

# 一个用于(中子,带电粒子)核反应 测量的多路望远镜系统\*

叶邦角 范扬眉 王忠民 韩荣典 梅文

虞孝麒 杨衍明 韩仁余 杜淮江

(中国科技大学近代物理系 合肥 230026)

肖振喜

(中国科技大学管理学院 北京 100080)

1993年6月8日收到

## 摘 要

设计了一个用于快中子引起的(中子,带电粒子)核反应双微分截面测量的多路望远镜系统。该系统由内外两个  $\Delta E$  多路正比室和一个中心能量探测器 CsI(Tl) 闪烁体组成。系统采用快慢三重符合,对所有信号进行筛选。建立了一套用于研究(中子、带电粒子)核反应电子学五参数获取系统。利用该系统,可以测量从  $30^\circ$ — $160^\circ$  的 16 个反应角,并可同时测量反应产物谱和本底谱。

**关键词** 多路望远镜,中子核反应,双微分截面。

## 1 引 言

由于(中子,带电粒子)核反应的截面与角分布的测量在核数据及核反应研究领域的重要地位,三十多年前人们就开始对该反应的截面进行实验测量和理论研究。但是由于实验上的两个特殊困难:①事件率非常少(反应截面都比较小, $\sigma$ 约1—100mb);②本底大,本底计数比事件计数有时要高3—6个数量级,因而实验测量非常困难,到目前为止,所得到的有用的测量结果还很少。

最近十多年来,一些国家的测量小组设计了一些新的探测系统<sup>[1-4]</sup>,在提高事件率与降低本底两方面迈出了新的一步。为了在我国开展这方面的研究,在参照国外的各种先进的探测技术的基础上,我们设计了一个用于快中子引起的(中子,带电粒子)核反应双微分截面测量的多路望远镜系统。

\* 国家自然科学基金和核工业总公司经费资助。

## 2 多路望远镜系统的设计

### 2.1 多路望远镜系统

我们设计的用于测量(中子, 带电粒子)核反应双微分截面的多路望远镜探测系统见图1。该探测系统由三部分组成: ①

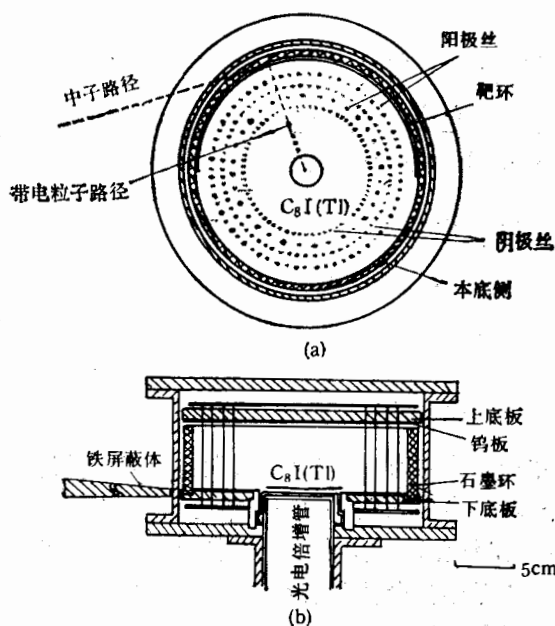


图1 多路望远镜结构 (a) 顶视图 (b) 侧视图

圆柱型多丝正比室, ②位于中心的能量探测器, ③真空、供气和气压稳定系统。圆柱型多丝正比室共有内外两层: 内层有16个正比室, 外层有32个正比室。在圆柱型多丝室中心底部安装有 CsI(Tl) 晶体, 作为能量探测器。整个系统在低气压下工作, 采用流气式的供气方式。从中子源发射的中子与靶发生(中子, 带电粒子)核反应, 产生的带电粒子穿过多丝室时, 损失一部分能量, 分别在相应位置的内外层丝上产生能量损失信号, 带电粒子最后终止在 CsI(Tl) 晶体中, 产生能量信号。

圆柱型多丝室由上、下底板(铝)构成, 两块上、下底板的内侧分别装有厚0.5mm的钨板, 钨的(n, p)和(n,  $\alpha$ )截面都很小, 可有效地减少本底。圆板上有四排圆孔, 圆孔内装有塑料绝缘子, 既作定位又作绝缘用。上、下底板外侧分别固定有一块圆形印刷电路板。布线时, 选用直径为50 $\mu$ m的镀金钨丝, 采用140g的张力焊接在印刷电路板上。阳极与阳极之间的镀金钨丝作为隔离丝; 工作时, 阴极丝、上下底板和隔离丝均加有同电位的负高压。

### 2.2 多路望远镜几何

中心能量探测器采用 CsI(Tl) 闪烁体, 其一是因为 Cs 和 I 的(n, p)和(n,  $\alpha$ )截面非常小; 其二是因为它有非常好的粒子脉冲形状分辨性能, 能区分光子、质子与  $\alpha$  粒子, 并且对质子的能量响应是线性的。CsI(Tl)晶体的直径约为25mm, 厚度约为1mm。根据文献[5]中的公式可算出能量为17MeV以下的质子其能量可全部沉积在晶体中。

用该系统测量带电粒子双微分截面时必须知道中心探测器对靶环所张的立体角, 中心探测器与靶环间的平均距离和反应角函数。全部采用 Monte-Carlo 模拟计算, 计算所选用的事例数为  $10^6$ 。CsI(Tl) 晶体对靶上不同的点所张的立体角是不同的, 对它们求平均即可得到平均立体角; 计算得到的平均立体角为  $14.7 \pm 0.3$ msr。CsI(Tl) 晶体与靶环的平均距离可用

CsI(Tl) 上任一点与靶上任一点之间的距离求平均得到。利用该距离可以计算带电粒子在多丝室中的能量损失,对能量进行修正。计算得到其平均距离为  $97.1 \pm 0.2\text{mm}$ 。

由于每个阳极丝对应的靶有一定的几何尺寸,中心探测器也有一定的面积,因而每个望远镜所探测到的从靶射出的带电粒子并非只在一个角度,而是有一个分布。可以用反应角函数的概念来描述,反应角函数就是在每个望远镜内反应角的分布。计算结果见图 2,从第一个望远镜的反应角  $33^\circ$  变化到第十六个望远镜的反应角  $159^\circ$ ,除了头两个望远镜的角分辨为  $18.3^\circ$  和  $16.8^\circ$  外,其余角分辨(反应角函数的半高宽)大约为  $11.5^\circ$ — $15^\circ$ 。

### 2.3 中子通量沿靶环的分布

由于室内不同的靶区离中子源的距离与角度都不同,所以必须对靶环上的中子通量进行刻度。我们采用伴随粒子法与活化法相结合的方法测量。采用铝作为活化材料,活化片覆盖 32 路多丝室对应的靶区。用倍加器产生的中子辐照十几小时后,把铝环按不同的多丝室剪成 32 片,测量各片  $\gamma$  活性相对标准点的相对强度,最后用伴随粒子法可以得到绝对中子积分通量。

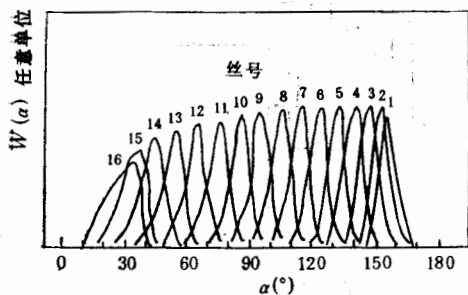


图 2 望远镜系统反应角函数

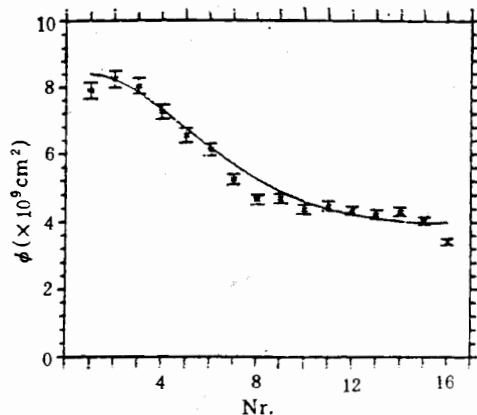


图 3 中子通量沿靶环分布的刻度曲线  
x Exp. — Cal.

图 3 是相应的中子通量沿靶环分布的刻度曲线。图中的实线所对应的曲线是把中子源当作各向同性点源,考虑到中子在铝外壳和石墨靶环中衰减而作的曲线。可以看出,最近和最远的四个靶区的中子通量偏离曲线较大,这是由于铁屏蔽体挡住了部分中子。中间  $90^\circ$  部分偏差是由于中子在外壳上散射造成。

## 3 在线五参数采集和记录系统

电子学系统包括电子学信号读出电路和 CAMAC 数据采集电路。图 4 是电子学示意框图。

### 3.1 实验数据的选取

我们知道,在快中子引起的(中子,带电粒子)双微分截面测量实验中,最大的困难是

本底计数高。在硬件上我们采用下述的内外多路正比室和中心探测器信号的三重符合来删除一部分本底。

内层多路正比室信号经快放大后,输入到快符合电路中与 CsI(Tl) 探测器输出的信号进行快符合;输出的快符合信号有两种,一种是总快符合信号,另一种是各路快符合信号(8路)。总快符合信号与 PSD 信号符合产生慢符合信号,作为五参数进入 ADC 的选通信号。8路快符合信号有两个作用:一是输入到对应的8路线性门中,作为线性门的开门信号;二是输入到地址编码电路中,作为各路地址编码的选通信号。因为外层丝  $\Delta E$  信号计数率很高,又是4路相加后输入到线性门,因此很容易造成脉冲堆积。经快符合选通后,既删除了一部分本底计数,又减轻了后面8路信号相加对高计数率的负担。

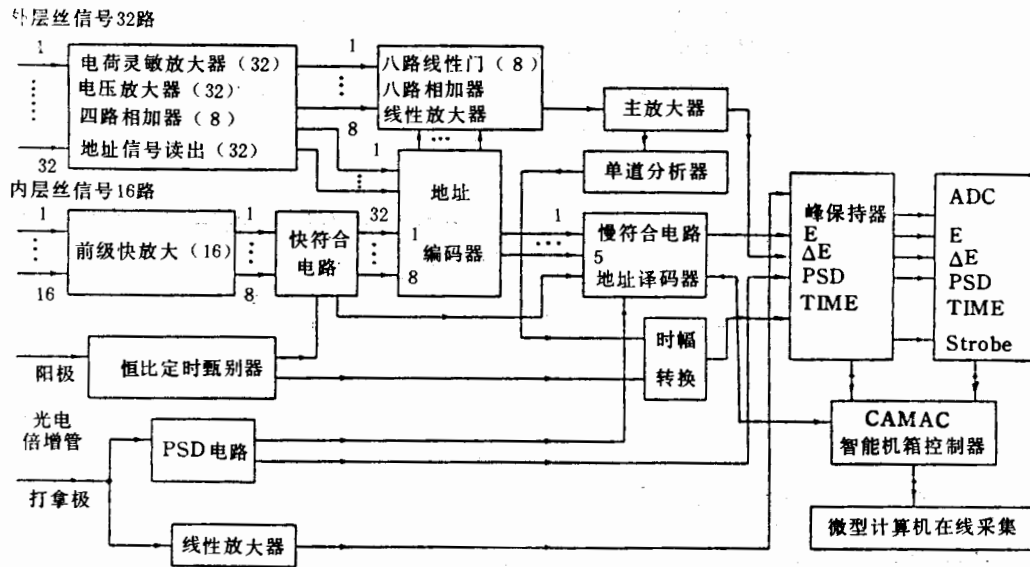


图4 在线五参数采集和记录系统示意框图

### 3.2 在线五参数获取

带电粒子在外层丝上产生的信号就作为  $\Delta E$  信号。该  $\Delta E$  信号首先经过电荷灵敏放大、电压放大和4路相加放大<sup>[6]</sup>,使信号数目从32路变为8路。这8路信号输入到8路线性门中,线性门的开门信号来自于对应的内层丝信号与中心探测器的符合信号。线性门的作用是在于32路信号相加后不致于产生严重的脉冲堆积。经线性门选通后的8路  $\Delta E$  信号相加成一路经主线性放大器进行滤波成形。

带电粒子穿过丝室给出的能损信号经过编码电路记下粒子所通过丝室的某一根阳极丝的丝位,由丝室的几何就可以算出出射粒子的反应角。32路输入编码信号输出32个状态,因而有五位表示状态的数据线。编码电路由快符合信号控制。为了保证编码信号与输入信号的一一对应,输出信号应与快符合信号同步,只有当符合有输出时编码信号才会被锁存。

我们选用 GDB50L 型光电倍增管,能量信号取自于光电倍增管的打拿极。脉冲形状 PSD 信号是利用不同粒子在 CsI(Tl) 闪烁体中的发光衰减时间的不同的性能来产生的。

所设计的脉冲形状分辨电路可分为三个部分<sup>[7]</sup>,即选通部分、过零定时部分和恒比定时部分。选通电路实际上起了过零甄别和恒比甄别中的预甄别作用。

带电粒子从靶飞行到中心探测器的飞行时间信号是这样产生的:从主放大输出的外层总  $\Delta E$  信号分成两路,其中一路经单道后输入到 TAC 的终止端作为停止信号。光电倍增管的阳极信号经恒比定时器后输出的 ECL 信号就作为 TAC 的起始信号。

### 3.3 实验数据存储

在(中子,带电粒子)反应的双微分截面测量实验中将要获取五个参数。其中,除地址编码外,其余四个参数均要经模拟-数字变换而得到。模-数变换是由 CAMAC 插件 ADC 完成的。

由于五信号到达 ADC 有一定的时间差(范围大约为  $\mu s$  量级),这样便无法由 ADC 同步变换。峰保持器的主要功能便是保证 ADC 能够同步地进行模-数变换。在通常情况下,峰保持器处于关闭状态,只有当 ADC 接收到外界加在 ADC 的 STROBE 输入端的一个触发信号时,峰保持器才同时打开接收输入信号。

实验中,我们采用分布式计算机数据获取系统。IBM-PC 作为主计算机,在实验过程中用于数据的在线分析;将带有微处理器的智能 CAMAC 机箱控制器作为前端处理机<sup>[8]</sup>,专门用于数据采集。读出的数据存放在 CAMAC 机箱控制器的缓冲区中,采集结束或缓冲区满时,主计算机从中读出数据并记录在磁盘上。

## 4 多路望远镜的性能测试

为了模拟在靶上的(中子,带电粒子)核反应所产生的带电粒子在多丝室中所产生的能量损失信号和在 CsI(Tl) 晶体中所产生的信号,我们采用 32 个强度较弱的  $^{241}\text{Am}$   $\alpha$  源

表 1 多路望远镜系统的性能测试结果

探测器	项 目	测 量 值	测 量 条 件
多丝正比室	气体放大倍数	1300	工作电压 -800V
	能量分辨率	15%	单根丝
		20%—22%	32 根丝相加
	时间分辨	200ns	底宽, 32 根丝相加
	探测效率	>99%	$^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 源
	最大允许中子通量	$1.8 \times 10^8/\text{s}$	CsI(Tl) 晶体与中子源的距离为 44cm
CsI(Tl) 闪烁体	能量分辨率	6%	$^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 源
		25%	质子
	PSD 分辨粒子	$M_{pa} > 0.7$	$^{241}\text{Am}$ $\alpha$ 粒子与等效质子能量 $E_p > 2\text{MeV}$
		$M_{pr} > 1.2$	等效质子能量 $E_p > 1\text{MeV}$ 的质子与 $\gamma$ 射线

( $2 \times 3\text{mm}^2$ ), 粘贴在石墨环上. 实验时, 我们采用的气体是 95% Ar + 5% CO<sub>2</sub>, 气压为 100mbar. 测试时, 质子由中子束轰击聚乙烯靶产生. 各项性能测量结果见表 1.

## 5 $^{93}\text{Nb}(n, xp)$ 核反应的微分截面测量

利用这套探测系统, 我们测量了  $^{93}\text{Nb}(n, xp)$  核反应的双微分截面, 得到了很好的结果.

我们采用靶厚为 0.8mm 的 Nb 作为靶材料, 纯度大于 99.997%, 尺寸是 289mm  $\times$  40mm, 弯曲成半径为 92mm 的半圆环粘贴在厚度为 7mm 的石墨环内径上. 另一边无靶, 用完全一样的石墨环放置在靶的位置上. 反应事例与本底的测量同时进行. 中子源离中心探测器的距离为 440.0mm. 屏蔽体用铁, 长度为 200mm.

实验测量约进行了 40h, 伴随  $\alpha$  粒子的总计数为  $12.02 \times 10^7$ ; 在测量进行到大约一半时间时, 我们把靶环与石墨环转动 180°, 正好两者互换了位置. 在测量过程中, 还要用定标器来监察各主要参数计数率的稳定性.

在获取的  $^{93}\text{Nb}(n, xp)$  核反应的五参数数据的基础上进行离线处理, 处理过程主要分

三步: 第一步对数据中的偶然本底进行删除, 用 PSD 鉴别  $\alpha, p, \gamma$  粒子, 删除不需要的  $\alpha$  和  $\gamma$ , 最后删除了反应的真本底; 第二步我们把厚靶数据转换成单位靶厚的数据; 第三步计算了双微分截面, 角度积分截面和总截面, 最后进行了误差分析.

所测  $^{93}\text{Nb}(n, xp)$  核反应的角分布与用 Kalbach-Mann 系统化公式计算的结果符合得很好, 在低能区角分布前倾不明显, 随着能量的增加, 角分布前倾明显; 由双微分截面得到的能谱见图 5, 与预平衡的激子模型计算结果符合得较好, 在高端我们的测量结果略大于其他小组结果. 由能谱计算可得到  $^{93}\text{Nb}(n, xp)$  核反应的总截面为

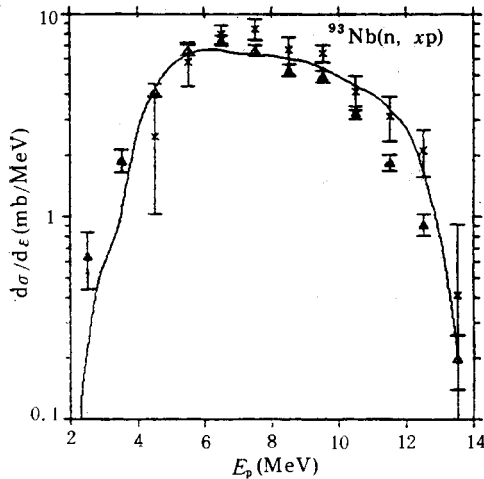


图 5  $^{93}\text{Nb}(n, xp)$  核反应的能谱

$47.7 \pm 3.0\text{mb}$ , 与预平衡理论计算结果及国际上另外几家的结果在误差范围内符合得较好.

## 6 结 论

本文所描述的多路望远镜系统, 可测量出射粒子能量为 3—18MeV 的质子与等效能量的  $\alpha$  粒子能谱与角分布; 测量的角度范围大 ( $30^\circ$ — $160^\circ$ ); 由于本底和反应产物谱同时测量, 提高了探测系统的使用率; 系统对本底排除比较有效, 特别是用 PSD 删除  $\gamma$  射线的性能很好. 由于采用厚靶, 能谱的低能端不甚理想, 需要进一步改进.

## 参 考 文 献

- [1] N. Koori et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **206** (1983)413.  
[2] W. R. McMurray et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **A288**, (1990)421.  
[3] C. Derndorfer et al., *Nucl. Instr. Meth.*, **187**, (1981)423.  
[4] S. M. Grimes, R.C.Haight, and J. D. Anderson, *Phys. Rev.*, **C17**, (1978) 508.  
[5] H. H. Anderson and J. F.Ziegler, "Hydrogen Stopping Powers and Ranges in All Elements" Vol.3.  
[6] 梅文等,核电子学与探测技术,**11**(1991)270.  
[7] 叶邦角等,核电子学与探测技术,一个 CsI(Tl) 探测器脉冲形状分辨 p, $\alpha$  和  $\gamma$  的电路,待发表.  
[8] 金革等,核电子学与探测技术,**11**(1991)146.

## A Multitelescope System for the Measurement of Differential (n, Charged Particle) Reaction Cross-sections

Ye Bangjiao Fan Yangmei Wang Zhongmin Han Rongdian

Mei Wen Yu Xiaoqi Yang Yanming Han Renyu Du Huaijiang

(Department of Modern Physics, Chinese University of Science and Technology, Hefei 230026)

Xiao Zhenxi

(Institute of Management, Chinese University of Science and Technology, Beijing 100080)

Received on June 8, 1993

### Abstract

A multitelescope system for measurement of double-differential cross-sections for the (neutron, charged particle) reactions is designed. The system consists of two  $\Delta E$  multiwire proportional chambers and a central CsI (Tl) energy detector. Fast-slow triple-coincidence was used to select all signals. An electronics system for acquiring five-parameters for the products from the (neutron, charged particle) reaction was established. The system allows simultaneous measurements of the energy spectra of charged particles at 16 reaction angles from  $30^\circ$ — $160^\circ$  and the background spectra.

**Key words** multitelescope system, neutron-induced reaction, the double-differential cross sections.