

文章编号: 1007-4627(2004)04-0382-03

轻中等质量核非对称裂变研究的新进展*

樊铁栓

(北京大学物理学院重离子物理研究所, 重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要: 介绍了轻中等质量核非对称裂变研究的新进展. 通过对 $^{64,58}\text{Ni}+^{12}\text{C}$ 和 $^{78,82,86}\text{Kr}+^{12}\text{C}$ 反应复杂碎片的激发函数测量, 发现流行的转动液滴模型和转动有限力程模型均不能复现实验的非对称裂变位垒数据.

关键词: $^{64,58}\text{Ni}+^{12}\text{C}$; $^{78,82,86}\text{Kr}+^{12}\text{C}$; 激发函数测量; 非对称裂变位垒

中图分类号: O571.43 **文献标识码:** A

1 裂变位垒脊线与非对称裂变

复合核衰变的主要模式是轻粒子蒸发和裂变. 前者相应于质量极端不对称的衰变模式, 后者指传统意义上的二分裂变现象, 而复杂碎片发射是介于这两者之间的衰变模式, 其发射概率取决于位能曲面上的条件位垒(它与特定不对称质量相应的位垒, 又称质量非对称位垒). 一般认为, 给定复杂碎片的产额 Y 和裂变位垒 B_z 之间的关系可以近似为 $Y \propto \exp[-B_z/T_z]$, 这里 T_z 是鞍点温度. 二分裂的条件位垒与质量不对称性的依赖关系决定了发射碎片的电荷分布或质量分布^[1]. 某一复合核的全部条件位垒轨迹相连得到位能曲面脊线, 其形状随裂变参量大小改变. 重复合核的对称质量裂变对应位能脊线极小以及相应碎片质量分布的裂变峰; 而轻复合核在对称质量处的质量分布出现极小, 传统的裂变鞍点消失, 脊线单向上升, 裂变峰消失而整个质量成“U”形分布, 说明裂变与蒸发过程已经难以分开(见图 1).

理论上, 宏观核模型可以计算非对称裂变位垒. 众多研究表明, 统计模型计算要与实验测量的裂变激发函数符合, 必须降低计算所使用的转动液滴模型(RLDM)裂变位垒. 转动有限力程模型(RFRM)由于考虑了核力的有限力程和表面扩散修正, 而有限程核力在鞍点处内凹形状的两表面之间作用, 可以有效降低裂变位垒计算值^[2]. 随着裂变核的裂变参量和角动量增加, 鞍点形状的下凹减

少, 导致这两个模型所预言裂变位垒的差别减少. 但是, 对于较轻质量核(如 $A=80-100$), 这两个模型所预言的对称质量裂变势垒可以相差 10 MeV 以上. 所以, 从实验上对完整的位能曲面脊线进行测量, 对于检验宏观模型的适用范围和适用程度是非常有意义的.

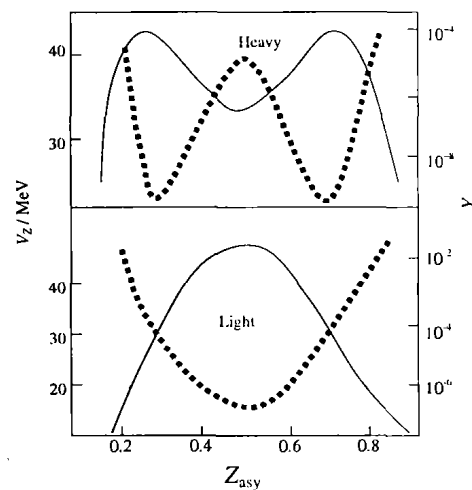


图 1 脊线位能(实线)和裂变产额(虚线)随质量不对称性 Z_{asym} 变化的示意图

2 实验非对称裂变位垒与模型计算的比较

实验上, 轻质量核($A < 100$)的非对称裂变可以

收稿日期: 2004 - 08 - 16

* 基金项目: 美国能源部核物理处高能物理核物理办公室资助项目(DE-AC03-76SF00098)

作者简介: 樊铁栓(1956-), 男(汉族), 陕西澄城人, 教授, 从事裂变与中子物理研究; E-mail: tsfan@nsl.pku.edu.cn

由重离子融合研究. 通过测量不同轰击能量下某一复合核系统的非对称裂变的完整质量分布, 可以确定一套完整的实验非对称裂变位垒——位能表面脊线的准确形状. 这种测量的困难在于典型低激发能的对称裂变产额很低, 实验测量十分困难, 另外, 必须正确辨别哪些数据是来自复合核反应.

在 1995 年, MacMahan 等^[3] 利用 45—130 MeV 的 ^3He 离子束轰击 ^{107}Ag 靶, 测量从复合核 ^{112}In 发射的 $2 \leq Z \leq 11$ 碎片的激发函数, 再与过渡态理论公式拟合, 得出了实验位能曲面脊线的一部分. Delis 等^[4] 从实验上研究了由 5.0—12.7 MeV/u ^{63}Cu 轰击 ^{12}C 反应的复杂碎片发射, 首次得到了复合核 ^{75}Br 的一套近乎完整的位能曲面脊线. 将以上两个实验结果与液滴模型计算结果比较, 发现 RFRM 模型计算结果能较好地复现实验数据. 但是, Boger 等^[5] 对 487—730 MeV 的 $^{86}\text{Kr} + ^{63}\text{Cu}$ 反应测量了 $4 \leq Z \leq 15$ 碎片发射, 使用类似的标准数据分析得到非对称裂变位垒, 并与 RFRM 模型计算进行比较, 给出了与前面所述两个实验不同的结论, 他们发现模型计算值比实验值小约 37%. 下面介绍的新近完成的 5 个复合核系统的非对称裂变实验测量, 提供了新的实验数据, 有助于澄清人们在非对称裂变研究中面临的困惑.

3 新的重离子融合实验与结果

美国伯克利实验室 Moretto/Wozniak 小组^[6, 7] 先后进行了 $^{78,82,86}\text{Kr} + ^{12}\text{C}$ 和 $^{64,58}\text{Ni} + ^{12}\text{C}$ 反应的重离子融合实验, 系统地研究了 $^{90,94,98}\text{Mo}$ 和 $^{70,76}\text{Se}$ 等

5 个同位素的非对称裂变位垒. 实验是在伯克利实验室 88 英寸回旋加速器上进行的. 实验利用高性能的 AEGR 离子源产生高电荷态的 $^{78,82,86}\text{Kr}$ (轰击能量范围 $E=6-12$ A MeV 共 20 个能点) 和 $^{64,58}\text{Ni}$ (轰击能量范围 $E=6-14$ A MeV 共 14 个能点) 离子束, 而薄 ^{12}C 靶有效降低了入射离子在靶中的能量损失. 用 8 个位置灵敏 $E-\Delta E$ 望远镜测量发射的复杂碎片, 可以系统方便地得到相当完整而连续的角分布信息, 把实验室系能谱转换成速度空间的截面绘图以辨别复杂碎片的来源. 在 $^{90,94,98}\text{Mo}$ 中测量了电荷数 $Z=5-25$ 的碎片, 而对较轻的 $^{70,76}\text{Se}$ 同位素考虑了 $Z=4-21$ 的碎片, 由碎片在质心系的角分布对角度积分得出的电荷分布呈现了典型的“U”型分布曲线(图 2 中给出其左半

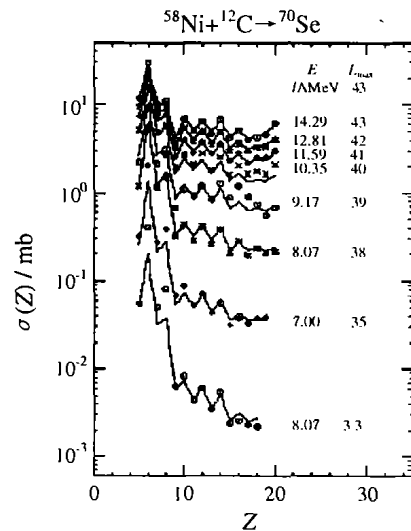


图 2 各项同性成分中的电荷分布

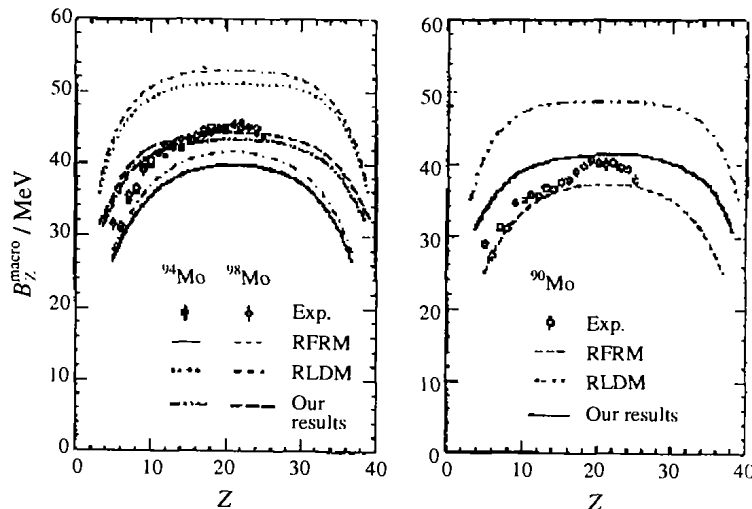


图 3 对 $^{94,98}\text{Mo}$ 和 ^{90}Mo 复合核的实验位垒与理论计算比较

部分), 同时也能看到明显的奇偶效应. 实验测量的 $^{58}\text{Ni}+^{12}\text{C}\rightarrow^{70}\text{Se}$ 反应的激发函数在低能区迅速上升, 而在能量较高时变化变缓, 这正是来自复合核统计发射的特征.

通过激发函数与跃迁态理论公式的拟合分别抽取了 $^{90,94,98}\text{Mo}$ 和 $^{70,76}\text{Se}$ 实验的质量不对称裂变位

垒, 并与宏观核模型计算进行了比较. 新的实验结果(见图 3)表明, 无论是 RLDM 模型, 还是 RFRM 模型都不能复制实验的非对称裂变位垒. 图 3 中注明我们的结果曲线显示, 由考虑了形状相关叠合能后的液滴模型^[8]计算结果与实验符合较好.

参 考 文 献:

- | | |
|---|---|
| [1] Moretto L G. Nucl Phys, 1975, A247 : 211. | [5] Boger J, Alexander J M, Phys Rev, 1994, C50 : 1 006. |
| [2] Sierk A J. Phys Rev Lett, 1985, 55 : 582. | [6] Fan T S, Jing K X, Moretto L G, <i>et al.</i> Nucl Phys, 2000, A679 : 121. |
| [3] MacMahan L G, Moretto L G, Padgett M L, <i>et al.</i> Phys Rev Lett, 1985, 54 : 1 955. | [7] Jing K X, Moretto L G, Veeck A C, <i>et al.</i> Nucl Phys, 1999, A645 : 203. |
| [4] Delis D N, Blumenfeld Y, Bowman D R, <i>et al.</i> Nucl Phys, 1991, A534 : 403. | [8] Royer G, Zhiri K. Nucl Phys, A697 : 630. |

Recent Experiments on Asymmetric Fission of Medium and Light Nuclei*

FAN Tie-shuan

(*Institute of Heavy Ion Physics and MOE Key Lab of Heavy Ion Physics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: The excitation functions were measured for complex fragments with atomic number $Z=4-25$ emitted from the compound nuclei $^{70,76}\text{Se}$ and $^{90,94,98}\text{Mo}$ produced in the reactions $^{64,58}\text{Ni}+^{12}\text{C}$ and $^{78,82,86}\text{Kr}+^{12}\text{C}$. The extracted mass asymmetric fission barriers have been compared with those calculated from macroscopic nuclear models.

Key words: $^{64,58}\text{Ni}+^{12}\text{C}$; $^{78,82,86}\text{Kr}+^{12}\text{C}$; excitation function measurement; asymmetric fission barrier

* **Foundation item:** The Director, Office of Energy Research, Office of High Energy and Nuclear Physics, Nuclear Physics Division of the US Department of Energy (DE-AC03-76SF00098)