

学校代码: 10246  
学 号: 20210200004

復旦大學

硕 士 学 位 论 文  
(学术学位)

针对 CEPC 缪子探测器预研与 BelleII 实验  
KLM 系统升级的闪烁体探测器研发

Research and development of scintillation detector for CEPC  
muon detector and the upgrade of BelleII KLM system

院 系: 现代物理研究所  
专 业: 粒子物理与原子核物理  
姓 名: 张鸿玉  
指 导 教 师: 王小龙 青年研究员  
完 成 日 期: 2024 年 5 月 20 日

# 指导小组成员

王小龙 青年研究员

# 目 录

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 插图目录                         | iii |
| 摘要                           | vii |
| Abstract                     | ix  |
| 第 1 章 研究背景                   | 1   |
| 1.1 粒子物理实验中的探测器技术            | 1   |
| 1.1.1 探测器的本征性质               | 2   |
| 1.1.2 粒子探测器的主要类型             | 4   |
| 1.2 环形正负电子对撞机 CEPC           | 5   |
| 1.2.1 物理目标                   | 5   |
| 1.2.2 加速器                    | 6   |
| 1.2.3 探测器                    | 6   |
| 1.2.4 缪子探测器                  | 8   |
| 1.3 SuperKEKB 上的 Belle II 实验 | 8   |
| 1.3.1 Belle II 实验物理目标        | 8   |
| 1.3.2 加速器 SuperKEKB          | 9   |
| 1.3.3 Belle II 探测器           | 10  |
| 1.3.4 KLM 系统升级               | 12  |
| 1.4 论文内容与结构                  | 13  |
| 第 2 章 SiPM 的相关研究             | 15  |
| 2.1 SiPM 性能测试                | 15  |
| 2.1.1 击穿电压                   | 16  |
| 2.1.2 光子谱                    | 17  |
| 2.1.3 增益                     | 18  |
| 2.1.4 暗计数率                   | 19  |
| 2.1.5 光学串扰                   | 19  |
| 2.2 读出电子学的设计和获取系统            | 21  |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 第 3 章 CEPC 缪子探测器的预先研究            | 27 |
| 3.1 闪烁体探测器的主要组成                  | 27 |
| 3.1.1 闪烁体与 WLS 光纤                | 28 |
| 3.1.2 光收集的改善方法                   | 30 |
| 3.2 多通道原型样机的宇宙线测试                | 31 |
| 3.3 小结                           | 35 |
| 第 4 章 针对 Belle II 实验 KLM 系统升级的研究 | 37 |
| 4.1 KLM 系统升级计划                   | 37 |
| 4.2 飞行时间计数器的技术路线                 | 38 |
| 4.2.1 BESIII 实验的 TOF 系统          | 38 |
| 4.2.2 NA61/SHINE 实验的 TOF 系统      | 39 |
| 4.3 高时间分辨的闪烁体探测器设计               | 40 |
| 4.3.1 时间分辨的测量方法                  | 40 |
| 4.3.2 SiPM 阵列的研究                 | 45 |
| 4.3.3 光导的使用                      | 47 |
| 4.3.4 具有长衰减长度的闪烁体                | 50 |
| 4.4 小原型机的宇宙线测试                   | 52 |
| 4.5 小结                           | 55 |
| 第 5 章 总结与展望                      | 57 |
| 参考文献                             | 59 |
| 攻读学位期间科研成果                       | 63 |
| 致谢                               | 65 |



# 插图目录

|      |                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1-1  | 探测效率测量装置示意图。 . . . . .                                                                                                                                                                                                                     | 3  |
| 1-2  | CEPC 综合布局。 . . . . .                                                                                                                                                                                                                       | 7  |
| 1-3  | CEPC 第四个探测器概念设计。 . . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 7  |
| 1-4  | SuperKEKB 示意图。 . . . . .                                                                                                                                                                                                                   | 9  |
| 1-5  | SuperKEKB 的亮度计划 <sup>[13]</sup> 。 . . . . .                                                                                                                                                                                                | 10 |
| 1-6  | Belle II 探测器及其坐标系。 . . . . .                                                                                                                                                                                                               | 13 |
| 1-7  | (a)(b): 位于 Belle II 最外层的 KLM 探测器.(c)(d): 用于桶部 KLM 的闪烁体探测器模块。 . . . . .                                                                                                                                                                     | 14 |
| 2-1  | 不同生产商的 SiPM 及其表面的显微镜视图:(a,b) Hamamatsu (MPPC S10362-13-050, 光敏面积 $1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ )。在光学显微镜下可看到表面用于高压供应和信号读出的两个引脚, 以及大小和间距随型号各有差异的像素。(c,d) NDL (EQR15 11-3030-s, 光敏面积 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ )。 . . . . . | 16 |
| 2-2  | 不同工作电压下的 SiPM 的增益值。 . . . . .                                                                                                                                                                                                              | 17 |
| 2-3  | 示波器采集开启色温显示时, 观察到 SiPM 的清晰的多个光子峰, 拟合不同电压下的单光子幅度, 可得到击穿电压。 . . . . .                                                                                                                                                                        | 17 |
| 2-4  | NDL 和 MPPC 在激光照射下的信号电荷积分谱。 . . . . .                                                                                                                                                                                                       | 18 |
| 2-5  | 两种 SiPM 多光子谱分析。黑色: 不同光子数对应高斯峰的峰位; 红色: 高斯峰的展宽值。 . . . . .                                                                                                                                                                                   | 18 |
| 2-6  | NDL 和 MPPC 的暗计数随阈值的变化。 . . . . .                                                                                                                                                                                                           | 19 |
| 2-7  | 来自不同制造商的 SiPM (MPPC、NDL) 的增益、暗计数、串扰随过电压的变化。 . . . . .                                                                                                                                                                                      | 20 |
| 2-8  | 放大倍数为 10 倍的前置放大器与供电母板。如图所示, 每个母板可为八个前放提供电源, 杜邦线将 SiPM 所需的高压引入, SiPM 信号通过 SMA 接线进入前放, 同时由 SMA 输出放大信号。 . . . .                                                                                                                               | 21 |
| 2-9  | 用于 SiPM 负反馈前置放大器原理图。 . . . . .                                                                                                                                                                                                             | 21 |
| 2-10 | (a) 极零相消电路和两级放大电路; (b) 前放的输入输出信号波形图。 . . . . .                                                                                                                                                                                             | 22 |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2-11 (a) 前放的带宽测试结果。(b) 前放的动态范围。(c) 前放的噪声水平测试结果。 . . . . .                                                                                               | 23 |
| 2-12 多种数据获取系统示意图。 . . . . .                                                                                                                             | 25 |
| 3-1 左：一个闪烁体探测器通道的结构示意图。右：组装过程中的闪烁体探测器。 . . . . .                                                                                                        | 27 |
| 3-2 挤压型闪烁体的衰减长度测量装置。 . . . . .                                                                                                                          | 28 |
| 3-3 挤压型闪烁体的衰减长度拟合结果。 . . . . .                                                                                                                          | 28 |
| 3-4 上：用于测试的 WLS 光纤。左侧的六根直径为 1.0 mm 的光纤来自圣戈班，右侧的六根直径为 1.2 mm 的光纤来自 Kuraray。下：分别使用 1000、1500、2000 目砂纸打磨后的光纤端面。 . . . . .                                  | 29 |
| 3-5 (a)3D 打印的耦合器件，光纤与黑色圆柱用胶水固定，机械尺寸使 SiPM 与光纤对齐。(b) 道康宁双组分光学胶。(c) 闪烁体表面使用不同反射层。从上到下为：聚四氟乙烯 (Teflon) 与二氧化钛。(d) 光学胶添加到光纤槽中，与闪烁体耦合。 . . . . .              | 30 |
| 3-6 使用各种方法改善前后的光产额对比。图 (a)(b) 是有无 3D 打印连接件的比较，(c) 是是使用单根和双根波长位移光纤的比较，(d) 是有无使用铝箔反射层的比较，(e)(f) 是有无使用光学胶，e 是 $\text{TiO}_2$ 反射层，f 是 Teflon 反射层。 . . . . . | 31 |
| 3-7 (a) 宇宙线测试装置：包括闪烁体、SiPM、前置放大器和示波器。(b)8 路闪烁体探测器的典型波形：ch1 和 ch2 是来自 (a) 中的触发器 #1 和触发器 #2，ch3-ch8 是来自六个长条。 . . . . .                                    | 32 |
| 3-8 宇宙射线击中长条不同位置所产生的信号 $N_{p.e.}$ 分布。 . . . . .                                                                                                         | 33 |
| 3-9 长条远端 (140 cm 处) 的效率随阈值 ( $N_{p.e.}$ ) 变化的分布。 . . . . .                                                                                              | 33 |
| 3-10 宇宙线击中远端时给出信号响应的探测器通道数量分布。 . . . . .                                                                                                                | 34 |
| 3-11 远端的时间分辨率与 $N_{p.e.}$ 的关系。 . . . . .                                                                                                                | 34 |
| 3-12 长条的时间分辨率在不同信号大小区间的分布。 . . . . .                                                                                                                    | 35 |
| 3-13 不同位置处触发条与长条的信号时间差，误差棒分别是触发条的长度以及探测器的时间分辨率，通过线性拟合可得到光子在光纤中的传播速度。 . . . . .                                                                          | 35 |
| 4-1 Belle II VR 中的 $K_L$ 簇射。 . . . . .                                                                                                                  | 37 |
| 4-2 BESIII 实验中的 TOF 探测器。 . . . . .                                                                                                                      | 38 |
| 4-3 ToF-F 探测器中闪烁体的布局示意图。 . . . . .                                                                                                                      | 40 |
| 4-4 对于采样波形进行 CFD 定时的示意图。 . . . . .                                                                                                                      | 41 |
| 4-5 不同触发比得到的时间分辨。F=0.2 时，分辨率最高， $\sigma = 276$ ps。 . . . . .                                                                                            | 42 |

|      |                                                                                                 |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4-6  | 不同型号 SiPM 在皮秒激光光源下的信号经前置放大器后的时间分辨结果。 . . . . .                                                  | 43 |
| 4-7  | 测量 10 cm 长闪烁体触发探测器的时间分辨的示意图。 . . . . .                                                          | 44 |
| 4-8  | 测量长闪烁体在中间位置的时间分辨的示意图。 . . . . .                                                                 | 45 |
| 4-9  | 来自 NDL 和 MPPC 的大面积 SiPM。SiPM 阵列采用不同连接方式的示意图。 . . . . .                                          | 46 |
| 4-10 | 4 个 SiPM 串联和并联的波形对比, 串联使上升时间变快, 但增益变小, 幅度降低。 . . . . .                                          | 46 |
| 4-11 | MPPC 分别采用 4 个并联的连接方式时, 两个 trigger 的信号时间之差的分布。 . . . . .                                         | 47 |
| 4-12 | 12 个 SiPM 使用不同的串并联连接方式。改变高压会影响时间分辨。 . . . . .                                                   | 47 |
| 4-13 | BC420 尺寸为 $5 \times 4 \times 120 \text{ cm}^3$ , 端面采用连接光导的方式读出, 和采用耦合 12 个 SiPM 读出。 . . . . .   | 48 |
| 4-14 | 高能科迪闪烁体两端加工成楔形测量时间分辨。 . . . . .                                                                 | 49 |
| 4-15 | BC420 两种耦合方式的时间分辨对比。 . . . . .                                                                  | 49 |
| 4-16 | GNKD 加工成两端楔形的时间分辨结果。 . . . . .                                                                  | 50 |
| 4-17 | BC420 与不同批次尺寸的 GNKD 闪烁体。 . . . . .                                                              | 51 |
| 4-18 | 不同批次与尺寸的 GNKD 闪烁体, 在不同位置的光收集和时间分辨对比。 . . . . .                                                  | 51 |
| 4-19 | 1 m 的 GNKD 闪烁体分别采用单端和双端读出时, 在不同位置的时间分辨。 . . . . .                                               | 52 |
| 4-20 | 有六层闪烁体探测器的原型样机测试装置实物图。 . . . . .                                                                | 52 |
| 4-21 | 有六层闪烁体探测器的原型样机测试装置。采用双端读出的长闪烁体和 trigger 共有 16 路信号读出, 通过 DT5742 进行数据采集。 . . . . .                | 53 |
| 4-22 | (a) 通过激光进行时间刻度的装置图。(b) 宇宙线测试的示意图。 . . . . .                                                     | 53 |
| 4-23 | DT5742 采集到的激光的触发信号与多通道 SiPM 的输出信号。 . . . . .                                                    | 54 |
| 4-24 | 宇宙线测试的装置图。 . . . . .                                                                            | 54 |
| 4-25 | (a): 对每层闪烁体的信号时间进行线性拟合, 得到宇宙线中缪子的速度。经过刻度修正后的数据 (红色) 与修正前 (黑色) 的数据对比。(b): 宇宙线缪子速度的分布图。 . . . . . | 55 |



# 摘要

在粒子物理领域，对物质进行更深层次的探索需要不断提高粒子能量，而高能量的对撞机是此领域最主要的实验手段。日本的 Belle II 实验作为亮度前沿的超级  $B$  介子工厂，旨在探索新物理并提高标准模型参数的测量精度。中国提出的环形正负电子对撞机（CEPC）计划，作为未来希格斯工厂方案之一，预期将对希格斯粒子进行深入研究。随着 Belle II 实验亮度的提升，其中的  $K_L$  和缪子探测系统（KLM）需将性能不足的 RPC 探测板全面替换为闪烁体探测板，期望实现对中性强子四动量的直接测量。而 CEPC 实验的缪子探测器则负责识别缪子、探测量能器泄露以及搜寻长寿命粒子等任务。

本论文聚焦于 CEPC 实验缪子探测器研制与 Belle II 实验 KLM 探测器升级的研发工作。一方面，为满足 CEPC 高探测效率的要求，我们采用了塑料闪烁体条耦合波长位移光纤与硅光电倍增管（SiPM）的探测技术。另一方面，为提升 Belle II KLM 系统的时间分辨率，我们设计了基于长衰减长度闪烁体、大面积 SiPM 阵列以及快电子学的方案。针对这两种方案，我们均构建了六层原型样机，并通过宇宙线测试验证了其性能。

在研究中，SiPM 作为闪烁体探测器的核心部件，我们对其增益、暗计数、串扰等性能进行了深入研究，并对比测试了滨松 MPPC 和 NDL 生产的 SiPM。此外，我们还设计并测试了一款高速且低噪声的前置放大器，适用于 SiPM 信号读出，其增益稳定、动态范围可达到 170 mV，带宽高达 426 MHz。同时，我们搭建了多种数据系统，为 SiPM、前放与闪烁体探测器的性能测量提供了灵活的应用平台。

在 CEPC 缪子探测器的预研中，我们采用了国产挤压型塑闪与 Kuraray 波长位移光纤，并对比了耦合滨松 MPPC 和 NDL SiPM 的效果。通过优化反射层、光纤类型、光学胶及耦合零件，光收集效率显著提升。NDL 和 MPPC 作为光读出，六层的原型样机均可以实现 90% 以上的探测效率，且时间分辨率优于 2 ns。这表明基于闪烁体-光纤-SiPM 结构的探测器可满足 CEPC 缪子探测器的性能要求。

针对 Belle II 的 KLM 升级，我们主要研究了长衰减长度闪烁体、大面积 SiPM 阵列以及快速电子学。使用 BC420 作为常用的塑闪，其测试结果作为参考，国产 GNKD 生长型闪烁体也可以实现同样优秀的时间分辨。此外，我们利用多个 SiPM 组成的阵列扩大了光收集面积，并通过对比不同串并联方式，选定

了最优的 12 个 SiPM (3S4P) 配置, 国产塑闪一米长的双端读出可以实现优于 85 ps 的时间分辨。原型机可以实现对缪子动量的初步测量, 缪子平均能量测量值为  $E_{muon} = 2.0 \pm 0.3 \text{ GeV}$ 。

**关键词:** 缪子探测器; 闪烁体探测器; 硅光电倍增管; 数据获取系统; 探测效率; 时间分辨

**中图分类号:** O413.1

# Abstract

In particle physics, deeper exploration of matter requires continuously increasing particle energies. High-energy colliders are the primary experimental tools for achieving this goal. The Belle II in Japan, functioning as a super  $B$  meson factory, strives for high luminosity to delve into new physics phenomena and improve the measurement precision of the Standard Model parameters. On the other hand, the Circular Electron Positron Collider (CEPC), proposed by China in 2013 as one of the future Higgs Factory schemes, will conduct more precise studies on the Higgs particle. Following an increase in luminosity, the Belle II experiment requires upgrading its  $K_L$  and muon detection(KLM) system, considering replacing all underperforming RPC detection panels with scintillation detection panels, aiming to achieve direct measurements of neutral hadron four-momenta. The muon detector of the CEPC experiment is tasked with identifying muons, detecting leaks from the calorimeter, and searching for long-lived particles.

This study is centered on developing muon detectors for CEPC and the KLM detector upgrade for Belle II, both leveraging scintillator detectors. Two primary objectives are addressed: Firstly, to achieve high detection efficiency for CEPC, plastic scintillator bars coupled with wavelength-shifting(WLS) fibers and SiPM are employed. Secondly, to meet the demanding high-time resolution requirements of Belle II's KLM upgrade, long-attenuation-length scintillators, large-area SiPM arrays, and fast electronics replace WLS fibers. Six-layer prototype setups were constructed and tested for cosmic ray detection for both projects.

As a key component of scintillation detectors, SiPMs were first studied for their performance in gain, dark count, crosstalk, etc. A comparison test was conducted between SiPMs produced by Hamamatsu MPPC and NDL. A high-speed and low-noise preamplifier suitable for SiPM signal readout was designed and tested. Its gain is stable, with a dynamic range of up to 170 mV and a bandwidth of up to 426 MHz. Various data systems were also constructed, which can be flexibly applied to performance measurements of SiPMs, preamplifiers, and scintillation detectors.

Concerning the R&D of the CEPC muon detector, extruded plastic scintillators by GNKD company embedded with Kuraray's wavelength-shifting fibers were utilized.

Various characteristics such as gain, dark count, crosstalk, etc., were tested for SiPMs from Hamamatsu MPPC and NDL. To enhance light collection, extensive studies were conducted on reflective layers, fiber types, optical glue, and coupling components. Both NDL and MPPC-based readouts achieved over 90% detection efficiency with time resolution better than 2 ns, fulfilling the requirements of the CEPC muon detector.

In terms of the upgrade of KLM, the focus was on long-attenuation-length scintillators, large-area SiPM arrays, and fast electronics. BC420 was employed as the standard plastic scintillator, while the GNKD-grown scintillator demonstrated equally remarkable time resolution. Employing arrays of SiPMs increased the light collection area, and after evaluating various series-parallel combinations, a configuration with the optimal performance of 12 SiPMs (3S4P) was selected. The domestically-produced plastic scintillator with dual-end readout, one meter in length, can achieve a time resolution better than 85 ps. The prototype can achieve preliminary measurements of muon momentum, with an average measured muon energy of  $E_{muon} = 2.0 \pm 0.3$  GeV.

**Keywords:** muon detector; scintillation detector; SiPM; DAQ; efficiency; time resolution

**CLC code:** O413.1



# 第 1 章 研究背景

自古以来，对物质生产的需求就推动着人类对物质结构的不断探索，总是想知道物质世界是如何构成的，又是否有一套基本的规则可以解释大自然中的各种现象。随着社会的发展，人们的认识由表及里逐步深入：从我国古代认为金木水火土五行组成物质世界的学说、古希腊的原子论，到近代原子学说的萌芽，道尔顿提出原子是物质结构不可分割的基元，门捷列夫通过分析化学性质排列出元素周期表，汤姆孙测定阴极射线的电荷和质量之比发现了电子，卢瑟福发现  $\alpha$  粒子穿过物质薄层时大角度散射的事例，提出了原子的核式结构。在分子、原子、原子核等层次的认识基础上，随着正电子和一系列介子、超子的发现，粒子物理学作为物理科学的前沿，开始不断向更深处发展。

随着对物质更深层次的探索，对粒子具有的能量需求越来越高，这是由粒子德布罗意波长  $\lambda$  与动量  $p$  的关系限制的。根据量子力学原理， $\lambda = \frac{2\pi}{k}$ ，其中  $k$  是质心系相对运动的波矢，动量  $p = \hbar k$ ，若要研究比  $10^{-14}$  cm 更小的尺度结构，就需要质心系能量在若干 GeV 以上。另一方面，根据爱因斯坦质能关系  $E = mc^2$ ，要产生的粒子质量所需要的能量越高。此外，自然界中除了光子、电子、质子等少数几种粒子以外，其余大多数粒子寿命很短，转瞬即逝。要研究这些粒子的产生、衰变、湮灭等现象，通常需要宇宙线或者加速器提供这些粒子，并由粒子探测器进行探测。宇宙射线存在极高能量的粒子，到达地面的大部分是缪子，在海平面上平均每分钟每平方厘米有一个缪子穿过<sup>[1]</sup>，是天然的粒子源。而在各类加速器中，对撞机技术发挥了巨大的作用。由于对撞机在同样的加速器束流能量中，能比固定靶实验提供更高的质心系能量，可以更有效地利用能量，研究更深层次的内部结构和作用机制。高能物理中的对撞机以及粒子探测器需要多方面的新型技术与设备，在基础科学不断取得突破的同时，也带动着技术上许多重大的革新和发展。

## 1.1 粒子物理实验中的探测器技术

粒子探测器的发展起源于放射性的发现。1895 年伦琴发现了电子轰击物质时产生了未知射线并命名为 X 射线，1896 年贝克勒尔受此启发，发现铀晶体自发放射出的辐射能使感光相纸变黑，自此发现了放射性。历史上第一种粒子探测器是由克鲁克斯发明的一种称为闪烁镜的装置，该装置利用了硫化铅的闪烁特

性。眼睛适应黑暗后，观看者通过旋转闪烁镜的镜头观察硫化锌屏幕，屏幕上出现微小的闪光，克鲁克斯将这种图像描述为“汹涌的发光海洋”。每一次闪光都是由位于屏幕正上方的指针尖端上的微小镭样本发射的  $\alpha$  粒子产生的。闪烁镜可以被认为是第一个辐射计数器，它能够记录单个事件<sup>[23]</sup>，也使得卢瑟福 1899 年发现  $\alpha$  粒子成为可能。

微观粒子和辐射只能通过它们与物质的相互作用进行探测，通过粒子探测器，我们希望知道粒子和辐射的种类，以及精确的能量、动量和轨迹。被探测粒子或辐射在探测物质中与其发生相互作用产生光或电信号，起初大多用光学手段进行测量，例如流光室、泡室和云室等，随着技术的发展转变为纯粹的电子学测量，光或电信号被进一步转化为电压或电流信号，电子学读出系统对信号进行记录和数字化，再由数据获取系统进行数据传输和存储，例如多丝正比室、漂移室和硅像素探测器等。目前的粒子探测技术已经实现了前所未有的高分辨率，例如时间分辨可以达到皮秒量级，空间坐标重建达到微米量级， $\gamma$  射线能量分辨率达到 eV 量级，同时探测器可以运行的事例率也非常高。这些探测器技术迅猛发展，不仅服务于粒子物理和核物理领域，也作为尖端和精巧的装置广泛应用于医学、化学、生物、材料、能源等方面。

### 1.1.1 探测器的本征性质

探测器有一系列本征性质，用于衡量其性能的优劣。以下是对探测器性质的介绍：

#### 分辨率

对于探测器所测量的物理量，如果其具有给定的真值，则探测器的测量值会形成一个分布函数，在大部分情况下，实验结果呈现正态分布，分辨率通常由该分布的半高宽来表示，可以通过数据计算或拟合得到。除了正态分布，有的实验结果遵从泊松分布或伯努利分布，对于事例数很小的情况，则使用 Regener 统计。分辨率与实验结果的平均值之比，则是相对精度，用于衡量实验误差的大小。实验结果的均值与真值并不一定相等，两者满足线性或非线性关系，需要对实验均值进行刻度，以得到准确的结果。

#### 时间特性

死时间是指探测器在记录一个事例后，在能够记录下一个事例之前还需要等待的一段时间。处于死时间内的探测器无法对粒子进行探测，死时间之后，探测器又能探测粒子，但还需要一段时间，对粒子的灵敏度才能恢复正常水平，这一段时间称为恢复时间。读出时间是指探测器读出事例需要的时间，通常与电

子学电子学的性能有关。时间分辨率是上一节所介绍的分辨率的一种，表征探测器记录时间的精度，与探测器信号上升时间、定时方法等因素有关。分辨时间是指探测器能分开两个相继入射粒子间的最短时间间隔，很大程度上取决于输出脉冲宽度。

### 真偶符合

符合计数法是粒子和辐射探测中常用的实验方法，是利用符合电路来甄选在时间、角度等方面存在关联的事件。真符合是指具有相关性的两个事件之间的符合。偶然符合是指没有关联的事件的符合。在高计数率的情况下，偶然符合带来的影响较大，需要对偶然符合率进行研究。假定两个探测器的探测的源相互独立，计数率分别  $n_1$  和  $n_2$ ，分辨时间为  $\tau$ ，当两个信号间隔在  $\pm\tau$  内则可以产生符合输出，那么偶然符合的计数率可以表示为  $2\tau n_1 n_2$ ，每个探测器的计数率越高，分辨时间越长，偶然符合计数率相应地越大。

### 效率

探测效率是指当粒子和辐射穿过探测器的灵敏体积时，探测器能给出响应的概率。探测器效率常见的测量方式如图 1-1 所示，两个触发探测器被放置在被测探测器的正上方和下方，当两个触发探测器给出二重符合信号时，说明粒子一定也穿过了中间被测探测器的灵敏体积。

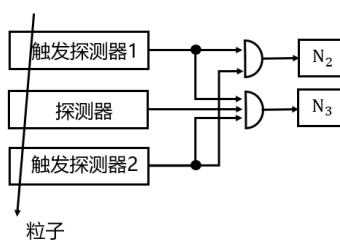


图 1-1 探测效率测量装置示意图。

上下触发探测器的二重符合计数记为  $N_2$ ，三个探测器给出三重符合信号计数记为  $N_3$ ，则探测效率可以计算得到：

$$\epsilon = \frac{N_3}{N_2} \quad (1.1)$$

效率误差为：

$$\sigma(\epsilon) = \sigma\left(\frac{N_3}{N_2}\right) = \frac{1}{N_2} \sigma(N_3) = \frac{1}{N_2} \sqrt{N_2 \epsilon (1 - \epsilon)} = \sqrt{\frac{\epsilon(1 - \epsilon)}{N_2}} \quad (1.2)$$

要想更精确地测量探测器效率，就要保证测量时间足够长，积累足够的事例。

### 1.1.2 粒子探测器的主要类型

探测的基本过程，就是粒子和辐射在气体、液体或固体中通过电离、激发等效应在探测器中沉积能量，沉积能量转换为输出信号，下面将根据探测器的主要原理分别介绍粒子探测器的几种主要类型。

#### 基于电离效应的探测器

根据介质的种类，基于电离效应的探测器主要有气体探测器、液体电离计数器和固体电离探测器。气体探测器是通过收集入射粒子在电极之间的气体内产生的电子离子对，形成输出脉冲，如果电荷在某些电场区域内能通过碰撞得到倍增，就可以得到更大的脉冲信号，例如工作在不同放电模式下的正比计数器、盖革计数器和流光管。相比于气体探测器，液体电离计数器在密度方面有其优势，能量吸收更大，常见的有液氙电离室。固体探测器的工作原理类似，粒子在探测器内产生电子空穴对，在电场中收集这些载流子形成信号。介于绝缘体和导体之间的半导体是固体探测器的常用材料，纯净的半导体导电能力有限，需要在其中掺入杂质，多数载流子是电子的称为 N 型半导体，多数载流子是空穴的称为 P 型半导体，两种半导体界面处会形成载流子密度很低的耗尽层，保证了无粒子入射时漏电流小，而在加上反向电压的情况下，粒子入射后的载流子寿命足够长，能被有效收集，因此 PN 结可用于固体电离探测器，也就是半导体探测器。

#### 基于发光效应的探测器

契伦科夫探测器和闪烁体探测器都是基于发光效应。契伦科夫辐射是指带电粒子以超过介质中光速 ( $c/n$ ) 的速度穿过介质时发出的特征电磁辐射。契伦科夫光与带电粒子径迹之间的夹角只与介质的折射率和粒子速度有关，结合能量信息，可以得到粒子质量，因此契伦科夫探测器可以用于粒子鉴别。一切透明物质都可以用作契伦科夫辐射体，包括气体、液体、固体，可以覆盖很大的折射率范围，另外气体和液体之间的折射率范围间隙可以由气凝胶覆盖。

粒子与某些透明物质相互作用，会使其电离、激发而发射荧光，利用这些闪烁光来探测粒子的探测器，称为闪烁探测器。测量闪烁光常见的是光电倍增管 (PMT)，与固体电离探测器相比，这样的非直接探测产生一个光电子所需的能量更大，但优点是闪烁体成本低，可以建造大尺寸的探测器来补偿。1947 年光电倍增管被用于探测闪烁光，闪烁体探测器自此开始蓬勃发展，大致分为有机闪烁体和无机闪烁体两类，能量弛豫、闪烁过程和辐射损伤的一些基本机制逐步

得到了了解。无机闪烁体中应用最多的碱金属卤化物闪烁晶体，BGO、LSO(Ge) 等高密度晶体，BaF<sub>2</sub>、CaF<sub>2</sub> 等具备快发光特点的晶体，不仅用于高能物理中的探测器，也在其他领域得到应用，特别是工业和医学成像设备。有机闪烁体分为三类，包括液体闪烁体、塑料闪烁体和有机晶体如蒽、芪、联三苯等。塑闪和液闪均由有机溶剂和发光物质溶质组成，塑闪本质上就是固化聚合的液闪，其主要基质一般是聚苯乙烯，再添加荧光剂（如 PPO 或 PTP）与移波剂（如 POPOP）。移波剂可以吸收闪烁光后发出波长更长的光，发射光谱更加远离吸收光谱，使得塑料的闪烁体光传输效率更高。塑料闪烁体相比无机闪烁体而言，发光衰减时间短，时间性能好，此外探测效率高、易加工，机械强度高，成本低，因此高能物理实验中也大量使用塑闪作为计数探测器。塑闪的生产加工方式有很多，比如浇铸造聚合、注塑成型与挤压。挤压法生产塑料闪烁体的成本非常低<sup>[24]</sup>，但光学衰减特性通常较差，结合波长位移光纤（WLS）使用则可以忽略这一不足，因此它经常被用于生产非常大型的探测器。用于 Belle II 实验中的塑闪就是使用挤压的方法制成，可以得到数米长度的闪烁体，通过耦合波长位移光纤和硅光电倍增管（SiPM）使用。

## 1.2 环形正负电子对撞机 CEPC

### 1.2.1 物理目标

标准模型是粒子物理学中被广泛接受的一种理论模型，描述了电磁力、强作用力、弱作用力三种基本力（除了引力）及组成所有物质的基本粒子，可以很好地解释基本粒子的特性及相互间的作用。自旋为  $\frac{1}{2}$  的费米子是组成物质的基本粒子，自旋为 1 的玻色子则是传递相互作用的粒子。自旋为零的希格斯玻色子（ $H$ ）地位独特，在阐明物质质量起源方面起着基础性的作用。

继 2012 年欧洲核子中心 CERN 建造的大型强子对撞机 (LHC) 发现具有里程碑意义的希格斯玻色子之后，研究其质量、自旋、CP 性质以及与之的相互作用等内容成为重要的物理目标。全球高能物理界就  $e^+e^-$  希格斯玻色子工厂作为下一个未来对撞机的重要性达成了共识，体现在全球各地区和国家的战略规划中。希格斯玻色子的质量  $m_H \approx 125 \text{ GeV}/c^2$  较低，因此可以基于合理的亮度和成本在正负电子对撞机相对干净的环境中产生，实现高精度测量。目前正在考虑几个未来的对撞机方案，最优先的就是希格斯工厂，质心能量  $E_{cm} \sim 240 \text{ GeV}$ ，对撞亮度  $L \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，能够产生数百万个用于物理研究的希格斯粒子。中国于 2013 年提出建造质心系能量在 240 GeV 的环形正负电子对撞机 (CEPC)<sup>[2-3]</sup>。国际上，日本高能加速器研究机构 KEK 提出了国际直线对撞机 (ILC)<sup>[4-5]</sup>，CERN 提出了未来环形对撞机 (FCC)<sup>[6]</sup>。FCC-ee 和 CEPC 的设计类似：在地下深处建



造一条约 100 公里的圆形隧道以容纳  $e^+e^-$  对撞机。之后，相同的隧道还可在适当的时机升级，用于搭建未来  $E_{\text{cm}} \sim 100 \text{ TeV}$ 、 $L \sim 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  的  $pp$  对撞机，例如 FCC-ee 可以升级为未来环形强子对撞机 FCC-hh<sup>[7]</sup>，CEPC 可以升级为超级质子对撞机 SPPC。

CEPC 自提出后，迅速开始了关于加速器和探测器的研发，于 2015 年发布初步概念设计报告 (Pre-CDR)，2018 年发布概念设计报告 (CDR)，介绍了物理目标、加速器、探测器及相关实验指标和未来计划。2023 年 CEPC 发布了加速器技术设计报告 (TDR)，加速器设计经过优化以最大程度发挥其科学潜力，同时考虑成本、技术可行性和运行效率等因素，探测器的参考性技术设计报告 (Ref TDR) 的研发已经在开展。

## 1.2.2 加速器

在加速器基准设计中，CEPC 将在三个不同的质心能量区间运行，以研究特定粒子及其相关现象。它们分别为：240 GeV 用于希格斯玻色子研究，160 GeV 用于  $W$  玻色子研究，91 GeV 用于  $Z$  玻色子研究。此外，为了增强研究能力并深入了解顶夸克，一个可选方案是将质心能量提高到 360 GeV。四个对撞能量点的亮度初步在 30 MW 下预计分别可以达到  $5 \times 10^{34}$ 、 $16 \times 10^{34}$ 、 $115 \times 10^{34}$  和  $0.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。如图 1-2 所示，CEPC 设计由四个加速器组成：一个 30 GeV 的直线加速器，一个 1.1 GeV 阻尼环，一个能量高达 180 GeV 的助推器和一个在四种不同能量模式 ( $Z$ 、 $W$ 、 $H$ 、和  $t\bar{t}$ ) 的对撞机。这些机器由十条运输线连接。直线加速器和阻尼环建在地面上，而储存环和对撞机则位于周长 100 公里的地下环形隧道中。隧道为未来的超级质子对撞机 (SPPC) 预留了空间。该对撞机采用双环结构，电子束和正电子束在单独的束管内沿相反方向循环<sup>[8]</sup>。

## 1.2.3 探测器

从最开始 CDR 中提出的基线设计探测器到目前最新的第四个概念探测器，CEPC 探测器研究团队在不断优化具体的探测器实现方案。如图 1-3 所示，最内层为硅顶点探测器，其目标是对高动量径迹的顶点测量精度达到  $5 \mu\text{m}$ ；往外是硅径迹探测器和提供粒子鉴别的漂移室，硅径迹探测器分为两部分，漂移室位于其内层与外两层之间；再往外是量能器，分为电磁量能器和强子量能器，3T/2T 的螺线管磁铁位于这两者之间，强子量能器的吸收体材料也作为磁通量回流的一部分；最外层是缪子探测器，由探测层和轭铁层交替排列组成，这一部分的闪烁体探测器方案正由复旦开展预研工作。

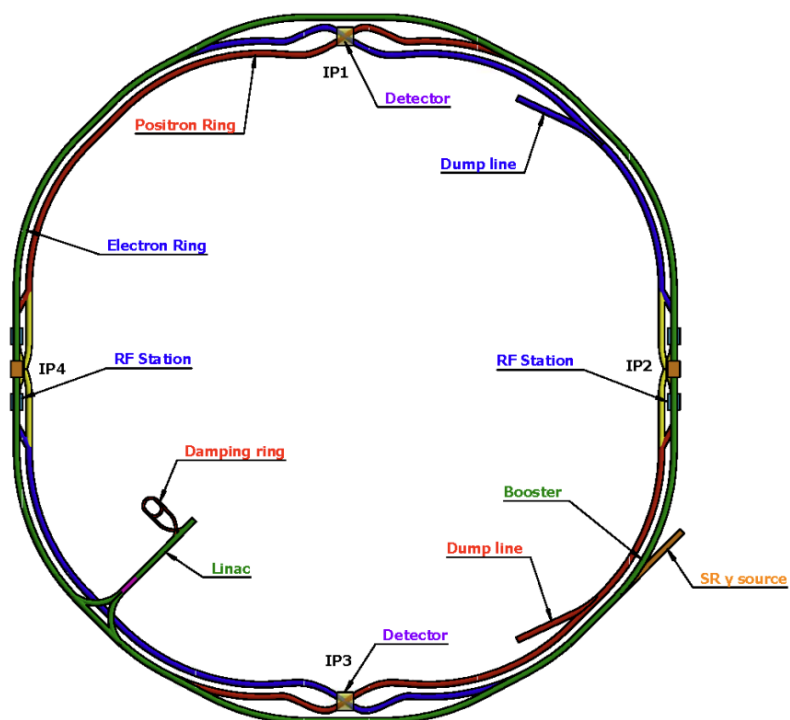


图 1-2 CEPC 综合布局。

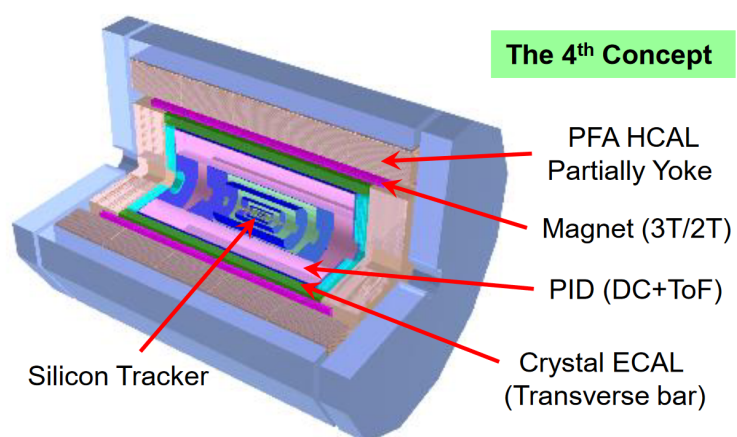


图 1-3 CEPC 第四个探测器概念设计。

### 1.2.4 缪子探测器

CEPC 概念设计报告中讨论指出，缪子探测器是一个能够识别缪子、检测来自量能器的泄露并寻找长寿命粒子的系统<sup>[3]</sup>。由于在寻找新粒子的过程中，含缪子的末态通常构成“黄金通道”，在基于加速器的实验中，缪子谱仪发挥着关键作用<sup>[9]</sup>。在  $e^+e^-$  湮灭中，希格斯玻色子的主要产生机制是  $e^+e^- \rightarrow H + Z^0$ ，其中  $Z^0$  是电弱相互作用的规范玻色子，其衰变分支比为  $B(Z^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3.3662 \pm 0.0066)\%$ <sup>[10]</sup>。在许多测量中， $H$  玻色子可以很好地通过  $Z^0$  玻色子的反冲来确定，而  $Z^0$  玻色子在其  $\mu^+\mu^-$  衰变模式中 can 很好地重建，这就需要对缪子进行优秀的测量。为了提供有关涉及缪子末态的物理过程的更多信息，缪子系统在探测效率、低强子误鉴别率、适当的位置分辨率和广覆盖方面应该有好的表现。此外，缪子探测器中清晰的缪子击中可以作为触发系统极好的输入。CEPC 缪子探测器的基准设计分为一个桶部和两个端部，各有 6 个灵敏层和铁吸收层交替排列。缪子探测器需要实现高探测效率（95%）、最优位置分辨率（ $\sigma_{r\phi} = 2.0 \text{ cm}, \sigma_z = 1.5 \text{ cm}$ ），以及 1-2 纳秒的时间分辨率和  $50 - 100 \text{ Hz/cm}^2$  的高速率探测能力<sup>[3]</sup>。

## 1.3 SuperKEKB 上的 Belle II 实验

KEKB 是一个周长 3 km 的非对称正负电子对撞机，从 1998 年起在日本高能加速器研究机构开始运行，Belle 是在 KEBB 对撞点上的大型粒子探测器<sup>[11]</sup>，用于进行 CP 对称性破坏研究。Belle 实验产生大量的  $B$  介子，因此该实验也被称为“ $B$  介子工厂”，长期保持着世界上对撞机的最高亮度记录，极大地推进了重味物理与 CP 破坏的研究，为小林诚（Makoto Kobayashi）和益川敏英（Toshihide Maskawa）获得 2008 年诺贝尔奖提供了重要的实验结果。CP 破坏被认为是宇宙中观察到的物质数量多于反物质数量的起源之一。但是，到目前为止，所测得的 CP 破坏的程度还不足以定量解释实际的不对称性，因此，需要对相关现象有更深入的了解<sup>[12]</sup>。在获得多项重要成果之后，KEKB 进行重大升级改造，改造完成后的 SuperKEKB 称为“超级  $B$  介子工厂”，如图 1-4；位于 SuperKEKB 对撞点上的新粒子探测器 Belle II，如图 1-6。

### 1.3.1 Belle II 实验物理目标

在目前的实验精度和已达到的能量水平上，标准模型（SM）是在基本层面上最好地描述自然界的经过检验的理论。虽然在描述基本粒子及其相互作用方面（除引力外）方面已经取得了巨大成功，但仍有许多基本问题的答案没有给出。标准模型没有解释为什么只有三代基本费米子，以及为什么费米子质量存在观察到的层次结构。在标准模型内，基本粒子的质量起源通过自发电弱对称



性破缺来解释，也就是希格斯机制。然而，目前尚不清楚希格斯玻色子是否能解释中微子的质量，也不清楚是否只有一个希格斯玻色子。在宇宙尺度上，宇宙中的物质-反物质不对称性问题尚未解决。源自 CKM 矩阵复相位观察到的 CP 破坏在数量级上远远不足以解释宇宙中物质的支配，因此，一定存在未发现的 CP 不对称性来源。对于标准模型中仍未解答的这些问题，许多含有新粒子和新过程的新物理（NP）已被提出来解释标准模型的这些不足之处，高能物理实验也是在通过各种方法，解答上述问题，寻找新物理。新粒子的产生取决于截面和数据样本的大小。在能量前沿，LHC 实验能够在质心能量高达 14 TeV 的质子-质子碰撞中发现新粒子的产生。在亮度前沿，作为新一代的味工厂，Belle II 主要的物理目标是寻找新物理，并且提高标准模型参数的测量精度。

### 1.3.2 加速器 SuperKEKB

SuperKEKB 是一台非对称能量正负电子双环对撞机，由 7 GeV 电子束（高能环，HER）和 4 GeV 正电子束（低能环，LER）和注入器组成，注入器包含电子枪、直线加速段和 1.1 GeV 的正电子阻尼环（DR）。SuperKEKB 以质心能量碰撞电子和正电子，大多数数据将在  $Y(4S)$  共振处收集，该共振态刚好高于  $B$  介子对产生的阈值，不会产生其他碎片粒子，干净的背景有利于数据处理与物理分析。不对称的束流能量可以提高质心系统的动量，从而允许进行时间相关的电荷宇称（CP）破坏测量。

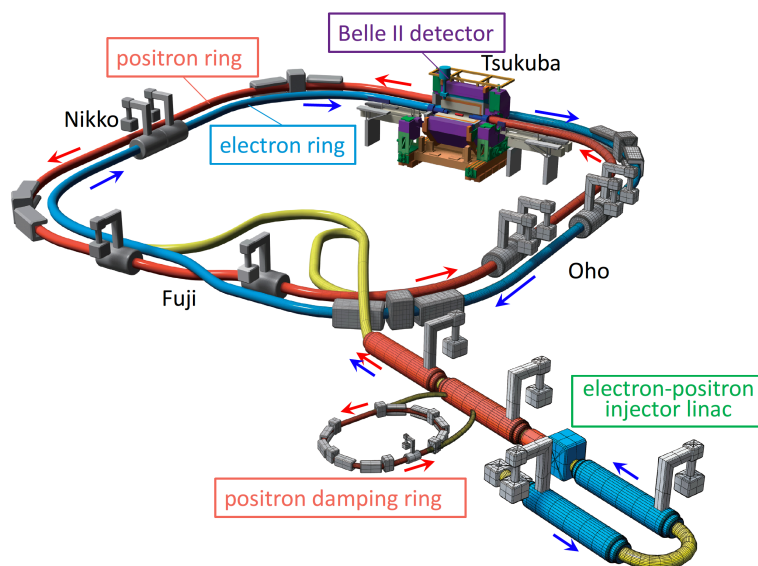


图 1-4 SuperKEKB 示意图。

如图1-5，SuperKEKB 设计的目标是  $6 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  的峰值亮度，大约是 KEKB 最高亮度的 30 倍，预期收集  $50 \text{ ab}^{-1}$  的数据。加速器的亮度计算公式如

下：

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2er_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*}\right) \left(\frac{I_{\pm}\epsilon_{y\pm}}{\beta_y^*}\right) \left(\frac{R_L}{R_{\epsilon_y}}\right) \quad (1.3)$$

其中  $\gamma_{\pm}$  是洛伦兹因子， $e$  是基本电荷， $r_e$  是经典电子半径， $\sigma_{x,y}^*$  是在对撞点的束流尺寸， $I_{\pm}$  是束流电流， $\beta_y^*$  是在对撞点的垂直  $\beta$  函数， $\epsilon_{y\pm}$  是束流参数， $R_L$  和  $R_{\epsilon_y}$  是对撞点几何损失的修正因子。SuperKEKB 为了实现更高的亮度，选择增大束流电流以及减小垂直  $\beta$  函数和束流尺寸，首次使用具有足够小  $\sigma_x^*$  的纳米级束流团在较大的水平交叉角度下碰撞，相应地提高了探测器衰变顶点的分辨率。

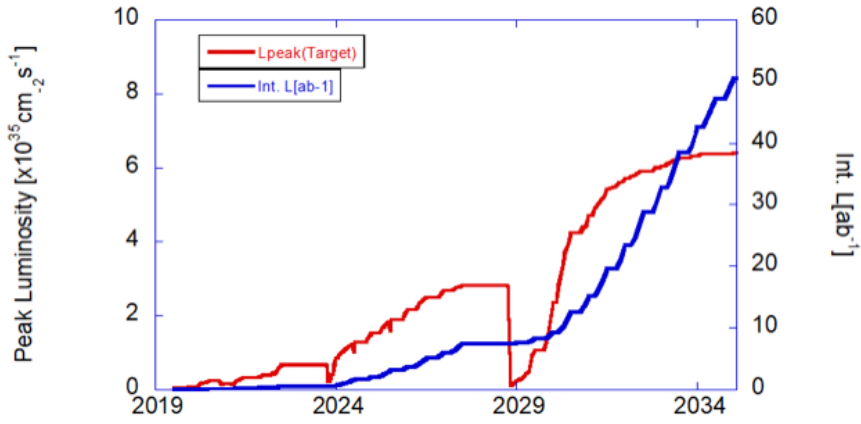


图 1-5 SuperKEKB 的亮度计划<sup>[13]</sup>。

Belle II 经过约 8 年时间的建造和调试，2018 年进行了第一轮对撞数据采集，主要用于加速器和探测器的调试，于 2019 年进入了以物理研究为目标的实验数据获取阶段。2022 年 6 月，SuperKEKB 创造了新的亮度世界纪录，达到了  $4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 。从 2019 年到 2022 年，Belle II 积累了  $400 \text{ fb}^{-1}$  的数据样本。这些数据提供了大量的  $b$  介子、含  $c$  夸克强子和  $\tau$  轻子样本，同时还进行了与暗物质相关的独特寻找。经过一段长期停机后，其中加速器和探测器都得到了改进，物理取数已经于 2024 年重新开始。国内许多单位已陆续加入 Belle II 国际合作组，复旦大学于 2017 年加入 Belle II 实验，成为正式的 Belle II 合作组成员，几年以来，复旦参与了 Belle II 的实验运行维护，在探测器升级尤其是 KLM 系统上也发挥着重要作用。

### 1.3.3 Belle II 探测器

Belle II 探测器作为实验的核心，由包围在 SuperKEKB 的对撞点的多个子探测器层组成，长宽高均为约 7 米，重量约 1400 吨。Belle II 探测器和坐标系如图 1-6 所示，由以下子探测系统组成：硅像素探测器（PXD）、硅微条探测器

(SVD)、中央漂移室 (CDC)、粒子鉴别 (PID) 探测器 (包含 ARICH 和 TOP)、电磁量能器 (ECL)、 $K_L$  和缪子探测器 (KLM)。超导螺线管磁铁位于 ECL 和 KLM 之间, 产生沿着束流轴方向的 1.5 T 磁场。图中画出的坐标系,  $x$  轴是水平的, 指向加速器隧道外部,  $y$  轴是垂直向上的,  $z$  轴是 Belle II 螺线管轴线, 即两条束流之间的角平分线方向, 大致指向电子束的方向。 $\phi$  是绕  $z$  轴的方位角。 $\phi = 0$  定义为  $(x, y, z) = (1, 0, 0)$ 。 $\theta$  是相对于  $z$  轴的天顶角。 $\theta = 0$  定义为  $(x, y, z) = (0, 0, 1)$ 。

Belle II 各个子探测器如下, 其中与本文研究直接相关的 KLM 探测器升级研究将在 1.3.4 详细介绍:

PXD 是 Belle II 最内层的子探测器, 直接围绕着束流管道。PXD 的内外两层分别位于距离束流线 14 mm 和 22 mm 的半径上, 两层的 DEPFET 像素尺寸分别为  $50 \times 55 \mu\text{m}^2$  和  $50 \times 75 \mu\text{m}^2$ 。PXD 的主要目的是在高亮度带来的高本底条件下测量衰变顶点。

SVD 由四层双面硅微条探测器组成, 半径分别为 38、80、115 和 140 mm, 与 PXD 的两层子探测器共同组成顶点探测器 (VXD)。SVD 用于衰变顶点测量和低动量粒子轨迹重建。时间相关的测量对于 Belle II 物理方面的研究至关重要, 这是因为 CP 破坏过程的研究需要测量碰撞中产生的两个 B 介子的衰变时间差, 测量的不确定度主要由顶点之间的距离 (数百微米量级) 的测量不确定度决定, 六层 VXD 顶点重建的精度可以达到  $\sigma_z = 26 \mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。

CDC 是 Belle II 实验中主要的径迹探测器, 由接地的 42240 根电位丝和施加正高压的 14366 根引出信号的灵敏丝组成, 充满着 50% He 和 50% C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 的混合气体, 带电粒子穿过 CDC 将使气体电离并产生电子, 电子雪崩产生感应需测量的信号。CDC 有三个重要作用: 首先, 重建带电粒子轨迹并精确测量它们的动量; 其次, 通过测量粒子在探测器气体中的电离能损来提供粒子鉴别信息; 最后, 它还可以为带电粒子提供高效可靠的触发信号。

气凝胶契伦科夫探测器 (ARICH) 位于前向端盖区域, 用于在前向端盖区域进行粒子鉴别。带电粒子在气凝胶辐射体中产生契伦科夫光, 光在光子探测器表面形成环, 光子探测器阵列能够在强磁场中探测单个光子, 具有高探测效率和良好的二维分辨率。契伦科夫光锥角度与粒子速度有关, PID 的主要任务就是通过契伦科夫光的角度来区分  $K$  介子和  $\pi$  介子。

TOP 探测器位于 Belle II 的桶部, 主要探测模块由石英板、端面的 (MCP) PMT 和另一端的反射镜面组成, 不同粒子击中石英板时, 通过测量内部反射的契伦科夫光的传播时间, 进行粒子鉴别。契伦科夫图像由  $(x, y)$  两个坐标和石英板端面 (MCP) PMT 提供的精确定时这 3 维信息进行重建。

电磁量能器 (ECL) 由桶部分的 6624 个铊掺杂的碘化铯 CsI(Tl) 晶体和端盖

部分的 2112 个 CsI(Tl) 晶体组成，每个晶体都耦合有大面积的硅光电二极管以检测闪烁光。ECL 的关键作用是探测光子，识别电子，同时也为 trigger 提供合适的信号，并与 KLM 一起测量  $K_L$ 。

KLM 作为 Belle II 探测器<sup>[15]</sup>的最外层的系统，在识别  $K_L$  介子和缪子方面起着至关重要的作用，探测动量高于 0.6 GeV/c 的粒子。KLM 由 4.7 cm 厚的钨铁层和约 4 cm 厚的信号探测层交替排列组成。八边形桶部有 15 个探测器层和 14 个钨铁层，覆盖了 200 到 340 cm 的半径范围，两端端盖各有 14 个探测器层和 14 个铁层，覆盖 130 到 340 cm，如图 1-7(a)(b) 所示。钨铁层不仅用作螺线管的磁通量回流，也能使  $K_L$  发生强子级联簇射。KLM 探测器结构中，桶部的两个最内层和所有端盖层中都使用闪烁体条进行探测，通过对闪烁体条的正交击中信息实现粒子轨迹的精确定位，而其余 13 个桶层使用原始 Belle 实验传统的阻性板气体探测技术（RPC）探测器。KLM 拥有约 38,000 个读出通道，其中一半专用于基于闪烁体的探测，表现出 KLM 系统广覆盖和高分辨的粒子探测能力。

触发系统：Belle II 探测器预计在设计亮度下将接收总共 20 kHz 的物理过程触发率。为了处理大量由束流引起的背景并高效选择事件以进行物理分析，Belle II 触发系统分为两个连续级别。第 1 级触发（L1）在硬件中实施，高级触发（HLT）是在软件中实施的，对由 L1 触发的事件进行更详细的选择，以进一步减少事例之间的背景。完整的一级触发包括从每个 Belle II 子探测器中收集信息的四个子触发器，对子触发器信息进行收集组合的全局重建逻辑（GRL），以及最终决定是否保留事例的全局决策逻辑（GDL）。一级触发信号设计目标是在束流碰撞后的 4.2  $\mu$ s 内输出决策。

### 1.3.4 KLM 系统升级

在 Belle II KLM 探测器的闪烁体模块设计中，闪烁体条的横截面尺寸为：桶部为 4 cm  $\times$  1 cm，端盖为 4 cm  $\times$  0.75 cm，实现了约  $\sigma_s \approx 1.2$  cm 的空间分辨率。每个闪烁体条包含一根 Kuraray Y11(200)MSJ 波长位移光纤<sup>[16]</sup>，以高效捕获和引导光子到 SiPM。SiPM 采用多像素光子计数器（MPPC：Hamamatsu S10362-13-050C），MPPC 通过内部约 10 倍的前置放大器增强初始信号，然后通过带状电缆传输到位于探测器外部的后端电子学。图 1-7(c)(d) 展示了 2013 年由弗吉尼亚理工大学为 KLM 桶部开发的闪烁体模块的内部结构。为 Belle II 端盖 KLM 开发和测试的闪烁体模块的详细信息，可以参阅文献<sup>[17]</sup>。

对比 KEKB，SuperKEKB 加速器将以更高的速率产生正负电子对碰撞，探测器也需要替换升级来提高性能<sup>[18]</sup>。基于 RPC 的 Belle KLM 在 Belle 实验的整个取数期间都表现出良好的性能。但亮度提高以后，RPC 由于放电后电场恢复



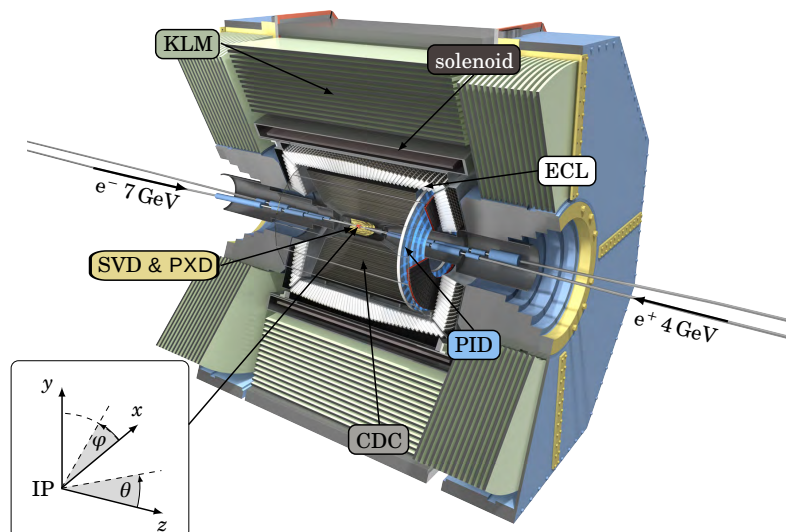


图 1-6 Belle II 探测器及其坐标系。

过程的死时间长，明显降低了高本底通量下的探测效率。在端盖中，由于对沿束流线外部产生的中子和其他粒子的屏蔽作用有限，本底情况变得更糟，因此，整个端盖和桶部最内两层的 RPC 已经替换成新的闪烁体探测器。除此之外，RPC 使用时长已经超过了二十多年，它的运行需要维持足够的工作气体、高达 8.2 千伏的电压，而高击中率也会使桶部 KLM 探测效率降低，影响动量低于  $1.5 \text{ GeV}/c$  的缪子的识别，现在 Belle II 的 KLM 仍有老的 RPC，SuperKEKB 和 Belle II 已经在讨论升级研究，桶部 KLM 会将外面 13 层 RPC 也替换为闪烁体探测器<sup>[19]</sup>。复旦作为 KLM 升级的主要推动单位之一，正在开展针对 KLM 系统升级计划的研究，国内多所高校也在陆续加入。

## 1.4 论文内容与结构

论文共分为五个章节，介绍了作者在硕士期间围绕着闪烁体探测器的研发所开展的工作：

第一章为研究背景部分，首先介绍了粒子物理实验中的探测器技术，包括探测器的本征性质和主要类型，接着介绍了目前正在运行的对撞亮度最高的 Belle II 实验与预研中的面向 Higgs 研究的大型正负电子对撞机 CEPC 实验。结合两个实验各自的物理目标、加速器与探测器现状，介绍了 CEPC 实验的缪子探测器预研与 Belle II KLM 子探测器升级对闪烁体探测器的相应研发需求，也就是本文的研究目标。

第二章对闪烁体探测器的关键部件-SiPM 进行了充分的研究，对比了两个厂

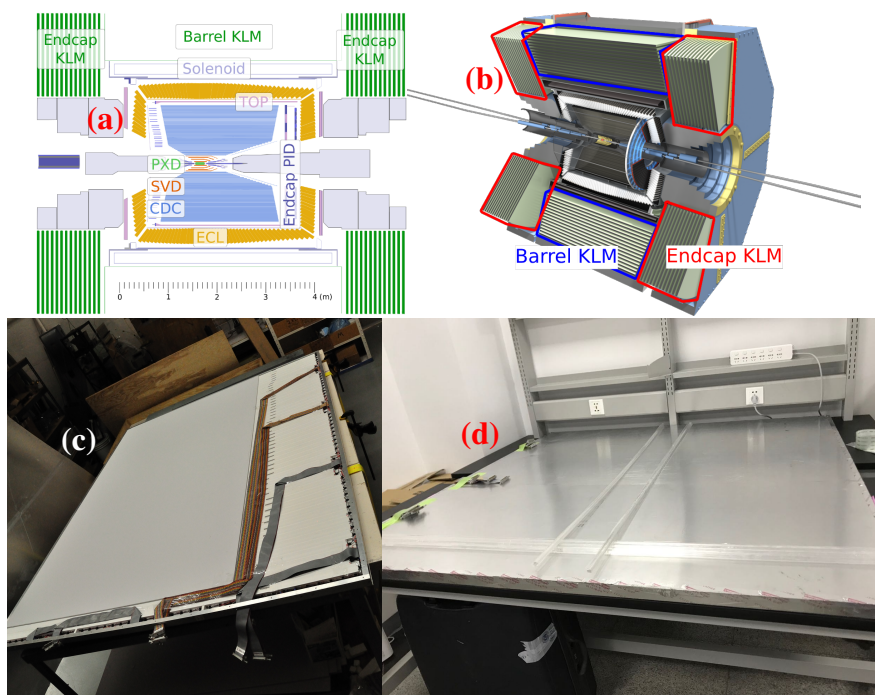


图 1-7 (a)(b): 位于 Belle II 最外层的 KLM 探测器.(c)(d): 用于桶部 KLM 的闪烁体探测器模块。

家生产的 SiPM 的性能，结合探测器性能目标和测试需求设计了前端电子学与数据获取系统。

第三章围绕针对 CEPC 缪子探测器使用闪烁体探测器方案开展了预先研究，包括探测器的主要部件的设计选择与多通道原型样机的性能测试。首先介绍了探测器所选用的闪烁体、光纤的各项参数，随后详细介绍了为提高闪烁体探测效率，提升光收集的多个方法。最后搭建了六个通道的闪烁体探测器原型样机进行宇宙线测试，得到了效率、时间分辨等各项性能，可满足 CEPC 实验需求。

第四章介绍了针对 Belle II 实验的 KLM 子探测器升级的方案研究，包括高时间分辨闪烁体探测器的设计与多通道小原型机的宇宙线测试。通过对多个 SiPM 阵列与长衰减长度的闪烁体的性能研究，采用类似 TOF 的双端读出，实现高时间分辨，研究了光导、表面抛光、反射层的使用等因素对时间分辨的影响。最后搭建了六个通道的闪烁体探测器原型机，在使用激光进行时间刻度后，测量了宇宙线缪子的平均速度与能量，为 KLM 系统升级的方案提供参考。

第五章为总结和展望，其后是参考文献、攻读学位期间科研成果和致谢。

## 第 2 章 SiPM 的相关研究

闪烁体探测器的关键部件之一是光信号的测量设备，CEPC 实验缪子探测器预研对探测模块提出了高效率的要求，Belle II 实验 KLM 系统升级提出了高时间分辨的要求，因此对于光读出的设备的选择尤其重要。最常用的测量光信号的设备是光电倍增管（PMT），闪烁光在它的光阴极通过光电效应打出电子，光电子经过打拿极逐级放大，实现光信号到电信号的转换，但普通的 PMT 无法在强磁场环境下工作，加上体积大、高电压需求的特点限制了其应用。相比之下，上个世纪九十年代兴起的 SiPM，作为一种具有单光子探测灵敏度的硅基弱光探测器件，由于其优秀的单光子分辨、高探测效率、高增益、优秀的时间分辨率、体积小、工作电压低和对磁场干扰的抗性而在高能物理实验中越来越受欢迎。

本章节对 SiPM 的性能进行了详细的研究，设计并测试了适用于 SiPM 信号读出的高速且低噪声前置放大器，还搭建了多种数据系统，可灵活应用于 SiPM、前放与闪烁体探测器的性能测量。

### 2.1 SiPM 性能测试

塑闪和光纤发出的光信号需要进一步转换为电信号进行分析，实验中就必须使用一个或多个光电转换装置。光探测器的主要光谱响应范围应该与波长移位光纤的发射光谱相配合，以确保光探测效率。

本实验使用了来自两个生产厂商的 SiPM，如图2-1所示。第一种类型是多像素光子计数器（MPPC）系列，主要包括 S13360-1325CS、S13360-1350CS 和 S13360-1375CS 等型号，由日本滨松（Hamamatsu）公司生产<sup>[32]</sup>。与当前 KLM 使用的 S10362 系列相比，S13360 系列的 MPPC 性能得到了提升，具有相同的  $1.3\text{ mm} \times 1.3\text{ mm}$  光敏面积，同时具有更低的工作电压、更低的串扰（OT）和暗计数率（DCR）。第二种类型是由国内新器件实验室（NDL）<sup>[33]</sup>生产的 EQR 系列 SiPM<sup>[34]</sup>，设计为表面贴装器件（SMD）。SMD SiPM 具有体积小、扁平的特点，并且可以通过回流焊接固定。

在搭建闪烁体探测系统之前，需要关注 SiPM 的像素大小，光探测面积以及工作电压。SiPM 的像素大一般意味着可以带来更高的增益、光子探测效率，而像素小的 SiPM 则具有更宽的动态范围和高速响应。有效光探测面积更大的 SiPM 具有更宽的动态范围，但由于端电容增大导致响应更慢。SiPM 的工作电压也需

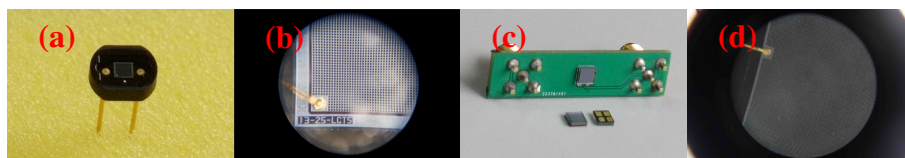


图 2-1 不同生产商的 SiPM 及其表面的显微镜视图：(a,b) Hamamatsu (MPPC S10362-13-050，光敏面积  $1.3 \text{ mm} \times 1.3 \text{ mm}$ )。在光学显微镜下可看到表面用于高压供应和信号读出的两个引脚，以及大小和间距随型号各有差异的像素。(c,d) NDL (EQR15 11-3030-s，光敏面积  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ )。

要在一定范围内可调，通过选取合适的值以得到所需的性能，高电压有助于得到高增益、高光子探测效率、优秀的时间性能，而低电压则具有更低的暗计数和串扰。下面研究了 Hamamatsu MPPC 和 NDL SiPM 的各项性能，包括击穿电压、增益、暗计数率和串扰。

### 2.1.1 击穿电压

SiPM 是由多个单光子雪崩二极管 (SAPD) 并联构成的，当施加反向偏置电压后，每个雪崩二极管像素可对单光子进行雪崩放大，当反向电压增大到击穿电压时，二极管的反向偏置电流突然增加到一个较高的值，进入“盖革模式”。在盖革模式下，单个光电子可被放大形成一个大脉冲，脉冲信号幅度与被激活像素的数量成比例变化，在 SiPM 信号的 ADC 分布中可见独立等间隔的光电子峰 ( $N_{p.e.}$ )。

典型的测量击穿电压的方法是测量不同反向偏置电压下的电流，在该电压下，雪崩击穿开始，电子数量迅速增加，I-V 曲线突变的点所对应的电压值就是击穿电压。除了用电流值来进行拟合推算以外，还可以测量不同电压下的单光子幅度大小、增益这些值来测量击穿电压。其中，电流值可以由提供高压的插件的监控电流得到，单光子幅度可以通过示波器测量，增益可通过测量单光子峰的峰位间隔来得到。增益法是测量 SiPM 击穿电压最简单的方式，而需要测量大量同一类型的 SiPM 样品的击穿电压时，电流法则更加方便，仅需测量击穿电压附近的电流值变化情况。图2-2展示了滨松 MPPC 和 NDL 的 Gain-V 曲线，根据线性拟合结果可得到所测量的 MPPC 击穿电压为 51.2 V，NDL 击穿电压为 21.7 V，与官方给出的击穿电压值基本一致。

下图2-3也展示了通过测量单光子大小来测量击穿电压的拟合结果。后文提到的 SiPM 的各项性能，包括增益、暗计数、串扰等很大程度上都取决于工作电压，因此测量击穿电压和选取合适的工作电压以得到好的性能就十分重要。根据 Nyquist 采样定理，要想得到准确的 SiPM 信号的特性，对数据获取系统的精度有要求，数据的采样频率必须大于所测信号的最高频率成分的两倍。对于实



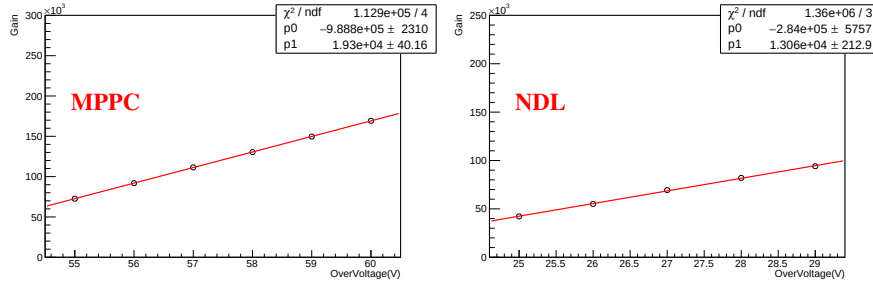


图 2-2 不同工作电压下的 SiPM 的增益值。

验中用到的 SiPM 的波形采样需求，暗计数最高可达几 MHz 量级，测量用到的示波器最低采样率为 200 M，最高可达 6.25 G，所用到的波形数字化仪采样率为 250 M，均满足测量的精度要求。

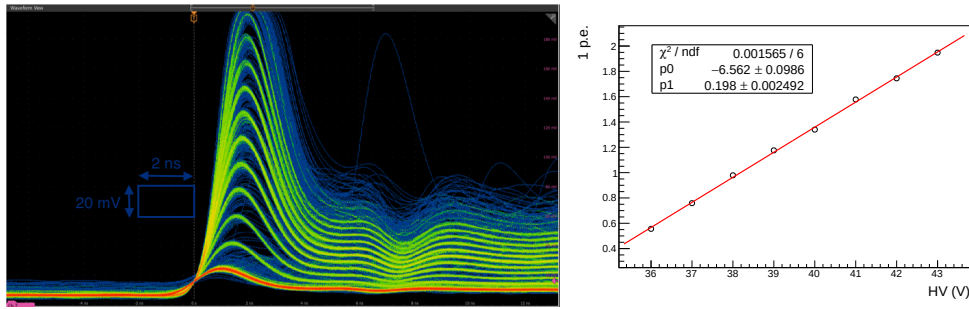


图 2-3 示波器采集开启色温显示时，观察到 SiPM 的清晰的多个光子峰，拟合不同电压下的单光子幅度，可得到击穿电压。

### 2.1.2 光子谱

在 SiPM 的性能测试实验中，使用长春新产业光电技术有限公司生产的脉冲激光器作为光源，选取的激光波长为 450nm，此波长同时在常见闪烁体与波长位移光纤的发射光谱范围内，也在 SiPM 的吸收波长峰值附近，可以很好地代替闪烁体的发光，同时激光器在输出频率为 100KHz 时脉宽可达到 100 ps，远低于闪烁体的衰减时间，有利于测量 SiPM 及前端电子学可达到的最优时间分辨性能。图2-4展示了 MPPC 和 NDL 接收皮秒激光给出的典型的脉冲信号电荷积分谱，ADC 表示模数转换的道址。蓝色表示 MPPC 在  $HV = 56.0 \text{ V}$  下的光子谱，可见多达 8 个 p.e. 峰值。红色表示 NDL 在  $HV = 27.0 \text{ V}$  下的光子谱，可见多达 4 个 p.e. 峰值，谱中观察到的第一个峰是由单个光电子产生的信号，而后续的多个等距峰对应于 SiPM 的多光子信号幅度，与激活像素的数量成正比。不同 p.e. 对应的的峰可使用高斯函数进行拟合，峰值和展宽  $\sigma^2$  与 p.e. 的对应关系如图2-5所示。峰值随光子数正比增长，满足信号幅度与被激活像素数成正比的规律，同时

展宽随光子数增加而变大表示单光子分辨也随之变差。

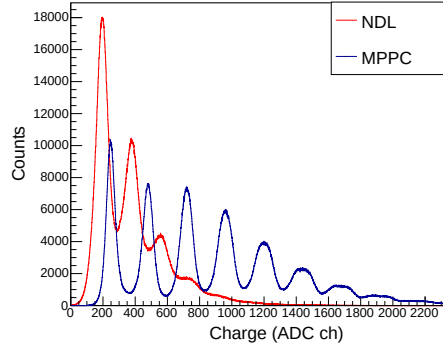


图 2-4 NDL 和 MPPC 在激光照射下的信号电荷积分谱。

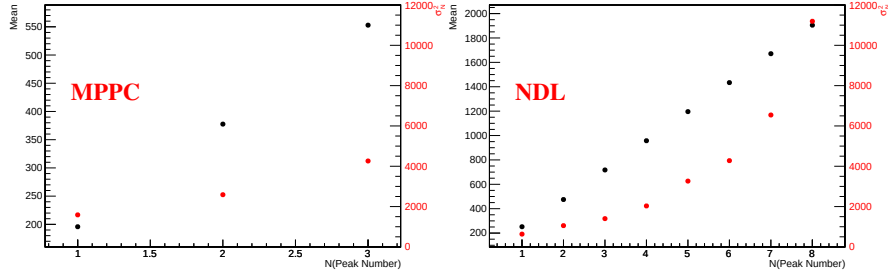


图 2-5 两种 SiPM 多光子谱分析。黑色：不同光子数对应高斯峰的峰位；红色：高斯峰的展宽值。

### 2.1.3 增益

SiPM 的增益是指盖革模式下每次雪崩放大单个光电子（SPE）信号所输出的电荷量，包括光电效应和载流子由于热激发产生的雪崩。其计算公式可以表示为

$$Gain = \frac{C \cdot \Delta V}{e} = \frac{(ADC_{2p.e.} - ADC_{1p.e.}) \times ADC_{conv}}{e}, \quad (2.1)$$

其中  $C$  是 SiPM 的电容（MPPC 通常为 60 pF，NDL 为 5.6 pF/mm<sup>2</sup>）， $\Delta V$  是过电压，即工作电压与击穿电压的差值。增益与过电压成正比，增益为 0 时对应的电压值就是击穿电压。通过计算得到脉冲电荷积分谱峰与峰之间的间隔，转换后即可计算出增益的大小。实验测试得出 S13360 MPPC 在 57.0 V 工作时的增益为  $1.1 \times 10^5$ ，EQR15 11-3030D-S 在 27 V 工作时的增益为  $0.7 \times 10^5$ 。为了方便对比，所有性能随过电压的变化数据画在同一张图中，增益随 HV 的变化如图 2-7 所示。

### 2.1.4 暗计数率

暗计数是指在无光条件下由于载流子热激发而产生的雪崩，是随机的且与光无关的假脉冲，会影响 SiPM 对光子数的分辨，尤其是在单光子 (SPE) 的检测中。暗电流率 (DCR) 取决于 MPPC 的衬底、技术、传感器设计、温度和过电压等因素。DCR 可通过测量超过  $0.5 \text{ p.e.}$  阈值的暗脉冲频率来得到，采用  $0.5 \text{ p.e.}$  的阈值意味着要求脉冲信号至少为单光子。图 2-6 给出了在建议的工作电压下，两种 SiPM 不同光子数阈值下对应的暗计数率，随着阈值增加，暗计数迅速下降，其中下降速率快的地方正是处于每个光子的峰值处。因此在实际的测量使用中，SiPM 信号可以通过加合适的阈值来去除暗计数的影响。图 2-7 给出了两种 SiPM 的暗计数随工作电压的变化，Hamamatsu MPPC 的 DCR 比 NDL SiPM 低一个数量级，NDL SiPM 的串扰随着过电压的增加迅速增加。其中，MPPC S13360 的像素尺寸为  $50 \mu\text{m}$ ，而 NDL EQR15 11-3030D-S 的像素尺寸为  $15 \mu\text{m}$ 。SiPM 的像素小则会导致像素数量多，暗计数也随之上升，在 NDL 的后续产品研发中，也在推出像素稍大的 SiPM 以减小暗计数。

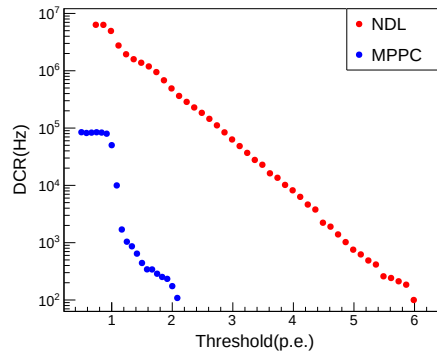


图 2-6 NDL 和 MPPC 的暗计数随阈值的变化。

### 2.1.5 光学串扰

当一个像素内部产生雪崩时，电子空穴对复合产生的光子有概率被附近的像素吸收，进一步发生雪崩，这种现象称为光学串扰 (OCT)，串扰的概率取决于 SiPM 的制作技术和工作电压。OCT 的计算公式定义为：阈值为  $0.5 \text{ p.e.}$  时的暗计数率与阈值  $1.5 \text{ p.e.}$  时的暗计数率之比：

$$OCT = \frac{(DCR)_{1.5p.e.}}{(DCR)_{0.5p.e.}} \quad (2.2)$$

串扰随 HV 的变化如图 2-7 所示。NDL 的串扰随过电压增加而迅速增加，MPPC 的串扰则始终较低，性能更好。

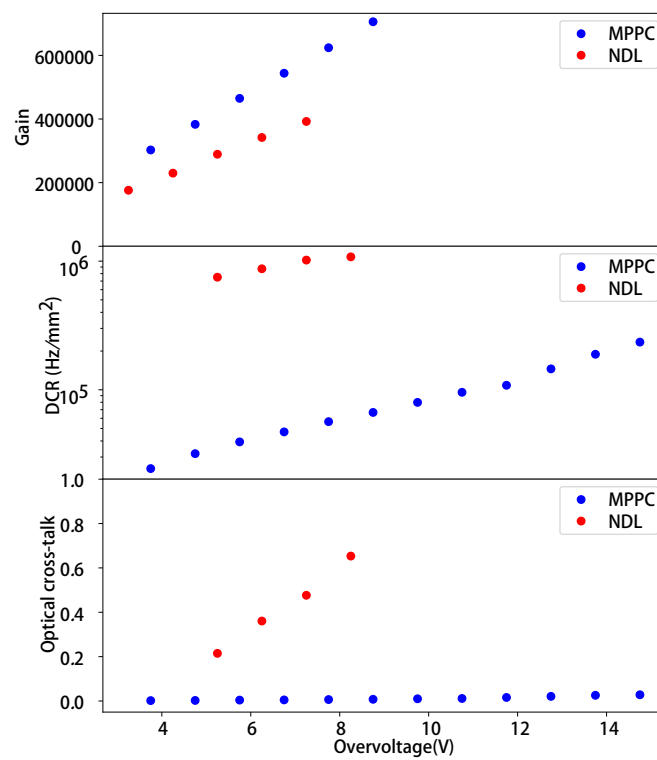


图 2-7 来自不同制造商的 SiPM (MPPC、NDL) 的增益、暗计数、串扰随过电压的变化。

## 2.2 读出电子学的设计和获取系统

本部分介绍了 SiPM 与闪烁体探测器的前端电子学设计，以及在幅度、电荷、时间和效率的测量中使用的数据采集（DAQ）系统。

### 前端电子学

SiPM 正常工作需要几十伏的高压电源，其信号幅度很小，需要在前端进一步放大，我们设计了基于低噪声运放的负反馈电路作为前置放大器<sup>[35]</sup>，同时设计的母板上配备了稳压模块，用于提供运放工作所需的低电压与 SiPM 所需的高压。此外，电源母板可以容纳多个前置放大器子板，可以作为多通道的探测器前端电子学，设计紧凑，如图2-8所示。

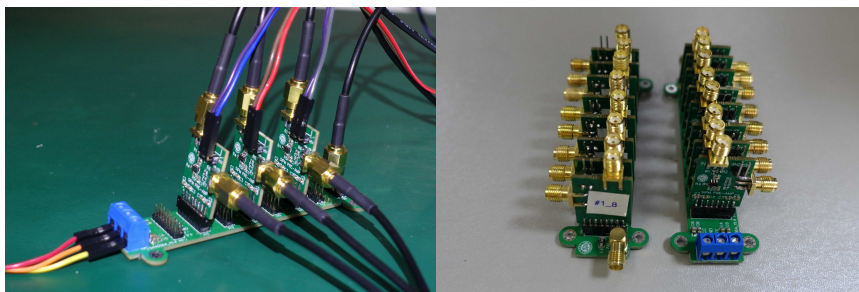


图 2-8 放大倍数为 10 倍的前置放大器与供电母板。如图所示，每个母板可为八个前放提供电源，杜邦线将 SiPM 所需的高压引入，SiPM 信号通过 SMA 接线进入前放，同时由 SMA 输出放大信号。

图2-9为前端电子学的电路图，负反馈的电路形式使其具有良好的增益稳定性和较快的上升时间，通过调节反馈回路的电阻  $R_f$  和  $R_g$  可调节增益，我们将前放放大倍数设置为 +21 V/V，对基本性能进行了测试。

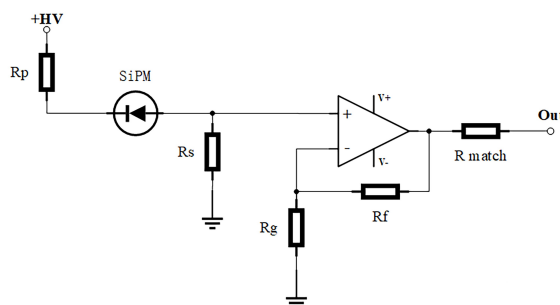


图 2-9 用于 SiPM 负反馈前置放大器原理图。

为了满足粒子物理实验中的高亮度对撞的事例率，还可在前放输出端并联电容电阻作为极零相消电路，信号中的低频分量被衰减，输出脉冲的上升时间和

下降时间会大大降低，从而减少脉冲堆积。图2-10(a)给出了带有极零相消和两级放大电路的原理图。使用探测器信号仿真器 DT5810B<sup>[30]</sup>模拟上升时间约 3 ns 和下降时间约 50 ns 的 SiPM 信号，然后将它们输入到设计的前置放大器，使用泰克 MDO3024 示波器获取前置放大器输入和输出信号的波形，如图2-10(b)所示，红色波形为放大倍数 21 倍的输出波形，绿色波形为添加了极零相消电路的输出波形，幅度有所降低，为了保证增益，可以使用二级放大电路，紫色波形即为二级放大的输出波形，在保持与极零相消电路几乎相同的上升和下降时间的情况下，幅度明显更大。

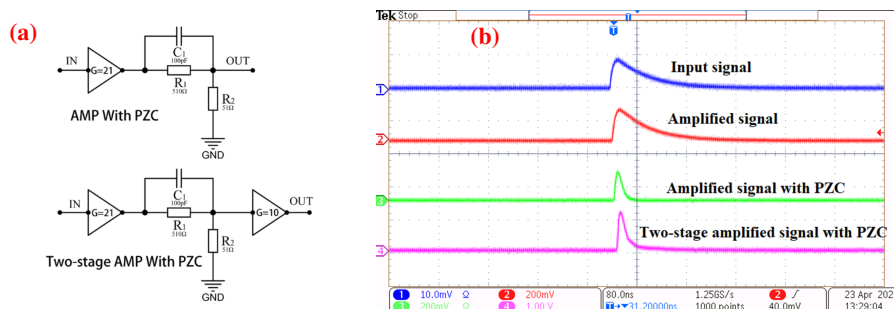


图 2-10 (a) 极零相消电路和两级放大电路；(b) 前放的输入输出信号波形图。

图2-8(a)使用网络分析仪测量了 10 MHz–1 GHz 范围内前置放大器的频率特性，对于 200 mVpp 的小信号，获得了 426 MHz 的  $-3$  dB 带宽，对于 2 Vpp 的大信号，获得了 240 MHz 的  $-3$  dB 带宽。图2-8(b)给出了前置放大器输入输出信号的幅度关系，输入信号为探测器仿真产生的类似 SiPM 输出的脉冲信号。在百毫伏量级的宽动态范围内，输入输出信号之间存在良好的线性关系。当前置放大器上的电源偏压 ( $V_{bias}$ ) 从 2.5 V 增加到 3.9 V 时，输入信号的最大幅度可以从 90 mV 增加到 170 mV，同时保持增益的线性度，动态范围得到提高。图2-8(c)为示波器测量得到的基线，将振幅投影在一维直方图上，呈现的分布由高斯函数拟合，得到  $\sigma = 302 \mu\text{V}$ ，考虑到示波器的输入阻抗，前置放大器的实际噪声电平应为  $\sigma_{noise} = 604 \mu\text{V}$ ，对于闪烁体探测器来说是很低的噪声。在这些测试中，示波器中的带宽和输入阻抗分别设置为 2 GHz 和 50  $\Omega$ 。

## 数据获取系统

SiPM 以及闪烁体探测器的性能测试需要搭建合适的数据获取系统，针对宇宙射线以及激光测试的各种需求，设计了多种数据获取系统 (DAQ)，如图2-12所示，电源母板 (carrier) 可同时为多个 SiPM 提供高压、为前放提供工作低压，宇宙射线通过闪烁体、光纤产生的光或者激光器产生的光由 SiPM 收集，产生的信号经过前置放大器放大，再进入后续 DAQ 进行处理，针对不同需求，不同 DAQ



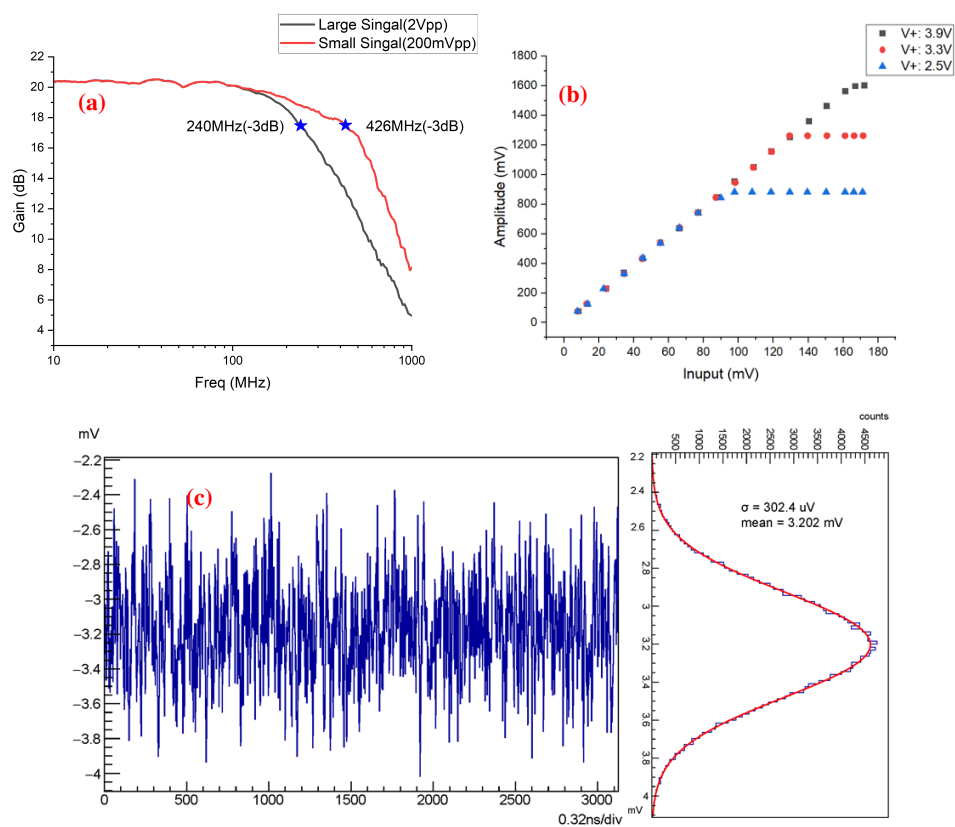


图 2-11 (a) 前放的带宽测试结果。(b) 前放的动态范围。(c) 前放的噪声水平测试结果。

有其优势。

第一种是核物理实验中常用的 NIM 系统,使用到多个电子学插件,由 LEMO 接头的同轴线缆依次连接,其中 N841 是 16 通道的前沿定时器,并且可以设置一定的阈值,去除低于阈值幅度的噪声,输出百毫伏量级的逻辑信号;N405 是能够进行或与非运算的逻辑单元,对多个通道的信号进行符合判选,使用放置在探测器模块上方和下方的闪烁体探测器作为触发,符合为真时,记录为一个事例;N1145 可对信号进行计数。通过这个系统可以进行阈值扫描、效率测量等实验。然而,使用 NIM 模块进行效率时,如果受到电噪声的影响,就可能导致计数错误,并且无法记录每个事例更完整的波形信息,如果要获得时间信息需要定时甄别器等核电子学插件,整个系统组装较为复杂、体积庞大以及造价较高,使用场景有其局限性。

第二种桌面数字化仪,有 8 通道的 DT5725<sup>[36]</sup>和 16 通道的 DT5742<sup>[37]</sup>两种,小巧便携,通过光纤或 USB 连接计算机使用。DT5725 的控制软件为 CAEN 官方提供的 COMPASS,可以实时显示波形、能谱,记录时间、能谱等信息,但带宽只有 125 MHz,采样率 250 MS/s,对快信号的时间测量无法满足要求。DT5742 带宽为 500 MHz,采样率最高可达 5 GS/s,多个档位可调,控制软件为官方的 WAVEDUMP,可以实时显示波形,以设置的采样点数存储触发到的波形幅值,这些数据可以通过后续的离线处理得到所需要的信息<sup>[38]</sup>。

第三种则是直接使用示波器设置触发,通过计算机编写程序读取并存储示波器中的波形信息。该方法简单直接,波形质量取决于示波器的配置,但也受到示波器的通道数限制,一般只有 4-8 个通道,在需要大批量测试的情况下无法满足要求。记录下来的波形数据实时存储在个人计算机上,供后续分析使用。原始数据包括每个脉冲在取样时间点对应的电压幅度,信号波形通过分析可以获取到如基线、幅度、电荷积分、波形半高宽、粒子击中时间等,还可以通过波形形状鉴别过滤噪声或其他来源引起的不良波形,可以提取准确的时间信息。

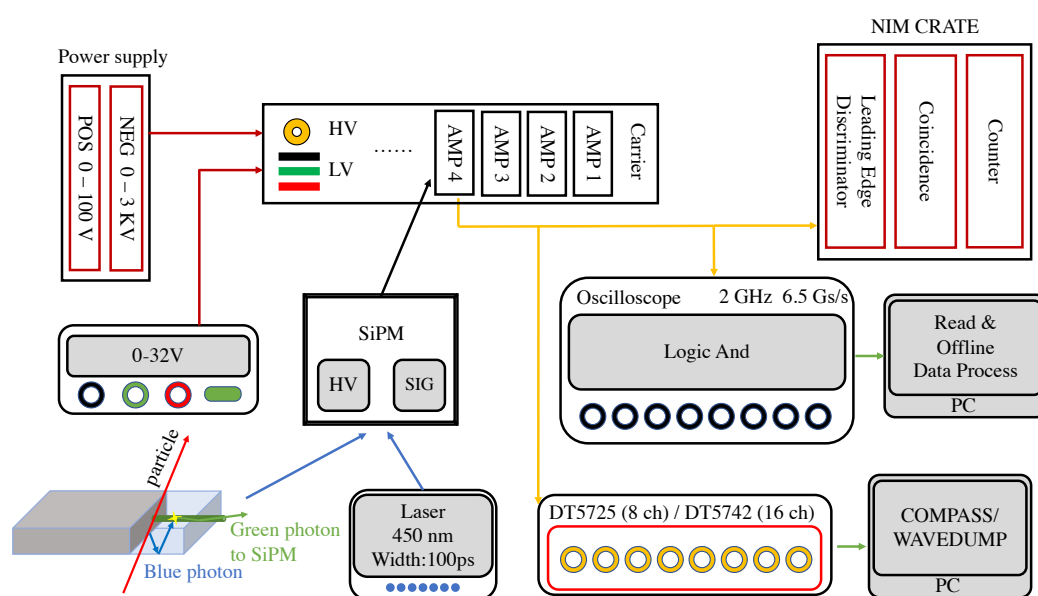


图 2-12 多种数据获取系统示意图。



## 第 3 章 CEPC 缪子探测器的预先研究

### 3.1 闪烁体探测器的主要组成

在 Belle II 实验中使用的闪烁体探测器方案，已经展现出了良好的性能<sup>[25]</sup>，它们在很大程度上符合 CEPC 对缪子探测器设定的严格要求，使用波长位移光纤耦合有机塑料闪烁体技术成熟<sup>[26]</sup>，在未来应用中有很大的潜力，本文采用与之类似的技术，开展 CEPC 缪子探测器的预先研究。

闪烁体的探测器通道的配置如图3-1所示，与 Belle II 实验上 KLM 探测器使用的闪烁体探测器结构类似，它由一根闪烁体条、波长位移光纤与前端电子学读出组成。闪烁体尺寸为  $1.5\text{ m} \times 4\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ，闪烁体条中嵌入了一根波长位移光纤，印刷电路板（PCB）上的 SiPM 通过 3D 打印器件与光纤对齐固定。PCB 上的前置放大器电路是基于德州仪器（TI）公司制造的运放开发的负反馈放大器。长条闪烁体是由北京高能科迪公司使用挤压技术制造的<sup>[27]</sup>。闪烁体条内部有深度约为 4 mm、宽度约为 2 mm 的长凹槽，用于容纳 WLS 光纤。这样的闪烁体长条在缪子探测器中正交排布，可以实现位置分辨  $\sigma_s = \frac{Width}{\sqrt{12}} = 1.2\text{ cm}$ ，满足 CEPC 实验要求。为了实现高探测效率和时间分辨率，本文对 SiPM 的选择、光纤类型和光收集提升方法进行了全面研究，测试了来自 Kuraray 公司<sup>[16]</sup>和圣戈班公司<sup>[28-29]</sup>的 WLS 光纤，对比了新器件实验室 NDL 生产的 EQR 系列 SiPM 和日本滨松公司生产的 MPPC。

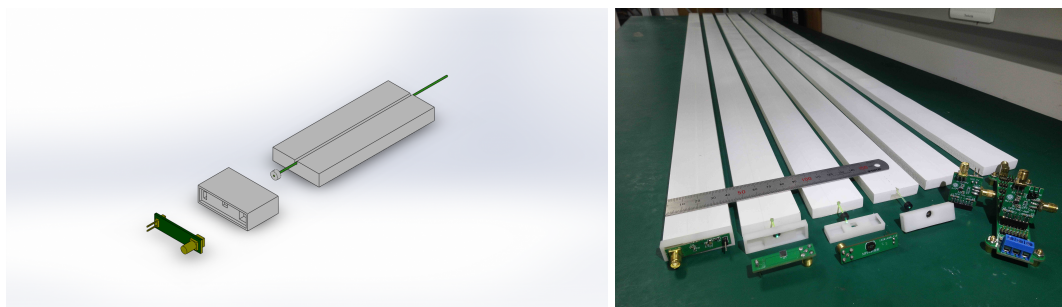


图 3-1 左：一个闪烁体探测器通道的结构示意图。右：组装过程中的闪烁体探测器。

### 3.1.1 闪烁体与 WLS 光纤

闪烁体的衰减长度是衡量其性能的一个重要参数。挤压型闪烁体由于工艺原因，虽造价低，但透明度较低，衰减长度一般较短，本文对高能科迪生产的挤压型闪烁体的衰减长度进行了测量，测试装置示意图见3-2，用信号发生器产生脉冲电压驱动 LED 发光，LED 通过平行放置的闪烁体块后，用 SiPM 探测衰减后的光强度，闪烁体块之间用光学胶耦合，减少由空气间隙带来的光衰减因素。光强度可以用一段时间内探测到的事例数（Entries）乘以 SiPM 的激活像素数的平均值（ADC mean）来表示，改变闪烁体层数，可得到光强随光穿越闪烁体路径长度变化的衰减曲线，如图3-3。用指数衰减函数拟合后得到衰减长度为  $(6.4 \pm 0.3) \text{ cm}$ ，由于这里使用的闪烁体是多块闪烁体贴合组成的，在每个界面都会有一定的光损失，因此测量得到的衰减长度是偏小的。

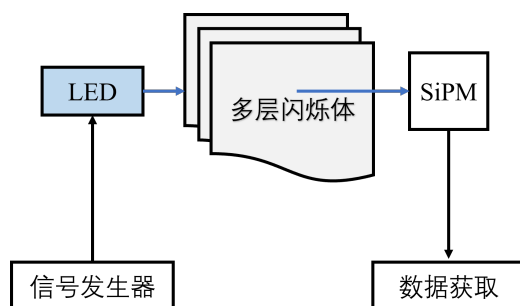


图 3-2 挤压型闪烁体的衰减长度测量装置。

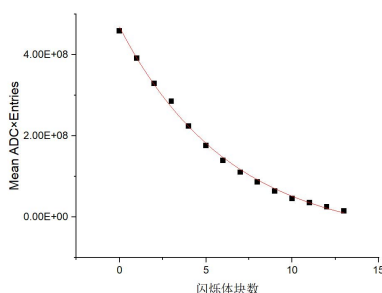


图 3-3 挤压型闪烁体的衰减长度拟合结果。

为了能在闪烁体尾端也实现较好的光收集，通常需要在短衰减长度的挤压式闪烁体中嵌入波长位移光纤，从而提高探测效率。当粒子击中闪烁体产生的闪烁光被波长位移光纤吸收，转换为波长更长的光子，满足全反射的光子在光纤内部一直传输到端面，最终由 SiPM 探测到。如图3-4所示，选择的是由圣戈班生产的 BCF-92 光纤和 Kuraray 生产的 Y11(200) 光纤。为了比较这两种 WLS 光纤的光产额性能，将其分别嵌入到同样配置的闪烁体中进行宇宙线测试，通



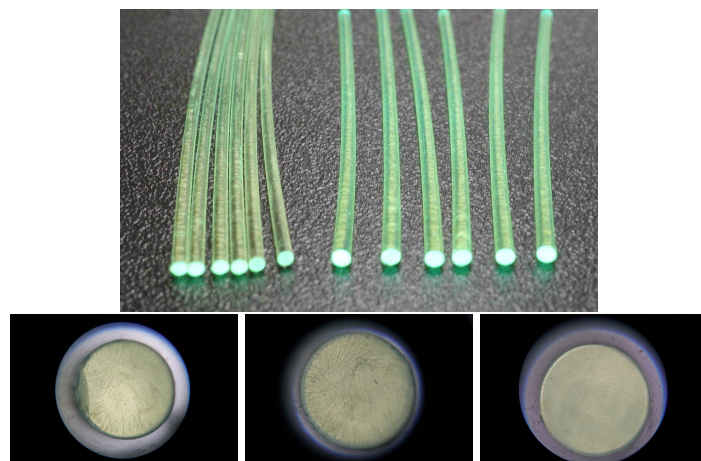


图 3-4 上：用于测试的 WLS 光纤。左侧的六根直径为 1.0 mm 的光纤来自圣戈班，右侧的六根直径为 1.2 mm 的光纤来自 Kuraray。下：分别使用 1000、1500、2000 目砂纸打磨后的光纤端面。

表 3-1 使用不同 WLS 光纤（圣戈班、Kuraray）时 1.5 m 闪烁体探测器的光产额比较。

| 闪烁体探测器 | 圣戈班      | Kuraray  |
|--------|----------|----------|
| 条 #1   | 28315940 | 61247840 |
| 条 #2   | 26237534 | 65786820 |

过对比同样触发条件下得到的光产额来比较。表3-1中的数值是 1 小时内收集到的探测器信号事例数和 ADC 均值的乘积，可用于比较两种光纤的光产额。根据表3-1给出的结果，Kuraray 光纤的光产额为圣戈班光纤的 2.3 倍，部分原因是由于其直径更大，接收并转换闪烁光的表面积更大，也表明相同能量下，Kuraray 光纤的光产额更高。根据其数据手册，Y11(200) 光纤作为蓝光到绿光波长转换器，峰值吸收波长为 430 nm，随后的发射光谱峰值在 476 nm 处，光纤的衰减长度超过 3.5 m。我们感兴趣的是在实际的粒子测量时，闪烁光在耦合光纤的闪烁体探测器内部的有效传递情况，因此使用宇宙线测试了高能科迪生产的挤压型塑闪的有效衰减长度。在章节3.2的宇宙射线测试中，通过测量耦合光纤的闪烁体的不同位置的光产额，并用两个指数衰减函数之和去拟合， $y =$  可以得到有效衰减长度的两个分量为  $(2.63 \pm 0.37)$  m 和  $(5.8 \pm 1.1)$  cm，可以有效保证远端的光收集。

安装到闪烁体探测器中的光纤需要对端面做一些预先处理。对于新截取的一段光纤，依次使用为 1000、1500 和 2000 的砂纸对光纤末端表面进行抛光，使得光纤末端表面相对平坦，增强闪烁光从光纤末端表面出射的效率。在显微镜下可以看到，继续增加砂纸目数对光纤表面光滑度提升不大，因此最终选择 2000 目砂纸打磨即可。日本的 T2K 中微子振荡实验中的 FGD 探测器也用到了 Y11

(200) 光纤, 光纤一端通过真空溅射镀铝形成镜面, 以增加光收集, 镜面通过紫外线胶覆盖形成保护层<sup>[31]</sup>。本文中采用在光纤末端的闪烁体端面覆盖铝箔, 以增加末端的光收集。

### 3.1.2 光收集的改善方法

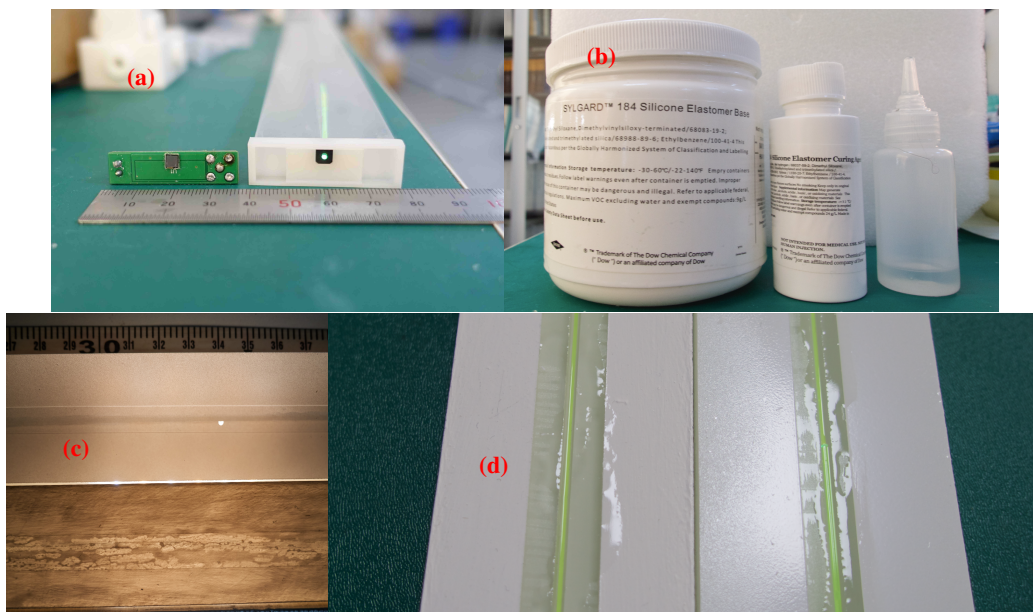


图 3-5 (a)3D 打印的耦合器件, 光纤与黑色圆柱用胶水固定, 机械尺寸使 SiPM 与光纤对齐。(b) 道康宁双组分光学胶。(c) 闪烁体表面使用不同反射层。从上到下为: 聚四氟乙烯 (Teflon) 与二氧化钛。(d) 光学胶添加到光纤槽中, 与闪烁体耦合。

为了确保闪烁体探测器良好的光收集以实现高探测效率, 可以采用各种技术, 如添加反射层、使用光学胶和采用耦合固定部件等方法。在 Belle II 实验中发现, 由于光纤端面的漫反射传输, 光纤与 SiPM 之间的靠近程度影响了约 37% 的光子收集。在本研究中, 参考 Belle II 实验中使用的耦合装置, 设计了一个结构简单、对齐良好且稳固的 3D 打印连接件, 可连接固定 WLS 光纤和 SiPM, 如图 3-5(a) 所示。使用连接件后的耦合稳定性提高, 直接提高了探测器的效率, 图 3-6(a)(b) 分别展示了 NDL 和 MPPC 使用连接件前后的宇宙线信号幅度谱对比, 信号幅度平均值均有所提升, 因此本项研究中所有的 SiPM 均采用连接件与闪烁体进行耦合。NDL EQR15 11-3030D-S 具有  $3.0\text{ cm} \times 3.0\text{ cm}$  的大光敏面积, 是 MPPC S13360 的五倍左右, 因此 MPPC 使用连接件后光收集改善程度比 NDL 更高。

除了耦合连接件, 闪烁体由厂商涂布了 Teflon 或  $\text{TiO}_2$  反射层, 使用黑色塑料胶带阻挡环境光 and 不同闪烁体条之间的串扰, 此外, 增加闪烁体条中的光纤和添加铝箔作为反射层也是改善光收集的有效方法, 如图 3-6(c)(d) 所示, 闪烁体

前中后端三个位置的信号平均值由 SiPM 被激活的像素数表示，误差棒大小代表信号幅度谱经过朗道拟合得到的标准差 (std)，使用两根波长位移光纤和添加铝箔反射层都能进一步提高闪烁体的光收集，但由于波长位移光纤成本较高，因此本项研究中闪烁体仅选择使用单光纤与添加铝箔的配置，远端使用铝箔可以增加  $N_{p.e.}$  约 38%。

在以上配置的基础上，使用光学胶在光纤和闪烁体凹槽之间填补空气间隙，可以进一步提高光收集效果。如图 3-5(b)(c) 所示，选用的 DOW 公司生产的的光学胶是双组分液体，按 10 比 1 混合均匀后会在固化后形成柔性弹性体<sup>[39]</sup>。在混合过程中应注意排除产生的气泡，以获得更高的光传输率。图 3-6(e)(f) 分别显示了使用  $\text{TiO}_2$  和 Teflon 反射层的闪烁体，在使用光学胶后，均表现出更好的光收集效果。在涂有  $\text{TiO}_2$  的闪烁体条的测试中，光学胶的使用在条的远端带来了 63% 的显著提升，涂有 Teflon 的条表现出了 30% 的提升， $\text{TiO}_2$  和 Teflon 都是广泛使用并能实现良好光收集的反射层，由于 Teflon 成本更低、更易涂布的优势，因此选用 Teflon 作为合适的反射层，后续由工厂涂布更厚的 Teflon 反射层后，闪烁体探测器有望做到更好的光收集。

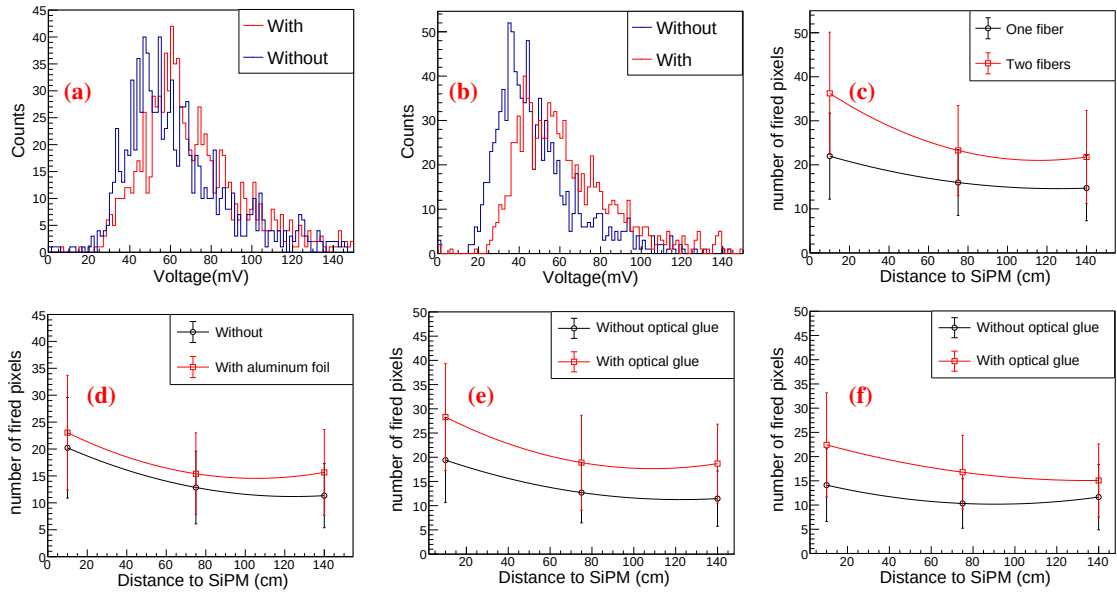


图 3-6 使用各种方法改善前后的光产额对比。图 (a)(b) 是有无 3D 打印连接件的比较，(c) 是是使用单根和双根波长位移光纤的比较，(d) 是有无使用铝箔反射层的比较，(e)(f) 是有无使用光学胶，e 是  $\text{TiO}_2$  反射层，f 是 Teflon 反射层。

## 3.2 多通道原型样机的宇宙线测试

根据对 Belle II 中 KLM 探测器的研发经验，基于挤压闪烁体的缪子探测器研发的关键在于低成本的同时获得来自闪烁体条的良好效率，CEPC 对缪子探测



器的探测效率、时间分辨都提出了一定的要求，本章节将对这些性能进行测试。与图 1-7 所示的 Belle II 的 KLM 一样，一个缪子探测器通常有多层用于带电轨迹探测的模块，将六个探测器通道放在一起形成一个阵列，可以在宇宙射线测试中研究该阵列的性能，如图 3-7(a) 所示。使用两个长度为 10 cm、放置在顶部和底部垂直对齐的短闪烁体条的作为触发 (trigger)，其读出使用的是 4 个大面积 SiPM 并联，具有高探测效率和高时间分辨的特点，6 根长闪烁体重叠放置在中间，移动 trigger 可以探测长条不同位置处的探测效率<sup>[40]</sup>与时间分辨等性能。实验对比了采用 NDL 和 MPPC 时，六根长闪烁体的性能表现，MPPC S13360 和 NDL EQR15 11-3030D-S 选取的工作电压分别为 56 V 和 27 V，SPE 信号的幅度约为 2 mV。图 3-7(b) 展示了来自两个 trigger 和六个长条的典型信号波形。

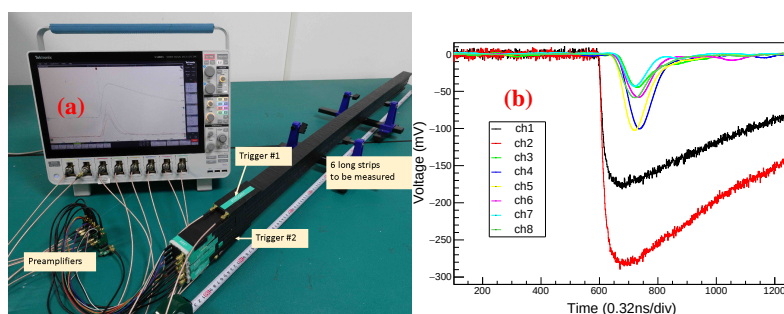
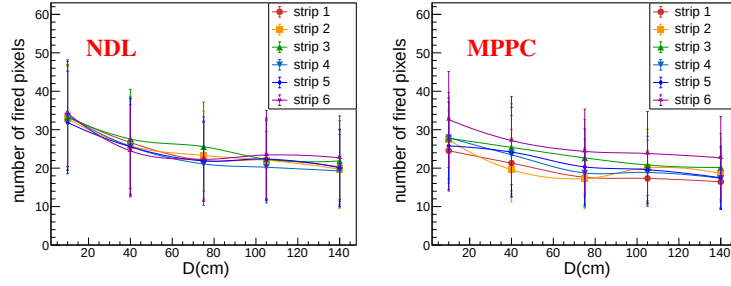
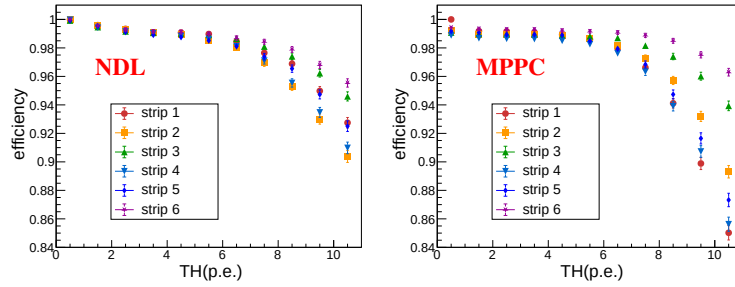


图 3-7 (a) 宇宙线测试装置：包括闪烁体、SiPM、前置放大器和示波器。(b) 8 路闪烁体探测器的典型波形：ch1 和 ch2 是来自 (a) 中的触发器 #1 和触发器 #2，ch3-ch8 是来自六个长条。

与图 3-6 中展示的研究方法类似，通过测量阵列在不同位置的 ADC 分布，然后将其转换为  $N_{p.e.}$  的分布，再使用朗道函数拟合  $N_{p.e.}$  分布，图 3-8 中数据点和误差棒分别给出了朗道函数的均值和标准差。由于闪烁体条各部件之间的耦合质量因制作误差的存在，包括 SiPM 与光纤、光纤与闪烁体之间的耦合，不同的闪烁体长条样本之间性能存在一些差异。采用 NDL SiPM 的六根长条在光子收集方面性能较为接近，而 MPPC 耦合的六根性能差异更大，这是由于 MPPC 光敏面积更小，其光收集受到耦合质量的影响更大。NDL 长条在近端可观察到平均每个宇宙线事例有 34 个  $N_{p.e.}$ ，在远端有 23 个  $N_{p.e.}$ 。在距离 SiPM 大于 75 cm 的位置没有明显的  $N_{p.e.}$  减少，这表明 WLS 光纤的长衰减长度有助于在长闪烁条中实现卓越的探测效率。

针对光收集最差的长条远端，通过测试不同阈值下的探测效率对其性能进行更加详细的评估。如图 3-9 所示，使用 NDL SiPM 的大多数长条在 10.5  $p.e.$  的阈值下的效率超过 90%，与之类似，对于使用 MPPC 的长条，效率在相同阈值水平上超过了 84%。这些结果表明了 NDL 和 MPPC SiPM 在探测器长条远端位置的良好效率。

图 3-8 宇宙射线击中长条不同位置所产生的信号  $N_{p.e.}$  分布。图 3-9 长条远端 (140 cm 处) 的效率随阈值 ( $N_{p.e.}$ ) 变化的分布。

在选定的工作电压下, 根据2-7中的测试结果, NDL EQR15 11-3030D-S 的光学串扰约为 20%, 而 MPPC S13360 的光学串扰约为 1%。为了研究探测阵列的性能, 对比宇宙线击中长条探测器远端位置时给出信号响应的探测器数量。参考 Belle II KLM 中的闪烁体通道的击中信号阈值 8  $p.e.$ , 同时考虑到串扰水平的差异, NDL 和 MPPC 分别选取 9.5  $p.e.$  和 7.5  $p.e.$  的阈值。如图 3-10所示, 对于 MPPC, 90% 以上的宇宙线引发了全部六根长条的信号响应, 对于 NDL, 全部长条都响应的比例占 70% 以上。对于每个宇宙线事例, 如果要求至少有五条长条有响应即记为该事例被探测到, 那么 NDL SiPM 的宇宙线探测效率约为 95%, 而使用 MPPC 的效率约为 99%。因此可以认为, 由多层基于闪烁体-WLS 光纤-SiPM 构建的稳定而紧凑的缪子探测器可以实现非常高的探测效率。

出色的时间分辨率也是利用闪烁体构建缪子探测器的关键优势。Belle 实验并没有考虑使用 RPC 构建 KLM 的时间分辨率性能, 根据 Belle II 复旦组开始的时间刻度工作, 研究了一个探测器通道中可实现的时间分辨率, KLM 目前在端盖区的时间分辨率约为 4 ns, 在桶区约为 8 ns。本文在六根闪烁体长条的宇宙射线测试中, 也研究了探测器通道的时间分辨率。两个触发条使用的是生长型闪烁体, 具有较长的衰减长度, 闪烁体条的端面贴装了四个大面积 SiPM, 该触发系统可获得约 60 ps 的时间分辨率, 关于触发探测器时间分辨的详细介绍在论文第 4 章。在长条闪烁体上下放置触发探测器, 得到此探测器通道信号与触发器

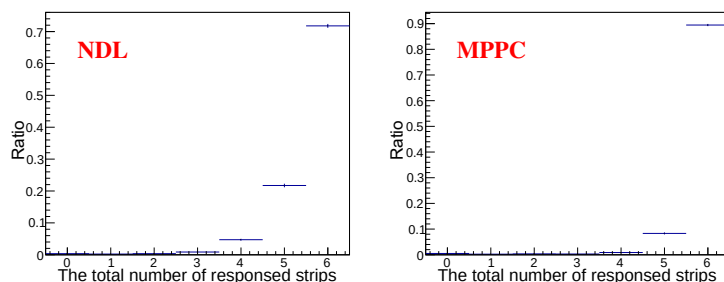


图 3-10 宇宙线击中远端时给出信号响应的探测器通道数量分布。

信号之间的时间差分布谱，分布的展宽表征着时间分辨率。图 3-11 给出了使用 MPPC 和 NDL 的长条在远端位置进行测试的结果，通过对宇宙线信号事例的大小分区，分别对这些事例计算时间分辨，可以发现长条的时间分辨率与收集光子数  $N_{p.e.}$  密切相关。使用 NDL 的长条可以在  $N_{p.e.} > 35$  时实现优于 1 ns 的时间分辨率，而使用 MPPC 在  $N_{p.e.} > 30$  时能达到相似的分辨率。通过增加闪烁体条的光输出或在探测器通道中使用多根光纤和大面积 SiPM，可以实现大  $N_{p.e.}$  下的良好时间分辨率。

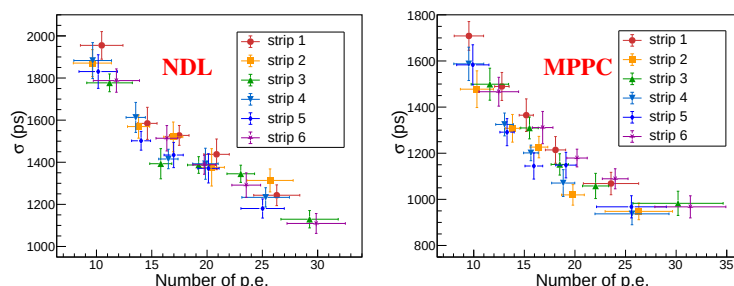
图 3-11 远端的时间分辨率与  $N_{p.e.}$  的关系。

图 3-12 也给出了沿长条不同位置的时间分辨率，NDL SiPM 约为 1.4 ns，而 MPPC 约为 1.2 ns，满足 CEPC 对缪子探测器时间分辨的要求。在远端的位置，时间分辨有变好的趋势，而根据图 3-8，远端和中端由于波长位移光纤衰减长度长，光收集效果变化不大，信号大小也变化不大。这是由于在远端光纤端面外，贴着的铝箔反射层一定程度上贡献了部分反射光子，使远端信号提升，与中端相当，因此时间分辨也有所提升；而中端的反射光子由于增加了总光子到达时间的离散程度，导致时间分辨没有提升；近端由于收集的光子数本身就足够多，因此受反射光子的影响不大。

通过对长条探测器与触发探测器在多个触发位置的信号时间差进行线性拟合，可以得到 Kuraray 光纤中闪烁光子传播速度为  $(16.3 \pm 2.8)$  cm/ns，通过计算可知，使用两种类型的 SiPM 沿着条带的空间分辨率分别为 27 cm 和 21 cm。由

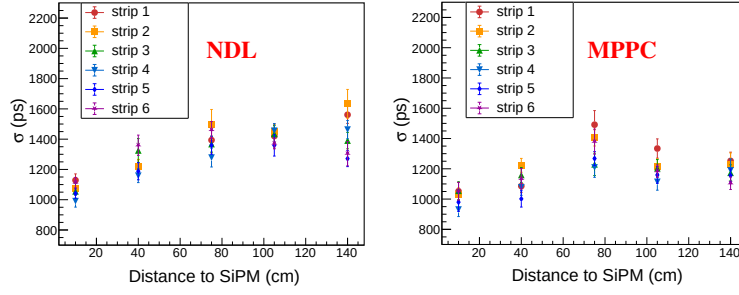


图 3-12 长条的时间分辨率在不同信号大小区间的分布。

于宇宙线在短触发条上的击中位置不确定，也会引入一定的时间分辨，若使用束流测试可以得到更准确的结果，或使用双端读出的方式进行测试，这一方面也在第三章中进行介绍。

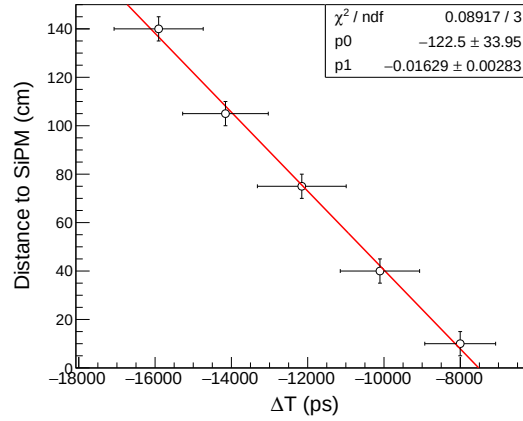


图 3-13 不同位置处触发条与长条的信号时间差，误差棒分别是触发条的长度以及探测器的时间分辨率，通过线性拟合可得到光子在光纤中的传播速度。

### 3.3 小结

本章介绍了针对 CEPC 设计的基于闪烁体的缪子探测器，使用挤压型塑料闪烁体、WLS 光纤和 SiPM 的探测器技术表现出良好的性能。我们设计了用于信号放大的低噪声负反馈前置放大器，选用了来自 GNKD 公司生产的闪烁体，来自 Hamamatsu 公司和 NDL 的 SiPM，以及来自 Kuraray 和 Saint-Gobain 公司的 WLS 光纤。在研究了不同 SiPM 的性能后，选取合适的 SiPM 型号，并通过设计一个耦合组件来固定 WLS 光纤并将其安装到 SiPM 上，以增强闪烁体、WLS 光纤和 SiPM 之间的耦合以提高光子收集。对比了  $\text{TiO}_2$  和 Teflon 作为反射层的效果，发现 Teflon 的表现已经达到预期。我们的研究表明，长条状的闪烁体表现出超过了 90% 良好探测效率，与 Belle II KLM 端盖闪烁体所用探测器的效率达到



相同的水平<sup>[15]</sup>，且具备优于 2 ns 的时间分辨率，这一技术可成功应用于 CEPC 缪子探测器的构建。

# 第 4 章 针对 Belle II 实验 KLM 系统升级的研究

## 4.1 KLM 系统升级计划

在 高能 粒子 探测 中，精 确 测量 中 性 强 子 的 四 动 量 很 困 难。因 为 它 们 不 带 电，无 法 通 过 激 发、电 离 等 手 段 测 量 飞 行 径 迹，通 常 用 强 子 量 能 器（HCAL）进 行 测 量，但 强 子 簇 射 的 成 分 非 常 复 杂，有 能 量 泄 露，因 此 HCAL 实 际 上 很 难 精 确 测 量 强 子 簇 射 的 沉 积 能 量。

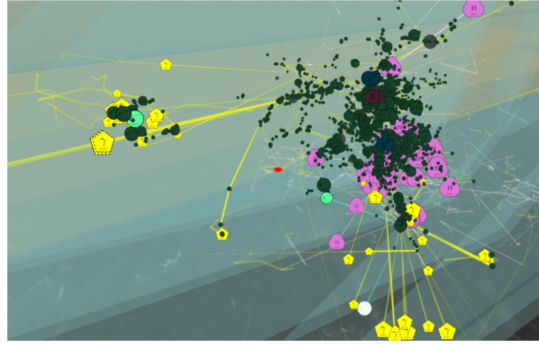


图 4-1 Belle II VR 中的  $K_L$  簇射。

升级计划中，桶部 13 层 RPC 将被替换为闪烁体探测器，可以更好地提供缪子径迹测量和  $K_L$  介子探测的信息，对于  $K_L$  介子在钨铁层或 ECL（部分泄漏到 KLM 的簇射）的强子簇射进行精确的飞行时间（ToF）测量，确定强子从对撞点区域到 KLM 探测器的飞行速度，然后与 KLM 给出的立体角和粒子鉴别信息结合，从而可以计算中性强子的四动量，这是现有 KLM 无法测量的。新的 KLM 测量四动量的能力将提高物理模式中带有  $K_L$  介子的动量分辨率，例如  $B^0 \rightarrow J/\psi K_L$ 。此外，精确的击中时间测量可以应用于单个一维闪烁体条中中子的探测，以更好地排除会污染  $K_L$  筛选的时域外中子本底。

根据

$$p = \gamma m v = \frac{m c L}{\sqrt{t^2 c^2 - L^2}} \quad (4.1)$$

其中  $t$  是 ToF,  $L$  是簇射与对撞点 (IP) 之间的飞行距离,  $\delta t$  和  $\delta p$  之间的关系为

$$\frac{\delta t}{\delta p} = -\frac{m^2 L^2}{t \cdot p^3} = -\frac{m^2 L v}{p^3} \quad (4.2)$$

假设  $L = 2 \text{ m}$ ,  $\gamma = 3$ ,  $p \approx 1.5 \text{ GeV}/c$ , 如果实现了  $\delta t = 100 \text{ ps}$  的时间分辨率, 我们可以得到  $p = 0.19 \text{ GeV}/c$ , 动量分辨率为  $\delta p/p \approx 13\%$ 。要精确测量中性强子的时间  $t$ , 必须测量飞行开始和停止时间。开始时间分辨率小于  $32 \text{ ps}$ , 主要由  $e^+e^-$  对撞时间测量决定; 停止时间将由新的 KLM 对强子簇射的击中中进行高时间精确度的测量。

## 4.2 飞行时间计数器的技术路线

### 4.2.1 BESIII 实验的 TOF 系统

基于塑料闪烁计数器的飞行时间 (TOF) 探测器系统一直是对撞机探测器中粒子识别的非常强大的手段。除了识别带电粒子的种类外, TOF 系统还可以提供快速触发信号。例如北京谱仪 III (BESIII) 为了带电粒子的鉴别, 考虑了紧凑设计的可用空间、所需的立体角覆盖范围、成本和技术复杂性, 使用塑闪搭建桶部双层和两个端盖单层的 TOF 系统。

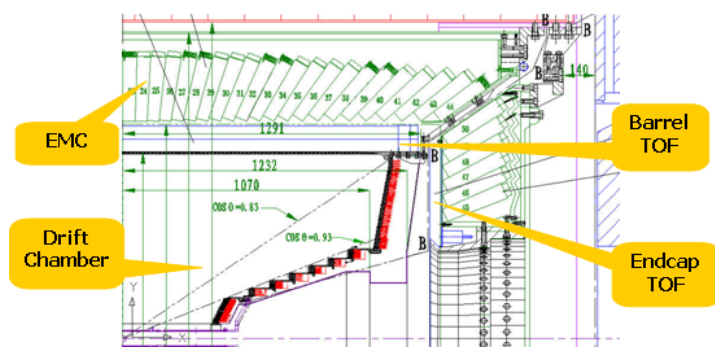


图 4-2 BESIII 实验中的 TOF 探测器。

BESIII 实验的 TOF 系统位于 CsI 晶体组成的电磁量能器 (EMC) 和主漂移室 (MDC) 之间, 剖面图如图4-2所示, MDC 和 EMC 之间为双层桶部计数器预留的径向空间为  $11.5 \text{ cm}$ , 间隙为  $0.5 \text{ cm}$  ( $0.81 \text{ m} < r < 0.93 \text{ m}$ )。TOF 桶部部分为两层, 每层有 88 个塑料闪烁体计数器 (BC-408), 两层交错排列。端盖单层的 TOF 计数器放置在两个 MDC 端板的外部。桶部极角覆盖范围为  $|\cos\theta| < 0.82$ , 端盖覆盖范围为  $0.85 < |\cos\theta| < 0.95$ 。桶部和两个端盖之间留有小的死区间隙, 以允许 MDC 的机械支撑结构和线缆穿过。桶部闪烁体长条的长度为  $230 \text{ cm}$ , 长条截面为梯形, 厚度为  $5 \text{ cm}$ , 两个 PMT (Hamamatsu R5924) 分别连接到闪烁体的两端, 并通过  $1 \text{ mm}$  厚的透明硅胶 (BC-634A) 耦合。PMT 的长度为  $5 \text{ cm}$ , PMT

组件的总长度为 10.3 cm，包括底座和前置放大器。两个端盖 TOF 各由 48 个排列在圆形层中的梯形闪烁计数器 (BC-404) 组成。闪烁体厚 5 cm，长 48 cm，其顶部宽度为 10.9 cm，底部宽度为 6.2 cm。闪烁体的内侧端面被切割成 45°，用来将光反射到光电倍增管，R5924 PMT 就安装在闪烁体面向 45° 切割面的外侧表面上<sup>[20]</sup>。桶部采用圣戈班的 BC-408 闪烁体是因为它的衰减长度较长，而端盖闪烁体较短，牺牲一部分衰减长度的优势，但可以获得更大的光输出和更快的时间响应。

桶部 TOF 的双层设计，使用两层闪烁计数器对粒子飞行时间进行两次独立测量，不仅可以提高系统可靠性，还提高了时间分辨率，可以显著扩展系统的物理能力。双层闪烁体的本征时间分辨理论上是单层的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ，但系统中还有影响时间分辨率的其他因素。BESIII 实验中所用的 TOF 时间分辨得到了充分的研究：“本征”时间分辨率是由闪烁光的上升时间、光子到达 PMT 的时间波动以及 PMT 的渡越时间决定。对于 1 GeV 的缪子，实验测量桶部单层闪烁体的本征时间分辨约为 80 ~ 90 ps。TOF 计数器的本征时间分辨率与粒子的类型及其动量有关，缪子的时间分辨率优于 K 介子和  $\pi$  介子。考虑到包括束流测量的不确定性、电缆引起的抖动、读出电子学的时间分辨等因素，单层 TOF 可实现的总时间分辨为 100 ~ 110 ps，双层总时间分辨为 80 ~ 90 ps。

### 4.2.2 NA61/SHINE 实验的 TOF 系统

位于 CERN 超级质子同步加速器 (SPS) 的 NA61/SHINE 是一个粒子物理实验，有两个物理目标：研究加速器中强子-质子、强子-核和核-核碰撞中的强子产生，进行强相互作用物理学的测量；改进长基线中微子振荡实验中初始中微子束通量计算的测量，以及更可靠的宇宙射线空气簇射模拟。它于 2009 年用强子束进行物理取数，于 2011 年用离子束取数。飞行时间计数器分为三部分，左右两侧的 ToF-L、ToF-R 和前向的 ToF-F。ToF-F 由 80 个垂直方向的闪烁体条组成，如图 4-3。这些闪烁体条经过测试后以 10 个为一组安装在独立模块上，其中一半放置在探测器的左侧，一半放置在探测器的右侧。每个闪烁体的尺寸为  $120 \times 10 \times 2.5 \text{ cm}^3$ 。它们之间以 1 cm 的尺寸重叠交错，以确保 ToF-F 几何接收上的完全覆盖。每个闪烁体条的两端均使用 2 英寸光电倍增管 Fast-Hamamatsu R1828 进行读出，总共 160 个读出通道。闪烁体是塑料闪烁体 (Bicron BC-408)，鱼尾型 PMMA 光导粘在两端进行光收集，闪烁体条和光导均用铝箔包裹，并用黑色塑料箔和胶带覆盖，PMT 和光导之间有直径相匹配的 3 mm 厚的硅胶圆柱体作为耦合。经测试得到 ToF-F 探测器中的闪烁体条独立测量的粒子击中时间之差的分布，分布宽度约为 155 ps，表明单个闪烁体条测量的分辨率约为 110 ps<sup>[21]</sup>。

以上介绍的 TOF 探测器均使用塑闪搭建，耦合光电倍增管作为光读出，但

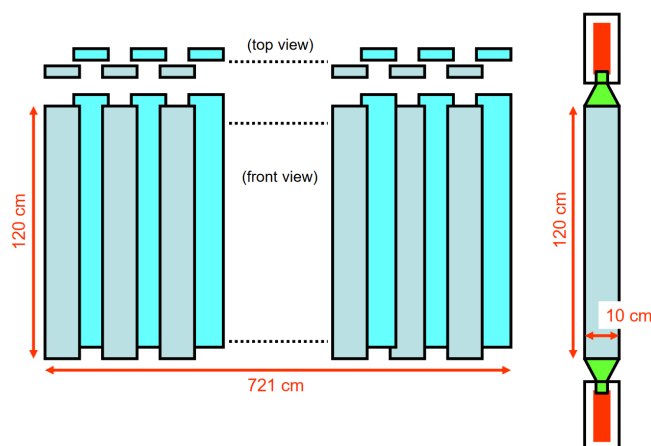


图 4-3 ToF-F 探测器中闪烁体的布局示意图。

这样的闪烁体造价高、PMT 体积大，限制了它的大批量使用。第 3 章给出了带光纤闪烁体加 SiPM 的时间分辨性能，仅能实现低于 2 ns 内的分辨率，可以满足 CEPC 实验对缪子探测器的要求，却不能满足 Belle II 实验中 KLM 系统高时间精度的升级目标。随着 SiPM 的广泛使用，也有使用 SiPM 阵列直接耦合闪烁体作为 TOF 的相关研究，尺寸为  $150\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的 EJ-200，耦合八个面积为  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$  的 SiPM 阵列到塑闪两端，在 CERN 质子加速器使用  $2.5\text{ GeV}/c$  的缪子束流测试，得到了优于 100 ps 的时间分辨，表明了该技术在大型粒子物理探测器的应用前景，如 CERN 质子加速器的 SHiP 实验上的定时探测器和日本 JPARC 的 T2K 实验飞行时间系统的升级<sup>[22]</sup>。以上 TOF 探测器的主要目的都是对带电粒子进行测量，目前还未有过对中性强子四动量的测量先例，本章节的工作目标即将 KLM 探测器升级为闪烁体探测器 TOF 的形式，并且采用国产的高能科迪长衰减长度闪烁体耦合大面积的 SiPM 阵列进一步降低生产成本，在保证光收集的情况下，实现紧凑、高时间分辨的探测器，在这个方案下，有望实现高时间分辨的  $K_L$  和中子形成的强子簇射测量，得到中性强子的四动量。

## 4.3 高时间分辨的闪烁体探测器设计

### 4.3.1 时间分辨的测量方法

#### 定时方法

一个信号事例包含许多信息，而时间信息则是其中重要的一项，时间分析在对时间分辨的性能研究中至关重要。要测量时间分辨，需要准确确定粒子的入射时间。在核电子学中，通常采用定时电路将来自探测器的模拟脉冲信号转化为前沿很快的逻辑脉冲信号，理想的定时信号应该与粒子入射时间严格对应，

但由于探测器信号的涨落、脉冲幅度波形变化以及电子学噪声的发生，会造成定时误差。因此我们需要针对所探测的信号特点选取合适的定时方法。

恒比定时 (CFD) 是一种具有可调恒定触发比的定时方法，可以消除由于波形幅度变化引起的“时间游动”。对于我们所用的闪烁体与 SiPM 组合的探测器输出信号而言，其波形形状基本不变，且使用了低噪声前放，但信号幅度会随收集光子数而发生变化，因此选择采取 CFD 这一定时方法，定时误差较小。目前已经有许多 NIM 或 VME 组件可以用于搭建 CFD 定时的数据获取系统，而这些数据获取系统一般较为冗杂，所需插件、线缆较多，许多时间分辨率较低，根据我们的测试需求，高采样率的示波器和数字化仪已经存储完整的信号波形信息，因此我们直接对波形信息进行分析处理，得到恒比定时的结果。计算机通过 python 程序读取示波器或者数字化仪得到 txt 格式的波形信息，通过高能物理中常用的数据分析软件 root 进行画图、拟合，提取出每个事例的重要信息存储为文件更小的 root 文件，方便后续的处理与分析。图4-4展示了定时处理的方法，黑色散点表示一个存储下来的原始信号波形，点间隔取决于示波器采样间隔，在信号上升沿之前的一段基线被选取后做平均处理，得到信号基线的水平位置，信号峰值与基线之差值即为信号的幅度 ( $A$ )，定时点则定义为波形电压值等于阈值 ( $TH$ ) 时对应的时刻， $TH$  选取幅度按一定比例进行衰减后的值，即  $A \cdot F$ ，这样定时点将恒定位于波形上升沿的固定触发比例 ( $F, 0 < F < 1$ ) 处，不会随波形幅度变化而变化。在上升沿从左到右寻找第一个超过阈值的数据点记为粗定时点，在粗定时点附近进行多项式拟合，即可计算出准确的电压值等于阈值的定时点位置，图中红色曲线是在粗定时点附近进行多项式拟合得到的，蓝色星号位置则是准确定时点的位置。。

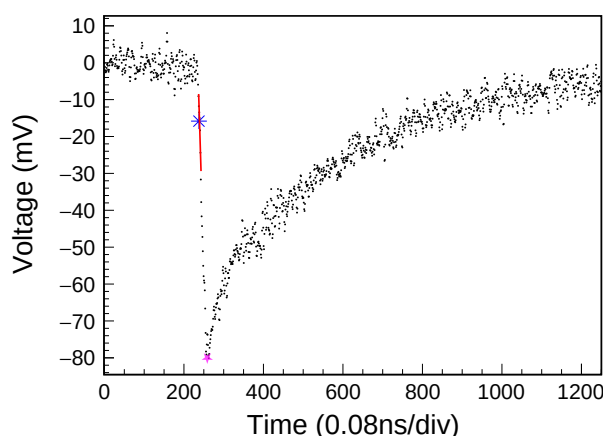


图 4-4 对于采样波形进行 CFD 定时的示意图。

对于不同探测器的信号，适合的触发比有所不同，改变触发比的值，选出可



以获得最佳时间分辨的大小。将来自与同一宇宙线触发产生的两路闪烁体探测器信号做差，经过高斯拟合得到的展宽即表征时间分辨的高低。根据图4-5结果，最终选取了触发比  $F=0.2$  作为后续分析定时的参数。

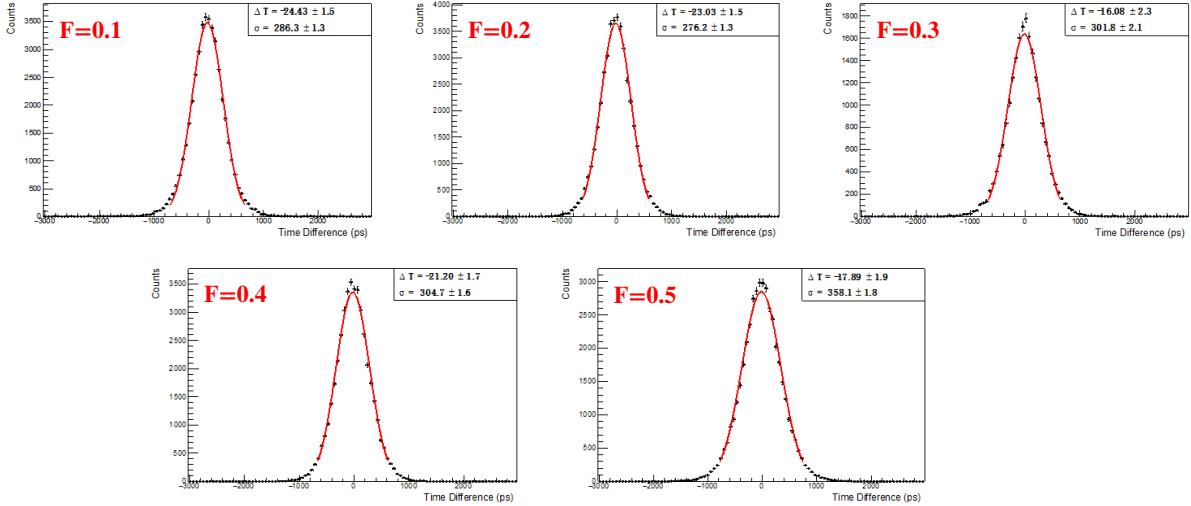


图 4-5 不同触发比得到的时间分辨。F=0.2 时，分辨率最高， $\sigma = 276$  ps。

电子学的时间分辨

闪烁体探测器的时间分辨由几部分组成，包括闪烁体发光和传播的时间分辨  $\sigma_{sci}$ 、SiPM 以及前放等电子学的时间分辨  $\sigma_{ele}$ ，由于本文闪烁体测试信号源选取的是宇宙线，通量有限，累积取数时间较长，而激光器发光频率高，取数快，且脉冲宽度为 100 ps 左右，远低于闪烁体的发光衰减时间，因此先采取激光作为光源，照射 SiPM 得到测试信号，测量激光信号下，SiPM 配合我们设计的前置放大器和数据获取系统能实现的时间分辨率  $\sigma_{ele}$ 。时间分辨受到 SiPM 型号参数的影响而有所不同，光敏面积越大，其电容也就越大，时间分辨也越差。测试的 SiPM 型号及参数见下表4-1：

表 4-1 型号对比

| 厂家   | 型号            | 像素尺寸 (μm) | 光敏面积        | 像素数量   | 端电容 (pF) |
|------|---------------|-----------|-------------|--------|----------|
| NDL  | EQR10-11-1010 | 10        | 1.0×1.0 mm2 | 10000  | 7        |
| MPPC | S13360-1350   | 50        | 1.3 × 1.3   | 667    | 60       |
| NDL  | EQR15-11-6060 | 15        | 6.0 × 6.0   | 160000 | 201.6    |
| MPPC | S14160-6050   | 50        | 6.0 × 6.0   | 14331  | 2000     |

图4-6给出了以上 SiPM 在激光测试下的时间分辨，控制光源远近可以得到

不同范围的信号大小，对数据做出筛选可以得到接收不同光子数时的时间分辨，分辨随接收到的光子数增加而提高。对于 NDL 和 MPPC 两款  $6 \times 6 \text{ cm}^2$  光敏面积的大面积 SiPM 电容更大，在光子数大于 20 时，时间分辨优于 50 ps，光子数大于 70 时，时间分辨优于 25 ps；对于两款光敏面积的更小的 SiPM，电容更小，在光子数大于 5 时，时间分辨优于 50 ps，光子数大于 40 时，时间分辨优于 25 ps。

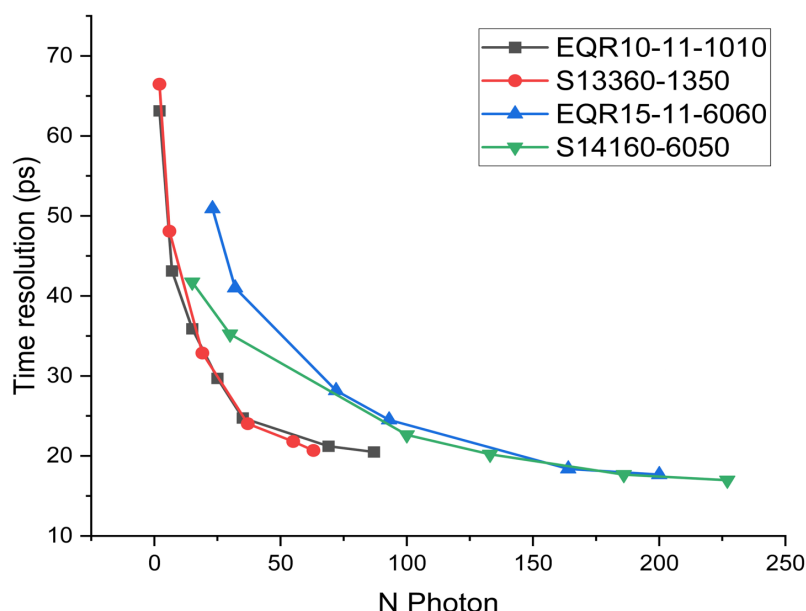


图 4-6 不同型号 SiPM 在皮秒激光光源下的信号经前置放大器后的时间分辨结果。

### 闪烁体探测器的时间分辨

对于闪烁体信号的时间分辨测量，由于闪烁体长度较长，在不同位置的时间分辨有所差异，需要进行分别研究。宇宙线信号采用粒子物理实验中常用的 trigger 探测器进行触发，两个探测器分别放置在被测探测器的上下，其时间的平均值作为宇宙线事例的起始时间。由图4-7所示，将三个 10 cm 长的 trigger 重叠放置，两端均使用 4 个 SiPM 并联的阵列进行光读出，以 1、2、5、6 四个通道的逻辑符合作为触发信号，当四个通道同时有信号时，表明有宇宙线同时击中三个 trigger 时，6 个 SiPM 阵列的信号经过定时分析后得到的到达时间记为 T1-T6。三个 trigger 共六个单端的读出相同，其性能看作相同的，每个单端读出的时间分辨可以记为  $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6$ ，将 trigger1、3 的四端信号到达时间做平均 ( $T_0$ ) 减去中间 trigger2 的两端做平均 ( $T_{short}$ )，得到的  $\Delta T$  是一个常数，与宇宙线击中闪烁体的角度与位置无关：

$$\Delta T = T_0 - T_{short} = \frac{T_1 + T_2 + T_5 + T_6}{4} - \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (4.3)$$

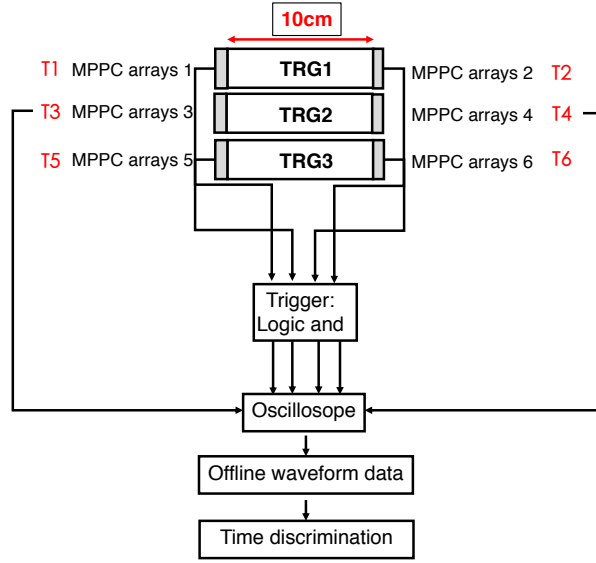


图 4-7 测量 10 cm 长闪烁体触发探测器的时间分辨的示意图。

因此  $\Delta T$  的高斯分布展宽  $\sigma(\Delta T)$  只与每端读出的时间分辨有关：

$$\sigma(\Delta T)^2 = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_5^2 + \sigma_6^2}{16} + \frac{\sigma_3^2 + \sigma_4^2}{4} \quad (4.4)$$

则可以求出每个 trigger 使用双端读出的时间分辨：

$$\sigma_{short} = \frac{\sigma}{\sqrt{2}} \quad (4.5)$$

以及使用两个双端读出的 trigger 组成一组触发探测器时的时间分辨是单个 trigger 的时间分辨除以  $\sqrt{2}$ ：

$$\sigma_{trg} = \frac{\sigma}{2} \quad (4.6)$$

闪烁体使用双端读出可作为飞行时间计数器 (TOF) 是常见的做法，对于使用双端读出的长条闪烁体而言，宇宙线击中位置距离 SiPM 读出越近，输出信号越大，其时间分辨也越高，因此在长条的中间位置获得的双端时间分辨是最差的，可以首先研究长条闪烁体在中间位置的时间分辨性能，如图4-8所示，用类似的方法，两个时间平均值之差  $\Delta T$  为常数，总的时间分辨  $\sigma(\Delta T)^2$  扣除掉 trigger 的时间分辨  $\sigma_{Trg}^2$ ，即可计算出长条闪烁体双端读出的时间分辨  $\sigma_{ToF}$ 。

$$\Delta T = T_0 - T_{ToF} = \frac{T_1 + T_2 + T_5 + T_6}{4} - \frac{T_3 + T_4}{2} \quad (4.7)$$

$$\sigma(\Delta T)^2 = \sigma_{T_0}^2 + \sigma_{ToF}^2 = \sigma_{Trg}^2 + \sigma_{ToF}^2 \quad (4.8)$$

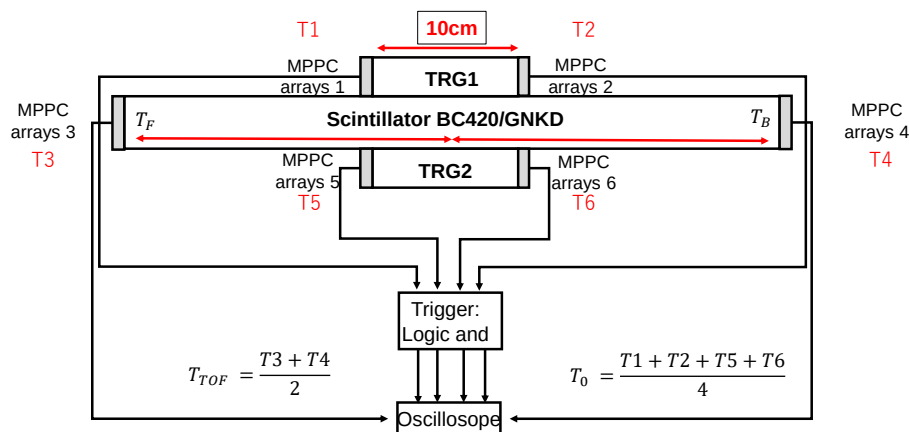


图 4-8 测量长闪烁体在中间位置的时间分辨的示意图。

### 4.3.2 SiPM 阵列的研究

对于去掉波长位移光纤后的闪烁体，SiPM 需要直接耦合闪烁体表面进行光收集，比 PMT 相比，虽然 SiPM 光探测面积小很多，但量子效率更高，多个 SiPM 组成阵列的用法则可以克服这一缺点，且实现更低的工作电压。SiPM 的数量和串联并联的连接方式的选择对时间分辨有很大的影响。本文选取了滨松生产的 S14160 和 NDL 生产的 EQR15 11-6060D-S 进行研究，两者光敏面积均为  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ，图4-9展示了多个 SiPM 串并联的电路板实物图和示意图。4 个 SiPM 阵列与短 trigger ( $10\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ ) 的端面尺寸接近，可以作为合适的光读出。分别将两种 SiPM 按全串联或全并联的连接方式耦合到短 trigger 的端面，如图4-10所示，串联信号的上升时间比并联信号快，但由于串联使端电容减小，增益减小，信号幅度也随之减小。按照上文4.3.1介绍的测量 trigger 时间分辨的方法，将三个相同的 trigger 叠放，计算上下 trigger 时间均值与中间 trigger 时间均值之差  $\Delta T$ ，可以得出每种配置下可以实现的时间分辨结果。图4-11给出了 MPPC 采用串联和并联配置的  $\Delta T$  分布，可见串联时间分辨优于并联，其上升时间变快的影响大于信号幅度略微下降的影响，最终上升时间变快，分辨变好。此外 NDL 四个串联的配置也进行了测量，所有时间分辨结果如表4-2所示。

针对长条闪烁体，本文探索了使用更厚的闪烁体以增加光产额的方法，而更厚的闪烁体则需要通过更大面积的 SiPM 阵列来增加光收集面积，这里选取了常用的圣戈班 BC420 作为测试对象，其发光衰减时间短，衰减长度长，是优秀的超快定时闪烁体类型，尺寸为  $5\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 120\text{ cm}$ ，通过 12 个 SiPM 阵列作为

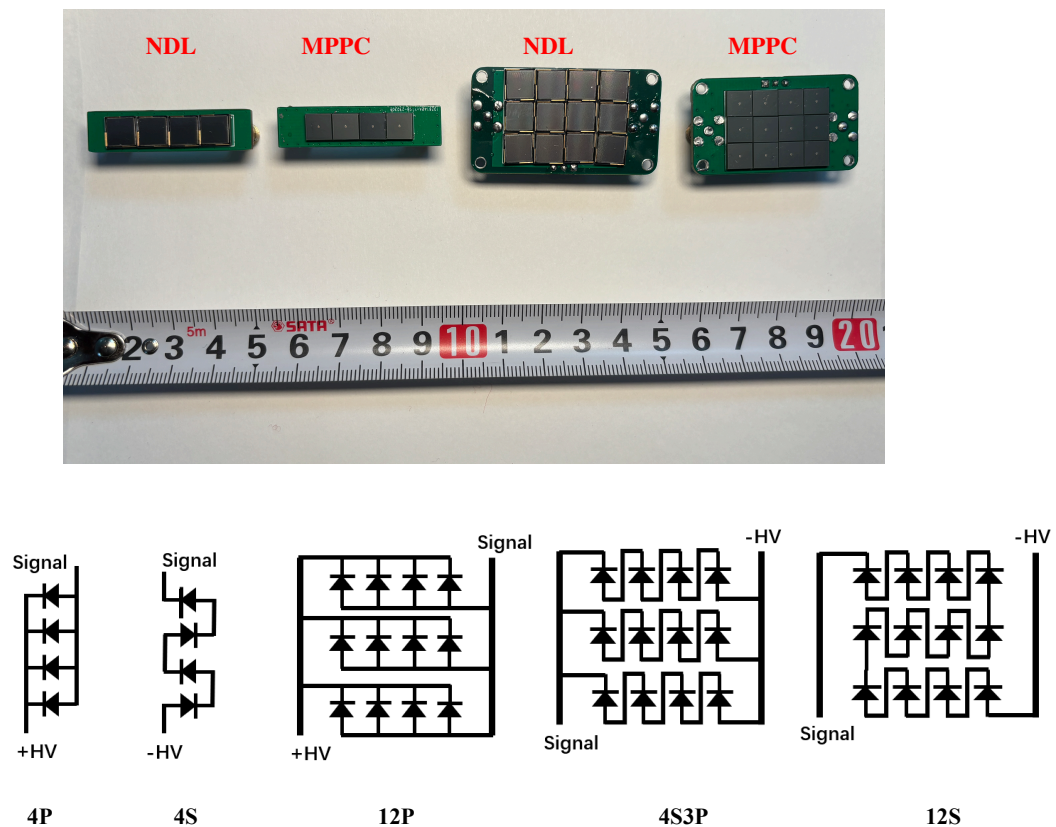


图 4-9 来自 NDL 和 MPPC 的大面积 SiPM。SiPM 阵列采用不同连接方式的示意图。

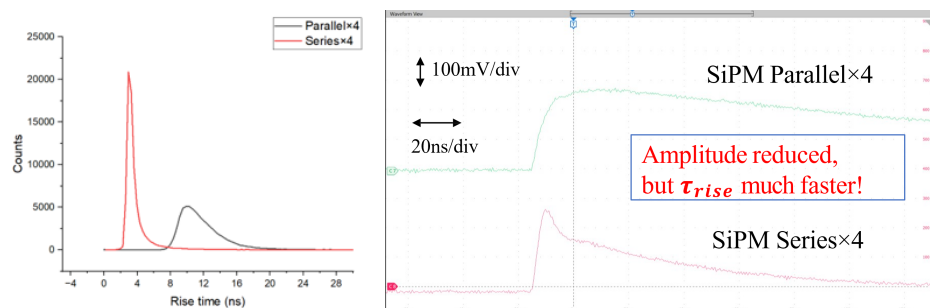


图 4-10 4 个 SiPM 串联和并联的波形对比，串联使上升时间变快，但增益变小，幅度降低。

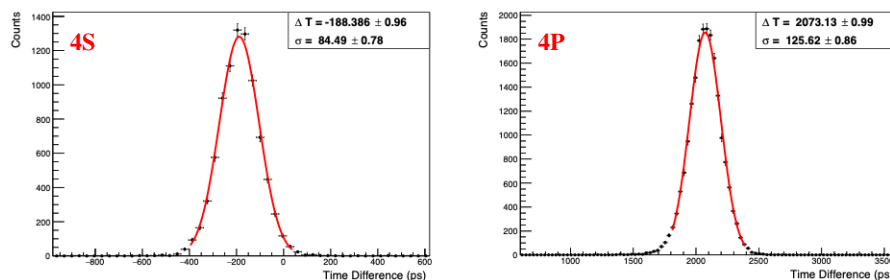


图 4-11 MPPC 分别采用 4 个并联的连接方式时，两个 trigger 的信号时间之差的分布。

表 4-2 不同 trigger 的时间分辨

| 时间分辨 (ps)        | MPPC    | MPPC      | NDL     |
|------------------|---------|-----------|---------|
| SiPM             | 4Series | 4Parallel | 4Series |
| $\sigma_{short}$ | 69      | 103       | 85.6    |
| $\sigma_{Trg}$   | 49      | 73        | 60.5    |

光读出，同样采用4.3.1介绍的测量方法，比较了全并联（12P）、全串联（12S）、4个并联的 SiPM 组成三个并联支路（4S3P）这三种连接方式，图4-12给出了三种信号的波形，串联成分越多，上升时间越快，但幅度会更小，总体来看 4S3P 分辨最好，这是由于 12S 相比于 4S3P 上升时间提升由 4.1ns 到 4ns，变化并不大，但 4S3P 在保证上升时间较快的前提下也能拥有较大的信号幅度，信号由 SiPM 到前放的路径更短，因此分辨最好，高压的增加能提高 SiPM 的增益有利于提高时间分辨，但也会使电子学噪声变高，因此三种 SiPM 阵列的时间分辨随高压的增加均呈现先提高再降低的趋势。

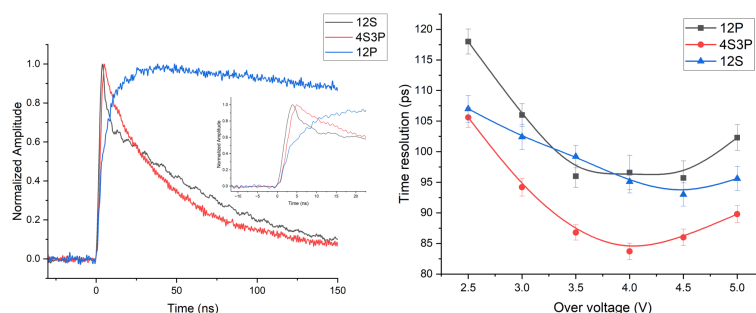


图 4-12 12 个 SiPM 使用不同的串并联连接方式。改变高压会影响时间分辨。

### 4.3.3 光导的使用

对于 BC420 端面尺寸来说，要得到好的光收集，有两种方法，一是是使用光导将大的端面转换为较小的端面，另一种使用 SiPM 阵列对端面进行全覆盖的



光收集，但这会带来更高的成本，本文对这两种方案进行了比较测试。定制的楔形光导材料是浇铸工艺制成的有机玻璃 PMMA，如图4-13所示，光导一端端面通过硅油与 BC420 端面耦合，另一端端面大小为  $28\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ ，可以与 4 个 SiPM 阵列充分对接，光导的其他表面用铝箔包裹作为反射层，尽可能增加光收集。直接耦合的方案采用了 12 个 SiPM 并联的阵列作为读出，覆盖约 22% 的闪烁体端面。将 trigger 放置在中间位置，对时间分辨性能进行测量。对于高能科

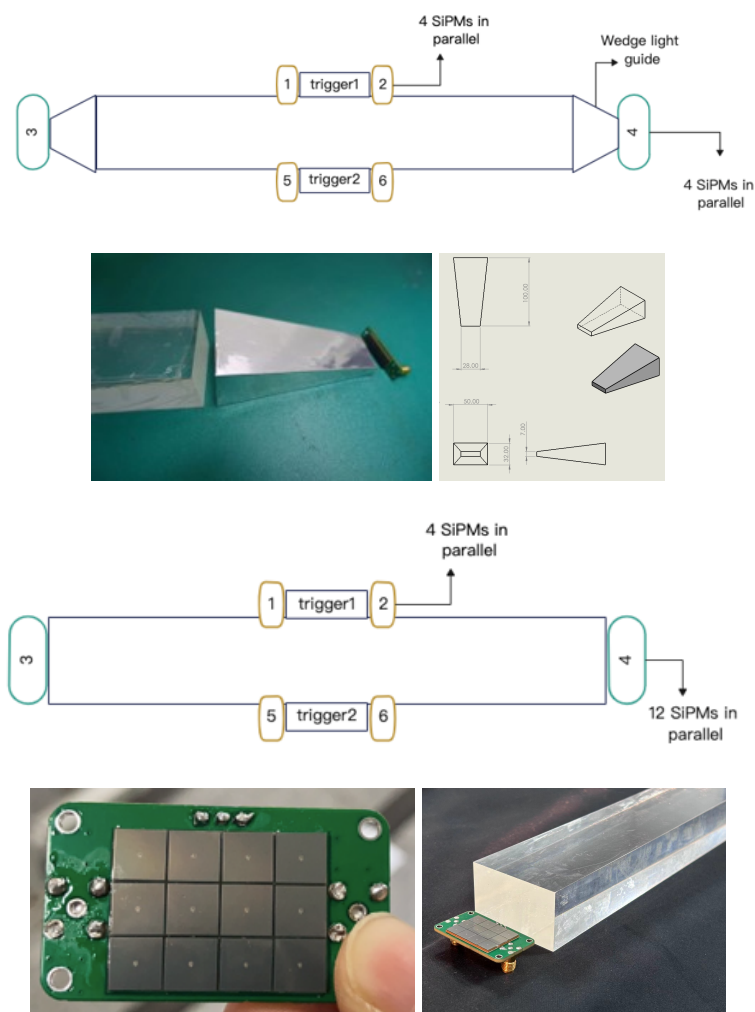


图 4-13 BC420 尺寸为  $5 \times 4 \times 120\text{ cm}^3$ ，端面采用连接光导的方式读出，和采用耦合 12 个 SiPM 读出。

迪  $150\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  的尺寸，为了与 4 个 SiPM 阵列更好地耦合，将两端加工成楔形，最终光输出的端面也为  $28\text{ mm} \times 7\text{ mm}$ ，如图4-14所示。

根据4.3.1介绍的时间分辨测量方法，拟合图4-15所示的 trigger 与 BC420 信号时间差分布，对比发现使用 12 个 SiPM 直接耦合分辨更高， $\sigma = 113\text{ ps}$ ，再计算得出 BC420 双端读出的时间分辨为  $87\text{ ps}$ ；使用光导时  $\sigma = 181\text{ ps}$ ，计算双端

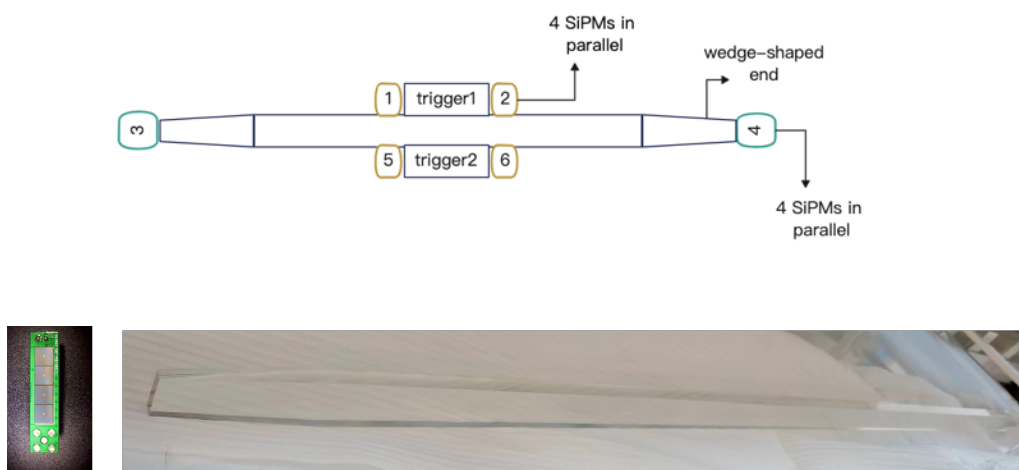


图 4-14 高能科迪闪烁体两端加工成楔形测量时间分辨。

读出的时间分辨为 165 ps。此外使用 12 个 SiPM 读出得到的信号幅度平均值远大于使用外接的光导，由此可知对于尺寸较厚的闪烁体，添加外接的光导对光收集的提升有限，使用更大面积的 SiPM 阵列可以更有效地增加光收集，提高时间分辨。

在此基础上，我们计算了 BC420 耦合 12 个 SiPM 的位置分辨率，通过信号到达闪烁体端面的时间与闪烁体内光速的信息可以推算信号击中闪烁体的位置，通过 BC420 单端与 trigger 时间之差 ( $\frac{T_2+T_6}{2} - T_4$  或  $\frac{T_1+T_5}{2} - T_3$ ) 的分布可以得出单端时间分辨，则位置分辨为  $\sigma_{spa} = \sigma \times \frac{c}{n} = 3.4 \text{ cm}$ ，其中  $c$  表示光速， $n$  表示闪烁体折射率， $\sigma$  表示单端时间分辨。

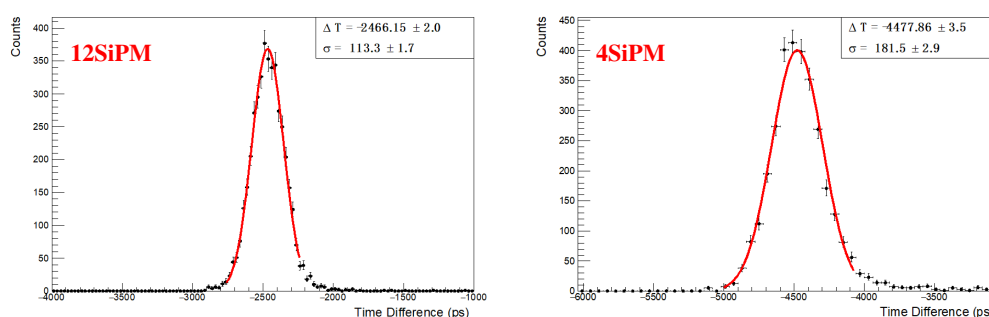


图 4-15 BC420 两种耦合方式的时间分辨对比。

图4-16给出了高能科迪两端加工成楔形的时间分辨结果， $\sigma = 240.5 \text{ ps}$ ，如果对事例进行筛选，仅看信号幅度大于 60 的事例，拟合得到  $\sigma = 168.7 \text{ ps}$ ，再计算得出双端读出的时间分辨为 152 ps。与 BC420 87 ps 的时间分辨对比有一定差距，这是由于高能科迪闪烁体更长，衰减长度更小，导致中间位置的信号到达两

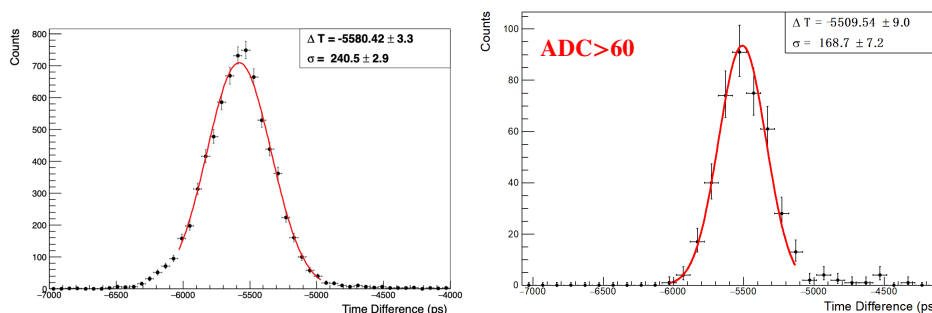


图 4-16 GNKD 加工成两端楔形的时间分辨结果。

表 4-3 测试用闪烁体尺寸

| 闪烁体    | GNKD_1 | GNKD_2 | GNKD_3 | BC420 |
|--------|--------|--------|--------|-------|
| 长 (cm) | 150    | 100    | 150    | 120   |
| 宽 (cm) | 4      | 4      | 4      | 5     |
| 高 (cm) | 1.5    | 2      | 2      | 4     |

端时衰减更多，高能科迪也在根据我们的测试结果不断提升闪烁体性能，前后推出了多个尺寸型号的长条闪烁体。

#### 4.3.4 具有长衰减长度的闪烁体

本文对高能科迪多个批次和尺寸的长条闪烁体性能给出了测试结果，将上下两个 trigger 放置在不同位置，计算 trigger 时间与中间待测长闪烁体之间的时间差，可以得到长条单端时间分辨，同时也可以信号幅度的平均值衡量不同位置的光收集效果，其中 BC420 作为常用的闪烁体，其测试结果作为一项参考。测试所用闪烁体的尺寸在表 4-3 中给出，图 4-18 左图为不同闪烁体在不同位置的信号幅度对比，右图为不同闪烁体在不同位置的单端时间分辨对比。高能科迪第一批与第三批尺寸一致，但可以荧光物质的配比进一步调整，时间分辨也因此提高；第三批闪烁体中，有对表面进行了抛光处理，以提升表面反射率，增加光衰减长度，与同一批没有进行抛光处理的闪烁体对比可以看出，抛光使光收集全面改善，时间分辨在远端得到提高，但在近端却变差，这是由于近端本身的光收集大部分并不是来源于反射，其信号大小也足够保持较高的时间分辨，但反射成分增加后使到达 SiPM 的信号时间涨落更大，因此分辨变差。第二批闪烁体长度为 100 cm，其光产额比 BC420 高，且时间分辨也更高，因此后续选择这一批闪烁体测量其双端读出的时间分辨。

在对中间位置的闪烁体双端读出的的时间分辨测试后，需要进一步测量其他非中心位置的时间分辨性能，两端的读出时间分别记为前端  $T_F$  和后端  $T_B$ ，信

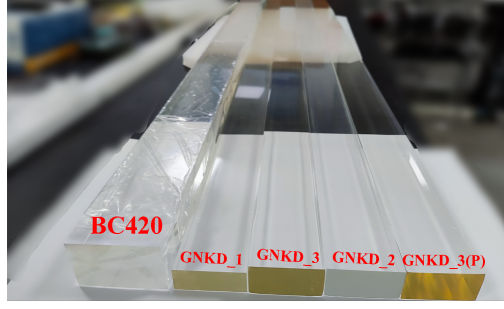


图 4-17 BC420 与不同批次尺寸的 GNKD 闪烁体。

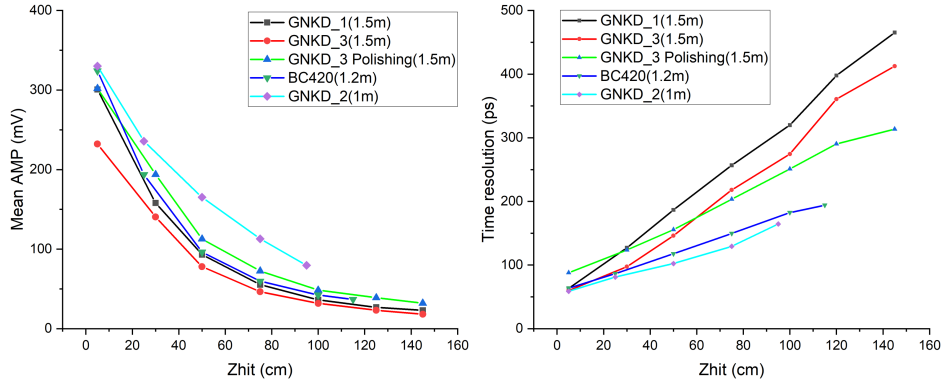


图 4-18 不同批次与尺寸的 GNKD 闪烁体，在不同位置的光收集和时间分辨对比。

号击中后，闪烁光到达两端的衰减路径不一样长，信号大小会有差异，各自的单端时间分辨也是不同的，如果仍采取直接平均的方法， $T_{scint} = \frac{T_F + T_B}{2}$ ，则双端总时间分辨  $\sigma_{scint} = \frac{\sigma_F^2 + \sigma_B^2}{4}$ ，比单端读出更差，显然是不合理的，因此采用加权平均法，使得分辨更高的一端对定时时间贡献更大，充分发挥击中位置靠近 SiPM 的信号强度优势，双端读出的总时间分辨也会比单端更好。

$$T_{scint} = \frac{T_F/\sigma_F^2 + T_B/\sigma_B^2}{1/\sigma_F^2 + 1/\sigma_B^2} \quad (4.9)$$

$$\frac{1}{\sigma_{scint}^2} = \frac{1}{\sigma_F^2} + \frac{1}{\sigma_B^2} \quad (4.10)$$

根据4.10误差计算公式，可以通过测量出的单端时间分辨，计算得到理论上的双端时间分辨。图4-19中曲线即为高能科迪 1 m 的闪烁体单端双端时间分辨的值，低于 85 ps，可满足升级目标。BESIII 实验中飞行时间计数器（TOF）桶部单层的本征时间分辨为 80–90 ps，国产闪烁体耦合 SiPM 与 BC408 耦合 PMT 达到相当的水平。除了通过单端测量值来计算双端分辨，也可以直接通过缩短 trigger 的长度来进行测量，这样可以减少由宇宙线击中位置不确定性带来的时间分辨，缺点是严格限制了位置，测量时间过长，因此对只对两个数据点进行测量，图

中4-19绿色数据点即为 50 cm 和 85 cm 处的测量结果，与上述加权平均法所得到的时间分辨吻合。

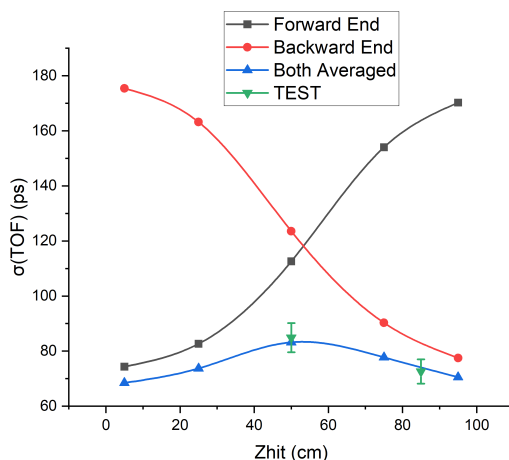


图 4-19 1 m 的 GNKD 闪烁体分别采用单端和双端读出时，在不同位置的时间分辨。

## 4.4 小原型机的宇宙线测试

单根闪烁体已经可以实现满足升级目标的时间分辨，在实际的探测器运行环境中，KLM 桶部探测器共有 15 个， $K_L$  粒子在 KLM 中的簇射会击中多个闪烁体层，结合多个探测器层对击中粒子的测量信息，时间分辨会有更大的提高。我们使用 GNKD\_1 这批闪烁体搭建了一套小原型机，考虑到数据获取系统信号通道为 16，再加上 trigger，因此共设置 6 个 75 cm 的探测器层，以及两个 10 cm trigger，均采用双端读出，如图4-21所示，SiPM 采用 4 个 SiPM 串联作为读出阵列，闪烁体由铝箔包裹作为反射层，再用黑色胶带包裹避光，每层之间通过相同的 3D 打印器件隔开保持固定间距，16 个通道的信号输入到 DT5742 中采集存储。通过测试，这样的 75 cm 长的闪烁体在中间位置采用双端读出的时间分辨为 130ps。



图 4-20 有六层闪烁体探测器的原型样机测试装置实物图。



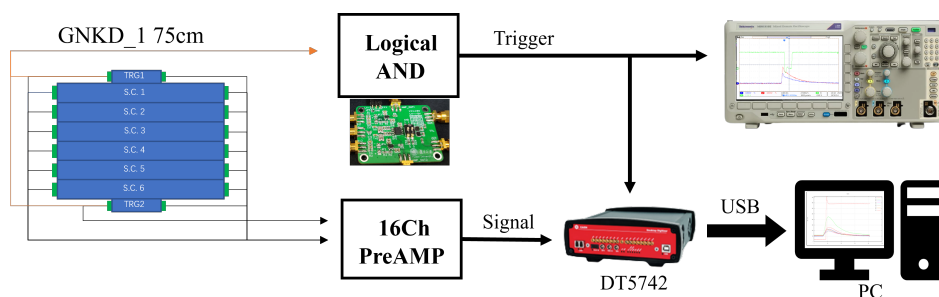


图 4-21 有六层闪烁体探测器的原型样机测试装置。采用双端读出的长闪烁体和 trigger 共有 16 路信号读出，通过 DT5742 进行数据采集。

多通道的时间测量涉及到刻度问题，由于不同通道之间电子学、线缆长度等差异会带来信号的不同延时，导致探测器记录的时刻与真实的事件发生时刻存在一个恒定的偏移量，因此需要利用同一时刻到来的信号进行刻度定标，测出偏移量的大小。本文采用激光对装置进行定标，如图4-22(a)所示，将激光器发出皮秒脉冲的激光作为光源，对齐闪烁体的正中间位置，模拟闪烁光从中间向两端传递的过程，六路激光来自同样的激光器，到达闪烁体的时刻相同，比较可得到偏移量的值，其他配置需要保持与后续宇宙线测试相同。六根长条加两个短 trigger 的装置示意图为4-22(b)，trigger 放置在闪烁体正中间，每个读出按序号记为  $T_1$  至  $T_{16}$ 。

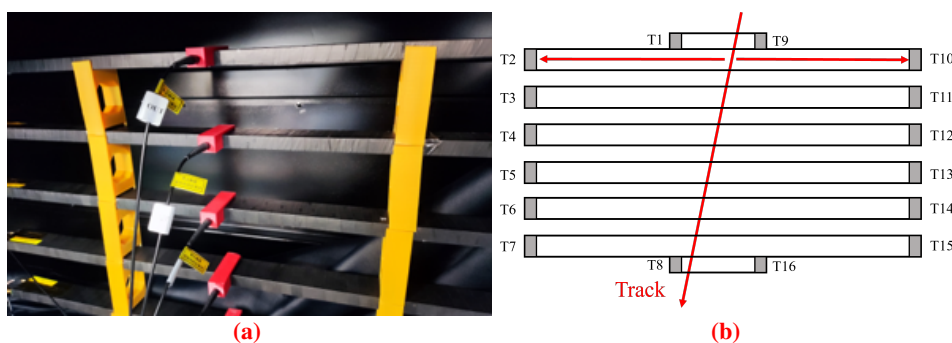


图 4-22 (a) 通过激光进行时间刻度的装置图。(b) 宇宙线测试的示意图。

图4-23是由 DT5442 实时显示的波形采样图，正的方波信号为激光器的触发信号，负脉冲为各通道闪烁体的信号。为了对时间分辨进行精确的测量，需要对 DT5742 进行合适的配置以得到符合要求的采样窗口。以下是配置方式：

- 通过配置文件 XX.txt 可以更改参数；
- 采样窗口设置 200 ns 以保证波形被完整采集；
- 采样率设置为该模式下最高的 1 G；



- trigger 方式：逻辑符合模块的信号作为外部触发。
- Post-Trigger 设置：脉冲之前的基线测量长度，用于计算基线位置。
- 信号基线水平位置设置：根据脉冲极性正负，保证脉冲在测量范围内。

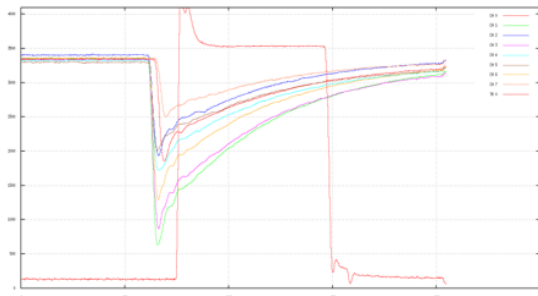


图 4-23 DT5742 采集到的激光的触发信号与多通道 SiPM 的输出信号。



图 4-24 宇宙线测试的装置图。

在对六根闪烁体层定标时，在激光测试下，每根闪烁体长条的时间记为  $T_{scinx}$ ，由闪烁体两端的时间做平均得到，选取第一根长条  $T_{scin1}$  作为参考时间，即  $T_{scin.1} = 0$  ps，与参考时间  $T_{scin.1}$  之差，即为需要刻度的偏移量。通过分析激光测试结果，得到其余五条闪烁体的偏移量： $T_{scin.2} = 27$  ps,  $T_{scin.3} = -70$  ps,  $T_{scin.4} = -56$  ps,  $T_{scin.5} = -111$  ps,  $T_{scin.6} = 68$  ps。

在宇宙线测试时，装置如图4-24，每根闪烁体长条的时间减去需刻度的偏移量  $T_{scinx}$ ，即为准确的时刻。缪子在穿透闪烁体时损失能量极小，飞行速度可视为不变，因此每层闪烁体的定时时刻与闪烁体层的位置高度满足线性关系，如图4-25(a)所示， $\Delta T$  是指每层闪烁体刻度定标后的两端时间平均值与作为参考时间的第一层闪烁体两端时间平均值之差，闪烁体位置间隔 9 cm，通过线性拟合可以得到宇宙线中缪子的平均速度为  $v_{muon} = 0.299582 \pm 0.00011$  mm/ps，图4-25(b)是缪子速度分布谱，误差包含闪烁体探测器的测量精度与宇宙线缪子本身的分布展宽。由速度可计算得出缪子平均能量测量值  $E_{muon} = 2.0 \pm 0.3$  GeV，穿过实

实验室大楼后的缪子能量有一定损失，低于海平面观测到的宇宙射线缪子的平均能量在  $3 \sim 4 \text{ GeV}$ 。

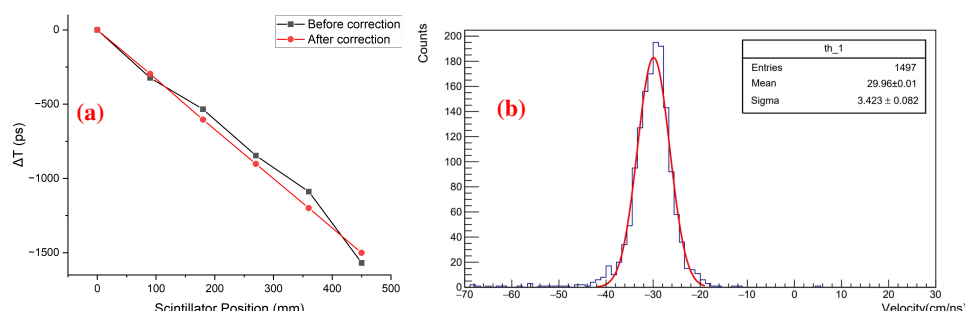


图 4-25 (a): 对每层闪烁体的信号时间进行线性拟合，得到宇宙线中缪子的速度。经过刻度修正后的数据（红色）与修正前（黑色）的数据对比。(b): 宇宙线缪子速度的分布图。

## 4.5 小结

现有的 Belle II KLM 系统中使用的闪烁体探测器时间分辨率在纳秒量级，通过高时间分辨的探测器升级可对中性强子四动量进行测量。我们去掉波长位移光纤，使用了长衰减长度的塑料闪烁体、大面积 SiPM 阵列以及低噪声的读出电子学，显著提高了探测器的时间分辨率。同时，我们还研究了 SiPM 阵列的串并联连接方式、SiPM 工作电压、闪烁体的尺寸、表面抛光等因素对探测器时间分辨率的影响。此外，我们设计了一套时间分辨率达到 50 ps 触发探测器，利用时间符合测量方法测量了长条闪烁体不同位置的的时间分辨率，使 GNKD 闪烁体和 12 个 SiPM 组合可以获得优于 85 ps 的时间分辨率。与 BESIII 实验和 NA61/SHINE 实验使用 PMT 的 TOF 系统相比，SiPM 组合闪烁体同样可以实现百皮秒量级的优秀时间分辨。最后，我们还使用 75 cm 的 GNKD 闪烁体建立了一个六层闪烁体原型机，并测量了宇宙射线的速度，测量结果与经验一致。



## 第 5 章 总结与展望

闪烁体探测器技术，是通过入射粒子损失能量引起闪烁体原子分子激发退激发，发出闪烁光实现对粒子的探测。塑料闪烁体以其高探测效率、高时间分辨、低成本、易加工和稳定等特点，广泛应用于粒子物理与核物理领域，对于 CEPC 的缪子探测器和 Belle II 实验的 KLM 这两个类似的位于最外层且大体积的探测系统来说是很好的选择。塑料闪烁体组合波长位移光纤和 SiPM 近年来得到大规模的应用，相比于传统的光电倍增管，SiPM 作为光电转换器件，有着工作电压低、抗磁场干扰能力强的优势，我们选取了低成本的国产塑闪与 SiPM 进行研发，用于有高探测效率要求的 CEPC 缪子探测器。而波长位移光纤的使用会极大地限制时间分辨，因此我们采取无光纤的方案，用于有高时间分辨性能要求 Belle II KLM 系统的升级计划。我们设计研发的两种闪烁体探测器方案，分别可用于 CEPC 和 Belle II 两个实验，并分别搭建了六层原型样机研究探测器性能，对宇宙线径迹和速度进行了测量。

本文的工作包含以下几个部分：

1、详细测试了滨松 MPPC 和 NDL 生产的两款 SiPM 的增益、暗计数、串扰等性能，设计了针对 SiPM 特点设计的前端电子学和数据获取系统。

2、设计并测试了基于闪烁体-光纤-SiPM 结构的闪烁体探测器搭建缪子探测器的方案，使用国产的挤压型塑闪，嵌入 Kuraray 的波长位移光纤，对比了 MPPC 和 NDL 两种 SiPM 的性能。研究了反射层、光纤种类、光学胶、耦合零件的使用对增强光收集的效果，NDL 和 MPPC 作为光读出，探测器均可以实现 90% 以上的探测效率，优于 2 ns 的时间分辨率，满足 CEPC 缪子探测器的需求，并且成本远低于进口闪烁体与 SiPM，可以大面积使用，可以显著提高对撞的复杂环境下缪子的鉴别能力。

3、首次提出 Belle II KLM 系统中对中性强子四动量进行测量的方案，通过对粒子高时间分辨的飞行时间测量，结合探测器立体角等信息，可计算得到中性强子的四动量。设计并测试了长衰减长度闪烁体耦合大面积 SiPM 阵列的高时间分辨升级方案。BC420 作为常用的塑闪，其测试结果作为参考，国产生长型闪烁体也可以实现同样优秀的时间分辨。利用多个 SiPM 组成的阵列可以增加光收集的面积，通过对比不同的串并联方式，选取了表现最好的 12 个 SiPM (3S4P) 的方案，GNKD 一米长的双端读出可以实现优于 85 ps 的时间分辨，通过小原型

机对宇宙线缪子速度实现了测量，将为 Belle II KLM 探测器升级获得高时间分辨以测量  $K_L$  提供重要的技术支持。

目前，CEPC 缪子探测器的参考技术设计手册已经在筹备中，未来需要建造数百条闪烁体探测器组成一个探测器超层的样机，再配合后端电子学进行读出，对波形进行采样，研究样机的探测效率、时间与位置分辨等性能。后端电子学需要体积紧凑，线缆尽可能少，实现高速的数据读出。大批量 SiPM 样品的击穿电压会有不一致的现象，电源供应电路还应该考虑每个通道的几伏范围内的微调设置。后续还需要考虑的是如何保质保量地组装大批量的闪烁体探测器，以及制定出对大量闪烁体和 SiPM 进行性能测试的流水线式的高效测量方案。

针对 KLM 升级的方案，本文选择了使用宇宙线这一天然的粒子源作为探测对象，对探测器性能进行了测试，后续可以考虑使用束流对闪烁体进行测试，与宇宙线相比，能更快地对闪烁体时间性能进行测量。此外，闪烁体的抗辐照性能需要进行研究，以保证在实验长期运行下保持良好的探测器效率和时间分辨。除了硬件实验研究，基于 Geant4 模拟的物理分析  $K_L$  动量测量也在研究中，后续将合并到 Belle II 软件框架中。

## 参考文献

- [1] C. Grupen and B. Shwartz, Particle Detectors[M]. Second Edition. Cambridge University Press, 2008.
- [2] The CEPC Study Group, CEPC Conceptual Design Report: Volume 1 - Accelerator[EB/OL]. arXiv:1809.00285v1. doi:10.48550/arXiv.1809.00285.
- [3] The CEPC Study Group, CEPC Conceptual Design Report: Volume 2 - Physics & Detector[EB/OL]. arXiv:1811.10545v1. doi:10.48550/arXiv.1809.00285.
- [4] C. Adolphsen, M. Barone, B. Barish, *et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 3.II: Accelerator Baseline Design[EB/OL]. arXiv:1306.6328. doi:10.48550/arXiv.1306.6328
- [5] T. Behnke, J. E. Brau, P. N. Burrows, *et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 4: Detectors[EB/OL]. arXiv:1306.6329. doi:10.48550/arXiv.1306.6329
- [6] The FCC Collaboration, FCC Physics Opportunities[J]. Eur. Phys. J. C **79** (2019) 474. doi:10.1140/epjc/s10052-019-6904-3
- [7] <https://link.springer.com/article/10.1140/epjst/e2019-900087-0>
- [8] T. C. S. Group, CEPC Technical Design Report – Accelerator[EB/OL]. <https://arxiv.org/abs/2312.14363v1>.
- [9] T. Hebbeker, K. Hoepfner, Muon Spectrometers[EB/OL]. Handbook of Particle Detection and Imaging. 2020. doi:10.1007/978-3-319-47999-6\_19-2
- [10] R.L. Workman *et al.* (Particle Data Group), The Review of Particle Physics (2023)[J]. Prog. Theor. Exp. Phys. **2022** (2022) 083C01 and 2023 update. doi:10.1093/ptep/ptac097
- [11] A. Abashian *et al.* (Belle Collaboration), The Belle detector[J]. Nucl. Instrum. Methods A **479** (2002) 117.



- [12] E. Kou *et al.*, The Belle II Physics Book[J]. Prog. Theor. Exp. Phys. **2019** (2019) 123C01. doi:10.1093/ptep/ptaa008.
- [13] Luminosity projection. [https://www-superkekb.kek.jp/Luminosity\\_projection.html](https://www-superkekb.kek.jp/Luminosity_projection.html).
- [14] I. Adachi, T. E. Browder, P. Križan, S. Tanaka and Y. Ushiroda, Detectors for extreme luminosity: Belle II[J]. Nucl. Instrum. Methods A **907** (2018) 46.
- [15] T. Abe *et al.*, The Belle II Technical Design Report[EB/OL]. KEK Report 2010-1, 2010, arXiv:1011.0352.
- [16] Kuraray, Ltd. (Japan)[EB/OL]. <https://www.kuraray.com/products/psf>
- [17] T. Aushev, D. Z. Besson, K. Chilikin *et al.*, A scintillator based endcap KL and muon detector for the Belle II experiment[J]. Nucl. Instrum. Methods A **789** (2015) 134 doi:10.1016/j.nima.2015.03.060
- [18] P. Križan *et al.* (Belle II Collaboration), The Belle II Upgrade Program[EB/OL]. arXiv:2211.13634
- [19] F. Forti (for the Belle II Collaboration), Snowmass Whitepaper: The Belle II Detector Upgrade Program[EB/OL]. arXiv:2203.11349v1.
- [20] The BESIII Collaboration, Design and Construction of the BESIII Detector[J]. Nucl. Instrum. Methods A **614** (2010) 345
- [21] N. Abgrall, O. Andreeva, A. Aduszkiewicz, et al., NA61/SHINE facility at the CERN SPS: beams and detector system[J]. J. Inst. 9, (2014) P06005.
- [22] C. Betancourt, A. Blondel, R. Brundler, A. Dätwyler, Y. Favre, D. Gascon, S. Gomez, A. Korzenev, P. Mermoud, et al., Application of large area SiPMs for the readout of a plastic scintillator based timing detector[J]. J. Inst. 12, (2017) P11023.
- [23] P. Lecoq, A. Gektin and M. Korzhik, Inorganic Scintillators for Detector Systems[M]. Springer International Publishing, Cham, 2017.
- [24] A. Pla-Dalmau, A. D. Bross and K. L. Mellott, Low-cost extruded plastic scintillator[J]. Nucl. Instrum. Methods A **466** (2001) 482 doi: 10.1016/S0168-9002(01)00177-2.

- [25] LeptonID group and Belle II Collaboration, Muon and electron identification efficiencies and hadron-lepton misidentification rates at Belle II for Moriond 2021[EB/OL]. Mar 2021. BELLE2-CONF-PH-2021-002.
- [26] Y. Kharzheev, Scintillation Detectors in Modern High Energy Physics Experiments and Prospect of Their use in Future Experiments[J]. J. Lasers, Opt. Photonics **789** (2017) 134.
- [27] 北京高能科迪科技有限公司 [EB/OL]. <http://www.gaonengkedi.com/>
- [28] Saint-Gobain, Ltd. (France)[EB/OL], <https://luxiumsolutions.com/sites/default/files/2021-11/Fiber-Product-Sheet.pdf>[Accessed 12 JAN 2024]
- [29] J. N. Dong, Y. L. Zhang, Z. Y. Zhang, *et al.*, Position-sensitive plastic scintillator detector with WLS-fiber readout[J]. Nucl. Sci. Tech. **29** (2018) 117. doi:10.1007/s41365-018-0449-2.
- [30] Fast Digital Detector Emulator[EB/OL]. <https://www.caen.it/products/dt5810/>
- [31] T2K ND280 FGD Collaboration, The T2K Fine-Grained Detectors[J]. Nucl. Instrum. Methods A **696** (2012) 1.
- [32] Hamamatsu Photonics K.K. (Japan)[EB/OL]. [https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/mppc\\_mppc-array.html](https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array.html)
- [33] Novel Device Laboratory(China)[EB/OL]. <http://www.ndl-sipm.net/>
- [34] J. Q. Jia, J. L. Jiang, K. Liang *et al.*, EQR SiPM with P-on-N diode configuration[J]. Nucl. Sci. Tech. **30** (2019) 119. doi:10.1007/s41365-019-0644-9.
- [35] X. Y. Wang, H. Y. Zhang, D. Q. Fang *et al.*, Design and performance of a high-speed and low-noise preamplifier for SiPM[J]. Nucl. Sci. Tech. **34** (2023) 169 doi:10.1007/s41365-023-01328-7
- [36] CAEN[EB/OL]. <https://www.caen.it/products/dt5725/>
- [37] CAEN[EB/OL]. <https://www.caen.it/products/dt5742/>

- [38] K. Wang, S. Samaranayake, A. Estrade, Investigation of a digitizer for the plastic scintillation detectors of time-of-flight mass measurements[J]. Nucl. Instrum. Methods A **1027** (2022) 166050. doi:10.1016/j.nima.2021.166050.
- [39] Dow, Ltd. (the U.S.)[EB/OL]. <https://www.dow.com/en-us/pdp.sylgard-184-silicone-elastomer-kit.01064291z.html#overview>
- [40] J. L. Autran, D. Munteanu, T. Saad Saoud and S. Moindjie, Characterization of atmospheric muons at sea level using a cosmic ray telescope[J]. Nucl. Instrum. Methods A **903** (2018) 77.

# 攻读学位期间科研成果

## 已发表论文

- 2023 年以第二作者在 Nucl. Sci. Tech. 发表论文一篇: X. Y. Wang, H. Y. Zhang, D. Q. Fang *et al.*, Design and performance of a high-speed and low-noise preamplifier for SiPM.

## 已接收论文

- 2024 年以第一作者在 J. Instrum. 投稿论文一篇, 已接收: H. Y. Zhang, X. Y. Wang, W. H. Ma *et al.*, Design and test for the CEPC muon subdetector based on extruded scintillator and SiPM.

## 已获授权专利

- 2022 年以第二作者获一项实用新型专利授权: 一种宇宙线演示装置



# 致 谢

首先，我要由衷地感谢我的研究生导师王小龙老师，王老师是我科研的引路人，在我整个学术生涯给予我悉心的指导和支持。本科时因为曦源项目进入实验室，王老师耐心地指导我阅读参考文献，带领我搭建实验装置，逐渐激发我对硬件实验的兴趣，一步步教导我如何做科研、做汇报与科研写作，鼓励我要自信地去探索与交流，在发现我缺点时也总是及时指出批评。王老师以身作则全身心投入科研的热情，对待学术严谨认真的态度，一直让我十分敬佩。实验上，王老师总是精益求精，考虑全面，对每组数据每张图都有严格的要求，在实验遇到困难时经常提出独到的建议；在学术展示与文章撰写上，总是一丝不苟，认真细致地为我修改，从标点到措辞，从框架结构到整体排版，修改后的文稿变得更加精炼、清晰和连贯，更具说服力。王老师还鼓励学生多多交流，扩展眼界，提供了到高能所、KEK 等单位交流学习的机会。

感谢曾指导过我的老师和共同工作学习过的同学们。在这个团队中，我得到了充分的合作与支持，我们共同克服了许多科研中的困难，取得了一系列令人满意的研究成果。每一次的讨论和合作都让我受益匪浅，我深感荣幸能够成为这个团队的一员。感谢何万兵老师在软件程序方面的建议，在实验器材上也多次给予帮助。感谢张雪梅老师为实验提供的放射源。感谢课题组的王曦阳，在实验室的电子学研发与实验测试方面都做出了许多贡献，是一位积极探索乐于钻研的好榜样。感谢邹世明师弟，在后期加入硬件工作组后完成了许多实验任务，学习能力很强。感谢曾加入到实验室一起合作学习的同学们，虽是短期交流，也为实验室工作贡献了力量，他们是刘宇鑫、徐翔宇、王帅淳、孟炜棋、刘维克、王传烨。感谢在高能所交流时关心帮助我的徐子骏老师。感谢在日本 KEK 搭建实验时带领我熟悉环境并提供各项仪器的 Kindo 博士。

感谢复旦大学现代物理研究所为我提供了良好的学术研究环境。在这里，我不仅得到了优秀的导师指导，还结识了许多优秀的同学和研究人员。大家在学术上的交流与分享，为我的研究提供了丰富的资源和启发。感谢我修读课程的老师们，不仅教授专业知识，更是启迪学习科研的方法与态度。感谢科研助理李鹤婷老师在经费报销、仪器采购等事务上的细致工作与帮助。感谢课题组大家庭的高宝胜师兄、朱文静师姐、王婷师姐、董旭师弟、李佳欣师妹、邹世明师弟、谢世卿师弟、庄婉仪师妹、黄开瑞师弟、袁铭宽师弟，还有隔壁实验室的虞晓宙



师兄，大家在一起学习讨论，遇到的小问题总在互相帮助之下迎刃而解，硬件实验中的不少体力活也总是伸出援手。也要感谢一起同窗的互帮互助的本研班级同学们。

感谢系所的陆广成老师、傅云清老师，感谢我的辅导员王勉老师、系所办公室的杨明杰老师、杨柳老师、封娅娅老师，以及其他辅导员、人才工程队友们，对我学生工作的支持与帮助。感谢 2020 级核工程与核技术班的学生们，充满青春活力的你们带给我许多鼓励与感动。

感谢我的家人们，外公、父亲母亲和妹妹，在不断长大的过程中，你们给我的爱一直那么美好，家是我最温暖的港湾。感谢我的朋友们，每一次谈天说地，每一次见面的快乐，都是我珍藏心底的幸福，你们的关心和支持是我不断前行的动力。

最后，我要感谢所有帮助过我的人，包括论文撰写过程中提出宝贵建议的老师，以及系所的技术人员和行政人员们。

## 复旦大学 学位论文独创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。论文中除特别标注的内容外，不包含任何其他个人或机构已经发表或撰写过的研究成果。对本研究做出重要贡献的个人和集体，均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_

## 复旦大学 学位论文使用授权声明

本人完全了解复旦大学有关收藏和利用博士、硕士学位论文的规定，即：学校有权收藏、使用并向国家有关部门或机构送交论文的印刷本和电子版本；允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。涉密学位论文在解密后遵守此规定。

作者签名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_