

# 脉冲高度权重技术测量 $^{197}\text{Au}$ 中子俘获截面

李鑫祥<sup>1,2</sup> 刘龙祥<sup>1,3</sup> 蒋伟<sup>4,5</sup> 任杰<sup>6</sup> 王宏伟<sup>1,2,3</sup> 范功涛<sup>1,3</sup> 曹喜光<sup>1,2,3</sup>  
胡新荣<sup>1,2</sup> 张岳<sup>1,2</sup> 王俊文<sup>1,7</sup> 郝子锐<sup>1,2</sup> 姜炳<sup>1,2</sup> 王小鹤<sup>1</sup> 胡继峰<sup>1</sup>  
王金成<sup>8</sup> 王德鑫<sup>8</sup> 张苏雅拉吐<sup>8</sup> 刘应都<sup>9</sup> 麻旭<sup>9</sup> 马春旺<sup>10</sup> 王玉廷<sup>10</sup>  
安振东<sup>1,11</sup> 何健军<sup>12</sup> 苏俊<sup>12</sup> 张立勇<sup>12</sup>

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院上海高等研究院 上海 201210)

4(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

5(中国散裂中子源科学中心 东莞 523803)

6(中国原子能科学研究院 北京 102413)

7(上海科技大学 上海 201210)

8(内蒙古民族大学 核物理研究所 通辽 028000)

9(湘潭大学 湘潭 411105)

10(河南师范大学 新乡 453007)

11(中山大学 珠海 519082)

12(北京师范大学 北京 100875)

**摘要** 脉冲高度权重技术是利用 $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测器测量中子俘获截面的一种数据处理方法。在中国散裂中子源(China Spallation Neutron Source, CSNS)的反角白光中子源(Back-n)靶站上,通过测量金靶( $^{197}\text{Au}$ )的中子俘获截面,验证了该方法的可靠性。首先利用Geant4蒙特卡罗程序模拟给出了不同靶条件下的探测器效率,脉冲高度权重函数等基本项,使得加权后的探测器效率与 $\gamma$ 能量成正比。然后通过实验测量了 $^{197}\text{Au}$ 中子俘获截面。结果表明:测量获得的中子俘获截面数据和ENDF/B-VIII.0评价数据相符合,同时发现随着实验靶尺寸的不同和质子束功率的增加,会使得实验本底的扣除误差越来越大。

**关键词** 中子俘获截面, 白光中子源, 脉冲高度权重技术

中图分类号 TL99, O571.1, O571.55+2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.080501

## Neutron capture cross section measurement of $^{197}\text{Au}$ with pulse height weighting techniques

LI Xinxiang<sup>1,2</sup> LIU Longxiang<sup>1,3</sup> JIANG Wei<sup>4,5</sup> REN Jie<sup>6</sup> WANG Hongwei<sup>1,2,3</sup> FAN Gongtao<sup>1,3</sup>  
CAO Xiguang<sup>1,2,3</sup> HU Xinrong<sup>1,2</sup> ZHANG Yue<sup>1,2</sup> WANG Junwen<sup>1,7</sup> HAO Zirui<sup>1,2</sup> JIANG Bing<sup>1,2</sup>  
WANG Xiaohe<sup>1</sup> HU Jifeng<sup>1</sup> WANG Jincheng<sup>8</sup> WANG Dexin<sup>8</sup> ZHANG Suyalatu<sup>8</sup> LIU Yingdu<sup>9</sup>  
MA Xu<sup>9</sup> MA Chunwang<sup>10</sup> WANG Yuting<sup>10</sup> AN Zhendong<sup>1,11</sup> HE Jianjun<sup>12</sup> SU Jun<sup>12</sup> ZHANG Liyong<sup>12</sup>

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

国家自然科学基金(No.11875311、No.11905274、No.11605097、No.11705156)资助

第一作者: 李鑫祥, 男, 1994年出生, 2016年毕业于南华大学, 现为博士研究生, 粒子物理与原子核物理专业

通信作者: 王宏伟, E-mail: wanghongwei@zjlab.org.cn

收稿日期: 2020-04-06, 修回日期: 2020-05-06

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11875311, No.11905274, No.11605097, No.11705156)

First author: LI Xinxiang, male, born in 1994, graduated from University of South China in 2016, doctoral student, focusing on particle physics and nuclear physics

Corresponding author: WANG Hongwei, E-mail: wanghongwei@zjlab.org.cn

Received date: 2020-04-06, revised date: 2020-05-06

3(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

4(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

5(China Spallation Neutron Source, Dongguan 523803, China)

6(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

7(ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

8(Institute of Nuclear Physics, Inner Mongolia University For The Nationalities, Tongliao 028000, China)

9(Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

10(Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

11(Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China)

12(Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** [Background] Pulse height weighting technology is a data processing method for measuring neutron capture cross section with  $C_6D_6$  detector. [Purpose] This study aims to measure the neutron capture cross section of  $^{197}\text{Au}$  on the back-n target station of China spallation neutron source (CSNS) by using Pulse height weighting technology, and verify the feasibility and data processing of this method. [Methods] First of all, detection efficiency of the detector, the pulse height weighting function of  $C_6D_6$  and other basic terms under different target conditions were simulated by Geant4 Monte Carlo code, so that the weighted detector efficiency was proportional to the gamma energy. Then experimental measurement of neutron capture cross section of  $^{197}\text{Au}$  was carried out by the Au target calibration data in the experiment. [Results & Conclusions] The experimental results show that the measured neutron capture cross section data are consistent with the ENDF/B-VIII.0 evaluation data. Inconsistent size of the carbon target and the sample target, and the increase of the proton beam power will cause a large error in the background subtraction.

**Key words** Neutron capture cross section, White light neutron source, Pulse height weighting techniques

白光中子源是指中子的能谱覆盖范围很宽 (meV~MeV, 甚至 GeV 能量) 的中子源, 高强度、窄脉冲的白光中子源是国际上开展中子物理研究, 尤其是中子散射分析、核数据测量的最重要实验装置之一<sup>[1]</sup>。国际上已建立了多种形式的白光中子源, 如美国橡树岭国家实验室 (OREL)、比利时 JRC/IRMM 实验室的 GELINA 装置基于电子束的白光中子源, 以及美国洛斯阿拉莫斯国家实验室 (LANL)、欧洲核子研究组织 (CERN) 等基于高能质子束的白光中子源, 白光中子源具有中子源强度大和中子能区广等优点。目前国际上有英国 ISIS、美国 SNS、日本 J-PARC 和中国散裂中子源 (China Spallation Neutron Source, CSNS) 等 4 大脉冲型散裂中子源装置。中国散裂中子源 CSNS 是我国第一台散裂中子源, 主要用于中子散射方面的实验研究<sup>[2-5]</sup>, 它的建成为我国材料科学、物理学、化学、生命科学、资源环境和新能源等提供一个先进、功能强大的科研平台<sup>[6-7]</sup>。CSNS 反角白光中子源<sup>[8]</sup> (Back-n), 是建造于 CSNS 质子注入束线反角方向的一条白光中子源靶站。Back-n 目前最大中子飞行距离约为 80 m, 提供的中子能量范围为 0.5 eV~200 MeV 左右, 在 Back-n 实验站中子通量可达  $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当质子加速器以单束团模式工作时, 在 1eV~1MeV 能区,

距散裂靶 80 m 处的中子时间分辨率约为 0.8%<sup>[9-10]</sup>。Back-n 可开展核数据测量和中子源的应用研究, 包括中子全截面、中子俘获截面、中子带电粒子截面、中子裂变截面测量, 以及中子积分实验、中子探测器标定和中子辐照效应等研究<sup>[11]</sup>。

中子俘获反应 ( $n, \gamma$ ) 是中子核反应的重要组成部分, 中子俘获截面在核能、核技术以及核医学等领域具有广泛的应用。在核天体物理大爆炸后的宇宙重元素演化过程中, 中子俘获反应在一些质量数较大同位素的快中子俘获过程 (r-process) 与慢中子俘获过程 (s-process) 中起到重要的作用<sup>[12-14]</sup>, 决定了重元素的核合成路径和丰度值。同时中子俘获反应截面是核反应理论、核工程设计与核技术应用的重要参数之一<sup>[15]</sup>, 是中子评价数据库中最重要的一类截面数据。随着核技术应用的发展, 中子俘获截面的数量和质量的的需求也越来越高。中子俘获截面的测量探测器有全吸收探测器与全能量  $\gamma$  探测器<sup>[16]</sup>, 如  $\text{BaF}_2$ 、BGO、CsI 阵列探测器, 以及  $C_6D_6$  探测器 (氘化苯探测器) 等。由于  $C_6D_6$  探测系统具有探测器使用数量少、布局简单、数据分析快捷等特点, 因此在很多白光中子源装置上采用  $C_6D_6$  探测器来测量中子俘获截面<sup>[17-20]</sup>。

本文利用中国散裂中子源 (CSNS) 的反角白光

中子源(Back-n)靶站开展了金靶( $^{197}\text{Au}$ )中子俘获截面刻度测量,其中天然碳靶( $^{\text{nat}}\text{C}$ )和空靶作为实验本底扣除使用。基于中国原子能科学研究所的 $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测系统<sup>[21]</sup>,研究了中子俘获截面的数据处理方法,利用Geant4蒙特卡罗程序模拟计算了不同靶厚和材料的脉冲高度权重函数,计算了金靶( $^{197}\text{Au}$ )的中子俘获截面。与数据库ENDF/B-VIII.0中的最新评价数据进行了比较,检验和确认了这一实验数据处理方法和模拟计算程序的可靠性。为基于 $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测器的白光中子俘获截面的数据处理提供了标准的处理方法和分析程序,并对未来在Back-n上开展更多精细的中子俘获截面的实验测量和数据处理提供了参考和经验。

## 1 实验布局

第一次实验于2019年1月完成,在质子束功率30 kW,重复频率25 Hz,质子束通量约为 $10^{12} \text{ s}^{-1}$ 条件下进行测量,金靶( $^{197}\text{Au}$ )和碳靶( $^{\text{nat}}\text{C}$ )尺寸均为 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。第二次实验于2019年4月完成,质子束流条件为50 kW、25 Hz,采用 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的金靶和 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的碳靶进行了同样的实验测量。 $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测器直径12.7 cm,厚度7.62 cm,配备12.7 cm ETEL 9390KEB光电倍增管,探测器结构如图1所示<sup>[22]</sup>,由于 $\text{C}_6\text{D}_6$ 对样品靶散射出来的中子几乎不敏感,其可作为理想的中子俘获 $\gamma$ 射线测量探测器。

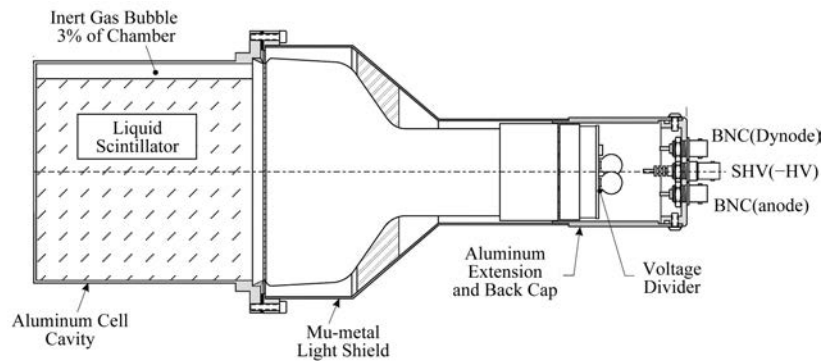


图1  $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测器结构

Fig.1 Structure of  $\text{C}_6\text{D}_6$  detector (digested from Eljen's website)

按照图2(a)所示的探测器布局进行摆放,左右端面相距14.87 cm,探头部分上下相距17.18 cm。将探测器向靶方向旋转90°,得到位置如图2(b)所示,测得探头尾部平面与靶相距7.3 cm。确定位置参数后,在图2(a)的基础上将探测器向靶的方向进

行X方向12°以及Y方向20°的旋转,得到如图2(c~d)所示的布局。考虑到 $\text{C}_6\text{D}_6$ 是为探测靶与中子反应后的 $\gamma$ 射线,为了尽可能避免靶上散射和中子捕集器透射中子的本底影响,因此采用这种后向角偏转的探测器布局。

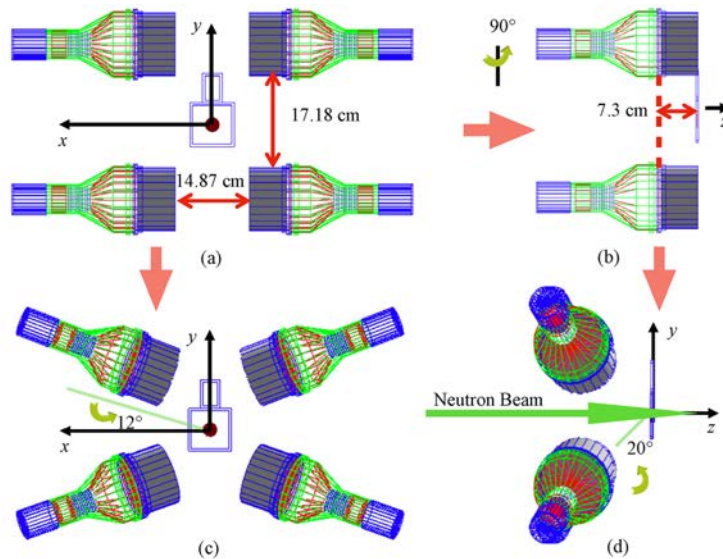


图2 探测器相对位置和布局

Fig.2 Relative positions and layout of the detectors



## 2 脉冲高度权重函数计算

脉冲高度权重技术(Pulse Height Weighting Techniques, PHWT)最初由Macklin与Gibbons应用在 $C_6F_6$ 探测器测量中子俘获截面上<sup>[23]</sup>,后来发现 $C_6D_6$ 具有更好的中子不灵敏特性, $C_6D_6$ 探测系统对 $\gamma$ 的探测效率足够低,以致于对于一次中子俘获反应,最多只探测到级联发射中的一条 $\gamma$ 射线。针对俘获反应的探测效率近似于对于该俘获反应的级联 $\gamma$ 探测效率之和:

$$\varepsilon_c = 1 - \prod(1 - \varepsilon_{\gamma_i}) \approx \sum \varepsilon_{\gamma_i} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_c$ 为俘获反应的探测效率; $\varepsilon_{\gamma_i}$ 为第 $i$ 条级联 $\gamma$ 射线的探测效率并且足够小。当式(1)中 $\gamma$ 的探测效率 $\varepsilon_{\gamma}$ 与 $\gamma$ 能量 $E_{\gamma}$ 成正比时,即:

$$\varepsilon_{\gamma} = \alpha E_{\gamma} \quad (2)$$

则式(1)可变为:

$$\varepsilon_c = \alpha \sum E_{\gamma_i} \quad (3)$$

为使式(3)成立,需要对探测系统的响应函数进行数学控制以实现式(2)的关系。定义一个加权函数 $W(E_d)$ ,使得式(4)成立:

$$\int_0^{\infty} R_d(E_d, E_{\gamma}) W(E_d) dE_d = \alpha E_{\gamma} \quad (4)$$

式中: $R_d$ 表示加入了能量响应函数的脉冲高度(Pulse Height, PH)谱在 $E_d$ 的计数; $W(E_d)$ 为 $E_d$ 对应的脉冲高度权重函数。这便是脉冲高度权重技术。根据PHWT方法的原理<sup>[24]</sup>,在低能区加权后的俘获截面反应产额 $Y_w$ 满足以下关系:

$$Y_w = \frac{N_w}{N_s I S_n} \quad (5)$$

中子俘获截面与反应产额有如下关系:

$$Y_w(E) = \left(1 - e^{-N\sigma_t(E)tf_c}\right) \frac{\sigma_c(E)}{\sigma_t(E)} \quad (6)$$

式中: $Y_w$ 为加权后的中子俘获产额; $\sigma_c$ 为靶核的中子俘获截面; $N_w$ 为加权后的脉冲高度谱计数; $N_s$ 为靶核的面密度; $S_n$ 为靶核的中子结合能; $I$ 为中子注量率; $N$ 为靶核的原子密度; $\sigma_t(E)$ 为不同中子能量下靶核的反应总截面; $\sigma_c(E)$ 为不同中子能量下靶核的俘获截面; $t$ 为靶核的厚度。由于中子在靶内多次散射可能导致中子的实际运动路径长度将大于靶的厚度,引入厚度修正因子 $f_c$ ,因此未知靶核的中子俘获截面为:

$$\sigma_c = \frac{N_w}{N_s I S_n} \times \frac{\sigma_t}{\left(1 - e^{-N\sigma_t f_c}\right)} \quad (7)$$

式中: $N_s$ 、 $S_n$ 、 $N$ 可根据靶核参数直接计算;中子注量率 $I$ 由CSNS质子束流参数或者Back-n的中子监测

探测器——Li-Si探测器<sup>[25]</sup>测量数据提供; $\sigma_t(E)$ 可从ENDF数据库中得到,为计算式中的 $N_w$ ,需要先对实验的脉冲高度谱(PH谱)按照每个能量箱进行累加,并且扣除本底。图3展示了实验样品金靶,空靶以及碳靶PH谱在每个能量箱的总计数。

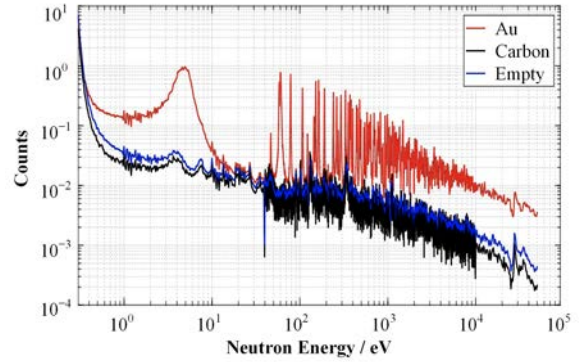


图3 金靶、空靶和碳靶计数(归一到单位中子注量率下计数)

Fig.3 Counting spectrum of <sup>197</sup>Au target, empty target and the Carbon target (normalized to the neutron flux rate)

归一到相同的中子注量之后,分别扣除空靶与弹性散射本底,记扣完本底的PH谱的计数为 $N_1$ ,则式(7)中的 $N_w$ 可由式(8)计算得出:

$$N_w = N_1 W = [N_{\text{sample}} - N_{\text{Bkg}} - \eta(N_c - N_{\text{Bkg}})] W \quad (8)$$

式中: $N_w$ 为加权后的PH谱计数; $N_1$ 为实验中扣除本底的PH谱计数; $W$ 为权重函数; $N_{\text{sample}}$ 为样品的计数; $N_{\text{Bkg}}$ 为空靶计数; $N_c$ 为碳靶计数; $\eta$ 与样品单位面积的靶核数和样品的弹性散射截面的乘积成正比。

CSNS反角白光中子源采用的 $C_6D_6$ 探测器系统属于总能量型俘获截面探测系统。对于理想的俘获截面探测系统,有三个必要条件<sup>[26]</sup>:1)系统的探测效率与级联 $\gamma$ 的退激路径、级联 $\gamma$ 的多重性、级联 $\gamma$ 的能量无关;2)探测系统对中子的灵敏度较低;3)探测系统的时间响应较好。其中2)和3)为探测系统在设计之初就考虑的条件,已经为实验所验证,我们需要利用模拟计算给出1)的探测器效率和级联 $\gamma$ 多重性和能量的无关性。

$C_6D_6$ 探测器的效率与 $\gamma$ 能量呈非线性关系,利用式(8)定义权重函数使加权后探测器能量响应函数的积分值与 $\gamma$ 能量成正比。通常采用最小二乘法拟合得到权重函数,如式(9):

$$\min \sum_j \left( \sum_i W_i R_i^j - \alpha E_{\gamma} \right)^2 \quad (9)$$

式中: $W_i$ 为 $E_i$ 对应的权重函数; $R_i^j$ 表示加入能量响应函数的PH谱在 $E_i$ 的计数; $E_{\gamma}$ 表示第 $j$ 组 $\gamma$ 射线的能量,为使探测效率与 $\gamma$ 射线的能量呈正比,拟合系数 $\alpha$ 取1。

采用 Geant4 蒙特卡罗程序<sup>[27]</sup>模拟了不同能量的单能 $\gamma$ 射线在 $C_6D_6$ 探测器中的能量沉积,其几何构型与布局如图2所示。得到效率曲线如图4(a)所示。通过式(9)拟合得到权重函数,将权重函数加权到效率谱上,可得探测效率与能量的关系近似为线性(图4(b)),即效率与能量之比近似为1(图4(c))。得到权重函数并验证无误之后,使用权重函数对实验PH谱进行加权,可以计算出式(7)中 $N_w$ 。

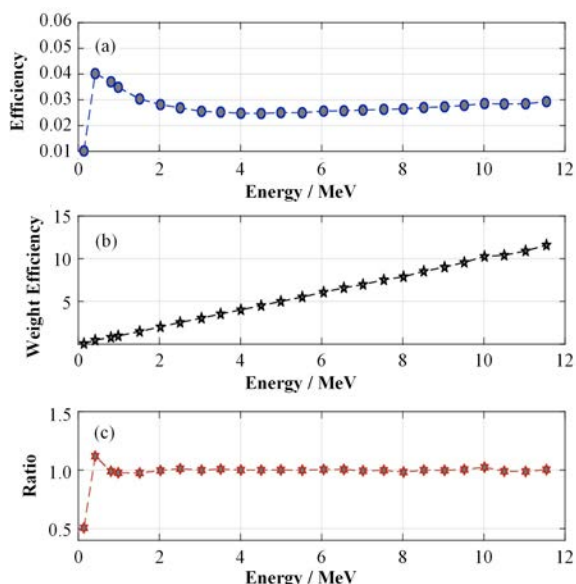


图4  $C_6D_6$ 效率曲线(a),加权探测效率(b),加权效率与能量之比(c)

Fig. 4  $C_6D_6$  efficiency curve (a), weighted detection efficiency (b), the weighted efficiency to energy ratio (c)

通过反角白光中子源(Back-n)Li-Si 监测探头的计数,并结合 CSNS 提供的中子能谱信息,确定式(7)中的中子注量率 $I$ ,由于提供的中子能谱数据点太少,根据实验数据划分的能量箱对中子能谱数据进行插值,以获得与 $N_w$ 所对应的中子注量率 $I$ (见图5)。

根据式(6),计算其它待求常数结果为:金靶核的中子结合能 $S_n = 6.5124 \text{ MeV}$ ;靶核的面密度 $N_s = 0.386 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;靶核的原子密度 $N = 0.0981 \cdot N_A \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

最后,考虑到靶内中子多次散射等效应可能导致粒子在靶中运动的实际路径将大于靶的厚度<sup>[28]</sup>,引入了厚度修正因子 $f_c$ ,具体的计算方法如下:通过 Geant4 模拟不同能量的中子在靶中的运动路径,将平均路径长度与靶的厚度作比,即得 $f_c$ :

$$f_c = f_L/t \quad (10)$$

式中: $f_L$ 为模拟的中子在靶内运动的总长度; $t$ 为靶厚。 $f_c$ 值反应了在一定厚度的金靶中,不同能量中子的平均路径长度随中子能量的变化。由图6可以

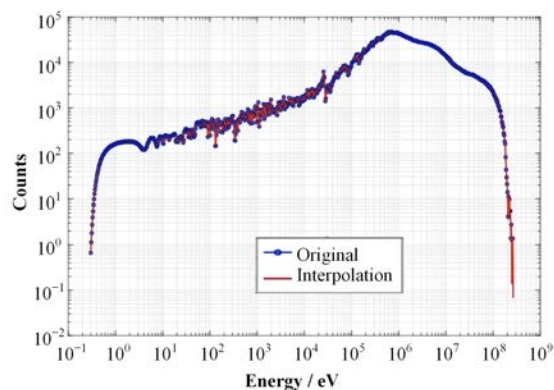


图5 中子能谱插值  
Fig.5 Neutron spectrum with interpolation

看到, $f_c$ 值随中子能量变化总体上趋于平稳,在 $1 \sim 10 \text{ eV}$ 处存在明显下降,这是由于在该能段,金对中子的吸收截面显著升高而导致的。在 $10 \text{ eV} \sim 10 \text{ keV}$ 能区,由于金对中子的吸收和散射截面在此处存在共振结构,从而导致 $f_c$ 值曲线在这一能区不够平坦和光滑。

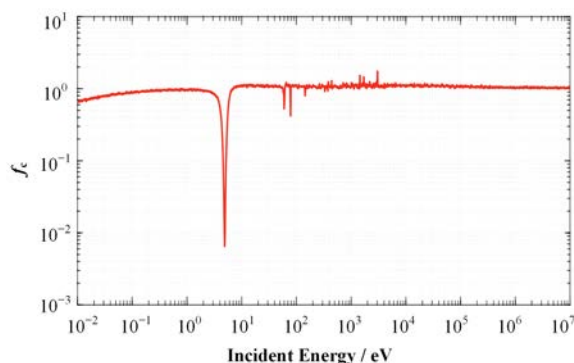


图6 不同入射中子能量下的 $f_c$ 值  
Fig.6  $f_c$  value in different incident neutron energy

### 3 结果与讨论

实验主要通过测量金靶( $^{197}\text{Au}$ )的标准中子俘获截面,检验和刻度本次实验的 $C_6D_6$ 探测器布局,验证脉冲高度权重技术处理中子俘获截面的方法在CSNS上应用的可靠性,发展一种CSNS反角白光中子源通用的中子俘获截面测量的数据处理方法,也将为后续的实验测量提供一些实验与数据处理中的经验作为参考,其中天然碳靶( $^{12}\text{C}$ )用来作为样品靶引起的散射中子本底扣除,空靶用来作为透射中子本底的扣除。

如前所述,实验进行了两次,分别采用了 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 与 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 。使用脉冲高度权重技术(Pulse Height Weighting Technique, PHWT)对



两次实验数据进行处理,并将处理结果与ENDF/B-VIII.0的评价数据库<sup>[29]</sup>进行了比对。将中子能量从 $1 \times 10^{-8}$  MeV到 $1 \times 10^{-1}$  MeV的能区分为1 150个能量箱,按照式(4)计算中子俘获产额并填充到能量箱中。图7展示了评价数据库与实验数据中子俘获产额的对比,其中黑色实线表示由ENDF/B-VIII.0中的截面数据经过式(5)计算得到的中子产额,两种圆

点数据分别表示计算了统计误差的 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的俘获产额和计算了统计误差的 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的俘获产额。可见具体到共振峰的位置,实验处理的数据点密度是可以提高的,这意味着要深入分析共振峰的结构和组成,可以进一步提高能量箱划分。

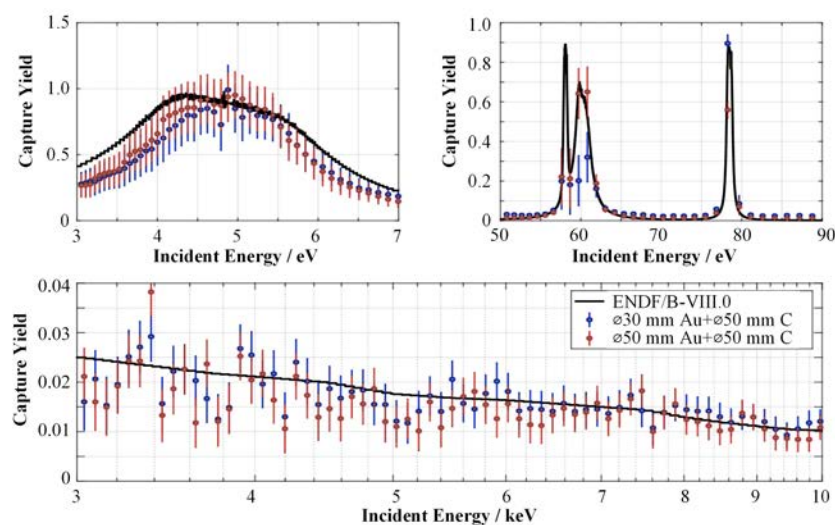


图7 金靶中子俘获产额测量值与评价值的比较

Fig. 7 Comparison between neutron capture yield measurements of Au target and data of ENDF/B-VIII.0

按照式(7)计算了两次实验的金靶中子俘获截面,并与统一到能量箱中的评价数据进行了整体的比较,得到结果如图8所示。图8(a)中线状曲线表示ENDF/B-VIII.0的评价数据,两种点状曲线分别为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的实验结果和 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的测量结果。图8(b)为两次实验结果与评价数据的相对误差,两种曲线分别为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的精度曲线和 $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的相对误差。

可以看到,在10 eV以下能区,两次实验数据与评价数据符合得较好, $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 在该能区的峰值附近的测量值与评价值偏差低至1%。在10~100 eV, $\varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm Au} + \varnothing 50 \text{ mm} \times 1 \text{ mm C}$ 的精度曲线较为平稳,峰值附近的测量值与评价值偏差低至1%。在0.1 keV~2 keV的共振能区,两次实验中共振峰的位置与评价数据一致,并且对峰值的测量误差明显小于谷的误差,值得注意的是,在该能区两次实验的测量误差均有明显的上升,我们认为这是由于本底扣除不干净导致测量的截面数据值提升,这里的本底主要是由靶散射中子和透射中子引起的,目前正在研究如何才能将这部分本底扣除的方法。在2 keV

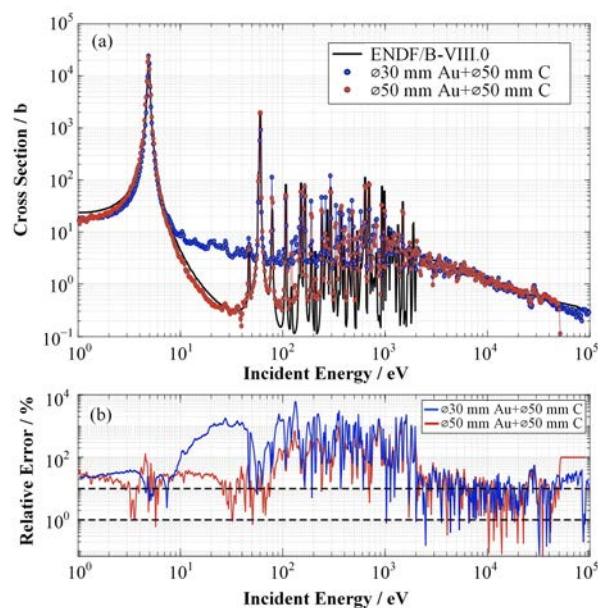


图8 金靶中子俘获截面测量值与评价值的比较(a)和测量值与评价值的相对误差(b)

Fig. 8 Comparison of measure Au neutron capture cross-section and evaluated data of ENDF/B-VIII.0 (a), relative error between measured value and evaluation data of ENDF/B-VIII.0 (b)

以上的能区,<sup>197</sup>Au中子俘获截面的数据和最新版的ENDF/B-VIII.0评价数据库一致,这一能区截面数据比较平坦,没有更多的共振峰贡献,两次实验的测量

误差有明显的降低,测量值与评价值的偏差普遍达到1%。

对比两次实验的结果,在峰值附近的测量没有太大区别,但是对于谷的测量, $\varnothing 50\text{ mm} \times 1\text{ mm Au} + \varnothing 50\text{ mm} \times 1\text{ mm C}$ 的结果明显优于 $30\text{ mm} \times 1\text{ mm Au} + \varnothing 50\text{ mm} \times 1\text{ mm C}$ 的结果,与前者相比,在进行 $\varnothing 30\text{ mm} \times 1\text{ mm Au} + \varnothing 50\text{ mm} \times 1\text{ mm C}$ 的实验测量时,质子束功率要低于前者的实验,同时 $^{197}\text{Au}$ 靶和 $^{12}\text{C}$ 靶的厚度相同但是直径不同, $^{197}\text{Au}$ 靶直径偏小。实验数据分析表明:会有更多的中子没有经过实验靶而直接进入束流最后端的中子捕集器中,这部分透射中子引起的 $\gamma$ 射线会导致较大的本底计数,而无法利用大直径的 $^{12}\text{C}$ 靶扣除掉,因此使得谷底截面数据抬高,较大的偏离了评价数据库的数据。从整体上看, $\varnothing 50\text{ mm} \times 1\text{ mm Au} + \varnothing 50\text{ mm} \times 1\text{ mm C}$ 的相对误差有明显的降低,其在谷位置处测量精度得到了有效的改善,这说明金靶和碳靶不一致的尺寸会带来本底扣除的困难。

通过两次金靶的截面数据分析,我们也可以看到在 $1\sim 30\text{ eV}$ 和 $10^2\sim 2\times 10^3\text{ eV}$ 能区,实验测量数据与ENDF/B-VIII.0评价数据还存在差距; $1\sim 30\text{ eV}$ 能区主要是由于环境本底的带来的误差,也就是无束流 $\gamma$ 本底;而 $10^2\sim 2\times 10^3\text{ eV}$ 能区主要是在束 $\gamma$ 带来的误差,这一部分的本底贡献是由于质子束轰击散裂靶产生的 $\gamma$ 射线带来的,也就是在束 $\gamma$ 本底,在CERN n\_TOF是通过铅靶来模拟扣除的,在这两次测量中,没有测量这两部分本底来源,通过这两次金靶实验测量的数据分析比较,也进一步了解了在束 $\gamma$ 本底的扣除在中子俘获截面共振区的重要性,因此考虑能否通过铅靶近似或者模拟计算等方法扣除;这两部分能区的本底来源扣除不干净而导致的截面误差可以从图7(b)中比较明显的看出。

由于使用脉冲高度权重技术的方法测量中子俘获截面是基于模拟的处理方法,因而对实验环境模拟的详细程度将会影响该方法的误差;同时,正如前文所述,由于PHWT方法基于只探测到一条级联 $\gamma$ 射线的前提,然而探测到一条以上级联发射的 $\gamma$ 射线的可能性是不可忽略的,这种影响取决于探测器的探测效率,级联的多样性以及较小程度取决于级联能量分布,已经有研究工作指出这种影响带来的系统误差小于1%<sup>[30]</sup>;由于内转换电子的发射可能导致级联 $\gamma$ 计数减少,在模拟中使用了包含内转换过程的简化模型的级联 $\gamma$ 发射程序,这部分将带来小于0.5%的系统误差<sup>[31]</sup>。2002年,Tain等<sup>[32]</sup>通过比较的 $^{56}\text{Fe}$ 中1.15 keV共振峰的中子宽度PHWT处理结果与实验结果,得出PHWT的系统误差为2%~3%的

结论。

利用 $\text{C}_6\text{D}_6$ 测量白光中子源的中子俘获截面,通过对金靶( $^{197}\text{Au}$ )标准截面的测量和分析,能够明确的分析和估算实验中的本底来源,检验实验设计和数据测量的可靠性。通过脉冲高度权重技术处理中子俘获截面的方法,在CSNS反角白光中子源上采用 $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测器测量中子俘获截面是可靠且有效的。但是随着束流功率的提升、实验室探测器周边环境的越来越复杂和实验采用同位素靶的越来越薄,大量透射中子进入中子捕集器和靶上散射中子引起的 $\gamma$ 本底会越来越难以扣除,同时束内 $\gamma$ 射线的扣除也还未能很好的解决。这些因素对于未来的低于100 mb的中子俘获截面的测量带来很大的挑战,还需要进一步研究不同本底扣除方法和降低周边环境的不利影响。通过两次对金靶的刻度测量,我们对于在CSNS Back-n靶站上进行中子俘获截面测量实验,有以下经验和建议:

1)实验选用的目标靶与用于本底扣除的天然碳靶的尺寸(厚度和直径)尽可能保持一致,否则会导致估计截面的大幅度抬升;实验必须测量一定时间的空靶数据,才能有效的扣除透射中子引起的本底贡献,随着同位素实验靶的采用,样品厚度越来越薄,这种透射中子的本底影响会越来越高,扣除的困难也越来越大。

2)实验误差来源于样品靶参数、中子能谱、环境因素、权重函数的计算等多个方面,利用金靶( $^{197}\text{Au}$ )的标准截面去确认和检验本次实验本底的来源和扣除比例,是有益的。同时也要考虑束内 $\gamma$ 、空气散射中子、环境空旷度的误差来源的扣除办法,才能有效和全面地扣除本底的影响,提高中子俘获截面的数据处理的可靠性,获得高精度、低截面值的中子俘获截面数据,为中子核技术的应用提供高质量的核数据。

综上所述,在CSNS反角白光中子源(Back-n)上采用 $\text{C}_6\text{D}_6$ 探测器和脉冲高度权重技术处理中子俘获截面的方法是可行且有效的。

**致谢** 感谢张桂林研究员对本工作的指导与督促,感谢CSNS和Back-n工作人员的值班和技术支持,感谢李光明先生、肖高亚女士、李欣雨女士对本工作的支持。

## 参考文献

- 1 韦杰. 中国散裂中子源简介[J]. 现代物理知识, 2007, 19(6): 22-29. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2007.06.002.  
WEI Jie. Brief introduction of CSNS[J]. Modern Physics, 2007, 19(6): 22-29. DOI: 10.13405/j.cnki.xdwz.2007.

- 06.002.
- 2 Chen H S, Wang X L. China's first pulsed neutron source [J]. *Nature Materials*, 2016, **15**(7): 689 – 691. DOI: 10.1038/nmat4655.
  - 3 Yu J B, Chen J X, Kang L, *et al.* Thermal analysis and tests of W/Cu brazing for primary collimator scraper in CSNS/RCS[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, **28**(4): 46. DOI: 10.1007/s41365-017-0208-9.
  - 4 Jin X M, Liu Y, Su C L, *et al.* Ionizing and non-ionizing kerma factors in silicon for China Spallation Neutron Source neutron spectrum[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2019, **30**(9): 143. DOI: 10.1007/s41365-019-0664-5.
  - 5 Xiao R, Liu Y F, Ni X J, *et al.* Spin polarization and production rate studies of surface muons in a novel solenoid capture system based on CSNS[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2017, **28**(8): 109. DOI: 10.1007/s41365-017-0261-4.
  - 6 程贺, 张玮, 王芳卫, 等. 中国散裂中子源的多学科应用 [J]. *物理*, 2019, **48**(11): 701 – 707. DOI: 10.7693/wl20191101.  
CHENG He, ZHANG Wei, WANG Fangwei, *et al.* Applications of the China spallation neutron source[J]. *Physics*, 2019, **48**(11): 701 – 707. DOI: 10.7693/wl20191101.
  - 7 穆奇丽, 周路平, 敬罕涛, 等. CSNS 简化实验缪子源的靶区物理研究[J]. *核技术*, 2019, **42**(12): 120502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.120502.  
MU Qili, ZHOU Luping, JING Hantao, *et al.* Physical study on target area of simplified experimental muon source at CSNS[J]. *Nuclear Techniques*, 2019, **42**(12): 120502. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.120502.
  - 8 Tang J Y, Fu S N, Jing H T, *et al.* Proposal for muon and white neutron sources at CSNS[J]. *Chinese Physics C*, 2010, **34**(1): 121–125. DOI: 10.1088/1674-1137/34/1/022.
  - 9 An Q, Bai H Y, Bao J, *et al.* Back-n white neutron facility for nuclear data measurement at CSNS[J]. *Journal of Instrumentation*, 2017, **12**: 7 – 22. DOI: 10.1088/1748-0221/12/07/P07022.
  - 10 Jing H T, Tang J Y, Tang H Q, *et al.* Studies of back-streaming white neutrons at CSNS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2010, **621**: 91–96. DOI: 10.1016/j.nima.2010.06.097.
  - 11 唐靖宇, 樊瑞睿, 封常青, 等. 中国第一台高性能白光中子源: CSNS 反角白光中子源及其应用[J]. *原子能科学技术*, 2019, **53**(10): 2012–2022. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0431.
  - TANG Jingyu, FAN Ruirui, FENG Changqing, *et al.* China's first high-performance white neutron source: CSNS back-n white neutron source and application[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, **53**(10): 2012–2022. DOI: 10.7538/yzk.2019.youxian.0431.
  - 12 Bohr N. Neutron capture and nuclear constitution[J]. *Nuclear Reactions*, 1970: 152–164. DOI: 10.1016/B978-0-08-006630-1.50012-X.
  - 13 Panov I V, Korneev I Y, Rauscher T, *et al.* Neutron-induced astrophysical reaction rates for translead nuclei [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, **513**: A61. DOI: 10.1051/0004-6361/200911967.
  - 14 柳卫平, 李志宏, 郭冰, 等. 我国核天体物理前沿科学问题研究进展[J]. *中国科学基金*, 2018, **32**(2): 125–130. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2018.02.001.  
LIU Weiping, LI Zhihong, GUO Bing, *et al.* Progress of nuclear astrophysics in China[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2018, **32**(2): 125–130. DOI: 10.16262/j.cnki.1000-8217.2018.02.001.
  - 15 鲍杰, 任杰, 栾广源, 等. 基于中国散裂中子源的核数据测量[R]. *中国原子能科学研究院年报*, 2017: 91–92.  
BAO Jie, REN Jie, LUAN Guangyuan, *et al.* Measurement of nuclear data based on Chinese spallation neutron source[R]. *Annual Report of China Institute of Atomic Energy*, 2017: 91–92.
  - 16 Borella A, Aerts G, Gunsing F, *et al.* The use of C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> detectors for neutron induced capture cross-section measurements in the resonance region[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2007, **577**(3): 626 – 640. DOI: 10.1016/j.nima.2007.03.034.
  - 17 Plag R, Heil M, Käppeler F, *et al.* An optimized C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> detector for studies of resonance-dominated (n,  $\gamma$ ) cross-sections[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, **496**(2–3): 425 –436. DOI: 10.1016/S0168-9002(02)01749-7.
  - 18 Lee J, Hori J I, Nakajima K, *et al.* Neutron capture cross section measurements of <sup>151,153</sup>Eu using a pair of C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> detectors[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2017, **54**(10): 1046 – 1057. DOI: 10.1080/00223131.2017.1344575.
  - 19 Mingrone F, Massimi C, Altstadt S, *et al.* Measurement of the <sup>238</sup>U radiative capture cross section with C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> at the



- CERN n\_TOF facility[J]. Nuclear Data Sheets, 2014, **119**: 18–21. DOI: 10.1016/j.nds.2014.08.007.
- 20 Liu X Y, Yang Y W, Liu R, *et al.* Measurement of the neutron total cross section of carbon at the Back-n white neutron beam of CSNS[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**(9): 139. DOI: 10.1007/s41365-019-0660-9.
- 21 Ren J, Ruan X C, Bao J, *et al.* The C<sub>6</sub>D<sub>6</sub> detector system on the Back-n beam line of CSNS[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2019, **3**(3): 52. DOI: 10.1007/s41605-019-0129-8.
- 22 EJ-315. EljenTechnology website[EB/OL]. 2019-10-11. <https://eljentechnology.com>.
- 23 Gibbons J H, Macklin R L. Neutron capture cross-sections and the s-process[J]. Origin and Distribution of the Elements, 1968: 43 – 62. DOI: 10.1016/B978-0-08-012835-1.50008-8.
- 24 Tain J L, Gunsing F, Aniel-Cano D, *et al.* Accuracy of the pulse height weighting technique for capture cross section measurements[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, **39**(sup2): 689 – 692. DOI: 10.1080/00223131.2002.10875193.
- 25 鲍杰, 陈永浩, 张显鹏, 等. 中国散裂中子源反角白光中子束流参数的初步测量[J]. 物理学报, 2019, **68**(8): 38–47. DOI: 10.7498/aps.68.20182191.
- BAO Jie, CHEN Yonghao, ZHANG Xianpeng, *et al.* Experimental result of back-streaming white neutron beam characterization at Chinese spallation neutron source [J]. Acta Physica Sinica, 2019, **68**(8): 38–47. DOI: 10.7498/aps.68.20182191.
- 26 任杰. 基于白光中子源的中子辐射俘获反应截面测量技术研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2018. DOI: 10.1186/1753-6561-7-S6-P26.
- REN Jie. Study on measurement technology of neutron capture cross section based on white light neutron source [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2018. DOI: 10.1186/1753-6561-7-S6-P26.
- 27 Geant4 Collaboration. GEANT4 user's guide for application developers (version: 10.2) [EB/OL]. 2015-12-04. <http://geant4.cern.ch>.
- 28 Yamamoto S, Kobayashi K, Fujita Y. Application of BGO scintillators to absolute measurement of neutron capture cross sections between 0.01 eV and 10 eV[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1996, **33**(11): 815–820. DOI: 10.1080/18811248.1996.9732014.
- 29 ENDF collaboration, evaluated nuclear data file (ENDF/B-VIII.0)[EB/OL]. 2019-12-21. <https://www.nndc.bnl.gov>.
- 30 Fioni G. Resonance neutron capture in Fe and Ni below 300 keV[D]. Belgium: Gent University, 1991.
- 31 Corvi F, Fioni G, Gasperini F, *et al.* The weighting function of a neutron capture detection system[J]. Nuclear Science and Engineering, 1991, **107**(3): 272–283. DOI: 10.13182/nse91-a23790.
- 32 Tain J L, Gunsing F, Aniel-Cano D, *et al.* Accuracy of the pulse height weighting technique for capture cross section measurements[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2002, **39**(sup2): 689 – 692. DOI: 10.1080/00223131.2002.10875193.