

10 MeV 中子引起的 ^{238}U 、 ^{209}Bi 和Fe的 次级中子双微分截面测量

祁步嘉 唐洪庆 周祖英 周陈维 柯尊建 孙振强 沈冠仁 夏海鸿

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京, 102413)

8~13 MeV 中子能区次级中子双微分截面的测量数据至今很少。联合使用中国原子能科学研究院建成的常规多探测器快中子飞行时间谱仪和相继创建的非常规快中子飞行时间谱仪进行了10 MeV 中子对 ^{238}U 、 ^{209}Bi 和Fe的次级中子双微分截面的测量, 并将测量结果和理论计算结果进行了比较。

关键词 双微分截面 次级中子 非常规飞行时间谱仪

中图法分类号 O571.55

次级中子双微分截面是核工程设计需要的重要核数据。预定在2025年建成的国际聚变实验堆(ITER)对一系列核的10 MeV 中子次级中子双微分截面提出了要求。目前, 在14 MeV附近, 因有很好的T(d, n)单能中子源, 实验测量数据较多^[1,2], 在8 MeV以下也有一些测量数据。但在8~13 MeV之间, 由于缺乏合适的单能中子源, 实验数据极少。至今只有美国的洛斯·阿拉莫斯国家实验室用加速氦的方法, 以H(t, n) ^3He 反应中子源测量过10 MeV 中子引起的次级中子双微分截面^[3,4], 发表了少量实验数据。对于常规中子源, 如D(d, n)和T(p, n)中子源, 单能中子能量高于8 MeV 将产生一群三体破裂中子, 这些破裂中子与样品作用后产生的次级中子叠加在由单能中子引起的次级中子能谱上, 致使次级中子能谱的低能段面目全非。得到纯净的由单能中子引起的次级中子能谱相当困难, 这是长期存在于8~13 MeV 中子能区次级中子双微分截面测量中的难题。

为了解决这一难题, 许多实验室进行了探索。这些探索可归纳为以下3个方面。

1) 采用脉冲白光中子源和解反冲质子谱的方法^[5]。Geel实验室采用了这种方法。中子源距样品很远(60 m), 白光中子源中9 MeV 以上的中子成分较少, 分别以9.6~11.7和11.7~13.8 MeV 作为入射中子能量间隔, 入射中子的能量分散相当大; 中子探测器与样品间的距离近至20 cm, 次级中子谱通过解反冲质子谱得到, 其能量分辨和数据精度相当差。

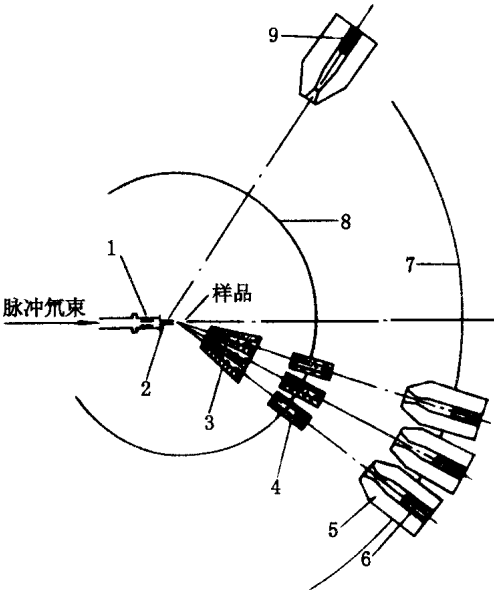
2) 寻找新的单能中子源。对重离子反应中子源, 如 ^{15}N (d, n)、H(^7Li , n)、 ^3He (^{12}C , n)和H(^{11}B , n)反应分别在TUNL^[6]、CAE和JAERI^[7]进行了研究。这些反应的中子源都不适于次级中子能谱的测量。

祁步嘉: 男, 59岁, 核物理专业, 副研究员

收稿日期: 1998-07-23 收到修改稿日期: 1998-10-26

3) 用 $^3\text{He}(d,n)$ 反应产生模拟D(d,n)反应的破裂中子谱。实验上先测出由该模拟中子谱产生的次级中子谱;再用Monte Carlo方法计算该次级中子谱,调整计算用的输入数据,使计算谱与实验测量谱比较相一致;最后再用Monte Carlo方法计算,扣除D(d,n)反应中破裂中子群对次级中子谱的贡献,得到次级中子双微分截面。PTB正在探索这种方法,目前还未见有结果发表。

为了解决这一难题,本工作研究采用一种新的测量方法^[8,9],即创建1台非常规快中子飞行时间谱仪,中子源到样品的距离为220 cm,样品到探测器的距离为70 cm,并对中子源前半球进行全屏蔽,以降低本底。这样,D(d,n) ^3He 反应中子源中单能中子和破裂中子在样品上引起的次级中子在飞行时间谱上完全分开,将破裂中子对次级中子能谱低能段(E_n 小于中子源中破裂中子最大能量 E_{max})测量的干扰消除。结合采用常规快中子飞行时间谱仪测量次级中子能谱高能段($E_n > E_{\text{max}}$),并将这两台飞行时间谱仪测量的次级中子能谱在重叠区归一缝合,给出整个谱区的次级中子双微分截面。



1 实验装置和方法

1.1 常规快中子飞行时间谱仪

常规快中子飞行时间谱仪的平面示意图示于图1^[10]。CAE的HF-13串列加速器提供脉冲化氘离子束。脉冲束的宽度小于1 ns,对于10 MeV中子,谱仪的总时间分辨约为1.6 ns,它包括脉冲束宽度、2 cm长的氘气体靶、样品、探测器及电子学线路对时间分辨的贡献。

氘气体靶是直径为1 cm、长2 cm的不锈钢气室,用7 μm厚的钼箔将它与加速器的真空系统隔开。气室用铂金衬里,用金片作束流阻止片。气室内充 3.6×10^5 Pa氘气。被测样品到氘气体靶中心的距离为20 cm,样品到中子探测器的距离约为600 cm。所用样品的几何大小及性质列于表1。用 $^{30}\text{n}_p$ 散射微分截面归一,得到次级中子双微分截面。

图1 常规多探测器快中子飞行时间谱仪
Fig 1 Nomal fast neutron TOF spectrometer
1——束流拾取筒;2——氘气体靶;3——准直器(1);
4——准直器(2);5——屏蔽体;6——中子探测器;
7——3 m 轨道;8——6 m 轨道;9——中子源监视器

表1 样品的几何形状及性质
Table 1 Properties of samples

样品	形状	尺寸/cm			浓缩度/%
		高	内径(孔)	外径	
^{238}U	中空圆柱形	3.0	1.0	3.0	99.3
^{209}Bi	中空圆柱形	3.0	1.0	3.0	100
Fe	中空圆柱形	4.0	1.0	3.0	天然
C	圆柱形	3.0		3.0	天然
$(\text{CH}_2)_n$	中空圆柱形	3.0	1.0	3.0	100

中子探测器由直径 10.5 cm、厚 5 cm 的 ST-451 液体闪烁体和光电倍增管 XP-2041 组成。引出两个信号: 线性信号, 用来设置探测器的下阈; 阳极信号, 既用作快定时信号, 又用作脉冲形状甄别(PSD)信号。CANBERRA 2160A 插件用以进行中子和 γ 射线的脉冲形状甄别。探测器的效率刻度在高压倍加器上用双闪烁探测器快中子飞行时间谱仪测量 n-p 散射微分截面的方法完成^[11], 同时用 Monte Carlo 程序进行了计算^[12], 二者符合得相当好, 并最后采用了 Monte Carlo 的计算结果。对 3 个中子主探测器之间的一致性进行了检验, 证明具有相当好的一致性。另一套单独的飞行时间谱仪作为中子源监测系统。

1.2 非常规快中子飞行时间谱仪

非常规快中子飞行时间谱仪平面图示于图 2。中子源到样品的距离和样品到中子探测器的距离分别为 220 和 70 cm。为了降低本底, 对子源的前半球进行了全屏蔽。屏蔽层的厚度为 145 cm, 其中, 铁 110 cm、石蜡 20 cm、铅 10 cm 和聚乙烯 5 cm。屏蔽体的中心为一矩型喇叭状中子准直孔。中子源中子被很好准直, 来自被测样品的次级中子由位于不同角度位置的 4 个中子探测器探测。为了说明该谱仪克服破裂中子干扰的原理, 示例计算在这样的几何条件下, 中子从中子源起飞到达探测器的时间, 即 D-d 反应的单能中子和破裂中子从中子源到样品的飞行时间及其在样品上产生的次级中子到探测器的飞行时间。计算结果列于表 2。

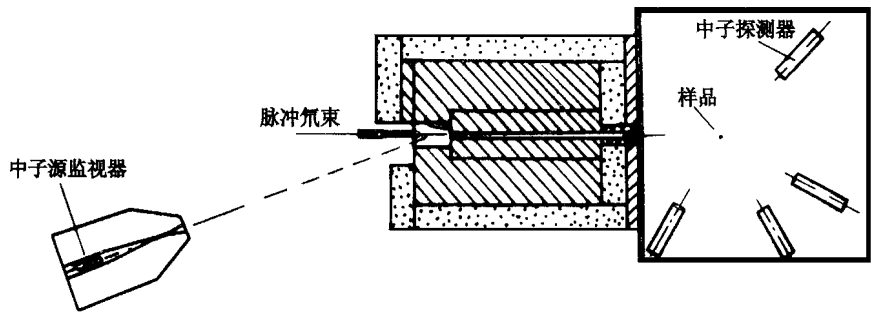


图 2 非常规快中子飞行时间谱仪

Fig. 2 Schematic diagram of the abnormal TOF spectrometer

□——石蜡+ 碳酸锂; ▨——铁; ▩——铅; ▤——聚乙烯

表 2 非常规谱仪中单能中子(10 MeV)及破裂中子
(中子最高能量 $E_n = 3.5 \text{ MeV}$) 的飞行时间

Table 2 Flight time of primary and secondary neutrons
induced by monoenergetic and break-up neutrons

初级中子		次级中子		总飞行时间/ns
E_n/MeV	飞行时间 t_1/ns	E_n/MeV	飞行时间 t_2/ns	
10	50.3	10	16.0	66.3
10	50.3	1.5	41.3	91.6
10	50.3	1.0	50.6	100.9
3.5	85.0	3.5	27.1	112.1

注: 中子源到样品的距离 $d_1 = 220 \text{ cm}$, 样品到探测器的距离 $d_2 = 70 \text{ cm}$

当探测器下阈取 1.5 MeV 时, 10 MeV 中子引起的最低能量的次级中子与破裂中子引起的最高能量的次级中子 (3.5 MeV) 飞越这样的距离后分开达 20.5 ns; 若中子探测器下阈取 1 MeV, 该时间仍可分开达 11.2 ns。因此, 10 MeV 中子与破裂中子引起的次级中子谱在飞行时间谱上完全得以分开。

图 3 给出了用非常规飞行时间谱仪在 45 测得的²³⁸U 样品上的次级中子飞行时间谱。由图 3 可以清楚看到破裂中子的干扰已完全排除, 测得了由中子源的单能中子引起的干净的次级中子飞行时间谱。双微分截面测量用 n-C 的微分截面作归一参考截面, 脉冲束信号拾取系统、氙气体靶、中子探测器及电子学系统和数据获取系统与常规飞行时间谱仪是相同的。

1.3 两谱仪结合使用^[9]

用常规飞行时间谱仪测量次级中子能谱的高能段 ($E_n > E_{\max}$, $E_{\max}$ 为破裂中子最高能量), 非常规飞行时间谱仪测量次级中子能谱的低能段 ($E_n < E_{\max}$), 将使两谱仪测得的结果在重叠部分归一缝合, 得到整个次级中子能谱。这样的测量结果能量分辨率好, 效应-本底比高, 破裂中子对次级中子能谱的干扰得以消除。图 4 示出测得的²³⁸U 次级中子双微分截面。图中阴影部分是中子源中破裂中子的贡献。

为了得到纯净的次级中子谱, 在每个角度对每个样品进行 4 轮测量: 1) 有靶气, 有样品; 2) 有靶气, 无样品; 3) 无靶气, 有样品; 4) 无靶气, 无样品。

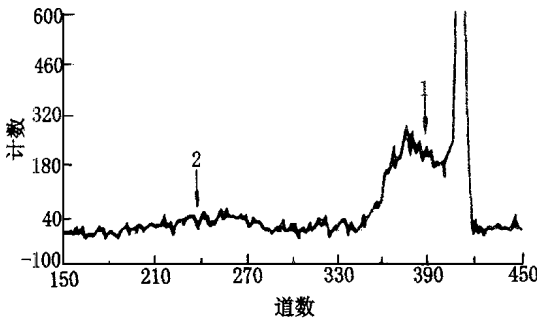


图 3 非常规谱仪测得的²³⁸U 的次级中子飞行时间谱

Fig 3 Secondary neutrons TOF spectrum of ²³⁸U at 10 MeV

1——单能中子引起的次级中子;
2——破裂中子引起的次级中子

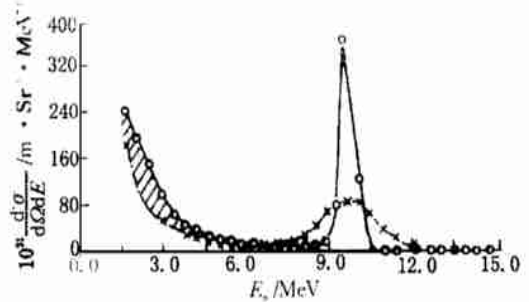


图 4 ²³⁸U 的次级中子双微分截面 ($E_n = 10$ MeV)

Fig 4 Double differential neutron emission spectra of ²³⁸U by 10 MeV neutron

○——常规快中子谱仪测得的次级中子双微分截面;
×——非常规快中子谱仪测得的次级中子双微分截面, 阴影部分为中子源中破裂中子的贡献

2 结果

图 5~7 示出了 10 MeV 中子引起的²³⁸U、²⁰⁹Bi 和 10.1 MeV 中子引起的 Fe 的次级中子双微分截面的测量结果。²³⁸U、²⁰⁹Bi 和 Fe 的数据已用 Monte Carlo 方法进行了中子注量衰减、多次散射和有限几何的修正。图 5、6、7 中的实线是用半经典多步过程的理论计算结果^[13]。从图可看出: 计算结果与²⁰⁹Bi 和 Fe 的测量数据符合较好。对²³⁸U 的计算已考虑了裂变机制。至今尚未看到国际上其它实验室有关 10 MeV 能点的²³⁸U、²⁰⁹Bi 和 Fe 的次级中子双微分截面数据的报道。实验测量误差的主要来源列在表 3 中。

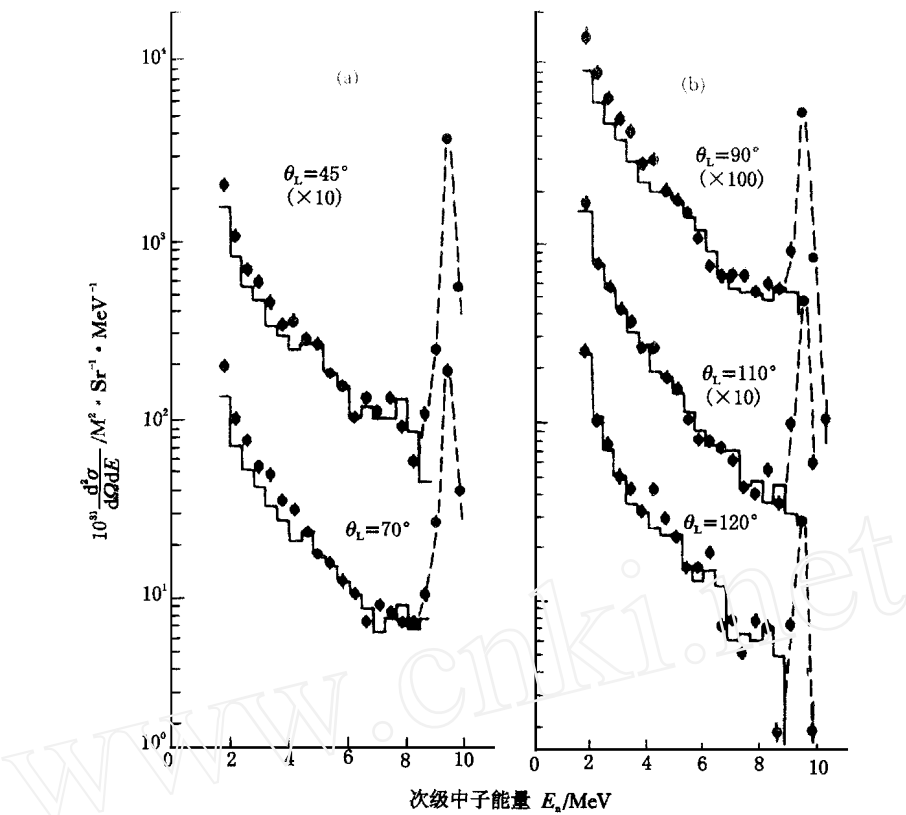


图 5 ²³⁸U 的次级中子双微分截面 ($E_n = 10\text{ MeV}$)

Fig 5 Double differential neutron cross sections of ²³⁸U at 10 MeV

(a) — $\theta_L = 45^\circ, 70^\circ$; (b) — $\theta_L = 90^\circ, 110^\circ, 120^\circ$

● —— 实验数据; 实线 —— 理论计算

表 3 误差及其来源

误差来源	误差/%
计数统计及本底扣除	2.5~ 9 ($E_n \geq 3\text{ MeV}$)
	2.5~ 6 ($E_n < 3\text{ MeV}$)
参考归一截面	2 (对 n-p)
	5 (对 n-C)
探测器效率	3 ($E_n \geq 3\text{ MeV}$)
	3~ 5 ($E_n < 3\text{ MeV}$)
Monte Carlo 修正	1~ 3
探测器间的一致性	< 2
总误差	4.9~ 10

误差主要来自计数的统计误差、中子探测器效率刻度误差和参考归一截面的 n-p 和 n-C 弹性散射微分截面误差。

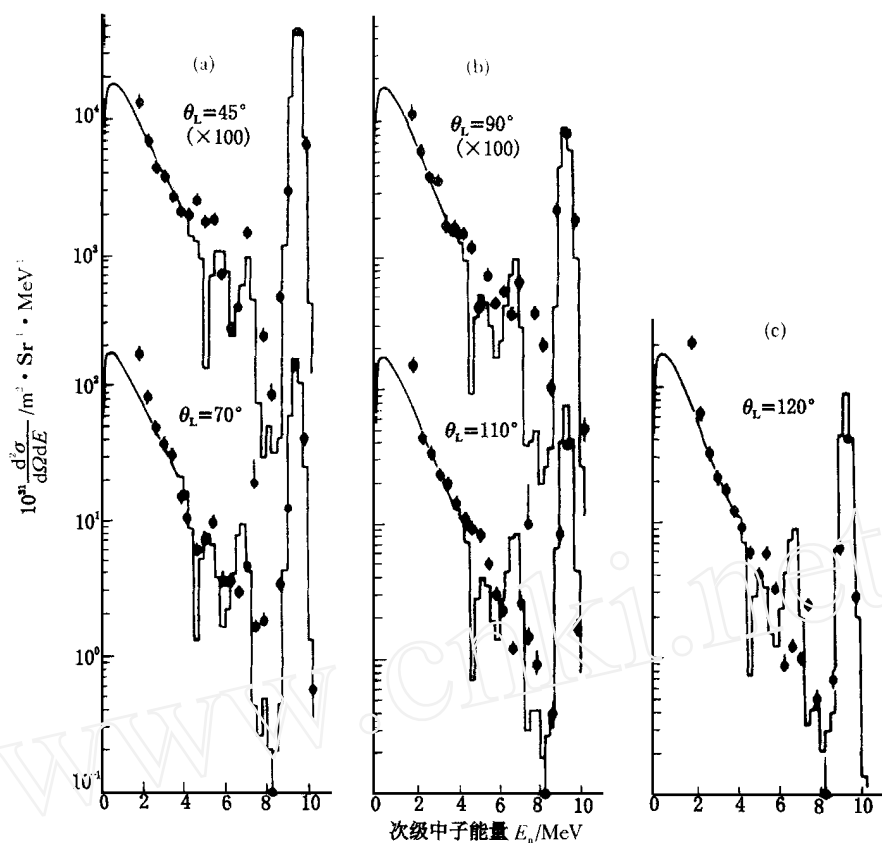


图6 ^{209}Bi 的次级中子双微分截面 ($E_n = 10 \text{ MeV}$)

Fig 6 Double differential neutron cross sections of ^{209}Bi at 10 MeV

(a) — $\theta_L = 45^\circ, 70^\circ$; (b) — $\theta_L = 90^\circ, 110^\circ$; (c) — $\theta_L = 120^\circ$

● — 实验数据; 实线 — 理论计算

3 讨论

用常规飞行时间谱仪和非常规飞行时间谱仪相结合的办法, 成功地解决了用常规中子源测量 8~13 MeV 能区次级中子双微分截面的难题, 消除了源破裂中子对次级中子能谱测量的干扰。

常规谱仪对 10 MeV 中子的能量分辨约为 2.4%, 非常规谱仪对 4 MeV 中子约为 12%, 对 1 MeV 中子约为 6%。非常规谱仪中子源前半球是全屏蔽的, 较易增加中子探测器以缩短测量时间。次级中子能谱下阈目前可达 1 MeV, 若改变中子源与样品间的距离至 270 cm, 样品与中子探测器间的距离仍为 70 cm, 则次级中子能谱的下阈可降至 0.7 MeV, 但计数率相应降低约 30%。这时, 中子探测器应具有更好的 n- γ 分辨能力。

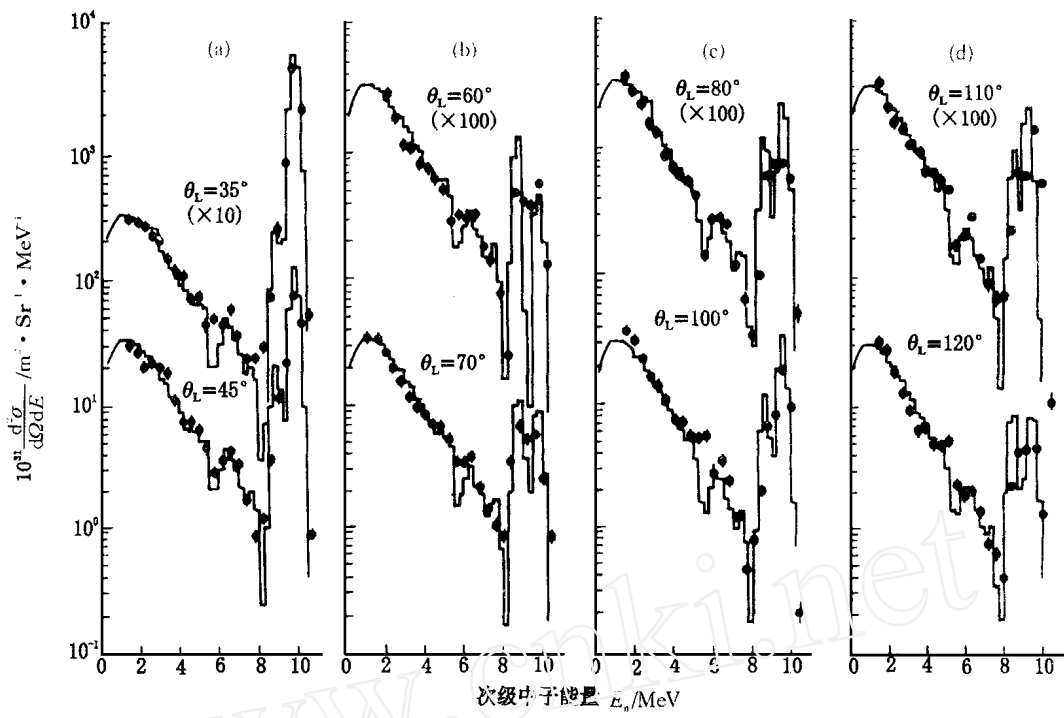


图 7 Fe 的次级中子双微分截面 ($E_n = 10.1 \text{ MeV}$)

Fig 7 Double differential neutron cross sections of Fe at 10.1 MeV

(a) — $\theta_L = 35^\circ; 45^\circ$ (b) — $\theta_L = 60^\circ; 70^\circ$ (c) — $\theta_L = 80^\circ; 100^\circ$ (d) — $\theta_L = 110^\circ; 120^\circ$
● — 实验数据; 实线 — 理论数据

衷心感谢张竞上先生提供了理论计算程序和凌玉德先生提供了Monte Carlo 修正计算, 对串列加速器组提供的良好束流条件表示衷心感谢。

参 考 文 献

1 Takahashi A. Measurement of Double Differential Neutron Emission Cross Sections at 14 MeV. In: Sun Zuxun, Tang Hongqing, eds Proceedings of Beijing International Symposium on Fast Neutron Physics Beijing International Symposium on Fast Neutron Physics, Beijing, China 1991. Singapore: World Scientific, 1991: 3

2 Baba M, Ishikawa M, Kikuchi T, et al Double Differential Neutron Scattering Cross Sections of Beryllium, Carbon, Oxygen In: Igarasi S, ed Proceedings of International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. International Conference on Nuclear Data for Science and Technology. Mito, Japan 1988 Tokyo: Saikon Publishing Co Ltd, 1988: 209

3 Drake DM, Auchampaugh GF, Arthur ED, et al Double Differential Beryllium Neutron Cross Sections at Incident Neutron Energies of 5.9, 10.1 and 14.2 MeV. Nuclear Science and Engineering, 1997, 63: 401

4 Drosg M, Lisowski PW, Hardekopf RA, et al Double Differential Neutron Emission Cross Sections of



- ^{10}B and ^{11}B at 6, 10, 14 MeV and of ^6Li , ^7Li and ^{12}C at 14 MeV. *Radiation Effect*, 1986, 92: 145
- 5 Dekempeneer E, Liskien H, Mewissen L, et al Double Differential Neutron Emission Cross Sections for ^7Li and Incident Neutrons Between 1.6 and 13.8 MeV. *Nuclear Science and Engineering*, 1987, 9: 353
- 6 Dave JH, Gould CR, Wender SA, et al The $^1\text{H}(^7\text{Li}, n)^7\text{Be}$ Reaction as an Intense MeV Neutron Source *Nucl Instrum Method*, 1982, 200: 605
- 7 Chiba S, Sugimoto M, Ikeda Y, et al Study of Fast Neutron Cross Sections at JAERI Tandem Accelerator. In: Sun Zuxun, Tang Hongqing, eds *Proceedings of Beijing International Symposium on Fast Neutron Physics* Beijing International Symposium on Fast Neutron Physics Beijing, China 1991. Singapore: World Scientific, 1991: 266
- 8 Qi Bujia, Tang Hongqing, Zhou Zuying, et al A New Approach to Solve the Problem of Source Break-up Neutron Interference in Secondary Neutron Spectrum Measurement *Chinese Journal of Nuclear Physics*, 1992, 14: 147
- 9 Tang Hongqing, Qi Bujia, Zhou Zuying, et al Measurement of Double Differential Cross Sections of Secondary Neutrons in the Incident Energy Range 9 to 13 MeV. In: Sun Zuxun, Tang Hongqing, eds *Proceedings of Beijing International Symposium on Fast Neutron Physics* Beijing International Symposium on Fast Neutron Physics Beijing, China 1991. Singapore: World Scientific, 1991: 32
- 10 撒 骏, 唐洪庆, 周祖英, 等 多探测器快中子飞行时间谱仪 *原子能科学技术*, 1992, 16(6): 1
- 11 沈冠仁, 撒 骏, 黄糖仔, 等 快中子探测器效率刻度 *原子能科学技术*, 1987, 21(1): 9
- 12 Dietze C, Klien H. Monte Carlo Codes for the Calculation of Neutron Response Functions and Detection Efficiencies for NE213 Scintillation Detectors: PTB-ND-22, 1982
- 13 Zhang Jingshang A Semi-Classical Theory of Multi-step Nuclear Reaction Processes *Nuclear Science and Engineering*, 1993, 114: 55

NEUTRON DOUBLE DIFFERENTIAL CROSS SECTIONS OF ^{238}U , ^{209}Bi AND Fe AT 10 MeV

Qi Bujia Tang Hongqing Zhou Zuying Zhou Chenwei
Ke Zunjian Sun Zhengqiang Sheng Guanren Xia Haihong

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box, 275-46, Beijing, 102413)

ABSTRACT

Neutron double differential cross sections of ^{238}U , ^{209}Bi and Fe at 10 MeV are measured at 5 or 8 angles between 35° and 120° by means of both normal and abnormal TOF spectrometers using D(d, n) neutron source. The data of ^{238}U , ^{209}Bi and Fe are compared with theoretical calculations. A good agreement is achieved.

Key words Double differential cross section Break-up neutron Abnormal TOF spectrometer