  表示)来描述核反应过程的动力学. 运动方程是:

$$\begin{aligned} \dot{q}_i &= \sum_j (M^{-1})_{ij} p_j, \\ \dot{p}_i &= -\frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{\partial (V_n + V_c)}{\partial q_i} - \sum_j R_{ij} (M^{-1} p)_j, \\ \frac{\partial T}{\partial q_k} &= -\frac{1}{2} \sum_{ij} \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} \dot{q}_i \dot{q}_j. \end{aligned}$$

式中核势  $V_n$  是用汤川加指数型折叠函数对双核系统体积积分求出的; 库仑势  $V_c$  也是对双核系统的体积积分求出的. 惯性张量  $M_{ij}$  是用对无旋转动作近似的 Werner-Wheeler 方法求出的,摩擦张量  $R_{ij}$  是在一体窗加壁耗散基础上,用一个通过窗进行粒子交换的模型求出的<sup>[11]</sup>. 因此整个动力学轨道计算中没有任何可调的自由参数.

图 1 上部显示了对  $80.6\text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  计算的经典偏转函数(实线)及用 Christensen 及 Winter 的方法<sup>[15]</sup>计算的偏转函数(虚线),后者拟合了大量轻系统的弹散数据. 两者除了在角动量坐标方向有  $0.5\hbar$  的相对移动外,基本上是一致的. 考虑到动力学轨道计算中加入了耗散,这种移动是可以理解的. 根据动力学轨道计算得到的偏转函数可导出经

了广泛  
了和重  
的影响.  
小. 由  
型的.  
中学到  
过程演  
深部非  
也是一  
面随轰  
系统的深  
着相互  
偏转角  
能外,离  
对能谱  
, 小角  
这个特  
物角分  
出深部

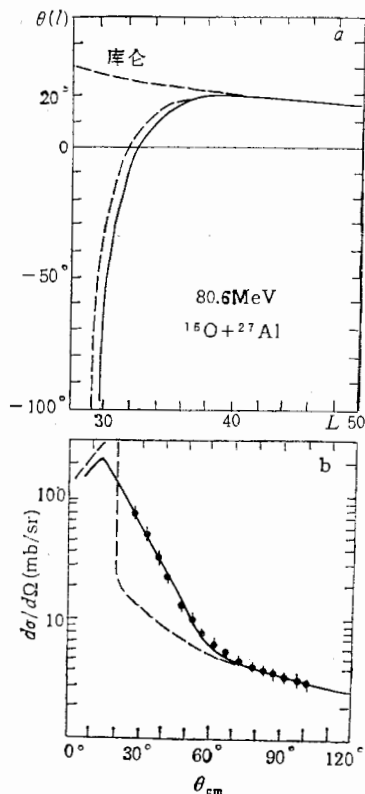


图 1 80.6 MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 经典偏转函数 (实线是根据文献 [10] 计算的, 虚线是根据文献 [16] 计算的) 及实验和计算的角分布 (点是实验结果, 虚线是不考虑涨落的计算结果, 实线是考虑涨落以后的计算结果)。

存在准弹和深部非弹两个分量。由于我们的实验数据仅对 Li—Ne 求和, 丢失了一些截面, 因此我们让计算结果在 90° 处和实验数据归一。

### 三、相互作用时间和能量耗散

图 2 显示了计算的 80.6 MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 的能量耗散, 角动量耗散及相互作用时间作为入射角动量的函数关系。对这样的轻系统, 相互作用时间在 10<sup>-22</sup> 秒量级, 比重系统和重系统的深部非弹相互作用时间要短得多 (一般在 10<sup>-21</sup> 秒量级)。我们从实验的不同 TKEL 间隔内的角分布的衰减角  $\theta_d$ , 及入射道转动角速度  $\omega_i$  计算出的相互作用时间

$$\tau = \frac{\theta_d}{\omega_i}$$

(13) 比动力学轨道计算导出的相互作用时间要短 20% 左右。正如文献 [13] 所指出的相对转动角速度在耗散过程中是一直在变化的。图 3 显示了对 80.6 MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 的  $l = 30$  及 30.5 的轨道上相对转动角速度及两个碎片内禀转动角速度随时间的变化。考虑角速度随时间的变化, 由实验的角分布的衰减角导出的相互作用时间和动力学轨道计

典角分布:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\lambda^2}{\sin\theta} \sum_l \frac{\left(l + \frac{1}{2}\right)}{|d\theta/dl|}$$

它显示在图 1 下部 (虚线)。计算的经典角分布可以很好拟合实验的深部非弹分量, 当然经典角分布在擦边角处有一无穷大奇点, 无法很好拟合小角度数据。考虑了量子统计效应引起的涨落可以洗去这个奇点。我们假设相应于角动量  $l_i$  的轨道的出射角  $\theta$  在平均值  $\bar{\theta}(l_i)$  附近有一个高斯分散:

$$P(\theta, l_i) = (2\pi\sigma_\theta^2)^{-\frac{1}{2}} \exp\left\{-\left[\theta - \bar{\theta}(l_i)\right]^2 / [2 \cdot \sigma_\theta^2(l_i)]\right\},$$

其中  $\sigma_\theta^2(l_i) = K(l_i - l_{gr})$ , 参数  $K$  表征量子统计涨落效应的大小, 我们采用了文献 [3] 拟合了轻系统实验数据的计算值, 此时角分布可表示为:

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \lambda^2 \int \frac{1}{(2\pi\sigma_\theta^2)^{\frac{1}{2}} \sin\theta} l_i \exp\left\{-\frac{[\theta - \bar{\theta}(l_i)]^2}{2\sigma_\theta^2(l_i)}\right\} dl_i.$$

图 1 下部的实线表示计算结果, 它确实能很好拟合我们的实验数据, 并显示出

图:  
动量

算的经典  
非弹分  
上有一无  
数据。  
长落可以  
角动量  
 $\bar{\theta}(l_i)$  附

)),  
文K表征  
我们采用  
数据的计

它确实  
并显示出  
了一些截

手时间作  
重系统和  
金的不同  
时间

指出的  
·<sup>27</sup>Al 的  
化。考  
轨道计

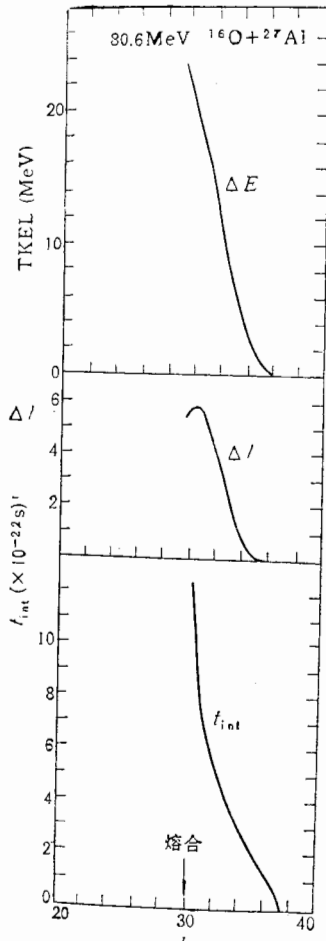


图 2 80.6 MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 计算的能损,角动量耗散和相互作用时间作为入射角动量的函数。

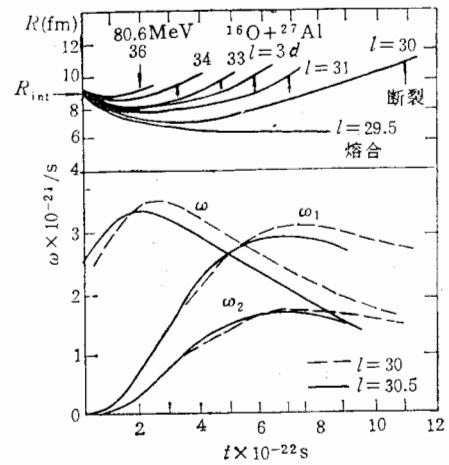


图 3 80.6 MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 不同入射角动量下的相互作用距离,  $l = 30$  及  $l = 30.5$  时相对转动及两个碎片内禀转动角速度。

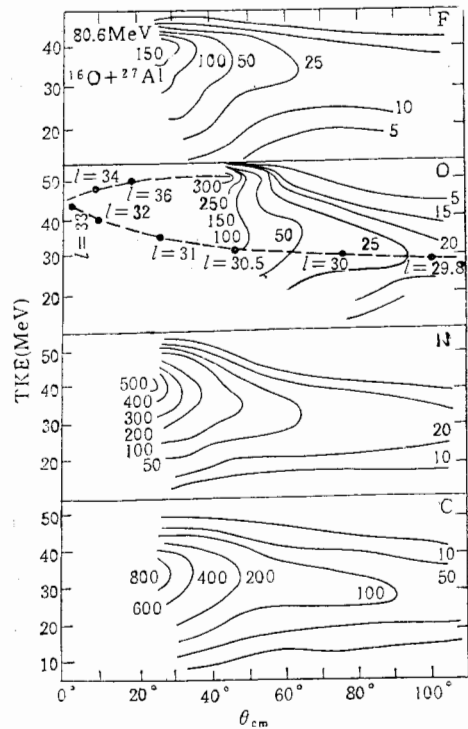


图 4 80.6 MeV<sup>16</sup>O + <sup>27</sup>Al 实验的对出射 C, N, O, F 元素的 Wilczynski 图和计算的能量耗散和出射角之间的关联。

算的结果基本上是一致的。

图 3 中还显示了  $80.6 \text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  在不同入射角动量下的相互作用距离。图 4 显示了  $80.6 \text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  实验的出射  $^{12}\text{C}$ ,  $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{19}\text{F}$  元素的 Wilzyski 图及计算的能量耗散和出射角之间的关联, 计算结果能很好拟合实验的能量耗散的演变过程和全弛豫能量。我们发现对于象  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  这样的轻系统离心能在全弛豫能量中可占到  $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ 。例如  $80.6 \text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  对  $l = 30.5$  的轨道, 在断点处, 壁耗散  $Q_1$ , 窗耗散  $Q_2$ , 转动能  $T_r$ , 形状自由度中的能量  $T_s$  和势能  $V = V_N + V_C$  分别为 1.85, 13.09, 16.87, 4.35 和 14.45 MeV。转动能  $T_r$  分成离心能  $T_{r1}$  (12.32 MeV) 及本征转动能  $T_{r2}$  (4.55 MeV)。全弛豫能由  $T_{r1}$ ,  $T_r$  和  $V$  组成, 为 31.1 MeV。

### 四、颈的大小和碎片形状

图 5 显示了  $80.6 \text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  计算的对  $l = 29.5$  及 30, 32, 34 时的轨道作为相互作用距离  $s$  及颈的大小  $\sigma$  的函数的演变过程。对  $l = 30$  在轨道上还画出了核的形状及相对转动角度的演变过程。我们发现对轻系统深部非弹中发展的颈的大小比重系统及中重系统小得多; 对  $^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$ , 颈  $\sigma$  总是小于 0.07, 但对于  $5.9 \text{ MeV/u}^{238}\text{u} + ^{35}\text{Cl}$   $\sigma$  可大于 0.3。图 6 显示了相互作用势  $V = V_N + V_C + V_{CE}$  (核、库仑及离心能) 在相互作用距离  $s$  及颈的大小  $\sigma$  的平面上的等高图 (对  $l = 0$  和  $l = 30$ )。可以看出轻系统的势作为  $s$  和  $\sigma$  的函数和重系统及中重系统是很不同的, 离心能对轻系统起很大作用。对  $l = 0$ , 势能面在小的  $s$  和大的  $\sigma$  处有一个谷, 但由于轻系统的离心能可在势中占很大比例, 对  $l = 30$  势能面在  $\sigma$  方向是很平坦的, 因此没有强的驱动力迫使系统向大的颈的方向发展, 而重系

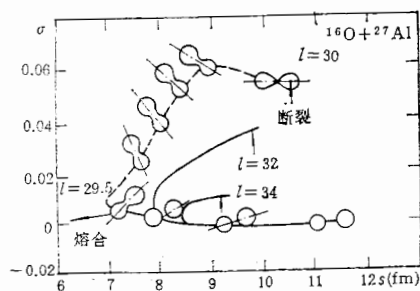


图 5  $80.6 \text{ MeV}^{16}\text{O} + ^{27}\text{Al}$  计算的对  $l = 29.5, 30, 32, 34$  时的轨道作为相互作用距离  $s$  及颈的大小  $\sigma$  的函数的演变, 对  $l = 30$  在轨道上还画出了核的形状及相对转动角度。

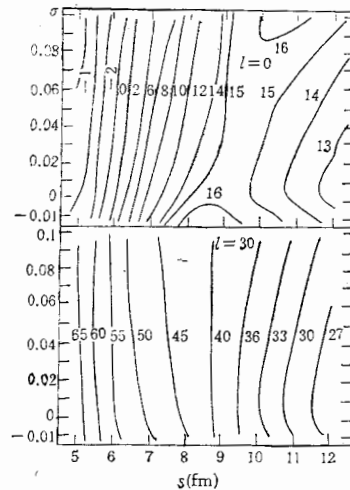


图 6 相互作用势  $V = V_N + V_C + V_{CE}$  (核、库仑及离心势) 在相互作用距离  $s$  及颈的大小  $\sigma$  的平面上的等高图 (对  $l = 0$  和  $l = 30$ )

统不是这  
一些  
( $\beta = 0.3$ )  
豫能量比

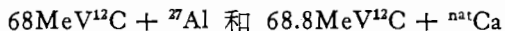
断点处  
变可拟在  
四极形的。  
但在小的  
产生拉

轻系  
部非弹  
深部非弹  
特征; 离  
系统在  
形变; 轻  
轻系统  
象非完全  
来解释的  
中去可能  
开, 然后  
算可能  
两种计算

- [1] W. Bro
- [2] M.
- [3] R.
- [4] Zhu
- [5] D.
- [6] R.
- [7] H.
- [8] D.
- [9] W.
- [10] H.

统不是这样. 可能这就是轻系统的深部非弹轨道上颈很小的原因.

一些作者<sup>[3]</sup>指出象  $100 \text{ MeV}^{16}\text{O} + {}^{48}\text{Ti}$  这样的轻系统, 在断点处有很大的四极形变 ( $\beta = 0.37$ ), 这是由静力学分析拟合实验数据导出的. 当然分离距离参数对用实验全弛豫能量提取形变参数有很大影响. 即使不考虑这种不确定性, 文献 [16] 也指出对



断点处四极形变可达 0.3—0.5. 他们用  $s = (1 + \beta)(R_1 + R_2)$ ,  $R_i = 1.2A_i^{1/3}$  及平衡形变可拟合实验全弛豫能量. 我们用轨道动力学计算给出的形状换算到文献 [16] 定义的四极形变, 导出的断点处平衡的四极形变参数  $\beta$  为 0.45, 和上述作者得到的结果是一致的. 但是轨道动力学计算还可给出形变随相互作用时间或轨道角动量变化的弛豫过程. 在小的相互作用时间, 由于长程的库仑力发生了压扁的四极形变, 随相互作用时间增长而产生拉长的四极形变, 最后达到平衡的形变<sup>[17]</sup>.

## 五、小 结

轻系统深部非弹的实验数据及包含六个自由度的动力学轨道计算表明, 对轻系统, 深部非弹确实也是一个重要的反应道. 除了和重系统深部非弹类似的一些特性外, 轻系统深部非弹还有一些自己的特性. 例如角分布明显地表现出有准弹和深部非弹两个分量的特征; 离心能在轻系统深部非弹中起很大作用, 它占了全弛豫能量的  $\frac{1}{2} - \frac{1}{3}$ ; 而且还使轻系统在反应过程中产生的颈比重系统少得多; 但在断点处轻系统深部非弹产物仍有较大形变; 轻系统的深部非弹相互作用时间大致在  $10^{-22}$  秒量级, 比重系统及中重系统小得多. 轻系统深部非弹的实验数据还表明核结构效应有很大影响, 炮弹的  $\alpha$  集团结构还能导致象非完全深部非弹这样的两步反应过程. 当然这类现象是无法用目前的动力学轨道计算来解释的. 把动力学轨道计算耦合到考虑了核结构效应的相互作用势的主方程的数值解中去可能可以解释核结构效应的影响. 考虑有强  $\alpha$  集团结构的炮弹在反应第一阶段先裂开, 然后炮弹的余核在反应的第二阶段和靶核发生深部非弹的裂开-深部非弹两步过程计算可能可以解释在轻系统的非完全深部非弹及其对轻系统单举深部非弹数据的影响. 这两种计算正在考虑和进行之中.

## 参 考 文 献

- [1] W. U. Schröder and J. R. Huizenga, "Treaties on Heavy Ion Science", V. 2, Chapter 3, Editor: D. A. Bromley, (1984).
- [2] M. Sato et al., *Phys. Rev.*, **C27**(1983), 2621.
- [3] R. Ritzka et al., *Phys. Rev.*, **C31**(1985), 133.
- [4] Zhu Yongtai, *J. Phys. Soc. JPN*, **54**(1985), Suppl. II, 335.
- [5] D. H. E. Gross and H. Kalinowski, *Phys. Lett.*, **48B**(1974), 302.
- [6] R. Beck and D. H. E. Gross, *Phys. Lett.*, **47B**(1973), 143.
- [7] H. H. Deubler and K. Dietrich, *Nucl. Phys.*, **A277**(1977), 493.
- [8] D. H. E. Gross and H. Kalinowski, *Phys. Reports*, **45**(1978), 175.
- [9] W. J. Swiatecki, *Physica Scripta*, **24**(1981), 113.
- [10] H. Feldmeier, in *Nuclear Structure and Heavy Ion Dynamics*, Editor: L. G. Moretto and R. A. Ricci, (1984).

- p. 274, (Lect. at int. School of Physics "Enrico Fermi").
- [11] H. Feldmeier, *J. Phys. Soc. JPN*, 54(1985), Suppl. II, p. 246.
- [12] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 9(1985), 332.
- [13] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 9(1985)611.
- [14] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 8(1984), 732.
- [15] P. R. Christensen and A. Winther, *Phys. Lett.*, 65B(1976), 19.
- [16] 慕容之等, 高能物理与核物理, 9(1985), 751.
- [17] 沈文庆等, 高能物理与核物理, 轻系统核子转移的壳结构效应, 待发表.

## DYNAMICS OF DISSIPATION COLLISION FOR LIGHT SYSTEM

SHEN WEN-QING QIAO WEI-MIN GE LING-XIAO ZHAN WEN-LONG ZHU YONG-TAI

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica, Lanzhou)

### ABSTRACT

The dynamics of the dissipation collision for light system are calculated by using the motion equations including six degrees of freedom. The angular distribution and the interaction time, the energy dissipation and the deformation of the fragment etc are discussed.

势,  
运  
是  
低

在作  
现象引  
述能损、  
损区内  
人认为  
等认为  
释。他  
方向流  
调节作  
他将此  
但是  
能量和  
的作用。  
大约为  
只在很  
把重

\* 兰州  
本文