

HIRFL-CSR系统中RIBLL II上中子墙 设计的模拟计算*

徐华根^{1,2;1)} 徐珊珊¹ 李文飞³ 詹文龙¹ 肖国青¹ 孙志宇¹ 郭忠言¹
李松林¹ 段利敏¹ 王宏伟¹ 肖志刚¹ 黄文学¹ 李琛^{1,2}
陈若富^{1,2} 张雪荧^{1,2} 贾飞^{1,2} 黄天衡^{1,2}

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (南京大学物理系生物物理研究所 南京 210008)

摘要 HIRFL-CSR系统中RIBLL II外靶实验终端上的中子探测装置是用来开展放射性束物理以及利用放射性束开展非对称核物质性质等研究的一个重要的探测装置. 介绍了在RIBLL II上计划建造的中子墙的探测原理以及基于Geant4对其所进行的蒙特卡罗模拟, 给出了中子墙的设计方案、优化的设计参数以及中子探测的性能指标.

关键词 HIRFL-CSR RIBLL II 中子墙 Geant4

1 引言

放射性核束(RNB)的使用为研究远离 β 稳定线的原子核带来了可能. 为开展并深入研究这些奇异核的特性, 国际上各大核物理实验室都相继建造了各具特色的放射性束流研究装置^[1-4]. 中国科学院近代物理研究所于1997年建成了国内第一条工作在费米能区的弹核碎裂(PF)型重离子放射性束流产生装置——兰州放射性束流线(RIBLL)^[5, 6], 其初级束是由兰州重离子加速器系统的分离扇回旋加速器(HIRFL-SSC)提供的单核子能量在几十到100MeV以上的重离子束. 在建的兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)系统中, 主环(CSRm)和实验环(CSRc)之间又正在建造一条利用CSRm提供的单核子能量可高达1GeV的重离子束的弹核碎裂和靶核碎裂机制产生放射性束的第2条放射性束流线RIBLL II. 中子墙是RIBLL II外靶实验终端中用来开展放射性束物理, 以及利用放射性束开展非对称核物质性质等研究

的一个重要的实验设备, 用于探测能量高达1GeV的中子.

飞行时间法是中子能量测量的最好方法之一^[7], 为了实现对中子的高效率探测, 在RIBLL II外靶实验终端中, 拟采用量能器构型的中子探测墙作为中子飞行时间测量的停止时间探测器, 飞行时间测量的起始时间信号由位于反应靶前的时间探测器给出.

为估计中子墙各项性能指标和优化设计参数, 开展系统的计算机模拟研究是非常必要的. 本文介绍了RIBLL II外靶实验终端上计划建造的中子墙及其探测原理, 以及对该设计所进行的基于Geant4^[8]的Monte Carlo模拟计算, 给出了中子墙的设计方案、最优化的设计参数及中子探测器所能达到的性能指标.

2 中子墙探测原理及设计选型

2.1 中子墙探测原理

就中子测量而言, 考虑的两个最基本问题就是探

2005-03-17 收稿

* 国家重大科学工程HIRFL-CSR冷却储存环项目, 中国科学院“百人计划”基金, 科技部重大项目前期研究专项基金(2001CCB01200), 中国科学院知识创新工程重点方向性项目(KJ951-A1-01, KJ951-A1-02)和国家重点基础研究发展规划项目(TG2000077401)资助
1) E-mail: xuhg@impcas.ac.cn

测效率和能量分辨. 中子不带电, 经过介质时不受介质原子核的库仑场作用, 只通过与原子核直接碰撞而损失能量, 因此, 穿透本领强. 不同能量的中子与介质作用的具体过程是不同的, 能量低时是以核反应、核反冲过程为主, 而高能时则以强子簇射为主. 因此, 要实现对不同能量中子的高效率探测, 需要不同的探测方法. 一般对低能中子 ($E_n < 20\text{MeV}$), 除采用大截面的核反应过程外, 常利用其质量与质子相当的特点采取核反冲方法进行测量. 即中子与质子碰撞使得质子反冲出来, 反冲质子引起介质电离或激发, 通过测量介质被反冲质子电离或激发后所产生的电荷或闪烁光信号 (通常是闪烁光) 而实现对中子的探测. 因此, 富含氢原子的有机闪烁材料成了中子探测的常用材料. 对高能中子, 主要是通过测量其在探测介质中发生簇射产生的带电次级强子引起介质电离或激发, 产生的电荷或退激时产生的闪烁光信号而来实现对其探测的. 由于高能中子与闪烁材料的核相互作用长度长 ($\lambda_{\text{int}} = 80\text{cm}$)^[9], 要使绝大部分簇射阻止在闪烁材料中, 需要很厚的探测介质. 为减小探测器的体积, 广泛采用取样型量能器^[10-12]. 取样型量能器的结构特点是在闪烁体材料层之间加入了相互作用长度短的吸收材料, 高能中子在吸收材料中发生强子簇射, 产生的次级带电强子打到闪烁体材料层产生闪烁光信号, 从而实现对其探测.

对能量分辨来说, 从飞行时间法知道, 中子的能量分辨取决于中子飞行距离的误差和飞行时间的分辨^[7].

$$\frac{t}{L} = \frac{3.336}{\left[1 - (939.6/(E_n + 939.6))^2\right]^{1/2}} \left(\frac{\text{ns}}{\text{m}}\right) \quad (1)$$

能量分辨由下式决定

$$\delta E_n / E_n = \gamma(\gamma + 1) \left[(\delta L / L)^2 + (\delta t / t)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

式中 γ 是洛伦兹因子, L 是中子的飞行距离, t 是中子的飞行时间, δL 和 δt 分别是各自的分辨. 当时间分辨绝对好 (即 $\delta t = 0$) 时, 能量分辨就只取决于飞行距离的分辨 δL , 这由探测器的有效厚度 (ΔL) 决定, 即 $\delta L = \Delta L$. 当中子的飞行距离被确定之后, 需要使用相对薄的探测器来提高飞行距离的分辨. 因此, 对于能量高达 1GeV 的中子, 既要保证高的探测效率, 还要有好的时间分辨, 取样型量能器构型的飞行时间中子探测墙成为选择. 同时, 在保证高的探测效率的前提下, 为减小飞行距离的分辨对能量探测分辨的影响和提高探测器承受高多重性, 探测器需采用分层模块化构型.

2.2 中子墙设计选型

在 RIBLL II 外靶实验终端上, 基于可利用的空间考虑, 中子的飞行距离约为 15m , 中子墙的有效面积为 $1.44\text{m} \times 1.44\text{m}$. 考虑到中子墙对中子测量所能达到的位置分辨水平以及对多个中子入射的分辨能力, 探测器要有足够的探测单元数, 这就需要采用模块化设计. 通常模块的形状有两种: 与中子飞行方向平行的“塔状”型和与中子飞行方向垂直的“浆状”型^[13]. “塔状”模块的优势在于, 中子在模块里引起强子簇射所产生的带电粒子都将包含在一个“塔状”模块里, 模块的前面积决定了角度分辨以及对多中子入射的分辨能力. 这种构型的缺点是: 1) 是需要使用很薄的光导沿着“塔”方向对闪烁光信号进行收集, 闪烁光收集效率低. 2) 虽然可以从光导的两端探测光信号, 但其时间分辨差. 这样“塔状”型模块不予考虑. “浆状”模块的优点在于闪烁体配以有效的光导, 闪烁光由光导沿着垂直于中子入射的方向传输收集, 两端信号的时间差可以给出中子入射的位置. 模块单元排列成层, 层与层之间的模块垂直正交, 这样每个模块的厚度就对应于前面讨论的 ΔL .

针对所需探测的中子能量范围, 中子墙的设计需要兼顾高能中子和低能中子的探测. 这样中子墙主体由两部分组成, 即对低能中子进行探测的闪烁体探测器和对高能中子探测的取样型量能器. 在基本构型被确定后, 需要用模拟计算对构型进行定型和优化.

3 中子墙设计的模拟研究

Geant4^[8] 是欧洲核子中心 (CERN) 开发的用于模拟射线与探测器物质相互作用的工具包. 我们利用 Geant4 提供的强子物理过程软件包对中子墙的构型与探测效率、多重性进行的模拟研究, 给出了中子墙的主体设计方案和优化的设计参数.

3.1 中子墙构型与探测效率的模拟

入射中子的探测效率取决于入射中子在中子墙上沉积能量的大小和产生的闪烁光的多少, 因此中子墙所用吸收层材料和取样层闪烁材料的性能以及材料厚度的选取成为关键. 鉴于中子在铁和铅中核相互作用长度差不多, 本着性价比高的原则, 量能器吸收层选择铁材料^[9]. 取样层主要是给出时间信号, 为了获得快的时间信号, 材料选用 Bicron 公司生产的 BC408 快塑料闪烁体. 中子墙的前端用于提高低能中子探测效率的纯闪烁体单元探测器也选用了相同的材料. 基

于Geant4的程序包,我们首先研究了探测材料以铁和闪烁体组成的“夹心”构型探测器对单个中子垂直入射时的探测效率.为研究探测效率随取样次数的变化,首先设计了一个面积为 $1.44\text{m}\times 1.44\text{m}$ 、厚度为 20cm 的模型探测器.图1给出了该模型探测器不同取样次数(两种材料的厚度总是选成相同的,以 d 表示,即 $d_{\text{铁}} = d_{\text{闪烁体}}$)厚度组合时探测效率随中子能量变化的曲线.模拟中探测阈设为 10MeV (即在闪烁体上沉积了 10MeV 的能量所产生的光经过传输到收集端才能被探测到).可以看出随着 d 的减小亦即取样次数的增多,探测效率逐渐提高.为进行比较,图中还给出了纯闪烁体作为探测器材料时的探测效率,可见在中子能量小于 200MeV 时,单一闪烁材料的探测效率要高于“夹心”构型,这也是我们在前面加上纯闪烁体材料探测单元的出发点.

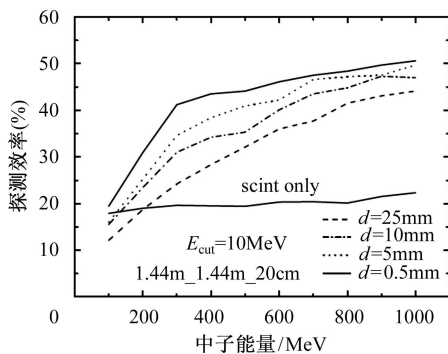


图1 不同厚度组合时探测效率随中子能量变化的曲线

为了获得高的中子探测效率,需要让入射中子反应后能把大多能量沉积在中子墙中,这时中子墙的总厚度应大于入射中子在其中核相互作用长度的2倍^[14],经估算中子墙的总厚度确定为 1m .兼顾对低能中子的探测,中子墙的前端为 16cm 厚的闪烁体探测器,由两层垂直相交的闪烁体单元构成.对不同材料厚度构型下量能器对中子的探测效率进行了研究,选择确定了一种对中子探测效率高的合理结构.图2

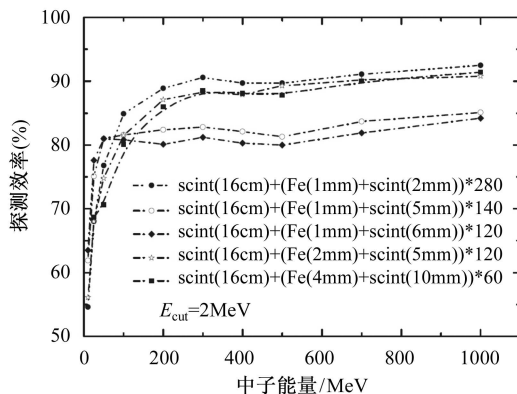


图2 不同构型下探测效率比较,探测阈为 2MeV

给出了多种不同厚度构型下探测效率随中子能量变化的曲线.在兼顾性价比和探测效率的前提下,我们决定选用 16cm (闪烁体)+ $(4\text{mm}$ (铁)+ 10mm (闪烁体)) $\times 60$ (层)的构型.

3.2 中子墙多重性

中子墙采用模块化设计不仅提高了中子飞行距离的分辨,同时又可以实现对多个中子入射的鉴别.当单个高能中子入射到中子墙的某个模块单元上时会引起强子簇射,产生的次级强子又会产生新的核过程,而且次级强子会打到相邻的模块单元上而产生信号.这样,一个入射中子就可能引起一个模块层面中多个不同的模块单元点火,即多个单元都能探测到信号,这种由单个中子入射引起点火的模块单元数称作中子墙的多重性.显然,这种多重性与模块单元的大小直接相关(要求模块宽度大些).另外由于模块单元的宽度又直接影响中子墙对多个中子入射的分辨能力(要求模块宽度小些).因此模块单元需要一个优化的尺寸大小,以期对多个中子入射有高的分辨能力且引起的多重性不高.我们对不同大小的模块单元构成的中子墙多重性进行了研究.在兼顾性价比的前提下,最终选择的模块尺寸为 144cm (长) $\times 8\text{cm}$ (宽) $\times 7\text{cm}$ (厚).该尺寸模块单元组成的中子墙,单个中子入射引起的多重性由图3给出,横轴为中子入射后一层中点火的模块单元数,纵轴表示点火的几率.结果表明,随着中子能量的增高,每层点火的模块单元数从1—3逐渐增加,点火几率分布变宽.

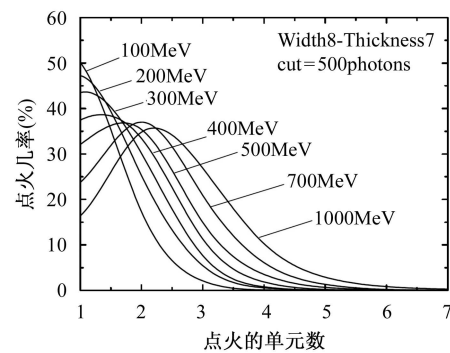


图3 单个中子引起的一个模块层面上模块单元点火的几率

3.3 中子墙设计定型

图4给出了基于Geant4对探测效率以及多重性的模拟得到的中子墙主体的最终设计构型示意图和浆状单元构型示意图.中子墙的主体部分尺寸为 $1.44\text{m}\times 1.44\text{m}\times 1\text{m}$ (厚),包括两部分,前端是 16cm 厚的闪烁体探测器,由两层塑料闪烁“棒”组成,每

层包括18个尺寸为144cm(长) \times 8cm(宽) \times 8cm(厚)的闪烁“棒”,两层闪烁“棒”相互垂直.后面为取样量能器,共由216个大小为144cm(长) \times 8cm(宽) \times 7cm(厚)的“夹心”构型的“浆状”模块组成,总厚度为84cm,由12个垂直的模块层排列而成.中子入射方向垂直于每层所在平面.“浆状”模块单元由6层铁(最外两层是2mm,其余4层为4mm)和5层10mm的闪烁体相间构成,光信号经光导传输到两端的光电倍增管读出.

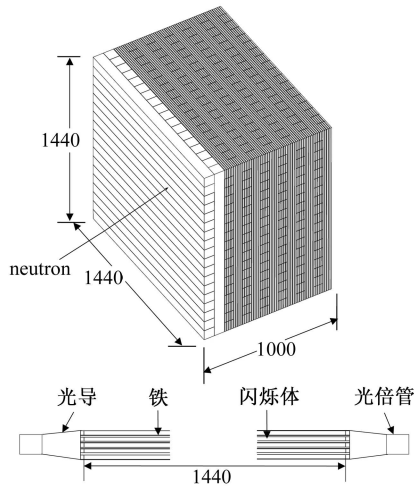


图4 中子墙主体部分结构(不包括信号读出部分)(上)和单个“浆状”模块结构(下)示意图

4 中子墙性能

4.1 探测效率

上述构型的中子墙,对中子的探测效率随中子能量变化曲线的模拟结果如图5所示.从图中可以看出,在所需探测的中子能量范围内,中子墙对中子的探测效率逐渐增大,对低能中子的探测效率达到了70%以上,对能量接近1GeV的中子其效率超过了90%.这满足实验测量中对中子测量的要求,也表明了中子墙的这种设计是合理的.

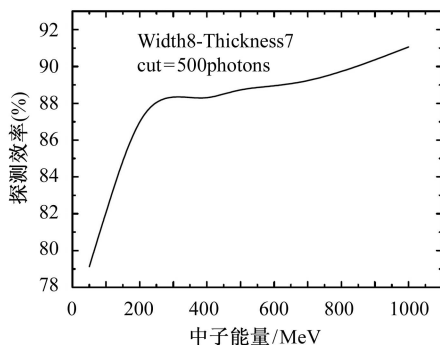


图5 中子墙探测效率

4.2 时间分辨

时间分辨的好坏直接影响中子的能量分辨.采用模块化设计时,中子墙的时间分辨即单元模块的时间分辨.从光导的形状、长度以及光电倍增管的性能考虑,模拟研究了单个浆状模块的时间性能.浆状模块单元的光导形状选择整体结构,模块单元的5层取样层的光信号用硅油耦合分别引出至光导的耦合端由一只光电倍增管读出(见图4(下)).光导形状由与模块匹配的方形收缩蜕变为与光电倍增管光阴极尺寸相匹配的圆形.我们模拟研究了以Hamamatsu的R7724光电倍增管做信号读出时浆状单元的时间分辨.光导长度为24cm,浆状单元两端读出时间分辨(前沿甄别)达到450ps(FWHM),图6显示了光导长度为24cm时计算得到的浆状模块单元时间分辨.

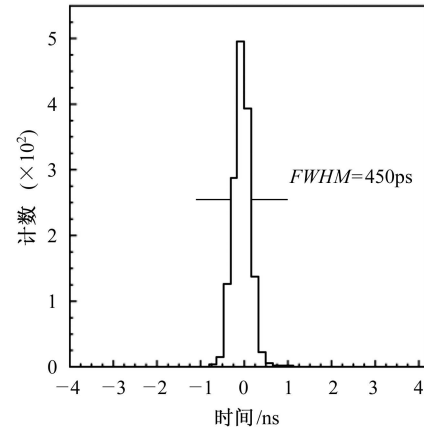


图6 采用R7724读出,模块单元两端读出时间谱

由此,结合飞行时间法给出的中子测量能量分辨公式(2),可以初步估算出中子墙对不同能量中子探测能达到的能量分辨水平.中子的飞行距离为15m,飞行距离的分辨由中子墙单元尺寸决定,飞行时间分辨由起始时间探测器(起始时间探测器分辨定为140ps^[15])和浆状单元得出,这样中子墙对不同能量中子的探测的能量分辨如表1所示.

表1 不同能量中子探测的能量分辨

E_n / MeV	能量分辨 (FWHM)/%	E_n /MeV	能量分辨 (FWHM)/%
50	1.07	500	2.68
100	1.28	700	3.47
200	1.59	1000	4.80
300	1.95		

5 结论

基于Geant4的模拟计算,给出了对中子墙的最终设计方案并给出了优化的设计参数以及对中子探测

所能达到的性能指标, 模拟结果表明基于取样量能器构型的中子墙的设计是合理的, 探测性能满足实验测量的要求, 这为中子墙的机械设计、加工提供了依据。

设计工作过程中没有做单元模块实验研究, 这将是下一步工作的重点, 包括对模块单元的性能研究和光电倍增管性能研究等。

参考文献(References)

- 1 Anne T, Bazin D, Mueller A C et al. Nucl. Instrum. Methods, 1987, **A257**: 215
- 2 Sherril B M et al. Nucl. Instrum. Methods, 1991, **B56/57**: 1106
- 3 Kubo T, Ishihara M, Inabe N et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B7**: 309
- 4 Geissel H, Armbruster P, Behr K H et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B70**: 286
- 5 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, XIAO Guo-Qing et al. Science in China, 1999, **A42**(5): 528
- 6 SUN Zhi-Yu, ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A503**: 496
- 7 WANG S S. Experimental Method for Nuclear Physics and Particle Physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1989. 155 (in Chinese)
- 8 Agostinelli S, Allison J, Amako K et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A506**: 250
- 9 Particle Data Group. Phys. Lett., 1990, **239B**: 1
- 10 Cashmore R J et al. Nucl. Instrum. Methods, 1985, **A242**: 42
- 11 Akesson T et al. Nucl. Instrum. Methods, 1985, **A241**: 17
- 12 Andresen A et al. Nucl. Instrum. Methods, 1990, **A290**: 95
- 13 Blaich Th et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **A314**: 36
- 14 XIE Y G et al. Particle Detector and Data Acquisition. Beijing: Sciences Press, 2003. 322 (in Chinese)
(谢一冈等. 粒子探测器与数据获取. 北京: 科学出版社, 2003. 322)
- 15 ZHAO You-Xiong, ZHAN Wen-Yong, GUO Zhong-Yan et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A355**: 464

Monte Carlo Simulation of the Neutron Detection Wall at RIBLL II in HIRFL-CSR^{*}

XU Hua-Gen^{1,2;1)} XU Hu-Shan¹ LI Wen-Fei³ ZHAN Wen-Long¹ XIAO Guo-Qing¹ SUN Zhi-Yu¹
 GUO Zhong-Yan¹ LI Song-Lin¹ DUAN Li-Min¹ WANG Hong-Wei¹ XIAO Zhi-Gang¹
 HUANG Wen-Xue¹ LI Chen^{1,2} CHEN Ruo-Fu^{1,2} ZHANG Xue-Ying^{1,2}
 JIA Fei^{1,2} HUANG Tian-Heng^{1,2}

1 (Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

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

3 (Institute of Biology-Physics, Department of Physics, Nanjing University, Nanjing 210008, China)

Abstract With the construction of the new Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (RIBLL II) which connects the CSRm and the CSRe, an experimental setup for physics research is highly required. A large area neutron detection wall is the main part of the setup. This paper introduced the detection principle of the neutron detection wall and the Monte-Carlo simulation of its design under the environment of the Geant4 toolkit. We presented the final design with the optimized parameters and the performance of the wall.

Key words HIRFL-CSR, RIBLL II, neutron detection wall, Geant4

Received 17 March 2005

^{*}Supported by HIRFL-CSR Project (Lanzhou, China), One Hundred Talents Program of Chinese Academy of Sciences, Major State Basic Research Development Program (2001CCB01200), Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (KJCX2-SW-N02, KJCX2-SW-N07) and Major State Basic Research Development Program(TG2000077401)

1) E-mail: xuhg@impcas.ac.cn