

文章编号: 1007-4627(2004)04-0400-04

轻核(n, x)反应微分截面的实验测量*

张国辉¹, 陈金象¹, 唐国有¹, 施兆民¹, 陈泽民²,
Yu. M. Gledenov³, M. Sedysheva³, G. Khuukhenkhoo³
(1 北京大学重离子物理研究所和重离子物理教育部重点实验室, 北京 100871;
2 清华大学物理系, 北京 100084;
3 Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia)

摘要: 对本课题组十几年来(n, x)反应实验研究工作进行了评述. 介绍了屏栅电离室的特点、构造与工作原理. 用屏栅电离室在北京大学 4.5 MV 静电加速器上测量了 1—7 MeV 中子⁶Li(n, t)⁴He 和¹⁰B(n, α)⁷Li 反应的微分截面与截面, 对实验结果进行了讨论.

关键词: 屏栅电离室; 轻核; (n, x)反应; 微分截面

中图分类号: O571.42⁺¹ **文献标识码:** A

1 引言

快中子引起的出射带电粒子、核反应(即(n, x)反应)信息, 包括双微分截面、角分布与截面信息等, 对于评价裂变聚变堆结构材料的辐射损伤、核发热以及放射性核的形成等具有重要的应用价值. 由于实验信息的缺乏, 单靠目前的核反应理论不能给出准确的预言. 需要一定数量的准确的核反应测量信息才能确定理论中的相关参数, 并检验模型理论. 目前, 这方面的实验测量信息还很缺乏, 已有的实验数据主要集中在 14 MeV 附近, 且相互之间存在较大的分歧, 远远不能满足应用和理论方面的要求. 这些核反应的反应截面一般较小; 发生核反应的中子为次级束, 因此受到了中子源强度的限制; 另外, 要测量双微分截面又需要对不同角度或能量的出射粒子进行测量, 因此需要有足够多的计数; 带电粒子从样品中射出有能损, 样品厚度受到限制. 所有这一切使这类实验工作的难度很大.

1980 年以前, 能直接测量出射粒子能谱和角分布的方法是立体角望远镜方法. 其主要缺点是探测效率低、设备复杂和测量时间长. 1983 年, 欧洲 Geel 所 Knitter 等^[1]首先将屏栅电离室用于测量 300 keV 以下能区⁶Li(n, t)⁴He 反应的角分布. 从 1990 年起, 北京大学、清华大学、俄罗斯 Dubna 联

合核子所合作进行了中重核(n, α)反应角分布与截面测量工作. 10 多年间, 俄罗斯 Dubna 为我们设计加工了 3 个结构不同的屏栅电离室, 提供了昂贵的同位素样品材料, 并派专家和我们进行合作实验研究. 利用屏栅电离室以及我们自己研制的双参数数据获取系统, 在北京大学 4.5 MV 静电加速器上进行实验, 在 4—7 MeV 中子能量范围内对⁴⁰Ca, ³⁹K, ⁵⁴Fe, ⁵⁸Ni 和⁶⁴Zn 等核的(n, α)反应及⁴⁰Ca(n, p)反应进行了测量. 同时还进行了理论分析, 获得了一批结果^[2-12]. 实验结果被国际原子能机构(IAEA)收入中子测量数据库(EXFOR)中, 实验室代码为“BJG”. 几乎与我们同时, 日本东北大学的 Baba 等^[13-16]也开展了这方面的研究工作. 从 2000 年起, 我们将实验研究由中重核扩展到轻核, 将待测粒子由 α 粒子与质子扩展到氦, 在 1—7 MeV 中子能量范围内对⁶Li(n, t)⁴He 和¹⁰B(n, α)⁷Li 反应的微分截面与截面进行了测量^[17-19]. 本文将对屏栅电离室法的特点、构造、测量原理、测量条件和过程以及上述两个轻核反应的实验结果进行介绍.

2 探测器特点、原理与构造

屏栅电离室对带电粒子同时具有能量和角度分

收稿日期: 2004 - 08 - 26

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10275001); 教育部留学生回国人员科研启动基金资助项目; 中国核数据中心资助项目; 北京大学重离子物理教育部重点实验室开放课题

作者简介: 张国辉(1964—), 男(汉族), 河北海兴人, 副教授, 从事实验核物理研究; E-mail: guohuizhang@pku.edu.cn

辨能力,探测效率高(约100%),探测立体角大(接近 2π),改变工作气体压强和极板间距离可以对待测粒子种类有选择能力.电子型屏栅电离室的工作原理是,一定能量的带电粒子自粘附在阴极的样品内射出,在到达栅极之前被工作气体阻止,产生电子-离子对.电子穿过栅极到达阳极.在此过程中,产生的阳极与阴极脉冲幅度^[13]分别为

$$U_a = G_a \left(1 - \sigma \frac{\bar{X}}{d} \cos\theta\right), \quad (1)$$

$$U_c = G_c \left(1 - \frac{\bar{X}}{d} \cos\theta\right), \quad (2)$$

其中, G_a 和 G_c 与带电粒子的能量及放大器的放大倍数有关; d 为阴极到栅极的距离; θ 为出射方向与法线的夹角; σ 为栅极非屏蔽因子,由电离室的结构决定,本电离室的 $\sigma=0.0078$; \bar{X} 为从离子发出点到其电离密度重心的距离^[20].简单地说,屏栅电离室阳极脉冲幅度基本反映了带电粒子能量大小,而阴极脉冲幅度与能量有关的同时还与粒子的出射角度有关.对阳极和阴极信号进行符合测量,即可获得粒子的能量和角度信息.

采用的屏栅电离室为前后向背对背共阴极的双屏栅电离室^[7,17],其中样品转换器有5个靶位,不打开电离室即可方便地更换样品.第1与第2个靶位上的样品用来进行含本底的事件测量, ${}^6\text{LiF}$ 样品(靶位1)的厚度为 $150\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$ (后向无 ${}^6\text{LiF}$ 样品),两个 ${}^{10}\text{B}$ 样品(靶位2,前向和后向)的厚度分别为 186 和 $192\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$;第3个靶位上的钨本底片(前向,后向)用来测量本底;第4个靶位上的聚乙烯膜(前向)和 ${}^{238}\text{U}$ 样品(后向)用来刻度中子通量(采用n-p散射与 ${}^{238}\text{U}$ 裂变截面为标准截面);最后一个靶位上的混合 α 源(前向,后向)用来在实验前和实验中对电子学系统进行检测、能量刻度以及在阳极-阴极双维谱上确定 90° 线.

3 测量方案与测量过程

与中重核相比,轻核的(n, x)反应有两个特点.其一是有很强的热中子事件干扰;其二是余核较轻,因而有很强的反冲,特别是 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反应.所以在实验时应尽量避免热中子事件的干扰.我们在电离室外包了一层 $0.5\ \text{mm}$ 厚的镉以吸收热中子.对于 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应,采用在双屏栅电离

室内前向($0^\circ-90^\circ$)与后向($90^\circ-180^\circ$)各放置一个样品,同时进行测量的方案.而对于 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反应,由于余核具有很强的反冲,后向的快中子事件受到热中子事件的干扰,两者在能量上不能分开.因此我们采用高、低两种工作气压,分别测量前向氦事件与前向 α 事件,而不测量后向事件.前向 α 事件可以换算成后向的氦事件,因为在质心系中 α 与氦一一对应,方向相反.采用这种方案避开了后向热中子事件的干扰,但会使测量时间加倍.

在 $4.5\ \text{MV}$ 静电加速器上分别用固体氦靶 $\text{T}(p, n)$ 反应以及氦气体靶 $\text{D}(d, n)$ 反应产生 $1-4\ \text{MeV}$ 和 $4-7\ \text{MeV}$ 准单能中子.测量过程中同时采用 BF_3 长中子管和具有n- γ 分辨的NE213作相对中子监测.电离室阴极的中心距离靶头 $38\ \text{cm}$,极板的法线与束流成 0° 角.屏栅电离室采用 $\text{Kr}+2.73\text{CO}_2$ 为工作气体.气体的压强的选取要使待测量的离子被阻止在阴极与栅极之间.阳极、阴极、栅极的高压根据饱和条件和栅极非俘获条件确定.

在对每个能点进行测量时,先用混合 α 源对电子学系统进行调试,并进行能量刻度,再分别进行事件测量与本底测量,之后进行中子通量刻度.对 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应,各能点测量的有效束流时间约为 $50\ \text{h}$;而对于 ${}^6\text{Li}(n, \alpha)\text{T}$ 反应,各能点测量的有效束流时间约 $25\ \text{h}$.

4 测量结果与讨论

4.1 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应

图1为 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应在入射中子能量为 $1.85, 2.67, 3.67$ 和 $4.42\ \text{MeV}$ 时质心坐标系中氦的微分截面实验结果.其中前向 α 数据已经转换成后向的氦数据.前两个能点的测量结果与已有的实验数据进行了比较.由图(a)和(b)可见,已有数据间分歧很大,我们的测量结果误差较小.本工作对于确定 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应微分截面系统走向、澄清分歧有重要意义.由图(c)和(d)可见,在中子能量 $3.67\ \text{MeV}$,质心系中氦的微分截面接近 90° 对称,而到 $4.42\ \text{MeV}$ 则明显地前倾,这与中重核反应有很大不同.此前,尚无人在该能点附近得到微分截面数据.

由以上对角度的微分截面通过勒让得多项式拟合得到对角度积分的反应截面.图2给出了已有的

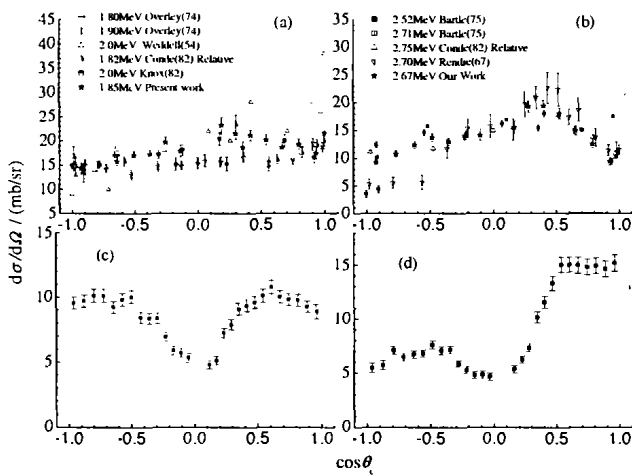


图 1 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应氦的质心系微分截面测量结果
 (a) $E_n = (1.85 \pm 0.05)$ MeV, (b) $E_n = (2.67 \pm 0.04)$ MeV,
 (c) $E_n = (3.67 \pm 0.20)$ MeV, (d) $E_n = (4.42 \pm 0.20)$ MeV.

各家实验与评价结果. 由图可见, 我们通过测量微分截面所得截面结果与 JENDL-3 以及 ENDF/B-VI 库的评价数据符合很好(上述核数据库中无微分截面数据). 另外, 在 2 MeV 以下, ENDF/B-VI 与 JENDL-3 库以及实验数据之间有很大分歧, 所以降低能量继续进行实验测量工作很有必要.

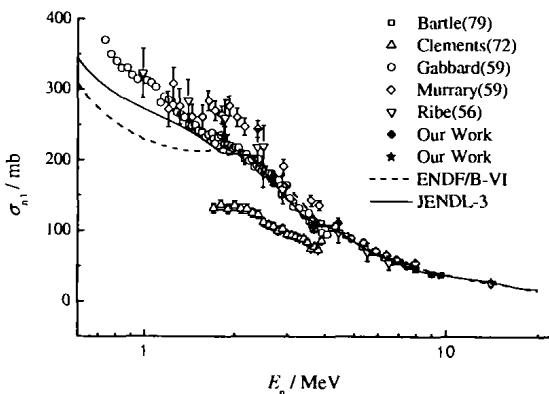


图 2 ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ 反应截面实验结果与其它结果的比较

4.2 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应

图 3 为 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应在入射中子能量为 4.17, 5.02, 5.74 和 6.52 MeV 时质心坐标系中 α 粒子的微分截面实验结果. 随着能量提高, 微分截面逐渐后倾. 在本实验之前, 该能区没有微分截面的实验测量数据.

由以上微分截面通过勒让得多项式拟合得到

${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应对角度积分的反应截面. 图 4 给出了我们的数据与已有的各家实验和评价结果的比较. 由图可见, 该反应截面目前只有三家测量值. 我们的测量结果与 Bichsel 等人的比较接近, 但要比 ENDFB/VI 以及 JENDL-3.2 库的评价值低得多, 而 Friesenhahn 等人的测量值比上述两库的评价值高出很多, 而且在两库的数据之间也存在很大差别. 所以, 有必要在该能区改进方法, 进一步进行实验测量, 以澄清分歧.

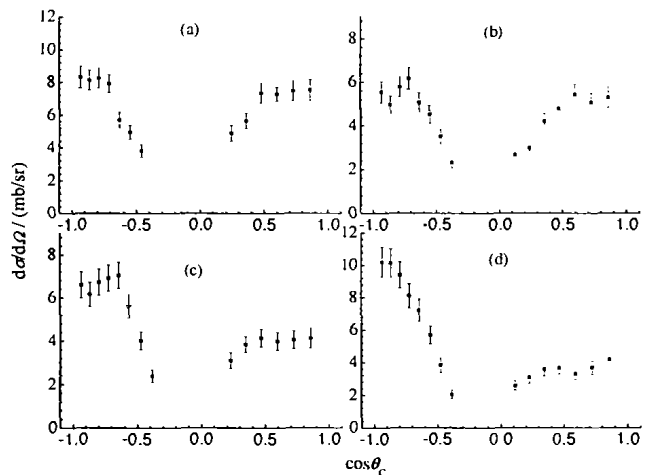


图 3 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应微分截面实验结果

(a) $E_n = (4.17 \pm 0.36)$ MeV, (b) $E_n = (5.02 \pm 0.27)$ MeV,
 (c) $E_n = (5.74 \pm 0.21)$ MeV, (d) $E_n = (6.52 \pm 0.16)$ MeV.

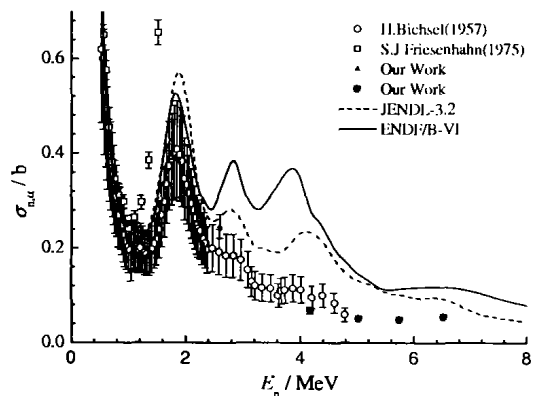


图 4 ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ 反应截面实验结果与其它结果的比较

致谢 感谢北京大学夏松江教授在研制与维护双参数数据获取系统中的工作; 作者多次与中国原子能科学研究院的韩洪银以及苏宗滦两位研究员进行讨论, 特此致谢.

参 考 文 献:

- [1] Knitter H-H, Budtz-Jørgensen C, Smith D L, *et al.* Nucl Sci and Eng, 1983, **83**: 229.
- [2] Fan Jihong, Chen Jinxiang, Tang Guoyou, *et al.* Communication of Nuclear Data Progress, 1995, **13**: 1.
- [3] Chen Yingtang, Chen Zemin, Qi Huiquan, *et al.* Chinese Journal of Nuclear Physics, 1995, **17**: 2 167.
- [4] Tang Guoyou, Fan Jihong, Chen Jinxiang, *et al.* Communication of Nuclear Data Progress, 1997, **17**: 1.
- [5] Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Jinxiang, *et al.* Communication of Nuclear Data Progress, 1998, **19**: 1.
- [6] Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Jinxiang, *et al.* Communication of Nuclear Data Progress, 1999, **21**: 11.
- [7] 陈泽民, 张雪梅, 陈迎棠等. 原子核物理评论, 1999, **16**(1): 31.
- [8] 张雪梅, 陈泽民, 梁伟等. 核技术, 1999, **22**(1): 11.
- [9] Zhang Xuemei, Chen Zemin, Chen Yingtang, *et al.* Nucl Sci and Eng, 2000, **134**: 1 89.
- [10] Zhang Xuemei, Chen Zemin, Chen Yingtang, *et al.* Phys Rev, 2000, **C61**: 054607 1.
- [11] Yuri Gledenov, Milana Sedysheva, Pavel Sedyshev, *et al.* Journal of Nucl Sci and Technology, 2002, **2** (Supplement): 342.
- [12] Yuan Jing, Chen Zemin, Zhang Guohui, *et al.* Nucl Sci and Eng, 2003, **144**: 1 108.
- [13] Ito N, Baba M, Matsuyama S, *et al.* Nucl Instr and Meth in Physics Research, 1994, **A337**: 474.
- [14] Baba M, Ito N, Hirakawa N, *et al.* Journal of Nuclear Sci and Technology, 1994, **31**: 7 745.
- [15] Sanami T, Baba M, Kawano T, *et al.* Journal of Nuclear Sci and Technology, 1998, **35**(12): 851.
- [16] Sanami T, Baba M, Saito K, *et al.* Nucl Instr and Meth in Physics Research, 2000, **A440**(2): 403.
- [17] Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Jinxiang, *et al.* Nucl Sci and Eng, 2000, **134**: 3 312.
- [18] Zhang Guohui, Tang Guoyou, Chen Jinxiang, *et al.* Nucl Sci and Eng, 2002, **142**: 2 203.
- [19] Zhang Guohui, Zhang Guohui, Tang Guoyou, *et al.* Nucl Sci and Eng, 2003, **143**: 1 86.
- [20] 张国辉, 唐国有, 施兆民等. 原子能科学技术, 1999, **33**(1): 50.

Differential Cross Section Measurement for (n, x) Reaction of Light Nuclei*

ZHANG Guo-hui¹, CHEN Jin-xiang¹, TANG Guo-you¹, SHI Zhao-min¹, CHEN Ze-min²,
Yu. M. Gledenov³, M. Sedysheva³, G. Khuukhenkhuu³

(1 *Institute of Heavy Ion Physics & MOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics,*
Peking University, Beijing 100871, China;

2 *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

3 *Joint Institute for Nuclear Research, Frank Laboratory of Neutron Physics, Dubna 141980, Russia)*

Abstract: Our research work on (n, x) reaction for more than one decade is reviewed. The characteristics, structure, and working principle of the gridded ionization chamber are discussed. Differential cross sections and cross sections of the ${}^6\text{Li}(n, t){}^4\text{He}$ and ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ reactions were measured in the neutron energy range of 1—7 MeV by using the GIC method. Experiments were carried out at the 4.5 MV Van de Graaff accelerator of Peking University. Results of the measurement are discussed.

Key words: gridded ionization chamber; light nuclei; (n, x) reaction; differential cross section