

快中子物理和实验技术研究*

周宏余 范国英 汪新福 华 铭 张胜基 黄光顺 陈如意 颜一鸣

(北京师范大学低能核物理所 北京 100875)

摘 要 综述近年来在北师大低能所的国内第一台脉冲化高压倍加器上开展的快中子物理,及有关的实验和数据处理技术研究.

关键词 组合聚束 快中子核反应 γ 辐射能谱和截面 多普勒效应

分类号 O571

1 引 言

自从 1932 年查德威克发现中子以来,人们对中子物理学研究的兴趣历久不衰,至今国内外仍然有大量的核物理学家在这个领域中不息耕耘.这不仅因为中子是研究核反应和核结构的最有效的工具之一,而且因为正是中子物理学的有关知识开辟了人类应用原子能的新时代.现在人们预期在二十一世纪科学技术的最大进步将是聚变能成功地开发利用,从而将极大地解决人类的能源需求.而这项人类文明的里程碑式的工程需要更全面更精确的中子物理学知识的支持.

中子物理学发展到今天要取得任何一点微小的进步都必须有新思路新技术的发展相伴随.近年来,本课题组在国际原子能机构、国家自然科学基金会和中国核数据中心等机构的支持下,在中子物理、快中子实验测量和数据分析技术、中子源等方面做了一些研究,建立了一些新的设备,提出了一些新的方法,得到了一些新的结果.

2 组合聚束系统的研制

中子核反应的实验研究常常采用飞行时间方法以提高信号本底比.而实现飞行时间测量的一个重要条件是中子源必须脉冲化.

在 1980 年到 1985 年期间,与北京大学技术物理系合作建立了国内第一条高压倍加器脉冲线^[1,2].那时的脉冲线,是一个由两个互相垂直的平行板扫描电极构成的切割器和一个螺旋波导聚束腔组成的后聚束系统.它能给出重复频率 3.2 MHz 和时间分辨 1ns 的稳定脉冲中子束.利用这台设备已经完成了大量的 14 MeV 快中子核反应研究工作.然而这个后聚束系统的一个严重缺点,是它的束流利用率很低,只有 2%~3%,在 200~300 μ A 的连续束下只能得到 3~5 μ A 平均脉冲束流.为了提高束流利用率,建立一个在保持脉宽不变条件下的强脉冲中子源,近年来对原有的后聚束系统进行了改进.在对多种聚束方案进行了计算和论证之后,选择了组合聚束方案.在这个方案中原来的后聚束设备可以完全保留,其变化仅仅是在离子源和加速电极之间新增加一个功率很低的头部聚束器.组合聚束首先利用较低频率和幅度的调制电压,在头部聚束器中将束流压缩到一定范围内,再用较高频率和幅度的调制电压在后聚束器中将束流进一步压缩.如果头部聚束的脉冲长度小于后聚束的相位接收度,组合聚束的束流利用率由头部聚束频率决定.在单正弦波聚束条件下,如果取头部聚束调制电压频率和后切割器的扫描电压频率相同,束流利用率可以达到 20%,比原来单一的后聚束系统平均提高 8 倍左右.现在的组

* 国际原子能机构(IAEA)研究合同和国家自然科学基金资助课题,课题编号 RCP-5357/RB RCP-8990/RB 和 1860112 18975008 19675007.

合聚束系统和原来的单一后聚束系统的主要性能比较如附表所示。

附表 组合聚束系统和后聚束系统的性能比较

参数	后聚束系统	组合聚束系统
分辨时间	1 ns	1 ns
重复频率	3.2 MHz	3.2 MHz 和 1.6 MHz
束流利用率	2%~3%	15%~20%
平均束流	3~5 μA	20~30 μA

由表可见,组合聚束系统保持了后聚束系统的时间分辨率,大大提高了束流利用率,能将脉冲中子源的强度提高近一个量级。

3 快中子激发 γ 辐射能谱和截面研究

3.1 γ 辐射能谱和产生截面测量

各种核素在快中子轰击下的 γ 辐射能谱和产生截面包含丰富的核结构和核反应机制信息,是检验和发展各种核理论模型的重要参数,也是一切与中子有关的核工程和核技术应用领域的重要基础数据.近年来,由于在核能开发、探矿测井、缉毒查爆、核武器试验研究、核武器和核材料检查及天文与地质学研究等应用领域,对快中子、尤其是对 D-T 反应中的 14 MeV 快中子引起的瞬发和短寿命 γ 辐射知识的兴趣日益增加,因此快中子激发 γ 辐射的在束研究日益受到重视.本课题组按照国际原子能机构和中国核数据中心的要求,用本所的高压倍加器脉冲中子源完成了 14 MeV 中子和 ${}^7\text{Li}$ 、 ${}^9\text{Be}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{19}\text{F}$ 、 ${}^{24}\text{Na}$ 、 ${}^{27}\text{Al}$ 、 ${}^{28,30}\text{Si}$ 、 ${}^{51}\text{V}$ 、 ${}^{56}\text{Fe}$ 、 ${}^{59}\text{Co}$ 、 ${}^{63,65}\text{Cu}$ 、 ${}^{93}\text{Nb}$ 、 ${}^{206,207,208}\text{Pb}$ 等近 20 个核素相互作用的 γ 辐射能谱和截面的研究^[1~10].在这项研究中由于使用了较强的脉冲中子源、飞行时间方法和高分辨的 Ge(Li) γ 谱仪,大大提高了探测灵敏度,发现了大量的新谱线.特别是由于首创了全 γ 辐射测量技术和柱样品中子注量衰减和 γ 自吸收修正的统一计算方法,把 (n, x γ) 反应研究推进到一个全新的水平。

3.2 全 γ 辐射测量技术^[3,4]

由快中子引起的 (n, x γ) 反应中的 γ 辐射一般总是包含瞬发和缓发两种成份.它们分

别形成了 γ 谱学研究中的在束研究和衰变研究两种技术.由于这两种技术在实验条件上有较大差别,它们往往在不同的实验中使用.近年来我们把通常的瞬发 γ 射线产额测量技术和缓发 γ 射线产额确定的寿命修正方法 (LCM) 相结合,建立了一个全 γ 辐射测量技术 (TGRM).它能在一个实验中同时确定瞬发和缓发 γ 射线产额.这个技术不但解决了瞬发 γ 射线产额测量中系统误差识别,混合峰分解等传统难题,且首次把飞行时间技术成功地应用于中子活化截面测量,能在一次实验中同时确定从瞬发 γ 到寿命在 100 小时内的全部缓发 γ 辐射产额,填补了寿命在几毫微秒到几微秒之间中子活化截面测量技术的空白.用 TGRM 完成了 Al、Si、Pb 样品在 14.9 MeV 中子轰击下的全 γ 辐射测量,首次同时得到了这些核素的瞬发和缓发 γ 射线能谱和微分产生截面以及中子活化截面,它也为短寿命同质异能态的研究创造了条件。

3.3 柱样品中子注量衰减和 γ 自吸收修正的统一计算方法^[7,8]

在 (n, x γ) 实验的数据分析中,样品的中子注量衰减和 γ 射线自吸收两项修正对 γ 射线产额的决定影响很大.在以前的处理中总是把它们看成是两个不相关的物理过程而分别计算.实际上由于点中子源的球面发散效应和样品对中子运输的衰减,使得在样品中的中子注量密度不均匀,因而样品中的不同点对 γ 射线产额的贡献不一样.这样 γ 自吸收修正就是一个位置的函数,直接与那一点中子衰减的情况有关.基于这样的物理分析,导出了柱样品的中子注量衰减和 γ 射线自吸收修正的统一计算公式,首次解决了这两种效应的位置关联问题.经比较发现,以前国内外在同类实验中使用的有的方法有的完全错误,有的只实用于个别角度,只有本课题组的统一计算方法具有普适性,实用于任何测量角度,它为 γ 射线产额的角分布测量提供了一个真正可靠的科学方法。

4 快中子核反应的多普勒效应研究

γ 谱学的多普勒方法被广泛用于带电粒

子反应中核态的寿命测量. 人们对堆中子非弹性散射反应中的寿命测量也积累了一些经验. 近年来本课题组开展了由 14 MeV 快中子引起核反应的多普勒效应研究. 和堆中子核反应相比, 在 14 MeV 中子引起的核反应中不但有更多的反应道被打开, 而且由于反冲核有更大的动量而使多普勒效应更显著. 此外在由快中子进行的多普勒效应研究中, 除了能够得到核态寿命外, 还可以得到很有实用价值的重离子阻止本领和反冲核角分布信息. 在初步研究中, 用 DSAM (Doppler Shift Attenuation Method)^[11] 确定了 ^{24}Na 、 ^{26}Mg 、 ^{27}Mg 三个核中九个核态的寿命, 以及能量在 5~500 keV 的 ^{26}Mg 在 ^{27}Al 中的阻止本领和 ^7Li 第一激发态的中子非弹性散射角分布, 完成了用快中子核反应进行多普勒效应研究的首次成功尝试^[12]. 在这个工作中还研究了快中子反应机制, 研究了耦合道光学模型对轻核的适用情况. 该项研究为利用像高压倍加器这样的小型低能加速器开展核核结构和核反应机制研究开辟了一条新途径.

参加本研究工作的还有温深林、陆挺、唐林、张圣基、周卫东、杨华、兰李桥, 以及俄罗斯科学院约飞物理技术研究所的 Pasternak A A 博士等.

参 考 文 献

- Zhou Hongyu, Tang Lin, Yan Yiming et al. Gamma Ray Production Cross Sections for the Interactions of 14.9 MeV Neutrons with C, Al, V, Fe and Nb at 90°. Report INDC(CPR)010/L, International Atomic Energy Agency 1986
- 颜一鸣, 周宏余, 唐林等. 使用脉冲化中子源的 $(n, x\gamma)$ 反应 γ 谱测量装置. 原子核物理, 1988, 10:166~173
- Zhou Hongyu, Huang Guangshun, Fan Guoying. A Lifetime Correction Method for the Gamma-ray Yield Measurement in $(n, x\gamma)$ Experiments. Nucl Instr and Meth, 1996, A371:504~509
- Zhou Hongyu, Huang Guangshun. Study of Total Discrete Gamma Radiation from Aluminum under 14.9 MeV Neutron Bombardment. Nucl Sci and Eng, 1997, 125:61~74
- Zhou Hongyu, Yan Yiming, Tang Lin et al. Production Cross Section Measurement of Discrete Gamma-ray at 90° for Interactions of 14.9 MeV Neutrons with Carbon and Niobium. C J Nucl Phys, 1989, 11(2):63~74
- 周宏余, 颜一鸣, 范国英等. 用 14 MeV 中子轰击铈伴生 γ 射线研究. 高能物理与核物理, 1989, 13:173~183
- 周宏余, 王皖虹, 颜一鸣等. 一个柱样品的中子注量衰减和 γ 射线自吸收修正的统一计算方法. 北京师范大学学报(自然科学版), 1989, 1:21~26
- Zhou Hongyu, Wang Wanhong, Yan Yiming et al. An United Method Calculating Neutron Fluence Attenuation and Gamma-ray Self-absorption in a Large Cylindrical Sample for $(n, x\gamma)$ Experiment. C J Nucl Phys, 1990, 12(2):117~124
- Fan Guoying, Zhou Hongyu, Zhu Xiaoga et al. Progress in the Measurement of Gamma-ray Production Cross Sections Induced by 14.9 MeV Neutrons. In: Qaim SM eds. Proc of Intern Conf on Nucl Data for Sci and Tech, Julich, Germany, 1991, 332~334
- 黄光顺, 周宏余, 范国英. 用寿命校正方法测量铝的活化截面. 北京师范大学学报(自然科学版), 1995, 31(3):329~333
- Lemberg I Kh, Pasternak A A. Modern Methods of Nuclear Spectroscopy. 1984, Moscow; Nauka, 1985, Russian
- Pasternak A A, Zhou Hongyu. Doppler Effects in $n + \text{Al}$ and $n + \text{Li}$ Reactions at Neutron Energy of 14.9 MeV. Bulletin of the Russian Academy of Science Physics, 1992, 56(11):1811~1822

Study on Fast Neutron Physics and Experimental Technique

ZHOU Hongyu FAN Guoying WANG Xinfu HUA Ming ZHANG Shengji

HUANG Guangshun CHEN Yuyi YAN Yiming

(Institute of Low Energy Nuclear Physics Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract The study on fast neutron physics and relative technique (下转第 154 页)

新型衍射装置的优势会更明显.

4 结 论

整体 X 光透镜的研制和生产是一项难度很大又有良好市场前景的高新技术. 整体 X 光透镜在基础科学研究(物理、化学、天文学、生命科学、地球科学、环境科学及材料科学等)和有关的国民经济诸领域(医疗器械、微电子学、微机械制造、工业探伤、冶金、地质及纺织业等)有很好的应用前景. 整体 X 光透镜

生产的产业化必将带来巨大的经济效益和社会效益.

参 考 文 献

- 1 Kumakhov K M, Komarov F F. Multiple Reflection from Surface X-ray Optics. *Phys Rep*, 1991, 191(5): 289~350
- 2 颜一鸣, 刘安东. 导管 X 光学和 X 光聚束系统. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 31(增刊): 1~14

Monolithic Capillary X-ray Lens and Their Application in X-ray Diffraction Technology

YAN Yiming HE Yejun CHEN Baozhen LI Yude DING Xunliang WANG Dachun
LIU Andong WEI Fuzhong CHEN Jun LUO Ping

(*Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University,
Beijing Radiation Center, Beijing 100875*)

Abstract The basic physical properties and applications in X-ray diffraction technology for the monolithic capillary lens are described. The new designed diffraction facility and its measurement results are also introduced.

Key Words X-ray capillary X-ray lens X-ray diffraction

(上接第 147 页)

of experiment and data analysis made at a pulsed neutron generator in Beijing Normal University during recent years is introduced.

Key Words combination buncher fast neutron reaction γ radiation energy spectrum and cross section Doppler effect