

文章编号: 1007-4627(2011)02-0251-05

$^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})^{15}\text{O}$ 反应中子源 0° 角激发函数测量*

齐波^{1,2}, 阮锡超^{2, #}, 姚泽恩¹, R. Nolte⁴, 陈国长², 黄翰雄², 李永明³, 周斌²,
马中原², 张雅玲^{1,2}, 仲启平², 聂阳波², 陈效先¹, 周祖英²

(1 兰州大学核科学与技术学院, 甘肃 兰州 730000;

2 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413;

3 北京大学核科学与技术国家重点实验室, 北京 100871;

4 Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Germany)

摘要: 利用中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器上的多探测器快中子飞行时间谱仪, 测量了 38 个不同入射质子能量点下 $^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})^{15}\text{O}$ 反应 0° 角方向的激发函数。测量数据用蒙特卡罗方法进行了模拟, 以进行中子注量衰减和入射窗厚度的不确定度修正。实验在入射质子能量位于 6.029—8.056 MeV 之间时发现了 3 个共振峰, 这一点与 DROSG-2000 评价数据及 PTB 数据相符合, 但三家的截面数值存在差异, 对这些差异需要作进一步深入探讨。

关键词: 激发函数; 蒙特卡罗方法; 评价数据; 微分截面

中图分类号: O571.5

文献标识码: A

1 引言

近年来, 加速器驱动系统(ADS)和核废料嬗变等研究对低能中子(2—4 MeV)与 ^{238}U 等核作用的次级中子微分截面(弹性、非弹散射)提出了要求。为完成相应的实验测量工作, 迫切需要发展一种低能中子源。 $^{15}\text{N}(\text{p}, \text{n})^{15}\text{O}$ 反应^[1]具有高达 3.54 MeV 的负 Q 值, 从而成为这个能区中子源的一个选择。但是上述反应存在多个共振结构, 而实验中我们趋向于选择中子产额最大的能量点进行实验, 这样, 对 0° 角中子产额激发函数数据的获取就显得尤为重要。在已有的激发函数数据中, DROSG-2000^[2] 的评价数据和 PTB 的测量数据显示出较大的差别, 为了检验并提高数据的可靠性, 有必要对激发函数进行重新测量。激发函数的测量中为了尽可能区分上述反应的各个共振结构, 要求加速器加速粒子的能量精确可调, HI-13 串列加速器正好满足这一要求, 加速粒子的能量精度很高, 可达万分之几的水平。

2 实验测量

实验测量是在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器的多探测器快中子飞行时间谱仪^[3]上进行的, 实验装置如图 1 所示。谱仪由 3 个主探测器和 1 个监视器组成, 3 个主探测器安装在屏蔽体上, 监视器则以固定的角度和距离对准中子源。在激发函数的测量中, 使用与束流夹角为 0° 的主探测器测量 0° 角微分截面, 监视器固定在与束流夹角为 92.4° 的方向上用于监测源的强度。实验的具体参数为: 入射质子能量在 6.029—8.056 MeV 之间, 平均流强在 0.177—0.377 μA 之间, 脉冲束半高宽(FWHM)约为 2.5 ns, 脉冲频率为 2 MHz; ^{15}N 气体靶长度为 30 mm, 直径为 11 mm, 平均压强为 0.26 个大气压, Au 底衬厚度为 0.3 mm, 入射 Mo 窗厚度为 10 μm , 0° 方向的主探测器和 92.46° 方向的监视器同为 BC501A 型液体闪烁体中子探测器, 它们的直径和厚度都是 5.08 cm; 飞行距离分别为 6.135 和 3.295 m, 探测阈低于 100 keV 等效电子

* 收稿日期: 2010-08-20; 修改日期: 2010-09-16

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10890094, 10975188)

作者简介: 齐波(1983—), 男(汉族), 山东济宁人, 硕士研究生, 从事核物理研究; E-mail: qibo_zyy@126.com

通讯联系人: 阮锡超, E-mail: ntof@ciae.ac.cn

能量。

采用脉冲束和飞行时间(TOF)法实验测量了 38 个人射质子能量点的中子 TOF 谱。在每个能量点都测量了有气和无气两种情况的谱,以便能正确地扣除本底。为了检验束流的稳定性还对 3 个共振点进行了重复测量。

实验采用多参数测量方法,每个探测器探测到信号后都产生 3 个参数:脉冲高度(PH)、TOF 和脉冲形状甄别(PSD)。PH 谱用于确定探测器的阈,从而确定探测器效率曲线;TOF 谱用于确定中子能量以及中子计数;PSD 谱用于进行 n-γ 分辨。测量数据采用时间记录方式,即把实验事件的所有参数按逐个事件记录,以便于进行离线数据分析。数据获取系统采用 SPARROWCORP 公司开发的 Kmax CAMAC 数据获取系统。

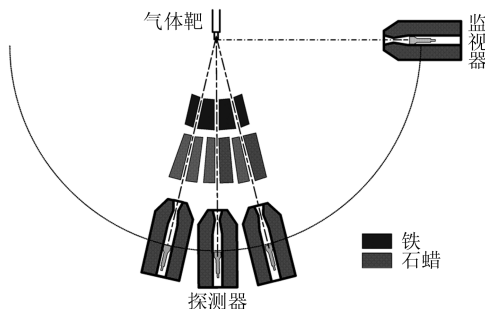


图 1 多探测器快中子飞行时间谱仪示意图

3 数据处理

数据处理的基本步骤可归纳为:γ 刻度以确定 ADC 道数和等效电子能量的关系,算出不同探测阈对应的道数;对原始数据进行反演,以便得到 n-γ 分辨后不同探测阈条件下的 TOF 谱;对 TOF 谱进行死时间修正、本底扣除以便得到纯净的 TOF 谱;根据纯净的 TOF 谱中子峰计数以及截面计算公式算出 0°角方向的微分截面,并用蒙特卡罗程序对这一截面进行修正;对入射质子能量进行修正,以修正后的能量作为蒙特卡罗程序 SINEN^[4]的输入,模拟得到 0°角的微分截面(PTB 的测量结果),以便和测量截面比较。

3.1 ADC 的 γ 刻度

γ 刻度中最关键的步骤是精确确定康普顿边缘所在的道数,通常采用蒙特卡罗模拟的方法得到实

际的康普顿边。图 2 所示为拟合康普顿边的情况。可以看出,在康普顿边附近测量谱和模拟谱拟合得非常好。

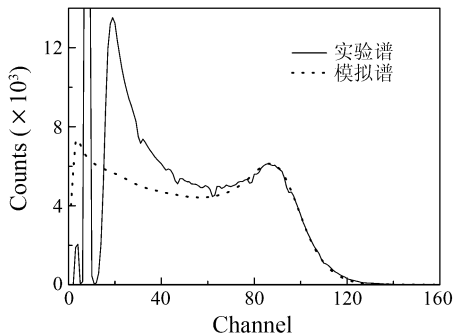


图 2 源射线实验谱和最后模拟谱康普顿边的比较

3.2 0°角微分截面计算及其修正

0°角方向某一中子出射能量的微分截面由下式给出:

$$\sigma(E_n, 0) = \frac{A}{IN_N\Omega\epsilon(E_n)}, \quad (1)$$

其中, A 为 0°角方向某一中子出射能区的中子峰计数; I 为测量时间内的入射质子数,由束流积分得到; N_N 为气体靶每平方厘米的靶核数目; Ω 为探测器对中子源所张的立体角; ε 为液体闪烁体探测器对中子的探测效率,它由 NEFF50 程序^[5]模拟给出(见图 3)。由于中子源不是点源,探测器较大,所

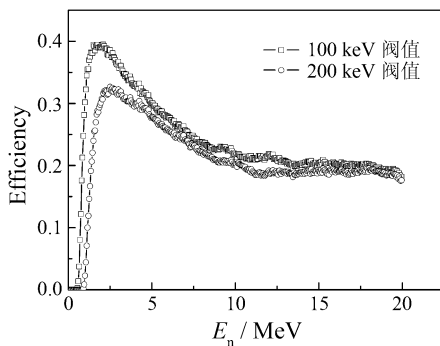


图 3 不同阈条件下液闪的探测效率

以上式得出的微分截面需要进行有限几何和中子注量率衰减修正。为了减少修正的不确定性,采用 PTB 开发的专门用于模拟气体靶中子注量率的蒙特卡罗程序 SINENA 模拟给出修正因子。

另外,为了检验上述方法所得截面的可靠性,又通过比值的方式给出本次实验 0°角方向的微分截面,其计算公式为

$$\sigma(E_n, 0) = \frac{A\sigma_s}{IN_s\Omega\epsilon(E_n)}, \quad (2)$$

其中, A 为 0° 角方向某一中子出射能区的中子峰计数, N_s 为 SINENA 模拟给出的中子峰的计数(其结果归一到每微安入射质子上), I 为束流积分值, ϵ 为探测器探测效率, σ_s 为 SINENA 模拟给出的 0° 角方向的微分截面(PTB 的实验数据)。

3.3 气体靶中质子能量的修正

以实验条件下的各变量为输入参数, 采用 SINENA 程序模拟得到 0° 角方向的加权微分截面, 模拟中考虑了实验的有限几何及靶厚的影响, 这样的结果可与我们实验中得到的截面进行更真实的比较。然而, 由于实验中入射 Mo 窗的厚度存在不确定性, 从而造成了气体靶中平均质子能量的不确定性, 所以模拟前需要对气体靶中的平均质子能量进行修正。修正方法为: 以实验加速器给出的入射质子能量作为 SINENA 程序的输入, 把模拟得到的中子能量和由实验测量的 TOF 谱求出的中子能量进行比较, 发现实验值比模拟值普遍偏高(共振点附近的几个点受共振结构影响较大, 表现出较大的差值)。于是把不同入射质子能量点下的实验值和模拟值之差相加然后取平均(平均值为 14 keV), 加速器给出的入射质子能量统一加上 14 keV, 代入 SINENA 程序重新模拟, 以得到 PTB 实验中 0° 角方向的微分截面。修正前后中子能量的实验值和模拟值之差如图 4 所示, 可见, 修正后的实验值和模拟值之差在 ± 10 keV。这是个可接受的误差范围。

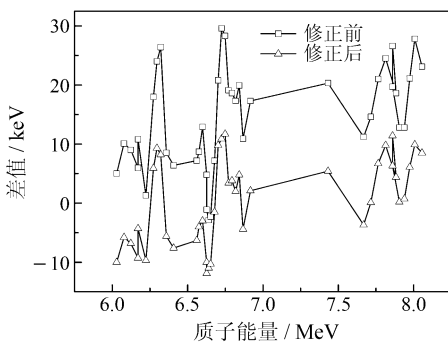


图 4 修正前后中子能量的实验值和模拟值之差

4 测量结果和讨论

图 5 给出了 3 个共振峰处实验测得的 0° 角出射

的中子能谱以及入射质子能量与出射中子能量的关系, 其中上半部分为 3 个共振点处的中子能谱, 它们所对应的质子能量从左到右依次为 5.82, 6.29 和 7.57 MeV; 下半部分所示为不同入射质子能量下的中子能量。可以看出, 这个反应中子源在这一能区是一个很好的单色中子源。

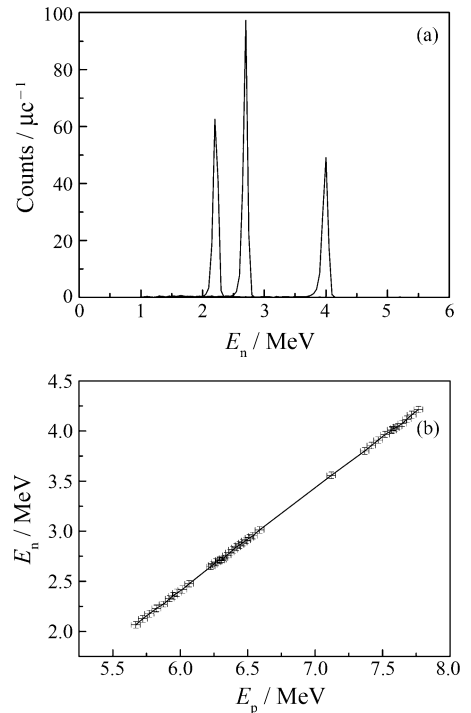


图 5 共振点处的中子能谱以及入射质子能量与出射中子能量的对应关系

根据上述处理方法, 最后得出了 0° 角方向的中子产额激发函数, 并与 DROSG2000 评价数据和 PTB 数据进行了比较。图 6 所示为阈值设为 100

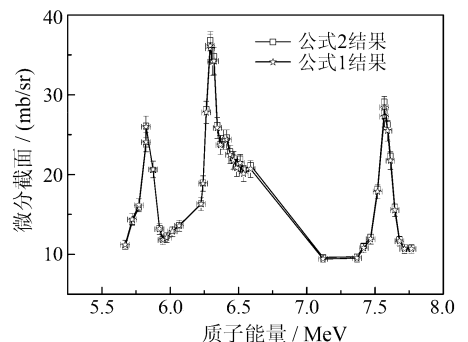


图 6 100 keV 阈值下公式 1 和 2 计算截面的比较

keV 时, 由公式 1(截面公式法)和公式 2(蒙特卡罗模拟法)计算截面的比较。可以看出, 理想条件下的

截面公式和严格意义上的蒙特卡罗模拟具有良好的自洽性。

图 7 所示为 100 和 200 keV 两种不同阈值条件下实验测量截面的比较。可以看出，它们具有较好的一致性，从而说明了 NEFF50 程序模拟得到的效率曲线是可靠的。

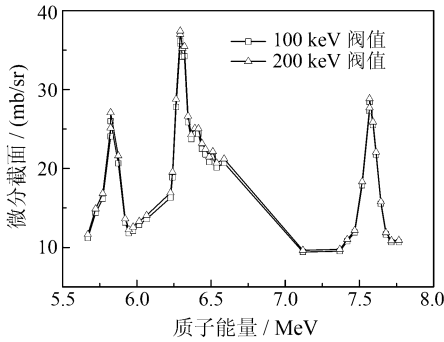


图 7 两种不同阈值下实验测量截面的比较

图 8 所示为本次测量结果与 DROSG2000 评价数据及 PTB 测量数据的比较。可以看出，3 家数据

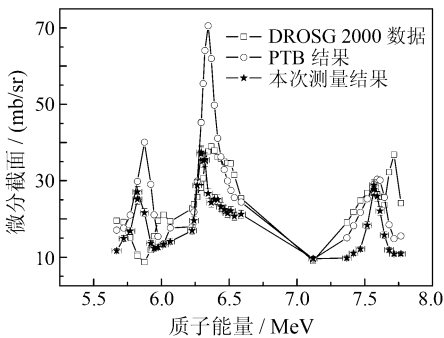


图 8 本次实验激发函数数据与评价数据及其它测量数据的比较

在整体趋势上是一致的，其中本次测量结果的第 2 个共振峰与 DROSG2000 评价数据吻合较好，第 3 个共振峰与 PTB 结果吻合较好。然而本次测量结果与 PTB 结果在前两个共振峰的峰位上有所偏差，在截面数值大小上也相差较多。分析其原因，是由于这个反应有许多共振结构，一方面对加速粒子的能量精度要求很高，另一方面在共振峰附近，靶厚对 neutron 产额有较大的影响，从而影响实验结果。在本实验中，为了尽量减少靶厚，气体靶只充了 0.26 个大气压的气体，但也有 23 keV 的厚度。相对来说，串列加速器的入射粒子能量精度最高，而 PTB 采用的是回旋加速器，其加速粒子的能量不能精确

可调。但是作为一种全新的中子源，在与 PTB 截面数值的差异上，能够作参考的实验数据毕竟太少，为澄清上述分歧，还需要作进一步的实验研究。

本实验结果的不确定度主要来源于以下几个方面：中子计数统计(0.5%—0.8%)；束流积分计数(3.3%)；每平方厘米的¹⁵N 核数(小于 2.5%)；中子源对探测器的张角(小于 0.2%)；探测效率(小于 2%)，总的确定度小于 5%。另外，与¹⁵N 核发生反应时质子能量的不确定度小于 0.5%，主要是由于质子能量在气体靶中的衰减引起的。

5 小结

实验测量了¹⁵N(p, n)¹⁵O 反应 0°角方向的中子产额激发函数，并将这一结果与评价数据及其它测量数据进行了比较。测量结果第 2 个共振峰与 DROSG2000 评价数据吻合较好，第 3 个共振峰与 PTB 结果吻合较好。本次测量数据与 PTB 数据在截面数值上的偏差还需要在将来的实验中作进一步深入的研究。实验结果对发展和使用¹⁵N(p, n)¹⁵O 反应中子源具有重要的意义，对拓展 HI-13 串列加速器的中子能区范围也有实际意义。

参考文献 (References):

- [1] Erik Pönitz, Ralf Nolte, Dankwart Schmidt. Investigation of the ¹⁵N(p, n)¹⁵O. Reaction for Use as a Neutron Source in Scattering Experiments. Cape Town: Proceeding of the International Workshop on Fast Neutron Detectors, University of Cape Town, South Africa, April 3—6, 2006.
- [2] Drog M, DROSG-2000, Codes and Database for 59 Neutron Source Reactions, Documented in the IAEA report IAEA-NDS-87 Rev. 8 (January 2003), received from the IAEA Nuclear Data Section.
- [3] Sa Jun, Tang Hongqing, Zhou Zuying, et al. Atomic Energy Science and Engineering, 1992, 26(6): 1(in Chinese). (撒骏, 唐洪庆, 周祖英, 等. 原子能科学技术, 1992, 26(6): 1.)
- [4] Schmidt D, Siebert B R L. Fast Neutron Spectrometry and Monte-Carlo Simulation; The Codes SINENA and STREUER. Germany: PTB, 2000.
- [5] Dieze G, Klein H. NRESP4 and NEFF4 Monte Carlo Codes for the Calculation of Neutron Response Functions and Detection Efficiencies for NE 213 Scintillation Detectors. Germany: PTB, 1982.

Measurement of Excitation Function at Zero Degree for $^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$ Reaction Neutron Source^{*}

QI Bo^{1, 2}, RUAN Xi-chao^{2, *}, YAO Ze-en¹, R. Nolte⁴, CHEN Guo-chang², HUANG Han-xiong²,
LI Yong-ming³, ZHOU Bin², MA Zhong-yuan², ZHANG Ya-ling^{1, 2}, ZHONG Qi-ping²,
NIE Yang-bo², CHEN Xiao-xian^{1, 2}, ZHOU Zu-ying²

(1 *School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

2 *Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;*

3 *National Key Laboratory of Nuclear Science and Technology, Peking University, Beijing 100871, China;*

4 *Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 38116 Braunschweig, Germany)*

Abstract: The excitation function of $^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$ reaction at 0 degree was measured at 38 energy points using the fast neutron Time-of-Flight (TOF) spectrometer at the HI-13 Tandem Accelerator in the China Institute of Atomic Energy(CIAE). The measured data were analyzed by Monte-Carlo simulation for the corrections of neutron flux attenuation and uncertainty of the thickness of the entrance foil. Three resonance peaks were observed in this experiment in the energy range from 6.029 to 8.056 MeV, which is comparable with the DROSG-2000 evaluated data and the PTB data. However, more experimental studies are needed since the cross sections deviate with each other.

Key words: excitation function; Monte-Carlo method; evaluated data; differential cross section

* **Received date:** 20 Aug. 2010; **Revised date:** 16 Sep. 2010

* **Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10890094, 10975188)

Corresponding author: Ruan Xi-chao, E-mail: ntof@ciae.ac.cn