

中能质子入射的裂变产物质量分布计算*

荣健¹⁾

(中国原子能科学研究院 北京 102413)

摘要 采用量子分子动力学(QMD)、统计衰变模型(SDM)和半经验的多模裂变模型方法计算了能量在 200MeV 附近的中能质子入射重核引起裂变的裂变产物质量分布,得到了与实验相符合的结果;同时对锕系核素和非锕系重核素分别给出了一组合理的多模裂变模型参数。

关键词 量子分子动力学(QMD) 统计衰变模型(SDM) 多模裂变模型 裂变产物 加速器驱动系统(ADS)

1 引言

加速器驱动的次临界系统(ADS)的研究推动了中能核反应理论和实验的开展。在目前的概念设计中,ADS 主要由三部分组成:具有较高运行效率的连续波中能强流质子加速器、次临界堆和为次临界堆提供源中子的靶系统^[1]。除加速器外,在靶系统和次临界堆的堆芯区,裂变是一个重要的反应形式。与低能核反应不同,在几百 MeV 的中能质子入射下,一些在低能核反应中不发生裂变的重核如铅、铋甚至金等,由于激发能高于裂变位垒而发生裂变反应。例如在 300MeV 质子入射反应中,铋的裂变截面占到总反应截面的 5%;而对于锕系核素²³⁸U 这一比例则为 50%^[2]。裂变产物是靶材料放射性核素积累的主要来源,也是次临界堆反应性的重要决定因素。因此,对中能质子入射引起裂变的裂变产物分布的研究有重要意义。

中能核裂变反应通常被考虑成两步的反应过程^[3]:首先,入射核子与靶核中的核子在靶核内碰撞,通过能量和动量的交换趋向于统计平衡,称之为预平衡过程;然后,这个激发核通过发射粒子或裂变退激发,相当于一个平衡态统计过程。最近,一个包含了相对论关联和高能裂变过程的量子分子动力学

(QMD)加统计衰变模型(SDM)统一的中能核反应理论模型^[4,5]和相应的计算程序⁶被建立起来。在该模型中,QMD 用于处理中能核反应的预平衡也称之为动力学过程,SDM 用于平衡态统计过程的处理。根据不同反应过程的时间标度,对于本工作中研究的中能质子入射引起的裂变反应,可以选用 100fm/c 作为动力学过程结束统计过程开始的“开关”时间^[7]。目前在 SDM 中对裂变问题的处理过于简单,要得到较好的结果,应选用新的模型处理统计过程中的裂变部分。目前半经验的多模裂变模型^{8-11]}是分析裂变问题的最好选择,Duijvestijn 等人将它推广用于中能裂变反应得到了很好的结果^[12]。

本工作采用上述的 QMD,SDM 和多模裂变模型,通过拟合 190MeV p + ²⁰⁸Pb 和 170MeV p + ²³⁸U 的裂变产物质量分布的实验数据,对非锕系重核和锕系核分别得到了两组参数,并使用这两组参数分别计算了 190MeV p + ¹⁹⁷Au, ²³²Th 以及 184MeV p + ²⁰⁹Bi 的裂变产物质量分布,得到了符合实验数据的结果。

2 理论模型的简要描述

QMD 理论的详细描述可以参阅 Aichelin 的综述性文章^[13]。在此模型中,每一个核子态被用一个宽

2002-08-29 收稿

国家重点基础研究发展规划项目(G1999022603)资助

1) E-mail: jrong@iris.ciae.ac.cn

度为 L 的高斯型波包函数表示

$$f_i(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t) = \frac{1}{(\pi \hbar)^3} \exp\left(-\frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_{i0}(t))^2}{2L} - \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}(t))^2}{\hbar^2}\right), \quad (1)$$

其中 \mathbf{r}_{i0} 和 \mathbf{p}_{i0} 分别是表征核子 i 的高斯型波包在坐标空间和动量空间中的中心位置. 总的相空间分布函数就是这些单粒子波包的简单相加, \mathbf{r}_{i0} 和 \mathbf{p}_{i0} 的初始值的选择应满足靶核基态的真实密度分布和动量分布, 用 Monte-Carlo 方法抽样得到^[14]. \mathbf{r}_{i0} 和 \mathbf{p}_{i0} 的时间演化满足牛顿方程, 核子-核子散射满足泡利不相容原理; 有效相互作用为包含对力和库仑力的 Skyrme 力.

SDM 采用简单的粒子蒸发模型, 粒子 x 的发射几率表示为

$$P_x = (2J_x + 1) m_x \epsilon \sigma_x(\epsilon) \rho(E^*) d\epsilon, \quad (2)$$

其中 J_x , m_x 和 ϵ 为粒子 x 的自旋、质量和动能, $\rho(E^*)$ 为激发能为 E^* 的剩余核的能级密度, $\sigma_x(\epsilon)$ 是能量为 ϵ 的粒子的逆吸收截面:

$$\sigma_x(\epsilon) = \begin{cases} (1 - U_x/\epsilon)\pi R^2 & \epsilon > U_x \\ 0 & \epsilon \leq U_x \end{cases}, \quad (3)$$

其中 R 表示吸收半径, U_x 是 x 粒子的库仑位垒. 如果剩余核的激发能高于它的裂变位垒, 则会发生裂变反应, 裂变几率为:

$$P_f = \frac{\Gamma_f}{\Gamma_R}, \quad (4)$$

其中 Γ_f 为裂变宽度, Γ_R 为反应的总宽度. 在本工作中, R , U_x 以及 Γ_f 和 Γ_R 均取经验值^[15].

3 计算结果与分析

对于非钢系核素的重核, 裂变产物的质量分布可以经验地用一个高斯分布函数来描述^[16]:

$$\sigma_i(A) = \sigma_{fiss} \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma_s} e^{-(A - M_s)^2/\Gamma_s^2}, \quad (5)$$

其中 σ_{fiss} 为总的裂变截面, M_s 可以取为发生裂变的激发核的质量的一半, 即认为这是一个对称裂变过程, Γ_s 为上述高斯函数的半宽度. 裂变截面是实验值, 为不可调输入参数. 在本工作中, 通过符合 190MeV $p + {}^{208}\text{Pb}$ 的实验数据得到上述两参数为

$$\begin{aligned} M_s &= M/2 \\ \Gamma_s &= 0.15M, \end{aligned} \quad (6)$$

拟合计算结果如图 1 所示. 我们用同样的一组参

数计算了 190MeV $p + {}^{197}\text{Au}$ 和 184MeV $p + {}^{209}\text{Bi}$ 的裂变产物质量分布, 如图 2 和图 3, 可以看出计算值基本符合实验值.

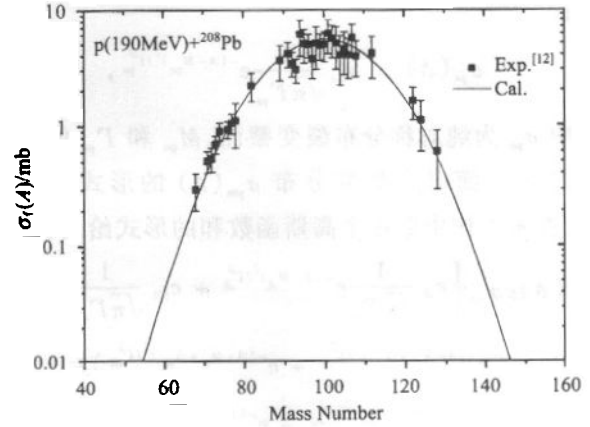


图 1 190MeV 质子入射引起²⁰⁸Pb 裂变的裂变产物质量分布

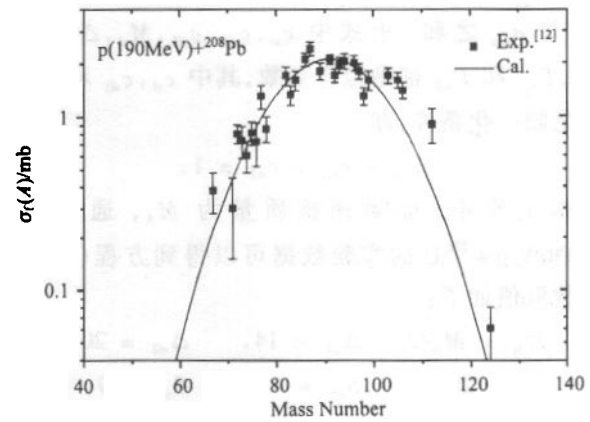


图 2 190MeV 质子入射引起¹⁹⁷Au 裂变的裂变产物质量分布

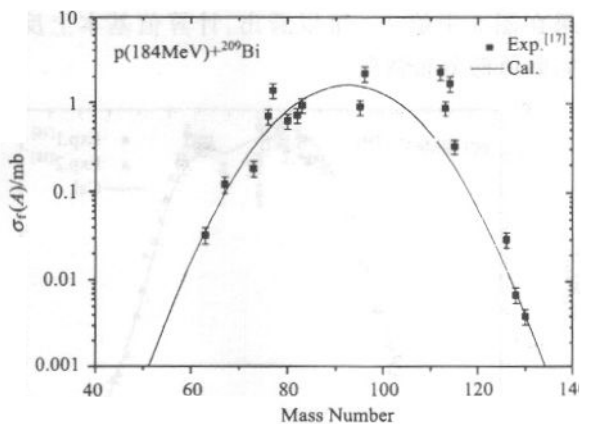


图 3 184MeV 质子入射引起²⁰⁹Bi 裂变的裂变产物质量分布

对钢系核素裂变, 情况要复杂一些, 根据多模裂变模型, 裂变产物的质量分布要用两部分描述, 即纯

对称分布和混合裂变分布:

$$\sigma_f(A) = \sigma_{ps}(A) + \sigma_{pm}(A), \quad (7)$$

其中纯对称分布 $\sigma_{ps}(A)$ 的形式与方程(5)的形式相同:

$$\sigma_{ps}(A) = \sigma_{ps} \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma_{ps}} e^{-(A-M_{ps})^2/\Gamma_{ps}^2}, \quad (8)$$

其中 σ_{ps} 为纯对称分布裂变截面, M_{ps} 和 Γ_{ps} 的取法同式(6). 而混合裂变分布 $\sigma_{pm}(A)$ 的形式则复杂些, 在本工作中取 5 个高斯函数和的形式给出:

$$\sigma_{pm}(A) = \sigma_{pm} \left\{ c_{s1} \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma_{s1}} e^{-(A-M_{s1})^2/\Gamma_{s1}^2} + c_{s11} \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma_{s11}} \cdot \right. \\ \left. (e^{-(A-M_{s1}-\Delta_{s11})^2/\Gamma_{s11}^2} + e^{-(A-M_{s1}+\Delta_{s11})^2/\Gamma_{s11}^2}) + \right. \\ \left. c_{s12} \frac{1}{\sqrt{\pi}\Gamma_{s12}^2} (e^{-(A-M_{s1}-\Delta_{s12})^2/\Gamma_{s12}^2} + e^{-(A-M_{s1}+\Delta_{s12})^2/\Gamma_{s12}^2}) \right\}, \quad (9)$$

同样, σ_{pm} 为混合分布裂变截面. 总的裂变截面为 σ_{ps} 与 σ_{pm} 之和. 上式中 $c_{s1}, c_{s11}, c_{s12}, M_{s1}, \Delta_{s11}, \Delta_{s12}, \Gamma_{s1}, \Gamma_{s11}$ 和 Γ_{s12} 都是拟合参数, 其中 c_{s1}, c_{s11} 和 c_{s12} 应满足归一化条件, 即:

$$c_{s1} + c_{s11} + c_{s12} = 1, \quad (10)$$

在本工作中, 如果靶核质量为 M_A , 通过符合 170MeV p + ^{238}U 的实验数据可以得到方程(9)中的参数取值如下:

$$M_{s1} = M_A/2, \quad \Delta_{s11} = 14, \quad \Delta_{s12} = 20, \\ S_{s1} = 25, \quad S_{s11} = 4, \quad S_{s12} = 9, \\ c_{s1} = 0.65, \quad c_{s11} = 0.05, \quad c_{s12} = 0.30.$$

图 4 给出了相应的计算结果. 采用同样的参数计算的 190MeV p + ^{232}Th 的裂变产物的质量分布的结果在图 5 中给出. 可以看出, 计算值基本上反应了实验值的分布情况.

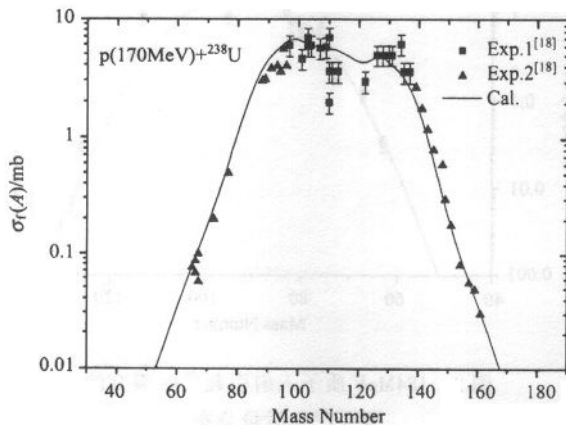


图 4 170MeV 质子入射引起 ^{238}U 裂变的裂变产物质量分布

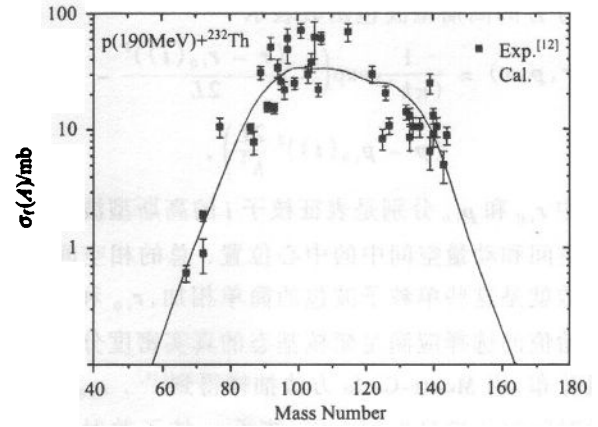


图 5 190MeV 质子入射引起 ^{232}Th 裂变的裂变产物质量分布

4 结果与讨论

采用量子分子动力学和统计衰变模型以及半经验的多模裂变模型等方法, 分别对由 200MeV 左右质子入射铜系和非铜系重核引起裂变的裂变产物质量分布进行了计算, 对铜系和非铜系重核分别给出了用于多模裂变模型的两组拟合参数. 从结果可以看出, 采用这个方法能够得到符合实验数据的计算值, 这两组参数也可以推广用于处于这一能区的重核裂变产物质量分布的描述.

在本工作中, 核反应中的预平衡过程是采用基于核内级联的量子分子动力学来处理的, 在反应的弹-靶系统趋于平衡的过程中, 由于弹核的高能量, 一般会经历数次粒子的预平衡发射过程; 在弹核能量足够高时, 还会发生散裂反应、多重碎裂等复杂的反应. 因此, 当处于平衡态的激发核发生裂变时, 它所包含的核子数会小于反应前的靶核中的核子数. 如果没有考虑反应中的粒子预平衡发射过程, 那么由于得到的激发核中的核子会多于实际情况, 裂变产物分布的高斯峰的中心位置就会向质量数增大的方向移动. 要正确的描述实验值, 就需要增加反映高斯峰的移动情况的参数, 并且这个参数对不同的核和不同的弹核入射能量数值是不同的, 这样是不能得到通用于一类核的普遍的参数形式的.

本工作采用的统计衰变模型(SDM)是非常简化的模型, 它只能描述简单粒子的蒸发过程, 并且对裂变的描述也很简单. 实际上, 对中能粒子入射重靶核形成的激发核的激发能是很高的, 一些较重的复杂粒子也可能以整体的形式被蒸发出来. 另外, 在高激发能情况下, 在弹-靶系统达到平衡之前, 裂变

就有可能发生,这也就是所谓的预平衡裂变,显然这也是会改变裂变产物的分布.对这些反应过程的进

一步研究将是我们下一步的工作.

参考文献 (References)

- 1 DING Da-Zhao. A New Option for Exploitation of Future Nuclear Energy—Accelerator Driven Radioactive Clean Nuclear Power System. In: ZHAO Zhi-Xiang ed. A Corpus on Conceptual Research on Accelerator Driven Radioactive Clean Nuclear Power System. Beijing: Nuclear Energy Press, 2002. 3 (in Chinese)
(丁大钊. 未来核能利用的方案探讨——加速器驱动放射性洁净核能系统. 见: 赵志祥编辑. 加速器驱动放射性洁净核能系统概念研究论文集. 北京: 原子能出版社, 2002. 3)
- 2 Duijvestijn M C, Koning A J, Hamsch F-J. Phys. Rev., 2001, **C64**: 014607
- 3 Wlazlo W, Enqvist T, Armbruster P et al. Phys. Rev. Lett., 2000, **84**: 5736
- 4 Niita K, Chiba S, Maruyama T et al. Phys. Rev., 1995, **C52**: 2620
- 5 Chiba S, Iwamoto O, Fukahori T et al. Phys. Rev., 1996, **C54**: 285
- 6 Niita K, Maruyama T, Nara Y et al. JAERI-Data/Code, 1999(042): 1
- 7 Chiba S, Niita K, Iwamoto O. Phys. Rev., 1996, **C54**: 3302
- 8 Broas U, Grossmann S, Mueller A. Phys. Repts., 1990, **197**: 167
- 9 FAN Tie-Shuan, HU Ji-Min, BAO Shang-Lian. Nucl. Phys., 1995, **A591**: 161
- 10 Vives F, Hamsch F-J, Bak H et al. Nucl. Phys., 2000, **A622**: 63
- 11 Hulet E K, Wild J F, Dougan R J et al. Phys. Rev. Lett., 1986, **56**: 313
- 12 Duijvestijn M C, Koning A J. Phys. Rev., 1999, **C59**: 776
- 13 Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**: 233
- 14 FAN Sheng, LI Zhu-Xia, ZHAO Zhi-Xiang et al. Eur. Phys. J., 1999, **A4**: 61
- 15 Charity R J, McMahan M A, Wozniak G J et al. Nucl. Phys., 1998, **A483**: 371
- 16 LI Wen-Xin, YIN Xin-Min, LUO Qing-Zheng et al. Phys. Rev., 1992, **C46**: 1538
- 17 Jodra L G, Sugarman N. Phys. Rev., 1955, **99**: 1470
- 18 Pappas A C, Hageb E, J. Inorg. Nucl. Chem., 1966, **28**: 1769

Calculations of the Mass Yield Distributions of Proton-Induced Fission at Intermediate Energies*

RONG Jian¹⁾

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

Abstract Based on the quantum molecular dynamics (QMD), statistical decay model (SDM) and the semi-empirical multi-mode fission model, the mass yield distributions of proton-induced fission near 200 MeV were calculated. By the experimental results of the 190 MeV $p + {}^{208}\text{Pb}$ and 170 MeV $p + {}^{238}\text{U}$, the fitted parameters, which were used in the semi-empirical multi-mode fission model, can be gotten. Using these parameters in some other calculations one found that the results were in accordance with the experimental data. These methods and the fitted parameters were available.

Key words quantum molecular dynamics (QMD), statistical decay model (SDM), multi-mode fission model, yield distributions, accelerator driven system (ADS)

Received 29 August 2002

* Supported by Major state Basic Research Development Program (G1999022603)

1) E-mail: jrong@iris.ciac.ac.cn