

10.6MeV / u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中角动量 对断点前粒子多重性的影响*

叶 巍¹ 沈文庆^{1,1)} 陆中道^{2,1)} 冯 军^{1,1)}

马余刚^{1,1),2)} 王建松¹

K. Yuasa-Nakagawa³ T. Nakagawa⁴

1(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

2(中国原子能科学研究院 北京 102413)

3(Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 982, Japan)

4(The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama, 351-01, Japan)

摘要 用推广的裂变扩散模型研究了角动量对 10.6MeV / u $^{84}\text{Kr}(^{27}\text{Al}$, 二体裂变)反应断点前粒子多重性的影响,发现断点前粒子多重性和断点时间随着角动量的减小逐渐增大,而且绝大多数粒子是在鞍点前发射的. 对实验中二体裂变反应发生的角动量范围进行权重平均,得到了与实验一致的断点前粒子多重性. 同时还研究了影响断点前粒子多重性和断点时间的诸多因素.

关键词 裂变扩散模型 粒子多重性 断点时间 角动量效应

1 引 言

近年来,实验上对重离子引起的熔合裂变反应在很大一段激发能和复合核质量范围内测量了断点前发射的 γ 射线^[1]、中子^[2,3]和轻带电粒子^[4]多重性,发现它们的值高于统计模型的估计. 同时统计模型也无法估计粒子在鞍点前以及在鞍点到断点之间发射的比例. 可以认为这些现象提供了在裂变过程中动力学效应的证据.

Kramers^[5]从 Fokker-Planck 方程的观点出发,把核的裂变看作是系统通过裂变位垒的扩散过程. 进入这个问题的新参数是摩擦系数,它同裂变自由度耦合产生热浴. Kramers 得到的解中除指数前的因子包括摩擦以外,其余的项同统计模型的完全一样. 由于摩擦的影响,存在一段暂态时间,在这段时间内裂变率从零增加到它的准稳态值. 相对于统计

1997-01-07收稿

* 国家自然科学基金(19675059)和上海市科技发展资金资助

1) CCAST (World Laboratory) P. O. Box 8730, Beijing 10080

2) 复旦大学-李政道综合物理实验室 上海 200433)

模型的预计, 上述的两个效应将减少总的裂变率, 增强了断点前的粒子发射. 在大摩擦近似下, Fokker-Planck 方程约化成 Smoluchowski 方程^[6], 文献 [7] 在 Smoluchowski 方程的基础上引入了中子发射并成功地解释了中子多重性的增强. 对重系统 (质量 $A \sim 250$), 带电粒子的发射相对于中子来说可以忽略, 但是对质量 $A \sim 110$ 左右的系统, 带电粒子发射的影响则不能忽略. 因此, 本文又考虑了质子和 α 粒子的发射并用这个扩展的 Smoluchowski 方程研究了角动量在裂变和粒子发射中所起的作用.

2 模型

裂变扩散过程可用 Fokker-Planck 和 Smoluchowski 方程描述, 后者在大摩擦条件下从前者约化而来, 描述原子核在裂变空间中的扩散. 文献 [7] 引入包含中子发射的扩展的 Smoluchowski 方程, 并对裂变扩散过程中的中子发射进行了描述. 我们对该方程作了进一步发展, 使其包括其它轻粒子发射. 本文中采用下面同时考虑了中子、质子和 α 粒子发射的 Smoluchowski 方程

$$\frac{\partial P(x, t)}{\partial t} = \theta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial U}{\partial x} P(x, t) + \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \right) - \sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_i P(x, t), \quad (1)$$

这里, $P(x, t)$ 代表系统在裂变的形变坐标 x 和时刻 t 时的几率. $U = V/T$, V 是系统的势函数, T 是系统的核温度. $\theta = T/(\mu\beta)$, μ 是系统的约化质量. 右边第二项是轻粒子的发射. $\lambda_i = \Gamma_i/\hbar$, 其中 Γ_i ($i = n, p, \alpha$) 是轻粒子的发射宽度, 用细致平衡原理的方法来计算^[7] 时间相关的裂变宽度定义为:

$$\Gamma_i(t) = \hbar \lambda_i(t) = \hbar J(t) / \pi_f(t), \quad (2)$$

其中, $J(t)$ 是通过鞍点的几率流, $\pi_f(t)$ 是系统在鞍点左边的几率.

在 10 MeV 左右的重离子反应中, 复合系统有较高的激发能, 通过和裂变竞争, 在它放出了轻粒子以后生成的子核仍有足够的能量通过发射轻粒子和裂变竞争, 直到最后的子核没有足够的激发能再继续发射轻粒子退激, 以裂变结束. 通过这种方式, 形成一个衰变链, 这个衰变链可以用一套耦合方程来描述,

$$\frac{d}{dt} P_s(t) = \sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_{i, s-1} P_{s-1}(t) - \left[\sum_{i=n, p, \alpha} \lambda_{i, s} + \lambda_{f, s}(t) \right] P_s(t), \quad (3)$$

这里, P_s 是第 s 个子核的存在几率. 方程右边第一项是源项, 表示它通过第 $(s-1)$ 个子核发射粒子而产生. 第二项是第 s 个子核通过裂变及发射粒子的衰变率. $t=0$ 时, 只有第一个核存在, 其存在几率为 1, 其它子核的存在几率为 0.

3 计算结果和讨论

在计算中, 首先取鞍点作为核的裂变点, 摩擦系数取为 $\beta = 5 \times 10^{21} \text{s}^{-1}$. 激发能中转动能的贡献可以用动力学模型获得^[8]. 用动力学模型计算得到的 Ediss 作为激发能中扣除的不用于粒子发射的那部分能量. 由于考虑了角动量效应, 裂变位垒会随角动量增大而降低 (见图 1). 这有利于核的裂变, 但同时激发能中有一部分是转动能, 这部分并没有用

于“热浴”使核升高温度, 因此裂变宽度和粒子的发射宽度都会变小, 但它们随角动量变化的速度是不同的. 裂变位垒对角动量的变化很敏感, 它随角动量的减小而增加, 造成核的首次裂变几率变小, 轻粒子多重性则随之增加(见图 2). 随着角动量的增加, 暂态时间变短, 表明裂变延迟存在角动量效应.

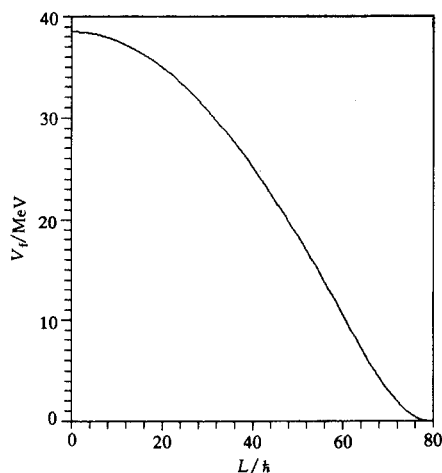


图 1 ^{111}In 核的裂变位垒和角动量的关系

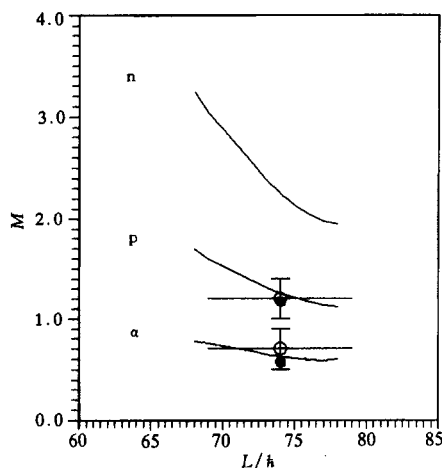


图 2 10.6MeV / u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中角动量对断点前粒子多重性 M 的影响

○ 是从该反应实验数据中提取的断点前质子和 α 粒子的多重性; ● 是理论值; 直线为提取的粒子多重性的实验数据的角动量范围(见文献 [9, 10]).

10.6MeV / u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应在相应的激发能下随着角动量增加, 粒子多重性减小, 且暂态时间变短. 图 3 给出了粒子多重性与暂态时间的关系, 从图中可以看出, 暂态时间的增加有利于粒子的发射. 对 10.6MeV / u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 实验中二体裂变反应发生的角动量范围进行权重平均得出的延迟时间 $\sim 10^{-20}\text{s}$. 而粒子的发射时间在本反应系统下 $\sim 10^{-21}\text{s}$, 比裂变延迟时间要小得多, 因此粒子有充分的时间在这段时间内发射, 造成断点前轻粒子发射的增强. 因此该反应产生的热核的衰变过程并不完全是通常的统计模型的图像. 通常的统计模型在低激发能时很成功, 这是因为粒子发射所需要的时间长于暂态时间, 因此暂态效应可以忽略. 但是随着激发能的增加, 粒子的发射速度加快, 核从基态演变到鞍点以及随后演变到断点的形变过程很重要, 有可能在核还没有裂变之前就发射粒子, 造成断点前粒子发射的增强. 此时裂变过程中的动力学效应起了重要的作用, 在激发能很高时, 甚至起了主导作用. 上述的结果证实了这一点.

图 4 给出了断点时间对入射道质量不对称性和角动量的依赖性, 从图中可以看出, 用扩展的 Smoluchowski 方程获得的结果, 比实验上用扩展统计模型提取的值^[11]要大一些. 这是由于文献 [11] 把核在裂变延迟这段时间内的裂变几率取为零, 而 Smoluchowski 方程则把裂变几率处理成是时间函数的缘故. 因此文献 [11] 给出的由实验数据提取的裂变延迟时间应该是裂变延迟时间的下限.

对于本文研究的激发能区域, 这里用 HICOL 对本反应系统进行了计算, 结果表明熔

合角动量随轰击能的变化不大,取 $L = 72\hbar$, 该值大约是熔合临界角动量以下 $10\hbar$ 左右. 在角动量 $L = 72\hbar$ 时, Smoluchowski 方程的计算表明随着激发能的增加, 裂变速度较低激发能时有所加快, 但是由于轻粒子的发射宽度随激发能的增加要比裂变宽度的增加快得多, 因此核的首次裂变几率仍然降低, 这与统计模型的估计正好相反, 因此轻粒子发射增加. 随着激发能的进一步增加, 粒子多重性的增加逐渐变得缓慢. 另一方面, 激发能的增加导致粒子的发射时间变短, 相对于激发能较低的情况, 核要更早地到达断点, 裂变时间将因此变短.

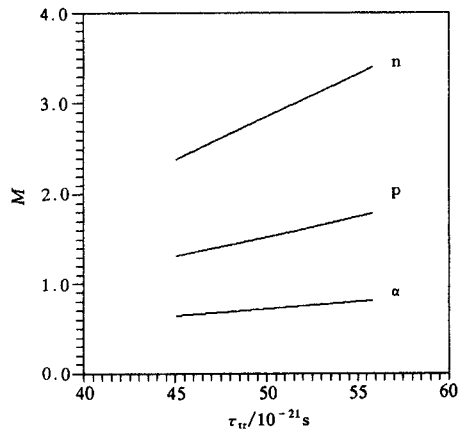


图 3 $10.6\text{MeV}/u$ $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应中断点前粒子多重性 M 对暂态时间的依赖性

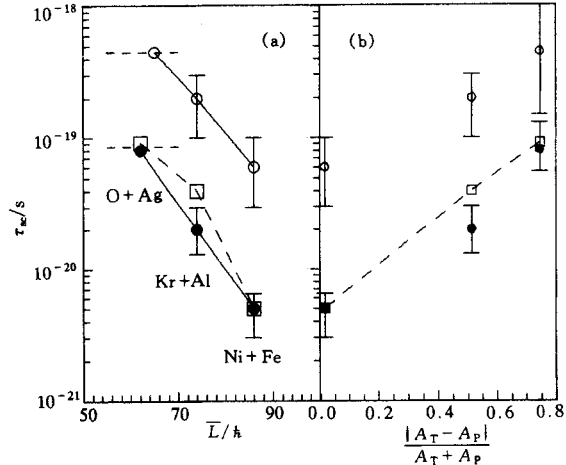


图 4 断点时间对系统对称裂变发生的平均角动量 (a) 和对入射道质量不对称性的依赖性 (b)

●和○取自文献 [9, 10], 分别代表用扩展统计模型和 HICOL 耦合的扩展统计模型从实验值提取的结果, 水平方向的虚线是实验点可能的角动量范围, 未标范围的实验点的角动量值是实验点上相应的平均角动量. □ 和虚线是本实验的计算结果.

在裂变的扩散过程中, 核摩擦的影响是很重要的, 它的大小反映了裂变自由度和系统的其它自由度之间耦合程度的强弱, 摩擦越强, 核的裂变过程就越慢, 建立起稳定的通过裂变位垒的几率流也就需要更长的时间. 这段时间的增加会有利于粒子的发射.

在上述的计算中, 取鞍点作为核的裂变点, 而实际上核在断点时才真正的裂变. 在固定核的激发能和角动量的情况下, 取过鞍点的某处作为核的裂变点称作裂变点的距离. 裂变点距离的增加使暂态时间变长, 首次裂变几率变小, 粒子的多重性会增加. 但是这种增加不是很大, 一个可能的原因是在鞍点以前发射的粒子带走了相当一部分能量, 因此核在从鞍点演变到断点的过程中发射粒子的能力很低. 加上本反应系统的断点构型非常接近鞍点构型, 粒子主要是在鞍点以前发射的, 它占据了断点前粒子发射的绝大部分. 从裂变几率随激发能的关系也可以得出同样的结论, 因为如果断点前的粒子绝大部分是在鞍点和断点之间发射的, 那么裂变几率就不会随着激发能的增加而减小. 核在基态对形变坐标分布状况对裂变过程的影响并不大, 因此在计算中, 取它为 δ 函数.

4 结论

本文用裂变扩散模型研究了角动量在 10.6MeV / u $^{84}\text{Kr}(^{27}\text{Al}, \text{二体裂变})$ 反应中裂变和轻粒子发射的竞争中所起的作用. 发现断点前的粒子多重性和断点时间随着角动量的减小而增加, 并且获得了与实验一致的质子和 α 粒子的多重性. 结果表明绝大多数粒子是在鞍点前发射的. 对于激发能相近、系统质量相近的不同入射道的反应, 即 10.6MeV / u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 和 10MeV / u $^{58}\text{Ni} + ^{56}\text{Fe}^{[9]}$ 反应, 从实验数据中提取的裂变延迟时间随角动量的变化与本文的计算结果一致. 说明文献 [9] 中的裂变延迟时间的入射道效应主要是角动量的效应. 通过研究, 可以看出, 随着激发能的增加, 裂变过程中的动力学效应起着越来越大的作用. 此时热核的衰变必须用考虑了动力学效应的模型来研究. 由于摩擦的影响, 需要有一段暂态时间核才能裂变, 这段时间的长短直接影响到粒子多重性的大小. 因此本文用扩展的 Smoluchowski 方程同时研究了影响暂态时间的诸多因素, 如角动量、激发能、核摩擦的强度、裂变点位置的选取以及核在基态的初始分布宽度. 从研究中我们发现前 3 个因素的影响比后两个要大得多. 在确定激发能范围和角动量窗下, 用 Smoluchowski 方程拟合实验中, 和裂变碎片符合的断点前粒子多重性数据可以提取核的摩擦系数并得出断点时间. 更仔细的研究仍然是必须的. 从 10.6MeV / u $^{84}\text{Kr} + ^{27}\text{Al}$ 反应实验数据提取的裂变延迟时间随角动量变化的工作还在进行之中, 其结果将与本工作预言的结果进行比较.

参 考 文 献

- [1] Paul P et al. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1994, **44**:65—108
- [2] Hinde D J et al. Nucl. Phys., 1986, **A452**: 500—572; Phys. Rev., 1989, **C39**:2268—2284; 1992, **C45**: 1229—1259
- [3] Hilsher D et al. Ann. Phys., (Paris) 1992, **17**:471—552, and references therein
- [4] Lestone J P et al. Phys. Rev. Lett., 1991, **67**:1078—1081; Nucl. Phys., 1993, **A559**:277—316
- [5] Kramers H A. Physica, 1940, **7**:284
- [6] Lu Zhong-Dao et al. Z. Phys., 1986, **A323**: 477—484; Phys. Rev., 1990, **C42**:707—710
- [7] Delagrange H et al. Z. Phys., 1990, **A323**:437—449
- [8] Siwek-Wilczyńska K et al. Phys. Rev., 1993, **C48**: 228—235; 1995, **C51**: 2054—2061
- [9] Yuasa-Nakagawa K et al. Phys. Lett., 1995, **B351**:77—81; Phys. Rev., 1996, **C53**: 997—1000
- [10] Futami Y et al. Nucl. Phys., 1996, **607A**: 85—104
- [11] Nakagawa T et al. Nucl. Phys., 1995, **A583**: 149—152

Effect of Angular Momentum on Precission Particle Multiplicity for the Reaction of $10.6\text{MeV} / \text{u}$ ^{84}Kr on ^{27}Al

Ye Wei¹ Shen Wenqing^{1, 1)} Lu Zhongdao^{2, 1)} Feng Jun^{1, 1)}
Ma Yugang^{1, 1), 2)} Wang Jiansong¹ K. Yuasa-Nakagawa³
T. Nakagawa⁴

1(*Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800*)

2(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413*)

3(*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 982, Japan*)

4(*The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-01, Japan*)

Abstract The effect of angular momentum on the precission particle multiplicity in the reaction of $10.6\text{MeV} / \text{u}$ $^{84}\text{Kr}(^{27}\text{Al}$, binary fission) is studied using generalized fission diffused model. The precission particle multiplicity and the scission time are found to increase with decreasing angular momentum. Most of the precission particle is emitted before saddle. The consistency with the experimental particle multiplicity is obtained when we average with weight over angular momentum contribution to binary fission reaction. At the same time other factors which influence the precission multiplicity and scission time are also discussed.

Key words fission diffuse model, particle multiplicity, precission time, angular momentum effect

Received 7 January 1997

1) (CCAST (World Laboratory) P. O. Box 8730, Beijing 10080)

2) (Fudan-T. D. Lee Physics laboratory, Fudan University, Shanghai 200433)