

基于WLS光纤及SiPM读出的反符合探测器单元研究

王珂^{1,2} 宋海声¹ 方芳^{2,3} 余玉洪^{2,3} 唐述文^{2,3} 刘相满^{3,4} 孙志宇^{2,3}
马朋^{2,3} 杨贺润^{2,3} 王世陶^{2,3} 章学恒^{2,3} 闫铎^{2,3} 张永杰^{2,3}

1(西北师范大学 物理与电子工程学院 兰州 730070)

2(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3(中国科学院大学 核科学与技术学院 北京 100049)

4(兰州大学 核科学与技术学院 兰州 730000)

摘要 中高能区中完全运动学测量是研究丰中子奇异核结构与性质的常用实验方法。反符合(Veto)探测器是CSR-RIBLLII(Cooling Storage Ring - Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou)外靶实验终端(External Target Facility, ETF)开展丰中子测量的关键设备之一,其功能是消除带电粒子干扰以提高丰中子的有效事例数。然而,原有的Veto探测器存在探测效率低、均匀性差等缺点,可能导致实验与理论计算结果出现偏差。为了解决原有探测器的问题,设计了一种新的Veto探测器单元构型,即采用在Veto探测器单元中嵌入波长位移光纤(Wave Length Shifter Fiber, WLS),并使用硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)读出的方案。搭建了专门的测试平台并对新型Veto探测器单元进行细致研究,其关键性能参数反符合效率可大于99.9%,相比于原有的Veto探测器提升了22.74%。这一研究结果为CSR-RIBLLII外靶实验终端提供了有效的升级方案,为下一步丰中子奇异核的实验研究奠定了良好的基础。

关键词 外靶实验终端, 反符合探测器, 波长位移光纤, 硅光电倍增管, 探测效率

中图分类号 TL812⁺.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.070401

Anti-coincidence detector unit based on WLS fiber and SiPM readout

WANG Ke^{1,2} SONG Haisheng¹ FANG Fang^{2,3} YU Yuhong^{2,3} TANG Shuwen^{2,3} LIU Xiangman^{3,4}
SUN Zhiyu^{2,3} MA Peng^{2,3} YANG Herun^{2,3} WANG Shitao^{2,3} ZHANG Xueheng^{2,3} YAN Duo^{2,3}
ZHANG Yongjie^{2,3}

1(School of Physics and Electrical Engineering, Xibei Normal University, Lanzhou 730070, China)

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

3(School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

4(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract [Background] Complete kinematic measurements in the medium or high-energy region is a common experimental method to study the structure and properties of exotic nuclides on the neutron-rich side. The experiment

国家自然科学基金(No.U2031206, No.12273086, No.U1832122)资助

第一作者: 王珂, 女, 1997年出生, 2019年毕业于闽南科技学院, 现为硕士研究生, 研究领域为辐射粒子探测技术研究

通信作者: 宋海声, E-mail: songhs@nwnu.edu.cn; 方芳, E-mail: fangf@impcas.ac.cn

收稿日期: 2022-12-14, 修回日期: 2023-04-19

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U2031206, No.12273086, No.U1832122)

First author: WANG Ke, female, born in 1997, graduated from Minnan University of Science and Technology in 2019, master student, focusing on radiation particle detection technology

Corresponding author: SONG Haisheng, E-mail: songhs@nwnu.edu.cn; FANG Fang, E-mail: fangf@impcas.ac.cn

Received date: 2022-12-14, revised date: 2023-04-19

setup in the Cooling Storage Ring - Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou (CSR-RIBLLII), a typical nuclear external target facility, comprises many detectors with different requirements. The anticoincidence (Veto) detector is an essential part of the external target facility for eliminating the interference of charged particles and measuring medium or high-energy neutrons with high reliability and performance by combining them with a neutron wall detector. The original Veto detector with photomultiplier (PMT) readouts has many disadvantages, such as low detection efficiency and poor uniformity, resulting in significant differences or contradictions between experimental and calculation results. **[Purpose]** This study aims to upgrade the original Veto detector using wave length shifter fiber (WLS) and silicon photomultiplier (SiPM) to improve the detection efficiency of charged particles. **[Methods]** Firstly, a new configuration for the anticoincidence Veto detector unit was designed and the detector thickness was increased by 5 mm compared to the previous Veto detector, resulting in a final thickness of 1 cm. The Veto detector was embedded with 15, 7, and 3 WLS fibers from both ends, and read using SiPM. Furthermore, to systematically explore the performance of the detector unit, a linear relationship was calibrated between the number of photons of the SiPMs and the number of Analog-to-Digital Converter (ADC) channels. This relationship was used to accurately calculate the threshold value, laying a foundation for calculating detection efficiency. Then, based on Multi-Wire Proportional Chamber (MWPC), a detection efficiency test platform was established, and time position conversion and track selection data analysis methods were developed as test methods. Finally, a detailed test on the whole and each part of the anticoincidence Veto detector unit was carried out on the MWPC test platform. **[Results]** Test results show the highest anticoincidence efficiencies of SiPMs at both ends for the Veto detector embedded with 15, 7, and 3 WLS fibers are 99.99%, 99.94%, and 99.82%, respectively; increased by over 22.74% compared with the original Veto detector. **[Conclusions]** The new Veto detector based on WLS fiber and SiPM readout meets the needs of the CSR-RIBLLII external target facility.

Key words External target facility, Anticoincidence detector, Wave length shifter fiber, Silicon photomultiplier, Detection efficiency

远离 β 稳定线附近丰中子核结构与性质的研究是当前核物理研究前沿领域之一^[1],对丰中子核尤其是幻数附近丰中子核的研究有助于人们更好地理解原子核的演化规律和核间的相互作用^[2-4]。利用中高能重离子束流轰击初级反应靶产生碎裂产物是获得丰中子核的常用方法之一,通过中高能放射性束流开展实验研究的优点之一是碎裂后的反应产物主要集中在前角区,这样仅需较小立体角的探测器就可以实现对带电粒子碎片、中子和 γ 等最终反应产物全范围覆盖的符合测量。这种多物理参量同时测量的实验方法又称为完全运动学测量方法^[5],需要研制大型外靶实验装置,这类实验装置一般采用磁谱仪构型,根据反应产物在大口径二极磁铁中偏转行为的不同表现,对带电粒子和中性粒子进行初步选择,其后通过组合、联合不同功能的探测器进一步实现粒子种类的鉴别和运动学完全参量的测量。国际上典型的实验装置包括密歇根州立大学国家超导环形加速器实验室(Michigan State University National Superconducting Cyclotron Laboratory, MSU)的模块化中子阵列(Modular Neutron Array, MONA)^[6]、德国亥姆霍兹重离子研究中心(GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH)

的新型大面积中子探测器(New Large-Area Neutron Detector, NeuLAND)^[7]及中国兰州重离子加速器(High Energy Heavy Ion Research Facility, HIRFL)冷却储存环第二条放射性束流(CSR-RIBLLII)的外靶实验终端(External Target Facility, ETF)^[8]。

反符合(Veto)探测器是CSR-RIBLLII外靶实验终端中的关键设备之一,与放在它正后方的中子墙探测器联合实现中高能中子的测量。中子墙探测器选用了大尺寸塑料闪烁体作为主要探测器的灵敏介质材料,采用图像量能器构型设计,基于飞行时间测量方法进行中高能中子的高探测效率和高能量分辨测量。Veto探测器的主要功能是降低或去除带电粒子本底被误判为中子的概率,这是因为中子的探测是通过其与灵敏介质中原子核相互作用后产生的次级带电粒子实现的,仅靠中子墙探测器无法剔除带电粒子本底的影响。Veto探测器的工作原理是采用薄型低原子序数(Z)作为灵敏介质材料时,目标能区的中子具有极强的穿透能力,击中时基本不产生有效信号,而对带电粒子却具有很高的探测效率,这样便可以利用信号的有无区分中子和带电粒子本底。可以看出,影响Veto探测器性能的关键因素是灵敏探测器的厚度和对带电粒子的探测效率。因

此,在设计厚度时,反映 Veto 探测器性能的主要指标是能否实现对带电粒子较高的探测效率要求,即对带电粒子的反符合效率越高,被误判为中子的概率也越小。

外靶实验终端原有的 Veto 探测器采用有机塑闪材料以及双端耦合光电倍增管(Photomultiplier, PMT)的读出方案,为了匹配其后置的中子墙探测器,单元条的有效几何尺寸为 $150\text{ cm}\times 8\text{ cm}\times 0.5\text{ cm}$ 。经过测试发现,此种 Veto 探测器的反符合效率较低,分析是 Veto 单元条的边缘效应造成的,因为 0.5 cm 厚度的探测器对于轻带电粒子能损较低,即产生的闪烁光子数目较少,越靠近边缘产生的闪烁光子由于较长的传输距离和较为苛刻的空间立体角限制难以传输至两端,最终造成越靠近边上的探测效率越低,且最小电离粒子(Minimum Ionizing Particles, MIPs)击中不同位置的 Veto 探测器和 PMT 的电压也均会影响 Veto 探测器的探测效率。图 1 是 MIPs 在不同位置的探测效率曲线图,可以看出,在两端都有有效读出计数(逻辑与)时,中间位置的 Veto 效率明显高于两端,在更高的 PMT 工作电压下探测效率更高,这表明 Veto 效率与击中位置相关,也与 PMT 的工作电压相关。但长时间过高的工作电压会损伤 PMT 的寿命,同时导致暗电流计数大幅度增加,对测量结果造成不利影响。因此,需要对 Veto 探测器进行技术升级。

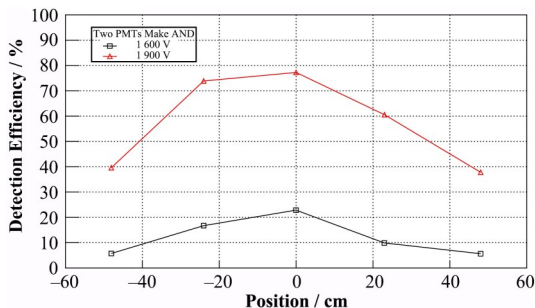


图1 不同电压下原有5 mm厚度的Veto探测器单元条5个不同位置的探测效率

Fig.1 Detection efficiency of 5 different positions of the original 5 mm thickness Veto detector unit strip under different voltages

综合对比后,拟在塑料闪烁体材料中嵌入波长位移转换光纤(Wave Length Shifter Fiber, WLS)光纤^[9],并采用硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier, SiPM)读出方案^[10]。WLS光纤是一种特殊的导光光纤^[11],它由发绿光的光纤表层材料和不发光的光纤纤芯材料组成,通常与有机塑料闪烁体配合使用,其工作原理是吸收闪烁体发出的蓝光波段的荧光光

子,并将其转换成绿光波段。使用时直接将其贴在闪烁体侧面或者嵌入闪烁体内部进行闪烁光的收集,能极大提高探测器的探测效率和光输出均匀性等性能。选择 SiPM 读出的主要原因是嵌入 WLS 光纤后,传输到光纤两端的闪烁光子总数量少,相比于一般 PMT 对单光子分辨能力较差,而 SiPM 对单光子有非常好的单光子分辨能力,因此在弱光探测场合中具有更大的优势^[12]。同时, SiPM 作为一种半导体型光电器件,还具有增益高、灵敏度高、偏置电压低、对磁场不敏感、结构紧凑等优点^[13],在粒子物理和核物理实验中的应用也日益广泛。

综上所述,采用此方案的 Veto 探测器,在具备高探测效率的同时更容易解决原有方案均匀性较差的问题,嵌入 WLS 光纤结合 SiPM 读出的方案能大幅提高不同入射位置 Veto 的均匀性并有效减少灵敏死区。因此,对现有外靶实验终端实验装置性能的提升有重要的意义。本文将介绍该种新型的 Veto 探测器结构,并对嵌入 15、7、3 根 WLS 光纤的 Veto 探测器性能进行研究,得到其探测效率等关键参数,为外靶下一步技术升级提供技术指导。

1 Veto 探测器的结构

研制的新型 Veto 探测器结构示意图如图 2 所示。该探测器由三部分组成:Veto 探测器单元模块、WLS 光纤、SiPM 读出器件。Veto 探测器单元条模块尺寸为 $150\text{ cm}\times 8\text{ cm}\times 1\text{ cm}$,材料选择的是 ELJEN 公司生产的塑料闪烁体 EJ-200^[14],性能参数为光输出 64% Anthracene、闪烁效率 10 000 光子/ $1\text{ MeV}\cdot\text{e}^-$ 、最高概率发射波长 425 nm、光衰减长度 380 cm、上升时间 0.9 ns、衰减时间 2.1 ns、折射系数 1.58。在 Veto 单元条模块中开槽并嵌入的直径为 1 mm 的 WLS 光纤,选用了圣戈班公司生产的 BCF-92 产品^[15],其主要参数如表 1 所示。这种光纤由发绿光的光纤包层聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)材料和不发光的光纤纤芯聚苯乙烯(Polystyrene, PS)材料组成,因此具有较长的衰减长度,比 150 cm 的 Veto 塑闪单元条的长度大两倍; SiPM 所选择的型号为日本滨松公司的 S13360-6050CS^[16],灵敏面积为 $6\text{ mm}\times 6\text{ mm}$,主要性能见表 2。为了对闪烁光子进行更好收集,嵌入的 WLS 光纤从 Veto 单元条模块两端拉出一定距离后汇聚在一起。同时,为了消除 WLS 和 SiPM 端面间的空气间隙,进一步提高闪烁光的有效收集效率,在结构上利用光学耦合剂将 WLS 和 SiPM 端面进行耦合。

表1 波长位移光纤参数
Table 1 Wave length shifter fiber (WLS) parameters

| 本实验方案中的直径 Minimum diameter / mm | 发射光子 Emission color | 发射光谱峰值 Emission peak / nm | 光子衰减时间 Decay time / ns | 衰减长度 Decay length / m |
|------------------------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| 1 | 绿 Green | 492 | 2.7 | >3.5 |

表2 SiPM 参数
Table 2 Silicon photomultiplier parameters

| 像素点个数 Number of pixels /ch | 像素尺寸 Pixel size / μm | 光谱响应范围 Spectral response range / nm | 波长峰值 Peak sensitivity wavelength (typ.) / nm | 典型增益 Gain (typ.) | 测量条件 Measurement condition / $^{\circ}\text{C}$ |
|----------------------------------|------------------------------------|---|--|---------------------|---|
| 14 400 | 50 | 270~900 | 450 | 1.7×10^6 | 25 |

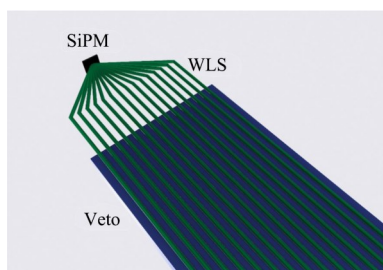


图2 在 Veto 探测器中嵌入 15 根 WLS 并使用 SiPM 读出示意图

Fig.2 Schematic diagram of embedding 15 WLSs in Veto detector and read out by SiPM

2 Veto 探测器探测效率的标定

2.1 SiPM 单光子的线性刻度

为了对 SiPM 的性能进行细致研究,本文设计了一套基于 LED 系统的实验装置,测试框图如图 3 所示。LED 驱动器选用 CAEN 公司的 SP5601^[17],其典型的特征如下:脉冲宽度为 8 ns,发出的峰值波长为 400 nm,可提供内部/外部两种触发方式,可调节发光强度,并可由一根光纤连接到被测设备端面。测试过程中,将 LED 的光输出光纤耦合至 SiPM 的灵敏面积端面。由于 SiPM 单光电子的信号在倍增后幅度仍然较小,无法和现有的商用 ADC 的量程进行很好匹配。因此,SiPM 输出的信号需要经过两级放大器连续放大。其中前置放大器由中国科学院近代物理所核电子学组自行研制,第二级主放大器为德国 MESYTEC 生产的 MDS-8。测试过程中使用的 ADC 为 CAEN V785N,其量程为 4 V,对应的最大 ADC 道数为 4 096 道。

在测试之前,对核电子学组自主研发的放大器和 MDS-8 主放大器进行统一的放大倍数刻度。刻

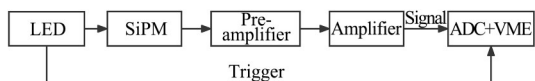


图3 LED 系统测试 SiPM 单光子分辨的实验装置
Fig.3 Experimental setup for testing SiPM single-photon resolution of LED systems

度方法如下:通过 Tektronix AFG3252 脉冲发生器输出一定幅度的信号并送进两级放大器件,在示波器上读出输出的幅度,再次改变输出信号的幅度,间隔测量,最后对数据进行拟合,便可得到两级放大器的倍数。测量结果见表 3,通过拟合得到两级放大的总放大倍数为 23.2。

表3 放大倍数测试
Table 3 Magnification test

| 输入信号幅度 Input signal amplitude / mV | 输出信号幅度 Output signal amplitude / mV |
|---------------------------------------|--|
| 50 | 1 168 |
| 100 | 2 313 |
| 150 | 3 455 |
| 200 | 4 686 |
| 250 | 5 769 |

在测试过程中,首先使用 EJ-550 光学硅脂将 LED 的光纤与 SiPM 进行耦合,以减少光子在光纤和 SiPM 之间的损失;然后通过定制的固定夹具对整套实验装置进行固定,减少光纤弯曲对光子传输的影响;最后使用遮光布对整套实验装置进行避光处理,防止自然光等其他因素对测试结果造成干扰。将 SiPM 工作电压设定为 56 V,并通过调节旋钮,调节 LED 的发光强度至极弱水平,测得的 SiPM 单光电子电荷谱如图 4 所示。对测得的电荷幅度谱进行高斯拟合并寻峰可以得到 SiPM 对不同的光电子峰具有良好的分辨能力。其中,不同的峰代表不同的光电子数目。随着 LED 发光强度的增加,高斯拟合得到 SiPM 不同光电子能谱的峰值与光电子数成正比,即 SiPM 对入射光子具有良好的线性响应,结果如图 5 所示。结合 SiPM 单光子与 ADC 道数的线性关系,可反推得到不同道数下 SiPM 在 56 V 工作电压下灵敏区域接受的光子数,进而确定 Veto 探测器在耦合 WLS 和 SiPM 情况下能够接收的光子数,为测试 Veto 探测器的探测效率奠定基础。

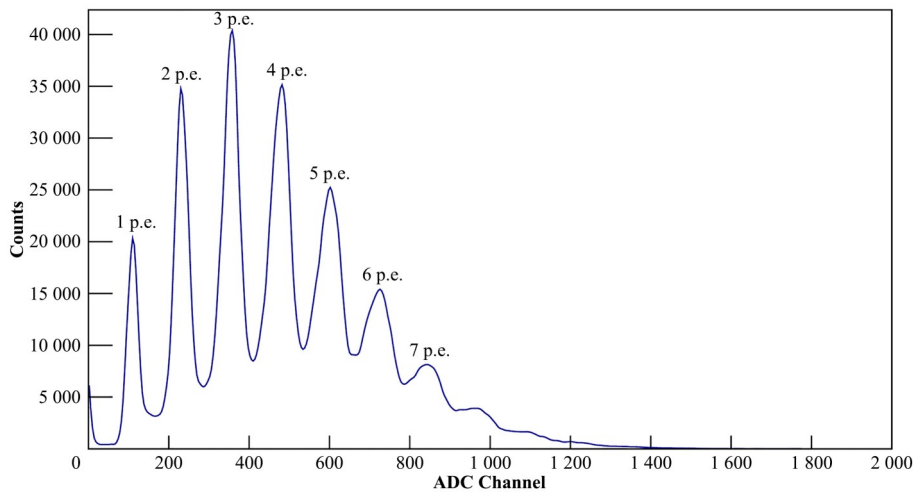


图4 LED照射SiPM时的单光电子电荷谱
Fig.4 Single photoelectron charge spectrum of SiPM illuminated by LED

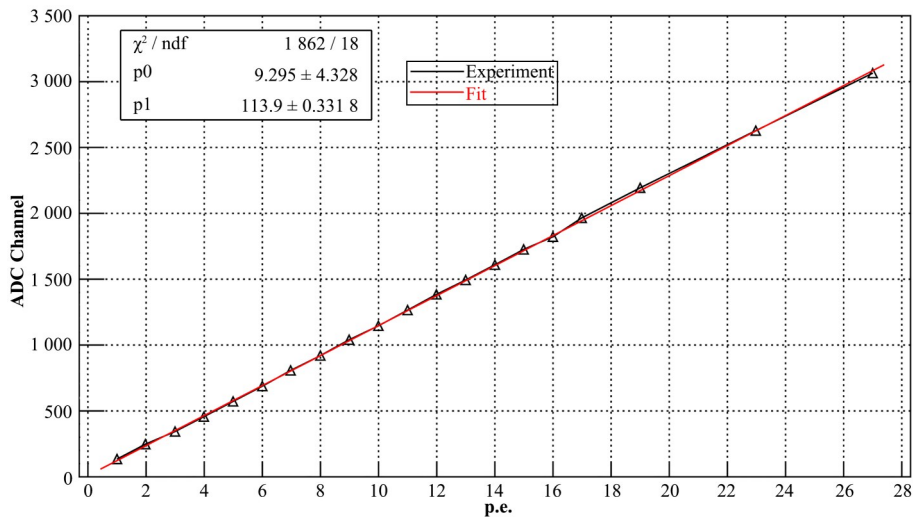


图5 SiPM光子数与ADC道数的线性关系
Fig.5 Linear relationship between the number of SiPM photons and ADC channels number

2.2 Veto探测效率测试平台

2.2.1 测试平台的结构

一般的探测效率测量方法是将被测探测器放置于上下的两重或多重触发探测器中间,通过计算不同重数符合率的比例得到待测探测器的探测效率^[18]。但是对于大灵敏面积探测器,直接利用该方法存在测试效率过低、测试时间过长、无法测试特殊形状的探测及本底粒子干扰强等缺点^[19],因此,为了对该新型Veto探测器单元的探测效率等性能参数进行研究,本文研制了一套利用地面附近的宇宙射线基于MWPC的位置灵敏探测器测试平台。该平台很好地利用了宇宙射线如下优势,其一是宇宙射线分布广泛且主要成分是 μ 子,常用于探测器尤其是大灵敏面积探测器研究的免费辐射粒子源;其二是它的能量非常高,平均能量在3~4 GeV,处于MIPs能量段,当它穿透Veto探测器时,在其中沉积

的能量为最小电离能量损失,用其测试得到的能量分辨可以代表探测器的最差能量分辨水平,可以得到的带电粒子探测效率为最低探测效率。搭建的Veto探测器单元性能测试平台如图6所示,该平台主要由触发探测器、位置灵敏型探测器、读出电子学及数据获取系统(Data Acquisition Card, DAQ)等几部分组成。

测试平台共包括两个触发探测器,分别放置在平台的顶部和底部,主要功能是提供DAQ系统的触发信号,并为位置探测器MWPC提供参考时间零点。其主体由两块200 mm×200 mm×10 mm的有机塑料闪烁体组成,探测器灵敏介质材料的型号为ELJEN公司的EJ-200。为了更好地实现有机塑料闪烁体和读出器件PMT二者间的匹配,利用PMMA加工了专门用于形状过渡的光导。其中,使用PMT的型号为日本滨松公司(Hamamatsu)的R7724。为了

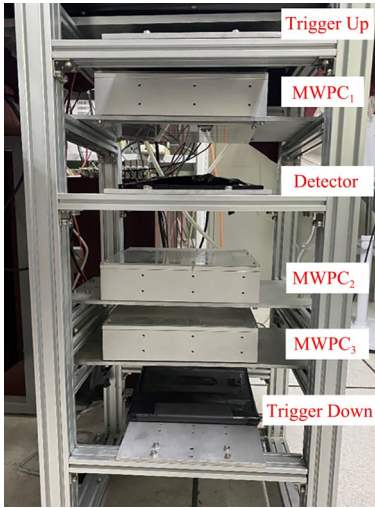


图6 MWPC测试平台实物图
Fig.6 Physical snapshot of the multiwire proportional chamber test platform

提高闪烁体材料中荧光的收集效率,在有机塑料闪烁体及光导的表面分别包覆了光学反射材料 Tyvek 纸和 Teflon 膜。同时,为了避免自然光的干扰,在反射材料外面又包覆了黑胶带。

位置灵敏探测器采用多丝正比室技术路线研制完成。为了得到一个有效径迹,共研制了 3 个 $MWPC_i (i=1, 2, 3)$, 放置在两个触发探测器内侧,从上到下平行放置,依次为 $MWPC_1$ 、 $MWPC_2$ 和 $MWPC_3$ 。其中, $MWPC_1$ 和 $MWPC_3$ 之间的垂直距离是 372 mm, $MWPC_2$ 和 $MWPC_3$ 之间的垂直距离是 98 mm。每个 MWPC 探测器的灵敏面积均为 $12\text{ cm} \times 12\text{ cm}$, 采用了两层阴极丝面夹一层阳极丝面的三层构型设计。阳极丝面与两侧阴极丝面的板间距均为 4 mm。它采用了斜丝布局,与阴极丝面的夹角为 45° 。每根阳极丝之间的间距为 2 mm, 选用了丝径为 $15\ \mu\text{m}$ 的金钨丝。为了实现二维位置信号读

出,两侧的阴极丝面采用相互正交设计。每根阴极丝之间的间距为 0.5 mm, 选用了丝径为 $30\ \mu\text{m}$ 的不锈钢丝。为了节约电子学的通道,每 4 根阴极丝并为一引出信号,即两路阴极丝的间距为 2 mm。每两路阴极丝之间有一个延迟时间为 2 ns 的延迟块,最后通过延迟块的两端读出 $MWPC_i$ 的时间信号^[20]。另外,每个 $MWPC_i$ 采用了 P10(Ar 90%+CH₄ 10%)混合气体作为工作气体,工作方式流气式。测试装置的读出电子学及 DAQ 系统由传统的 NIM 及 VME 产品组成。上、下两个触发探测器 PMT 输出的脉冲信号经过 ORTEC CF8000 恒分甄别器后,其中一路送入到 ORTEC CO4020 逻辑符合插件作逻辑与运算,符合后的逻辑信号作为电荷数字转换器 (Charge-to-Digital, QDC) 的门信号和时钟数字转换器 (Time-to-Digital, TDC) 的公共起始时间,另一路则经过 ORTEC DL8000 延迟后进入 TDC 模块记录时间信息。前述 TDC 为 CAEN 公司生产的 V755, 量程设置为 800 ns, 对应每道的数值为 195 ps, QDC 为 CAEN 公司生产的 V965, 在实验中选择的量程范围为 900 pC。 $MWPC_i$ X、Y 两个方向阴极丝面的读出信号在从两端引出后,先后通过 ORTEC 快时间放大器 FTA820C 和 FTA820B 进行 20 倍和 200 倍的两级放大,放大后的信号送入 CF8000 进行甄别、经 DL8000 延迟后送入 TDC 模块中记录时间信息。

Veto 探测器单元放置在 $MWPC_1$ 和 $MWPC_2$ 之间,并通过 TDC 和 QDC 插件记录时间和幅度信息。根据被测探测器输出的原始脉冲信号的实际幅度大小,可以选择不同增益的放大器进行动态范围匹配。由于被测探测器的幅度信息是通过 QDC 记录的,需要通过延迟线对模拟信号进行延迟。整个测试平台的电子学框图如图 7 所示。

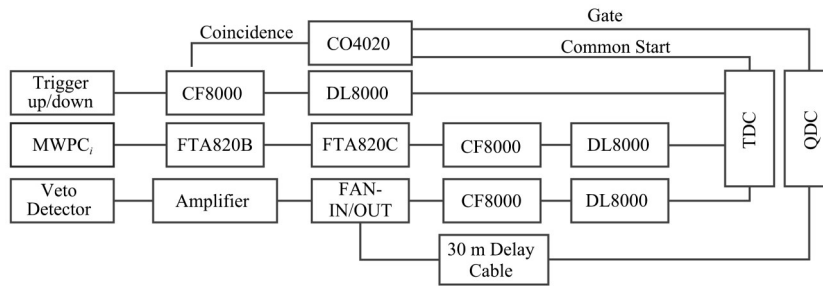


图7 电子学测试框图
Fig.7 Electronics test block diagram

2.2.2 平台测试方法

利用该平台,可以进行宇宙射线径迹的挑选。当宇宙射线穿过 MWPC 产生响应的同时也穿过 Veto 探测器时,被认为是一条有效径迹。数据分析的方法主要包括两个步骤:1) $MWPC_i$ 的 T - P (时间-

位置)关系刻度;2)有效径迹的挑选。由于 $MWPC_i$ 是完全一样的探测器且每个探测器的 X 方向和 Y 方向尺寸相同并采用了同样丝构型的设计,因此,它们的 T - P 刻度方法是一样的。下面将以 $MWPC_1$ 的 X 方向进行 T - P 刻度关系举例说明。

TDC测量得到MWPC₁探测器的两端时间差原始谱如图8(a)所示。为了得到时间与击中位置的关系以入射粒子击中MWPC₁探测器X方向的几何中心点为参考零点,则两端最边缘处的位置分别为 $x_1=-60\text{ mm}$ 和 $x_1'=60\text{ mm}$,此时对应了两个时间差最大值 Δt_1 和 $\Delta t_1'$,对图8(a)原始谱进行微分运算、取绝对值及平滑处理,最后再进行高斯拟合得到的两个中心峰值则是 Δt_1 、 $\Delta t_1'$,结果如图8(b)所示。由于MWPC₁探测器X方向的时间差与击中位置之间具有线性关系,利用线性公式(1)和(2)求解出参数 k 和 b 的值,实现MWPC₁探测器X方向的T-P关系刻度,结果如图8(c)所示。

$$\Delta t_1 = kx_1 + b \quad (1)$$

$$\Delta t_1' = kx_1' + b \quad (2)$$

在实现步骤一T-P关系刻度后,下一步需要进行入射粒子击中有效径迹的挑选。采用的方法是在MWPC₁探测器X方向和Y方向分别重构一条二维直线在XOZ坐标面和YOZ坐标面的投影方程,联立之后便得到三维径迹。同样,由于MWPC₁探测器X方向和Y方向构型设计完全相同,下面将以X方向为例说明。通过T-P关系的刻度,可以得到入射粒子穿过MWPC₁3层X方向阴极丝记录的三个位置击中点坐标 X_{MWPC_1} 、 X_{MWPC_2} 、 X_{MWPC_3} 。Z方向的三个位置坐标点以MWPC₁的物理安装位置为基准测量得到,测量是以MWPC₃探测器的底板平面为参考位置点($Z=0$),测量得到MWPC₁探测器X丝面到参考零点位置的垂直距离 Z_i ($i=1,2,3$),如图9所示。确定坐标(X_{MWPC_i}, Z_i)后,把式(1)、(2)求得的参数 k 、 b 代入直线拟合公式(3)计算得到各MWPC探测器的击中位置,XOZ面的拟合结果如图10所示。

$$X_{\text{MWPC}_i} = \frac{z_i - b}{k} \quad (3)$$

3 Veto探测器测试结果与讨论

3.1 探测效率测试方法

通过研制的MWPC测试平台,可以实现对被测探测器总的探测效率及各部分探测效率的研究。为了得到被测探测器各部分的探测效率,可以将被测探测器的灵敏面积划分成 $M \times N$ 个方格(即X方向划分成 M 份,Y方向划分成 N 份),根据式(4)即可计算得到各方格内的有效探测效率。

$$\eta_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_{ij}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: n_{ij} 为X方向第 i 个以及Y方向第 j 个方格内被测探测器统计的有效击中数目; N_{ij} 则为被测探测器击

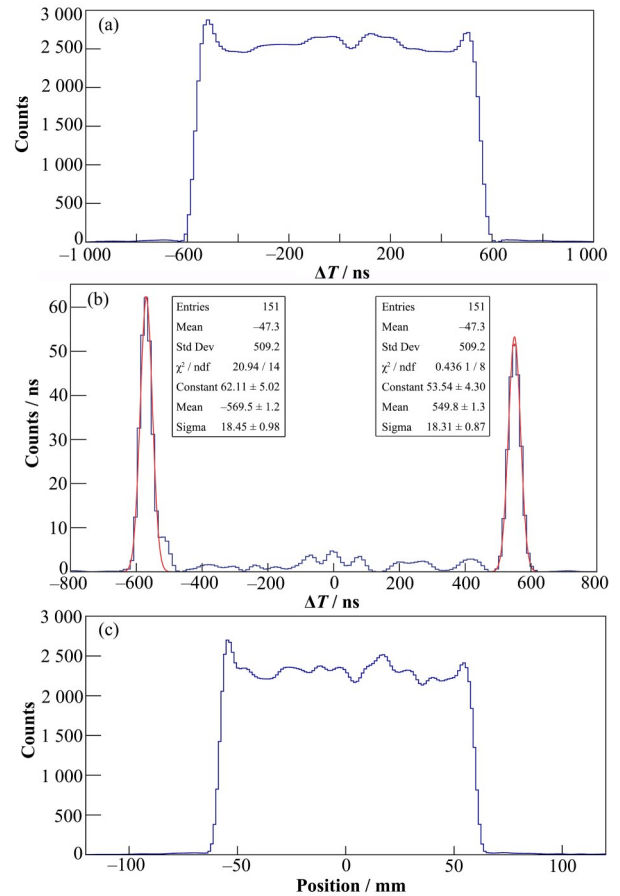


图8 MWPC₁两端时间差谱(a),MWPC₁两端时间差谱进行微分及取绝对值后计算得到的谱图(b),MWPC₁X方向进行T-P关系转换后的位置谱(c)

Fig.8 Time difference spectrum at both ends of MWPC₁ (a), spectrum calculated after differential and absolute value of the time difference spectrum at both ends of MWPC₁ (b), position spectrum of MWPC₁ after T-P relationship transformation in X direction (c)

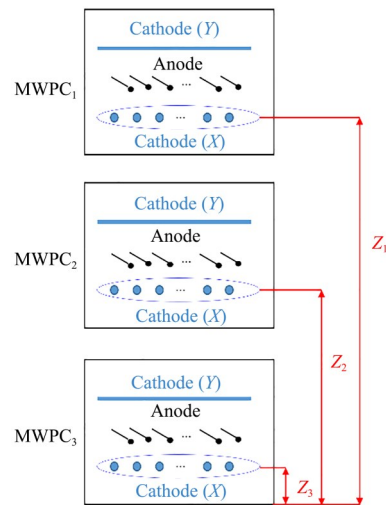


图9 各层丝面到Z=0的垂直距离示意图
Fig.9 Schematic diagram of the vertical distance from Z=0 to each layer of silk surface

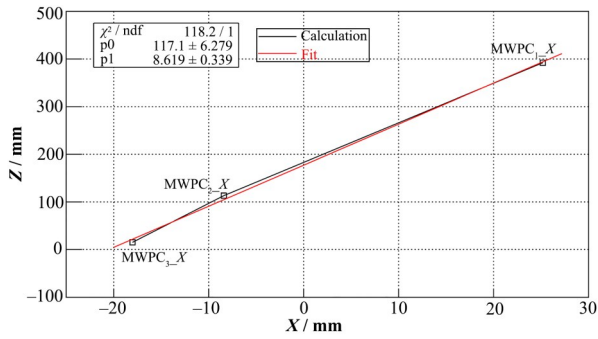


图 10 XOZ 平面三个位置点拟合的直线且符合条件的有效径迹

Fig.10 The straight line fitted by the three position points on the XOZ plane and the effective diameter that meets the conditions

中 X 方向第 i 个以及 Y 方向第 j 个方格时穿过的有效径迹数目。

而对于总的探测效率,可以很容易通过式(5)求得:

$$\eta = \frac{N_i}{\sum_{ij \in D} N_{ij}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: N_i 为被测探测器总的有效击中事件数目; $\sum_{ij \in D} N_{ij}$ 为被测探测器所有方格内总的有效径迹数。

3.2 测试结果与分析

将嵌入 15、7、3 根 WLS 光纤的 Veto 探测器放置于 $MWPC_1$ 和 $MWPC_2$ 之间,并从上到下依次安装固定进行统一测试。首先,测试 Veto 单元条的中间位置,当宇宙射线穿过测试平台及 Veto 单元条后,测试平台中的 $MWPC_i$ 和 Veto 单元条分别送入不同的电子学通道进行处理与记录。由于被测单元条在宇宙射线击中后所产生的闪烁光仅很少的比例会进入 WLS 中进行波长转换,并最终传输到两端的读出 SiPM,因此,需要对 SiPM 输出的原始模拟信号进行放大以适应电子学的动态量程范围,电子学测试框图如图 7 所示。SiPM 分别测得埋入 15、7、3 根 WLS 光纤三个 Veto 单元条的两端信号,为了方便记录,6 个 SiPM 信号命名为: 15_N、15_S、7_N、7_S、3_N、3_S,如图 11 是 7_N、7_S 的 QDC 电荷幅度谱,黑色表示 7_N 信号、蓝色则是 7_S 的幅度、红色是 7_N、7_S 的朗道拟合,最可几值分别为 823.2 ± 1.7 、 969.7 ± 1.4 ,两者相差约 146 道的原因是不同的 QDC 通道以及电子学插件通道存在不同的基线噪声及传输到两边的光子数目可能有所不同。对不同 QDC 电荷谱的基线噪声拟合得到的平均值为电子学的平均台阶值,展宽反映了测试过程中的噪声水平大小。取平均值加上 5 倍展宽的数值为有效阈值,作为 Veto 探测器是否被有效击中的判据。最后则可通过过阈事

件总数和穿过 Veto 探测器单元的总有效径迹数比例,计算得到 Veto 探测器总的反符合效率。

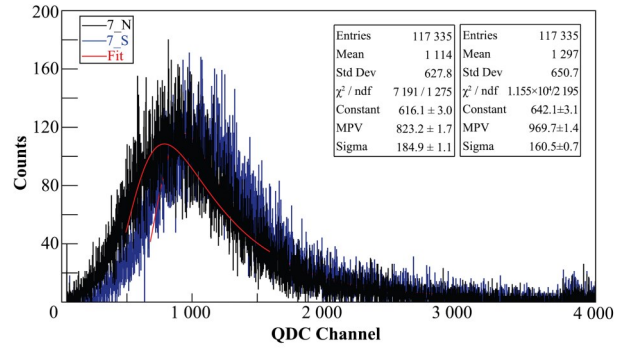


图 11 嵌入 7 根 WLS 光纤的 veto 探测器电荷幅度谱(彩图见网络版)

Fig.11 Charge-magnitude spectra of veto detectors embedded in seven WLS fibers (color online)

由于探测器边缘效应的存在,采用嵌入 WLS 和 SiPM 读出结合的方式,可以让探测器单元条边缘处的闪烁光子实现收集,使得边缘处的探测效率得以提高。为了评估该方案对边缘效应的改善,需要对不同击中位置(包括边缘位置)的探测效率进行研究。在利用该平台具体分析的过程中,通过调整方格面积,可以对被测探测器的边缘效应进行细致研究。图 12 给出了嵌入 15、7 根 WLS 光纤的 Veto 探测器单元条放置在中心位置时,按 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的面积划分格子时各部分的有效探测效率。从图 12 可以看出,在边缘位置即 Y 方向的约 $\pm 40 \text{ mm}$ 处,嵌入 15 根 WLS 光纤的 Veto 探测器的探测效率明显高于嵌入 7 根 WLS 光纤的 Veto 探测器的探测效率。为了更好对比 Veto 探测器的探测效率,把没有 WLS 光纤和嵌入 15、7、3 根 WLS 光纤的 Veto 探测器,按 10 cm 每份划分成 15 等份放入平台进行测试,结果如图 13 所示,可以看出,没有光纤的 Veto 探测器和嵌入 15、7、3 根 WLS 光纤的 Veto 探测器最高探测效率分别为 94.43%、99.99%、99.94% 和 99.82%,嵌入 15 根 WLS 光纤的 Veto 探测器的探测效率相比于没有 WLS 光纤以及嵌入 7、3 根 WLS 光纤的 Veto 探测器的探测效率提高了 5.56%、0.05% 和 0.17%,相比于早期 Veto 探测器提高了 22.74%;且嵌入 15、7、3 根 WLS 光纤的 Veto 探测器两侧边缘位置的探测效率为 99.99%、99.91% 和 99.57% 相比于中间位置下降了 0、0.03%、0.25%,而没有嵌入 WLS 光纤的两侧边缘位置的探测效率相比于自身中间位置下降了 1.28%,对整体影响最明显,其波动较大的原因是边缘的光子由于较为苛刻的空间立体角限制很难传输至两端,使得在边缘累积足够多的过阈光子数最终造成了有效面积内的探测效率不均匀。

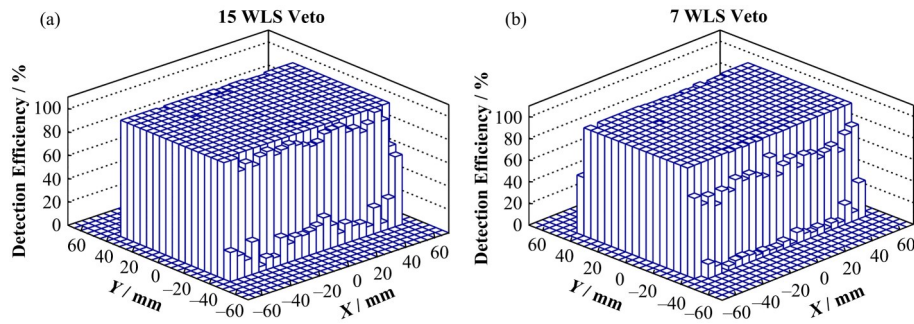


图12 15、7根WLS的Veto探测器中心处分成 $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的格子其每个格子的探测效率

Fig.12 Center of 15 and 7 WLS Veto detectors is divided into $5\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ grids, and the detection efficiency of each grid

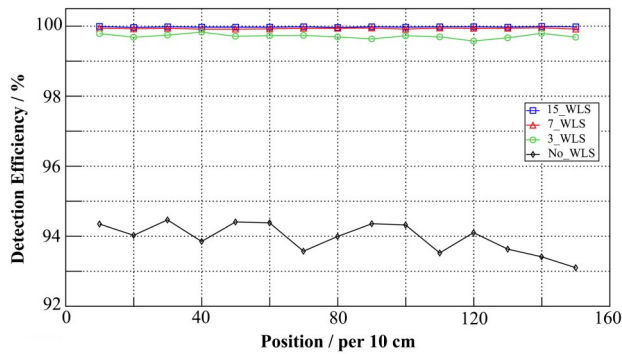


图13 不同构型的Veto探测器单元不同位置的探测效率

Fig.13 Detection efficiency of different types of Veto detectors at different positions

4 结语

为了提高CSR-RIBLLII外靶反符合探测器单元条的探测效率, 本文将Veto单元条的厚度从 5 mm 增加至 10 mm , 嵌入了15、7、3根WLS光纤, 并在双端使用SiPM读出。为了更好对比没有光纤和嵌入15、7、3根WLS光纤的Veto探测器的探测效率, 搭建完成了一套基于MWPC的宇宙射线测试平台, 利用该平台对不同构型的反符合探测器单元条开展了细致研究。测试结果显示, 在厚度增加为 10 mm 且没有嵌入WLS光纤时的Veto探测器单元中间位置处的探测效率相比于原有 5 mm 厚度时用PMT读出(工作电压为 $1\ 900\text{ V}$)Veto探测器单元中间位置处提高了 17.18% , 可以看出, 在单元条厚度增大后, 由于总的闪烁光子数量增加, 在衰减长度相同的条件下被两端收集的光子数目也会增加, 进而提高了整个探测单元的探测效率。在嵌入15、7、3根WLS光纤的Veto探测单元条两端读出器件作与时中间位置处的反符合效率的数值分别为 99.99% 、 99.94% 和 99.82% , 相较于原有 5 mm 厚度的Veto探测器单元条分别提高了 22.74% 、 22.69% 和 22.57% , 可以看出, 采用嵌入WLS结合SiPM方案后, 由于SiPM对微弱信号极具灵敏, 可以实现对很小幅度信号的测

量, 从而最终大幅增加探测器单元条的探测效率。同时, 通过数据分析还发现嵌入光纤后, 不论是两端还是单元条两侧边缘处, 局部位置的探测效率均匀性都有明显的改善。另外, 相比于嵌入7、3根光纤时, 嵌入15根光纤不论是总的探测效率还是两侧边缘处的探测效率都要更高, 均匀性更好。原因是随着嵌入总的光纤数目越多, 传输到两端的总光子数也越多, 且在嵌入的光纤等间距排布时最边上的光纤离单元条两侧边的距离也越小。

因此, 通过本文工作的研究结果, 在增加单元条厚度、并嵌入多根WLS光纤时, 可以大幅提高Veto探测器单元的总探测效率和均匀性, 减少探测器的边缘效应, 增加单元条的灵敏面积。采用该方案升级的外靶实验终端反符合探测器, 性能上可以得到大幅度的提升, 这将极有利于外靶实验终端丰中子核素物理实验的开展。在后续的研究中, 也将在外靶实验终端利用放射性次级束流(Radioactive Nuclear Beam, RNB)对Veto探测器的单元样机进行在束性能测试, 以验证其实际使用性能。

作者贡献声明 王珂负责进行实验、收集和分析数据、论文撰写、最终版本修订; 宋海声提供研究思路, 设计研究方案, 并对研究设计提供了重要反馈; 方芳提供研究思路, 设计研究方案, 并对研究设计提供了重要反馈; 余玉洪提供研究思路, 设计研究方案, 并对研究设计提供了重要反馈; 唐述文提供研究思路, 设计研究方案, 并对研究设计提供了重要反馈; 刘相满提供研究思路, 设计研究方案, 并对研究设计提供了重要反馈; 孙志宇负责课题监管与指导并为研究提供了经费支持; 马朋为测试反符合单元条提供了平台支持; 杨贺润为测试反符合单元条提供了平台支持; 王世陶提供研究思路, 设计研究方案; 章学恒提供研究思路, 设计研究方案; 闫铎提供研究思路, 设计研究方案; 张永杰提供研究思路, 设计研究方案。

参考文献

- 1 Duer M, Aumann T, Gernhäuser R, *et al.* Observation of a correlated free four-neutron system[J]. *Nature*, 2022, **606** (7915): 678 - 682. DOI: [10.1038/s41586-022-04827-6](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04827-6).
- 2 Loveland W D. Synthesis of new neutron-rich heavy nuclei[J]. *Frontiers in Physics*, 2019, **7**(23): 1 - 8. DOI: [10.3389/fphy.2019.00023](https://doi.org/10.3389/fphy.2019.00023).
- 3 Baumann T, Spyrou A, Thoennessen M. Nuclear structure experiments along the neutron drip line[J]. *Reports on Progress in Physics Physical Society (Great Britain)*, 2012, **75**(3): 036301. DOI: [10.1088/0034-4885/75/3/036301](https://doi.org/10.1088/0034-4885/75/3/036301).
- 4 Marqués F M. The extremes of neutron richness[J]. *The European Physical Journal Plus*, 2021, **136**(5): 594. DOI: [10.1140/epjp/s13360-021-01556-z](https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-021-01556-z).
- 5 Nakamura T, Yosuke Kondo. Large acceptance spectrometers for invariant mass spectroscopy of exotic nuclei and future developments[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms*, 2016, **376**: 156 - 161. DOI: [10.1016/j.nimb.2016.01.003](https://doi.org/10.1016/j.nimb.2016.01.003).
- 6 Baumann T, Boike J, Brown J, *et al.* Construction of a modular large-area neutron detector for the NSCL[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2004, **543**(2): 517 - 527. DOI: [10.1016/J.NIMA.2004.12.020](https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2004.12.020).
- 7 Boretzky K, Gašparić I, Heil M, *et al.* NeuLAND: the high-resolution neutron time-of-flight spectrometer for R3B at FAIR[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2021, **1014**: 165 - 701. DOI: [10.1016/j.nima.2021.165701](https://doi.org/10.1016/j.nima.2021.165701).
- 8 余玉洪. CSRM外靶实验装置中快塑料闪烁体阵列型探测器研制[D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 2009. YU Yuhong. Development of fast plastic scintillator array detector in CSRM external target experimental device[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- 9 Watanabe K, Yamazaki T, Sugimoto D, *et al.* Wavelength-shifting fiber signal readout from Transparent RUBber SheeT (TRUST) type LiCaAlF₆ neutron scintillator[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, **784**: 260 - 263. DOI: [10.1016/j.nima.2014.11.109](https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.109).
- 10 Risigo F, Bulgheroni A, Caccia M, *et al.* SiPM technology applied to radiation sensor development[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2009, **607**(1): 75. DOI: [10.1016/j.nima.2009.03.209](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.03.209).
- 11 Bobchenko B, Chadeeva M, Danilov M, *et al.* Optimization of the uniformity of light yield from scintillator tiles read out directly by silicon photomultipliers[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2015, **787**: 166 - 168. DOI: [10.1016/j.nima.2014.11.086](https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.11.086).
- 12 刘伍丰, 刘相满, 唐述文, 等. 下一代康普顿望远镜的量能器探测单元研究[J]. *核技术*, 2020, **43**(1): 010203. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203). LIU Wufeng, LIU Xiangman, TANG Shuwen, *et al.* Study of the detection unit of the calorimeter for the next generation Compton telescope[J]. *Nuclear Techniques*, 2020, **43**(1): 010203. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.010203).
- 13 Adamo G, Agrò D, Stivala S, *et al.* Measurements of silicon photomultipliers responsivity in continuous wave regime[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2013, **60**(11): 3718 - 3725. DOI: [10.1109/TED.2013.2282709](https://doi.org/10.1109/TED.2013.2282709).
- 14 Eljen Technology. EJ-200, EJ-204, EJ-208, EJ-212 plastic scintillators[EB/OL]. 2022.12.10. <https://eljentechnology.com/products/plastic-scintillators/ej-200-ej-204-ej-208-ej-212>.
- 15 Semenov V, Brekhovskih V, Khudyakov A, *et al.* Study of polystyrene scintillators-WLS fiber elements and scintillating tile-WLS prototypes for New CHOD detector of CERN NA-62 experiment[C]//Proceedings of the 4th International Conference on New Photo-Detectors (PhotoDet 2015, Moscow, Russia, July 6-9, 2015). Moscow, Russia: SISSA, 2016: 041.
- 16 Hamamatsu K K. Photonics, S13360 series (datasheet) [EB/OL]. 2022.12.10 https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s13360_series_kapd1052e.pdf [S13360-6050CS].
- 17 CAEN. SP5601 user manual[EB/OL]. 2022.12.10. <https://www.caen.it/products/sp5601/>.
- 18 Grupen C, Shwartz B A, Spieler H. Particle detectors[M]. 2nd Ed. New York: Cambridge University Press, 2008: 466 - 509. DOI: [10.1017/CBO9780511534966](https://doi.org/10.1017/CBO9780511534966).
- 19 张永杰, 余玉洪, 周勇, 等. 批量塑闪单元条测试技术的研究[J]. *核技术*, 2015, **38**(8): 080403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080403). ZHANG Yongjie, YU Yuhong, ZHOU Yong, *et al.* Development of a test bench for plastic scintillator

- counters for the DAMPE[J]. Nuclear Techniques, 2015, **38**(8): 080403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.080403).
- 20 何越峰, 王艳凤, 赵映潭, 等. 基于延迟块读出的多丝正比室探测器的研制[J]. 核技术, 2018, **41**(8): 080403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.080403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.080403).
- HE Yuefeng, WANG Yanfeng, ZHAO Yingtan, *et al.* Prototype of neutron sensitive MWPC detector with delay-line readout[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(8): 080403. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.080403](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.080403).