

# 闪烁光纤中宇宙线缪子的荧光光子 计数测量

王启奇<sup>1</sup> 张湘<sup>1</sup> 田立朝<sup>1</sup> 马燕云<sup>2,3</sup> 孙乙文<sup>1</sup>

1(国防科技大学 理学院 长沙 410073)

2(国防科技大学 前沿交叉学科学院 长沙 410073)

3(国民核生化灾害防护国家重点实验室 北京 102205)

**摘要** 开展基于塑料闪烁光纤的宇宙线缪子测量研究时,对闪烁光纤输出光脉冲的光子数定量分析,是读出电子学设计的前提。在无单光子源等弱光标定时,对缪子入射事件在光纤中产生光脉冲的光子数进行定量分析是本文的主要目标。首先利用硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier Tube, SiPM)固有的非光生载流子特性标定光脉冲的测量值,获得缪子在直径 1 mm 和 2 mm 光纤中产生微弱光脉冲包含的光子数;然后结合 Geant4 软件模拟计算缪子在光纤中理论光子产额,并与实验结果对比验证。结果显示,在直径 1 mm 和 2 mm 光纤中光脉冲光子期望值分别为 44 个和 85 个,与模拟结果偏差分别为 4.55% 和 10.59%,表明该低光子数测量方法可以在无额外标定设备时,实现对缪子入射光纤产生光子数的准确测量,并可以应用在其他弱光脉冲光子数测量场景中。

**关键词** 硅光电倍增管, 缪子, 塑料闪烁光纤, 光子数测量, Geant4

中图分类号 TL813, TL82

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100401

## Measuring fluorescence photon counts of cosmic ray muons in scintillation fibers

WANG Qiqi<sup>1</sup> ZHANG Xiang<sup>1</sup> TIAN Lichao<sup>1</sup> MA Yanyun<sup>2,3</sup> SUN Yiwen<sup>1</sup>

1(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

2(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

3(State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Beijing 102205, China)

**Abstract** [Background] In the realm of cosmological ray studies employing plastic scintillation fibers, it is essential to conduct quantitative analyses of the photon number from the fiber's output pulse for the successful design of readout electronics. [Purpose] Given the absence of a weak cursor setting device such as a single photon source. This study aims to quantitatively analyze the number of photons generated by photon incidents within the fiber calibrating without a weak photon source such as a single photon source. [Methods] Firstly, photon numbers within weak optical pulses induced by muons in optical fibers with diameters of 1 mm and 2 mm were determined by the calibration method that making use of inherent non-photogenerated carrier characteristics of the silicon photomultiplier tube (SiPM). Then, the Geant4 software was employed to simulate the theoretical photon yield of muons in these optical fibers, and the simulation results were compared with experimental data for validation.

湖南省自然科学基金(No.2021JJ30772)资助

第一作者: 王启奇, 男, 1994 年出生, 2016 年毕业于中国人民解放军火箭军工程大学, 现为硕士研究生, 主要从事辐射测量技术研究

通信作者: 田立朝, E-mail: [tianlichao\\_2004@163.com](mailto:tianlichao_2004@163.com); 马燕云, E-mail: [yanyunma@126.com](mailto:yanyunma@126.com)

收稿日期: 2023-04-18, 修回日期: 2023-06-02

Supported by Hunan Provincial Natural Science Foundation of China (No.2021JJ30772)

First author: WANG Qiqi, male, born in 1994, graduated from Rocket Army Engineering University in 2016, master student, mainly engaged in the research of cosmological ray muon imaging technology

Corresponding author: TIAN Lichao, E-mail: [tianlichao\\_2004@163.com](mailto:tianlichao_2004@163.com); MA Yanyun, E-mail: [yanyunma@126.com](mailto:yanyunma@126.com)

Received date: 2023-04-18, revised date: 2023-06-02

**[Results]** The verification results indicate that the anticipated photon count in the optical pulses within fibers with diameters of the 1 mm and 2 mm fibers are 44 and 85, respectively. The deviation from the simulation results is 4.55% and 10.59%, respectively. **[Conclusions]** The results validate the efficiency of the low photon number measurement method, demonstrating its ability to accurately measure the photon count generated by the incident fiber without the need for additional calibration equipment. This method may extend to other scenarios that require the measurement of photon numbers in weak light pulse situations.

**Key words** Silicon photomultiplier tube, Muon, Plastic scintillation fiber, Photon number measurement, Geant4

缪子具有较强的穿透性,可以作为无损检测的优良探针<sup>[1]</sup>。利用缪子在高Z物质中的散射对物体进行三维成像的方法称为散射法成像<sup>[2]</sup>,在跨境安检、核安保领域具有独特的优势。其中缪子径迹测量是缪子散射成像的关键技术之一,目前常用的缪子探测器包括气体探测器<sup>[3]</sup>、核乳胶探测器以及闪烁体探测器<sup>[4]</sup>。闪烁体探测器使用塑料闪烁条或闪烁块与波长位移光纤耦合作为缪子敏感材料,二者之间的耦合方式对光子传输效率有较大影响<sup>[5-6]</sup>,光信号通过波长位移光纤传输到光电转换设备。

我们设计了一种新型的缪子散射成像系统,其核心是基于塑料闪烁光纤<sup>[7]</sup>(Plastic Scintillation Fiber, PSF, 以下简称光纤)阵列的缪子位置灵敏探测器,兼具塑料闪烁条型缪子探测器<sup>[8]</sup>的全固态优势和气态型缪子探测器<sup>[9]</sup>的低 $\gamma$ 本底优势,同时更为便携和易组装,缺点是缪子在光纤中光产额较小。因此,缪子在闪烁光纤中产生的弱光信号读出与发光光纤位置重建是系统的关键技术,对闪烁光纤输出光脉冲光子数进行准确测量是后续读出电子学设计的前提。光纤输出光信号定量测量在塑料闪烁光纤剂量计<sup>[10]</sup>设计中也有需求,但剂量计是测量光电转换设备输出的电流信号而非光子个数。

本文给出一种利用硅光电倍增管(Silicon Photomultiplier Tube, SiPM)暗噪声标定光脉冲光子数的测量方法,其基本原理是利用噪声中的暗电子信号,量化 SiPM 的输入(光子数)-输出(电脉冲幅度)对应关系,从而定量分析宇宙线缪子在光纤中的光子数产额。进一步,结合 Smith、Duller 等<sup>[11-13]</sup>提出的缪子能量分布的唯象模型(简称 S&D 模型),使用 Geant4 模拟对实验分析结论进行对照验证。本研究的数据为基于闪烁光纤阵列的缪子位置灵敏探测器电子学系统设计提供依据。同时,该方法对其他领域的弱光信号定量分析也具有参考和借鉴意义。

## 1 SiPM暗电子谱测量

### 1.1 暗电子产生原理及特征

SiPM是一种固态半导体光电转换器件,与光电

倍增管(Photomultiplier Tube, PMT)相比, SiPM具有工作电压低、集成度高、抗磁场干扰能力强等优点<sup>[14-15]</sup>,同时也有阳极暗噪声计数率高、对温度敏感、探测面积较小等缺点<sup>[16]</sup>。SiPM由上千个二维排列的雪崩光电二极管(Avalanche Photon Diode, APD)和串联的淬灭电阻构成<sup>[17]</sup>,光子入射到 APD 的 PN 结时产生非平衡载流子,经过漂移和倍增最终在阳极输出信号脉冲。无光条件下 SiPM 阳极暗噪声会产生非光生载流子,其物理载体是电子-空穴对。通常 PN 结中的噪声由正向电流和反向电流组成,由于 APD 工作在雪崩区,PN 结处于反向偏置状态,非光生载流子主要来源是反向电流,即由微观粒子热运动而在 PN 结耗尽层中随机形成的电子-离子对在电场作用下定向偏移形成的电流。

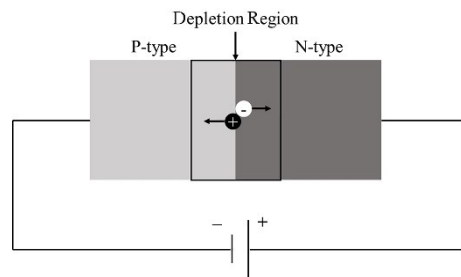


图1 SiPM暗电子产生原理示意图  
Fig.1 Diagram of the generation principle of dark electron in SiPM

每个 APD 产生暗电子是独立事件,每次产生 0 个或 1 个暗电子,上千个 APD 在单位时间内产生的暗电子数量服从泊松分布。但由于产生的暗电子并非 100% 被 SiPM 本身探测到,所以定性地描述为单位时间内产生的暗电子数量越多,发生的概率越小。如图 2 所示,当单个暗电子产生后,非光生载流子在电场作用下漂移、雪崩放大,信号在 APD 阳极被收集, SiPM 输出一个电压信号,多次单个暗电子事件会在信号峰值谱图中形成一个单暗电子峰;当两个 APD 中各产生一对非光生载流子时,会在信号峰值谱图中形成一个双暗电子峰;三暗电子及多暗电子同样会形成峰。由于信号处理过程中存在电子学噪声和统计涨落,最终形成多个峰,相邻两个峰的峰位

差值就是单个暗电子对应的电压值。以此建立起暗电子输出信号峰值与暗电子数量的对应关系,用来标定光脉冲测量结果。

### 1.2 暗电子谱测量方法

设计实验将反向偏压下的SiPM置于避光环境中,由于暗电子输出信号较小无法直接观测,使用放大器将信号放大后记录并得到暗电子谱。实验框图

如图3所示,实验中选用SENSL C系列3 mm SiPM,击穿电压24.2~24.7 V,过电压最高不超过5 V。选用CAEN A1423B快前放,增益18~54 dB可调。SiPM工作高压由直流电源提供。记录滤波后的暗电子信号。

选择在26~28.5 V范围内间隔0.5 V设置一系列电压值,测量不同电压值下暗电子谱,快前放增益固定为18 dB。测量结果见图4。

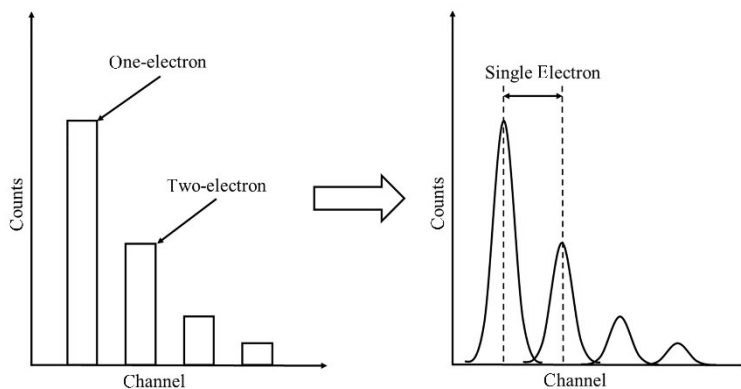


图2 SiPM暗电子信号特征示意图

Fig.2 Diagram of the characteristic signature of dark electrons in SiPM

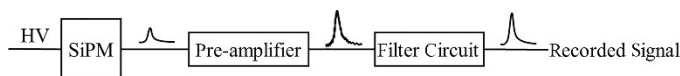


图3 SiPM暗电子谱测量实验框图

Fig.3 Block diagram of the experimental approach to SiPM dark electron spectroscopy measurement

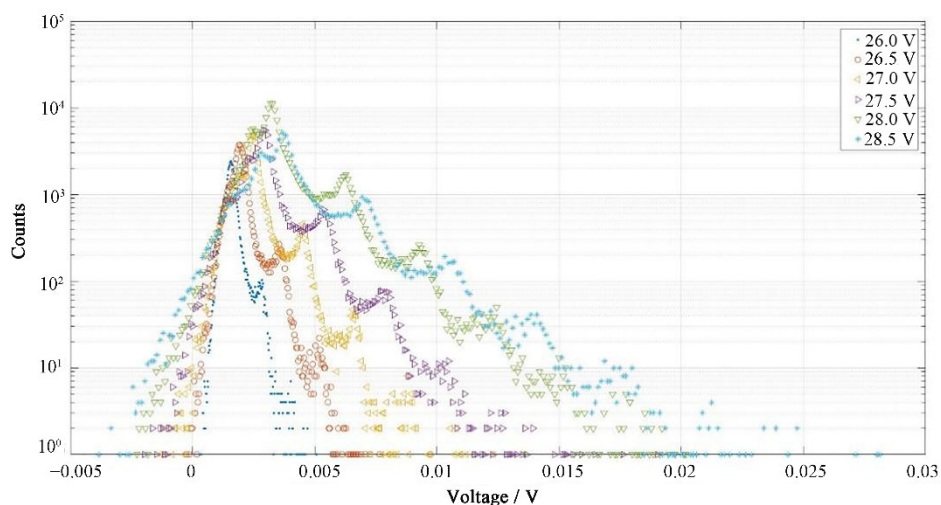


图4 18 dB增益下不同电压值暗电子谱图

Fig.4 Spectra of dark electrons with different voltage values under a gain of 18 dB

从图4可以看出,每个工作电压对应暗电子谱图中会出现多个峰,从左至右依次是单电子峰、双电子峰、三电子峰等,在理论上各峰间距相等,相邻峰之间峰位差对应的电压值表示当前实验条件下单个

电子的信号幅度。对数据进行拟合和计算可以得到不同电压下单个电子对应输出信号峰值,结果见表1。

对图4中暗电子能谱进行分析,在第一个峰之

表1 不同电压下单个电子对应输出信号峰值  
Table 1 Correspondence of peak output signals to individual electrons at different voltages

序号 Serial numbe	SiPM工作电压 SiPM operating voltage / V	单个电子对应信号峰值 Peak of a single electronic signal / mV
1	26.0	1.31
2	26.5	1.64
3	27.0	2.05
4	27.5	2.52
5	28.0	3.0
6	28.5	3.4

前普遍存在一个较小的单峰,且电压越大此峰越明显。第一个峰代表的物理意义是单个电子对应输出信号峰值,因此第一个峰前面的较小单峰不可能是电子的信号,分析应当是由电子学噪声引起的。

## 2 宇宙线缪子在光纤中输出光子数定量分析

暗电子谱可以通过 SiPM 的量子效率  $\eta$  转化为等效入射光子谱,将信号幅值与采集到的光子数建立关系。通常量子效率  $\eta$  与入射光波长、SiPM 工作电压有关。假设某一波长的  $n$  个光子被 SiPM 采集到,量子效率为  $\eta$ ,产生的信号经过放大和滤波后输出信号幅值为  $V$ ,通过测量暗电子谱得知单个电子对应电压值为  $V_c$ ,则存在以下关系:

$$n = \frac{V}{V_c \cdot \eta} \quad (1)$$

因此,可以通过测量 SiPM 输出值  $V$  计算被探测到的光子数  $n$ 。

### 2.1 光子数测量方案

塑料闪烁光纤是一种固体有机闪烁体,可以将

带电粒子沉积在其中的能量转换为光子,基本发光原理可以用有机分子电子能级结构解释。光纤一般由芯层和包层组成,芯层折射率大于包层折射率,根据光的全反射原理在临界角以内的光可以在光纤内部高效率传输。带电粒子在光纤中沉积能量产生的光子是点光源,全反射角之内的光子可以传输到光纤的端面。

设计实验测量缪子在光纤中产生的光信号,将光纤一端打磨后涂抹硅油,贴在 SiPM 中心并支撑固定,光纤与 SiPM 置于避光环境中。为了排除缪子之外的环境本底辐射和 SiPM 噪声的干扰,增加缪子符合设备。缪子符合设备由两块塑料闪烁体及电子学管座、两路脉冲幅度甄别器、符合电路组成。一定天顶角范围内的缪子穿过光纤的同时会穿过上下两块塑料闪烁体产生两路电信号,经过脉冲幅度甄别进入符合电路,输出符合信号,时序上符合信号输出的时刻与缪子入射塑料闪烁体的时刻之差是固定值。可以通过符合信号甄别出缪子在光纤中产生的光信号。实验框图见图 5。

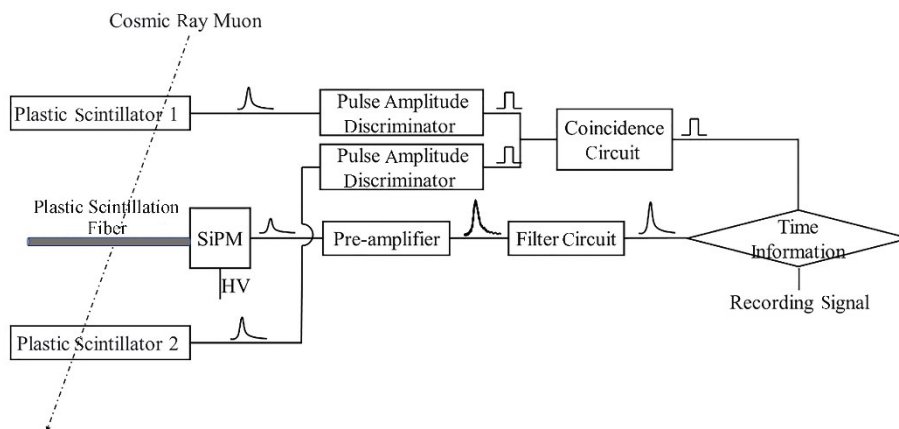


图5 缪子在光纤中产生光子数测量框图  
Fig.5 Block diagram of the measurement of the number of photons generated by muse in an optical fiber



## 2.2 输出光子数定量分析

实验中选择日本 Kuraray 生产的 SCSF-78MJ 型 1 mm 和 2 mm 直径塑料闪烁光纤，芯部材料为聚苯乙烯，外表面包覆一层聚甲基丙烯酸甲酯薄膜。光纤发光光谱峰值 450 nm，处于 SiPM 量子效率最高的波长，与 SiPM 适应较好。

两块塑料闪烁体分别放置在光纤上方和下方 10 cm 处，当缪子同时穿过两块塑料闪烁体时，两路输出信号经过甄别后进入符合电路输出符合信号。将符合信号和 SiPM 经过放大滤波后的输出信号同时接入示波器中，如果该缪子同时穿过光纤，由于各电路信号处理时间固定不变，SiPM 的输出信号与符合信号将存在固定的时序关系，因此，时间符合设备可以提供寻找缪子信号的重要时间参考值。本实验中 SiPM 输出的缪子信号峰值位置出现在符合信号上升沿之前约 260 ns 处(图6)，其中，CH1、CH2 是上下两层塑料闪烁体的输出信号，CH3 是符合后的信号，CH4 是缪子在光纤中沉积能量产生的信号。

因此，可以通过符合信号和缪子信号之间的时序关系定位到缪子信号位置，有效排除了各种噪声的干扰。

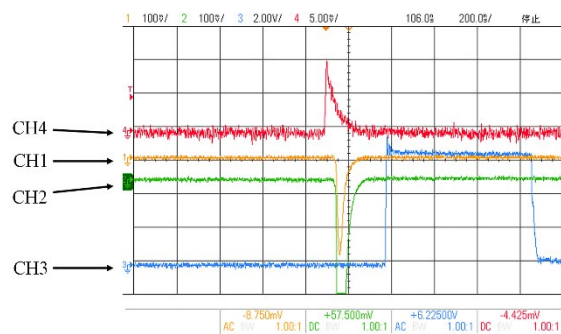


图6 各路信号时序关系图(彩图见网络版)

Fig.6 Temporal sequence diagram of each signal (color online)

实验中取 40 cm 长、直径 1 mm 的光纤，光纤一端贴在 SiPM 表面并固定，光纤与 SiPM 良好遮光，实验环境温度保持在 20 °C 左右。快前放增益 18 dB，SiPM 工作电压 28 V。

光纤发射的光在一定波长范围内是连续的，SiPM 的量子效率在固定的过电压下随着波长连续变化，如图7所示，提取说明书中数据，使用闪烁光谱的波长分布乘以 SiPM 对应波长的量子效率，再对光纤发射光谱波长范围进行积分，得到总的量子效率为  $\eta=36.53\%$ 。

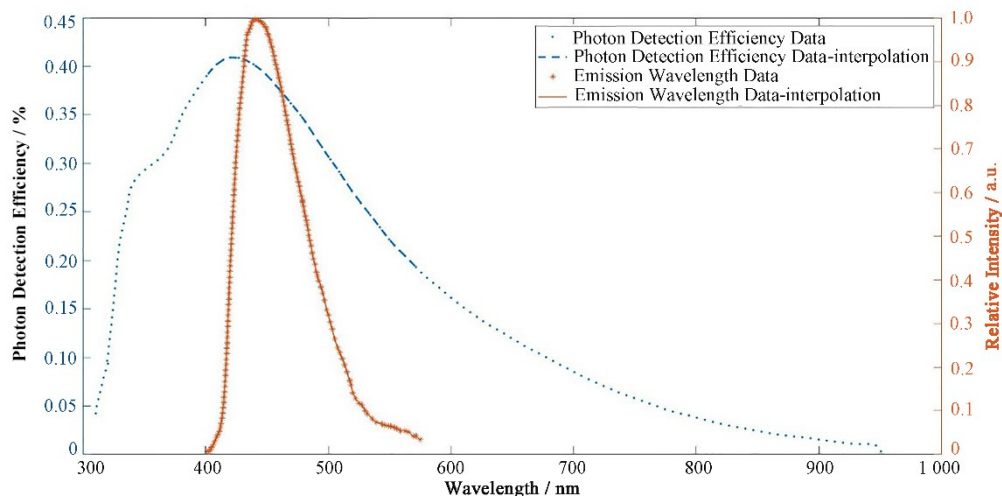


图7 光纤发射光谱(窄曲线)及 4.5 V 过电压下 SiPM 量子效率(宽曲线)

Fig.7 Comparative display of optical fiber emission spectrum (narrow curve) and quantum efficiency of SiPM at 4.5V overvoltage (wide curve)

即  $V_c$  和  $\eta$  已知，记录 SiPM 输出的缪子信号  $V$ ，则可以计算出每个缪子入射事件产生的光子数，绘制直方图，见图8。对数据进行高斯拟合可知，每个缪子入射事件产生光子数期望是 43.64，即 44 个光子。进行高斯拟合时舍弃了图中前几个柱和最后一个柱的数据，原因在于前几个柱的数据是噪声信号，实验时为了确保缪子光子谱型尽量完整，阈值选择

较低引入了部分噪声信号；而最后一个柱的数据是由多个超过记录量程的大信号数据叠加形成的，因此舍弃。

同样取长 40 cm、直径 2 mm 的光纤进行实验，得到每个事件产生光子数期望是 85.06，即 85 个光子，见图9。

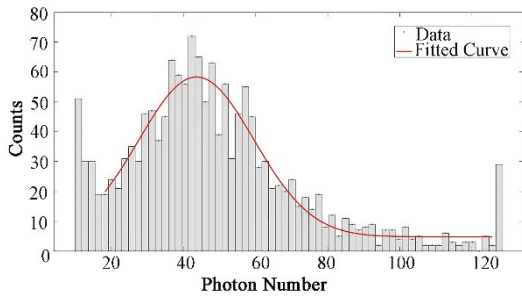


图8 缪子在直径1 mm 光纤中产生光子数谱图  
Fig.8 Spectrum of photon numbers generated by muons in a 1 mm diameter fiber

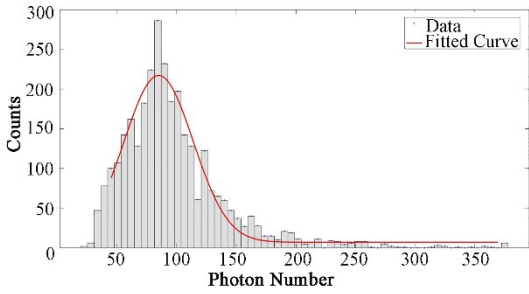


图9 缪子在直径2 mm 光纤中产生光子数谱图  
Fig.9 Spectrum of photon numbers generated by muons in a 2 mm diameter fiber

### 3 Geant4 模拟缪子在光纤中沉积能量

为了验证实验可靠性,使用 Geant4 软件进行模拟。Geant4 软件是欧洲核子研究组织开发的基于 C++ 编程语言的一种开源的蒙特卡罗软件包,用于模拟粒子在物质中的输运过程。我们基于 S&D 模

型数据使用随机抽样的方法对缪子能量进行抽样,在 Geant4 中使用 G4GeneralParticleSource 类函数产生具备真实能谱分布的缪子,抽样产生缪子与 S&D 模型比较如图 10 所示。

在 Geant4 中建立光纤模型,使用抽样产生的缪子照射在直径 1 mm 和 2 mm 的光纤中,模拟出缪子在光纤中沉积的能量,沉积的能量乘以光纤光子产额参数得到缪子在光纤中产生的总光子数,总光子数乘以到达光纤端面光子的占比得到到达光纤某一端的光子数。能量沉积模拟结果见图 11,由厂家提供的光纤说明书知,光子产额  $8\ 000\ \text{MeV}^{-1}$ ,光纤内光的全反射角  $20.4^\circ$ 。根据全反射角计算出光的全反射立体角为:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} \int_0^{20.4^\circ} \sin \theta d\theta d\varphi \approx 0.127\ 2\pi \quad (2)$$

所占  $4\pi$  立体角的比例是:

$$\Omega/4\pi = 0.031\ 8 \quad (3)$$

即光子传输到达光纤某一端的数量占比约 3.18%,1 mm 光纤中能量沉积均值 0.18 MeV,计算出到达光纤某一端的光子数是:

$$n = [0.18 \times 8\ 000 \times 3.18\%] = 46 \quad (4)$$

2 mm 光纤中能量沉积均值 0.37 MeV,到达某一端的光子数是:

$$n = [0.37 \times 8\ 000 \times 3.18\%] = 94 \quad (5)$$

1 mm 光纤模拟光子数均值 46 个,实测值 44 个,偏差 4.55%;2 mm 光纤模拟光子数均值 94 个,实测值 85 个,偏差 10.59%。

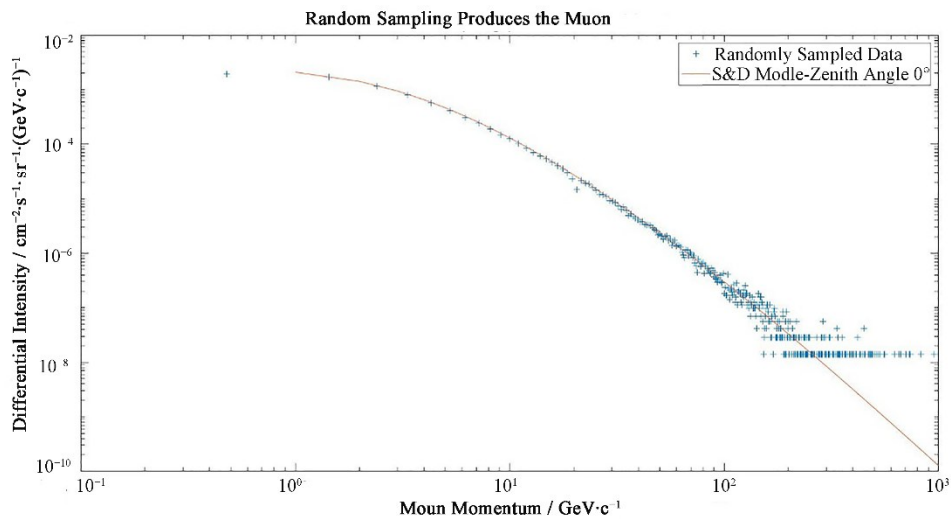


图10 随机抽样产生缪子与 S&D 模型对比  
Fig.10 Comparison of muon data obtained through random sampling with S&D models

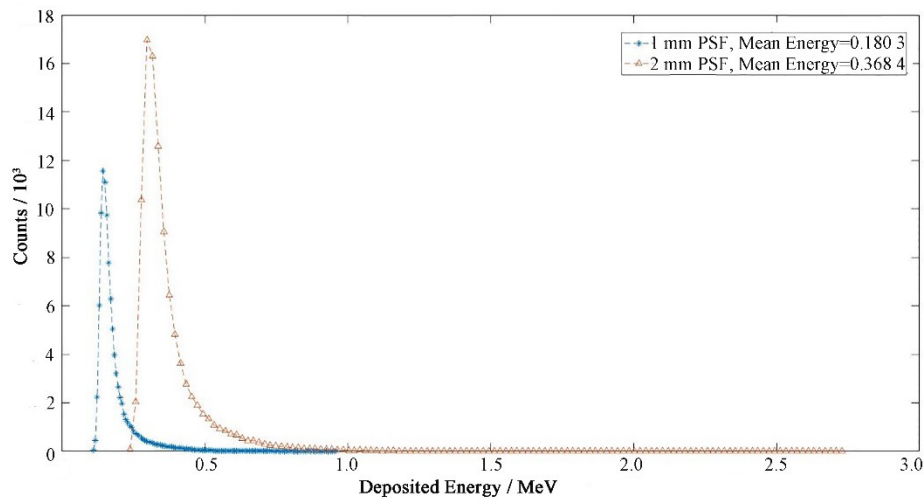


图 11 模拟缪子在光纤中沉积能量  
Fig.11 Simulation of muon energy deposition in optical fibers

#### 4 结语

本文介绍了利用 SiPM 中的非光生载流子特性标定光纤中微弱光脉冲的方法。该方法适用于使用 SiPM 作为光电转换器件的辐射探测、量子通信、辐射医疗、水下探测等光子数较低的领域和场景,无须额外稳定光源,具备通用性和低成本设备要求。从结果来看,此方法针对极低光子产额情况下的测量精度较高,本文提到的宇宙线缪子在光纤中产生光子数测量,在 1 mm 光纤中模拟结果和实测结果偏差 4.55%,在 2 mm 光纤中偏差 10.59%,符合情况很好。

**作者贡献声明** 王启奇负责文章撰写、实验和数据处理;张湘负责具体实验指导和数据处理指导;田立朝负责实验设计、指导和检查;马燕云负责实验指导和文章检查;孙乙文协助完成实验。

#### 参考文献

- 1 叶邦角,李祥,周志浩. 缪子成像及元素成分分析[J]. 物理, 2021, **50**(4): 248 - 256. DOI: [10.7693/wl20210407](https://doi.org/10.7693/wl20210407).  
YE Bangjiao, LI Yang, ZHOU Zhihao. Muon imaging and elemental analysis[J]. Physics, 2021, **50**(4): 248 - 256. DOI: [10.7693/wl20210407](https://doi.org/10.7693/wl20210407).
- 2 Schultz L, Borozdin K, Gomez J, *et al.* Cosmic ray muon radiography for contraband detection[C]//Sixth International Meeting on Nuclear Applications of Accelerator Technology (AccApp'03): Accelerator Applications in a Nuclear Renaissance. San Diego, USA. 2003.
- 3 Aimè C, Calzaferri S, Casarsa M, *et al.* Muon detector for a muon collider[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, **1046**: 167800. DOI: [10.1016/j.nima.2022.167800](https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167800).
- 4 Procureur S. Muon imaging: principles, technologies and applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, **878**: 169 - 179. DOI: [10.1016/j.nima.2017.08.004](https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.08.004).
- 5 Luo G, Hor Y K, Lu P Z, *et al.* Design optimization of plastic scintillators with wavelength-shifting fibers and silicon photomultiplier readouts in the top veto tracker of the JUNO-TAO experiment[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(7): 99. DOI: [10.1007/s41365-023-01263-7](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01263-7).
- 6 Li M, Wang Z M, Liu C M, *et al.* Performance of compact plastic scintillator strips with wavelength shifting fibers using a photomultiplier tube or silicon photomultiplier readout[J]. Nuclear Science and Techniques, 2023, **34**(2): 31. DOI: [10.1007/s41365-023-01175-6](https://doi.org/10.1007/s41365-023-01175-6).
- 7 Kharzheev Y N. Radiation hardness of scintillation detectors based on organic plastic scintillators and optical fibers[J]. Physics of Particles and Nuclei, 2019, **50**(1): 42 - 76. DOI: [10.1134/S1063779619010027](https://doi.org/10.1134/S1063779619010027).
- 8 Anghel V, Armitage J, Botte J, *et al.* Construction, commissioning and first data from the CRIPT Muon tomography project[R]. 2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSS/MIC), 2012.
- 9 Checchia P, Benettoni M, Bettella G, *et al.* INFN muon tomography demonstrator: past and recent results with an

- eye to near-future activities[J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2018, **377**(2137): 20180065. DOI: [10.1098/rsta.2018.0065](https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0065).
- 10 Yang Y, Yang C P, Xin J, *et al.* Performance of a plastic scintillation fiber dosimeter based on different photoelectric devices[J]. Nuclear Science and Techniques, 2021, **32**(11): 120. DOI: [10.1007/s41365-021-00965-0](https://doi.org/10.1007/s41365-021-00965-0).
- 11 Smith J A, Duller N M. Effects of pi meson decay-absorption phenomena on the high-energy mu meson zenithal variation near sea level[J]. Journal of Geophysical Research, 1959, **64**(12): 2297 - 2305. DOI: [10.1029/JZ064i012p02297](https://doi.org/10.1029/JZ064i012p02297).
- 12 Chatzidakis S, Chrysikopoulou S, Tsoukalas L H. Developing a cosmic ray muon sampling capability for muon tomography and monitoring applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, **804**: 33 - 42. DOI: [10.1016/j.nima.2015.09.033](https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.09.033).
- 13 Su N, Liu Y Y, Wang L, *et al.* A comparison of muon flux models at sea level for muon imaging and low background experiments[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, **9**: 750159. DOI: [10.3389/fenrg.2021.750159](https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.750159).
- 14 Yoo H, Joo S, Yang S, *et al.* Optimal design of a CsI(Tl) crystal in a SiPM based compact radiation sensor[J]. Radiation Measurements, 2015, **82**: 102 - 107. DOI: [10.1016/j.radmeas.2015.08.002](https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.08.002).
- 15 Piemonte C, Gola A. Overview on the main parameters and technology of modern Silicon Photomultipliers[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **926**: 2 - 15. DOI: [10.1016/j.nima.2018.11.119](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.119).
- 16 Klanner R. Characterisation of SiPMs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **926**: 36 - 56. DOI: [10.1016/j.nima.2018.11.083](https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.11.083).
- 17 Guberman D, Cortina J, Ward J E, *et al.* The light-trap: a novel concept for a large SiPM-based pixel for very high energy gamma-ray astronomy and beyond[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **923**: 19 - 25. DOI: [10.1016/j.nima.2019.01.052](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.01.052).