

文章编号: 1007-4627(2015)02-0224-06

一种宽能谱多球中子谱仪能量响应的 MC 模拟

袁娇^{1,2}, 苏有武¹, 李武元^{1,2}, 徐俊奎^{1,3}, 庞成果³, 严维伟^{1,4},
李宗强¹, 毛旺^{1,5}, 徐翀^{1,2}, 左伟^{1,2}, 付鑫^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 兰州大学, 兰州 730000;

4. 中国科学技术大学, 合肥 230026;

5. 西北师范大学, 兰州 730070)

摘要: 利用蒙特卡罗程序 FLUKA 模拟计算了聚乙烯慢化球和辅助材料慢化球对低能中子到高能中子的响应函数曲线。结果表明, 对纯聚乙烯球来说, 随着聚乙烯层厚度的增加, 响应曲线峰逐步右移, 峰值在高能区有所下降, 对 20 MeV 以上的中子, 无论纯聚乙烯球的尺寸有多大, 其响应均下降到很低程度; 对辅助材料慢化球来说, 中子能量小于 1 MeV 时, 辅助材料慢化球与聚乙烯慢化球的响应曲线相似, 但当中子能量大于 20 MeV 时, 中子与辅助材料层发生 (n, xn) 反应, 慢化球的响应呈显著上升趋势。分析计算结果, 最终能够确定宽能谱多球中子谱仪的尺寸组合。

关键词: FLUKA; 多球谱仪; 响应函数; 聚乙烯; 辅助材料

中图分类号: TL817+.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.02.224

1 引言

中子辐射场的基本信息是加速器辐射防护研究的主要内容之一。由于中子的穿透能力和中子与物质相互作用的截面均强烈依赖于中子能量, 因此中子的产额、能谱和角分布是中子防护研究的基础数据。常用的中子能谱测量仪有利用快中子飞行时间法的半导体谱仪、利用核反应法的快中子谱仪、利用反冲法的反冲质子谱仪和中子多球谱仪、阈探测器等, 其中中子多球谱仪是目前应用广泛的实时测量中子能谱的仪器之一^[1-3]。多球中子谱仪最早是在上世纪 60 年代由 Bonner 等^[4]提出, 由热中子灵敏探测器和不同厚度的一系列慢化体球壳组成, 也即通常所说的 Bonner 球, 常用于中子能量小于 20 MeV 的辐射场测量, 对 20 MeV 以上的中子, Bonner 球的响应迅速下降, 并几乎不再随球的尺寸而变化。墨西哥萨卡特卡斯自治大学计算了⁶LiI 多球中子谱仪对中子能量从 2.5×10^{-8} 到 100 MeV 的响应矩阵^[5], 从中可以看出 Bonner 球适用于中子能量小于 20 MeV 的辐射场测量。Birattari 等^[6]在传统 A-B 型

雷姆剂量仪的基础上, 研制了宽能谱中子剂量仪, 通过在慢化体中加入辅助材料实现了对中子能量高达 2 GeV 的辐射场监测。中国原子能科学研究院研制的多球中子谱仪包含 9 个聚乙烯球, 可用于中子能量小于 20 MeV 的辐射场监测^[7]。中国工程物理研究院核物理与化学研究所设计研制了包含 12 个聚乙烯球的多球中子谱仪, 其对于中子能量小于 20 MeV 的辐射场有较好的探测效果^[8]。

随着加速器技术的不断发展, 加速器类型繁多, 可加速的粒子种类、能量、靶材料、以及加速器周围条件均有很大的不同, 这些因素都能影响加速器周围的中子辐射场^[9-10]。目前, 国内研制的多球中子谱仪均不能适用于高能中子辐射场的测量, 而对于像兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)^[11]这样的中高能重离子加速器, 以及将来的 ADS 高能质子直线加速器^[12-13]来说, 将会有大量高能中子产生, 最高中子能量可达 GeV 量级, 对于这么高的中子辐射场来说, 其能谱测量是很困难的, 因此研制用于 HIRFL-CSR 和 ADS 中子能谱测量的宽能谱多球中子谱仪是很必要的。我们计划借鉴

收稿日期: 2014-05-11; 修改日期: 2014-06-26

基金项目: 国家重大科学仪器设备专项(2011YQ120096)

作者简介: 袁娇(1990-), 女, 四川邻水人, 硕士研究生, 从事辐射防护研究; E-mail: yuanjiao@impcas.ac.cn

通信作者: 苏有武, E-mail: suyowu@impcas.ac.cn

宽能谱中子剂量计的研制方法, 研制包含 15 个慢化球的宽能谱多球中子谱仪。首先通过蒙特卡罗 (MC) 方法模拟计算不同尺寸的慢化球对不同能量中子的响应函数曲线, 根据计算所得的响应曲线确定宽能谱多球中子谱仪的尺寸组合, 最终研制出宽能谱多球中子谱仪, 用于高能中子辐射场的测量。

2 多球中子谱仪

多球谱仪也称 Bonner 球谱仪, 是由一系列不同大小的慢化球构成, 慢化球的中心置有热中子灵敏探测器, 常用的热中子灵敏探测器有 ^3He 正比计数器、 BF_3 正比计数器、 ^6LiI 晶体探测器等。多球谱仪有能量分辨率低的缺点, 但因其测量能量范围宽、各向同性、易于现场测量等优点, 在各实验室及核设施测量中有广泛的应用^[14]。

多球中子谱仪的基本原理是不同能量的中子在直径不同的慢化球内被慢化的程度不同, 到达慢化球中心后引起的响应也不同, 从而可以反映出所测辐射场中子的能量分布情况。随着慢化层厚度的增加, 热中子趋于基本被慢化体俘获吸收, 低能中子趋于慢化成热中子后被慢化球中心的热中子探测器探测到或在未到达慢化球中心时被慢化体俘获吸收, 而高能中子在慢化层较薄时, 趋于逃逸; 在慢化层较厚时, 慢化成热中子后被慢化球中心的热中子探测器探测到, 所以随着慢化层厚度的增加, 响应函数的峰值逐渐由低能区向高能区移动。能谱测量关系如下:

$$N = \int \Phi(E)R(E)dE, \quad (1)$$

其中: N 为中子计数; $\Phi(E)$ 为中子能谱; $R(E)$ 为响应函数。得到响应函数后, 根据探测器测量结果, 可通过相关解谱得到所测辐射场的中子能谱, 用于多球中子测量技术的解谱方法有迭代法、直接法和 MC 法^[15]。

3 MC模拟计算

FLUKA^[16] 是由意大利国家核物理研究院 (INFN) 和欧洲核子研究中心 (CERN) 共同开发的用于粒子输运和粒子与物质相互作用模拟计算的 MC 程序。它最早是由 Ranft 等开发用于电子、质子加速器屏蔽计算, 随后经 Fasso 等改进后增强计算功能, 可用于模拟中子、光子和电子等粒子在物质中的传输问题。FLUKA 可跟踪约 60 种不同粒子在任意几何形状物质中的相互作用和传播, 可跟踪的中子能量达 20 TeV。

3.1 计算模型

在本工作中, 多球中子谱仪的慢化体选用的是常用的聚乙烯, 辅助材料计划选用铜、铅和钨, 中心的热中子灵敏探测器选用的是英国 Centronic 公司生产的 SP9 ^3He 球形正比计数器, 其不锈钢外壳内充有 4 个标准大气压的 ^3He 气体, 原子密度为 10^{20} atoms/cm³, 质量密度为 4.966×10^{-4} g/cm³, 球体内直径 32 mm, 外直径 33 mm。平行中子束从面源入射到慢化球上 (图 1), 假设慢化体与计数器之间没有间隙, 同时忽略中心探测器的连接器与探头的各种线路影响。

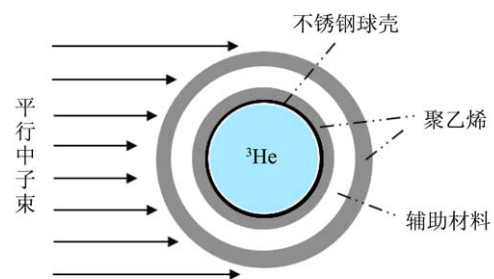


图 1 (在线彩图) 多球中子谱仪响应曲线计算模型

3.2 计算方法

平行中子束覆盖整个慢化球, 中子能量从热中子一直到 10 GeV, 选择不同的慢化层厚度, 利用热中子的 $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ 反应计算中子的响应。假设每个 $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ 反应均被记录, 则

$$N = \phi(E)\sigma_{n,p}n_{\text{He}}, \quad (2)$$

其中: N 是置于中心的 ^3He 球形正比计数器的计数; $\phi(E)$ 是入射到慢化球上的单能中子注量; $\sigma_{n,p}$ 是 $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ 反应的反应截面; n_{He} 是球形正比计数器内 ^3He 的原子数密度。考虑热中子运输, 模拟计算时需要选择 LOW-NEUT 卡, 计数卡选择 RESNUCLEI, 记录 $^3\text{He}(n, p)\text{T}$ 反应产生的带电粒子, 同时选择 USRTRACK 计数卡可记录所关心体积内中子注量径迹长度。

4 计算结果与讨论

4.1 FLUKA 计算验证

文献[8]中作者采用 MC 程序 MCNP 模拟计算了慢化球的响应函数曲线, 本工作运用 FLUKA 程序, 建立与其相同的计算模型, 设置基本相同的参数, 计算慢化体直径为 0 和 5 cm 慢化球的响应函数曲线, 并与文献[8]中计算结果进行比较, 如图 2 所示。

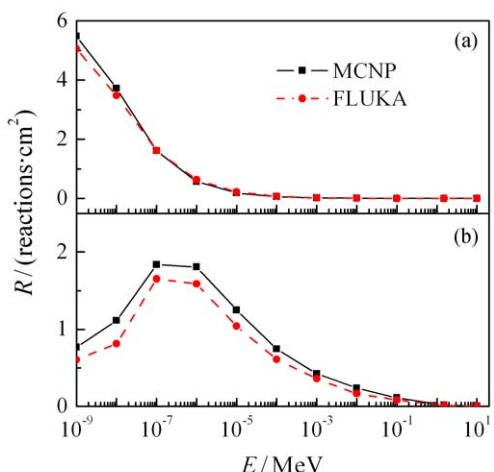


图 2 (在线彩图) MCNP 与 FLUKA 的计算结果比较
(a) 慢化体直径为 0 cm; (b) 慢化体直径为 5 cm。

图 2 展示了文献[8]与 FLUKA 的计算结果, 横坐标表示中子能量, 纵坐标表示响应函数, 即单位入射平行单能中子注量在探测器灵敏体积内与 ^3He 发生的反应率 (reactions·cm²)。比较图中的响应函数曲线可以看出, 运用 FLUKA 程序计算的响应函数曲线与文献[8]MCNP 的响应函数曲线总体趋势一致, 而且结果很接近, 由此可知运用 FLUKA 程序模拟计算多球中子谱仪的响应函数曲线是可行的。

4.2 FLUKA 模拟计算纯聚乙烯慢化球的响应函数曲线

根据多球中子谱仪响应曲线计算模型(图 1), 从裸球开始, 不断增加中心探测器外的聚乙烯慢化层厚度, 选取能量从 10^{-11} MeV 至 10 GeV 的中子, 每个量级取三个能量点, 从而得到从裸球到聚乙烯慢化层厚 23 cm 的慢化球随中子能量变化的响应曲线。计算结果如图 3 所示。

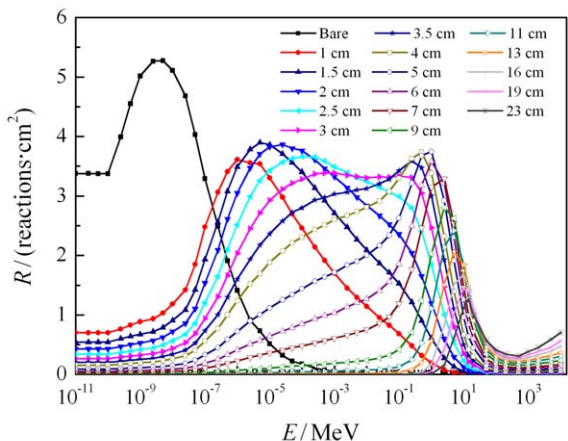


图 3 (在线彩图) FLUKA 模拟计算纯聚乙烯慢化球的响应函数曲线

图 3 展示了不同尺寸的聚乙烯慢化球对不同能量中子的响应函数曲线, 图中 Bare 表示未包裹慢化层的中心探测器, 即裸球; 1 cm 表示包裹的聚乙烯慢化层厚度。从图 3 可以看出, 对纯聚乙烯球来说, 随着聚乙烯层厚度的增加, 响应曲线峰逐步右移, 响应曲线峰值在高能区有所下降。对 20 MeV 以上的中子, 无论纯聚乙烯球的尺寸有多大, 其响应均下降到很低的程度, 这与理论分析结果相符合, 同时也与文献 [5] 的计算结果吻合。

4.3 辅助材料慢化球的响应函数曲线

为了适应高能中子辐射场的测量要求, 在聚乙烯慢化球内嵌入高 Z 材料铜、铅和钨, 高能中子通过辅助材料层时发生 (n, xn) 反应, 可提高高能中子的能量响应。在聚乙烯慢化体内嵌入铜、铅、钨辅助材料后, 慢化球在高能区中子的响应函数曲线分别如图 4, 5, 6 所示。

由于低能中子与辅助材料发生 (n, xn) 反应的截面很小, 添加辅助材料对低能中子响应的影响较小, 所以本计算主要考察嵌入辅助材料后的慢化球对高能中子的响应, 选取能量从 100 keV 至 10 GeV 的中子。图 4 中 3C5-7 表示慢化球内层的聚乙烯厚度是 3 cm, 嵌入的慢化层材料为铜, 以 C 表示 (图 4 与图 5 中的 P 和 W 分别表示铅和钨), 厚 2 cm, 外层的聚乙烯厚度是 2 cm, 慢化体的总厚度是 7 cm。从图 4 ~ 5 的 (a) 图中可以看出, 内层聚乙烯与外层聚乙烯厚度保持不变, 高能区 (≥ 20 MeV) 的中子响应随着辅助材料层的增厚而升高; 从图 4 ~ 5 的 (b) 图可以看出, 辅助材料层与外层聚乙烯厚度保持不变, 当内层聚乙烯厚度从 2 cm 变化至

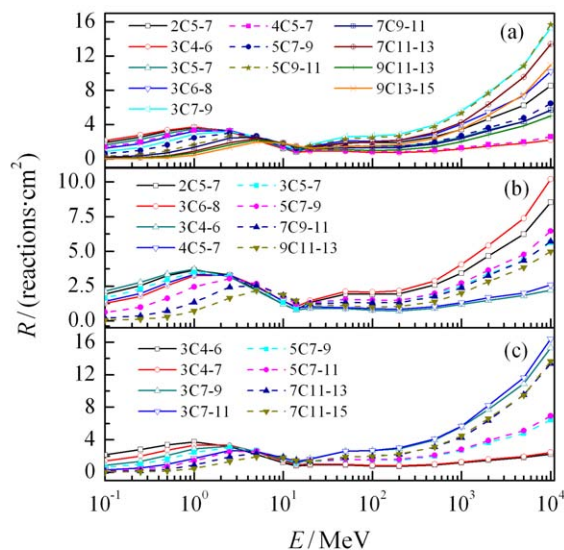


图 4 (在线彩图) 嵌入铜层的慢化球对高能中子的响应函数曲线

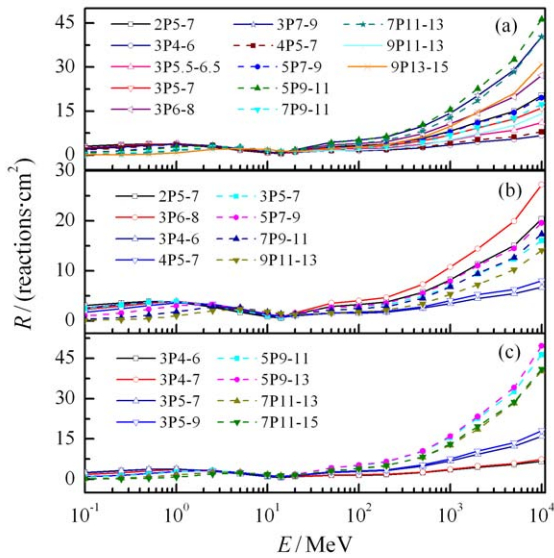


图 5 (在线彩图) 嵌入铅层的慢化球对高能中子的响应函数曲线

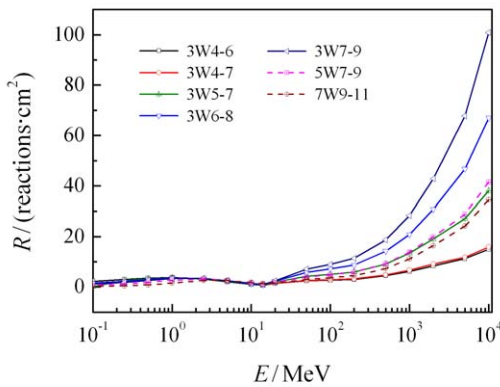


图 6 (在线彩图) 嵌入钨层的慢化球对高能中子的响应函数曲线

5 cm 时, 高能区的中子响应呈升高趋势, 而当内层聚乙烯厚度从 5 cm 变化至 9 cm 时, 高能区的中子响应呈下降趋势, 这说明内层聚乙烯厚度在一定范围内增加可提升高能区中子的响应; 图 4~5 的 (c) 图主要展示的是外层聚乙烯厚度对高能区中子响应的影响, 从图中可以看出, 外层聚乙烯层的厚度增加 2 cm 时, 高能区中子的响应曲线变化很小, 可忽略不计。

结合铜和铅对高能区中子响应的影响, 对于辅助材料钨挑选几组具代表性的尺寸组合, 考察钨层对高能区中子的影响, 其响应函数曲线如图 6 所示。比较图 4, 5 和 6 可看出, 辅助材料可明显改善慢化球对高能中子的响应, 在相同尺寸组合的情况下, 嵌入钨层对高能区中子响应的影响最好, 铅层次之, 铜层最差。

4.4 宽能谱多球中子谱仪

分析聚乙烯慢化球和嵌入辅助材料慢化球的响应函

数曲线, 考虑慢化球的最大直径 (< 40 cm)、辅助材料层的重量 (< 18 kg) 和加工难度等因素, 挑选响应函数曲线相差较大的慢化体构型组成宽能谱多球中子谱仪, 具体尺寸见表 1 和 2, 响应函数曲线见图 7。

表 1 宽能谱多球中子谱仪纯聚乙烯球尺寸 (单位: cm)

纯聚乙烯球	慢化球外径	纯聚乙烯球	慢化球外径
Bare	3.3	5	13.3
1.5	6.3	7	17.3
2	7.3	9	21.3
2.5	8.3	13	29.3
3	9.3	16	35.3
3.5	10.3		

表 2 宽能谱多球中子谱仪辅助慢化球尺寸 (单位: cm)

辅助材料球	内层聚乙烯球直径	辅助材料厚度	慢化球外径
3C4-6	9.3	1	15.3
3P4-6	9.3	1	15.3
3P4.5-6.5	9.3	1.5	16.3
2P5-7	7.3	3	17.3

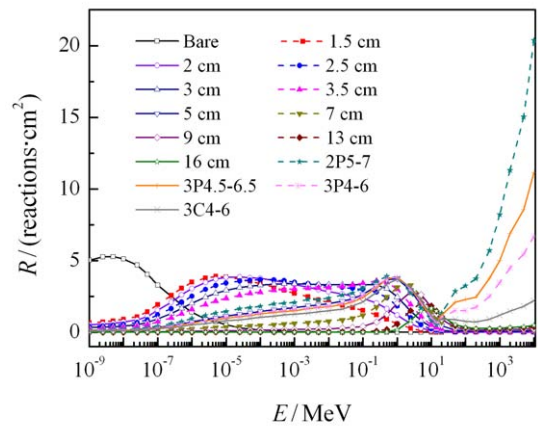


图 7 (在线彩图) 选择的宽能谱多球中子谱仪响应函数曲线

从图 7 中可以看出, 中子能量小于 1 MeV 时, 辅助材料慢化球的响应函数曲线与聚乙烯慢化球的曲线相似, 但当中子能量大于 20 MeV 时, 由于中子与辅助材料层发生 (n, xn) 反应, 响应曲线呈显著上升趋势, 如球 2P5-7 在 10 GeV 处的响应约为 16 cm 聚乙烯球的 40 倍。

5 结论与展望

在本文中, 通过 FLUKA 程序模拟计算聚乙烯慢化球和辅助材料慢化球对低能中子到高能中子的响应函数

曲线来确定宽能谱多球中子谱仪的尺寸组合, 分析计算结果可得如下结论。

(1) 从 FLUKA 模拟计算聚乙烯慢化球的响应曲线结果可以看出, 响应曲线峰随着聚乙烯层厚度的增加逐渐向高能区移动, 但峰值在 20 MeV 以上后, 响应下降到很低的程度, 所以由聚乙烯慢化球所组成的多球中子谱仪仅适用于 20 MeV 以下的中子辐射场测量, 这与理论分析结果相符合, 同时也与文献[5]符合。

(2) 在聚乙烯慢化球内嵌入辅助材料层可明显提升慢化球对高能中子的响应, 从图 3, 4 和 5 可以看出, 辅助材料层越厚, 慢化球对高能中子的响应越好; 内层聚乙烯厚度在一定范围内增加可提升高能中子的响应, 而外层聚乙烯厚度对高能中子的响应影响很小, 可忽略不计。

本工作通过 FLUKA 模拟计算确定了宽能谱多球中子谱仪的尺寸, 在以后的工作中, 准备开始加工事宜, 制作完成后选择合适的中子源进行标定刻度, 最后投入实验测量, 结合计算所得的响应函数, 根据测量结果, 经过相关解谱得到所测辐射场中的中子能谱, 实现宽能谱多球中子谱仪在 20 MeV 以上高能中子辐射场测量中的应用。

参考文献:

- [1] MALLETT M W, MCLEAN T D, OLSHER R H, *et al.* Radiation Protection Dosimetry, 2004, **110**(1-4): 549.
- [2] LI Taosheng. Radiation Protection Bulletin, 2003, **23**(2): 16. (in Chinese)
(李桃生. 辐射防护通讯, 2003, **23**(2): 16.)
- [3] BROOKS F D, KLEIN H. Nucl Instr Meth A, 2002, **476**: 1.
- [4] BRAMBLETT R L, EWING R I, BONNER T W. Nucl Instr Meth, 1960, **9**: 1.
- [5] VEGA-Carrillo H R, EDUARDO G, ALFREDO L, *et al.* MEXICO: AMEE, 2007: 36.
- [6] BIRATTARI C, ESPOSITO A, FERRARI A, *et al.* Radiation Protection Dosimetry, 1998, **76**(3): 135.
- [7] CHEN Jun, YANG Xiaoyun, RONG Chaofan. Symposium of the thirteenth National Conference on Nuclear Electronics and Nuclear Detection Technology(First)[C]. Some Calculation Problems Associated with Neutron Multi-sphere Spectrometer. Bei Jing: Chinese Nuclear Society, 2006: 370. (in Chinese)
(陈军, 杨小芸, 容超凡. 第十三届全国核电子学与核探测技术学术年会论文集(上册)[C]. 有关中子多球谱仪的计算问题. 北京: 中国核学会, 2006: 370.)
- [8] WEI Xiye, YUAN Yonggang. Nuclear Techniques, 2010, **33**(7): 532. (in Chinese)
(魏熙晔, 袁咏刚. 核技术, 2010, **33**(7): 532.)
- [9] SU Youwu, WANG Guiling, LI Wuyuan, *et al.* Chinese Physics C, 2008, **32**(5): 348.
- [10] KUROSAWA T, NAKAO N, NAKAMURA T, *et al.* Physical Review C, 2000, **62**(4): 044615.
- [11] XIA Jiawen, ZHAN Wenlong, WEI Baowen, *et al.* HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS, 2008, **20**(11): 1787. (in Chinese)
(夏佳文, 詹文龙, 魏宝文, 等. 强激光与粒子束, 2008, **20**(11): 1787.)
- [12] ABDERRAHIM Ait H, GALAMBOS J, GOHAR Y, *et al.* FERMILAB-FN-0907-DI, LA-UR-10-06754, 2010, September: 23.
- [13] ZHAN Wenlong, XU Hushan. Bulletin of Chinese Academy and Sciences, 2012, **27**(3): 375. (in Chinese)
(詹文龙, 徐珊珊. 中国科学院院刊, 2012, **27**(3): 375.)
- [14] DING Dazhao, YE Chuntang, ZHAO Zhixiang, *et al.* Beijing: Atomic Energy Press, 2005: 141. (in Chinese)
(丁大钊, 叶春堂, 赵志祥, 等. 中子物理学(上册)[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 141.)
- [15] LI Taosheng, YANG Lianzhen, CHEN Jun, *et al.* Nuclear Electronics and Detection Technology, 2004, **24**(5): 453. (in Chinese)
(李桃生, 杨连珍, 陈军, 等. 核电子学和探测技术, 2004, **24**(5): 453.)
- [16] ALFREDO F, PAOLA R S, ALBERTO F, *et al.* Fluka: a multi-particle transport code[M]. 2011: 43.

MC Calculation of Neutron Response for an Extended Range Multisphere Neutron Spectrometer

YUAN Jiao^{1,2}, SU Youwu¹, LI Wuyuan^{1,2}, XU Junkui^{1,3}, PANG Chengguo³, YAN Weiwei^{1,4},
LI Zongqiang¹, MAO Wang^{1,5}, XU Chong^{1,2}, ZUO Wei^{1,2}, FU Xin^{1,2}

(1. *Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;*

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

3. *Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;*

4. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

5. *Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)*

Abstract: The responses of an extended range Multisphere Neutron Spectrometer as function of neutron energy were calculated by Monte Carlo code, FLUKA. The results show that peak value of the response curve shift to the right with the increasing of polyethylene thickness, but decreases in the high energy region. For neutron with energy >20 MeV, the response of polyethylene moderator will be decreased to be a very low level no matter what size it is. For neutron energies below 1 MeV, the response curve of moderator with auxiliary materials behave like the one of polyethylene moderator, but above 20 MeV the responses increase significantly due to increasing (n, xn) cross-sections of auxiliary materials. Based on the present discussion, the size of an extended range multisphere neutron spectrometer can be determined.

Key words: FLUKA; multisphere neutron spectrometer; response function; polyethylene; auxiliary material

Received date: 11 May 2014; **Revised date:** 26 Jun. 2014

Foundation item: National Major Scientific Instruments and Equipment Development Project(2011YQ120096)

Corresponding author: SU Youwu, E-mail: suyowu@impcas.ac.cn.

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