

文章编号: 1007-4627(2017)03-0450-04

$^{122}\sim^{125}\text{Sn}$ 中子谱因子的实验研究

甘林¹, 李志宏¹, 李云居¹, 苏俊¹, 郭冰¹, 韩治宇¹, 连钢¹, 李鑫悦¹, 裴常进¹,
湛阳平¹, 王友宝¹, 曾晟¹, 周勇¹, 李二涛²

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413;
2. 深圳大学物理与能源学院, 深圳 518060)

摘要: 多个Sn同位素位于慢速中子俘获(s-)过程路径上, 其中子谱因子可用于计算 $^A\text{Sn}(n, \gamma)^{A+1}\text{Sn}$ 直接辐射俘获的天体物理反应率, 并可研究Sn同位素对s-过程核合成的贡献。本工作在中国原子能科学研究院HI-13串列加速器Q3D磁谱仪上, 对实验室系下 $8^\circ\sim 66^\circ$ 范围内的 $^{122,124}\text{Sn}(d, p)$ 和 (p, d) 单中子转移反应角分布进行了测量。利用DWBA理论计算了转移反应角分布, 并提取了 $^{122}\sim^{125}\text{Sn}$ 的基态以及 $^{123,125}\text{Sn}$ 第一激发态的中子谱因子。其中, ^{122}Sn 和 ^{124}Sn 的基态中子谱因子是首次从实验上获得。由于本工作成功鉴别开了 $^{123,125}\text{Sn}$ 的基态和第一激发态的效应, 因此给出的谱因子比前人的结果更可信。

关键词: DWBA理论; 单中子转移反应; 中子谱因子

中图分类号: O571.42 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.34.03.450

1 引言

中子俘获反应, 包括快速中子俘获过程(r-过程)和慢速中子俘获过程(s-过程), 在天体重元素的核合成中起主导作用。在比铁重的元素合成中, 有近一半数量的元素是通过s-过程产生^[1]。因此, 研究s-过程对于解开铁以上重元素核合成之谜有着非常重要的意义。Sn的多个同位素均位于s-过程核合成路径上, 对这些同位素的中子辐射俘获反应研究有助于加深我们对s-过程核合成的理解。此外, Sn同位素的质子数为幻数50, 并拥有多个稳定同位素, 能提供多个同位素靶, 通过对Sn同位素系列进行单中子转移反应的研究, 有助于提取中子数在50~82之间的中子壳层结构信息^[2]。

根据辐射俘获反应理论, 单中子辐射俘获反应截面中的直接俘获过程可通过复合核的中子谱因子间接计算导出。目前, 多个项目组利用 (d, p) , (p, d) , $(\alpha, ^3\text{He})$ 以及 $(^3\text{He}, \alpha)$ 等单中子转移反应对 $^{123,125}\text{Sn}$ 基态及多个激发态的中子谱因子进行过研究^[2-11], 但仍缺乏 ^{122}Sn 与 ^{124}Sn 的基态中子谱因子数据。此外, 由于 ^{123}Sn 与 ^{125}Sn 第一激发态的激发能分别只有25与28 keV, 受到当时实验条件的限制, 测量过程中无法将二者的基态与第一激发态分开, 只能根据理论计算的比例系数来给出基态和第一激发态的谱因子, 结果有很大的不确定性。因此, 有必要利用高精度的实验

对 $^{122}\sim^{125}\text{Sn}$ 的中子谱因子进行精确研究。

本次实验使用能量分辨和位置分辨极高的Q3D磁谱仪^[12], 其能量分辨可达万分之二, 角度误差在 0.1° 以内, 该谱仪完全可以将 ^{123}Sn 与 ^{125}Sn 的基态与第一激发态鉴别开, 从而能精确测定 $^{122,124}\text{Sn}(d, p)^{123,125}\text{Sn}$ 反应布居基态和第一激发态的角分布。

2 实验部分

在北京HI-13串列加速器Q3D磁谱仪上, 分别使用14 MeV的质子束和12 MeV的氘束轰击同位素富集的 $^{122}\text{SnO}_2$ 靶与 $^{124}\text{SnO}_2$ 靶。

实验设置如图1所示。一个可以上下移动的实验靶被放置在反应靶室中心, 靶的下游用一个法拉第筒记录束流强度, 用于反应截面的绝对归一。为了使实验微分截面有较好的角度分辨, 我们在Q3D磁谱仪的入口处安放了一个直径为8 mm的准直光阑, 使得磁谱仪的接收角为0.88 msr, 角度覆盖范围为 $\pm 0.6^\circ$ 。在磁谱仪的焦平面上放置一块50 mm × 74 mm的位置灵敏型单面硅微条探测器(PSSD), 测量经Q3D分离后的反应产物。PSSD由8条水平方向的硅微条组成, 每条宽度为6 mm, 通过信号所在条来确定事件的垂直位置。硅微条的阻抗均匀, 可以依据电荷分配法确定事件的水平位置。Q3D磁谱仪无法在焦平面探测器的位置上鉴别

收稿日期: 2016-11-20; 修改日期: 2017-05-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11321064, 11375269); 国家重点基础研究发展计划(973计划)(2013CB834406)

作者简介: 甘林(1988-), 男, 四川内江人, 博士研究生, 从事原子核与粒子物理研究; E-mail: ganlin2007@foxmail.com。

具有相同磁刚度的不同离子,但由于这些离子具有不同的能量,因此,可以通过 PSSD 的能量信号来鉴别这些磁刚度相同的离子。图 2 显示了在实验室坐标系下 8° 时 PSSD 测量 $^{124}\text{Sn}(d, p)^{125}\text{Sn}$ 反应的能量-位置粒子鉴别谱。

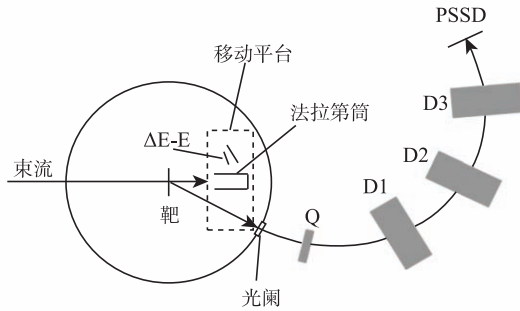


图 1 实验测量设置示意图

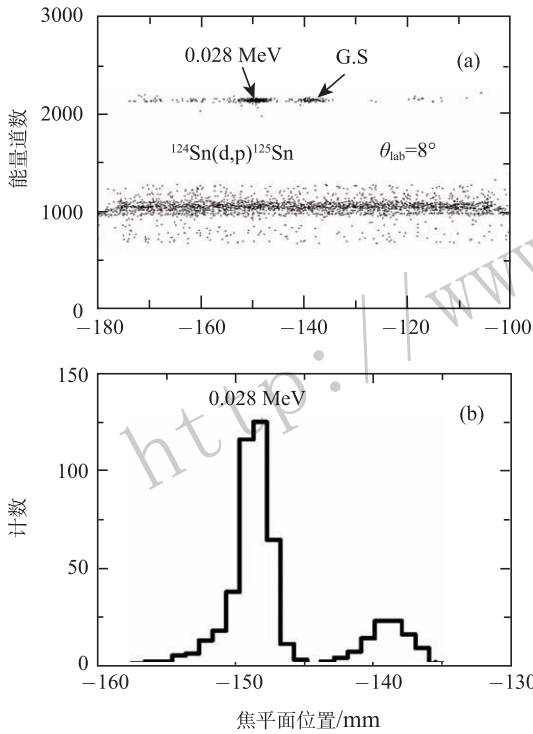


图 2 (a) 为 $^{124}\text{Sn}(d, p)^{125}\text{Sn}$ 反应测量得到的能量-位置二维粒子鉴别谱, 图中能量道数在 2100 附近的两团较强粒子分别对应 ^{125}Sn 基态与第一激发态。(b) 为目标粒子位置单维谱, 图中两个峰对应 (a) 图中的两团粒子

从图 2 中可以看出, 通过粒子鉴别谱能清晰鉴别出目标粒子, 并排除其它杂质的干扰, 进一步确定反应的产额。

通过转动 Q3D 磁谱仪, 对实验室坐标系 $8^\circ \sim 66^\circ$ 范围内 $^{122}\text{Sn}(p, d)^{121}\text{Sn}$, $^{122}\text{Sn}(d, p)^{123}\text{Sn}$, $^{124}\text{Sn}(p, d)^{123}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn}(d, p)^{125}\text{Sn}$ 4 个单中子转移反应角分

布进行了分别测量。实验得到的微分截面如图 3 和图 4 所示, 实验的误差由统计误差和系统误差组成, 其中统计误差小于 11%, 系统误差来自靶厚的不确定度, 约 8%。

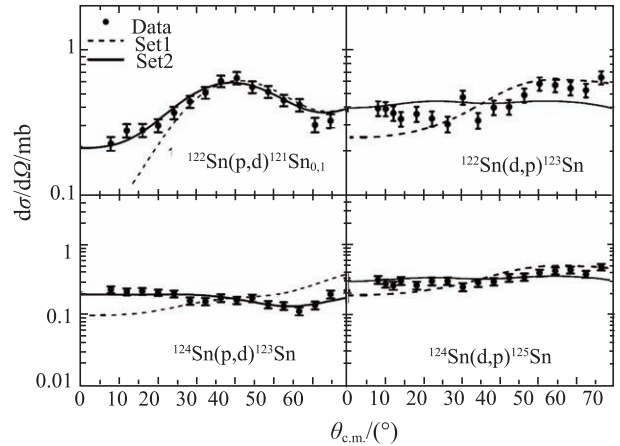


图 3 $^{122,124}\text{Sn}(p, d)^{121,123}\text{Sn}$ 和 $^{122,124}\text{Sn}(d, p)^{123,125}\text{Sn}$ 反应实验微分截面(点)与 DWBA 计算结果(曲线)

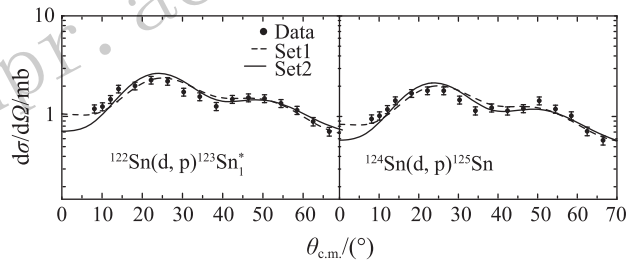


图 4 $^{122,124}\text{Sn}(d, p)^{123,125}\text{Sn}$ 反应布居 ^{123}Sn 和 ^{125}Sn 第一激发态的微分截面

3 DWBA理论分析

本工作使用 TWFNR 程序^[13] 对 $^{122,124}\text{Sn}$ 的单中子转移角分布进行了扭曲波玻恩近似 (DWBA) 分析。光学势采用程序内置的系统学光学势, 其中质子的光学势选取了 Chapel-Hill 89 评价库的光学势参数^[14], 氘的光学势选取 Perey 等^[15] 提出的无自旋-轨道光学势 (set1) 和 Lohr 等^[16] 提出的氘-核光学势 (set2)。Set1 使用了无自旋-轨道耦合的光学势参量, 它的适用范围是 12~25 MeV 的氘-核相互作用体系。Set2 是一套适合于氘入射能量在 8~13 MeV 范围的总体光学势。对于本工作的反应体系, 氘的相对能量分别对于入射道 12 MeV 和出射道 7.5 MeV 左右, 因此提取谱因子时, 氘-核的体系我们使用了 Set2 光学势参数。

中子谱因子为实验与理论微分截面的比值^[17], 可以用公式表示为

$$S = \frac{d\sigma_{\text{EXP}}/d\Omega}{d\sigma_{\text{DWBA}}/d\Omega} \quad (1)$$

从图 3 和图 4 可以看出, 使用合适的光学势参量, 经谱因子归一后的 DWBA 计算的角分布能较好地符合实验角分布。对于 $^{122}\text{Sn}(p, d)^{121}\text{Sn}$ 反应, 由于 ^{121}Sn 第一激发态的激发能仅为 6 keV, 在焦平面位置上与基态的距离只有 2 mm, 因此实验无法从位置和能量上将二者鉴别开来, 测得的微分截面为二者之和。在 DWBA 分析时需要拟合二者的比例, 得到各自的贡献, 进而提取出二者的中子谱因子。

表 1 列出了本工作中提取出的中子谱因子同当前存在的其它结果的比较。从表中可以看出, 我们首次得到了 ^{122}Sn 基态与 ^{124}Sn 基态的中子谱因子, 其它几个态的中子谱因子与已有的实验结果符合较好。需要特别指出的是: 由于之前的实验中无法将 ^{123}Sn 和 ^{125}Sn 的基态与第一激发态分开, 而本工作借助高精度的 Q3D 磁谱仪与双维位置灵敏硅探测器成功做到了这一点, 因此得到的中子谱因子更加可信。

表 1 $^{122}\sim^{125}\text{Sn}$ 中子谱因子

	E_x/MeV	Present	(d, p)	(d, p)	(α , ^3He)	(α , ^3He)
^{122}Sn	0	1.80 ± 0.18				
^{123}Sn	0	0.41 ± 0.04	$0.38^{[7]}$			$0.37 \pm 0.04^{[10]}$
	0.025	0.63 ± 0.06	$0.43 \pm 0.04^{[2]}$	$0.45 \pm 0.03^{[3]}$		
^{124}Sn	0	5.56 ± 0.54				
^{125}Sn	0	0.32 ± 0.03	$0.42 \pm 0.08^{[4]}$		$0.41 \pm 0.08^{[4]}$	$0.30 \pm 0.03^{[10]}$
	0.028	0.48 ± 0.05	$0.44 \pm 0.09^{[4]}$	$0.43 \pm 0.03^{[3]}$		

4 结论

本工作在中国原子能科学研究院北京 HI-13 串列加速器的 Q3D 磁谱仪上, 测量了实验室系 $8^\circ \sim 66^\circ$ 范围内 $^{122}\text{Sn}(p, d)^{121}\text{Sn}$, $^{122}\text{Sn}(d, p)^{123}\text{Sn}$, $^{124}\text{Sn}(p, d)^{123}\text{Sn}$ 和 $^{124}\text{Sn}(d, p)^{125}\text{Sn}$ 单中子转移反应的微分截面。通过选取适当的光学势参数, 利用 DWBA 程序计算了这些单中子转移反应的角分布, 并通过实验和理论比较提取了 $^{122}\sim^{125}\text{Sn}$ 基态以及 ^{123}Sn 和 ^{125}Sn 第一激发态的中子谱因子。其中, ^{122}Sn 和 ^{124}Sn 基态的中子谱因子是我们首次从实验微分截面提取得到。由于本次工作中成功地将 ^{123}Sn 与 ^{125}Sn 基态和第一激发态的效应分离开, 因此给出的谱因子结果更加可信。

在下一步研究中, 我们将利用本工作得到的中子谱因子研究 $^{121}\sim^{124}\text{Sn}$ 的中子辐射俘获反应, 计算 $^{121,122,123,124}\text{Sn}$ 等核中子辐射俘获反应的天体物理反应率, 并评估它们对 s- 过程核合成的影响。

参考文献:

- [1] ARNOULD M, TAKAHASHI K. Reports on Progress in Physics, 1999, **62**(3): 395.
- [2] SCHNEID E J, PRAKASH A, COHEN B L. Physical Review, 1967, **156**(4): 1316.
- [3] CARSON P L, MCINTYRE L C. Nuclear Physics A, 1972, **198**(1): 289.
- [4] BINGHAM C R, HILLIS D L. Physical Review C, 1973, **8**(2): 729.
- [5] STRÖMICH A, STEINMETZ B, BANGERT R, *et al.* Physical Review C, 1977, **16**(6): 2193.
- [6] SEKIGUCHI M, SHIDA Y, SOGA F, *et al.* Nuclear Physics A, 1977, **278**(2): 231.
- [7] TAMURA T, MATUMOTO Z, MIYANO K, *et al.* Nuclear Data Sheets, 1980, **29**(3): 453.
- [8] TAMURA T, MATUMOTO Z, OHSHIMA M. Nuclear Data Sheets, 1981, **32**(4): 497.
- [9] MATOBA M, IJIRI H, KAMETANI H, *et al.* Nuclear Physics A, 1986, **456**(2): 235.
- [10] MASSOLO C P, FORTIER S, GALÈS S, *et al.* Physical Review C, 1991, **43**(4): 1687.
- [11] EGIDY T V, WIRTH H F, FAESTERMAN T, *et al.* Physical Review C, 2011, **83**(4): 044326.
- [12] LI Zhichang, CHENG Yehao, YAN Chen, *et al.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1993, **336**(1-2): 150.
- [13] TGARASHI M. Institute for Nuclear Study, University of Tokyo (unpublished).
- [14] VARNER R L, THOMPSON W J, MCABEE T L, *et al.* Physics Reports, 1991, **201**: 57.
- [15] PEREY C M, PEREY F G. Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1976, **17**: 1.
- [16] LOHR J M, HAEBERLI W. Nuclear Physics A, 1974, **232**: 381.
- [17] SORENSEN R A, LIN E K, COHEN B L. Physical Review, 1966, **142**(3): 729.

Experimental Study of the Neutron Spectroscopic Factors in $^{122\sim 125}\text{Sn}$

GAN Lin^{1,1)}, LI Zhihong¹, LI Yunju¹, SU Jun¹, GUO Bing¹, HAN Zhiyu¹, LIAN Gang¹, LI Xinyue¹, PEI Changjin¹, SHEN Yangping¹, WANG Youbao¹, ZENG Sheng¹, ZHOU Yong¹, LI Ertao²

(1. China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. College of Physics and Energy, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: Several Tin isotopes are on the path of slow neutron capture (s-) process, and the direct components of (n, γ) reactions can be derived from their neutron spectroscopic factors. In the present work, the angular distributions of $^{122,124}\text{Sn}(p, d)$ and (d, p) reactions are obtained using the high-precision Q3D magnetic spectrograph in Beijing HI-13 tandem accelerator in China Institute of Atomic Energy. The distorted-wave Born approximation (DWBA) calculations are performed to extract the neutron spectroscopic factors of the ground state of $^{122-125}\text{Sn}$ and the first excited state of $^{123,125}\text{Sn}$. The neutron spectroscopic factors of the ground state of ^{122}Sn and ^{124}Sn are firstly obtained in this work. As the events of the ground state and first excited state of $^{123,125}\text{Sn}$ can be distinguished clearly by our experiment, the neutron spectroscopic factories of $^{123,125}\text{Sn}$ are more reliable.

Key words: DWBA; single neutron transfer; neutron spectroscopic factor

<http://www.npr.ac.cn>

Received date: 20 Nov. 2016; **Revised date:** 13 May 2017

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11321064, 11375269); National Basic Research Program of China(973 Program) (2013CB834406)

1) E-mail: ganlin2007@foxmail.com.