GEF模型对 $n+^{233}\text{U}$ 反应裂变碎片质量分布的研究

郝艺伟^{1,2}, 董国香^{2*}, 王小保², 王华磊¹, 舒能川^{3*}, 陈永静³, 刘丽乐³

1. 郑州大学物理工程学院, 郑州 450001;

2. 湖州师范学院理学院, 湖州 313000;

3. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413

*联系人, 董国香, E-mail: gxdong@zjhu.edu.cn; 舒能川, E-mail: nshu@ciae.ac.cn

收稿日期: 2019-06-14; 接受日期: 2019-07-30; 网络出版日期: 2019-10-23

国家自然科学基金(编号: 11605054, U1732138, 11505056, 11847315, 11790320, 11790325, 11675148)、河南省高等学校青年骨干教师(编号: 2017GGJS008)和郑州大学物理学科推进计划(编号: 32410017)资助项目

摘要 General Fission (GEF)模型是描述裂变过程的一种半经验模型, 它运用了量子力学和统计力学中的物理概念, 并结合经验信息调整出了一组适用于不同裂变系统的参数, 可以对大量原子核的裂变可观测量给出可靠的预测. 本工作使用GEF模型计算了 ^{233}U 中子诱发裂变产额的质量分布. 结果表明, 随着入射中子能量增加, 对称裂变贡献逐渐增大, 非对称裂变贡献逐渐减小; 考虑了多次机会裂变, (n,f) 裂变道相对贡献随着入射中子能量增加逐渐降低, 而其他裂变道贡献增加; 裂变产物的产额能量变化趋势与其在质量分布上的不同位置有关.

关键词 ^{233}U , GEF模型, 裂变产额, 质量分布

PACS: 21.10.Gv, 25.85.Ec, 24.75.+i

1 引言

核裂变为核能利用的主要途径, 钚作为新一代核燃料受到人们越来越多的关注, 而中子诱发 ^{233}U 裂变, 作为关键环节在钚铀循环研究中具有重要的意义^[1]. 准确评价裂变过程中的裂变产物产额对衰变热的计算、核反应堆设计与运行以及乏燃料处理等方面都具有实际应用意义. 同时, 研究裂变产额的分布对核裂变机制和核结构研究也具有十分重要的意义.

核裂变是一个非常复杂的过程, 自从裂变被发

现以来, 人们已经做了无数的尝试来描述裂变过程, 但至今仍遗留许多未解决的问题, 如产额能量关系的演化. 实验数据对于充分理解裂变过程十分重要, 然而, 短寿命核素的裂变产额数据实验上很难进行测量, 而且有些实验所测得的产额数据分歧较大, 甚至在一些能区没有实验数据^[2,3]. 在这种情况下, 建立裂变模型对裂变产额数据进行理论预测是非常必要的.

沿着不同的研究方向, 物理学家发展了许多不同的理论模型来描述裂变过程, 如密度泛函理论框架下采用Skyrme或Gogny有效相互作用的HFB理

引用格式: 郝艺伟, 董国香, 王小保, 等. GEF模型对 $n+^{233}\text{U}$ 反应裂变碎片质量分布的研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 122001

Hao Y W, Dong G X, Wang X B, et al. Mass distributions of fission fragments for $n+^{233}\text{U}$ reaction investigated by GEF model (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2019, 49: 122001, doi: [10.1360/SSPMA-2019-0222](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2019-0222)

论^[4,5]. 这种方法为我们提供了裂变产额的量子力学微观解释,但需要进行大量的数值计算,而且在核技术应用方面,这种平均场方法的精确性有待进一步提高. 在系统学研究的基础上,也有完全经验的方法,如五高斯模型^[6]. 在这个模型中,裂变产物产额分布是用5个高斯分布之和来描述的,但这样的经验模型缺乏物理基础,难以解释裂变过程中的物理现象. 这两者之间还有一些是用半经验唯象模型,比如Benlliure等人^[7]和Shu等人^[8]的工作,根据实验数据拟合出模型参数,能有效再现裂变产额数据,同时保留了基本的物理思想,但该模型拟合计算极大地依赖实验数据及相应误差,所以有一定的局限性^[9]. Schmidt等人^[10]提出的GEF唯象模型避免了微观计算的近似性和局限性,简化计算的同时又纳入了许多基本的物理思想. GEF模型参数较多,一些参数值是通过拟合大量实验数据确定的,无法像微观模型那样能把这些模型参数值与核力的性质联系起来,但GEF目前是更加适合应用的程序. 在本文中,GEF唯象模型将用于²³³U中子诱发裂变产额分布规律的研究.

2 理论模型

GEF是模拟核裂变过程的计算程序,是Monte-Carlo编码,它将量子力学和统计力学中的物理概念与特定的实验信息结合在一起,采用一种通用的方法描述所有裂变可观测量. 比如中子诱发裂变瞬发中子发射前和发射后裂变碎片质量产额、核素产额、角动量分布、同核异能态产额、瞬发中子谱和瞬发伽玛谱等. 考虑了多种裂变模式和多次机会裂变,在前人的研究基础上,模型获得参数经验公式和初始值,然后通过对更多裂变可观测量的拟合,获得最佳参数. 模型虽然也依赖于实验数据,但普适性强,使用范围广泛,可以自洽地计算所有裂变物理量,通过多个计算程序(TALYS, CYFP, GEF)对多个裂变系统的计算比较,GEF计算结果与大多数实验数据(包括新获取的实验数据)符合较好,被认为具有良好的预测性. JEFF-更新版3.3^[11]参考了GEF计算结果.

裂变碎片的产额是由裂变垒和断点之间的势能

面的性质决定的,势能面是质量不对称自由度的函数. 根据宏观-微观方法,断点的势能由液滴模型给出的宏观势和壳效应之和得出^[12]. Mosel和Schmitt^[13]的研究发现,外垒附近的单粒子能级结构与两个裂变碎片的单粒子能级结构十分相似. 用量子力学的一般特性来解释这一结果,即颈状势(Necked-in Potential)中波函数的主要部分已经局域在将要形成的裂变碎片的位置. 这一发现意味着裂变系统的微观性质本质上是由碎片壳层结构决定的,而宏观性质与特定的裂变系统有关^[14]. GEF模型利用这一“可分性原则”(Separability Principle),通过经验信息来确定宏观势的硬度以及碎片壳的位置和强度. GEF模型使用了大约50个参数,从经验数据的系统分析确定了一些参数,这些参数经过调整以适应大量的裂变系统,即只需要一组参数就可以给出大量裂变核的结果,而不需要对于某个特定裂变系统进行单独调整. 文献^[10]中给出了裂变道的位置和宽度、壳效应和碎片形变等参数及其不确定性. 由于模型的参数与系统的物理性质密切相关,因此可以推导出一些关于裂变过程的有趣结论.

在Brosa等人^[15]提出的多模式无规颈断裂模型中,裂变核有多种裂变路径(裂变模式)^[16]. 一般对于铀系核主要考虑最重要的3种裂变模式,分别为超长形变(SL)模式、标准I(S1)模式和标准II(S2)模式,但在本工作中还考虑了第4种裂变模式,即超级不对称(SA)裂变模式^[17,18],每种裂变模式对应势能曲面上不同的裂变路径及断前形状,其中SL是对称裂变,呈现对称的产额分布,碎片具有较低的总动能,且两个裂变碎片在断点处有强烈形变. 标准S1和S2模式是非对称裂变,呈现不对称的质量分布,碎片具有较高的总动能,其中S1模式又比S2模式高. S1裂变模式被认为是由一个靠近双幻核¹³²Sn的球形重碎片和一个中等形变的轻碎片构成. S2模式为一个中等形变重碎片和中等形变的轻碎片构成. SL模式与液滴宏观势能相关, S1, S2模式与重碎片的壳效应相关. S1重碎片的平均质量在134附近,接近于Z=50, N=82的球形壳, S2重碎片的平均质量在140附近,靠近N=88的形变壳^[9,19].

对于热中子诱发裂变,各不对称裂变模式电荷断点的平均位置由以下经验公式给出:

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{S1} &= 51.5 + 25 \cdot \left(\frac{Z_{CN}^{1.3}}{A_{CN}} - 1.5 \right), \\ \bar{Z}_{S2} &= 53.4 + 21.67 \cdot \left(\frac{Z_{CN}^{1.3}}{A_{CN}} - 1.5 \right), \\ \bar{Z}_{SA} &= 58.0 + 21.67 \cdot \left(\frac{Z_{CN}^{1.3}}{A_{CN}} - 1.5 \right),\end{aligned}\quad (1)$$

其中 A_{CN} 是复合核的质量数, Z_{CN} 是复合核的质子数. 碎片壳的位置被参数化为核电荷 Z 的函数, 在不同的裂变系统中, 各裂变道电荷平均断点位置是基本不变的, 而碎片质量断点位置则会随激发能量的增加而发生变化.

裂变产额由下式计算:

$$Y = \frac{e^{\left(\frac{E_{rel}}{T_h} - \frac{E_{rel}}{0.4}\right)}}{1 + e^{\left(-\frac{E_{rel}}{T_h T_l / (T_h - T_l)}\right)}}, \quad (2)$$

其中 Y 代表通过某个裂变途径的裂变几率, E_{rel} 为相对于位垒的能量, T_h 为低于位垒的有效温度, T_l 为高于位垒的有效温度. 各个裂变模式的相对产额由下式给出:

$$Y_2/Y_1 = e^{-\Delta E/T} \cdot \frac{\hbar\omega_1}{\hbar\omega_2} \approx e^{-\Delta E/T}, \quad (3)$$

其中 Y_1 , Y_2 代表两个不同裂变途径的裂变几率, ΔE 是两个裂变位垒差. 当激发能小于裂变位垒时, 考虑位垒穿透之后的裂变几率公式由下式给出:

$$Y_i = \frac{e^{E_{B,i}^*/T}}{1 + e^{(-E_{B,i}^*/(T \cdot T_{tun}^i/(T - T_{tun}^i)))}}, \quad (4)$$

其中 $E_{B,i}^*$ 为相对于裂变位垒的能量, 等于裂变核的初始激发能减去外垒高度, $E_{B,i}^*$ 对于各裂变道相对产额的影响用斜率参数为 T_{tun}^i 的指数函数可以很好地描述. 基于文献[20]的能级密度参数化给出由宏观势形成的对称裂变道的温度参数, 它在等温条件下具有的最小值为0.72 MeV. 质量不对称自由度下的集体温度 T 由下式给出:

$$T = 0.034 \cdot E_B^* + 0.04 \cdot \Delta E_{pot}, \quad (5)$$

其中 ΔE_{pot} 为从鞍点到断点过程中增加的势能,

$$\Delta E_{pot}(\text{MeV}) = 0.08 \cdot (Z_{CN}^2/A_{CN}^{1/3} - 1358) + 11, \quad (6)$$

裂变位垒计算时考虑了对能和壳修正, 但在鞍点的壳效应比较小可以忽略^[21], 所以裂变位垒由以下三部分构成: 宏观裂变位垒减去基态微观贡献加上垒上微观贡献:

$$B_f = B_f^{TF} - \delta E_{gs}^{mic} + \delta E_f^{mic}, \quad (7)$$

其中基态微观贡献为 $\delta E_{gs}^{mic} = m_{gs} - m_{TF}$, 垒上微观贡献为 $\delta E_f^{mic} = \delta P_f$, 最终得到

$$B_f = B_f^{TF} - (m_{gs} - m_{TF}) + \delta P_f. \quad (8)$$

裂变核在断点的激发能由三部分构成:

$$\begin{aligned}E_{scission}^* &= E_B^* + E_{diss} + E_{coll}, \\ E_{diss} &= 0.35 \cdot \Delta E_{pot}, \\ E_{coll} &= 0.065 \cdot \Delta E_{pot}^{coll},\end{aligned}\quad (9)$$

$$\Delta E_{pot}^{coll}/\text{MeV} = 0.08 \cdot (Z_{CN}^2/A_{CN}^{1/3} - 1390) + 11,$$

其中 E_{diss} 为在从鞍点到断点过程中获得的内禀能, 约为鞍点-断点势能差的35%, E_{coll} 为集体自由度之间耦合获得的集体能, 约为鞍点-断点势能差的6.5%. 对于某一裂变核的多次机会裂变各裂变道的激发能不同.

3 结果与讨论

用GEF程序和系统学计算程序CYFP¹⁾计算了中子入射能量为热能点和14.8 MeV产额质量分布. GEF计算结果与CYFP计算结果以及EXFOR数据库实验数据相比较如图1和2所示, CYFP程序在入射中子能量为14.8 MeV时与实验数据符合得较好, 而在热能点时两个峰区产额数值与实验数据相差较大, GEF程序则在两个能点都与实验数据符合较好.

不同的裂变模式对应不同的产额质量分布, 对于某个裂变核, 其产额质量分布为多种模式的叠加, 每个模式所占的份额与入射中子能量 E_n 有关. 图3为用GEF模型计算的不同裂变模式的相对贡献随入射中子能量的变化关系. 从图中可看出, S2模式在0–20 MeV这个能量范围内是占优势的, 随着入

1) Wahl A C. Systematics of Fission-Product Yields. Los Alamos National Laboratory Report. No. LA-13928, 2002 (unpublished)

射中子能量升高, 壳效应逐渐减弱, 非对称裂变S1, S2模式贡献逐渐减小. SA模式所占贡献非常小, 从热能点到2 MeV左右贡献很小, 总体变化趋势是随中子能量增加贡献减小. 对称裂变SL模式贡献逐渐增加, 非对称裂变模式逐渐转化为对称裂变模式.

GEF模型可以计算各裂变模式和各裂变道相应的分质量分布. 图4给出了SL, S1, S2, SA四种裂变模式在不同入射中子能量下各自的产额质量分布, 可明显看出非对称裂变S1, S2均近似为双峰分布, 且随入射中子能量的升高峰高降低峰宽增大, 壳效应逐渐减弱, 贡献减少. 为了便于观察把它转换到对数坐标上, 可以看出对称裂变为单峰分布, 随着能量

图1 (网络版彩图)热能点 $n+^{233}\text{U}$ 裂变碎片质量分布

Figure 1 (Color online) Mass distributions of fission fragments of $n+^{233}\text{U}$ reaction at $E_n = \text{Thermal}$.

图2 (网络版彩图)14.8 MeV $n+^{233}\text{U}$ 裂变碎片质量分布

Figure 2 (Color online) Mass distributions of fission fragments of $n+^{233}\text{U}$ reaction at $E_n = 14.8 \text{ MeV}$.

图3 (网络版彩图)不同裂变模式的相对贡献随入射中子能量的变化关系

Figure 3 (Color online) The relative contribution of different fission modes as a function of the incident neutron energy.

的升高, 峰高与峰宽均增大, 贡献增加. 超级不对称模式SA是比较特殊的, 可以从图中看出SA模式为双峰分布, 虽然SA模式在热能点的贡献比在14 MeV时的贡献小, 但由图3可知, 其随入射中子能量变化的总体趋势是随能量升高贡献减小. 而且SA模式所占的份额非常小, 几乎可以忽略不计. 此外S1和S2模式的位置几乎不变, 这也与壳效应相对应.

随着入射中子的能量增加, 复合核在裂变之前可能会先发射一个或几个中子, 发射中子后, 还有足够的激发能发生裂变, 即多次机会裂变, (n,f), (n,nf), (n,2nf)等多道裂变道会打开. 图5为计算的多次机会裂变不同裂变道的相对贡献随入射中子能量的变化关系. 从图中可以看出, 入射中子能量 $E_n < 20 \text{ MeV}$ 时主要有三个裂变道, 能量较低时只有(n,f)裂变道, E_n 到5 MeV左右时(n,nf)裂变道打开, E_n 到11 MeV左右时(n,2nf)裂变道也打开. 随入射中子能量升高, (n,f)裂变道相对贡献逐渐降低, 其他裂变道的贡献逐渐增加. 某一裂变系统下, 总的产额质量分布为各个裂变道的权重和.

图6给出了(n,f), (n,nf), (n,2nf)三个裂变道在 $E_n = 6 \text{ MeV}$ 和14 MeV时的产额质量分布. 在 $E_n = 6 \text{ MeV}$ 时主要有两个裂变反应道, 峰区和谷区都是(n,f)裂变道占主要优势. 当 $E_n = 14 \text{ MeV}$ 时主要有3个裂变道, 谷区(n,f)裂变道占优势, 峰区则是(n,nf)裂变

图 4 (网络版彩图)不同裂变模式的分质量分布, 上为直角坐标, 下为对数坐标, 左边 E_n =Thermal, 右边 E_n =14 MeV

Figure 4 (Color online) Calculated mass distributions of different fission modes at E_n =Thermal and 14 MeV. The same results are plotted in linear and logarithmic scales, respectively, in the upper and lower panels.

道占优势.

裂变碎片产额分布与入射中子的能量有关, 且质量分布上不同位置的产物核产额能量关系明显不同. 图7为计算的入射中子能量从热能点到 20 MeV共6个能点的产额质量分布, 可发现随着入射中子能量的增加产额质量分布的变化有如下特点: 随着能量的升高, 壳效应逐渐减弱, 非对称裂变

图 5 (网络版彩图)多次机会裂变不同裂变道的相对贡献随入射中子能量的变化关系

Figure 5 (Color online) The relative contribution of different fission chances as a function of the incident neutron energy.

图 6 (网络版彩图)多次机会裂变不同裂变道的分质量分布, 上为 E_n =6 MeV, 下为 E_n =14 MeV

Figure 6 (Color online) Calculated mass distributions of the different fission chances at E_n = 6 MeV and 14 MeV.

图7 (网络版彩图)不同能点的质量产额分布

Figure 7 (Color online) Calculated mass distributions at different incident neutron energies.

的贡献减小, 对称裂变贡献增加, 峰高变低, 谷底抬高, 峰宽加大. 质量分布不同位置上产额随能量变化会出现不同的趋势: 轻峰区($A \sim 85-101$)和重峰区($A \sim 132-148$)产额总的趋势随入射中子能量升高而下降, 谷区和两翼产额随入射中子能量上升而上升. 上述4个质量点称为趋势转折点, 外侧两个点、内侧两个点之和, 考虑中子发射带走的2-3个中子之后, 与复合核的质量几乎相等. 这与刘丽乐等人^[9]给出结果一致.

4 总结

裂变的半经验模型GEF模型采用一种全局方法使用一组参数可以计算大量原子核的裂变可观测量, 而不需要各个裂变系统具体的实验信息, 可以为产额评价提供重要的参考. 本工作使用GEF模型计算 ^{233}U 中子诱发裂变各裂变模式和多次机会裂变各个裂变道的产额质量分布并对产能关系进行了研究. 计算结果表明, 随着入射中子能量的提高, 壳效应减弱, 对称裂变贡献逐渐增大, 非对称裂变贡献逐渐减小. 入射中子能量增加到一定值时多次机会裂变各裂变道会依次打开, 随着能量增高(n,f)裂变道相对贡献逐渐降低, 其他裂变道贡献增加. 质量分布不同位置上产额随能量变化有不同的变化趋势, 峰区产额随入射中子能量升高而下降, 谷区产额随入射中子能量上升而上升.

通过GEF, CYFP计算结果和实验数据的比较, 说明CYFP程序是系统学程序, 并且自2002年以来没有更新, 峰区数据与实验数据相差较大; 而GEF这些年来一直在更新, 与现有的实验数据或者评价数据符合较好, 为缺乏产额实验数据的核提供了较为可靠的预测, 因此推荐GEF作为评价数据的参考. 在下一步工作中, 我们将对美国利弗莫尔国家实验室开发的FREYA程序^[22]进行解读.

参考文献

- 1 IAEA N F C. Thorium Fuel Cycle - Potential Benefits and Challenges-IAEA-TECDOC-1450. Technical Report, Vienna: International Atomic Energy Agency. 2005
- 2 Böckstiegel C, Steinhäuser S, Schmidt K H, et al. Nuclear-fission studies with relativistic secondary beams: Analysis of fission channels. *Nucl Phys A*, 2008, 802: 12-25
- 3 Kellett M A, Besillon O, Mills R W. The JEFF-3.1/-3.1.1 Radioactive Decay Data and Fission Yields Sub-libraries. Technical Report, No. 6287, OECD Nuclear Energy Agency. 2009
- 4 Schunck N, Duke D, Carr H, et al. Description of induced nuclear fission with Skyrme energy functionals: Static potential energy surfaces and fission fragment properties. *Phys Rev C*, 2014, 90: 054305
- 5 Regnier D, Dubray N, Schunck N, et al. Fission fragment charge and mass distributions in $^{239}\text{Pu}(n, f)$ in the adiabatic nuclear energy density functional theory. *Phys Rev C*, 2016, 93: 054611
- 6 Musgrove A R de L, Cock J L, Trimble G D. Prediction of Unmeasured Fission Product Yields. IAEA-169. Technical Report, Vienna: International Atomic Energy Agency, 1974. 163-200
- 7 Benlliure J, Grewe A, de Jong M, et al. Calculated nuclide production yields in relativistic collisions of fissile nuclei. *Nucl Phys A*, 1998, 628: 458-478
- 8 Shu N C, Chen Y J, Liu T J, et al. Semi-empirical study on the yield energy-dependence of the $^{235}\text{U} + n$ fission. *J Korean Phys Soc*, 2011, 59: 1353-1356

- 9 Liu L L, Shu N C, Liu T J, et al. Study on mass distribution of $n+^{233}\text{U}$ fission with phenomenological model (in Chinese). *Nucl Phys Rev*, 2013, 30: 374 [刘丽乐, 舒能川, 刘廷进, 等. $n+^{233}\text{U}$ 裂变碎片质量分布的唯象模型研究. *原子核物理评论*, 2013, 30: 374]
- 10 Schmidt K H, Jurado B, Amouroux C, et al. General description of fission observables: GEF model code. *Nucl Data Sheets*, 2016, 131: 107–221
- 11 Kellett M A, Bersillon O. The Decay Data Evaluation Project (DDEP) and the JEFF-3.3 radioactive decay data library: Combining international collaborative efforts on evaluated decay data. *EPJ Web Conf*, 2017, 146: 02009
- 12 Brack M, Damgaard J, Jensen A S, et al. Funny hills: The shell-correction approach to nuclear shell effects and its applications to the fission process. *Rev Mod Phys*, 1972, 44: 320–405
- 13 Mosel U, Schmitt H W. Potential energy surfaces for heavy nuclei in the two-center model. *Nucl Phys A*, 1971, 165: 73–96
- 14 Schmidt K H, Kelić A, Ricciardi M V. Experimental evidence for the separability of compound-nucleus and fragment properties in fission. *Europhys Lett*, 2008, 83: 32001
- 15 Brosa U, Grossmann S, Müller A. Nuclear scission. *Phys Rep*, 1990, 197: 167–262
- 16 Fan T, Hu J, Bao S. Study of multichannel theory for the neutron induced fissions of actinide nuclei. *Nucl Phys A*, 1995, 591: 161–181
- 17 Mulgin S I, Okolovich V N, Zhdanova S V. Observation of new channel in the proton-induced low-energy fission of nuclei from 233 Pa to 245 Bk. *Phys Lett B*, 1999, 462: 29–33
- 18 Hamsch F-J, Oberstedt S, Aarle J Van. $^{252}\text{Cf}(\text{SF})$: Fission modes and far asymmetric mass yields. *Conf Proc—Italian Phys Soc*, 1997, 59: 1239
- 19 Wilkins B D, Steinberg E P, Chasman R R. Scission-point model of nuclear fission based on deformed-shell effects. *Phys Rev C*, 1976, 14: 1832–1863
- 20 Rusanov A Ya, Itkis M G, Oklovich V N. Features of mass distributions of hot rotating nuclei. *Phys Atom Nucl*, 1997, 60: 683
- 21 Myers W D, Swiatecki W J. Nuclear properties according to the Thomas-Fermi model. *Nucl Phys A*, 1996, 601: 141–167
- 22 Verbeke J M, Randrup J, Vogt R. Fission reaction event yield algorithm FREYA 2.0.2. *Comput Phys Commun*, 2018, 222: 263–266

Mass distributions of fission fragments for $n+^{233}\text{U}$ reaction investigated by GEF model

HAO YiWei^{1,2}, DONG GuoXiang^{2*}, WANG XiaoBao², WANG HuaLei¹, SHU NengChuan^{3*},
CHEN YongJing³ & LIU LiLe³

¹*School of Physics and Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;*

²*School of Science, Huzhou University, Huzhou 313000, China;*

³*Key Laboratory of Science and Technology on Nuclear Data, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*

The General Fission (GEF) model is a semi-empirical model describing fission process, which combines physical concepts from quantum mechanics and statistical mechanics with specific experimental information to adjust a set of parameters suitable for different fission systems and gives reliable predictions for essentially all fission observables of a broad range of fissioning nuclei. In this work, the mass distributions of ^{233}U neutron-induced fission are calculated using the GEF model. The results show that with the increase of incident neutron energy, the contribution of symmetric fission channel increases gradually, and the asymmetric fission channel decreases. Detailed analysis of the fragment mass distribution is performed by taking multi-chance fission into account. The contribution of (n,f) fission channel gradually decreases with the increase of incident neutron energy, while the other fission channels increases. The variation trend of the yield energy-dependence is related to the position located on the mass distribution.

^{233}U , GEF model, fission yield, mass distribution

PACS: 21.10.Gv, 25.85.Ec, 24.75.+i

doi: 10.1360/SSPMA-2019-0222