

文章编号: 1007-4627(2017)02-0252-06

2.8 MeV 中子诱发²³⁸U 裂变的瞬发中子谱高能段实验测量

黄翰雄, 阮锡超, 任杰, 聂阳波, 黎光武, 栾广源

(中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413)

摘要: 在中国原子能科学研究院的高压倍加器上利用中子飞行时间方法测量了 2.8 MeV 中子引起 ²³⁸U 裂变的瞬发中子能谱, 通过增大样品量和设计合适的屏蔽体提高了效应/本底比, 使得测量数据的不确定度满足预期目标(在 5.5~14 MeV 能区内, 能量间隔为 0.5 MeV 条件下能谱的不确定度小于 10%)。将实验几何、中子源能量分布及角分布、探测效率、束流的时间结构等实验条件输入到 MCNP 程序里, 模拟了出射的中子谱, 模拟结果与测量结果在不确定度范围内一致, 验证了在入射中子能量较低时 ²³⁸U 的裂变瞬发中子谱评价数据的可靠性。

关键词: 裂变瞬发中子谱; 飞行时间方法; 蒙特卡罗模拟

中图分类号: TL11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.02.252

1 引言

中子诱发核材料裂变产生的瞬发中子能谱 (Prompt Fission Neutron Spectrum, PFNS) 在国防应用、反应堆设计、临界安全计算、核技术应用及核物理理论研究中都有重要的应用价值。以往已开展了一些相关研究^[1-4], 但裂变中子谱高能部分开展工作较少, 且数据精度差, 实验数据与评价数据之间存在较大分歧, 无法满足日益严格的应用需求。文献[1]测量了 1.9 MeV 中子入射诱发 ²³⁸U 裂变的瞬发中子谱, 其实验结果被 EXFOR 数据库收录, 本文后面会将此 EXFOR 数据与本文的结果进行比较。文献[2]给出了 10.17 和 12.12 MeV 两个能点中子引起 ²³⁸U 裂变的瞬发中子谱与 FINESSE 理论计算结果的比较, 如图 1 所示。比较可以看出, 裂变瞬发中子谱测量结果与理论模型计算结果在 2~7 MeV 能区基本一致。在低能区, 由于本底干扰多, 理论与实验结果分歧比较大; 而在能量较高的区域, 由于裂变瞬发中子占全能区中子的份额太少, 以致高能区实验测量很难达到很好的统计精度, 实验数据与评价数据之间有系统偏差, 这一分歧至今没有解决。国际原子机构 (IAEA) 已经组织了两次关于“铀系核裂变瞬发中子谱评价”的协作研究项目 Coordinated Research Project (CRP)^[5, 6], 以便更好地促进裂变瞬发中子谱测量及数据评价工作的开展。

本文利用 2.8 MeV 的入射中子与 ²³⁸U 相互作用,

目标是测量 5 MeV 以上能区的裂变瞬发中子谱, 故而源中子散射及其它反应出射的中子对高能区的贡献可以通过提高探测阈直接扣除。本实验重点关注裂变瞬发中子谱高能段的数据, 通过大的样品量达到好的统计精度, 一方面补充具有较高精度的实验数据, 另一方面为澄清现有实验与评价数据在高分能段的分歧提供依据。

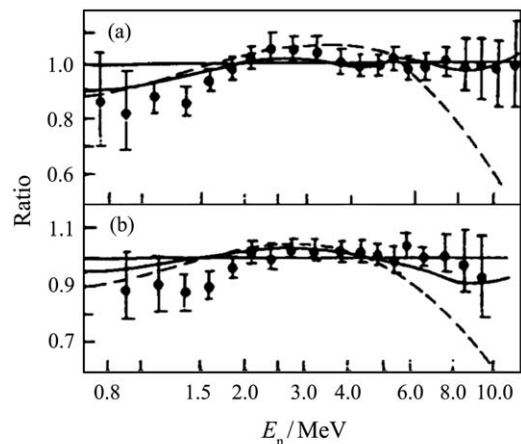


图 1 10.17 和 12.12 MeV 中子诱发 ²³⁸U 裂变的瞬发中子谱理论计算与实验数据的比较^[2]

图中圆点是实验测量结果, 实线是 FINESSE 程序计算的结果, 虚线是 ENDF/B-VI 库的评价数据。

2 实验测量

实验在中国原子能科学研究院的倍加器上进行, 实

收稿日期: 2016-08-08; 修改日期: 2016-09-28

基金项目: 核数据专项资金资助(B0120133001)

作者简介: 黄翰雄(1979-), 男, 广东韶关人, 副研究员, 硕士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: hhanxiong@163.com.

验布局见图 2。中子源采用的是氘+氘(Ti)反应, 中子源强约 $1.5 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, 脉冲束宽度约 2.5 ns(FWHM)。

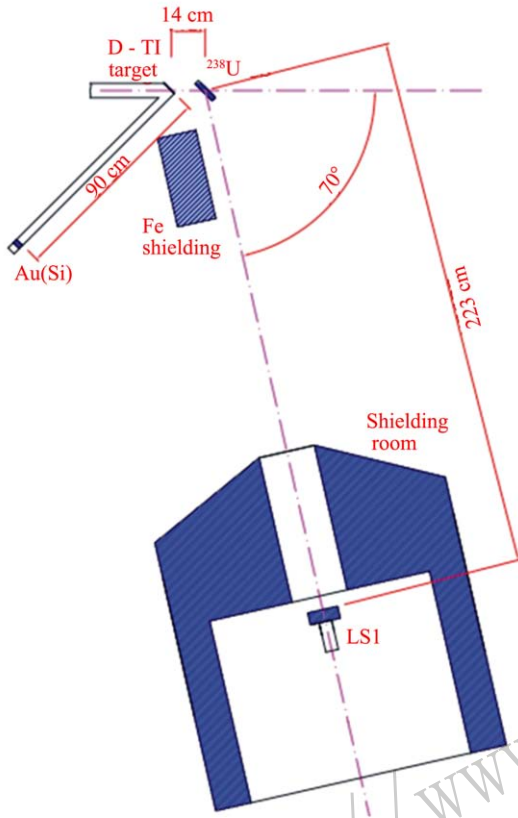


图 2 (在线彩图) 实验布局图

采用板状 ²³⁸U 样品, 尺寸为 10 cm×10 cm×2 cm, 重量 3.8 kg。中子探测器采用的是 $\phi 12.7 \text{ cm} \times 5.08 \text{ cm}$ 的 BC501 液体闪烁体探测器, 液闪探测器放置在一个屏蔽体内, 以便降低本底的干扰; 在氘靶和屏蔽体之间还放置了一段长 40 cm 的铁砖作为影椎, 用来降低来自靶上源中子的本底干扰。液闪探测器距离样品 223 cm, 样品距离氘靶表面 14 cm, 液闪探测器与束流方向夹角约 70°。

实验采用的电子学如图 3 所示。其中 LS1 Anode 是放置在 70° 的液闪探测器的阳极信号, 经 Philipse-744 扇出后, 其中一路送恒比定时器(CFD, ORTEC-935), CFD 的三路输出分别作为 NTOF 的起始时间、定标器计数和数据获取(DAQ) 的门信号; 第二路信号经幅度衰减后送 QDC, 作为脉冲高度谱信号(Pulse Height Spectrum, PH1.QDC), 即对应中子的能量参数; 第三路信号送入 MPD-4 插件, 这块插件集成了 PH 输出(PH1.MPD4) 和脉冲形状甄别(Pulse Shape Discrimination, PSD1)。LS2 Anode 是放置在 5° 的监视器阳极信号, 该监视器用于监测束流的稳定性。氘靶前端有一个脉冲感应环, 可以拾取氘束的时间信号(pickup), 经 CFD 定时并适当延迟后作为 NTOF 的停止信号。另外, 在 135° 放置一个有伴随粒子测量系统(金硅面垒探测器), 通过测量 D(d, p)T 反应出射的质子计数率来监测 D(d, n)³He 反应中子源的强度, 作为实验测量数据的归一标准。

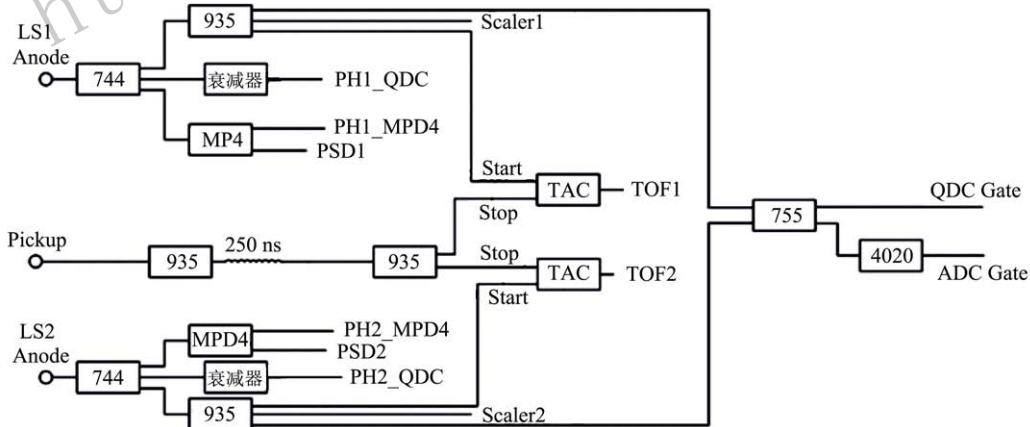


图 3 PFNS实验电子学

在线有效测量总共 85.4 h, 其中有样测量 60 h, 无样本底测量 25.4 h。期间多次用 ¹³⁷Cs 源对液闪探测器进行了刻度, 测得的 ¹³⁷Cs 脉冲高度谱(PH 谱) 的康普顿边缘^[7]位置没有变化, 这说明实验期间探测器工作状态非常稳定。

3 数据分析

3.1 确定入射中子能量

不同入射能量中子诱发的裂变中子谱形状不同, 故实验首先需要确定入射到样品上中子的能量。因

为 ^{238}U 很重, 中子与其发生弹性碰撞后几乎不损失能量(如 2.8 MeV 中子与 ^{238}U 发生弹性散射, 70° 角出射的中子能量为 2.784 MeV, 只损失 16 keV), 因此弹性散射中子的能量基本可以代表入射中子能量。由于液闪探测器具有 n- γ 甄别能力, 通过脉冲形状甄别技术, 在 TOF1 谱上加上事例限制条件(如图 4(a) 所示, 左边的“ γ ”框内的事例), 得到的是排除了中子干扰后的纯事例的 TOF 谱, 对该谱的 γ 峰位进行高斯拟合后可获得峰位 (P_γ)。同理, 在 TOF 谱上加上中子事例限制条件(图 4(a) 中右边的“PSD1”框内事例), 再用有样品时的 TOF 谱减去无样品时的 TOF 谱可得到纯

中子 TOF 谱(如图 4 (b) 所示, 上面的曲线是没有任何条件的 TOF, 下面的曲线是用经 PSD 挑选并将有样谱减去无样谱后得到的纯中子 TOF)。对纯 TOF 谱的中子峰进行高斯拟合得到中子峰位 P_n 。然后利用飞行距离 (L)、TAC 道宽 (W) 等参数即可算出源中子与 ^{238}U 作用后弹性散射中子的飞行时间及能量^[8], 见公式 (1) 和 (2), 中子能量最终的计算结果为 $E_n = 2.8$ MeV。

$$t_n = t_\gamma = \Delta t_{n-\gamma} = \frac{L}{v_c} + (P_\gamma - P_n) \times W, \quad (1)$$

$$E_n = \left(\frac{72.3 \times L}{t_n} \right)^2. \quad (2)$$

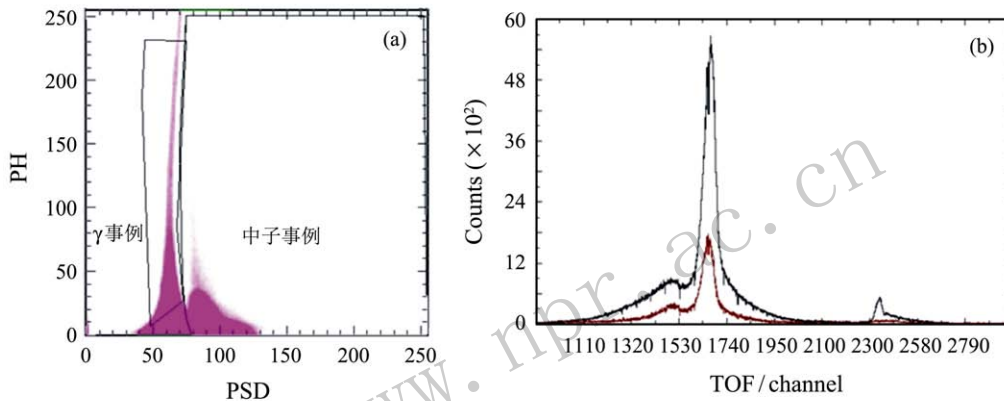


图 4 (在线彩图) 液闪探测器的粒子甄别及中子飞行时间谱

3.2 实验数据反演

不同探测阈值条件下探测器的探测器效率不一样, 对实验数据进行反演之前要先定好一个探测器阈。探测器阈是通过 γ 源标定来获得的, 使用了 ^{22}Na 和 ^{137}Cs 两个同位素源, 共 3 个能点, 如表 1 所列。对这 3 个能点进行线性拟合可以得到 γ 刻度的结果:

$$E_e = 1.8367 \times CHN - 20.783, \quad (3)$$

其中: E_e 为康普顿散射电子最大能量^[7, 9]; CHN 为这个电子能量对应 ADC 的道数。数据反演时取探测器的探测阈 $CHN = 828$ channel, 根据式 (3) 可以算出对应的康普顿散射电子最大能量为 1.5 MeV, 根据之前的液闪光响应实验刻度结果^[9], 该电子能量对应的中子能量约为 3.8 MeV。即本次实验的中子探测阈设为 3.8 MeV, 经过这一限制条件后, 可以排除低能中子对 TOF

谱的干扰, 同时也大大降低 TOF 谱中的偶然符合本底。

反演使用的软件也是 KMAX, 反演得到的有样能谱减去无样能谱即可得到 ^{238}U 样品的纯净谱。

3.3 效率修正

为了后续数据分析的灵活和简便, 对实验测量的能谱不作效率修正, 而是在后面的 MCNP 模拟时把探测效率添加进去。这样处理的好处是在模拟中把实验几何、探测效率、脉冲束参数等都作为输入参数, 模拟获得的 TOF 谱或能谱可直接与实验测量谱进行比较。本工作中使用的液闪探测器效率由 NEFF50 程序计算得到^[9]。

4 对实验的 MCNP 模拟

经数据处理, 得到的 2.8 MeV 中子诱发 ^{238}U 裂变的裂变瞬发中子谱实验测量结果如图 5 中所示。采用 MCNP 程序对 2.8 MeV 中子诱发 ^{238}U 裂变的裂变瞬发中子谱进行了模拟, 模拟时按照实验布置对几何模型和材料进行了输入, 同时, 将中子源能量分布及角

表 1 放射源刻度结果

序号	放射源名称	E_e/keV	$CHN/\text{Channel}$
1	^{22}Na	341	197
2	^{137}Cs	477	271
3	^{22}Na	1061	589

分布、探测效率、束流的时间结构等实验条件作为输入参数进行了建模; 并采用了 CENDL-3.1 评价数据库, MCNP 模拟结果与裂变瞬发中子谱的比较也显示在图 5 中。为了更直观地比较两者的差异, 将测量谱除以 MCNP 的模拟结果, 得到两者的比值, 结果见图 6。另外, 还采用 ENDF/B7.1 数据库进行了 MCNP 模拟, 其模拟结果和采用了 CENDL-3.1 评价数据库的模拟结果未发现显著差异, 文中没有给出采用 ENDF/B7.1 数据库的模拟结果。

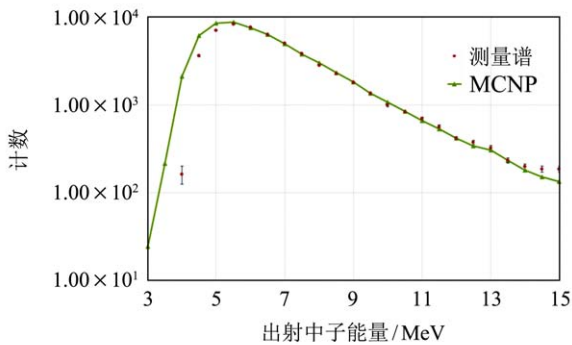


图 5 (在线彩图) 测量能谱与 MCNP 模拟结果的比较

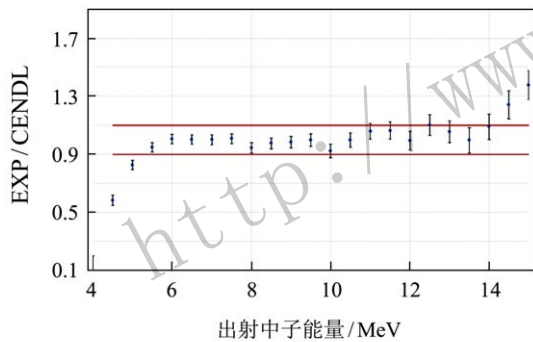


图 6 (在线彩图) 裂变瞬发中子谱测量结果与 MCNP 模拟结果的比值

从图 5 和图 6 中的结果可以看出, 在 5.5~14 MeV 中子能区, 模拟结果跟测量结果一致性较好; 在低能区 ($E_n < 5$ MeV), 模拟谱数据和实验谱结果存在较大

的偏差, 分析其原因, 可能是近阈处的探测效率曲线非常陡峭, 探测效率不确定度很大所致; 在大于 14 MeV 能区, 一方面由于计数率低, 统计误差大, 另一方面对本底的准确扣除非常困难, 导致测量结果跟模拟结果有较明显的分歧。

5 不确定度分析

不确定度主要来自探测器探测效率不确定度 (σ_{eff}) 和数据计数统计不确定度 (σ_{stat})。依据之前的工作^[9]可知, 探测效率不确定度约为 3%, 数据计数统计不确定度 σ_{stat} 与有样计数、无样本底计数和伴随粒子计数等都有关联, 测量谱的计数率可用下列表达式描述, 即

$$N_{\text{net}} = N_s - \frac{A_s}{A_b} \times N_b \quad (4)$$

其中: N_s 是有样条件下中子探测器的计数; A_s 是有样时伴随粒子探测器的计数; A_b 是无样本底测量时伴随粒子计数; N_b 是无样测量时中子探测器计数。由于每一轮有样减无样时伴随粒子计数很大 (大于 1×10^5), 故 A_s/A_b 的统计不确定度可以忽略, 即只考虑 N_s 和 N_b 的统计不确定度, 根据文献[10]对不确定度传递的处理方法, 计数率不确定度可用下列方程描述, 即

$$\Delta N_{\text{net}}^2 = \left(\frac{\partial N_{\text{net}}}{\partial N_s} \right)^2 \Delta N_s^2 + \left(\frac{\partial N_{\text{net}}}{\partial N_b} \right)^2 \Delta N_b^2 \quad (5)$$

将 $N_{\text{net}} = N_s - A_s/A_b \times N_b$, $A_s/A_b = 2.33$, $\Delta N_s^2 = N_s$, $\Delta N_b^2 = N_b$ 代入上式简化后可得

$$\sigma_{\text{stat}} = \Delta N_{\text{net}} = \sqrt{N_s + 5.43N_b} \quad (6)$$

利用上式对每一个能点进行统计不确定度计算, 最后总的不确定度为,

$$\sigma_{\text{total}} = \sqrt{\sigma_{\text{stat}}^2 + \sigma_{\text{eff}}^2} \quad (7)$$

不确定度计算结果如表 2 中所列。

表 2 各能点的测量不确定度

E_n/MeV	Error/%	E_n/MeV	Error/%	E_n/MeV	Error/%	E_n/MeV	Error/%
4.50	3.60	7.50	3.45	10.50	5.00	13.50	8.83
5.00	3.26	8.00	3.62	11.00	5.27	14.00	8.83
5.50	3.21	8.50	3.77	11.50	5.83	14.50	9.71
6.00	3.23	9.00	3.94	12.00	6.42	15.00	10.07
6.50	3.28	9.50	4.31	12.50	7.13		
7.00	3.35	10.00	4.61	13.00	7.39		

6 结果与讨论

图 7 是本次测量结果与评价数据及 EXFOR 数据的比较, 由比较得知, 在 5.5 ~ 14 MeV 能区内, 测量结果与 MCNP 模拟结果在 10% 不确定度范围内完全一致。这说明对 2.8 MeV 中子诱发 ^{238}U 裂变的瞬发中子谱, 评价数据是可靠的。本次测量的数据与 2002 年 EXFOR 的数据相比, 数据点更平滑、更合理, 能区上限由 12 MeV 扩大至 14 MeV。

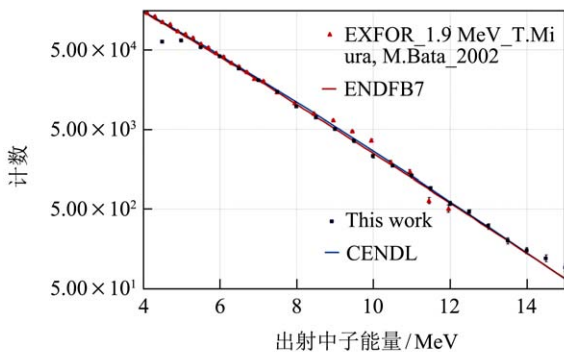


图 7 (在线彩图) 本次测量结果与评价数据及 EXFOR 数据的比较

本实验结果表明, 该实验方法用来测量低能中子诱发的裂变瞬发中子谱是切实可行的, 可以获得高统计精度的实验数据。本工作一方面提供了一份中子诱发 ^{238}U 裂变的瞬发中子谱的高能段实验数据, 另一方面也为开展其它能点的高精度测量奠定了基础。在有较大质量的裂变材料样品条件下, 此方法亦可用来测量其它裂变材料的裂变瞬发中子谱。而对高能入射中子的情况, 为了扣除源中子的干扰, 需要通过裂变室与液闪进行符合测量的方法才能得到比较好的数据结果, 这也是

下一步的工作方向。

致谢 实验过程中得到了核数据重点实验室许多同事的热心帮助并参与实验测量值班, 也得到了倍加器组全体职工的大力配合, 在此一并感谢!

参考文献:

- [1] MIURA T, BABA M, WIN T, *et al.* Journal of Nuclear science and Technology, 2002(S2): 409.
- [2] LI Anli, BAI Xixiang, WANG Xiaozhong, *et al.* Nucl Instr and Meth A, 1996, **370**: 477.
- [3] MADLAND D G, IGNATYUK A. FISSION NEUTRON SPECTRA OF URANIUM-235 [2016-02-26]. <https://www.oecd-nea.org/science/wpec/volume9/volume9.pdf>, 2003.
- [4] NODA S, HAIGHT R C, NELSON R O, *et al.* Phys Rev C, 2011, **83**: 034604.
- [5] MASLOV V M. Atomic Energy, 2007, 103: 633.
- [6] CAPOTE R, CHEN Y J, HAMBACH F J, *et al.* Nuclear Data Sheets, 2016, **131**: 1.
- [7] LU Xiting. Nucleus Physics[M]. 2th ed. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2000: 65. (in Chinese)
(卢希庭. 原子核物理[M]. 第2版, 北京: 原子能出版社, 2000: 65.)
- [8] SHEN Guanren. The Method of Neutron Time Of Flight and its Applications[M]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 2007: 1. (in Chinese)
(沈冠仁. 中子飞行时间方法及其应用[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 1.)
- [9] HUANG Hanxiong, RUAN Xichao, CHEN Guochang, *et al.* Chinese Physics C, 2009, **33**(8): 677.
- [10] WU Zhihua, ZHAO Guoqing, LU Fuquan, *et al.* Nuclear Physics Methods[M]. 3th ed. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1997: 8. (in Chinese)
(吴治华, 赵国庆, 陆福全, 等. 原子核物理实验方法[M]. 第3版. 北京: 原子能出版社, 1997: 8.)

Measurement of Prompt Fission Neutron Spectrum of ^{238}U Induced by 2.8 MeV Neutron

HUANG Hanxiong, RUAN Xichao, REN Jie, LI Guangwu, LUAN Guangyuan

(*Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

Abstract: The Prompt Fission Neutron Spectrum (PFNS) of ^{238}U induced by 2.8 MeV neutron was measured using the Cockcroft-Walton accelerator in China Institute of Atomic Energy (CIAE). The signal/background ratio was improved by increasing the amount of sample mass and using an appropriate shielding system. The final uncertainty of neutron energy spectrum in 5.5~14 MeV region is less than 10% with a bin size of 0.5 MeV which has reached this project's anticipation. The experimental geometry, the angular distribution and energy distribution of neutron source, the detection efficiency and time structure of deuteron beam were inputted into the MCNP code to simulate the outgoing neutron spectrum. The simulated results agree with the experimental ones within the uncertainty. The result indicates that the evaluated PFNS for ^{238}U at low neutron energy is reliable.

Key words: prompt fission neutron spectrum; Time-Of-Flight method; Monte-Carlo simulation

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 8 Aug. 2016; **Revised date:** 28 Sep. 2016

Foundation item: Special Fund for Nuclear Data((B0120133001)

1) E-mail: hhanxiong@163.com.