

与核能有关的中子数据和核反应研究

唐国有 陈金象 施兆民

(北京大学重离子物理研究所 北京 100871)

摘 要 介绍开展中子核反应研究和数据测量的重要性, 并扼要介绍了在北京大学重离子物理研究所 4.5MV 静电加速器单色中子源上开展的中子实验工作.

关键词 中子核反应 核数据测量 核数据评价

1 引 言

中子核反应研究已经直接进入到了为发展核能所需要的阶段, 在实际应用中, 又对过去已建立的理论提出了新的问题. 例如, 随着聚变能的利用接近工程阶段, 以及聚变装置的小型化, 过去所发表的一些有关的中子核反应信息, 从精度和类型上已不能满足需要. 因此, 必须从实验上发展新的测量技术, 提高测量精度, 获取新的实验信息. 而新的实验信息, 又要求更完善和更精确的理论解释, 从而不断推进中子核反应理论的发展.

正是因为上述原因, 实验和理论上对中子核反应过程的研究, 仍然受到普遍重视, 国际原子能机构为此组织了专门的协调研究项目 CRP (Coordinated Research Program), 主要内容包括: 快中子引起的长寿命核素的反应截面测量、次级中子双微分截面测量及聚变堆结构材料核的 (n, α) 反应截面测量和理论研究等. 在中国核工业总公司及中国核数据中心支持下, 根据全国“中子核反应数据测量和评价”协作网的总体规划, 与原子能研究院相互补充, 并发挥 4.5MV 静电加速器单色中子源能区特长, 开展了 4~7MeV 能区的中子核反应研究及中子数据测量和评价工作.

2 中子数据评价

中子数据评价是中国核数据中心为建立中国核数据库下达的任务. 十多年来, 先后完成了五个重点核(天然 Si、天然 Ca、天然

Mg、 ^{237}Np 和 ^{238}U) 的全套中子数据评价. 经专家鉴定后, 已被收入“中国核数据库(第二版)”. 其中 ^{238}U 的中子数据是直接影响快堆设计的重要数据. 我们在美国 ENDF/B6 和日本 JENDL-3 库的基础上, 对各反应道的截面数据重新进行了计算和推荐. 其中, 与他们数据的最大差别是总的非弹反应道截面^[1]. 经均匀快堆装置宏观基准检验表明^[2], 本所推荐的数据, 比美国 ENDF/B6 库和日本 JENDL-3 库的数据更符合测量值.

3 (n, p) 、 (n, α) 双微分截面测量

根据发展聚变堆的需要, 同时为进一步研究中子核反应机制, 对 (n, p) 、 (n, α) 双微分截面的实验研究显得越来越重要, 过去十几年, “多重望远镜”等法多适用于在 14.0MeV 强中子源上进行 (n, p) 、 (n, α) 研究工作. 在 4~7MeV 及大于 15.0MeV 中子能区的研究工作几乎是空白. 从 1990 年开始, 和俄国 Dubna 联合核子研究所、清华大学合作. 用“屏栅电离室法^[3]”, 在我所 4.5MV 静电加速器上, 在 4~7MeV 中子能区开展了这一领域的研究工作. 1992 年测出了 $^{40}\text{Ca}(n, \alpha)^{37}\text{Ar}$ 出射粒子的双微分截面^[4]. 这一研究结果证实了“屏栅电离室法”用于 4~7MeV 中子能区(弱中子源)研究 (n, p) 、 (n, α) 反应双微分截面的可行性.

铁、镍是聚变堆的主要结构材料之一, 而它们的 (n, α) 反应是造成聚变堆结构材料辐射损伤的主要来源之一. 但这方面的实验结

果很少. 工程所需要的 (n, α) 反应的数据, 主要来自于理论计算和评价者的推荐. 因此实验上测准总截面、角分布及双微分截面等对于评估计算值和推荐值是非常重要的. 目前, 日本东京大学的 M. Baba 等人正在开展这方面的测量. 近两年来, 本所选用了比 M. Baba 等人更薄的镍靶, 测量了中子能量为 5.0, 6.0, 7.0 MeV 的 $^{58}\text{Ni}(n, \alpha)$ 反应^[5]以及中子能量为 7 MeV 的 $^{56}\text{Fe}(n, \alpha)$ 反应出射粒子的双微分截面. 用中国核数据中心所提供的理论计算程序 UNF 进行了计算, 计算结果与实验符合较好, 为理论上进一步开展 (n, α) 反应机制的研究工作提供了新的信息.

4 中子活化截面的研究

中子活化截面对于反应堆和聚变堆的安全设计, 辐射防护及核测试是很重要的实验数据. 人们在这方面已做了不少工作, 但随着聚变堆设计的发展及核测试精度提高, 对数据的数量和精度提出了越来越高的要求, 故目前还在继续开展这方面的实验研究. 另一方面, 对于中子活化截面, 目前虽然可用一些核反应模型进行理论解释, 但是现有理论对 (n, α) 、 (n, t) 截面的计算值一般要比实验结果偏低. 因此这方面的研究对于发展核反应模型也是有意义的.

本所 4.5 MV 静电加速器具有能产生低于 7 MeV 和高于 14 MeV 单色中子的特长, 配备有宽敞的中子大厅($12 \times 7 \times 7 \text{m}^3$), 大厅的本底较小. 从 1993 年静电加速器试运行开始, 在提高加速器性能和指标的同时, 选用了一些与剂量数据有关的重要核反应(如 $^{64}\text{Zn}(n, p)$ 、 $^{64}\text{Zn}(n, \gamma)$ 、 $^{58}\text{Ni}(n, p)$ 等)进行了测量^[6], 为填补数据空白和澄清分歧起到了很好的作用.

结合实验数据的处理, 开展了用协方差分析测量数据的研究^[7], 编制了包括平衡前发射的统计模型计算核反应截面的程序 HFTT. 该程序输入参数少, 使用方便. 通过

对多个核的计算表明^[8], 具有广泛的应用价值. 已被收录入中国核数据中心程序库, 并被 IAEA 的 NAE Data Bank 收录.

5 次级中子能谱和双微分截面实验准备进展

中子能谱和次级中子双微分截面的数据是聚变堆装置所需要的. 目前在 14 MeV 中子能区, 不少实验室测量了次级中子的双微分截面. 在 7 MeV 以下中子能区, 开展工作的只有三家: 日本 Tohoku 大学, 美国 Ohio 大学和 Los Alamos 实验室. 本所筹备和进行 DDX 测量工作, 侧重在 7 MeV 以下能区. 双微分截面的测量中考虑的重要问题是能量分辨和数据精度, 它们能达到的水平主要取决于实验设备的水平. 主要包括加速器和飞行时间谱仪, 同时也和实验测量方法, 实验细节考虑是否周详有关. 为此, 注重了下列方面的工作.

1) 脉冲中子源的建立 加速器的束流脉冲化, 时间宽度约为 1.8 ns, 重复频率 3 MHz, 平均流强可大于 $1 \mu\text{A}$. 完成了脉冲束流的时间拾取系统, 氖气体靶和气体注入系统已经加工完毕, 正准备与加速器的脉冲化配合, 建立脉冲中子源.

2) 宽动态范围快中子飞行时间谱仪的建立 中子探测器由 ST451 液闪和 XP2040 光电倍增管组成, 监测器由 茛 晶体($\Phi 40 \times 25 \text{mm}$)和 RCA8575 组成. 中子探测器具有良好的时间分辨(70:1 动态范围, 625 ps)和能量分辨. 谱仪设置了两套高低阈的 $n-\gamma$ 分辨电路, 动态范围的组合可以超过 200:1. 一轮实验可得到两个阈值的时间谱. 由计算机控制的四通道分析器系统, 同时对主探测器, 监测器和 $n-\gamma$ 分辨进行获取和监测. 用微型流气式电离室作 ^{252}Cf 碎块探测器, 1.0 MeV 以上的中子, 时间分辨为 1.5 ns.

3) 中子探测器的效率曲线和有效中子阈的测定 这是测量能谱和双微分截面的基础

工作, 它直接影响到测量结果的精度. 用薄膜²⁵²Cf 源测量其标准的瞬发中子能谱, 求得六个阈值的中子探测效率曲线, 并与用 Monte-Carlo 计算结果相比较, 得到了满意的结果^[9]. 并用²⁵²Cf 连续中子谱直接标定中子探测器阈^[10]. 用系列 γ 源测量与 Monte-Carlo 计算探测器对 γ 康普顿电子谱分布相结合, 得到探测器的中子和电子能量的光产额数据, 为理论计算效率和使用提供可靠数据.

加速器脉冲化工作已初步完成, 目前正在实验测量.

参 考 文 献

- 1 Tang Guoyou, et al. CNDP, 1995, 13:86
- 2 Liu Guisheng. CNDP, 1995, 13:107
- 3 唐国有等. 核技术, 1994, 17(3):129
- 4 Tang Guoyou, et al. C. J. Nucl. Phys., 1993, 15(33):239
- 5 Tang Guoyou, et al. C. J. Nucl. Phys., 1995, 17(1):45
- 6 Shi Zhaomin. CNDP, 1994, 11:1
- 7 施兆民等. 核科学与工程, 1990, 10(3):239
- 8 黄斐增, 施兆民等. 北京大学学报(自然科学版), 1989, 25(3):289
- 9 陈金象等. 核电子学与探测技术, 1993, 13(6):323
- 10 陈金象等. 核电子学与探测技术, 1994, 14(3):124

Neutron Data Relative to Nuclear Energy and Neutron Reaction Research

Tang Guoyou Chen Jinxiang Shi Zhaomin

(*Institute of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract In this paper, the importance of nuclear reaction research and nuclear data measurement is illustrated, and the neutron experiments on the 4.5MV Van de Graaff accelerator, at Peking University are briefly introduced.

Key Words neutron-induced nuclear reaction nuclear data measurement nuclear data evaluation

(上接第 27 页)

corresponding superconducting cavity are introduced. The designing of the cavity geometry, analysing of the RF property of the Niobium as well as its mechanical quality are described. Special procedure of the cavity fabricating and its post processing are set. Experimentally, we got the gradient of 10MV/m and the quality factor of 10^9 at 2.5K.

Key Words superconducting cavity quality improvement of the Niobium quality factor accelerate gradient