

多探测器快中子飞行时间谱仪

撒 骏 唐洪庆 周祖英 隋庆长
祁步嘉 李仲芳 于春英 沈冠仁

(中国原子能科学研究院核物理所,北京市 275 信箱,102413)

描述了一台串列加速器 HI-13 上的多探测器快中子飞行时间谱仪,并与国际上同类谱仪进行了比较。本谱仪主要用于能量大于 8 MeV 的快中子散射实验、次级中子双微分截面及带电粒子引起的出射中子能谱的测量。简要介绍了谱仪各主要部分(包括零信号拾取筒、氩气体靶、探测器、电子学等)的结构和特性及其在快中子实验中的应用。

关键词 快中子飞行时间谱仪,微分截面。

一、引 言

在聚变堆和裂变-聚变混合堆的设计中,快中子能谱和截面是必不可少数据^[1]。在聚变反应堆中,次级中子及其能量分布在空间上的各向异性比裂变堆要大得多。在过去的十几年中对 14 MeV 中子在几十种元素上的双微分截面进行了测量^[2-6],但在 8—13 MeV 能区,这些数据还十分缺乏,这主要是因为缺少合适的单能中子源。尽管一些实验室^[7-10]先后建立了 8—13 MeV 中子飞行时间谱仪企图测量次级中子双微分截面,但是由于 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应(或 $T(p, n)^3\text{He}$ 反应)伴生的破裂中子干扰没有解决,直到目前此能区的次级中子双微分截面还几乎是空白。

一台多探测器快中子飞行时间谱仪已在我院 HI-13 串列式静电加速器上建成。本谱仪将用来测量 8 MeV 以上的中子散射角分布和次级中子双微分截面,以及对 (x, n) 反应(x 代表带电粒子)产生的连续中子发射谱进行研究。作为一个例子,对 11.6 MeV 中子在碳上弹性散射的微分截面作了讨论。其它的测量将在别的文章^[11,12]中介绍。

二、实验装置

多探测器快中子飞行时间谱仪有 3 种类型:加速器和多探测器都是固定不动的;加速器可动,多探测器是固定不动的;加速器固定,多探测器是可动的。本谱仪属于后一类。多探测器和屏蔽体系统可通过远距离控制开关来移动。

1. 一般性能

图 1 给出了快中子飞行时间谱仪的平面图。脉冲化的氩离子束是从端电压为 13 MV 的串

列加速器^[13]上得到的。能量大于 8 MeV 的中子由入射氘束打在氘气靶上通过 $D(d,n)^3He$ 反应产生。圆柱形样品放在角分布仪的中心。角分布仪由 1 组准直器、3 个屏蔽体、3 个径向车、1 个角度车及电路控制系统组成。样品到氘气靶之间的距离可变，一般为 10—20 cm。被样品散射的中子用彼此相隔 10° 的、放在屏蔽体内的 3 个探测器探测。此屏蔽的探测器系统可在半径为 6 m 的轨道上、在负 30° — 165° 的角度范围内转动。角度定位精度好于 0.1° 。中子的飞行路程可在 1.5 m 到 6.5 m 之间变化。若使用单个探测器，最短飞行路程为 1.5 m；若使用两个探测器，最短飞行路程为 4 m；若同时使用 3 个探测器，最短飞行距离约为 5 m，如有必要，最长可以延伸到 11m。

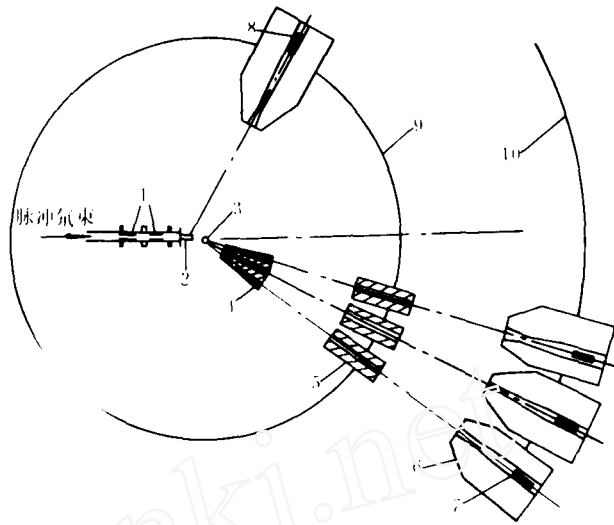


图 1 HI-13 串列加速器上的多探测器快中子飞行时间谱仪
Fig. 1 Multi-detector fast neutron TOF spectrometer at HI-13 tandem accelerator

1—拾取筒；2—氘气靶；3—样品；4—准直器(1)；5—准直器(1)；6—屏蔽体；7—中子探测器；8—中子源监视器；9—3 m 轨道；10—6 m 轨道。

靶上脉冲束的宽度小于 1 ns。对

于 10 MeV 中子 ($E_d = 7$ MeV)，谱仪总的时间分辨约为 1.6 ns。它包括脉冲束宽度、1.5 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。随着入射氘能量 (E_d) 的提高，时间分辨将变好。脉冲状态时，靶上的平均束流为 1—4 μA (重复频率为 4 MHz 时)，它与加速器的端电压值有关。

源中子注量由一个放在屏蔽体中的闪烁探测器组成的另一台飞行时间谱仪来监测。氘气靶到中子探测器的距离从 1.5 到 3.5 m 可变。

为了减小地面散射本底，在氘气靶下面有一个直径为 3 m、深度为 2.5 m 的地坑。

2. 脉冲束信号拾取系统

在快中子飞行时间技术中，精确确定中子飞行的起始和停止时刻是极其重要的。表征中子飞行起始时刻的信号是由脉冲束通过靶前圆筒时感应出来的，通常叫作拾取信号，用作时间-幅度转换器的停止脉冲。拾取信号的性能好坏取决于脉冲束的宽度、拾取筒的尺寸和快放大器系统。

脉冲束信号拾取系统示于图 2。我们知道，粒子脉冲束的几何长度为

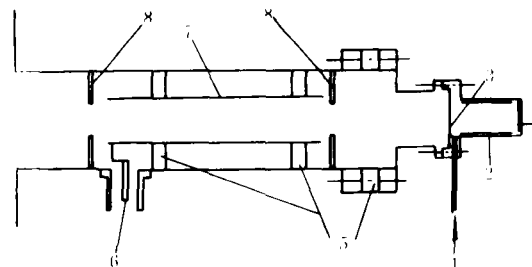


图 2 氘气靶和脉冲束拾取系统

Fig. 2 Deuterium gas target and pulsed beam pick off system

1—金束流阻止片；2—铂金衬；3—铝窗；4—氘气入口；5—绝缘体；6—束流拾取信号；7—拾取筒；8—铝光栏。

$$L = 1.383\tau \sqrt{E/M} \quad (\text{cm})$$

其中, E 是以 MeV 为单位的粒子能量, M 是以 amu 为单位的粒子质量数, τ 为以 ns 为单位的脉冲束宽度。

在圆筒上感应的电流脉冲的形状和大小与圆筒长度 l 有关: 当 $l > L$ 时, 脉冲形状为梯形; $l = L$ 时, 脉冲形状为三角形; $l < L$ 时, 脉冲也为梯形, 但幅度减小。在我们的情况下, 拾取筒长是 6 cm, 直径 $d = 1.2$ cm。对于各种能量的氘脉冲束, 均为 $l > L$, 即束流拾取信号的形状为梯形。拾取筒同轴地放在直径 $D = 2.8$ cm 的不锈钢管道内, 并与加速器管道绝缘。

假设脉冲平均束流 $I = 0.1 \mu\text{A}$, 脉冲束宽度 (FWHM) $\tau = 1$ ns, 周期 $T = 250$ ns, 那么, 峰值电流 $I_p = 0.025$ mA, 每个脉冲感应的电荷为 $Q = I_p \tau = 2.5 \times 10^{-14}$ C。拾取筒对地的分布电容 $C = 0.2416 l / \log(D/d) = 4.6$ pF, 在拾取筒上感应的信号峰值电压 $V = \frac{Q}{C} = 6$ mV。实际上, 考虑到快放大器的输入电容和其它分布电容, 感应的峰值电压要小于 6 mV。

为了得到高质量的拾取信号, 在感应筒前后分别同轴地装上了两个孔径为 0.8 cm 的光栏以减小拾取信号的上升和下降时间。拾取信号直接耦合到高输入阻抗的前置放大器, 其输出信号通过约 60 m 长的电缆送到一个放大倍数为 50 的快放大器, 然后经恒比定时甄别器。其输出就是所需的零定时信号, 作为时间-幅度转换器的停止脉冲。由于对快放大器系统进行了仔细的调试, 其输出脉冲有相当快的上升和下降时间 (均为 0.8 ns)。

3. 氘气体靶

氘气体靶是一个直径为 1 cm、长为 1.5 cm 的不锈钢气室。用 $5 \mu\text{m}$ 厚的铝箔将它与加速器的真空系统隔开。气室用铂金衬里, 用金作束阻止片。选择这两种材料是为了减小由于 (d, n) 反应产生的不希望的本底。气室内充 3.6×10^5 Pa 的氘气。氘气靶的结构图亦示于图 2 中。

为消除气室内表面的沾污, 在安装之前对气室的各部件需进行仔细清洗。而且在进行了一段时间实验后, 铝窗以及铂金和金等靶衬材料也要更换。这样可大大减小源中子的本底。

由 $\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 反应产生的 10 MeV ($E_d = 7$ MeV) 中子谱示于图 3。该谱已扣除了无氘气的本底。从图 3 可见, 在单能中子和裂变中子峰之间的本底很低, 而且是平的。然而, 如果将图 3 的纵坐标放大, $^{16}\text{O}(d, n)$ 反应产生的中子小峰就能看见, 小峰面积约占单能中子峰面积的 2%。为了改善中子源的性能, 纯化气靶中的氘气是必要的。

4. 中子探测器

主中子探测器由直径为 10.5 cm、厚 5 cm (或直径为 180 cm、厚为 5 cm) 的 ST-451 液体闪烁体和光电倍增管 XP2040 组成。管座上引出两个信号: 一个是线性信号, 它被用来设置探测器的下阈; 另一个是阳极快信

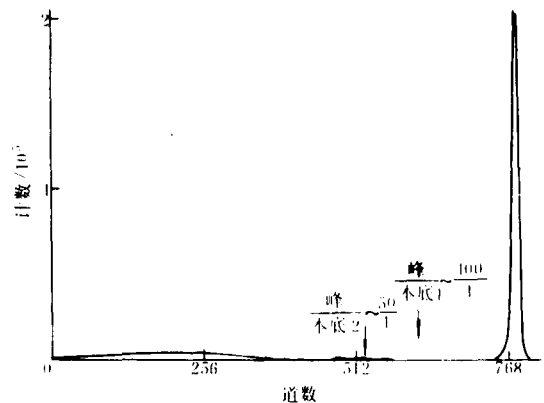


图 3 d+D 反应中子飞行时间谱
Fig. 3 Neutron TOF spectrum of $\text{D}(d, n)$ reaction
 $E_d = 7$ MeV, $\theta = 0^\circ$

号,它既被用作快定时信号(表征中子飞行终止了时刻,作为时间-幅度转换器的起始脉冲)又被用作脉冲形状甄别(PSD)信号。

CANBERRA model 2160A 插件被用来进行中子和 γ 射线的脉冲形状甄别。经过仔细调整,对于下阈为 120 keV 电子能量时,中子和 γ 射线的脉冲分布能清楚地分开,即能很好地排除 γ 射线本底而中子基本上不受损失。n- γ 分辨状态与探测器的工作电压关系较大。在我们的情况下,高压为 -2100 V 时,它有较好的分辨状态。而且 n- γ 分辨状态的好坏和稳定性对周围的环境温度十分敏感。为了得到稳定的好的 n- γ 分辨信号,需使插件能很好地散热并使之工作在恒定的温度之下。

探测器的效率是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^[14]来完成的。同时还用德国物理工程研究所(PTB)的 Monte-Carlo 程序^[15]进行了计算。二者符合得相当好,最后采用了 Monte-Carlo 的计算结果。图 4 给出的是阈值为 160 keV 电子能量的中子探测器的效率曲线。

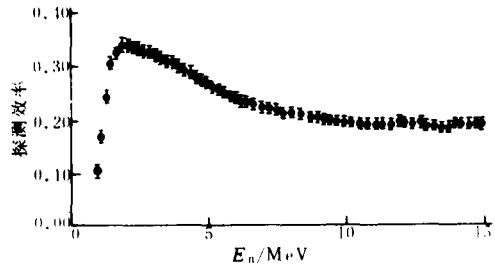


图 4 中子探测器的效率

Fig. 4 Neutron detector efficiency

5. 电 子 学

图 5 给出了由 3 个主中子探测器和 1 个监视探测器组成的飞行时间谱仪的电子学方块图。每个探测器有两个输出信号,即阳极信号和线性信号。

从 4 个探测器来的阳极信号和脉冲束的拾取信号经恒比定时甄别器后转换成逻辑信号。阳极的逻辑信号用作时间-幅度转换器(TAC)的起始信号。束流拾取的逻辑信号经扇出和延迟后用作时-幅转换器的停止信号。中子的飞行时间由起始信号和停止信号之间的时间差即 TAC 的输出脉冲幅度来确定。经过 n- γ 分辨甄别出的中子信号和阈上脉冲的选择,TAC 的输出经过线性门拉长器,由 VAX11/780 计算机数据获取系统进行记录。

靶上束流用 ORTEC439 数字电荷积分仪来测量。

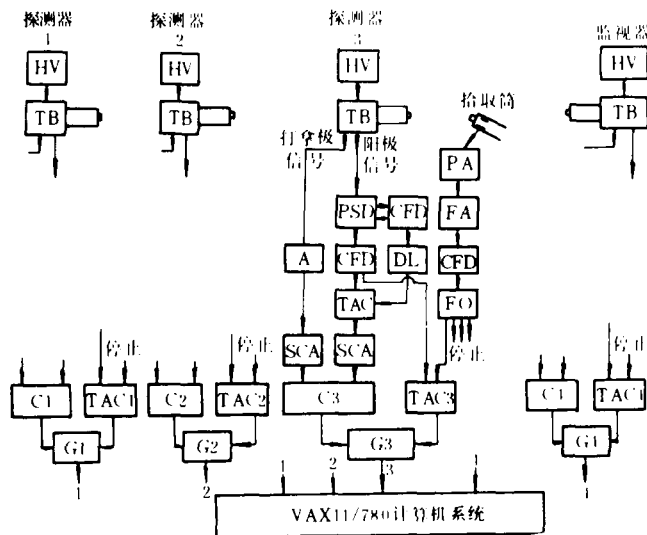


图 5 多路飞行时间系统的电子学方块图

Fig. 5 Electronics block diagram of the multi-detector TOF spectrometer

HV——高压电源;TB——光电倍增管座;A——放大器;PSD——脉冲形状甄别器;PA——前放;CFD——恒比定时甄别器;FA——快放大器;TAC——时幅转换器;DL——延迟线;SCA——定时单道;FO——扇出;C——符合;G——门。

6. 多探测器系统的一致性

采用两种方法对 3 个主中子探测器之间的一致性进行了检验。其一,将 Am-Be 中子源置于角分布仪的中心,并将 3 个探测器的线性阈都设置在相同的中子能量,记录各个探测器的中子计数。其二,将 3 个主探测器中的每一个分别放在同一角度(例如 30°),测量在相同监视计数下中子在碳上弹性散射计数。两种方法的测量结果均在统计误差范围内完全一致。这表明,3 个探测器具有相当好的一致性。

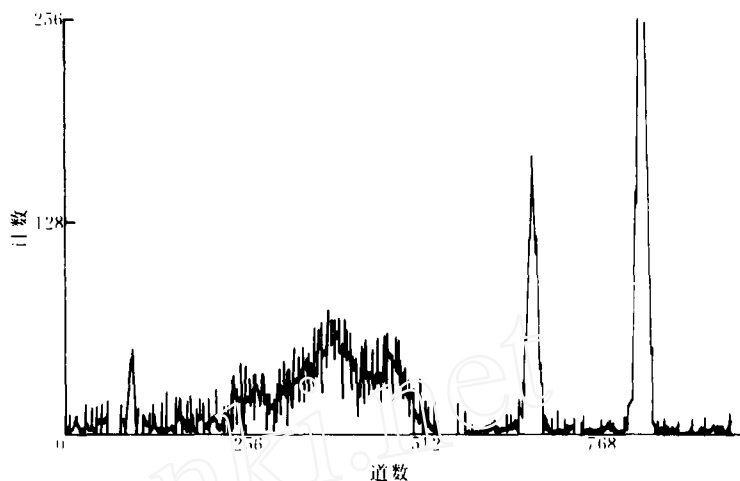


图 6 被 ^{12}C 散射的中子飞行时间谱

Fig. 6 TOF spectrum of 11.6 MeV neutron scattered by carbon

$$E_n = 11.6 \text{ MeV}, \theta = 40^\circ$$

三、11.6 MeV 中子在碳上的弹性散射微分截面

为了检验谱仪的性能,用该飞行时间谱仪对 11.6 MeV 中子在碳上弹性散射的微分截面进行了测量,测量角度范围从 20° — 160° 。11.6 MeV 中子由 $\text{D}(d,n)^3\text{He}$ 反应产生。散射样品是直径为 3 cm、高 3 cm 的圆柱形石墨。样品的轴线与角分布仪转动中心的轴线对准并与氦气体靶在同一水平面上。气靶到样品的距离为 17 cm。3 个探测器离样品的距离分别是 525、615 和 517 cm。在有样品和无样品条件下分别测量了中子飞行时间谱。图 6 所示的是散射中子的飞行时间谱。散射角为 40° ,探测器的阈为 0.85 MeV 中子能量。源中子注量用监视探

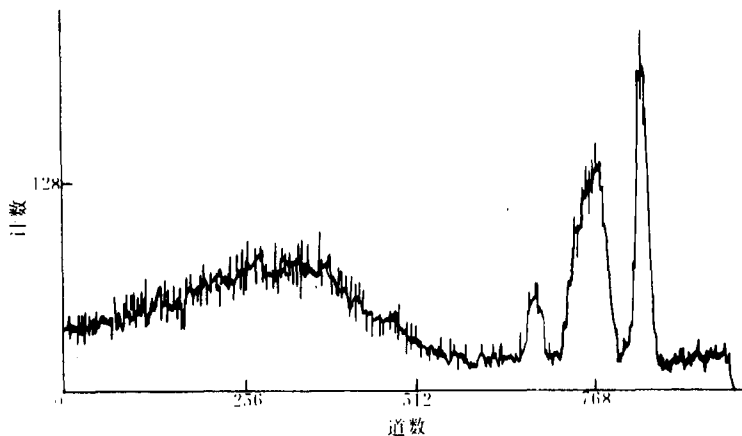


图 7 被聚乙烯散射的中子飞行时间谱

Fig. 7 TOF spectrum of 11.6 MeV neutrons scattered by polyethylene

$$E_n = 11.6 \text{ MeV}, \theta = 30^\circ$$

测器飞行时间系统监测,同时用电荷积分仪测量了靶上的束流。两个监视系统在误差范围内一致。

为了确定中子在碳上弹性散射角分布的绝对值(微分截面),在实验中还测量了中子在聚乙烯样品上的 n-p 散射在 30°角的计数。聚乙烯样品是一个内径为 1 cm、外径为 3 cm、高为 3 cm 的空心圆柱体。11.6 MeV 中子在聚乙烯样品上的散射中子在 30°角的飞行时间谱示于图 7。从图中可以看出, n-p 散射峰与碳上弹性和非弹性散射峰很干净地分开了。

入射中子能量为 E_0 , 在实验室系散射角 θ 处, 碳的散射中子的微分截面可从下式得到:

$$\frac{d\sigma(\theta, E)}{d\Omega} = \frac{Y_c(\theta)}{Y_p(\theta')} \cdot \frac{\epsilon_p(E_p)}{\epsilon_c(E_0)} \cdot \frac{N_p}{N_c} \cdot \sigma(\theta', E_0)$$

其中, $Y_c(\theta)$ 和 $Y_p(\theta')$ 分别是碳样品在 θ 角和聚乙烯样品在 θ' 角的监视器计数归一的散射中子计数; $\epsilon_p(\theta')$ 和 $\epsilon_c(\theta)$ 分别是对能量为 E_p 和 E_0 的中子的探测效率。 N_p 和 N_c 分别是聚乙烯样品中的氢核数和碳样品中的碳核数。 $\sigma_p(\theta', E_0)$ 是入射中子能量为 E_0 、在 θ' 角的 n-p 散射微分截面。

得到的微分截面已对中子在碳样品中和聚乙烯样品中的注量衰减和多次散射及有限几何效应应用 Monte-Carlo 方法进行了修正。修正中还考虑了氘气体靶的有限大小。

实验误差列于表 1。典型的总误差约为 5%—7%。

表 1 测量中子在 ^{12}C 上弹性散射微分截面的误差

Table 1 Errors in the measurement of elastic scattering differential cross sections of ^{12}C

	来 源	误差/%
相对误差	碳的弹性散射峰计数及本底扣除	1—4
	中子探测器的探测效率($3 < E_0 < 15 \text{ MeV}$) ($E_0 < 3 \text{ MeV}$)	3 3—8
	源中子监视器计数统计误差	1
	蒙特-卡罗修正(对碳样品)	1—3
绝对误差	n-p 散射峰的计数统计误差	2
	蒙特-卡罗修正(对聚乙烯样品)	1
	n-p 散射微分截面	1
总误差		5—9

图 8 给出了 11.6MeV 中子在碳上弹性散射的微分截面,为了比较两个较早的能量相近的测量也示于图中。这些数据很好地一致。

四、总 述

一个多探测器快中子飞行时间谱仪已在我院的 HI-13 串列加速器上建成。现有的多探测器快中子飞行时间装置及本谱仪的性能列于表 2。从表 2 可知,本谱仪具有好的时间分辨,宽

的测量角度范围、高的记录效率和好的效应本底比。这些性能在中子在碳上散射的实验中已表现出来。本谱仪主要将用于 8—40 MeV 能量范围内的次级中子双微分截面和散射中子角分布的测量(用 $D(d, n)^3\text{He}$ 反应可提供 9—29 MeV 的中子,用 $T(d, n)$ 和 $T(p, n)$ 反应可提供 22—40 MeV 和 7—25 MeV 的中子)。至今已用它测量了 10 MeV 中子与 ^{238}U 和 ^{209}Bi 作用的次级中子双微分截面以及 ^{59}Co 和 Mo 、 Sm 、 Ag 等同位素的 (p, n) 反应的中子能谱。这些测量将在别处^[4,5]报导。

本工作是在院、所各级领导的大力支持下和院内外许多单位(大连重型机械厂、本院服务社、工厂、电子学计算机组和加速器室等)共同协作下完成的。作者对他们的工作表示深切的感谢。作者对王大海、黄胜年、丁大钊和姜承烈等同志的许多有益的讨论表示感谢。李自强、于保生、沈根凤、温琛林和黄糖籽同志曾参加过部分工作,在此也深表谢意。

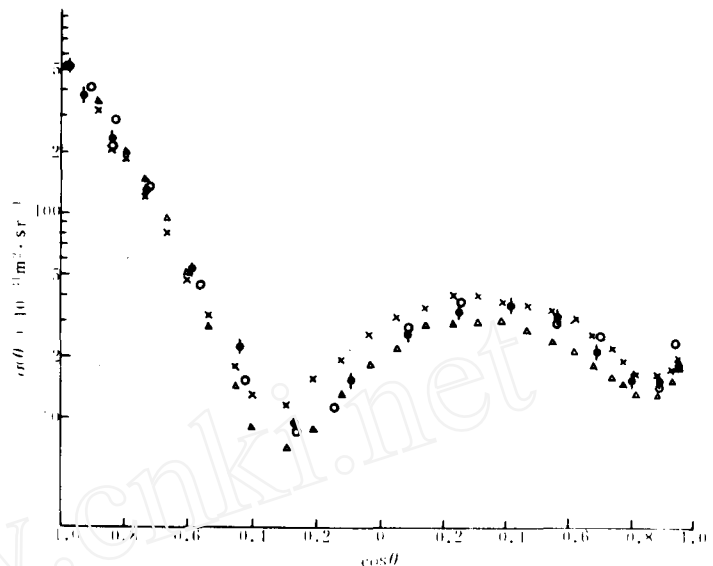


图 8 11.6 MeV 中子在 ^{12}C 上弹性散射的微分截面

Fig. 8 Differential cross sections of 11.6 MeV neutrons elastically scattered from ^{12}C

●——本工作;△——Purser^[16], 11.2 MeV; ×——Purser^[16], 11.79 MeV; ○——Haouat^[17], 11.5 MeV.

表 2 同类多探头飞行时间谱仪性能比较

Table 2 Comparison of the performances of existing multi-detector fast neutron TOF spectrometers

国别 和实验室	束流强度 / μA	脉冲宽度 /ns	飞行距离 /m	探测器		可测角度 范围/ $^\circ$	可达到的中子 能量/MeV
				数目	尺寸		
美国 TUNL	~3	1—2	4 或 6	1 1	$\phi 10 \times 5 \text{ cm}$	<160	8—15
法国 BRL	2.5	1—1.5	18	4	$\phi 10 \times 5 \text{ cm}$	<160	8—15
西德 PTB	1	1—1.5	10—30	5	$\phi 25 \times 5 \text{ cm}$	≤ 155	8—15
日本 JAERI	2—6	1.5—2.3	8	4	$\phi 20 \times 23 \text{ cm}$	≤ 130	≤ 50
中国 CIAE	1—3	1—1.5	6.5(11)	3	$\phi 18 \times 5 \text{ cm}$	≤ 165	≤ 40

参 考 文 献

- [1] WRENDA 87/88 INDC(sec)-095/URSF ed. Wang Dahai, IAEA, (1988).
- [2] Takahashi, A. et al., proc. of Inter. Conf. on Nucl. Data for Sci. & Tech., ed. S. Egarasi, Mito, Japan, 1988, p. 205; Proc. of Beijing Inter. Symp. on Fast Neutron phys., ed. Sun Zuxun, Tang Hongqing, Xu Jincheng and Zhang Jingshang, Beijing, China, 1991, p. 3.
- [3] Baba, M. et al., Proc. of Inter. Conf. on Nucl. Data for Sci. & Tech., ed. S. Igarasi, Mito, Japon, 1988, p. 209.
- [4] Stengl, G., Uhl, M and Vonach, H., *Nucl. phys. A* **290**,109(1977).
- [5] Gul, K. et al., *Nucl. Instrum. Methods*, B10/11, 401(1985).
- [6] Shen Guanren et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **86**,184(1984).
- [7] Glasgow D. W. et al., *Nucl. Instrum. Methods* **114**,521(1974). *Nucl. Sci. Eng.*, **41**,521(1976).
- [8] Haouat, G. et al., *Nucl. Sci. Eng.*, **65**, **331**(1978).
- [9] Böttger, R. et al., proc. of Inter. Conf. on Nucl. Data for Sci and Tech., Antwerp, Belgium, 6-10 sep. 1982, p. 836.
- [10] Chiba, S. et al., JAERI-M, 87025, p. 262.
- [11] Tang Hongqing, Qi Bujia, Zhou Zuying et al., proc. of Beijing Inter. Symp. on Fast Neutron phys., ed sun Zuxun, Tang Hongqing, Xu Jincheng and Zhang Jingshang, Beijing, China, 1991, p. 32
- [12] Zhou Zuying, Tang Hongqing, Sa Jun et al., INDC(NDS)-234(1990).
- [13] Tian yaming et al., *Nucl. Instrum. Methods*. A**244**,39(1986).
- [14] 沈冠仁等,原子能科学技术,**21**(8),39(1986).
- [15] Dietze, G. and Klein, H., PTB-Report ND-22, Braunschweig, Oct, 1982.
- [16] Purser, F. O., Glasgow. D. W. et al., Nucl Cross sections and Tech., proc. of a Conf., V **I**, Washington D. C., 1975 p. 866; *Nucl. Sci. and Eng.*, **81**,521(1976).
- [17] Haouat, G. et al., Nucl. Cross sections and Tech., proc. of a conf., V. **I**, Washington D. C., 1975, p. 889.

(编辑部收稿日期:1992年5月11日)

Multi-detector fast neutron time of flight spectrometer

Sa Jun Tang Hongqing Zhou Zuying Sui Qingchang
Qi Bujia Li Zhongfang Yu Chunying Shen Guanren

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

ABSTRACT

A multi-detector fast neutron time of flight spectrometer is built at HI-13 tandem accelerator and compared with existing ones. The spectrometer will be used for measurements of fast neutron scattering angular distributions and double differential cross sections of secondary neutrons as well as charged particle induced neutron emission spectrum study. Main parts of the spectrometer (including beam pick-off system, deuterium gas target, neutron detector and electronics) are described briefly. The performance of the spectrometer and some applications in fast neutron experiment are also depicted.

Key words Fast neutron time of flight spectrometer, Differential cross section.