

文章编号: 1007-4627(2016)03-0308-07

## 光中子源上吸收片功能研究

朱亮<sup>1,2</sup>, 刘龙祥<sup>1,3</sup>, 王宏伟<sup>1,3</sup>, 马余刚<sup>1</sup>, 李琛<sup>1,3</sup>, 张国强<sup>1,3</sup>, 张松<sup>1</sup>, 钟晨<sup>1</sup>,  
曹喜光<sup>1,3</sup>, 张桂林<sup>1</sup>, 陈金根<sup>1,3</sup>, 蔡翔舟<sup>1,3</sup>, 韩建龙<sup>1</sup>, 胡继峰<sup>1</sup>, 王小鹤<sup>1</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. 中国科学院核辐射与核能技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要:** 15 MeV 电子直线加速器驱动的光中子源装置, 将用于中国科学院战略性先导科技专项“钍基熔盐堆”中的核数据初步测量工作、中子探测器的研制和反应堆相关材料的辐照研究等。光中子源的中子能谱是连续的, 中子能量通过中子飞行时间法测量得到, 需要利用吸收片确认中子吸收峰, 刻度飞行时间, 计算等效飞行距离, 扣除实验本底等, 而实验本底的扣除对最终总截面计算有很大的影响。因此通过 Geant4 蒙特卡罗模拟软件构建了包括中子源、吸收片在内的模拟实验环境; 研究了不同吸收片的吸收谱和吸收片厚度的关系, 同理论计算值进行了比较, 给出了推荐的吸收片厚度值; 模拟计算了中子飞行时间谱, 并和实验测量结果比较, 确定中子等效飞行距离为 5.70 m。Geant4 的理论计算也可以模拟出多吸收片本底函数曲线, 可用于实验数据的本底扣除和误差分析。实验测量、模拟分析以及理论公式计算的吸收片厚度和中子飞行时间参数得到了完全一致的结果, 验证了实验测量的可靠性。

**关键词:** 中子吸收片; Geant4; 模拟计算; 蒙特卡罗

**中图分类号:** O571.53      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/ NuclPhysRev.33.03.308

### 1 引言

中国科学院战略性先导科技专项“未来先进核裂变能——钍基熔盐堆核能系统”(Thorium Molten Salt Reactor Nuclear Energy System, TMSR)项目于 2011 年正式启动<sup>[1-5]</sup>, 开启了国家未来对钍资源利用的一个新途径的研究。TMSR 项目将设计建造一台 15 MeV 电子加速器驱动的中子物理仿真实验装置, 又称为光中子源(Photo-Neutron source-phase1, PNS1), 利用强流电子直线加速器, 通过电子韧致辐射伽玛-中子源及飞行时间(Time Of Flight, TOF)测量技术, 开展钍基熔盐堆相关的 Th-U 反应链核数据(中子反应总截面、俘获截面测量)的初步研究, 以及中子、伽玛的辐射防护技术、材料辐照性能等方面的研究。PNS1 中子源装置理论上可以产生 0.025 eV 到 15 MeV 能区的宽能中子谱, 实验上由于中子飞行距离的限制( $\leq 6.0$  m)和韧致辐射伽玛闪烁信号宽度的影响, 实际能测量的能区在热中子至 100 eV 范围<sup>[6]</sup>, 进一步降低 TOF 探测器光电

管 PMT 信号响应的影响, 可以达到 keV 的能量范围。

中子能量  $E_n$  (单位: eV) 通过 TOF 方法来测量(参见公式(1)), 等效飞行距离  $L_{\text{eff}}$  (单位: m) 包括中子慢化时间对应的长度和实际飞行管道对应的长度之和, 起始时间由加速器高频 RF 信号或者由电子在中子产生靶(钨靶, 尺寸为 60 mm×48 mm)上的伽玛闪烁信号前沿得到, 终止时间由 TOF Detector 给出。其中, TOF 单位为  $\mu\text{s}$ 。

$$E_n = (72.3 \times L_{\text{eff}} / \text{TOF})^2. \quad (1)$$

中子 TOF 由两个信号的时间差计算得到, 总飞行距离  $< 6$  m。中子反应靶及吸收片(Samples)位于中子飞行路径的中间位置, 约 2.85 m 处, Monitor 探测器用于环境中子本底监控探测器。中子在低真空管道中传输, 管道真空  $2 \times 10^{-1}$  Pa, 实验装置如图 1 所示。

实验中, 需要使用合适厚度的中子吸收片才能准确刻度中子能量和飞行时间的关系, 确定中子  $L_{\text{eff}}$ , 以及估算实验中的中子本底情况<sup>[7-9]</sup>。中子总截面测量实验

收稿日期: 2015-10-30; 修改日期: 2015-12-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA02010100); 国家自然科学基金资助项目(11475245); 国家自然科学基金青年项目(11305239)

作者简介: 朱亮(1987-), 男, 江苏太仓人, 在读博士, 从事粒子物理与原子核物理研究; E-mail: zhuliang@sinap.ac.cn

通信作者: 王宏伟, E-mail: wanghongwei@sinap.ac.cn.

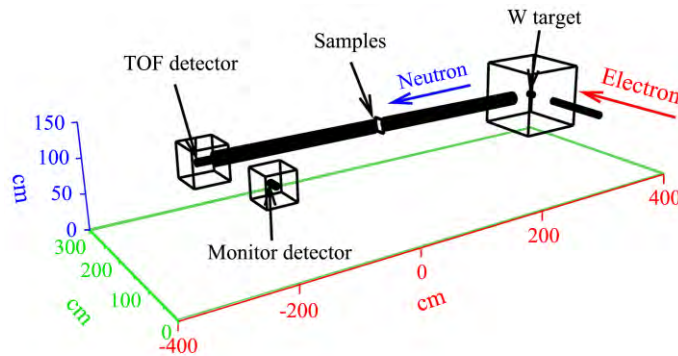


图 1 (在线彩图) 探测器布局与吸收片位置

中，吸收片有两种作用：Black Resonance(BR)和 Anti-Overlap(AO)；BR吸收片为含有适当厚度的多种同位素材料，选择性吸收中子束流中特定的能量形成共振吸收峰，具有特定 TOF (飞行距离固定)，而吸收峰的顶点位置即表示环境本底的大小，能量依赖的本底如图 2 中的红线所示<sup>[8]</sup>，其主要功能：利用中子吸收片的已知共振吸收峰来刻度 TOF；确定实验测量的环境本底，在中子反应总截面测量时需要扣除本底以得到准确的实验计数结果。而 AO 吸收片通过在中子束线上放置硼或镉以消除每次脉冲中最慢的中子，防止本次脉冲产生的慢中子与下一次脉冲的快中子交叠；在 PNS1 装置中，即使最高频率 266 Hz 也不足造成能量 1 keV 以下慢中子和热中子 TOF 的交叠，因此本文的吸收片均指 BR 吸收片。

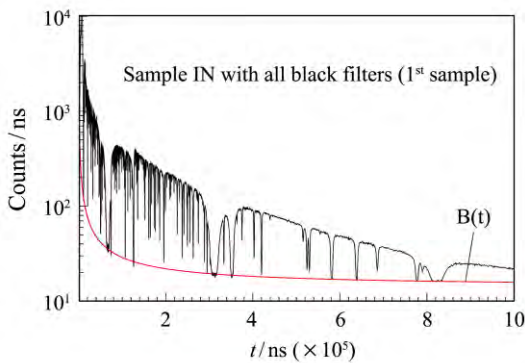


图 2 (在线彩图) 吸收片的共振峰与本底刻度(取自文献[8])

纯同位素吸收片的吸收厚度可以通过以下方法计算得到：设中子与样品靶核作用的全截面为  $\sigma$ ，样品单位体积内原子数为  $N$ ，厚度为  $d$ ，则作用几率  $T = \sigma Nd$ ；透射率为中子束强度  $I$  与初始强度  $I_0$  之比

$$I/I_0 = e^{-\sigma Nd} = e^{-T}, \quad (2)$$

选取适当的吸收片厚度  $d$ ，令  $T \geq 5$  即可使中子在对应共振能量上的透射率小于  $10^{-2}$ ，即  $e^{-T} = 0.0067^{[10]}$ ，

只有吸收片厚度大于这个数值时，就认为吸收峰达到了极值点，而该点下的其它中子均认为来自于本底的贡献。同时，吸收片的吸收峰参数用来刻度 TOF 谱，对于确认吸收片特征吸收峰位置，确定中子  $L_{eff}$  等具有重要的作用。吸收片的最佳厚度数据也可以采用蒙特卡罗(MC)方法进行模拟计算，因此吸收片的厚度模拟分析为理论计算值提供验证和对照，也为实验测量提供了有效的数据参照。较常用的 MC 粒子运输模拟软件有 Geant4<sup>[11]</sup>，MCNP<sup>[12]</sup>，EGS<sup>[13]</sup>等，其中 Geant4 为本文所采用。该软件是 CERN 开发的基于面向对象语言 C++ 编写的通用程序包，加入了最新的截面数据库，可以模拟已知粒子与探测器介质之间的各种相互作用，方便跟踪特定粒子的物理过程并获得其位置能量能损、动量等诸多有用信息，提高物理模拟效率，功能最为全面。同时，Geant4 完全开放源代码，用户可以根据实际需要进行更改、扩充，具有良好的通用性和扩展能力。

本文首先介绍中子源实验测量系统以及中子吸收片的选择，之后利用 Geant4 建立中子吸收片的模拟计算环境，得到不同材料吸收片的参照厚度数据，并与公式计算数据做了对比，确定推荐吸收片厚度值；最后对实验测量的吸收片中子 TOF 谱和模拟计算结果进行比较，确认吸收峰位置，验证模拟计算的准确性。吸收片的计算和分析为中子截面数据测量实验提供了很好的参考。

## 2 吸收片材料选择

中子吸收片主要选择一些高纯度的天然靶材料，这些材料在某些能量值上对中子的共振吸收截面很大。利用这一特点，实验可以得到中子的绝对能量和 TOF 的确定关系，同时可以确定环境中子本底，在中子反应总截面测量时合理扣除本底以得到准确的结果。中子吸收片的选择需要满足 2 个方面的实验需求，一是中子的共振吸收峰可以很好地覆盖实验测量的能量区。这就要求

选用不同种类且达到足够厚度的吸收片,能完全吸收多个特定能量值的中子。例如 n\_TOF<sup>[7]</sup>、GELINA<sup>[8]</sup>、PNF<sup>[9]</sup>等中子源装置的采用的中子吸收片材料有镉、

铟、银、钨、钼、钴等中子共振材料,分别在 0.177, 1.457, 5.19, 18.8, 44.9, 132 eV 中子能量上有很好的吸收作用。常用的吸收片材料如表 1 所列。

表 1 常用的中子吸收片材料数据

天然材料	同位素质量分数	吸收峰能量/eV
Cd/镉	<sup>110</sup> Cd 12.39, <sup>111</sup> Cd 12.75, <sup>112</sup> Cd 24.07, <sup>113</sup> Cd, 12.26, <sup>114</sup> Cd 28.86, <sup>116</sup> Cd 7.58	0.177( <sup>113</sup> Cd)
In/铟	<sup>113</sup> In 4.28, <sup>115</sup> In 95.72	1.457, 3.86, 9.12( <sup>115</sup> In)
Ag/银	<sup>107</sup> Ag 51.82, <sup>109</sup> Ag 48.18	5.19( <sup>109</sup> Ag)
W/钨	<sup>180</sup> W 0.13, <sup>182</sup> W 26.3, <sup>183</sup> W 14.3, <sup>184</sup> W 30.7, <sup>186</sup> W 28.5	18.84( <sup>186</sup> W)
Mo/钼	<sup>92</sup> Mo 15.84, <sup>94</sup> Mo 9.04, <sup>95</sup> Mo 15.72, <sup>96</sup> Mo 16.53, <sup>97</sup> Mo 9.46	44.7( <sup>95</sup> Mo)
Au/金	<sup>197</sup> Au 100	60.3( <sup>197</sup> Au)
Ge/锗	<sup>70</sup> Ge 20.7, <sup>72</sup> Ge 27.5, <sup>73</sup> Ge 7.7, <sup>74</sup> Ge 36.4, <sup>76</sup> Ge 7.7	102.0( <sup>73</sup> Ge)
Co/钴	<sup>59</sup> Co 100	132.0( <sup>59</sup> Co)
Mn/锰	<sup>55</sup> Mn 100	337.0( <sup>55</sup> Mn)
Bi/铋	<sup>209</sup> Bi 100	800.0( <sup>100</sup> Bi)
Na/钠	<sup>23</sup> Na 100	2 850.0( <sup>23</sup> Na)
Al/铝	<sup>27</sup> Al 100	5 904.68( <sup>27</sup> Al)
S/硫	<sup>32</sup> S 95.0, <sup>33</sup> S 0.75, <sup>34</sup> S 4.2	102 900( <sup>32</sup> S)

另一方面,要利用中子吸收峰进行吸收片特征吸收峰的辨识及实验测量本底的确定,就要求吸收片的厚度适当。实验测量结果中往往包含多个吸收峰,特别是为了节省时间多个吸收片联合使用时,相邻较弱吸收峰的辨认就变得异常困难;另外,如果吸收片过厚,使得特征吸收峰展宽太多,会造成 TOF 数值确定的误差较大,进而影响实验测量的精度。但是,实际实验中往往需要多个吸收片同时使用,不同厚度材料对中子会有慢化吸收作用,在材料厚度较高时尤为显著,这会导致吸收峰位置有微小的偏移,以及相邻峰位叠加而发生变化或难以辨识,在对数坐标下的这些微小变化导致 TOF 的标定误差过大,影响能谱的精确测量。因此模拟分析和理论计算结果同实验测量相互检验和验证,对于实验的指导和顺利实施具有重要的作用,对于 keV 以下光中子源测量系统,选用镉、铟、银、钨、钼、金、锗、钴、锰、

铋、铝等材料作为吸收片,并采用 MC 软件 Geant4 进行模拟计算。

### 3 Geant4 模拟计算结果

本文使用的 Geant4 版本为 4.9.5。实验设定为最左侧放置中子源(Source),中间放置吸收片(Target/Sample),右侧放置探测器(Tracker)。实验空间(World)是边长为 8 m 的立方体,内部是真空。吸收片面积为 6 cm×6 cm,材料、厚度可变;中子源由 General Particle Source(GPS)模块<sup>[15]</sup>产生,使用面源直径 5 cm,从距离吸收片左侧约 1 m 处向右照射;探测器尺寸 6 cm×6 cm,长度 6 cm,距离吸收片 6 m。由于仅记录中子数,内部也是真空。模拟环境布局如图 3 所示,为便于观察,图 3(a)吸收片(除厚度)和探测器尺寸均扩大了 10 倍。

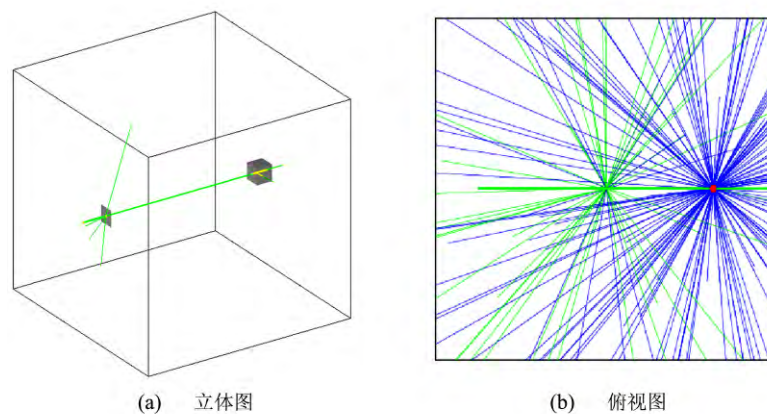


图 3 (在线彩图) 模拟环境布局

### 3.1 均匀分布的慢中子吸收测试

为模拟测量系统的中子源(实际的中子源分布在直径 50 mm 的孔径内), 首先采用简化的中子源, 即设定直径 50 mm 的面源, 以天然材料银为例, 中子能量均匀分布在 1 eV 到 10 eV 区间内, 能量区间内平均事件数为  $1 \times 10^5$ 。模拟结果如图 4 所示, 调整材料厚度分别为 0.05, 0.1, 0.15 mm 等, 观察被吸收的中子变化。在厚度约为 0.05 ~ 0.1 mm 时吸收峰处的中子被完全吸收, 因此对于每个能量区间  $10^5$  的中子通量条件下, 银吸收片的最佳厚度为 0.05 ~ 0.1 mm。

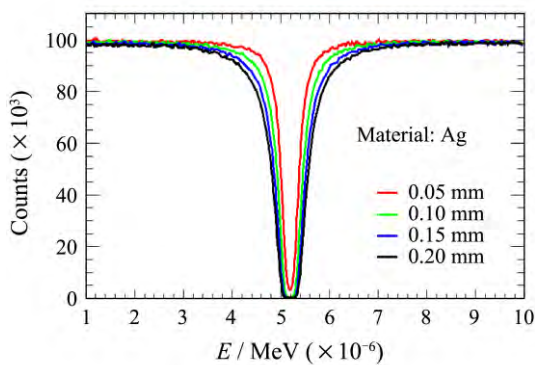


图 4 (在线彩图) 中子经过不同厚度的银材料吸收片后的计数变化

中子 TOF 范围设置在 10 ~ 600  $\mu\text{s}$ , 经过 0.2 mm 钢吸收片, 模拟总事件数为  $8 \times 10^5$ 。中子 TOF 谱变化如图 5 所示, 其中黑线为输入的均匀分布中子 TOF 谱, 红色为经过钢吸收片以后的中子 TOF 谱, 图中显

示 9.04, 3.86, 1.457 eV 等 3 条吸收峰, 在中子飞行距离为 5.7 m 的条件下分别对应中子 TOF 等于 137, 209, 341  $\mu\text{s}$ , 和公式 (1) 计算的数值一致, 检验和验证了 Geant4 模拟计算的正确性。其中两条较弱的吸收峰只有在较高的统计和分辨条件下才能够出现。

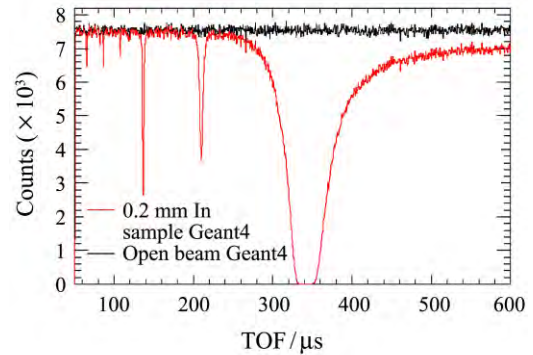


图 5 (在线彩图) 中子经 0.2 mm 钢吸收片的计数变化

通过上述方法, 计算得到所选用的各种天然材料在共振吸收峰处的建议厚度, 总结如表 2 所列, 其中公式计算厚度采用条件  $T = 5$ ,  $e^{-5} = 0.0067$ , 纯同位素材料时的计算结果。实验测量和模拟计算中使用的吸收片通常是纯度很高的天然金属材料, 对于一种元素可能含有多种同位素。而对于中子吸收截面贡献大的可能是其中一种同位素。同时由于 Geant4 模拟时步长的选择等原因, 模拟的天然材料厚度对中子的吸收会较理论计算值 ( $T = 5$ ) 稍有偏高。表 2 的建议厚度值为  $T = 5$  到  $T = 10$  的吸收片厚度值范围。

表 2 测量系统所用材料的吸收峰与建议厚度

天然材料	共振吸收峰/eV	公式计算厚度/mm	模拟分析厚度/mm	建议厚度/mm
Cd/镉	0.17	0.148	0.12	0.15 - 0.30
In/铟	1.46	0.045	0.05	0.05 - 0.09
Ag/银	5.19	0.076	0.10	0.08 - 0.14
W/钨	18.8	0.027	0.10	0.03 - 0.06
Mo/钼	44.9	0.401	0.50	0.50 - 0.80
Au/金	60.2	0.150	0.20	0.15 - 0.30
Ge/锗	102.0	1.516	1.70	1.60 - 3.00
Co/钴	132	0.053	0.10	0.06 - 0.11
Mn/锰	337	0.195	0.20	0.20 - 0.39
Bi/铋	800	1.022	1.00	1.10 - 2.04
Al/铝	5904.68	8.040	8.00	8.10 - 16.9

### 3.2 光中子源吸收片实验测量

光中子源装置进行了试车运行, 实验中准直器限制中子出射面积(束斑)为直径 50 mm, 采用  $^6\text{LiF}(\text{ZnS})$  热中子探测器, 直径 50 mm, 厚度 0.5 mm, 对于热中子及慢中子的探测器效率为 70% 左右, 中子通过 0.2 mm

钢吸收片后被  $^6\text{LiF}(\text{ZnS})$  中子探测器记录, 实验同时测量了钢靶(0.2 mm 厚度, 99% 纯度, 以 1.457 eV 处完全吸收为例), 镉靶(0.125 mm 厚度, 99% 纯度, 吸收峰 0.177 eV), 空靶和 Block-off 靶(12 cm 厚度 5% 含硼聚乙烯, 作为实验测量的本底计数), 测量结果如图 6 所示, 图中同时也给出了 Geant4 模拟分析结果作为对比,



Geant4 模拟计算采用实验测量条件下的修正中子 TOF 谱作为输入, 该谱是空靶 TOF 谱减去 Block-off 的 TOF 谱, 即认为 Block-off 谱是完全来自于本底中子的贡献, 而修正中子 TOF 谱主要来自于光中子源的贡献。

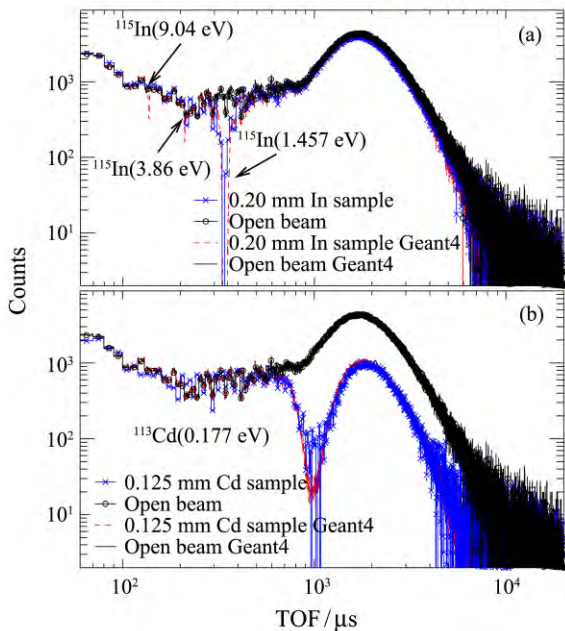


图 6 (在线彩图) 光中子源的 0.2 mm 铟(a)和 0.125 mm 镉(b)吸收片后的计数变化

Geant4 模拟分析的一个重要作用就是确认吸收片共振峰的位置, 实验测量常常需要积累大量的数据后才能看到明显的 TOF 谱及吸收峰位置, 尤其对中子能量范围跨度非常大的测量来说, 测量时间需要累积几个小时以上, 同时由于统计的原因, 使得一些截面较低的特征峰无法辨识清楚, 而模拟分析可以使得在辨认出主吸收峰以后, 准确的辨别其它较弱的吸收峰位置, 因此 MC 模拟分析研究对于准确判断实验测量结果具有重要的指导意义。

由于中子经过慢化体慢化以后, 再经过确定尺寸的飞行管道到达探测器, 其  $L_{eff}$  需要刻度后得到, 模拟中需要调整飞行距离参数, 才能使实验测量结果和 Geant4 模拟结果重合, 这样就从模拟中直接设定  $L_{eff}$  参数, 并可以和实验测量的吸收峰参数(能量和 TOF) 计算出来的  $L_{eff}$  比较, 从图 6 的模拟分析中提取中子  $L_{eff}$  为 5.70 m; 实验测量的中子通过 0.2 mm 铟吸收片后记录到了 1.457, 3.86 和 9.04 eV 的吸收峰以及 0.125 mm 镉吸收片的 0.177 eV 吸收峰, 分别对应 341, 209, 137 和 980  $\mu s$ , 利用公式 (1) 也可以计算得到 5.70 m 的  $L_{eff}$ (表 3), 实际测量中子产生靶到中子 TOF 探测器的距离为 6.30 m, 扣除中子由产生靶中

飞出以及 10 cm 聚乙烯慢化所对应的路径长度 0.60 m (由 Geant4 模拟计算确定), 也得到  $L_{eff}$  为 5.70 m。

表 3 TOF(公式(1))计算得到的  $L_{eff}$

吸收片材料	吸收峰能量 /eV	测量的 TOF / $\mu s$	$L_{eff}/m$
Cd/镉	0.177	980 $\pm$ 10	5.70 $\pm$ 0.06
In/铟	1.457	341 $\pm$ 10	5.69 $\pm$ 0.17
	3.86	209 $\pm$ 10	5.68 $\pm$ 0.27
	9.04	137 $\pm$ 10	5.70 $\pm$ 0.42

从图 6 中可以看到实验测量和模拟分析的 TOF 谱完全重合, 吸收峰的位置也完全对应, 中子的  $L_{eff}$  为 5.7 m, 和理论估算值一致, 因此进一步验证和模拟结果的准确性和实验测量结果的合理性; 但是由于试运行实验测量数据时间只有 40 min 而且经过较大的并道因子后, 9.04 eV 的吸收峰不明显; 图中实验测量曲线(蓝色曲线)没有完全吸收, 而 Geant4 模拟显示 0.2 mm 铟已经完全吸收, 这表明我们采用 12 cm 的含硼聚乙烯材料测量结果不能完全的作为本底条件, Geant4 模拟其吸收效率在 95% 以上, 但是仍然有部分的环境本底中子存在, 因此还需要进一步降低加速器束流损失, 提高探测器的屏蔽, 提高数据测量的精度和数据统计量。

图 7 中黑色曲线为试运行实验测量的空靶中子 TOF 谱, 作为 Geant4 输入能谱, 红色为采用表 2 推荐厚度 0.125 mm 镉、0.05 mm 铟、0.15 mm 银吸收片时, 由 Geant4 计算得到的多吸收片条件下吸收谱本底情况, 蓝色曲线为拟合全吸收峰底得到的本底函数曲线 ( $y = y_0 + A_1 \exp(x/t_1) + A_2 \exp(x/t_2)$ ), 本底函数曲线以下则为环境本底的贡献; 类似于图 2 所示的本底刻度方法, 在 15 MeV 电子直线加速器驱动的光中子源装置上测量到较精确的空靶 TOF 谱后, 在某些特定的能区如果没有合适厚度的吸收片材料用于实验测量, 也可以通过 MC 模拟分析来扣除本底中子的贡献, 用于实验数据的本底扣除和误差分析, 可以大大减少本底刻度所

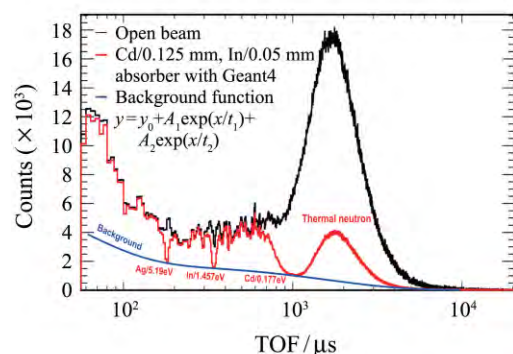


图 7 (在线彩图) Geant4 模拟的多吸收峰及本底函数拟合

占用的大量束流时间, 而且模拟计算结果还有效地避免了多吸收片厚度叠加带来的吸收峰偏移影响, 提高测量精度。

## 4 结论

本文介绍了中国科学院上海应用物理研究所钍基熔盐堆 (TMSR) 项目的白光中子源 (PNS1) 装置, 实验测量系统以及所用中子吸收片的设计。通过 Geant4 模拟计算不同吸收片对中子的吸收峰和吸收厚度分析, 得到了可用于中子能量和 TOF 刻度的吸收片厚度推荐值; 刻度及模拟计算提取了中子  $L_{\text{eff}}$  为 5.70 m; Geant4 模拟结果和光中子源实验测量比较验证了模拟计算的一致性和实验测量的可靠性, 说明 Geant4 可以用于光中子源的中子物理实验测量的模拟。由于 Geant4 在探测器模拟方面具有较大优势, 我们可以基于 Geant4 建立一个完整的模拟系统, 为中子物理实验测量提供很好的参考; 进一步工作将提高 Geant4 的模拟条件和中子实际能谱分布, 以期更好地标定中子源。另外, 考虑将实验测量中的探测器系统, 周边环境因素和多吸收片条件逐步添加到模拟计算中, 让模拟计算的结果可以更准确地反映实验测量情况, 为实验设计工作提供更好的参考。

**致谢** 衷心感谢上海光源自由电子激光部直线加速器运行人员, 感谢中国科学院上海应用物理研究所公用设施部、技术安全部, 核安全与工程技术部、反应堆工程一部等部门同事的大力支持和协助等。

## 参考文献:

- [1] JIANG Mianheng, XU Hongjie, DAI Zhimin. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, **27**(3): 366. (in Chinese) (江绵恒, 徐洪杰, 戴志敏. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 366.)
- [2] CAI J, XIA X B, CHEN K, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(3): 030602.
- [3] ZHU L, PU P, DU S, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(2): 020601.
- [4] CHENG M S, DAI Z M. Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010601.
- [5] ZHOU X M, LIU G M, LI D, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2014, **25**(1): 010603.
- [6] WANG Hongwei, CHEN Jingen, CAI Xiangzhou, *et al.* Nuclear Science and Techniques, 2014, **37**(10): 100522. (in Chinese) (王宏伟, 陈金根, 蔡翔舟, 等. 核技术, 2014, **37**(10): 100522.)
- [7] ABBONDANNO I U, AERTS G, ALVAREZ H, *et al.* Cern—TOF Facility: Performance Report[R]. Geneva: European Organization for Nuclear Research, 2003: 43.
- [8] NOGUERE G. Mesure de la section efficace de capture neutronique et determination des parametres de resonances de I-127 et I-129 [D]. Strasbourg: Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2003: 81.
- [9] KHANDAKER M U. Activities on the nuclear data measurement at the Pohang neutron facility based on electron LINAC[C]. Proceedings of Asian Particle Accelerator Conference. 2007: 800.
- [10] KOPECKY S, BRUSEGAN A. Nuclear Physics A, 2006, **773**(3): 173.
- [11] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, *et al.* Nucl Instr Meth A, 2003, **506**(3): 250.
- [12] BRIESMEISTER J F. MCNP—A General Monte Carlo N-Particle Transport Code[R]. Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos National Laboratory, 2000.
- [13] National Research Council Canada. EGSnrc: Software Tool to Model Radiation Transport[EB/OL]. [2015-09-06]. [http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/egsnrc\\_index.html](http://www.nrc-cnrc.gc.ca/eng/solutions/advisory/egsnrc_index.html).
- [14] KOPECKY S, BRUSEGAN A. Nuclear Physics A, 2006, **773**(3): 173.
- [15] FERGUSON C. General Purpose Source Particle Module for GEANT4/SPARSET: Technical Note [EB/OL]. Uos-GSPM-Tech, 2000[2015-09-06]. [http://reat.space.qinetiq.com/gps/gspm\\_docs/gspm\\_tn1.pdf](http://reat.space.qinetiq.com/gps/gspm_docs/gspm_tn1.pdf).

## A Study of the Filter Functions Used in the Photo-neutron Source

ZHU Liang<sup>1,2</sup>, LIU Longxiang<sup>1,3</sup>, WANG Hongwei<sup>1,3</sup>, MA Yugang<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1,3</sup>, ZHANG Guoqiang<sup>1,3</sup>,  
ZHANG Song<sup>1</sup>, ZHONG Chen<sup>1</sup>, CAO Xiguang<sup>1,3</sup>, ZHANG Guilin<sup>1</sup>, CHEN Jingen<sup>1</sup>,  
CAI Xiangzhou<sup>1,3</sup>, HAN Jianlong<sup>1</sup>, HU Jifeng<sup>1</sup>, WANG Xiaohe<sup>1</sup>

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract:** A photo-neutron source driven by a 15 MeV electron LINAC is built for the “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences - the “thorium-based molten salt reactor” project to conduct the nuclear data measurement work, develop neutron detector and carry out reactor material irradiation studies. Since the neutron energy spectrum is continuous, the neutron energy is measured by the time of flight (TOF) method, and neutron filters are needed to confirm absorption peaks, calibrate the TOF, calculate the equivalent flight distance, and remove the experimental background which has great influence on the calculation accuracy of the total cross section. Based on the Monte Carlo simulation tool, Geant4 a simulation environment is set up, including neutron source and neutron filters, to study the energy absorption spectra and thickness of different filters and recommended data for the thickness are provided. The neutron TOF spectra are simulated and compared with experimental measurement, deciding the equivalent TOF distance to be 5.7 m. Geant4 can also simulate the background curve of multiple filters and be used to remove background and analyze errors for the experimental data. All the experiments, simulation and theoretical calculation show consistent results on filter thickness and neutron TOF parameters, indicating the accuracy of the measurement.

**Key words:** neutron; filter; Geant4; simulation; Monte Carlo

---

**Received date:** 30 Oct. 2015; **Revised date:** 28 Dec. 2015

**Foundation item:** Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDA02010100); National Nature Science Foundation of China (11475245); National Nature Science Foundation of China for Young Scientists (11305239)

**Corresponding author:** WANG Hongwei, E-mail: wanghongwei@sinap.ac.cn.