

## $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})n$ 反应角分布和 $^7\text{Li}$ 的质子谱因子

李二涛<sup>1,2</sup>, 李志宏<sup>2</sup>, 李云居<sup>2</sup>, 颜胜权<sup>2</sup>, 郭冰<sup>2</sup>, 苏俊<sup>2</sup>, 王友宝<sup>2</sup>, 王宝祥<sup>2</sup>,  
曾晟<sup>2</sup>, 连钢<sup>2</sup>, 白希祥<sup>2</sup>, 方晓<sup>2</sup>, 柳卫平<sup>2</sup>, 赵维娟<sup>1</sup>

(1. 郑州大学 物理工程学院, 河南 郑州 450052;

2. 中国原子能科学研究院 核物理研究所, 北京 102413)

**摘要:** 在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器次级束流线上, 使用 $^6\text{He}$  次级束首次测量了质心系能量为 9.1 MeV 的 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})n$  反应角分布, 并用扭曲波波恩近似(DWBA)进行理论分析, 导出了 $^7\text{Li}$  的质子谱因子为  $0.40 \pm 0.02$ 。

**关键词:**  $^6\text{He}$  次级束; 角分布; 扭曲波波恩近似; 核谱因子

中图分类号: O571.423 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931(2010)01-0009-05

## Angular Distribution for $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})n$ Reaction and Proton Spectroscopic Factor of $^7\text{Li}$

LI Er-tao<sup>1,2</sup>, LI Zhi-hong<sup>2</sup>, LI Yun-ju<sup>2</sup>, YAN Sheng-quan<sup>2</sup>, GUO Bing<sup>2</sup>, SU Jun<sup>2</sup>,  
WANG You-bao<sup>2</sup>, WANG Bao-xiang<sup>2</sup>, ZENG Sheng<sup>2</sup>, LIAN Gang<sup>2</sup>,  
BAI Xi-xiang<sup>2</sup>, FANG Xiao<sup>2</sup>, LIU Wei-ping<sup>2</sup>, ZHAO Wei-juan<sup>1</sup>

(1. *Institute of Physical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China;*

2. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-46, Beijing 102413, China*)

**Abstract:** The angular distribution of the  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})n$  reaction was measured at  $E_{\text{cm}} = 9.1$  MeV for the first time using the secondary beam facility of HI-13 tandem accelerator. The experimental data were analyzed with distorted wave Born approximation (DWBA) calculation and the proton spectroscopic factor of  $^7\text{Li}$  was extracted to be  $0.40 \pm 0.02$ .

**Key words:**  $^6\text{He}$  secondary beam; angular distribution; distorted wave Born approximation; spectroscopic factor

核谱因子是壳模型中重要的核结构参数, 对核结构和核天体物理研究有重要意义。近年

收稿日期: 2008-12-05; 修回日期: 2009-01-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB815003); 国家自然科学基金资助项目(10675173, 10705053, 10735100)

作者简介: 李二涛(1981—), 男, 河南驻马店人, 硕士研究生, 核技术及应用专业

来,在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器次级束流线<sup>[1-2]</sup>上,利用放射性离子束对<sup>7</sup>Be(d, n)<sup>8</sup>B、<sup>8</sup>Li(d, p)<sup>9</sup>Li、<sup>8</sup>Li(d, n)<sup>9</sup>Be、<sup>11</sup>C(d, n)<sup>12</sup>N和<sup>13</sup>N(d, n)<sup>14</sup>O等反应的角分布进行了逆运动学测量。对测量结果用扭曲波恩近似(DWBA)理论进行分析,得到了<sup>8</sup>B、<sup>9</sup>Li、<sup>9</sup>Be、<sup>12</sup>N和<sup>14</sup>O的核谱因子,并结合辐射俘获理论,分别导出了<sup>7</sup>Be(p,  $\gamma$ )<sup>8</sup>B<sup>[3]</sup>、<sup>8</sup>Li(n,  $\gamma$ )<sup>9</sup>Li<sup>[4]</sup>、<sup>8</sup>Li(p,  $\gamma$ )<sup>9</sup>Be<sup>[5]</sup>、<sup>11</sup>C(p,  $\gamma$ )<sup>12</sup>N<sup>[6]</sup>和<sup>13</sup>N(p,  $\gamma$ )<sup>14</sup>O<sup>[7]</sup>等反应的天体物理S因子或反应率。

目前,<sup>7</sup>Li质子谱因子的实验结果还存在较大差别。Brady等<sup>[8]</sup>利用<sup>7</sup>Li(n, d)<sup>6</sup>He反应得到的<sup>7</sup>Li = <sup>6</sup>He + p谱因子为0.62,而Lapikás等<sup>[9]</sup>根据<sup>7</sup>Li(e, e'p)<sup>6</sup>He反应得到的结果为 $S_{Li} = 0.42 \pm 0.04$ ,二者差别高达32%。因此,从实验上准确确定出<sup>7</sup>Li的质子谱因子,对核结构和核天体物理研究有重要意义。

## 1 探测器设置

在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器次级束流线上,利用加速器提供的46 MeV <sup>7</sup>Li初级束轰击长4.8 cm、气压约0.15 MPa、前后窗均为1.9 mg/cm<sup>2</sup> Havar膜的氦气靶,通过<sup>2</sup>H(<sup>7</sup>Li, <sup>6</sup>He)<sup>3</sup>He反应产生<sup>6</sup>He次级束<sup>[10]</sup>。次级束流线的接收角为 $3.0^\circ \pm 0.8^\circ$ ,这样设置可避开透射的<sup>7</sup>Li束流,使次级束纯度有很大提高。进入次级束流管道的<sup>6</sup>He与各种杂质离子先经二极管磁的选择,只有与<sup>6</sup>He磁刚度窗口相匹配的离子才能到达次级束流线下游,其它离子将被管道壁阻挡。其后,<sup>6</sup>He离子又经1组四极透镜进行水平和垂直两个方向的聚焦。为进一步降低束流固有的角度离散,次级靶室前安装了1套相距20 cm的 $\phi 7$  mm- $\phi 5$  mm准直光阑。经准直光阑后收集到强度为 $3000 \text{ s}^{-1}$ 、纯度为99%、能量为37.7 MeV的<sup>6</sup>He次级束。

实验设置如图1所示。次级束经准直后入射到厚23  $\mu\text{m}$ 的硅探测器 $\Delta E_1$ 上,利用 $\Delta E_1$ 可鉴别和记录<sup>6</sup>He离子,以用于束流归一。用厚1.7 mg/cm<sup>2</sup>的(CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>作为效应靶,实现对<sup>2</sup>H(<sup>6</sup>He, <sup>7</sup>Li)n反应的测量。为扣除(CD<sub>2</sub>)<sub>n</sub>靶中C原子对实验的影响,使用1块相同厚度的

纯C靶进行本底测量。在靶的下游放置1套 $\Delta E$ -E探测器望远镜用于记录和鉴别反应产物,其中, $\Delta E$ 为厚23  $\mu\text{m}$ 的穿透型硅探测器 $\Delta E_2$ ,E<sub>i</sub>由厚300  $\mu\text{m}$ 、中心有孔的多环硅探测器MRSD和1块小面积、相同厚度的中心硅探测器CSD构成, $\Delta E_2$ 和MRSD分别距离次级靶37 mm和172 mm。该探测系统覆盖的实验室系角度范围为 $0^\circ \sim 11.2^\circ$ ,对应<sup>2</sup>H(<sup>6</sup>He, <sup>7</sup>Li)n反应的质心系角度为 $0^\circ \sim 51.6^\circ$ 。通常,谱因子皆是从角分布第1个峰上的数据提取出来的。理论计算表明,<sup>2</sup>H(<sup>6</sup>He, <sup>7</sup>Li)n反应角分布的第1个峰位于质心系 $20^\circ$ 附近,因此,该实验设置有利于<sup>7</sup>Li核谱因子的测量。

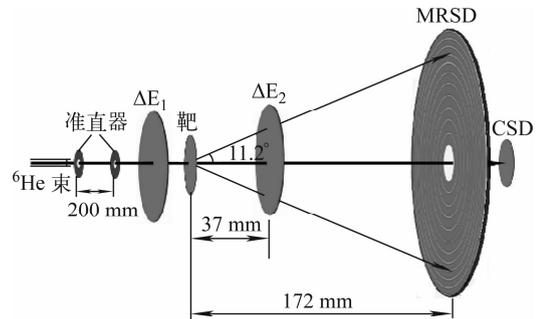


图1 实验设置

Fig. 1 Experimental setup

## 2 实验数据处理

图2为次级束在 $\Delta E_1$ 探测器上的能量损失谱。通过比较其线性坐标和对数坐标能谱,可看出次级束中含有极少量的<sup>7</sup>Li杂质。由于<sup>2</sup>H(<sup>6</sup>He, <sup>7</sup>Li)n反应欲探测的目标核为<sup>7</sup>Li,次

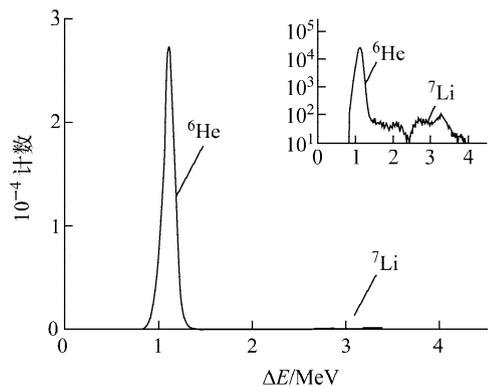


图2  $\Delta E_1$ 探测器的能量损失谱

Fig. 2 Energy loss spectrum of  $\Delta E_1$  detector

级束中的 $^7\text{Li}$ 会对实验测量造成严重的干扰。为排除这些干扰,使用 $\Delta E_1$ 能谱对次级束中的 $^6\text{He}$ 事例进行选择,然后再与 $\Delta E-E_r$ 探测器望远镜记录的事例进行符合分析,由此可得到 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应生成的 $^7\text{Li}$ 事例。

图3为效应轮中用 $^6\text{He}$ 事例开门得到的前4个环的 $\Delta E-E_r$ 二维谱。为节省处理数据所用的时间,在 $\Delta E_2=2\text{ MeV}$ 处设置1个阈值,并把 $\Delta E_2<2\text{ MeV}$ 的事例数除以100,由于 $^7\text{Li}$ 在 $\Delta E_2$ 中的能量损失大于 $2\text{ MeV}$ ,此设置不会影响到反应产物 $^7\text{Li}$ 的鉴别。图3中的实线为理论计算的 $\Delta E-E_r$ 曲线,二维门为蒙特卡罗模拟

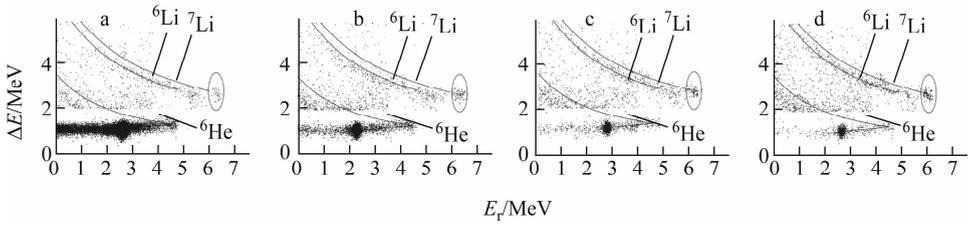


图3 环形探测器第1(a)、2(b)、3(c)、4(d)环的 $\Delta E-E_r$ 散点图

Fig. 3 Scatter plot of  $\Delta E$  vs  $E_r$  corresponding to the 1st (a), 2nd (b), 3rd (c) and 4th (d) rings of MRSD

### 3 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应角分布

$^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应的微分截面可表示为:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_i = \frac{\Delta N_i}{IN_s\Delta\Omega_i} \quad (1)$$

其中: $(d\sigma/d\Omega)_i$ 为第*i*环对应角度的微分截面; $\Delta N_i$ 为MRSD第*i*环探测到的 $^7\text{Li}$ 的有效事例数; $I$ 为入射到反应靶中的 $^6\text{He}$ 粒子数; $N_s$ 为 $(\text{CD}_2)_n$ 靶单位面积的氘原子核数; $\Delta\Omega_i$ 为MRSD第*i*环的立体角。

实验得到的 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应角分布如图4所示。其中,微分截面的误差主要来自统计误差和利用蒙特卡罗模拟确定 $^7\text{Li}$ 运动学区域的不确定性。

$^7\text{Li}$ 第1激发态的激发能为 $0.48\text{ MeV}$ ,小于 $^6\text{He}$ 次级束的能量离散 $0.62\text{ MeV}$ ,因此,本实验不能分辨出 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应产生的 $^7\text{Li}$ 的基态与第1激发态。图4中的角分布应为 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应布居 $^7\text{Li}$ 基态和第1激

$^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应生成的 $^7\text{Li}$ 的运动学区域,模拟时考虑了束流本身的角度和能量歧离、束斑大小、靶厚以及探测器分辨率、厚度等因素的影响。对本底轮进行了相同的处理,在 $^7\text{Li}$ 的运动学区域中未发现任何事例,说明次级靶中的C对角分布测量的影响可忽略。

本次实验在 $(\text{CD}_2)_n$ 靶和C靶上分别累计了约 $2.71\times 10^8$ 和 $8.41\times 10^7$ 个 $^6\text{He}$ 事例。通过数据处理,在 $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应产生的 $^7\text{Li}$ 运动学区域中共得到599个有效事例,统计精度好于以往在本次级束装置上所做的任何实验。

发态的角分布之和。

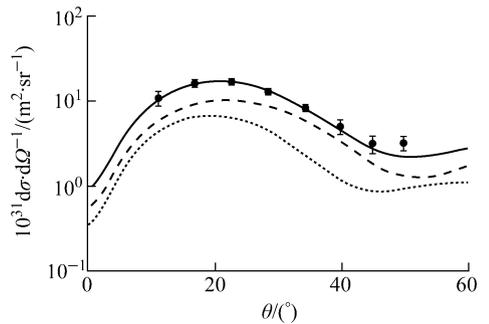


图4  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 反应的角分布

Fig. 4 Angular distributions of  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$

●——实验微分截面;

实线——DWBA理论计算的总角分布;

虚线——基态的贡献;点线——第1激发态的贡献

### 4 DWBA理论计算

$^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$ 实验微分截面与DWBA理论计算的微分截面以及核谱因子的关系可表

示为:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exp}} = S_d S_{\text{Li}} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{gs}} + S_d S_{\text{Li}^*} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{exl}} \quad (2)$$

其中:  $(d\sigma/d\Omega)_{\text{exp}}$  为实验微分截面;  $(d\sigma/d\Omega)_{\text{gs}}$  和  $(d\sigma/d\Omega)_{\text{exl}}$  分别为 DWBA 理论计算的  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$  反应布居  $^7\text{Li}$  基态和第 1 激发态的微分截面;  $S_d=0.859$  为  $d=p+n$  的谱因子;  $S_{\text{Li}}$  和  $S_{\text{Li}^*}$  分别表示  $^7\text{Li}=^6\text{He}+p$  和  $^7\text{Li}^*=^6\text{He}+p$  的谱因子, 根据壳模型的理论计算结果, 二者大小相等<sup>[11]</sup>。结合式(2)可导出  $^7\text{Li}$  基态和第 1 激发态的质子谱因子。

计算时采用的光学势为 Woods-Saxon 势, 形式为:

$$U(r) = -Vf(r, r_V, a_V) - iW_V f(r, r_W, a_W) - iW_S \frac{d}{dr} f(r, r_W, a_W) + V_{\text{SO}} f(r, r_{\text{SO}}, a_{\text{SO}}) + V_C \quad (3)$$

其中:  $V$ 、 $W_V$ 、 $W_S$ 、 $V_{\text{SO}}$  和  $V_C$  分别为体吸收势的实部、体吸收势的虚部、表面吸收势、自旋轨道相互作用势和库仑势;  $r$ 、 $a$  分别为约化半径和弥散参数, 其下角  $V$ 、 $W$ 、 $\text{SO}$ 、 $C$  分别表示体吸收、表面吸收、自旋轨道相互作用及库仑。

库仑势为:

$$V_C = \begin{cases} Z_P Z_T e^2 \left(3 - \frac{r^2}{R_C^2}\right) & r \leq R_C \\ \frac{Z_P Z_T e^2}{r} & r > R_C \end{cases} \quad (4)$$

$$f(r, r_i, a_i) = \left(1 + \exp \frac{r - R_i}{a_i}\right)^{-1} \quad i = V, W, \text{SO}, C \quad (5)$$

$$R_i = r_i (A_{r,P}^{1/3} + A_{r,T}^{1/3}) \quad i = V, W, \text{SO}, C \quad (6)$$

其中:  $Z_P$ 、 $Z_T$  和  $A_{r,P}$ 、 $A_{r,T}$  分别为入射粒子、靶核的原子序数和相对原子质量。

与文献[12]类似, 由 Chapel-Hill 89<sup>[13]</sup> 普适唯象光学势的系统规律计算出核子与核的相互作用光学势, 并利用绝热近似计算了氦与  $^6\text{He}$  的光学势参量。这些势参量列于表 1。由此计算出的  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$  反应角分布如图 4 中的实线所示。从理论计算和实验数据的比较得到  $^7\text{Li}$  的质子谱因子为  $0.40 \pm 0.02$ 。该结果与 Lapikás 等利用  $^7\text{Li}(e, e'p)^6\text{He}$  反应得到的  $S_{\text{Li}}=0.42 \pm 0.04$  符合较好, 而与 Brady 等拟合  $^7\text{Li}(n, d)^6\text{He}$  反应角分布得到的  $S_{\text{Li}}=0.62$  相

差 35%。

表 1 DWBA 计算所用的光学势参数  
Table 1 Optical potential parameters used in DWBA calculation

反应道	$V/\text{MeV}$	$r_V/\text{fm}$	$a_V/\text{fm}$	$W_V/\text{MeV}$	$W_S/\text{MeV}$	
$^6\text{He}+d$	97.79	1.13	0.72	2.05	13.91	
$^7\text{Li}+n$	41.54	1.41	0.50	13.58	1.35	
反应道	$r_W/\text{fm}$	$a_W/\text{fm}$	$V_{\text{SO}}/\text{MeV}$	$r_{\text{SO}}/\text{fm}$	$a_{\text{SO}}/\text{fm}$	$r_C/\text{fm}$
$^6\text{He}+d$	1.10	0.72	5.90	0.68	0.63	1.30
$^7\text{Li}+n$	0.20	5.50	1.15	0.50		

注: 单粒子的约化半径和弥散参数分别为  $r_0 = 1.25 \text{ fm}$  和  $a_0 = 0.65 \text{ fm}$

## 5 小结

本工作在中国原子能科学研究院 HI-13 串列加速器次级束流线上利用  $^6\text{He}$  放射性离子束测量了  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$  反应, 首次得到了质心系能量为 9.1 MeV 时  $^2\text{H}(^6\text{He}, ^7\text{Li})\text{n}$  反应的角分布, 并通过 DWBA 计算得到  $^7\text{Li}$  质子谱因子为  $0.40 \pm 0.02$ 。这一结果与 Lapikás 等得到的结果符合较好。

感谢中国原子能科学研究院串列加速器工作人员给予的支持与合作。

## 参考文献:

- [1] BAI Xixiang, LIU Weiping, QIN Jiuchang, et al. A facility for production and utilization of radioactive beams[J]. Nucl Phys A, 1995, 588c: 273-276.
- [2] LIU Weiping, LI Zhihong, BAI Xixiang, et al. Current progress of nuclear astrophysics study and BRNBF at CIAE[J]. Nucl Instrum Methods Phys Res B, 2003, 204: 62-70.
- [3] LIU Weiping, BAI Xixiang, ZHOU Shuhua, et al. Angular distribution for the  $^7\text{Be}(d, n)^8\text{B}$  reaction at  $E_{\text{cm}} = 5.8 \text{ MeV}$  and the  $S_{17}(0)$  factor for  $^7\text{Be}(p, \gamma)^8\text{B}$  reaction[J]. Phys Rev Lett, 1996, 77(4): 611-614.
- [4] LI Zhihong, LIU Weiping, BAI Xixiang, et al. The  $^8\text{Li}(d, p)^9\text{Li}$  reaction and the astrophysical  $^8\text{Li}(n, \gamma)^9\text{Li}$  reaction rate[J]. Phys Rev C, 2005, 71: 052801.
- [5] ZENG Sheng, LIU Weiping, LI Zhihong, et al.

- Measurement of  $^2\text{H}(^8\text{Li}, ^9\text{Be})\text{n}$  reaction relevant to primordial nucleosynthesis [J]. *Chin Phys Lett*, 2005, 22(9): 2 219-2 221.
- [6] LIU Weiping, LI Zhihong, BAI Xixiang, et al. Determination of  $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$  astrophysical  $S$ -factor via measurement of  $^{11}\text{C}(d, n)^{12}\text{N}$  reaction [J]. *Nucl Phys A*, 2003, 728: 275-284.
- [7] LI Zhihong, GUO Bing, YAN Shengquan, et al.  $^{13}\text{N}(d, n)^{14}\text{O}$  reaction and the astrophysical  $^{13}\text{N}(p, \gamma)^{14}\text{O}$  reaction rate [J]. *Phys Rev C*, 2006, 74: 035801.
- [8] BRADY F P, KING N S P, BONNER B E, et al.  $^6\text{Li}(n, d)^5\text{He}$  and  $^7\text{Li}(n, d)^6\text{He}$  with 56.3 MeV neutrons [J]. *Phys Rev C*, 1977, 16 (1): 31-41.
- [9] LAPIKAÁ S L, WESSELING J, WIRINGA R B. Nuclear structure studies with the  $^7\text{Li}(e, e'p)^6\text{He}$  reaction [J]. *Phys Rev Lett*, 1999, 82 (22): 4 404-4 407.
- [10] 李云居,李志宏,白希祥,等.  $^6\text{He}(p, \gamma)^7\text{Li}$  反应的实验设计与束流准备 [J]. *原子能科学技术*, 2008, 42(11): 961-964.
- LI Yunju, LI Zhihong, BAI Xixiang, et al. Experimental design of  $^6\text{He}(p, \gamma)^7\text{Li}$  reaction and beam preparation [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42 (11): 961-964 (in Chinese).
- [11] RUDCHIK A A, RUDCHIK A T, KOZER-ATSKA G M, et al.  $^7\text{Li} + ^{11}\text{B}$  elastic and inelastic scattering in a coupled-reaction-channels approach [J]. *Phys Rev C*, 2005, 72: 034608.
- [12] GUO Bing, LI Zhihong, LIU Weiping, et al. Determination of astrophysical  $^{11}\text{C}(p, \gamma)^{12}\text{N}$  reaction rate from the asymptotic normalization coefficient of  $^{12}\text{B} \rightarrow ^{11}\text{B} + n$  [J]. *J Phys G: Nucl Part Phys*, 2007, 34: 103-114.
- [13] VARNER R L, THOMPSON W J, MCABEE T L, et al. A global nucleon optical model potential [J]. *Phys Rep*, 1991, 201(2): 57-119.