

# 重离子全熔合反应中的 Langevin 统计涨落<sup>1</sup>

刘国兴 于 暹 陈克良 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘 要** 在重离子反应中, 尽管统计涨落是很明显的, 但是在以前的关于重离子全熔合反应的理论模型中未加考虑. 本工作在经典轨道模型框架内, 在运动方程中包括了 Langevin 无规力, 采用 Monte-Carlo 轨道抽样方法计算了  $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo}$  和  $^{86}\text{Kr} + ^{123}\text{Sb}$  全熔合反应的几率, 并且与实验值进行了比较.

**关键词** 经典轨道模型 Langevin 统计涨落 熔合几率

**分类号** O571.4

## 1 引 言

从非平衡统计理论可知, 核碰撞的耗散过程经常伴随有统计涨落. 在重离子反应中, 尽管统计涨落是很明显的, 但是在以前的关于重离子全熔合反应理论模型中一直未加考虑. 为了考察统计涨落对重离子熔合裂变反应的影响, Barbosa 等人<sup>[1]</sup>, Abe 等人<sup>[2]</sup>, Frobrich 和 Xu<sup>[3]</sup>把 Langevin 方程应用到重离子熔合裂变反应研究中. 基本做法是以解一组包括摩擦力和 Langevin 无规力在内的经典运动方程代替解 Fokker-Plank 方程. 采用 Langevin 轨道抽样方法计算相关物理量、相空间分布函数和反应截面. Frobrich 等人<sup>[4]</sup>采用组合动力学统计模型(CDSM)计算了重离子熔合反应截面、裂变截面、中子与带电粒子能谱及多重性, 并且与实验数据进行比较, 深入地研究了 Langevin 统计涨落对裂变反应性质的影响.

本工作在经典轨道框架内, 在一组一维的运动方程中包括了 Langevin 无规力, 采用 Monte-Carlo 轨道抽样方法计算了  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  反应轨道集合的相空间分布、 $^{100}\text{Mo} + ^{100}\text{Mo}$  和  $^{86}\text{Kr} + ^{123}\text{Sb}$  全熔合反应几率, 并且与实验值作了比较, 讨论了 Langevin 统计涨落对重离子熔合反应的影响.

## 2 包括 Langevin 无规力的运动方程

经典轨道模型成功地描述了重离子的许多性质<sup>[5,6]</sup>. 模型的基本假设是, 守恒力克服弹核和靶核之间的势垒, 使核接触. 耗散力使系统在微观自由度和宏观自由度之间交换能量. 摩擦力来自系统的集体运动和单粒子自由度之间的耦合. 少数集体按照运动方程进行时间演化, 而集体坐标通常是与两个核质心间距离、角动量、形变或其它的形状参数和时间相关. 在经典轨道模型框架内, 忽略形变自由度, 不考虑质量和电荷转移, 那么包括 Langevin 无规力描述两个核径向运动的一组运动方程是

$$\frac{dr}{dt} = \frac{P}{\mu} \quad (1)$$

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{dV_N}{dt} + \frac{dV_C}{dt} - \Gamma(r) \frac{P}{\mu} + L(t) \quad (2)$$

其中,  $r$  是两个核质心间的距离,  $P$  是径向动量,  $\mu$  是反应系统的约化质量,  $V_N(r)$  是核势,  $V_C(r)$  是库仑势,  $\Gamma(r)$  是摩擦系数,  $L(t)$  是 Langevin 无规力. 在时间间隔  $\Delta t$  作用在系统上的无规力是

$$I(t) = \int_t^{t+\Delta t} L(t') dt' \quad (3)$$

假设 Langevin 无规力  $I(t)$  是高斯分布形式, 并且有以下性质

$$\langle I(t) \rangle = 0$$

$$\langle I(t)I(t') \rangle = 2D\Delta t \quad (4)$$

$D$  是扩散系数, 根据耗散-涨落定理, 有

$$D(r) = T\Gamma(r) \quad (5)$$

$T$  是热浴温度,

$$T = \sqrt{\frac{E^*}{a}} \quad (6)$$

$E^*$  是一直到时间  $t$  时动能转变为核的内激发能,  $a$  是能级密度参数.

采用两种模型计算核势  $V_N(r)$  和摩擦系数  $\Gamma(r)$ 。

1) 亲近模型 (缩写为 PM)<sup>[7,8]</sup>. 这个模型给出的核势  $V_N(r)$  和摩擦系数  $\Gamma(r)$  是

$$V_N(r) = 4\pi\gamma\bar{C}b\Phi\left(-\frac{r-C_1-C_2}{b}\right) \quad (7)$$

$$\Gamma(r) = 4\pi n_0 C b \varphi\left(-\frac{r-C_1-C_2}{b}\right) \quad (8)$$

其中,  $C_1$  和  $C_2$  是两个核的半密度半径,  $\bar{C} = C_1 C_2 / (C_1 + C_2)$ ,  $b$  是表面厚度,  $b = 1.0$  fm;  $\gamma$  是表面张力系数,  $r = 0.9517[1 - 1.7826(N - Z/A)^2]$  ( $N$ ,  $Z$  和  $A$  分别是复合核的中子数、质子数和质量数);  $n_0$  是核子流强度<sup>[7]</sup>;  $\Phi$  和  $\varphi$  分别是由文献<sup>[7,8]</sup>所描述的普适函数.

2) Gross-kalinwski 模型 (缩写为 GKM)<sup>[5]</sup>.

据此模型, 核势  $V_N(r)$  和摩擦系数  $\Gamma(r)$  是

$$V_N(r) = - \sum_{n=1}^3 B_n (r - R)^{n-1} \cdot \ln\left[1 + \exp\left(-\frac{r - R}{a_0}\right)\right] \quad (9)$$

$$\Gamma(r) = \Gamma_0 \left(\frac{dV_N}{dr}\right)^2 \quad (10)$$

其中,  $R = r_0(A_1^{1/3} + A_2^{1/3})$ ,  $r_0 = 1.30$  fm,  $a_0 = 0.61$  fm,  $B_1 = 33$ ,  $B_2 = 2$  和  $B_3 = 3$ ,  $\Gamma_0 = 4.0 \times 10^{-23}$  s/MeV.

根据运动方程(1)和(2), 由 Monte-Carlo 轨道抽样方法计算全熔合反应几率  $P_{fu}(E)$

$$P_{fu}(E) = \frac{N_{fu}}{N_{tot}} \quad (11)$$

其中,  $N_{fu}$  是导致全熔合反应的轨道数目,  $N_{tot}$  是总的轨道数目.

### 3 计算结果

以  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  反应为例, 我们计算了 Langevin 统计涨落对这个熔合反应的影响. PM 计算结果表明, 只有超过库仑半径的轨道, 耗散才开始作用, 统计涨落不能改变这个

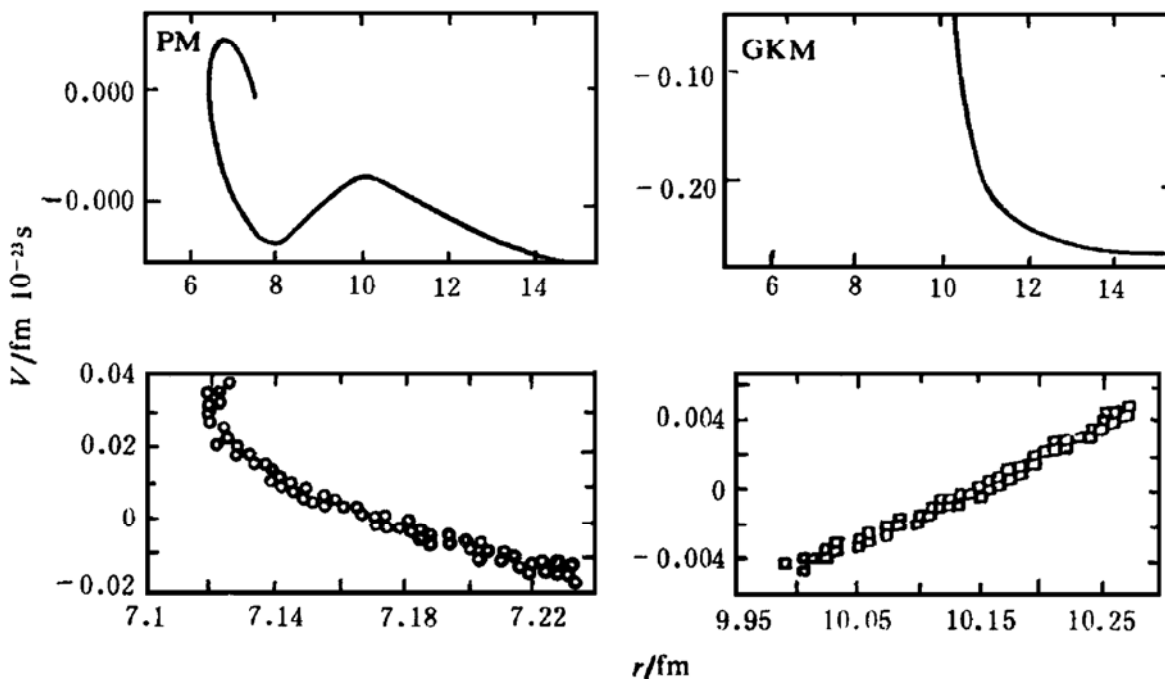


图 1 对于  $^{58}\text{Ni} + ^{58}\text{Ni}$  反应使用 PM 和 GKM 计算 1 000 条轨道集合的相空间分布

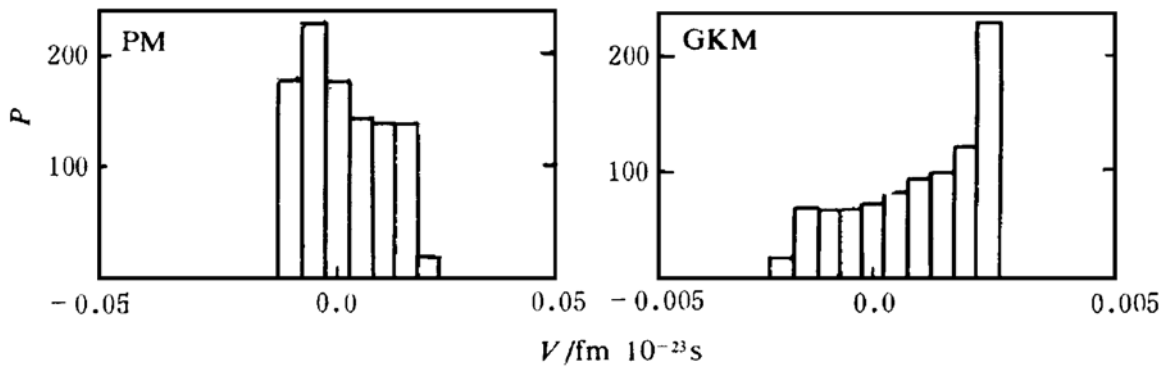


图 2  $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$  反应计算的轨道集合在速度轴上的投影

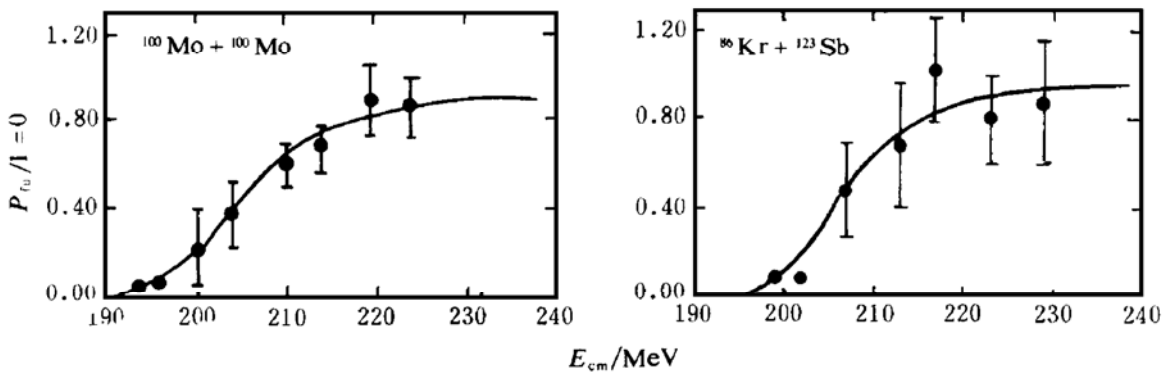


图 3 对于 $^{100}\text{Mo}+^{100}\text{Mo}$ 和 $^{86}\text{Kr}+^{123}\text{Sb}$ 反应计算的熔合几率 $P_{fu}$ 与实验值的比较

结果,轨道全落在势阱口袋中,导致全熔合反应. GKM 计算结果表现出完全不同的行为,核中心到达库仑半径前,耗散就开始起作用,在库仑半径外已有很强的统计涨落. 图 1 给出了 $^{58}\text{Ni}+^{58}\text{Ni}$ 反应中,当 $E_{cm}=110\text{ MeV}$ 时,使用 PM 和 GKM 计算的 1 000 条轨道的相空间分布. 图的上部表示无统计涨落的单条轨道. 可以看到,对于 PM,轨道在势阱中有振荡,而在 GKM,由于强耗散很快吸收了质心动能. 图 1 下部表示在经典运动方程中加上导致统计涨落的 Langevin 力使用两种模型计算出的完全不同的轨道行为. 对于 PM,轨道完全落在势阱口袋里,对于 GKM,轨道分成两部分,一部分轨道被势阱俘获导致全熔合,另一部轨道即使越过势垒顶部,由于 Langevin 无规力的作用仍有某种几率反射回来向外运动,这部分相当于非全熔合反应. 图 2 表示计算的轨道集合在速度轴上的投影. 图 3 给出了 $^{100}\text{Mo}+^{100}\text{Mo}$ 和 $^{86}\text{Kr}+^{123}\text{Sb}$ 熔合反

应几率 $P_{fu}$ . 实验数据取自文献[9,10]. 实线是采用 GKM 由 Monte-Carlo 轨道抽样方法计算的. 由图 3 看出. 对两个反应计算的熔合几率 $P_{fu}$ 在实验误差范围内与实验值符合得很好. 对 $^{86}\text{Kr}+^{123}\text{Sb}$ 反应,尽管实验的熔合几率误差比较大,但是计算熔合几率 $P_{fu}$ 随能量变化的行为与实验结果是一致的.

### 参 考 文 献

- 1 Barbosa V C, Soares P C, Oliveira E C et al. Thermal Fluctuations in Heavy-ion Fusion Reactions. *Revista Brasileira de Fisica*, 1985,15:211~220
- 2 Abe Y, Gregoire C, Delagrangé H. Nuclear Fission with a Langevin Equation. *J de Phys*, 1986,C4:329~429
- 3 Frobrich P, Xu S Y. The Treatment of Heavy-ion Collisions by Langevin Equations. *Nucl Phys*, 1988, A477:143~161
- 4 Frobrich P, Gontchar I I, Mavlitov N D. Langevin Fluctuation Dissipation Dynamics (下转第 45 页)