

RIBLL 终端大面积中子探测器阵列 研制方案的理论计算*

陈志强¹ 叶沿林^{1;1)} 王金川² 肖国青² 詹文龙² 徐珊珊²
郭忠言² 江栋兴¹ 王全进¹ 郑涛¹ 张高龙¹ 李智焕¹
李湘庆¹ 胡青元¹ 庞丹阳¹ 王佳¹

1 (北京大学技术物理系和教育部重离子物理重点实验室 北京 100871)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

摘要 介绍了一种用于丰中子核研究的 RIBLL 终端大面积中子探测器阵列的研制. 利用 Geant4 软件包对该探测系统的中子探测效率、时间分辨和位置分布等进行了蒙特卡罗模拟, 同时对探测器的 cross-talk 进行了研究. 给出了探测器的设计方案.

关键词 丰中子核 RIBLL 大面积中子探测器阵列 蒙特卡罗模拟

1 引言

自 20 世纪 80 年代中期 Tanihata 等人发现中子晕现象^[1]以来, 放射性核束物理已成为核科学最具活力的前沿研究领域. 国际上绝大多数重离子核物理实验室都相继建成了放射性核次级束流线, 如 LISE(GANIL)^[2], A1200(MSU)^[3], RIPS(RIKEN)^[4] 和 FRS(GSI)^[5]等. 兰州重离子加速器放射性次级束流线(RIBLL)于 1997 年 7 月建成并投入运行^[6], 目前它已为多个放射性束物理实验提供了多种放射性束流(RIB).

随着放射性核束物理的发展, 一些核被证实存在中子或质子晕结构^[7], 而人们对于这些奇异核内部更深层次的结构以及晕核形成和衰变机制并非十分清楚. 为了开展丰中子核, 特别是中子晕核及中子滴线核参与的核反应研究, 国际上许多实验室建立了各种大型的中子探测设备, 例如美国 Texas A&M 大学的中子球^[8]、美国 MSU 研制的中子墙阵列^[9]、法国和比利时合作研制的 DEMON 探测器^[10]

和德国 GSI 研制的 LAND^[11]. 北京大学物理学院亚原子粒子探测实验室正在研制中子球探测器用于丰中子核的 β 衰变研究. 为了进行放射性滴线核多中子集团发射的研究, 深入探索弱束缚中子集团系统的内在形成机制, 兰州重离子加速器国家实验室正在 RIBLL 终端研制大面积中子探测器阵列, 用于中子的测量.

对于这类大型探测器的研制, 人们希望探测器具有较高的探测效率, 但是面积的增加导致了能量分辨、时间分辨或位置分辨的变差, 解决这个问题的方法是使用许多小尺寸晶体和多个光电倍增管组成的探测器阵列. 为了估计探测器各项性能指标, 优化设计参数, 有必要对探测系统进行蒙特卡罗模拟.

2 大面积中子探测器阵列的研制

2.1 总体考虑

中子探测器的研制主要用于丰中子核结构和性

2004-05-17 收稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(G2000077400)资助

1) E-mail: yeyl@hep.pku.edu.cn

质的研究,中子测量是十分重要的.中子的测量中两个最基本的问题是要有高的探测效率和好的分辨(能量分辨、时间分辨或位置分辨).

由于中子不带电,不能直接测量,常采用核反冲法进行测量,含氢原子较多的有机闪烁体是最常用的材料.塑料闪烁体具有良好的光输出和快的时间响应,而且能够很容易地被加工成各种形状和尺寸,我们选择了 BICRON 公司生产的 BC400 塑料闪烁体作为探测器的材料. BC400 固有衰变时间 2.4ns,光输出 65%,H 和 C 的比例 1:1,最大发射波长 423nm.光电倍增管采用 EMI-9214B 型(2.05inch)光电倍增管.

要提高中子的探测效率,需要相对厚的材料.对于中子高分辨测量采用飞行时间(TOF)方法测量,有机闪烁体能够给出很好的时间分辨,从而给出了很好的能量分辨.对于能量分辨由下式给出:

$$\frac{\delta E}{E} = 2 \left[\left(\frac{\delta d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中 d 是中子的飞行距离, T 是中子的飞行时间, δd 和 δT 分别是各自的分辨(FWHM).在时间分辨绝对好($\delta T = 0$)的情况下,能量分辨就只取决于探测器的有限厚度 Δd ,这样飞行距离的分辨 $\delta d = \Delta d$. d 可以被十分精确地确定,这就需要有相对薄的探测器来提高飞行距离的分辨.

要同时满足好的分辨和合理的探测效率,需要选择合适尺寸的探测器材料.增大探测器的面积,从而增大了探测器的接收立体角,但会使分辨降低.因此,我们将整个中子探测器做成模块化、阵列式,把它的面积 2300mm × 1200mm 分成 8 个模块单元,考虑到探测器造价以及电子学系统的复杂性,只将每个模块单元分成 7 × 7 阵列.

2.2 蒙特卡罗模拟

Geant4 是由 CERN 的一个小组(IT/API)开发的对粒子和核物理探测器进行蒙特卡罗模拟的一个功能强大的工具包^[12].采用 Geant4 软件包对中子探测器进行了模拟计算,主要考虑了探测器对中子的探测效率、时间分辨和位置分辨,以及探测器阵列的 cross-talk 问题.模拟以一个模块单元为例,每个模块单元闪烁体面积为 500mm × 500mm,分为 7 × 7 阵列.

由于塑料闪烁体由 H 和 C 组成,中子和塑料闪烁体的相互作用主要通过如表 1 的 6 个过程.#4 和 #6 相互作用没有中子产生而且截面很小,其他过程伴随中子的产生,还产生了 C, α 粒子和质子等反冲核.图 1 给出了模拟得到的不同入射中子能量 E_n 的 BC400 的光输出谱,1MeVee 等于 1MeV 电子等效能量.我们可以看出, α 粒子和 C 的光输出产额很低,而且能量也很低,绝大多数反冲核是质子,因此通过测量反冲的质子可以实现对中子的测量.

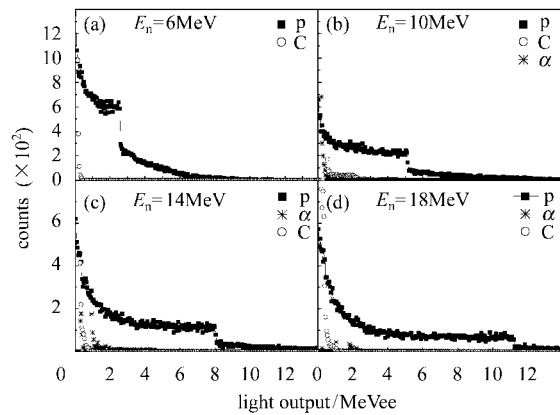


图 1 BC400 的光输出谱

表 1 中子与塑料闪烁体相互作用过程(数据取自文献[13])

interactions	$E_n = 6\text{MeV}$	$E_n = 10\text{MeV}$	$E_n = 14\text{MeV}$	$E_n = 18\text{MeV}$
	σ_R/b	σ_R/b	σ_R/b	σ_R/b
1 $n + p \rightarrow n + p$	1.43	0.94	0.69	0.543
2 $n + C \rightarrow n + C$	0.917	0.21	0.15	0.12
3 $n + C \rightarrow n + C + \gamma(4.44\text{MeV})$	0.17	0.345	0.25	0.136
4 $n + C \rightarrow \text{He} + \text{Be} - 5.71\text{MeV}$	0.00	0.135	0.08	0.064
5 $n + C \rightarrow n + 3\alpha - 7.26\text{MeV}$	0.00	0.06	0.22	0.32
6 $n + C \rightarrow p + B - 12.59\text{MeV}$	0.00	0.00	0.00	0.03

对于某一给定能量 E_n 的单色中子的探测效率定义为:

$$\epsilon = \frac{\int_{E_n^{th}}^{E_n^{max}} R(E, E_n) dE}{\Phi}, \quad (2)$$

式中 Φ 是入射中子的计数, $R(E, E_n)$ 是 BC400 的相对光输出响应函数, E_n^{th} 是探测阈值, E_n^{max} 是 BC400 光输出最大的能量. 图 2 给出了不同厚度的 BC400

塑料闪烁体在不同探测阈值的中子探测效率. 可以看出中子探测效率随着探测器厚度的增加而增加. 闪烁体厚度的增加会导致时间分辨变差, 如图 3 所示. 我们选择闪烁体的厚度为 8cm, $E_n = 15\text{MeV}$ 条件下, BC400 的时间分辨(FWHM)约为 1ns 左右, 中子探测效率为 32% 左右(探测阈为 150keVee), 基本满足实验需要.

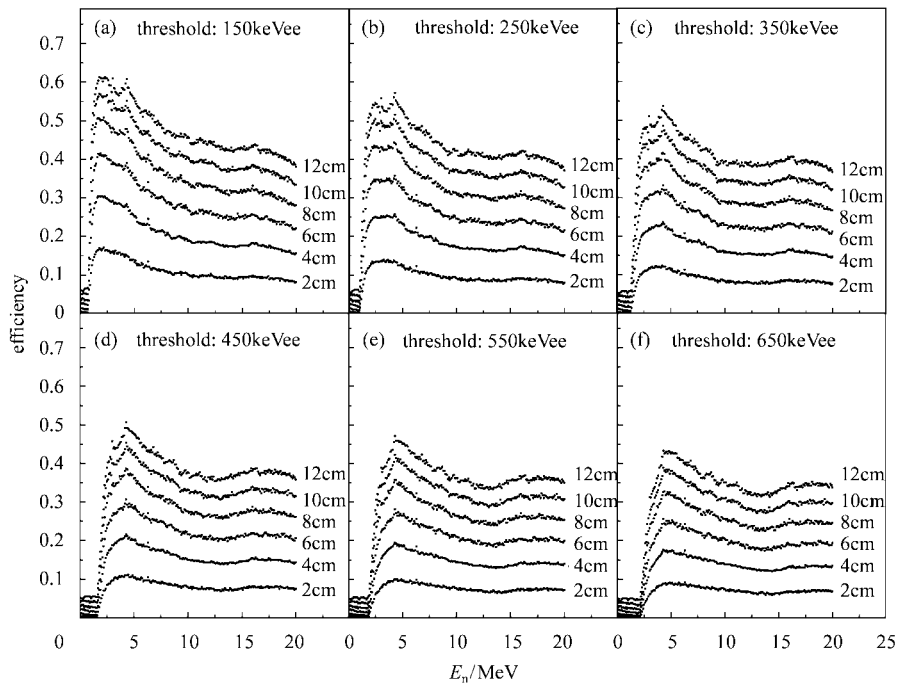


图 2 BC400 的中子探测效率

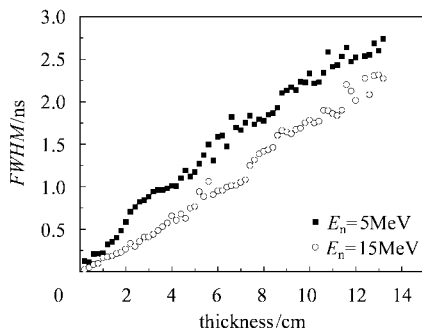


图 3 BC400 的时间分辨随厚度的变化

对于探测器模块单元的中子位置分辨我们考虑了几种不同的阵列, 如图 4 所示, 可以看到随着阵列分得越细, 位置分布越窄, 就越能够给出更为精确的

位置信息. 因此有必要将整块 BC400 闪烁体 (500mm × 500mm) 分隔成阵列形式.

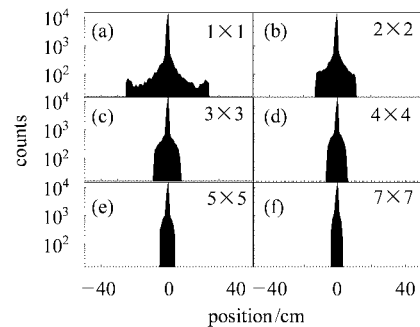


图 4 不同阵列形式的探测器模块的中子位置分布

但是阵列式探测器不可避免地会遇到 cross-talk

问题,因此有必要对探测器阵列进行优化设计. 模拟过程将整个探测器分为 7×7 矩阵的阵列形式,各矩阵彼此之间具有相同的间隙 d . 图 5 给出不同探测器阵列布局下 (d 分别为 0cm, 0.6cm, 1.0cm), 中子(15MeV)以不同方式入射探测器阵列引起的 cross-talk 情况, (a)垂直入射到第(4,4)个矩阵的中心, (b)以一定角度入射于第(4,4)个矩阵的顶角,

(c)垂直入射于第(4,4)个矩阵的顶角. 可以看出, 对于(a), cross-talk 的影响很小, 而且各种布局形式差别不是很大. 对于(b)和(c), d 为 0cm 时, cross-talk 影响很大, 随着 d 变大, cross-talk 影响逐渐变小, 在 d 为 1.0cm 时, cross-talk 事件是真实事件的 (b)6%, (c)10%, cross-talk 的影响很小.

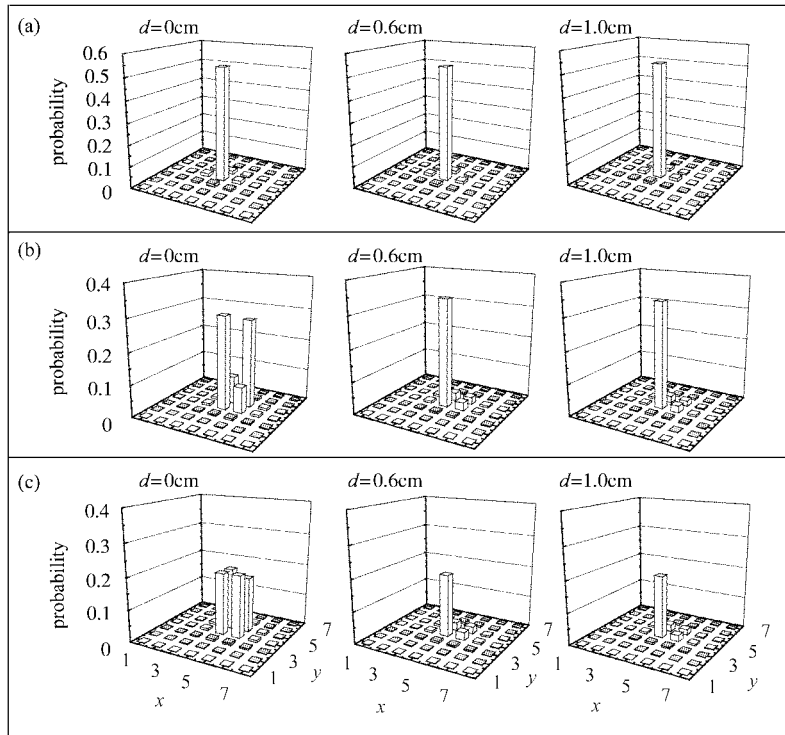


图 5 不同阵列形式的 cross-talk 情况
详细说明见正文.

2.3 设计方案

通过以上 Geant4 模拟计算,我们给出了中子探测器阵列的设计方案,其结构如图 6 所示. 它是一个长为 3m 的锥形腔体,其一端(430mm \times 200mm)与 RIBLL 终端相接,另一端(2300mm \times 1200mm)为 8 个模块单元的阵列结构,单元之间的夹角为 11.4° ,因此整个探测器覆盖了 45° 夹角. 每个模块单元(580mm \times 580mm)中,腔体外侧 100mm 厚的光电倍增管光磁屏蔽低碳钢板上加工出 7×7 阵列、直径为 64mm 的圆孔,49 个光电倍增管就坐落在这些孔里. 紧靠腔体的内壁放置了一个 540mm \times 540mm \times 120mm 的铝架, 7×7 个间距为 10mm BC400 塑料闪烁体(69mm \times 69mm \times 80mm)填充在铝架上,并通过一个厚度为 45mm 的高透明有机玻璃光导与光电倍增

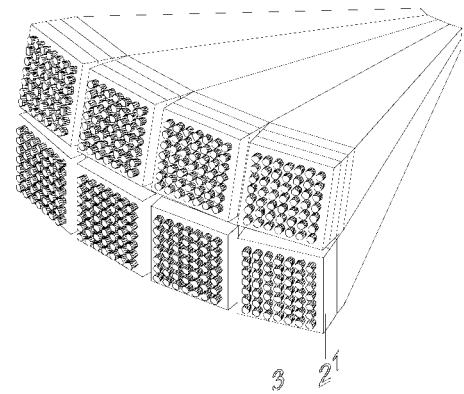


图 6 中子探测器结构示意图
1 塑料闪烁体支撑铝架, 2 光电倍增管光磁屏蔽钢板,
3 光电倍增管阵列.

管相耦合. 塑料闪烁体和光导的四周用黑色胶带包裹.

3 结束语

本文通过用 Geant4 蒙特卡罗模拟、优化设计,

为 RIBLL 终端大面积中子探测器阵列的优化定型设计和研制提供了良好的基础. 该探测系统将为放射性束物理深层次反应机制和核结构的研究提供了有效的实验探测手段.

参考文献 (References)

- 1 Tanihata I, Hamagaki H, Hashimoto O et al. Phys. Rev. Lett., 1985, **55**: 2676—2679
- 2 Anne R, Bazin D, Mueller A C et al. Nucl. Instrum. Methods, 1987, **A257**: 215—232
- 3 Sherrill B M et al. Nucl. Instrum. Methods, 1991, **B56/57**: 1106—1110
- 4 Kubo T, Ishihara M, Inabe N et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B70**: 309—319
- 5 Geissel H, Armbruster P, Behr K H et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **B70**: 286—297
- 6 ZHAN Wen-Long, GUO Zhong-Yan, LIU Guan-Hua et al. Science in China (Series A), 1999, **42(5)**: 528—536
- 7 Ozawa A, Bochkarev O, Chulkov L et al. Nucl. Phys., 2001, **A691**: 599—617
- 8 Schmitt R P, Cooke L, Derrig G et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A354**: 487—495
- 9 Zecher P D, Calonsky A, Kruse J J et al. Nucl. Instrum. Methods, 1997, **A401**: 329—344
- 10 Tilquin I, Masri Y El, Parlog M et al. Nucl. Instrum. Methods, 1995, **A365**: 446—461
- 11 Blaich Th, Elze Th W, Emling H et al. Nucl. Instrum. Methods, 1992, **A314**: 136—154
- 12 Agostinellis, Allison J, Amako K et al. Nucl. Instrum. Methods, 2003, **A506**: 250—303
- 13 Cecil R A, Anderson B D, Madey R. Nucl. Instrum. Methods, 1979, **161**: 439—447

Theoretical Calculation of the Design of Large Area Neutron Detector Array at RIBLL *

CHEN Zhi-Qiang¹ YE Yan-Lin^{1,1)} WANG Jin-Chuan² XIAO Guo-Qing²
 ZHAN Wen-Long² XU Hu-Shan² GUO Zhong-Yan² JIANG Dong-Xing¹
 WANG Quan-Jin¹ ZHENG Tao¹ ZHANG Gao-Long¹ LI Zhi-Huan¹
 LI Xiang-Qing¹ HU Qing-Yuan¹ PANG Dan-Yang¹ WANG Jia¹

1 (Department of Technical Physics and the DOE Key Laboratory of Heavy Ion Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

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

Abstract The design of large area neutron array detector at RIBLL for the study of neutron-rich nuclei is presented. The neutron detection efficiency, timing resolution and position distribution of this detecting system have been obtained by detailed Monte Carlo simulation based on Geant4 package. Meanwhile, the cross-talk of the detector system has been investigated. The design of the detector is described.

Key words neutron-rich nuclei, RIBLL, large neutron detector array, Monte Carlo simulation

Received 17 May 2004

* Supported by Major State Basic Research Development Program (G2000077400)

1) E-mail: yeyl@hep.pku.edu.cn