

中图分类号:

UDC:

学校代码: 10055

密级: 公开

南开大学
硕士学位论文

大装置实验上的有机闪烁体探测器模拟和研究

Simulation and Research of Organic Scintillator Detectors for
Large-scale Experimental Facilities

论文作者	白子冰	指导教师	赵明刚教授
申请学位	硕士	培养单位	南开大学
学科专业	粒子物理与原子核物理	研究方向	高能物理
答辩委员会主席	缪炎刚	评阅人	

南开大学研究生院

二〇二五年四月

南开大学学位论文使用授权书

本人完全了解《南开大学关于研究生学位论文收藏和利用管理办法》关于南开大学(简称“学校”)研究生学位论文收藏和利用的管理规定,同意向南开大学提交本人的学位论文电子版及相应的纸质本。

本人了解南开大学拥有在《中华人民共和国著作权法》规定范围内的学位论文使用权,同意在以下几方面向学校授权。即:

- 1. 学校将学位论文编入《南开大学博硕士学位论文全文数据库》,并作为资料在学校图书馆等场所提供阅览,在校园网上提供论文目录检索、文摘及前 16 页的浏览等信息服务;
- 2. 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存学位论文;学校根据规定向教育部指定的收藏和存档单位提交学位论文;
- 3. 非公开学位论文在解密后的使用权同公开论文。

本人承诺:本人的学位论文是在南开大学学习期间创作完成的作品,并已通过论文答辩;提交的学位论文电子版与纸质本论文的内容一致,如因不同造成不良后果由本人自负。

本人签署本授权书一份(此授权书为论文中一页),交图书馆留存。

学位论文作者暨授权人(亲笔)签字: _____

20 年 月 日

南开大学研究生学位论文作者信息

论 文 题 目	大装置实验上的有机闪烁体探测器模拟和研究				
姓 名	白子冰	学号	2120220234	答辩日期	2025.05.19
论 文 类 别	博士 ☐ 学历硕士 ☒ 专业学位硕士 ☐ 同等学力硕士 ☐ 划 ☒ 选择				
学院（单位）	物理科学学院		学科/专业(专业学位) 名称		粒子物理与原子核物理
联 系 电 话	16622808687		电子邮箱	baizb@mail.nankai.edu.cn	
通讯地址(邮编): 300100					
非公开论文编号			备注		

注:本授权书适用我校授予的所有博士、硕士的学位论文。如已批准为非公开学位论文,须向图书馆提供批准通过的《南开大学研究生申请非公开学位论文审批表》复印件和“非公开学位论文标注说明”页原件。

南开大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：_____年 月 日

非公开学位论文标注说明

(本页表中填写内容须打印)

根据南开大学有关规定，非公开学位论文须经指导教师同意、作者本人申请和相关部门批准方能标注。未经批准的均为公开学位论文，公开学位论文本说明为空白。

论文题目			
申请密级	☐ 限制 (≤2 年) ☐ 秘密 (≤10 年) ☐ 机密 (≤20 年)		
保密期限	20 年 月 日至 20 年 月 日		
审批表编号		批准日期	20 年 月 日

南开大学学位评定委员会办公室盖章 (有效)

注：限制 ★2 年 (可少于 2 年); 秘密 ★10 年 (可少于 10 年); 机密 ★20 年 (可少于 20 年)

摘要

本文基于 Geant4 模拟框架，针对高能物理实验中有机闪烁体探测器技术开展了系统性研究。研究首先通过模拟闪烁体内部光传播特性及表面处理效果，建立了有机闪烁体材料的精确光学模型；在此基础上，系统考察了光纤耦合方式、直径大小等参数对光子收集效率的影响，并通过改变闪烁体条的几何结构参数，建立了结构-性能关系模型，为后续研究提供了共同的基础数据。

本研究围绕两个相互关联但各具特色的方向展开：一方面，以 Belle II 实验中 GAZELLE 探测器的几何参数为基础，构建了有机闪烁体远端探测器的完整模型，通过精确模拟 K_L^0 粒子及其衰变产物在探测器中的传播与相互作用过程，系统分析了探测单元结构设计与探测器整体尺寸对探测效率和立体角覆盖的定量影响，研究结果表明优化闪烁体条排列方式和探测器几何尺寸可显著提升对长寿命粒子衰变事件的探测能力；另一方面，针对 CEPC 实验的具体需求，完成了缪子探测器的设计和全面模拟工作，并实现了探测器在 CEPCSW 软件框架中的完整集成。采用了参数分离与结构简化策略，有效解决了不同精度需求下的大规模集成模拟挑战，通过建立参数化的探测器响应模型，成功平衡了模拟精度与计算效率的关系。

我们通过建立围绕有机闪烁体超层展开的多项探测器模拟，形成了从材料特性到探测器系统的完整技术链，为高能物理实验中的探测器设计与优化提供了系统性的技术支持和方法论参考，研究成果已成功应用于 CEPC 实验的相关工作中，并为未来类似大型物理实验中的探测器开发奠定了基础。

关键词：长寿命粒子探测；Geant4 模拟；有机闪烁体超层；DD4hep

Abstract

This thesis presents a systematic study of organic scintillator detector technology for high-energy physics experiments based on the Geant4 simulation framework. The research begins by establishing an accurate optical model of organic scintillator materials through simulating light propagation characteristics and surface treatment effects within the scintillator. On this foundation, the study systematically examines the influence of parameters such as optical fiber coupling methods and diameter on photon collection efficiency, and establishes a structure-performance relationship model by varying the geometric parameters of scintillator strips, providing common baseline data for subsequent research.

The work focuses on two interconnected yet distinctive directions: on one hand, based on the geometric parameters of the GAZELLE detector in the Belle II experiment, a complete model of an organic scintillator far detector was constructed. Through precise simulation of K_L^0 particles and their decay products' propagation and interaction processes in the detector, the study systematically analyzes the quantitative impact of detection unit structural design and overall detector dimensions on detection efficiency and solid angle coverage. The results indicate that optimizing scintillator strip arrangement and detector geometry can significantly enhance the detection capability for long-lived particle decay events. On the other hand, in response to the specific requirements of the CEPC experiment, the research completed the design and comprehensive simulation of the muon detector, and achieved full integration of the detector in the CEPCSW software framework. The study adopted parameter separation and structural simplification strategies, effectively addressing the challenges of large-scale integrated simulation under different precision requirements, and successfully balanced simulation accuracy and computational efficiency by establishing a parameterized detector response model.

By developing multiple detector simulations centered around organic scintillator superlayers, we have formed a complete technical chain from material properties to detector systems, providing systematic technical support and methodological reference

for detector design and optimization in high-energy physics experiments. The research results have been successfully applied to relevant work in the CEPC experiment and lay a foundation for future detector development in similar large-scale physics experiments.

Key Words: Long-lived particle detection; Geant4 simulation; Organic scintillator superlayer; DD4hep

目录

摘要	I
Abstract	II
第一章 引言	1
第一节 高能物理与标准模型	1
一、 高能物理	1
二、 标准模型	1
三、 CKM 矩阵和 CP 破坏	2
第二节 长寿命粒子及其探测	3
一、 长寿命粒子的定义	3
二、 长寿命粒子的产生机制	4
三、 长寿命粒子的探测方法	4
第三节 研究背景与意义	5
一、 长寿命粒子探测的科学意义	5
二、 探测技术的发展与挑战	6
第四节 研究长寿命粒子探测技术的参考标准粒子	7
一、 μ 子的物理特性与探测意义	7
二、 K^0 - $\bar{K}^0$ 混合与物理传播态	9
三、 K_L^0 和 K_S^0 的物理特性对比	9
四、 K_L^0 的衰变长度与探测特征	11
第五节 本研究的目标与方法	11
一、 基于自发衰变的长寿命粒子远端探测器	12
二、 基于铁靶-有机闪烁体的 μ 子探测器	13
第六节 Geant4 模拟框架	14
一、 理论基础与架构	15
二、 物理过程模拟能力	15
三、 几何建模与计算优化	15
四、 应用领域	16

第七节 研究内容与论文结构	16
一、研究目标与内容	16
二、论文结构安排	17
第二章 Belle II 实验和 CEPC 实验	20
第一节 Belle II 实验	20
一、SuperKEKB 加速器	20
二、Belle II 探测器概述	22
第二节 GAZELLE 远端探测器	25
一、探测器设计与配置	26
二、背景抑制与信号识别	27
三、物理潜力与局限性	27
四、前景与展望	29
第三节 环形正负电子对撞机 (CEPC) 概述	29
一、CEPC 加速器复合体设计	30
二、性能参数与运行模式	30
三、科学意义与未来展望	31
第四节 本研究中的探测器模拟框架	31
第三章 有机闪烁体超层探测器工作原理	33
第一节 有机塑料闪烁体的发光机制	33
第二节 光子传输机制	34
第三节 光电信号转换	34
一、SiPM 的基本工作原理	34
二、SiPM 的关键性能参数	35
三、击中判定标准	36
第四节 闪烁体超层结构与坐标重建	36
第四章 闪烁体探测单元的模拟与优化	38
第一节 Geant4 模拟框架与物理过程	38
第二节 闪烁体材料模拟	38
一、闪烁体材料特性	39
二、光学表面设置	40
三、高能粒子入射模拟	40

第三节 单条闪烁体模拟	42
一、 光纤耦合闪烁体模拟	42
二、 光纤嵌入方式比较	42
三、 参数影响分析	43
第五章 基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器设计与优化	45
第一节 有机闪烁体远端探测器设计原理与模型构建	45
第二节 原型探测器尺寸选择考量	45
第三节 参数化模拟框架	46
第四节 探测单元的结构影响下探测器效率差异对比	47
一、 模拟设置与数据收集	47
二、 数据处理与击中点重建	47
三、 探测效率比较	48
第五节 远端探测器立体角覆盖分析	48
一、 角度扫描模拟方法	48
二、 探测器尺寸参数与立体角计算	49
三、 宽度对立体角覆盖的影响	49
第六章 CEPC 实验的缪子探测器设计	51
第一节 桶部设计	51
一、 探测器整体结构	51
二、 超层结构设计	52
三、 桶部组装与交错结构	53
四、 模拟思路与总结	55
第二节 端盖设计	56
一、 端盖探测器整体结构	56
二、 闪烁体条层的结构设计	56
三、 闪烁体条的分段设计	56
第三节 缪子探测器有效面积与整体协同设计	57
一、 探测器有效面积计算	57
二、 桶部与端盖的协同设计	58
第四节 CEPCSW 中的集成	58
一、 CEPCSW 软件框架概述	59

二、 缪子探测器在 CEPCSW 中的模拟实现	60
第五节 集成优化	62
一、 参数分离与配置自动化	62
二、 探测器结构简化与内存优化	63
第七章 总结与展望	64
第一节 研究成果总结	64
第二节 研究局限性与未来展望	65
一、 远端探测器优化研究的局限性与展望	65
二、 缪子探测器设计的局限性与展望	66
参考文献	67
致谢	71
附录 A 缪子探测器端盖闪烁体条长度参数	72
个人简历	74

第一章 引言

第一节 高能物理与标准模型

一、 高能物理

高能物理（粒子物理）致力于探索物质最基本的组成单元及其相互作用。现代粒子物理实验通常需要达到 $\text{GeV}(10^9 \text{ eV})$ 至 $\text{TeV}(10^{12} \text{ eV})$ 量级的能量以研究基本粒子的性质，这远高于原子物理的 eV 量级和核物理的 MeV 量级。

高能物理实验的基本流程包括：产生并加速初始态粒子，使其在对撞机中相互碰撞或与固定靶相互作用，产生各种中间态粒子，这些粒子随后衰变成最终态粒子，最后由探测器捕捉并记录它们的各种信息，通过计算机分析重建碰撞事件。

在目前最大的粒子对撞机 LHC 中，质子束被加速到 6.5 TeV 的能量，在对撞点处产生的总能量可达 13 TeV 。而在 SuperKEKB 中，电子和正电子分别被加速到 7 GeV 和 4 GeV ，通过非零交叉角对撞产生丰富的物理过程^[1]。Belle II 探测器作为 SuperKEKB 加速器的主要实验装置，专注于 B 介子、D 介子和 τ 轻子的精确测量，通过研究这些粒子的稀有衰变和 CP 破坏现象来寻找新物理的证据^[1]。

二、 标准模型

标准模型（Standard Model, SM）是描述微观世界基本组成及其相互作用的最成功的物理理论框架。自 20 世纪 70 年代建立以来，SM 经受住了大量实验的检验，其预测也得到了实验的证实。标准模型描述了三种基本相互作用（强、弱、电磁）以及构成物质的基本粒子。

标准模型中的基本粒子根据自旋可以分为费米子（fermions，自旋为 $\frac{1}{2}$ ）和玻色子（bosons，自旋为整数）。费米子包括夸克（quarks）和轻子（leptons）两大类，是物质的基本组成成分。夸克分为三代六种类型：第一代（u, d），第二代（c, s），第三代（t, b）。轻子也分为三代：第一代包括电子（ e^- ）和电子中微子（ ν_e ），第二代包括 μ 子（ μ^- ）和 μ 中微子（ ν_μ ），第三代包括 τ 子（ τ^- ）和 τ 中微子（ ν_τ ）。

子 (ν_τ)。玻色子包括规范玻色子 (gauge bosons) 和希格斯玻色子 (Higgs boson)。规范玻色子是基本相互作用的媒介粒子：光子 (γ) 传递电磁相互作用； $W^\pm$ 和 Z^0 玻色子传递弱相互作用；胶子 (g) 传递强相互作用。希格斯玻色子是 SM 中唯一的自旋为 0 的标量玻色子，通过希格斯机制为其他粒子提供质量。

标准模型描述的三种基本相互作用在典型的次原子能量尺度下的相对强度约为：

$$\text{强相互作用} : \text{电磁相互作用} : \text{弱相互作用} \approx 1 : 10^{-2} : 10^{-13} \quad (1.1)$$

三、CKM 矩阵和 CP 破坏

在标准模型中，夸克可以通过弱相互作用改变其味道 (flavor)。这种现象由 Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) 矩阵描述^[2, 3]。CKM 矩阵连接夸克的质量本征态和弱相互作用本征态：

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

CKM 矩阵是一个 3×3 的幺正矩阵，包含四个独立参数：三个混合角和一个 CP 破坏相位。该矩阵使得不同代的夸克之间可以通过弱相互作用相互转化，导致了許多重要的物理现象，如 K 介子和 B 介子的衰变^[4]。

标准模型中 CP 破坏的唯一来源是 CKM 矩阵中的复相位。CP 破坏的强度可以用 Jarlskog 不变量 (J) 来衡量，它是 CKM 矩阵元素的特定组合的虚部。尽管标准模型内禀地包含了 CP 破坏机制，但研究表明，其强度不足以解释宇宙中观测到的物质-反物质不对称性，这为探索超越标准模型的物理提供了动机。

除了 CP 破坏强度不足外，标准模型还面临其他挑战，包括无法将引力纳入量子场论框架、缺乏合适的暗物质候选粒子、无法自然解释中微子质量的非零值，以及强 CP 问题等。为解决这些问题，理论物理学界提出了多种超出标准模型的理论框架，如超对称理论、大统一理论、额外维度理论等。

这些理论框架的验证需要依赖高精度的实验测量和先进的探测技术。特别地，许多模型预言了新的长寿命粒子或罕见衰变过程，这些现象的探测对于验证或排除这些理论至关重要。在下一节中，我们将详细讨论长寿命粒子的特性及其在粒子物理学中的重要意义，为后续探讨其探测技术奠定基础。

第二节 长寿命粒子及其探测

长寿命粒子（Long-Lived Particles, LLPs）是一类在高能物理中具有重要研究价值的粒子，它们的寿命足够长，能够在探测器中飞行一段可测量的距离后才发生衰变，从而产生独特的实验信号。本节将介绍长寿命粒子的定义、产生机制以及探测方法。

一、长寿命粒子的定义

在粒子物理实验的语境中，长寿命粒子是指那些在产生后能够飞行一段可观测距离再发生衰变的粒子^[5]。这个可观测距离是宏观的，意味着它能够被实验装置分辨出来。长寿命粒子可分为两类：标准模型中已知的长寿命粒子和理论预测的超出标准模型（Beyond Standard Model, BSM）的长寿命粒子。

标准模型中存在多种长寿命粒子，如本研究中关注的 μ 子（寿命约 2.2×10^{-6} 秒）和 K_L^0 （寿命约 5.1×10^{-8} 秒）。这些粒子已被实验充分证实，其性质和行为已被详细研究。

BSM 长寿命粒子目前仍处于理论预测阶段，尚未被实验观测到^[6]。根据理论模型，这些粒子之所以具有较长寿命，主要是因为其衰变过程受到抑制。根据量子场论，粒子寿命 τ 与其衰变宽度 Γ 成反比（ $\tau = 1/\Gamma$ ）。衰变宽度可以表示为^[7]：

$$\Gamma \sim \frac{1}{M} |\mathcal{M}|^2 d\Pi \quad (1.3)$$

其中， M 是粒子的质量， $|\mathcal{M}|$ 是衰变过程的矩阵元， $d\Pi$ 是相空间因子。对于理论预测的 BSM 长寿命粒子，其矩阵元 $|\mathcal{M}|$ 和/或相空间 $d\Pi$ 必须很小，可能源于与标准模型粒子的耦合极其微弱、衰变过程需要通过高阶效应或虚粒子中介、存在近似对称性保护，或者衰变过程的相空间受到严格限制^[7]。

目前，多个实验项目正在积极搜索 BSM 长寿命粒子，包括 LHC 的 ATLAS 和 CMS 实验，以及专门设计的探测器如 MATHUSLA^[8]。尽管尚未发现明确的实验证据^[9]，这些搜索对于解决粒子物理学和宇宙学中的开放问题（如层次问题、暗物质和重子不对称性）具有重要意义。通过已知的标准模型长寿命粒子，我们可以验证和优化探测器设计，为未来搜索 BSM 长寿命粒子提供重要的技术基础。

二、长寿命粒子的产生机制

高能物理实验中的长寿命粒子有多种产生机制。首先是直接产生，如电子-正电子对撞可产生重中性轻子： $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow \nu N$ ，其产生概率与混合参数 $|V_{\ell N}|^2$ 相关^[10]；其次，是在级联衰变过程中，重粒子（如希格斯玻色子）可衰变为长寿命粒子，这些粒子随后在探测器中产生位移顶点信号^[10]；另外，也有混合效应使标准模型粒子与新物理粒子（如暗光子）通过微小混合产生长寿命粒子的情况^[11]。

本研究关注的 K_L^0 粒子在 Belle II 实验中的产生来自于级联衰变机制，在 Belle II 的 e^+e^- 对撞中，电子和正电子以能量约 10.58 GeV（Y(4S) 共振峰）碰撞产生 $B^0\bar{B}^0$ 和 B^+B^- 对，这些 B 介子随后衰变产生 K^0 或 $\bar{K}^0$ 。此外，非共振的连续谱过程（如 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ，其中 q 为 u, d, s, c 夸克）也会产生含有奇异夸克的介子，进而产生 K_L^0 粒子^[1]。

三、长寿命粒子的探测方法

长寿命粒子的探测策略取决于其寿命、质量和产生机制，主要包括以下几种方法：

位移顶点（Displaced Vertices）是长寿命粒子飞行一段距离后衰变产生的次级顶点，与初级相互作用点明显分离^[12]。这种方法基于精确测量粒子衰变位置与初始碰撞点之间的距离，要求探测器具有高精度的顶点重建能力。

消失径迹（Disappearing Tracks）适用于带电长寿命粒子在探测器中留下径迹后衰变为不可见粒子的情况^[13]。这种方法通过识别在探测器内部突然终止的径迹来探测长寿命粒子，需要探测器各层之间的精确匹配。相关的动能异常（Kinked Tracks）则表现为径迹方向的突然改变，通过分析径迹曲率的不连续性来识别，这两种信号在超对称理论的暗物质搜索中尤为重要。

延迟信号（Delayed Signals）利用了长寿命粒子在探测器中的延迟衰变特性。因为其在产生后不会立即衰变，而是经过一段可测量的时间后才衰变^[14]，所以可以通过比较粒子信号的时间戳与初级碰撞时间，识别那些明显延迟的信号。现代探测器皮秒级的时间分辨率使得区分正常粒子信号和延迟信号成为可能，特别适用于寿命在纳秒到微秒量级的长寿命粒子。

停止粒子（Stopped Particles）探测针对在探测器材料中停止后稍晚衰变的长寿命粒子^[15]。这种方法的原理是重而慢的长寿命粒子会在探测器材料中损失

能量直至停止，然后在稍后时刻衰变。通过在束流间隙期间（即没有新粒子产生的时间窗口）收集数据，可以识别这些与初始碰撞事件在时间上完全不同步的衰变信号，有效降低背景干扰。

长寿命粒子探测面临的主要挑战包括触发效率低（常规触发系统针对即时产生的粒子优化）、背景复杂（如宇宙射线或探测器噪声）以及需要专门的重建技术。为应对这些挑战，研究人员开发了多种专用探测器设计和创新的数据分析方法。

第三节 研究背景与意义

长寿命粒子探测是当代粒子物理学的前沿研究领域之一，其科学意义和技术挑战吸引了全球众多研究团队的关注。这些粒子由于其独特的物理特性和潜在的理论价值，为探索超出标准模型的新物理提供了重要窗口。本节将从长寿命粒子的基本概念、探测意义以及当前研究现状等方面，系统阐述本研究的背景与意义。

一、长寿命粒子探测的科学意义

长寿命粒子探测在现代物理学研究中具有多方面的科学意义，主要体现在基础物理研究、宇宙射线与粒子物理学以及应用物理学等领域。

长寿命粒子探测技术目前在粒子物理、天体物理学和应用物理学中已经得到广泛应用，为多个前沿研究领域提供了关键的实验手段。例如，液态氙探测器作为一种成熟的长寿命粒子探测技术，在 ATLAS 对撞机实验中用于精确测量高能粒子碰撞产物，在 DUNE 实验中用于研究中微子振荡现象，以及在 DarkSide 和 DEAP 等地下实验室中用于探测暗物质粒子与普通物质的微弱相互作用。Bonivento 和 Terranova 强调，这类探测器经过 20 多年的研发，已在稀有事件探测和粒子识别方面展现出卓越性能，能够同时满足高灵敏度和低本底要求^[16]。

在基础物理研究方面，长寿命粒子探测技术为暗物质搜索提供了关键工具。暗物质作为具有确凿宇宙学观测证据的超出标准模型的新物理现象，其本质特性仍未被完全理解^[17]。通过先进的探测技术，研究人员能够探索从亚 GeV 到超重质量范围的暗物质候选体，这对于完善宇宙学模型和粒子物理理论具有重要意义。

中微子物理研究是长寿命粒子探测的另一个重要应用领域。在这一领域中，水切伦科夫探测器被用于探测太阳和大气中微子，液态氩时间投影室则凭借其优异的粒子识别能力和三维成像能力，在研究中微子振荡和中微子-核相互作用方面发挥着关键作用。Rubbia 的研究表明，这些探测器技术已成功应用于多个大型实验中，为理解中微子质量、混合角和 CP 破坏等基本物理问题提供了重要实验证据^[18]。

在应用物理学领域，长寿命粒子探测技术已扩展到核安全监测和国土安全应用。Lacy 等人提出的新型辐射探测技术，利用铜吸管阵列和富集硼碳化物涂层，能够高效探测伽马射线和中子，为大范围区域监测提供了经济有效的解决方案^[19]。这类技术的发展对于特殊核材料的探测和识别具有重要的现实意义。

长寿命粒子探测技术的持续发展不仅深化了我们对基本物理规律的理解，也为解决宇宙学和粒子物理学中的未解之谜提供了重要工具，同时在应用领域展现出广阔的前景。

二、探测技术的发展与挑战

粒子探测技术在过去几十年中经历了显著发展，形成了多种技术路线以满足不同实验需求。这些技术各有其优势与局限性，推动着研究者不断探索新的解决方案。

低温探测器技术通过极低温环境运行，实现了卓越的能量分辨率性能。Pirró 和 Mauskopf 的研究表明，这类探测器在稀有事件探测等基础物理领域展现出独特优势^[20]。液态惰性气体探测器，特别是液态氩和液态氙探测器，结合了闪烁和电离信号读出，提供了优异的粒子识别能力^[16]。半导体探测器，尤其是高纯锗探测器，在暗物质搜索和双贝塔衰变实验等超低本底实验中发挥重要作用^[21]。尽管各类探测技术取得了显著进展，粒子探测仍面临诸多挑战。包括进一步降低本底水平，以提高对稀有事件的灵敏度；在保持性能的同时，扩大探测器规模；降低能量阈值同时维持低本底水平、确保大型探测系统的长期稳定运行、改善极低能量事例的信噪比；以及解决大规模探测器阵列的数据获取和处理等问题，都是当前研究面临的重要课题。

针对探测器规模扩展和成本控制的挑战，有机闪烁体探测器凭借其相对低廉的成本和灵活的几何构型，提供了可行的解决方案。有机闪烁体探测器采用的材料和制造工艺通常比其他探测技术更为经济，然而，尽管成本较低，有机闪烁探测器的性能却不逊色于传统探测器。Janda 和 Pipal 的研究表明，即使是

简单的塑料闪烁微球探测器也能达到对 ^{90}Sr 高达 71.2% 的探测效率，对 ^{241}Am 的探测效率可达 13.1%^[22]，这在许多应用场景下已经足够满足实验需求。同时，有机闪烁体的低成本使其特别适合进行灵活构型设计，这让有机闪烁体探测器可以通过结构设计提高探测效率。例如一种基于双散射原理的三层探测器结构，通过优化几何布局显著提升了探测效率^[23]。创新的构型设计充分利用了有机闪烁体探测器的易扩展性，在保持低成本的同时实现了性能的显著提升。

为解决极低能量事例的信噪比问题和大规模探测器阵列的数据获取挑战，硅光电倍增器 (SiPM) 与有机闪烁体的结合提供了新的解决途径。相比传统光电倍增管 (PMT)，SiPM 在光子探测效率方面表现出色，在 420 nm 波长处可达 63%，是 PMT 典型 20-30% 效率的 2-3 倍^[24, 25]。此外，SiPM 工作电压低 (20-100V，而 PMT 需要 500-3000V)，对磁场不敏感，使其在紧凑、灵活的探测器设计中具有明显优势^[26]。这种高度可扩展性和紧凑性使 SiPM 特别适合构建大面积、高通道数的探测系统，同时简化了电子学设计和数据处理架构^[27]。

有机闪烁体探测器技术的这些优势使其在多种应用场景中展现出巨大潜力，包括高能物理实验中的粒子识别、医学成像以及核安全监测等领域。

本研究将聚焦于有机闪烁体探测器在不同应用场景下的设计与优化，包括以 Belle II 实验的 GAZELLE 探测器为原型的基于自发衰变的长寿命粒子远端探测器，以及 CEPC 实验中基于铁靶-有机闪烁体结构的缪子探测器。

第四节 研究长寿命粒子探测技术的参考标准粒子

在开发和验证长寿命粒子探测技术时，选择合适的标准参考粒子至关重要。本研究主要关注两种标准模型中的长寿命粒子： K_L^0 和 μ 子。这两种粒子因其独特的物理特性，成为验证不同探测技术的理想参考对象。其中， K_L^0 的物理特性更为复杂，涉及 CP 破坏和弱相互作用等基本物理现象。

一、 μ 子的物理特性与探测意义

μ 子是标准模型中第二代轻子，质量为 $105.66 \text{ MeV}/c^2$ ，平均寿命为 $2.20 \mu\text{s}$ ^[28]。作为带电轻子， μ 子主要通过电磁相互作用和弱相互作用与物质发生作用。表1.1展示了 μ 子与电子、质子的基本物理性质对比：

μ 子是不稳定粒子，通过弱相互作用发生衰变。根据粒子数据组 (PDG) 的最新数据^[28]， μ^- 的主要衰变方式和分支比如下：

表 1.1 μ 子、电子和质子的基本性质对比

粒子	中文名	电荷	自旋	质量 (MeV/c ²)	磁矩	旋磁比 (kHz/G)	寿命 (μ s)
e	电子	± 1	1/2	0.51	657	2800	∞
μ	缪子	± 1	1/2	105.66	3.18	13.5	2.20
p	质子	± 1	1/2	938	1	4.26	∞

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu, \quad (\text{分支比} \approx 100\%) \quad (1.4)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma, \quad (\text{分支比} = (6.0 \pm 0.5) \times 10^{-8}) \quad (1.5)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + e^+ + e^-, \quad (\text{分支比} = (3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}) \quad (1.6)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \gamma, \quad (\text{分支比} < 4.2 \times 10^{-13}) \quad (1.7)$$

其中第四个衰变过程不遵循轻子味对称性，在标准模型理论中它不应该存在。如果能寻找到诸如此类的稀有衰变，则意味着突破标准模型而发现新物理。由于其分支比极小，因此需要超高强度的 μ 子束流来进行实验研究。

μ 子具有一些独特的物理特性：它不参与强相互作用；在核反应中表现出与强子不同的行为；衰变过程中会同时产生一个中微子和一个反中微子。这些特性使 μ 子在高能物理实验中具有多方面的重要意义。

首先， μ 子具有独特的穿透能力，能够穿过大量物质而能量损失相对较小。这是因为 μ 子作为轻子，不参与强相互作用，主要通过电离过程损失能量。相比电子， μ 子质量很大，因此辐射损失（与质量平方成反比）显著减小；相比强子， μ 子不受强相互作用影响，避免了非弹性核碰撞导致的能量损失。这种穿透特性使 μ 子成为探测器中识别和测量高能粒子的理想工具。

其次， μ 子在许多重要物理过程中作为信号或背景出现。在希格斯玻色子衰变、超对称粒子搜索以及重味物理研究中， μ 子常作为关键信号的组成部分。例如，希格斯玻色子通过 $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ 或 $H \rightarrow \mu^+\mu^-$ 衰变道的研究需要精确的 μ 子探测。同时，宇宙射线 μ 子也是地下实验的主要背景来源之一，需要有效识别和抑制。

μ 子在实际应用中展现出广泛的价值。在粒子物理领域，国际上多个实验室正在开展 μ 子稀有衰变研究，包括瑞士 PSI 的 MEG 和 Mu3e 实验、日本 J-PARC 的 COMET 实验以及美国 FNAL 的 Mu2e 实验。这些实验旨在探测轻子味破坏过程，为超出标准模型的新物理提供实验证据^[29]。

二、 K^0 - $\bar{K}^0$ 混合与物理传播态

中性 K 介子系统由强相互作用本征态 K^0 （由 $d\bar{s}$ 组成）和 $\bar{K}^0$ （由 $\bar{d}s$ 组成）构成。这两个态在强相互作用中保持稳定的身份，但在弱相互作用下可以相互转化，形成所谓的 K^0 - $\bar{K}^0$ 混合现象^[30]。

在 CP 守恒的情况下，可以定义 CP 本征态：

$$|K_1^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) \quad (1.8)$$

$$|K_2^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) \quad (1.9)$$

然而，由于 CP 破坏的存在，实际在空间传播的物理态（质量本征态） K_S^0 和 K_L^0 是 CP 本征态的混合：

$$|K_S^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_1^0\rangle + \epsilon|K_2^0\rangle) \quad (1.10)$$

$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon|^2}}(|K_2^0\rangle + \epsilon|K_1^0\rangle) \quad (1.11)$$

其中 ϵ 是 CP 破坏参数，测量值约为 $|\epsilon| \approx 2.228 \times 10^{-3}$ ^[30]。这个参数表征了中性 K 介子系统间接 CP 破坏的大小，即发生在 K^0 - $\bar{K}^0$ 混合过程中的 CP 破坏。

K_S^0 和 K_L^0 之间的质量差异约为 3.484×10^{-15} GeV^[30]，是 K^0 和 $\bar{K}^0$ 之间量子振荡现象的基础，是量子力学在粒子物理中的重要体现。

三、 K_L^0 和 K_S^0 的物理特性对比

K_L^0 和 K_S^0 作为中性 K 介子系统的物理传播态，具有显著不同的物理特性。根据 PDG 的最新数据^[28]， K_S^0 的平均寿命为 $(0.8954 \pm 0.0004) \times 10^{-10}$ 秒，而 K_L^0 的平均寿命为 $(5.116 \pm 0.021) \times 10^{-8}$ 秒，这种巨大的寿命差异源于它们主要衰变模式的不同。

K_S^0 的主要衰变模式是两体衰变：

$$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad (\text{分支比} = 69.20 \pm 0.05\%) \quad (1.12)$$

$$K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \quad (\text{分支比} = 30.69 \pm 0.05\%) \quad (1.13)$$

而 K_L^0 的主要衰变模式是半轻子衰变和三体强衰变:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm e^\mp \nu_e \quad (\text{分支比} = 40.55 \pm 0.11\%) \quad (1.14)$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp \nu_\mu \quad (\text{分支比} = 27.04 \pm 0.07\%) \quad (1.15)$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \quad (\text{分支比} = 19.52 \pm 0.12\%) \quad (1.16)$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \quad (\text{分支比} = 12.54 \pm 0.05\%) \quad (1.17)$$

K_S^0 和 K_L^0 寿命的巨大差异主要源于几个关键因素:

在 CP 守恒的情况下, K_L^0 (近似 CP 奇态) 不能衰变为两个 π 介子 (CP 偶态)^[31]。虽然 K_L^0 也可以通过 CP 破坏效应衰变为两个 π 介子, 但这些衰变的分支比非常小:

$$K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad (\text{分支比} = (1.967 \pm 0.010) \times 10^{-3}\%) \quad (1.18)$$

$$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0 \quad (\text{分支比} = (0.864 \pm 0.006) \times 10^{-3}\%) \quad (1.19)$$

因此, K_L^0 主要通过三体衰变和半轻子衰变过程进行。

正如我们在第一章中介绍过的, 在量子场论中, 粒子衰变宽度 Γ 与衰变矩阵元 $\mathcal{M}$ 和相空间因子 Φ_n 的关系可表示为:

$$\Gamma \propto |\mathcal{M}|^2 \times \Phi_n \quad (1.20)$$

首先, 从相空间角度看, 对于 n 体衰变, 相空间因子与 $(2\pi)^{3n-4}$ 成反比^[32]。 K_L^0 的主要衰变模式三体衰变的相空间因子比 K_S^0 两体衰变的小约两个数量级^[33]。

其次, 从衰变矩阵元角度看, $K_S^0 \rightarrow \pi\pi$ 是一阶弱过程, 通过单个 W 玻色子交换实现。这一过程的费曼图结构相对简单, 没有额外的抑制因子^[34]。而 K_L^0 的主要衰变道相对复杂: 半轻子衰变 $K_L^0 \rightarrow \pi l \nu$ 需要通过 W 玻色子产生轻子-中微子对; 三体强衰变 $K_L^0 \rightarrow \pi\pi\pi$ 则涉及更高阶的相互作用过程, 其矩阵元受到额外的耦合常数和动量依赖性的抑制^[35]。

根据公式, 相空间因素的抑制结合衰变机制的复杂性差距造成的衰变矩阵元的差异, 共同导致 K_L^0 的总衰变宽度显著小于 K_S^0 ^[33, 35], 从而使 K_L^0 的寿命较 K_S^0 更长。

在实验中, K_L^0 和 K_S^0 可以通过它们的衰变模式和寿命来区分。由于 K_S^0 的寿命很短, 它通常在产生点附近衰变, 而 K_L^0 则可以传播较长距离后才衰变。这种长寿命特性使得 K_L^0 成为研究远离产生点衰变的长寿命粒子探测技术的理想对象。

四、 K_L^0 的衰变长度与探测特征

K_L^0 的衰变长度 L 可以通过相对论公式计算： $L = \gamma\beta c\tau$ ，其中 γ 是洛伦兹因子， β 是速度与光速之比， c 是光速， τ 是固有寿命。在典型的高能物理实验中， K_L^0 的动量可以达到数 GeV/c，导致其衰变长度达到数十米。在 Belle II 实验中，平均动量约为 2-3 GeV/c 的 K_L^0 的衰变长度约为 8-12 米^[1]。这个长衰变长度带来了探测上的挑战和机遇。一方面， K_L^0 可能在主探测器之外衰变，导致信号丢失；另一方面，这种长寿命特性使得 K_L^0 成为研究远离产生点衰变的长寿命粒子的理想模型^[36]。

由于 K_L^0 是中性粒子，它本身不会在探测器中留下电离轨迹，这增加了探测的难度。 K_L^0 的探测通常依赖于其衰变产物的识别或与物质的直接相互作用。在半轻子衰变中，可以通过识别带电轻子（电子或 μ 子）和 π 介子来重建 K_L^0 ；在三体强衰变中，可以通过测量多个 π 介子的动量和能量来重建 K_L^0 。此外， K_L^0 也可以通过与探测器材料的核相互作用被直接探测，如在 Belle II 的 KLM 探测器中^[1]。

K_L^0 与多种假设的长寿命新物理粒子展现出显著相似性^[7, 37]。这种相似性体现在三个方面：寿命尺度方面， K_L^0 的衰变长度与理论预测的某些新物理长寿命粒子处于相近量级；衰变拓扑方面，它们都可能产生多个末态粒子，形成复杂的衰变链；探测技术方面，在探测效率低和背景干扰高等问题上，它们面临共同的挑战。这些共性使得 K_L^0 成为验证长寿命粒子探测技术的理想参考标准。

使用 K_L^0 验证长寿命粒子探测器性能具有显著优势： K_L^0 的物理性质已被精确测量，可以提供可靠的校准标准；在高能对撞实验中， K_L^0 的产生率高，能提供良好的统计显著性；此外，通过比对实验结果与标准模型预测，可以全面验证探测技术的有效性^[38]。因此，研究 K_L^0 的探测技术可以为搜索新物理提供宝贵的经验和方法。

第五节 本研究的目标与方法

本研究聚焦于有机闪烁体探测器在两种不同应用场景下的设计与优化：基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器和 CEPC 实验中的缪子探测器。这两种应用虽然都采用有机闪烁体作为基本探测单元，但在探测原理和设计思路存在显著差异，分别代表了粒子探测的两种技术路线。

一、 基于自发衰变的长寿命粒子远端探测器

如前文所述，以 K_L^0 为标准参考开发的自发衰变探测技术具有卓越的可迁移性。Chou 等人强调：“寿命前沿（lifetime frontier）是新物理搜索的重要方向，使用已知长寿命粒子校准和验证探测器性能是开发下一代长寿命粒子探测技术的关键步骤”^[39]。FASER 实验也采用类似策略：“通过探测已知长寿命粒子的衰变，可以验证探测器性能并校准探测效率，为未知长寿命粒子的搜索奠定基础”^[38]。

远端探测器技术的发展源于对主探测器覆盖范围的扩展需求。由于主探测器的几何接受度和触发效率限制，某些稀有 BSM 粒子事件可能未被有效记录。长寿命粒子能够穿越主探测器并在远离产生点的位置才发生衰变，使得在远端布置额外的探测器成为有效策略。远端探测器通过在粒子源一定距离处布置探测器阵列，专门捕获那些穿越主探测器后才衰变的长寿命粒子，显著提高了探测灵敏度^[40]。相比传统系统，远端探测技术在空间分辨率、时间分辨率、角分辨率和探测效率方面均实现了显著提升^[41–44]。

自发衰变探测方法依赖于粒子的固有衰变过程，通过在粒子可能飞行的路径上布置探测系统，捕捉其自然衰变产生的次级粒子。FASER 实验的设计理念阐述了这一方法特别适用于“轻且极弱相互作用的粒子”，这类粒子“可以长距离传播而不发生相互作用”，最终“在探测器中衰变回可见粒子”^[38]。

自发衰变探测方法的主要优势在于提供相对纯净的实验环境，减少背景干扰，并能精确测量粒子的固有物理特性。Beacham 等人指出：“低背景水平对于探测罕见事件至关重要，特别是在搜索极低产生截面的新物理信号时”^[37]。然而，这种方法也面临技术挑战，主要是对特别长寿命粒子的探测效率较低，以及对极低分支比衰变模式的信号统计不足。

然而，自发衰变探测也面临一些技术挑战。最主要的限制在于探测效率与粒子寿命的关系。对于特别长寿命的粒子，其在有限探测体积内自发衰变的概率极低，可能需要更长的数据采集时间或更大规模的探测系统。此外，对于极低分支比的衰变模式，信号统计量可能不足，需要开发更灵敏的触发和数据获取系统。同时，自发衰变探测系统应采用低密度材料构建，以最小化粒子在传播过程中的能量损失和多重散射，避免干扰粒子的自然衰变过程。

有机闪烁体探测器因其成本低廉的同时结构简单，成为远端探测器的理想选择。这种探测器能够在不显著干扰粒子运动的情况下，有效捕捉衰变产物并提供精确的时空信息。特别是当与先进的光电读出系统结合时，可实现纳秒级

的时间分辨率和毫米级的位置分辨率。这些光电器件相比传统光电倍增管具有工作电压低、对磁场不敏感、体积小巧等优势，使得探测系统更加紧凑高效。此外，现代高速数字化电子学系统能够实现多通道并行读出，配合先进的波形采样和数字信号处理算法，可以有效区分不同类型的粒子信号，提高触发效率和数据获取质量，为捕获那些极低分支比的衰变事件提供了技术保障。

本研究采用 Belle II 实验为 GAZELLE 探测器设计的几何参数，构建了基于有机闪烁体的远端探测器模型，用于模拟 K_L^0 粒子穿出 KLM 探测器后在远端位置的探测情况。通过系统的模拟研究，为远端探测器的优化设计提供了坚实的数据基础。这种基于已有设计参数的研究方法，使我们能够评估有机闪烁体探测器在特定几何构型下的性能表现，为未来类似探测器的设计提供重要参考。

二、 基于铁靶-有机闪烁体的 μ 子探测器

在高能物理实验中，精确识别 μ 子等长寿命粒子对于研究稀有衰变过程和新物理现象具有重要意义。为实现这一目标，我们采用铁靶-有机闪烁体结构的探测系统，该设计充分利用两种材料的互补物理特性，实现高效率、高精度的粒子探测。

铁靶在粒子探测中具有独特的物理功能。首先，铁材料因其高原子序数和高密度特性，能够有效区分 μ 子与其他粒子。当高能粒子穿过铁靶时，电子和光子会产生电磁簇射并被完全吸收；强子（如质子、中子、 π 介子等）通过强相互作用与铁原子核发生非弹性碰撞，导致能量损失或被完全阻止；而 μ 子作为轻子，主要通过电离过程损失能量，穿透能力显著高于其他粒子^[1]。其次，铁靶同时作为超导磁体的磁通回路，优化了整体实验装置的磁场分布，提高了探测系统的几何接受度。铁靶的厚度经过计算，足以使大多数强子发生强相互作用并被吸收，同时允许特定动量阈值以上的 μ 子穿透并被后续探测器记录。

有机闪烁体作为粒子探测材料具有多项物理优势。首先，其具有优异的时间响应特性，亚纳秒级的时间分辨率有助于精确的事件重建和背景抑制。其次，有机闪烁体表现出较高的辐射硬度，能在高辐射环境下保持长期稳定的性能。第三，闪烁体的光输出与入射粒子的能量损失呈线性关系，提供了粒子能量沉积的精确测量。此外，有机闪烁体的光收集效率高，通过波长位移光纤和光电倍增器的组合，能够实现高效的信号转换和读出。

铁靶-有机闪烁体结构的组合优势体现在多个方面。铁靶提供了有效的粒子筛选和能量调制功能，而有机闪烁体则提供了精确的位置和时间信息。当 μ 子

穿过铁靶后，其能量降低到适合有机闪烁体探测的范围，产生的闪烁光被高效收集并转换为电信号。这种“筛选-探测”的级联策略显著提高了整体探测系统的信噪比和探测效率。在高亮度对撞机环境下，铁靶-有机闪烁体探测器系统能够在高背景通量条件下维持稳定的探测效率，为精确的粒子识别提供可靠保障。通过优化铁靶和有机闪烁体的物理参数，该设计能够在保证高 μ 子识别效率的同时，有效抑制背景干扰，为高能物理实验提供高灵敏度、高可靠性的粒子探测解决方案。

本研究所开发的铁靶-有机闪烁体探测系统是针对环形正负电子对撞机(CEPC)物理需求而设计的。作为探测器系统的重要组成部分，该子系统将与其他探测单元协同工作，构成完整的粒子识别框架。通过详细的蒙特卡洛模拟研究了该系统在各类物理过程中的响应特性，评估了其在不同实验条件下的性能表现。这些模拟结果为探测器的工程设计和优化提供了重要依据，有助于确保最终实现的探测系统满足CEPC精密物理测量的要求。

为了系统地研究和优化上述两种探测器系统的性能特性，我们需要借助先进的蒙特卡洛模拟工具进行详细分析。无论是基于自发衰变原理的长寿命粒子远端探测器，还是利用铁靶-有机闪烁体结构的 μ 子探测器，其物理性能和探测效率都受到多种因素的复杂影响，包括材料选择、几何构型、光学特性以及电子学读出系统等。通过精确的计算机模拟，我们可以在实际建造前评估不同设计方案的性能表现，优化关键参数，并预测在实际实验条件下的探测效率和分辨能力。在下一节中，我们将介绍Geant4模拟框架，这是本研究中用于探测器响应模拟和性能评估的核心工具，它为我们理解粒子与探测器材料的相互作用过程、优化探测器设计以及制定实验策略提供了强大的计算支持。

第六节 Geant4 模拟框架

Geant4 是一种先进的蒙特卡洛模拟工具包，用于研究粒子与物质相互作用的复杂过程。该框架在高能物理、核物理、加速器物理、空间科学和医学物理等领域具有广泛的应用价值。Geant4 采用面向对象的设计方法和 C++ 语言实现，由 CERN、KEK、SLAC 等国际研究机构组成的合作团队于 1994 年开始开发，目前已成为粒子物理模拟的标准工具之一。其名称“GEANT”源自法语“GEometry ANd Tracking”（几何与径迹追踪）的缩写，数字“4”表示它是该系列软件的第四代产品。

Geant4 的核心功能包括粒子传输、物理过程模拟、探测器几何构建和事件数据管理等。它能够模拟从 eV 到 TeV 能量范围内的各类粒子（如光子、电子、强子和离子等）在物质中的行为，包括电磁相互作用、强相互作用、弱相互作用以及光学过程。该工具包提供了丰富的物理模型库和灵活的用户接口，使研究人员能够根据具体需求构建复杂的实验装置模型，并进行高精度的模拟计算。此外，Geant4 还支持多线程并行计算和可视化功能，大大提高了模拟效率和结果分析的便捷性。作为开源软件，Geant4 不断更新迭代，持续融入最新的物理模型和计算技术，为全球科研工作者提供了强大而可靠的模拟平台。

一、 理论基础与架构

Geant4 的理论基础建立在粒子物理学的基本原理之上，包括量子电动力学、强相互作用理论和核物理学等。其架构采用层次化设计，主要由基础层、核心功能层和管理层组成。基础层提供了物理常量、材料属性和几何描述等基本功能；核心功能层实现了粒子追踪和物理过程模拟；管理层则负责事例处理和运行控制。该框架采用统一的物理过程处理机制，通过计算相互作用长度和执行相互作用两个关键步骤来模拟粒子的行为。这种方法使得不同类型的物理过程可以在同一框架下协同工作，从而实现了高度的模块化和可扩展性。

二、 物理过程模拟能力

Geant4 能够模拟从 250 eV 到数 PeV 能量范围内的各种物理过程，包括电磁相互作用、强相互作用、衰变过程和光学过程等。电磁相互作用模型涵盖了电离、韧致辐射、多重散射、康普顿散射、光电效应和对产生等过程；强相互作用模型则包括弹性散射、非弹性散射和核反应等。这些物理模型基于理论计算、实验数据和参数化方法，经过了广泛的验证和测试。模型的开放性和透明性使研究人员能够根据特定研究需求选择或修改适当的物理模型，从而在精度和计算效率之间取得平衡。

三、 几何建模与计算优化

Geant4 提供几何建模能力，支持复杂探测器系统的精确表达。其几何描述基于逻辑体积和物理体积的概念，能够有效地表示从简单到复杂的各种探测器结构。为了提高计算效率，Geant4 实现了多种优化算法，使得在复杂几何中的粒子传播计算更加高效。这些优化方法对于模拟包含大量探测器元件的现代高

能物理实验至关重要。

四、 应用领域

Geant4 还在医学物理（如放射治疗计划、医学成像）、空间科学（如卫星辐射环境模拟）、核物理和加速器设计等领域得到广泛应用。在高能物理实验中被广泛应用于探测器设计优化、物理分析和数据重建，对于理解探测器性能和解释实验数据起到重要作用。在本研究中，我们利用 Geant4 构建了基于闪烁体的远端探测器模型，用于研究长寿命粒子的探测效率。通过几何构建、材料定义、物理过程和光学传输模拟，我们系统地研究了不同设计参数对探测效率的影响，为实际探测器的优化设计提供依据。

第七节 研究内容与论文结构

本研究涵盖两个相互独立但在技术方法上相关的研究方向：一是基于 Belle II 实验中 GAZELLE 探测器设计原型的远端探测器优化研究；二是 CEPC 实验缪子探测器的模拟设计与 DD4hep 系统集成。通过 Geant4 模拟框架，本研究从不同角度探索了有机闪烁体探测器在高能物理实验中的应用与优化。以下将详细阐述本研究的具体目标、研究内容以及论文的整体结构安排，为读者提供对本研究的全面理解。

一、 研究目标与内容

本研究包含两个主要研究方向，它们建立在共同的基础工作之上，但各有不同的研究目标与应用场景：

作为两个研究方向的共同基础，我们首先在 Geant4 模拟框架下完成了以下工作：

在材料模拟层面，研究闪烁体材料的光学特性及其表面处理方法。通过在 Geant4 中建立精确的材料模型，模拟粒子与闪烁体的相互作用过程，包括能量沉积、光子产生和传输等物理过程。

在单元结构层面，研究闪烁体条的不同设计方案及其对探测效率的影响。通过改变闪烁体条的几何参数（长度）和光读出方式（如光纤嵌入方式、光纤直径），系统评估不同实际配置下的光子收集效率，为单元探测器的优化设计提供依据。

基于上述共同的基础工作，本研究进一步展开了两个不同的研究方向：

第一个研究方向是基于 Belle II 实验中 GAZELLE 探测器设计原型的远端探测器优化研究。本研究使用 Belle II 实验中的 GAZELLE 探测器的几何参数，构建了一个基于有机闪烁体超层结构的远端探测器，重点评估有机闪烁体探测器在这一特定设计框架下的性能表现。在这一研究方向中，我们在整体布局层面构建了基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器模型，模拟 K_L^0 粒子及其衰变产物在探测器中的行为。评估不同配置下的探测效率，分析探测器尺寸对衰变事件立体角覆盖的影响，为探测器的整体布局优化提供指导。

第二个研究方向是 CEPC 实验缪子探测器的模拟设计和与其他探测器的集成。在这一方向中，我们的主要目标是设计 CEPC 实验中的缪子探测器，并将其集成到 CEPCSW 软件框架中。在这一研究方向中，我们主要完成了以下工作：首先，设计了缪子探测器的桶部和端盖结构，包括整体几何布局、超层结构设计和组装方式等。其次，通过桶部与端盖的协同设计，计算缪子探测器的有效面积，确保探测器的整体性能满足 CEPC 实验的要求。最后，实现了缪子探测器在 CEPCSW 软件框架中的集成，并通过参数分离与探测器结构简化等方法提高模拟效率和可维护性。

这两个研究方向虽然在具体目标和应用场景上有所不同，但都使用有机闪烁体超层进行构建，探讨了高能物理实验中有机闪烁体探测器技术的应用和发展潜力。

二、 论文结构安排

本论文的结构安排遵循从基础理论到具体应用、从共同基础工作到特定研究方向的逻辑框架，共分为七章，内容组织如下：

第一章为引言，介绍高能物理学与标准模型的基本概念，阐述长寿命粒子的定义、产生机制及探测方法。分析长寿命粒子探测的科学意义与技术挑战，介绍参考标准粒子 K_L^0 和 μ 子的物理特性，以及基于自发衰变的长寿命粒子远端探测器和基于铁靶-有机闪烁体的 μ 子探测器的基本原理和选择依据。此外，还概述了本研究使用的 Geant4 模拟框架的理论基础、架构和应用领域，以及本研究的主要目标与内容。

第二章为 Belle II 实验和 CEPC 实验概述，介绍 SuperKEKB 加速器和 Belle II 探测器的整体结构及各子探测器系统，重点描述 GAZELLE 远端探测器的设计理念和物理潜力。同时，概述环形正负电子对撞机（CEPC）实验的加速器设计、性能参数和科学意义，并简要介绍本研究中使用的探测器模拟框架。这一

章为后续两个研究方向提供了必要的实验背景知识。

第三章阐述有机闪烁体超层探测器的工作原理，包括有机有机闪烁体的发光机制、光子在闪烁体中的传输过程、SiPM 的光电信号转换原理及性能参数，以及闪烁体超层结构的坐标重建方法。这些理论基础是两个研究方向共同依赖的物理知识，为后续的模拟研究提供了必要的理论依据。

第四章为闪烁体探测单元的模拟与优化，这是两个研究方向的共同基础工作。首先介绍 Geant4 模拟框架与物理过程，然后进行有机闪烁体材料模拟，确保可以正确激发光子并接收信息。接着进行单条闪烁体模拟，比较不同光纤耦合方式（如光纤嵌入方式、光纤直径）和闪烁体条长度等结构参数对光子收集效率的影响，为后续两个研究方向中探测器的设计与优化提供基础数据支持。

第五章为基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器设计与优化，这是第一个研究方向的具体内容。本章介绍远端探测器的设计原理与模型构建，原型探测器尺寸选择考量，以及参数化模拟框架的实现。通过对比不同探测单元结构下的探测效率差异，以及系统分析探测器尺寸参数对立体角覆盖的影响，为远端探测器的整体布局优化提供指导，展示了基于成熟设计原型进行针对性优化的研究方法。

第六章为 CEPC 实验的缪子探测器设计，这是第二个研究方向的具体内容。本章详细介绍缪子探测器桶部和端盖的设计方案，包括整体几何布局、超层结构设计和组装方式等。通过桶部与端盖的协同设计，计算缪子探测器的有效面积，确保探测器的整体性能满足 CEPC 实验的要求。此外，还介绍了缪子探测器在 CEPCSW 中的集成实现，以及通过参数分离与探测器结构简化等方法提高模拟效率和可维护性的优化策略。

第七章为总结与展望，归纳两个研究方向的主要成果，分析研究局限性，并提出未来研究方向。对于远端探测器研究，未来发展方向包括：采用其他模拟软件进行精细化的电子学模拟；利用 DD4hep 框架将其与其他 Belle II 探测器集成模拟，更真实地模拟实际情况；拓展拼接探测器单元，模拟结构更加复杂、尺寸更大的远端探测器。对于缪子探测器设计，未来发展方向包括：根据 CEPCSW 的重建结果进一步优化参数；与负责实际建造的机械组协调，分析参数在实际机械建造中的可行性，更加精细化地模拟实际探测器的结构；优化算法，进一步减小占用内存。

本论文的结构设计清晰地展示了从共同基础工作到两个特定研究方向的研

究路线，涵盖了从物理基础到技术实现的完整链条。通过这种结构安排，能够全面展示有机闪烁体超层探测器在不同高能物理实验中的应用与优化，为未来的相关研究提供有价值的参考。

第二章 Belle II 实验和 CEPC 实验

第一节 Belle II 实验

一、 SuperKEKB 加速器

SuperKEKB 是位于日本茨城县筑波市的高能加速器研究机构 KEK 上的能量不对称正负电子对撞机，是对原 KEKB 加速器的全面升级^[1]。作为目前世界上亮度最高的粒子对撞机，SuperKEKB 代表了高能加速器技术的最新发展，对于推进粒子物理前沿研究具有重要意义。它使用与 KEKB 相同的隧道，但采用了全新的“纳米束”（Nano-Beam）对撞方案^[1]。中心质量能量为 10.58 GeV，对应于 $Y(4S)$ 共振态的质量，其衰变到 $B\bar{B}$ 介子对，因此被称为 B 介子工厂。

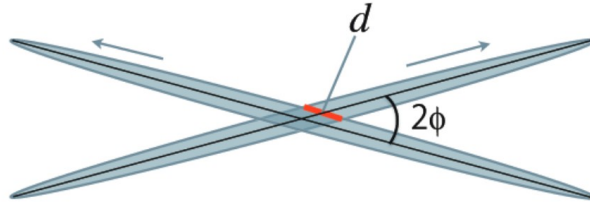


图 2.1 纳米束方案中束流对撞的示意图。在该方案中，两束以较大的交叉角相交，使得有效重叠区域长度 d 远小于束长 σ_z ^[1]。

SuperKEKB 最主要的升级是采用了“纳米束”对撞方案。简单来说，这种方案通过让两束粒子以较大角度相交，大幅减小了它们的有效相互作用区域。如图 2.1 所示，该方案的核心思想是通过较大的交叉角使由水平交叉角 ϕ 和交互点处的水平束斑尺寸 σ_x^* 决定的两束在交互点的有效重叠区域长度 d 缩短：

$$d \approx \frac{\sigma_x^*}{\phi} \quad (2.1)$$

在传统的对撞中，由于“沙漏效应”（hourglass effect），垂直贝塔函数受到束长 σ_z 的限制： $\beta_y^* > \sigma_z$ 。而在纳米束方案中，这一限制条件变为： $\beta_y^* > d$ 。通过采用较大的交叉角（41.5 mrad）和极小的水平发射度，SuperKEKB 能够将 β_y^* 压缩到亚毫米水平，比 KEKB 小约 20 倍。这种创新设计是实现超高亮度的关键。

纳米束设计使 SuperKEKB 能够实现前所未有的高亮度。在粒子物理中，亮度是衡量对撞机性能的关键指标，定义为单位时间、单位面积内的粒子对撞次数，直接决定了实验可以收集的物理事例数量。

SuperKEKB 拥有两个周长约为 3 公里的正负电子环：能量为 4.0 GeV 的正电子低能量环（LER）和能量为 7.0 GeV 的负电子高能量环（HER）。相比 KEKB，SuperKEKB 的束流能量从 3.5/8.0 GeV 调整为 4.0/7.0 GeV，这一变化有助于减轻 LER 中的束内散射和 Touschek 效应，同时有利于 HER 获得更低的发射度。

表 2.1 SuperKEKB 与 KEKB 主要参数对比^[1]

参数	KEKB 实现值	SuperKEKB 设计值
能量 (GeV) (LER/HER)	3.5/8.0	4.0/7.0
垂直束团参数 ξ_y	0.129/0.090	0.090/0.088
垂直贝塔函数 β_y^* (mm)	5.9/5.9	0.27/0.41
束流电流 I (A)	1.64/1.19	3.60/2.62
亮度 ($10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	2.1	80

如表2.1所示，SuperKEKB 的设计亮度为 $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，比 KEKB 高约 40 倍。这一显著提升主要通过大幅降低垂直贝塔函数、提高束流电流和减小水平发射度三方面实现，其中垂直贝塔函数的压缩是最关键的技术突破。

由于束流不对称性，Y(4S) 在产生时在电子束流方向有一个推进（boost）： $\beta\gamma = E_{\text{her}}/E_{\text{ler}} = 0.28$ 。两个 B 介子在 z 方向飞行距离平均约为 $200 \mu\text{m}$ ，Belle II 探测器的像素顶点探测器拥有足够好的分辨率，能测量这个区别。

为实现纳米束方案和高亮度目标，SuperKEKB 对多个关键子系统进行了全面升级。磁铁系统重新布局，调整了两环偏转磁铁长度和弧段单元数量，以降低发射度。射频系统采用 ARES 腔和超导腔组合，支持更高束流电流。真空系统使用副室结构和表面处理技术，减小束流阻抗并抑制电子云效应。注入系统升级包括新建阻尼环和光阴极射频电子枪（如图2.2所示），以提供低发射度束流。束流仪器系统也得到增强，改进了束流监测和反馈能力。

这些设计和升级使 SuperKEKB 能够实现其前所未有的高亮度目标，为 Belle II 实验提供丰富的物理数据，有助于探索新物理现象和精确测量标准模型参数。

Belle II 探测器是对原 Belle 探测器的全面升级，旨在适应 SuperKEKB 加速器提供的高亮度环境。如图2.3所示，Belle II 探测器保持了与 Belle 相似的整体结构，但几乎所有子探测器都进行了重大改进，以应对预期增加 20 倍的本底水平和 50 倍的物理事例率。这些改进旨在维持甚至提高探测器的性能，使 Belle II

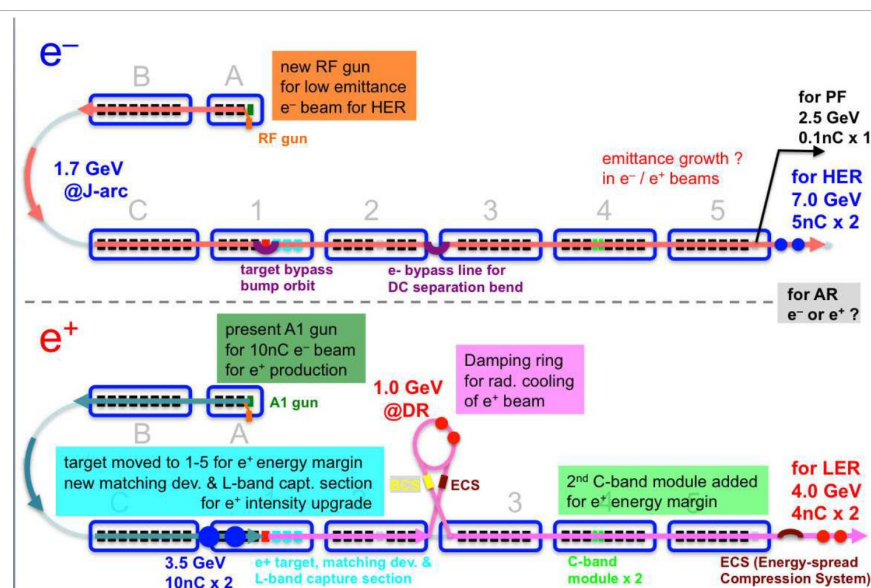


图 2.2 SuperKEKB 注入器示意图，包括线性加速器和阻尼环^[1]。

能够充分利用 SuperKEKB 提供的高亮度优势，实现精确测量标准模型参数和探索新物理的目标。

二、 Belle II 探测器概述

Belle II 探测器装置在 1.5 特斯拉超导螺线管和铁基结构中，超导磁铁提供的磁场方向平行于束流管的方向，使得运动的带电粒子发生偏转。探测器由多个子系统组成，从内到外依次为：束流管、像素顶点探测器 (PXD)、硅顶点探测器 (SVD)、中心漂移室 (CDC)、粒子鉴别系统、电磁量能器 (ECL) 以及 K_L 和 μ 探测器 (KLM)。

为了在高本底环境下保持与 Belle 相当或更好的性能，Belle II 探测器进行了一系列关键改进。在束流管外部增加了基于 DEPFET 技术的两层硅像素探测器；扩展了硅顶点探测器并采用更快的 APV25 芯片读出；中心漂移室采用更小的漂移单元；粒子鉴别系统升级为高性能的切伦科夫成像技术；电磁量能器电子学采用波形采样技术；KLM 探测器端盖部分替换为闪烁体；数据获取系统全面升级以处理更高事例率等等。这些改进使 Belle II 能够在高亮度环境下维持优异的物理性能。

• 束流管

相互作用区域的束流管由铍材料制成，内半径为 10 毫米，采用双壁结构，

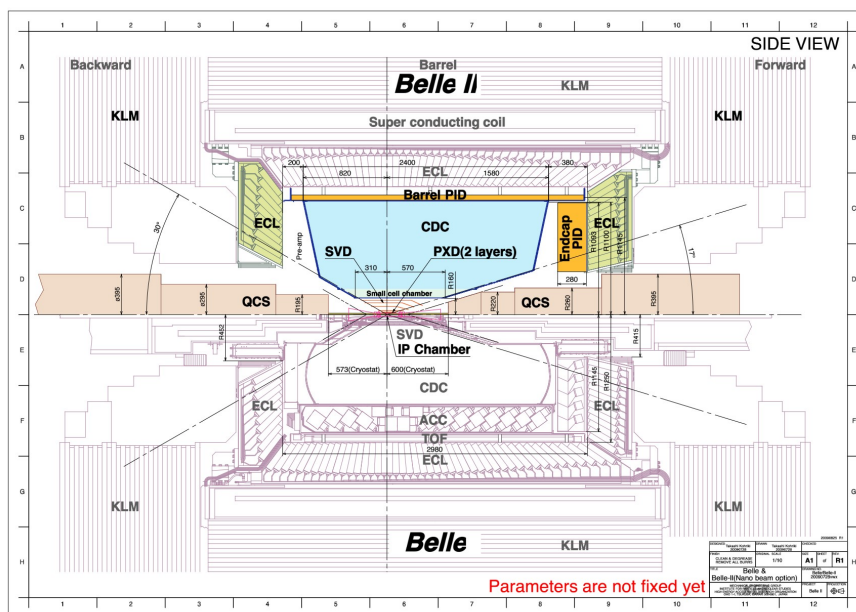


图 2.3 Belle II 探测器 (上半部分) 与原 Belle 探测器 (下半部分) 的对比^[1]。

中间有间隙用于液体冷却剂 (石蜡)。内表面镀有金层, 以减少到达 PXD 的同步辐射光子数量。束流管的设计旨在减少多重库仑散射, 同时为顶点探测器提供足够的保护。

- **像素顶点探测器 (PXD)**

像素顶点探测器是 Belle II 的全新子探测器, 由两层 DEPFET(耗尽场效应晶体管) 传感器组成, 半径分别为 14 毫米和 22 毫米。DEPFET 像素传感器是一种单片结构, 在单个器件中结合了探测和放大功能, 像素尺寸约为 50 微米。PXD 的引入显著提高了顶点重建的分辨率, 对于测量 B 介子衰变顶点和短寿命粒子的衰变至关重要, 这是 Belle II 物理研究计划中的核心要求。

- **硅顶点探测器 (SVD)**

Belle II 的 SVD 由四层双面硅条探测器 (DSSD) 组成。与 Belle 的 SVD 相比, Belle II 的 SVD 具有更大的覆盖范围, 并采用了更先进的读出电子学。这种设计显著提高了 $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 衰变的重建效率, 因为更多的 K_S^0 衰变会在硅探测器内发生并留下击中信号。SVD 覆盖的极角范围为 $17^\circ < \theta < 150^\circ$, 为带电粒子径迹重建提供了精确的位置信息。

- **中心漂移室 (CDC)**

中心漂移室在 Belle II 探测器中扮演三个重要角色：重建带电径迹并精确测量其动量；通过测量气体体积内的能量损失提供粒子鉴别信息；为带电粒子提供高效可靠的触发信号。CDC 包含 56 层导线，其中 32 层为轴向层，24 层为立体层。相比 Belle 的 CDC，Belle II 的 CDC 具有更小的漂移单元和更大的体积，以提高径迹重建效率和动量分辨率，尤其是在高本底环境下。

- **粒子鉴别系统**

Belle II 采用了全新的粒子鉴别系统，包括桶部的飞行时间传播 (TOP) 计数器和端盖的气凝胶环形成像切伦科夫探测器 (ARICH)。在桶部区域，TOP 计数器测量切伦科夫光子在石英辐射体内部全反射传播的时间。切伦科夫图像通过两个坐标和精确的时间信息重建，时间由石英棒端面的微通道板光电倍增管确定。在前端盖区域，ARICH 探测器被设计用于在大部分动量范围内分离 K 介子和 π 介子，并在低动量区分 π 介子、 μ 介子和电子。ARICH 使用气凝胶辐射体和混合雪崩光电二极管光电探测器。两种新型粒子鉴别装置将 π/K 分离能力扩展到实验的动量极限，显著提高了 Belle II 的物理潜力，特别是对于依赖精确粒子鉴别的稀有衰变和 CP 破坏测量。

- **电磁量能器 (ECL)**

由于 B 介子衰变产物中约三分之一是 π^0 或其他提供光子的中性粒子，高分辨率电磁量能器是 Belle II 探测器的重要组成部分。Belle 电磁量能器由桶部和两个端盖组成，覆盖了广泛的极角范围。量能器使用 CsI(Tl) 晶体，采用塔式结构。Belle II 对 ECL 的主要升级是电子学系统，采用波形采样技术，能够显著减少噪声堆积，这对于缺失能量研究尤为重要。端盖区域的晶体可能会在未来升级为纯 CsI 晶体，以提高辐射耐受性和时间响应。这些改进使 ECL 能够在高亮度环境下保持优异的能量分辨率。

- **K_L 和 μ 探测器 (KLM)**

K_L 和 μ 探测器 (KLM) 由铁板和有源探测元件交替组成的夹层结构组成，位于超导螺线管外部。铁板作为螺线管的磁通回路，同时提供足够的材料使 K_L 介子产生强子簇射。桶部和端盖共同覆盖了广泛的极角范围。由于 RPC 在高环境率下的预期效率降低，Belle II 的端盖配备了闪烁体条。桶部区域仍使用 RPC，但内层可能采用比例模式运行，以应对高本底环境。这些改进使 KLM 能够在高亮度环境下保持高效的 K_L 和 μ 探测能力。

- 触发和数据获取系统

Belle II 的触发系统要求包括强子事例的高效率、较高的触发率、低延迟和高精度的时间测量。触发系统包括子触发系统和全局决策逻辑系统，整合各个子探测器的信息做出决策。数据获取系统根据触发决策读出探测器信号，并通过多个数据处理步骤将数据传输到存储系统中。Belle II 的 DAQ 系统经过全面升级，能够处理高达 50 倍于 Belle 的事例率，并实现高效的在线数据处理和筛选。这些改进使 Belle II 能够充分利用 SuperKEKB 提供的高亮度，收集大量数据用于精确测量和新物理探索。

- 预期性能

Belle II 探测器在多个方面提供了显著的性能改进。顶点分辨率因两个内层像素探测器的优秀空间分辨率而提高；重建 $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 衰变的效率因硅顶点探测器覆盖更大体积而提高；桶部和端盖区域的新型粒子鉴别装置将 π/K 分离扩展到动量极限；电磁量能器的新电子学显著减少噪声堆积，对缺失能量研究尤为重要。这些改进共同作用，使 Belle II 能够实现其物理目标，包括精确测量 CKM 矩阵参数、研究稀有 B 和 D 介子衰变、探索新物理现象等。表 2.2 总结了 Belle II 探测器各组件的预期性能。

表 2.2 Belle II 探测器各组件的预期性能^[1]

组件	性能指标	预期值
PXD+SVD	顶点分辨率	$\sigma_{z0} \sim 20 \mu\text{m}$
CDC	动量分辨率	$\sigma_{p_t}/p_t = \sqrt{(0.1\%p_t)^2 + (0.3\%/\beta)^2}$
TOP	K/π 分离	$> 99\%$ 效率, $< 0.5\%$ π 错误率
ARICH	K/π 分离 (4 GeV/c)	96% 效率, 1% π 错误率
ECL	能量分辨率	$\sigma_E/E = 0.2\%/\sqrt{E} \oplus 1.6\%/\sqrt[4]{E} \oplus 1.2\%$
KLM	K_L 方位角分辨率	$\Delta\phi = \Delta\theta = 20 \text{ mrad}$

总之，Belle II 探测器是一个高度先进的粒子物理实验装置，其设计旨在充分利用 SuperKEKB 加速器提供的高亮度环境，为精确测量和新物理探索提供强大的工具。通过对各个子探测器的全面升级，Belle II 将能够在高本底环境下保持优异的物理性能，实现对标准模型的严格检验和对新物理的深入探索。

第二节 GAZELLE 远端探测器

GAZELLE (GAZELLE is the Approximately Zero-background Experiment for Long-Lived Exotics) 是一个为 Belle II 实验设计的远端探测器，旨在探测长寿命

粒子的衰变^[45]。在标准模型之外的新物理尚未被高能对撞机实验明确观测到的情况下，GAZELLE 作为 Belle II 的补充探测器，提供了探索轻质量且弱耦合隐藏粒子领域的新途径。

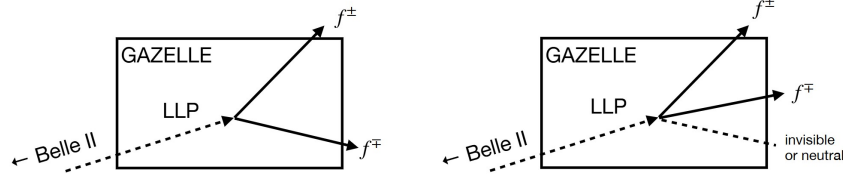


图 2.4 GAZELLE 中的信号事例示意图：(左) 没有额外中性粒子的两个带电粒子信号；(右) 有额外中性或不可见粒子的两个带电粒子信号^[45]。

一、 探测器设计与配置

GAZELLE 探测器的物理要求包括约 100 ps 的时间分辨率、约 1 μ s 的延迟时间以及约 10 cm 的顶点分辨率。在设计时考虑了三种不同的探测器配置，如图 2.5、2.6 和 2.7 所示：

- **Baby-GAZELLE (BG):** $(4 \times 4 \times 4) \text{ m}^3$ 的立方体形状，立体角覆盖为 0.12 sr (0.95% 角度覆盖)。
- **L-GAZELLE (LG):** 由两部分组成，LG-B1 尺寸为 $(6 \times 16 \times 24) \text{ m}^3$ ，立体角覆盖为 0.34 sr (2.7% 角度覆盖)；LG-B2 尺寸为 $(26 \times 16 \times 3) \text{ m}^3$ ，立体角覆盖为 0.76 sr (6.0% 角度覆盖)。
- **GODZILLA (GZ):** $(25 \times 10 \times 50) \text{ m}^3$ 的探测器，立体角覆盖为 0.74 sr (5.9% 角度覆盖)。

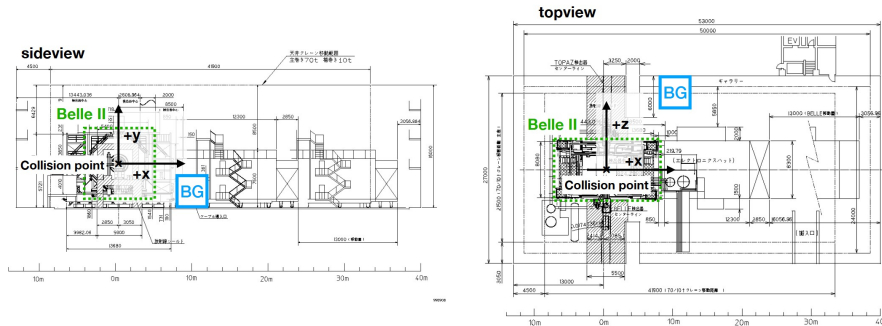


图 2.5 Baby-GAZELLE 探测器配置的 (左) 侧视图和 (右) 俯视图^[45]。

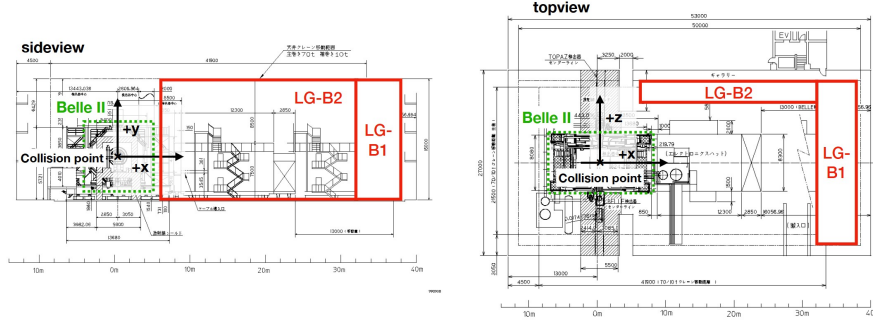


图 2.6 L-GAZELLE 探测器配置的 (左) 侧视图和 (右) 俯视图, 包括 LG-B1 和 LG-B2 两个组件^[45]。

对于探测器技术, 在设计过程中考虑了几种满足要求且成本效益高的选项, 包括闪烁纤维、闪烁板和多间隙电阻板室 (MRPC)。GAZELLE 探测器需要与 Belle II 读出系统同步, 理想情况下甚至与一级触发系统双向同步。

二、背景抑制与信号识别

GAZELLE 中的主要背景来源于初级 e^+e^- 碰撞和宇宙射线, 特别是中性 K_L^0 介子和 μ 介子的衰变。为了有效抑制这些背景, GAZELLE 采用了多种互补的背景区分策略。

由于 GAZELLE 距离 Belle II 相互作用点较远, 当背景粒子 (如宇宙射线或随机碰撞产生的粒子) 被错误地假设为来自 Belle II 相互作用点的长寿命粒子衰变产物时, 使用这一假设重建的粒子质量会不合理地大, 超出 SuperKEKB 碰撞能量所能产生的范围, 这提供了一种特别有效的背景区分方法。此外, 真实的长寿命粒子两体衰变具有特征性的平面几何结构——两个带电粒子径迹和连接衰变顶点到碰撞点的线位于同一平面上, 这一特性可用于拒绝宇宙 μ 介子诱导的背景事例。GAZELLE 与 Belle II 事例之间的时间关联要求进一步降低了背景水平。最后, 如果 Belle II 中可计算事例缺失动量矢量, 它必须指向 GAZELLE 中的顶点位置, 这为信号识别提供了额外的约束条件。

通过这些背景抑制措施的综合应用, GAZELLE 有望实现接近零背景的探测环境。

三、物理潜力与局限性

GAZELLE 探测器的设计过程考虑了多种长寿命粒子模型, 包括重中性轻子 (HNLs)、类轴子粒子 (ALPs) 和非弹性暗物质 (iDM)。这些模型在 Belle II 实验中

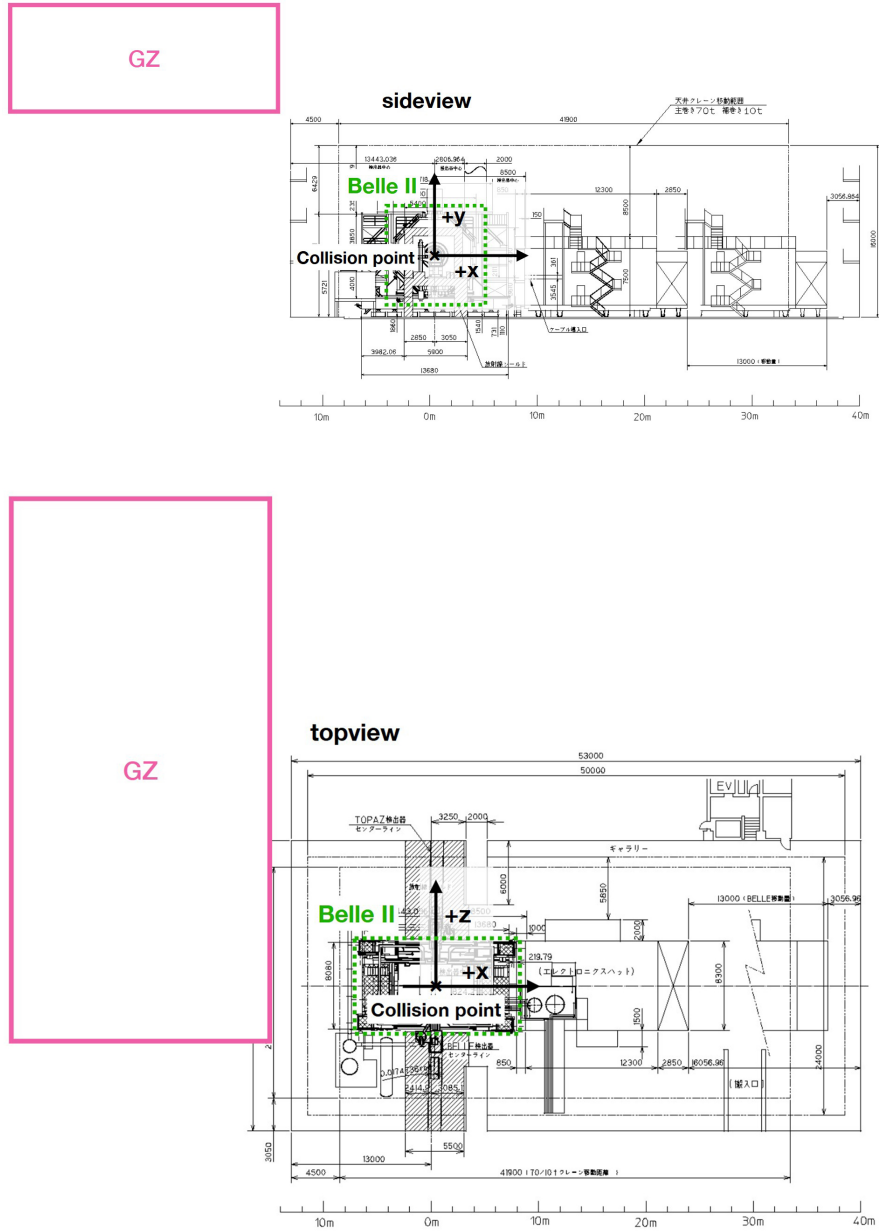


图 2.7 GODZILLA 探测器配置的 (上) 侧视图和 (下) 俯视图^[45]。

通过不同的产生机制形成，并产生具有不同运动学特征的衰变产物，为远端探测器的设计提供了重要参考。

物理分析表明，对于大多数参数空间，GAZELLE 对 Belle II 的灵敏度提升相对有限，大约为 $O(1)$ 倍。这一结果源于 Belle II 探测器本身在探测 100 MeV 至 GeV 能区中微弱耦合粒子方面已具备很高的灵敏度。尽管 GAZELLE 的角度覆盖相对较小，但其较大的径向深度使其对长寿命粒子的探测效率与 Belle II 主探测器相当。

然而，GAZELLE 在两种特定物理场景中展现出显著优势：首先，对于在正负电子碰撞中直接产生并主要沿束线方向发射的轻长寿命粒子，这些粒子通常落在 Belle II 探测器的盲区；其次，对于隐藏扇区中具有强相互作用的模型，如产生新兴喷注、通量管或高多重度末态的模型，GAZELLE 的大面积探测能力提供了独特的探测优势。这些特性使 GAZELLE 成为 Belle II 实验的有价值补充，能够探索主探测器难以覆盖的物理区域。

四、 前景与展望

尽管 GAZELLE 在一般情况下对 Belle II 的灵敏度提升有限，但其在特定物理场景中的独特优势仍然使其成为有价值的补充探测器。特别是在发现长寿命粒子事件的情况下，GAZELLE 将成为深入研究这些粒子衰变特性的关键工具，尤其是对于涉及非最小或强耦合暗扇区的物理过程。

理论分析表明，通过优化探测器设计和布局，特别是通过增加角度覆盖范围，GAZELLE 有可能将长寿命粒子的探测灵敏度提高至 Belle II 的两个数量级。这一潜力突显了远端探测器在扩展高能物理实验探测能力方面的重要作用。

此外，GAZELLE 的设计理念和技术方案对未来正负电子对撞机实验（如 ILC、CEPC 和 FCC-ee）的远端探测器设计具有重要参考价值。这类探测器应当优先考虑高效率的空间覆盖，包括大角度覆盖和足够的径向深度，以最大化其对长寿命粒子的探测能力，从而有效补充主探测器的物理研究范围。

第三节 环形正负电子对撞机（CEPC）概述

环形正负电子对撞机（Circular Electron Positron Collider, CEPC）是由中国发起并主导的大型科学实验，通过与国际合作伙伴的广泛合作推进^[46]。作为继大型强子对撞机（LHC）之后的下一代粒子对撞机，CEPC 旨在通过高精度测量

希格斯玻色子的性质，深入探索标准模型，并为超出标准模型的新物理提供实验依据。本节将介绍 CEPC 的基本设计、性能目标及其科学意义。

一、CEPC 加速器复合体设计

CEPC 加速器复合体由四个主要部分组成：30 GeV 的直线加速器（Linac）、1.1 GeV 的阻尼环（Damping Ring）、能量可达 180 GeV 的增强器（Booster）以及可在不同能量模式（Z、W、H 和 $t\bar{t}$ ）下运行的对撞机（Collider）^[46]。其中，直线加速器和阻尼环位于地表，而增强器和对撞机则位于周长为 100 公里的地下隧道中。这一设计不仅满足当前的物理研究需求，还为未来可能的超级质子-质子对撞机（SPPC）预留了空间。

对撞机环是 CEPC 加速器复合体的主要组成部分，其 100 公里的周长经过优化，以在产生希格斯粒子、Z 玻色子、W 玻色子和顶夸克对时实现最佳的性能-成本比。这一较长的周长设计也为未来 20 年内高场超导磁铁技术取得突破后，可能在同一隧道中建造 SPPC 提供了条件。CEPC 隧道将采用门形（宽 6 米、高 5 米）或圆形（直径 6.5 米）截面，能够同时容纳 CEPC 和 SPPC 的设备^[46]。

增强器位于地下约 100 米处，与对撞机共享相同的轨道布局，除了在 IP1 和 IP3 位置。对撞机和增强器都设有四个线性段（LS1-LS4），用于注入、提取和束流倾倒。对撞机有两个长直线段（IP1 和 IP3）用于安装探测器，另外两个长直线段（IP2 和 IP4）则用于射频（RF）系统^[46]。

二、性能参数与运行模式

CEPC 的周长是一个关键的基本设计参数。通过全面的研究，考虑到整体项目成本、所需粒子数量以及相应的每粒子成本，确定了希格斯运行模式下的最佳周长为 80 公里。然而，考虑到其他物理目标，如 Z 极运行、顶夸克工厂的高能升级以及潜在的 SPPC 项目，最终确定的最佳周长为 100 公里^[46]。

在基线设计中，为了降低运行成本，每束流的同步辐射功率限制在 30 MW。如果有额外的预算，CEPC 可以升级到 50 MW 以获得更高的亮度。在基线设计中，每个相互作用点（IP）的希格斯运行模式下的瞬时亮度为 $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，这意味着在两个 IP 上运行十年后，可以获得 13 ab^{-1} 的积分亮度，产生约 260 万个希格斯玻色子。如果将同步辐射功率提高到每束流 50 MW，CEPC 将能够产生 430 万个希格斯玻色子，使希格斯耦合的精确测量达到亚百分比水平，精度超过 HL-LHC 预期的一个数量级^[46]。

CEPC 的主要科学目标是建造一个希格斯工厂，因此束流能量设定为 120 GeV。然而，加速器的设计也兼容于在 45.5 GeV 和 80 GeV 能量下运行，分别用于 Z 玻色子和 W 玻色子的产生。在 30 MW 功率运行模式下，每个 IP 的希格斯运行瞬时亮度为 $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，Z 运行 115 $\times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，W 运行 16 $\times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ [46]。

三、 科学意义与未来展望

CEPC 作为一个希格斯工厂，将能够以前所未有的精度测量希格斯玻色子的性质，包括其质量、宽度、自耦合以及与其他粒子的耦合强度。这些测量对于理解电弱对称性破缺机制、探索超出标准模型的新物理以及解答宇宙早期演化等基本问题至关重要。

除了希格斯物理外，CEPC 还将在 Z 极和 W 阈值能量下运行，提供大量的 Z 和 W 玻色子样本，用于精确测量电弱参数、强相互作用耦合常数以及搜索稀有衰变过程。这些测量将极大地提高我们对标准模型的检验精度，可能揭示新物理的迹象。

CEPC 的设计还考虑了未来的升级路径。能量升级可以使 CEPC 达到顶夸克对产生阈值，而在同一隧道中建造 SPPC 的可能性则为未来的高能物理研究提供了长期发展方向。这种灵活性使 CEPC 成为一个具有持久科学价值的设施，能够在未来几十年内持续为粒子物理学的发展做出贡献[46]。

总之，CEPC 代表了粒子物理学实验设施的新一代，其精确测量能力将极大地扩展我们对基本粒子和相互作用的理解，可能引领我们发现超出标准模型的新物理，为解答宇宙的基本问题提供关键线索。

第四节 本研究中的探测器模拟框架

本研究包含两个相互关联但各具特色的探测器模拟工作，分别针对不同实验环境下的长寿命粒子探测需求：

首先，以为 Belle II 实验设计的远端探测器 GAZELLE 为原型，使用其几何参数模拟了一个有机闪烁体远端探测器。GAZELLE 作为一个专为长寿命粒子远距离衰变探测设计的装置，其结构参数和技术方案为我们提供了现实可行的参考基准。这部分工作聚焦于模拟并分析有机闪烁体探测器对 K_L^0 衰变产物的响应，以及不同几何参数对探测效率的影响，为长寿命粒子远端探测提供参考。

其次, 针对 CEPC 实验的主探测器系统, 本研究设计并模拟了缪子探测器组件。这一铁靶-有机闪烁体结构的探测器被整合到 `dd4hep` 框架中, 与其他探测器子系统共同构成完整的主探测器模型。通过在整体系统中运行事例模拟, 为缪子探测器的实际建造提供技术指导和优化建议。

这两项工作虽然针对不同的实验平台, 但在探测原理和技术实现上均是对有机闪烁体的应用。通过这两项研究, 可以深入理解不同实验环境下有机闪烁体探测器应对长寿命粒子探测的技术挑战和解决方案, 为未来相关探测器的设计提供全面参考。

接下来, 首先将介绍闪烁体超层探测器的基本工作原理, 包括其结构设计和信号产生机制。随后的章节将详细阐述基于 `Geant4` 的探测器模拟方法。

第三章 有机闪烁体超层探测器工作原理

闪烁体探测器是基于带电粒子通过物质时产生电离和激发的原理工作的。当高能带电粒子穿过闪烁体材料时，会沿其轨迹沉积能量，导致闪烁体分子被激发。这些被激发的分子在回到基态的过程中会发射特征波长的光子，即闪烁光^[47]。在有机闪烁体中，这一过程通常发生在纳秒量级的时间尺度内，使其成为高时间分辨率探测的理想选择。

第一节 有机塑料闪烁体的发光机制

本研究使用的 BC-420 有机塑料闪烁体是基于聚乙烯甲苯 (PVT) 基质的高性能闪烁材料，具有快速响应时间和较高的光输出效率，适合粒子探测应用。当电离辐射（如带电粒子或高能光子）穿过闪烁体时，能量首先被基质材料吸收，然后通过一系列复杂的分子激发和能量转移过程，最终产生可见光。这种能量转换机制是闪烁探测器工作原理的核心，可分为以下几个连续且相互关联的阶段^[47, 48]：

1. **能量沉积与激发**：入射带电粒子通过库仑相互作用将能量传递给闪烁体中的电子，导致基质分子被激发或电离。能量沉积的效率与入射粒子的电荷和比能量损失 (dE/dx) 相关。
2. **能量迁移**：被激发的基质分子通过非辐射能量转移将能量传递给主要掺杂剂分子。在有机闪烁体中，这一过程通常发生在皮秒至纳秒时间尺度内。
3. **主要发光**：主要掺杂剂分子被激发后，会发射紫外至可见光波段的光子。在 BC-420 中，发射峰值波长为 391 nm^[49]。
4. **波长位移**：在某些应用中，会添加次级掺杂剂分子以吸收主要发光并重新发射波长更长的可见光，以更好地匹配光电探测器的响应特性。

根据 Stokes 定律，发射光谱的波长总是大于吸收光谱的波长^[50]。在 BC-420 闪烁体中，吸收峰值约为 330 nm，而发射峰值约为 420 nm，这与商业有机闪烁体的特性相符。

第二节 光子传输机制

当粒子击中闪烁体后，产生的光子需要通过某种机制传播到闪烁体条末端的光电探测器。在本研究中，光子传输主要通过两种机制实现：

1. **内表面全反射：**由于闪烁体材料（折射率 $n \approx 1.58$ ）与周围空气（ $n \approx 1.0$ ）之间存在显著的折射率差异，当光线入射角大于临界角时，光子会在闪烁体内表面发生全反射。根据 Snell 定律，临界角 $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1) \approx 39.3^\circ$ 。这意味着约 60% 的发射光子可以通过全反射机制沿着闪烁体条传播。
2. **光纤导光：**对于长度较大的闪烁体条，仅依靠内表面全反射会导致大量光子因多次反射而损失。为提高光收集效率，在闪烁体内部嵌入了波长位移光纤。这些光纤能吸收闪烁体发出的蓝光（约 420 nm），并重新发射波长较长的绿光（约 490-500 nm）。由于波长位移光纤具有更高的折射率（约 1.60）和更长的衰减长度（>3 m），能更有效地将光信号传导至探测器端面。

光子在闪烁体中的传输效率受到多种因素影响，包括闪烁体材料的透明度、表面抛光质量、光纤的嵌入方式等。在长闪烁体条中，光子的收集效率与闪烁体长度呈指数衰减关系：

$$\eta(x) = \eta_0 \cdot e^{-x/\lambda_{att}} \quad (3.1)$$

其中 $\eta(x)$ 为距离光电探测器 x 距离处产生的光子的收集效率， η_0 为近端光子收集效率， λ_{att} 为有效衰减长度，综合考虑了材料的本征衰减长度和几何因素导致的光损失。

第三节 光电信号转换

闪烁光最终被安装在闪烁体条末端的硅光电倍增器 (SiPM) 探测。SiPM，在滨松公司的产品中又称为多像素光子计数器 (MPPC)，是一种由大量工作在盖革模式下的雪崩光电二极管 (APD) 微单元并联组成的新型光电探测器件^[51]。

一、 SiPM 的基本工作原理

每个 SiPM 由数千个 APD 微单元 (像素) 组成，每个微单元包含一个 PN 结和串联的淬灭电阻 (R_q)。当反向偏置电压超过击穿电压 (V_{BR}) 时，微单元处于高电场强度的亚稳态^[51]。此时，单个光子通过光电效应在硅材料中产生的电子-空

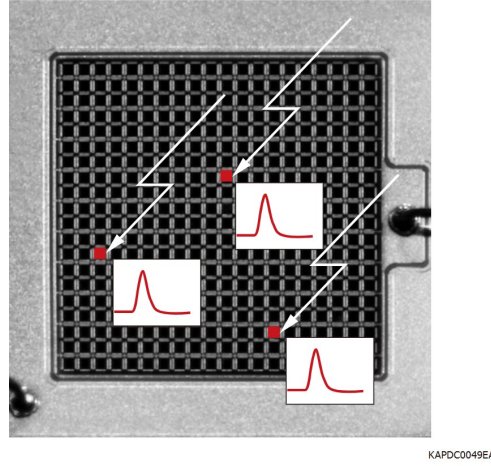


图 3.1 多像素光子计数器 (MPPC) 实物图及其内部微单元结构示意图。左侧为 MPPC 器件的外观，右侧为其内部由多个 APD 微单元组成的阵列结构。（图片来源：滨松光子公司）

穴对可触发雪崩倍增过程，产生约 10^5 - 10^6 个次级载流子，形成可测量的电流脉冲。

SiPM 的增益 (M) 定义为单个像素输出的电荷量 (Q) 与基本电荷 (e) 的比值：

$$M = \frac{Q}{e} = \frac{C_{pixel} \cdot (V_{bias} - V_{BR})}{e} = \frac{C_{pixel} \cdot V_{over}}{e} \quad (3.2)$$

其中， C_{pixel} 是单个像素的电容， V_{bias} 是施加的反向偏置电压， V_{over} 是过电压。SiPM 的增益与过电压成正比，典型值在 10^5 - 10^7 之间^[51]。

二、 SiPM 的关键性能参数

SiPM 的光子探测效率 (PDE) 是量子效率 (QE)、填充因子 (FF) 和雪崩触发概率 ($P_{avalanche}$) 的乘积^[51]：

$$PDE = QE \times FF \times P_{avalanche} \quad (3.3)$$

在我们的实验中使用的 SiPM，在 391 nm 波长 (BC-420 发射峰值波长) 处的 PDE 约为 40%。这一效率足以有效探测到闪烁体发出的光子。

SiPM 的其他重要性能参数包括暗计数率 (DCR)、串扰 (Crosstalk)、后脉冲 (Afterpulse) 和恢复时间 (Recovery Time)^[51]。这些参数会影响探测器的信噪比和时间分辨率。在我们的设计中，通过优化工作电压和温度控制，将 DCR 控制在合理范围内，以确保高信噪比。

三、 击中判定标准

在我们的设计中，当 SiPM 在接收到第一个光子后的 $\Delta t = 150 \text{ ps}$ 时间窗口内累积接收到至少 $N_{\text{th}} = 5$ 个光子时，判定为有效击中，即：

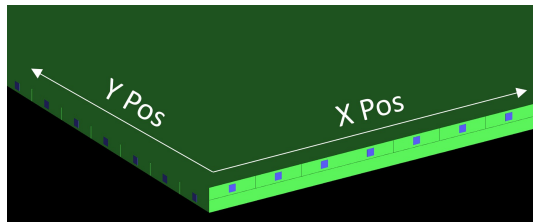
$$N_{\text{detected}}(t_0, t_0 + \Delta t) \geq N_{\text{th}} \quad (3.4)$$

其中 t_0 为首个光子的到达时间， N_{detected} 为时间窗口内探测到的光子数量， N_{th} 为阈值设置。这一判据基于对信噪比的优化，能有效抑制 SiPM 的暗计数和电子噪声影响，同时保持对最小电离粒子的高探测效率。

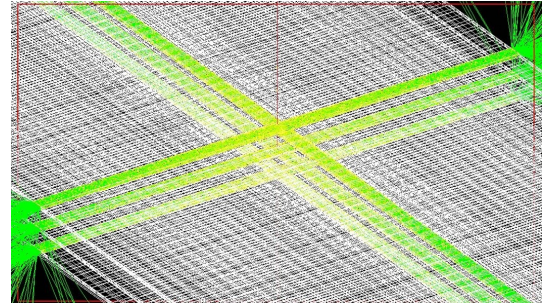
由于 SiPM 具有优异的单光子分辨能力和快速响应特性，我们能够实现约 100 ps 的时间分辨率^[51]，这对于精确测量粒子飞行时间和重建衰变顶点至关重要。

第四节 闪烁体超层结构与坐标重建

为实现对粒子轨迹的三维重建，本研究设计了闪烁体超层结构。如图3.2所示，每个超层由两层垂直排列的闪烁体条阵列组成。第一层闪烁体条沿 x 轴方向排列，第二层沿 y 轴方向排列，两层之间紧密相邻。每根闪烁体条的尺寸为 $4 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times L$ ，其中 L 为闪烁体条的长度，根据探测器整体设计需求可以调整。



(a) 超层的三维视图



(b) Geant4 模拟中 μ 子穿过超层的图像

图 3.2 闪烁体超层结构及其在 Geant4 中的模拟。(a) 展示了超层的基本结构设计，(b) 显示了带电粒子穿过超层时的模拟轨迹。

当带电粒子穿过闪烁体超层时，会在两层闪烁体中分别产生击中信号。通过记录被击中的闪烁体条的编号，可以确定粒子通过点的坐标：

- 第一层（ x 层）中被击中的闪烁体条编号 i_x 对应击中位置的 x 坐标：

$$x = w \cdot (i_x + 0.5 - N_x/2)$$

- 第二层 (y 层) 中被击中的闪烁体条编号 i_y 对应击中位置的 y 坐标:
 $y = w \cdot (i_y + 0.5 - N_y/2)$
- 超层的编号 i_z 对应击中位置的 z 坐标: $z = d_z \cdot (i_z + 0.5 - N_z/2)$

其中, $w = 4 \text{ cm}$ 为闪烁体条的宽度, N_x 和 N_y 分别为 x 和 y 方向上闪烁体条的总数, d_z 为相邻超层中心之间的距离, N_z 为超层的总数。对于纯闪烁体结构, $d_z = 2h$, 其中 $h = 1 \text{ cm}$ 为单层闪烁体条的厚度; 而对于铁靶-有机闪烁体结构, $d_z = 2h + h_{Fe}$, 其中 h_{Fe} 为铁靶的厚度。这种坐标系设置使得探测器的几何中心位于坐标原点, 便于后续分析。通过这种方式, 每个超层可提供一个三维空间点, 多个超层的击中信息可用于重建粒子的完整轨迹。

对于穿过探测器的高能带电粒子, 其轨迹近似为直线。假设有 n 个超层记录到击中信号, 得到空间点集 $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, n\}$, 则可通过最小二乘法拟合得到粒子轨迹:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + t \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 为轨迹上的一点, (v_x, v_y, v_z) 为方向向量。对于来自同一顶点的两条轨迹 (如 $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 衰变), 可通过求解两条轨迹的最近接近点来重建衰变顶点位置。

闪烁体超层的空间分辨率由探测器的几何结构决定。在我们的设计中, x 和 y 方向的单位长度为闪烁体条宽度 $w = 4 \text{ cm}$, z 方向的单位长度为超层厚度 $2h = 2 \text{ cm}$ 。由于粒子击中位置在闪烁体条内可视为均匀分布, 根据均匀分布的方差计算公式, 三个方向的空间分辨率分别为:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{w}{\sqrt{12}} \approx 1.15 \text{ cm} \quad \sigma_z = \frac{2h}{\sqrt{12}} \approx 0.58 \text{ cm} \quad (3.6)$$

这一空间分辨率足以对长寿命粒子的衰变顶点进行有效重建, 为研究其物理特性提供必要的实验基础。

第四章 闪烁体探测单元的模拟与优化

在前一章中，我们详细介绍了闪烁体超层的工作原理，包括有机塑料闪烁体的发光机制、光子传输过程、光电信号转换以及闪烁体超层的结构设计。本章将聚焦于构成这些超层的基本单元——闪烁体条的模拟与优化，这是理解和改进整体探测器性能的关键步骤。

本研究涉及的多个探测器实验，虽然应用场景不同，但都采用了相似的闪烁体条作为基本探测单元。因此，对闪烁体材料特性和单条闪烁体结构的深入模拟和优化，对于所有这些实验都具有普遍意义。通过 Geant4 模拟框架，我们建立了从微观材料特性到宏观探测效率的多尺度模拟方法，系统研究了影响闪烁体条性能的关键参数，为后续的探测器整体设计提供了可靠的理论和技术基础。

第一节 Geant4 模拟框架与物理过程

为了准确模拟闪烁体条的性能，本研究采用 Geant4 10.6.3 版本作为主要模拟工具。Geant4 提供了模拟粒子与物质相互作用的全面框架，特别适合于复杂探测器系统的设计和性能评估。

在物理过程设置方面，模拟采用 FTFP_BERT 参考物理列表，该列表适用于模拟高能粒子与物质的相互作用，包括强相互作用、电磁相互作用和衰变过程。此外，为了提高电磁相互作用模拟的精度，特别是在对低能电子和光子的处理上，我们添加了 G4EmStandardPhysics_option4 电磁物理模块。对于光学过程，我们启用了 G4OpticalPhysics 模块，以模拟闪烁光的产生、传播和探测过程。

模拟框架的设计遵循模块化原则，包括几何构建、材料定义、物理过程设置、粒子源配置和数据收集等模块。这种模块化设计使得模拟框架可以灵活应用于不同的闪烁体条配置，从单一材料特性研究到复杂的光纤读出系统评估。

第二节 闪烁体材料模拟

闪烁体探测器的核心组件是闪烁体超层，其探测性能直接决定了整个探测器系统的效率和分辨率。在进行复杂的探测器几何结构设计和性能评估之前，首

先需要确保闪烁体材料的模拟是准确可靠的。因为只有当基本的闪烁机制、光子产生、传输和收集过程被正确模拟后，才能保证后续的探测器整体模拟结果具有物理意义。

闪烁体材料模拟的主要目标是精确描述带电粒子在闪烁体中沉积能量并产生闪烁光子的过程，以及这些光子在材料内传播并最终被光电探测器收集的过程。这涉及多个物理过程，包括粒子能量损失、闪烁机制、光子传播、界面反射和折射等。通过调整材料参数和表面特性，可以使模拟结果尽可能接近实际闪烁体的物理行为。

本研究首先建立了单条闪烁体的详细模型，包括材料组成、光学特性和表面处理等参数，然后通过模拟高能粒子穿过闪烁体的事件，分析光子产生和收集的特性。这一基础工作为后续的单条闪烁体优化和整体探测器设计提供了可靠的参数依据。

一、 闪烁体材料特性

本研究中使用的 BC-420 有机塑料闪烁体材料具有以下特性参数，如表4.1所示。这些参数是在 Geant4 模拟中实际使用的关键参数^[49]。

表 4.1 BC-420 闪烁体的主要参数^[49]

参数	数值
基质材料	聚乙烯甲苯 (PVT)
密度	1.032 g/cm ³
折射率	1.58
光产额	10,240 光子/MeV
上升时间	0.5 ns
衰减时间	1.5 ns
发射峰值波长	391 nm
光衰减长度	140 cm

在 Geant4 模拟中，这些闪烁体参数通过 G4MaterialPropertiesTable 类定义，并与材料关联，以便光学过程能够正确模拟粒子与闪烁体的相互作用。特别是：光产额 (SCINTILLATIONYIELD) 参数直接决定了沉积能量转化为光子的效率，在模拟中表示为每单位能量 (MeV) 产生的光子数量；折射率 (RINDEX) 和光衰减长度 (ABSLENGTH) 控制光子在闪烁体内的传播行为，影响光子的反射、折射和吸收；而上升时间 (SCINTILLATIONRISETIME) 和衰减时间 (SCINTILLATIONTIMECONSTANT) 则定义了闪烁光的时间分布特性，对于精

确模拟光信号的时间响应至关重要。这些参数的准确设置确保了模拟结果能够反映闪烁体的物理特性。

二、 光学表面设置

闪烁体的光学表面特性对光子收集效率有显著影响。在本研究中，通过 `G4SubtractionSolid` 类构造一个单独的闪烁体表面，其光学特性则通过 `G4OpticalSurface` 类定义，表面类型设置为光滑 (polished)。为了更真实地模拟实际闪烁体条的光学特性，令表面吸收 10% 的入射光子。

三、 高能粒子入射模拟

为了验证闪烁体材料模型的有效性，需要模拟高能粒子入射闪烁体时的情况。配合前述光学表面，使用 `BC-420` 构建了一个尺寸为 $4\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 200\text{ cm}$ 的闪烁体条。在模拟中，使用 Geant4 的粒子枪 (`G4ParticleGun`) 向闪烁体条垂直打入能量为 1 GeV 的 μ^- 粒子（如图4.1）。

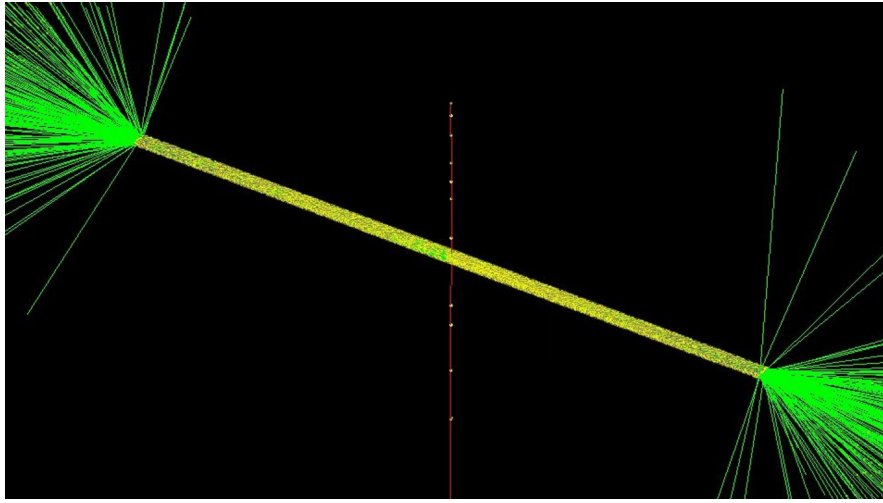


图 4.1 测试闪烁体模拟示意图，显示了 μ^- 粒子后可视化的闪烁光子轨迹

为了量化地看到模拟的结果，模拟尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 SiPM^[51] 作为敏感探测器 (Sensitive Detector)，记录到达其中的光子的信息。

需要说明的是，本模拟中的 SiPM 并未进行真实的电子学模拟，仅作为敏感探测器 (Sensitive Detector) 用于接收光子信息，并在接收后终止该光子的轨迹。在实际实验中，SiPM 接收光子后会将其转化为电信号，具有特定的光电转换效率。在需要将模拟数据与实验结果比较时，以敏感探测器接收到的光子数乘以相应的转换效率作为等效的模拟电信号。

在材料模拟的测试模拟阶段尚未引入光纤，为了更大限度地覆盖整个 $4\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的闪烁体端面，确保能够收集到大部分到达端面的光子，在闪烁体的每一端都安装四片 SiPM 探测器，如图4.2所示。

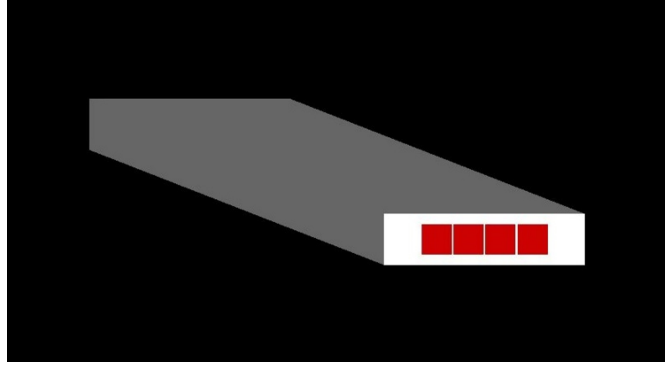


图 4.2 闪烁体端面上四片 SiPM 探测器的排列布局，每片 SiPM 尺寸为 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 1\text{ mm}$

为了获得统计意义上的结果，模拟了 10,000 个事例，并记录了每个事例中 SiPM 接收到的光子数量和到达时间。图4.3展示了模拟结果，呈现出较好的高斯分布。

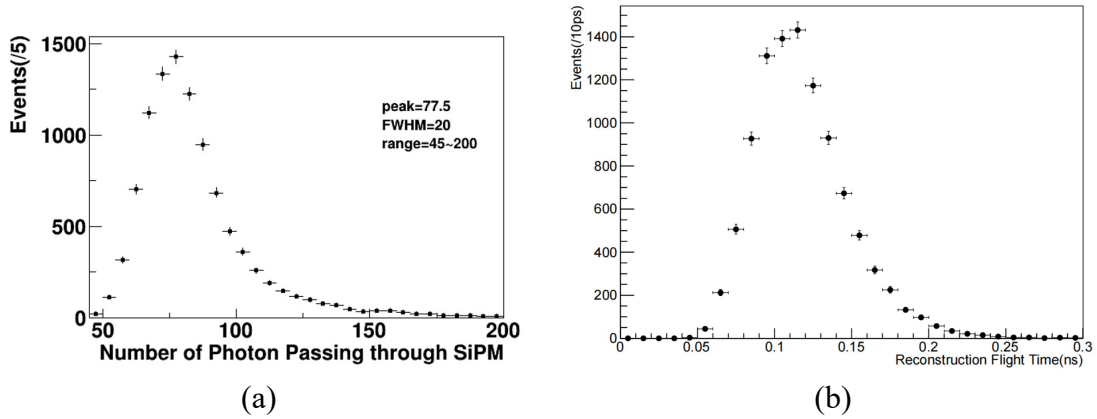


图 4.3 高能粒子入射闪烁体的模拟结果：(a) SiPM 接收到的光子数分布；(b) 基于光子到达时间重建的粒子飞行时间分布，重建时间 $t_0 = (t_1 + t_2 - t_3)/2$ ，其中 t_1 和 t_2 是光子到达闪烁体两端面的最小时间， t_3 是光子从闪烁体左端传播到右端所需的时间， t_0 是入射粒子的重建飞行时间

第三节 单条闪烁体模拟

在掌握闪烁体材料特性的基础上，本节将研究单条闪烁体的结构设计及其对探测效率的影响。这些模拟涵盖了不同长度、光纤直径以及光纤嵌入方式等情况，旨在比较不同设计方案下末端 SiPM 能接收到的光子信息，为远端探测器的优化设计提供依据。

一、 光纤耦合闪烁体模拟

在长闪烁体条中，光子需要传播较长距离才能到达端部的光电探测器，这会导致光子因吸收和散射而损失。为了提高光子收集效率，在闪烁体中嵌入波长位移光纤 (Wavelength Shifting Fiber, WLS) 是一种常用技术。图4.4展示了嵌入光纤的闪烁体被高能粒子打中后的模拟情况。使用光纤后，我们仅需在两端各使用一个 SiPM 接收光子信息即可。

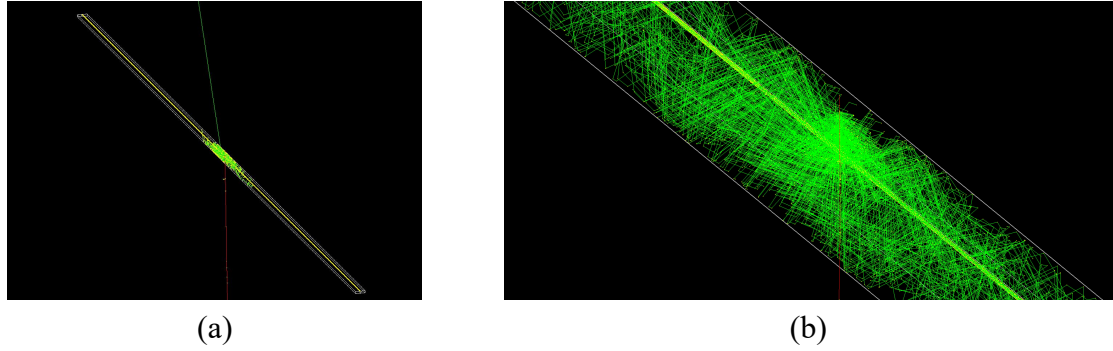


图 4.4 嵌入光纤的闪烁体模拟：(a) 可视化高能 μ^- 粒子入射嵌入光纤的闪烁体时的光子产生和传播；(b) 靠近入射位置的近景

二、 光纤嵌入方式比较

光纤的嵌入方式对光子收集效率有显著影响。本研究比较了两种主要的光纤嵌入方式：挖槽和钻孔。图4.5展示了这两种嵌入方式下闪烁体条的截面 ($4\text{ cm} \times 1\text{ cm}$) 以及在打入高能粒子后，光子的分布情况。

在挖槽方式中，光纤放置在闪烁体表面开设的凹槽中，只有光纤的一部分表面贴近闪烁体材料；而在钻孔方式中，光纤完全嵌入闪烁体内部的圆孔中，光纤的整个表面几乎都与闪烁体材料直接接触。这两种方式在光子捕获效率和制造难度上存在一定差异。钻孔方式由于光纤与闪烁体的接触面积更大，能够捕获更多的闪烁光子，因此光子收集效率更高；但相比于从表面开槽，在长闪烁

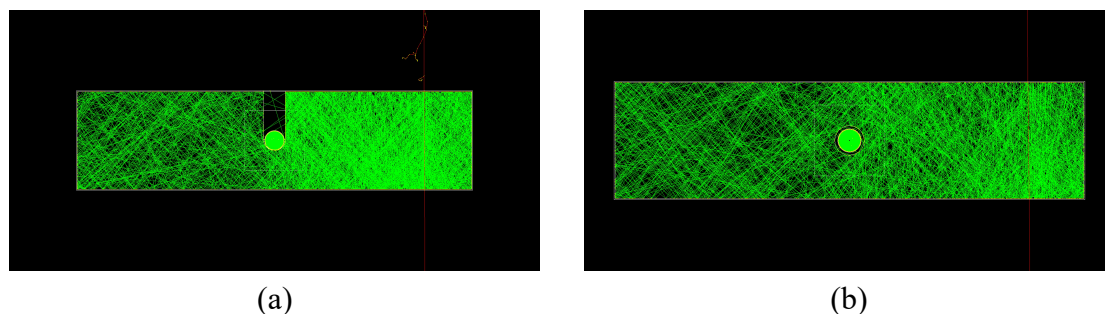


图 4.5 两种光纤嵌入方式的闪烁体截面（4 cm × 1 cm）及打入高能粒子后的光子分布：(a) 挖槽方式，光纤放置在从闪烁体表面挖至中央的凹槽中；(b) 钻孔方式，光纤放置在从闪烁体中心钻出的孔中

体内部钻孔在制造工艺上相对来说难度更大，成本也相应更高。

三、 参数影响分析

为了评估不同设计参数对光子收集效率的影响，模拟了多种在实际实验中常用的参数组合，包括：

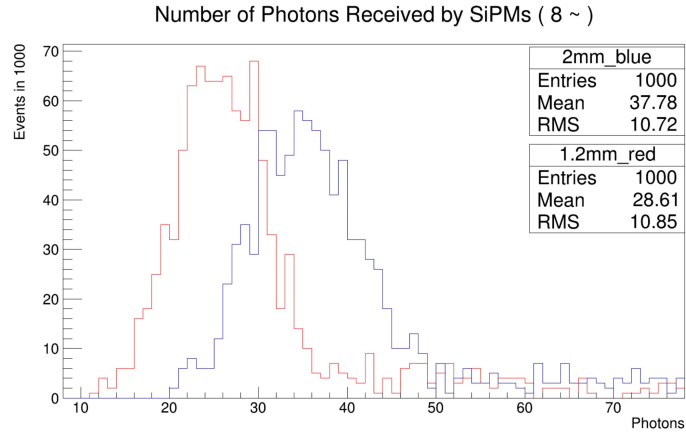
- 闪烁体长度：1.5 m 和 4 m
- 光纤直径：1.2 mm 和 2 mm
- 光纤嵌入方式：挖槽和钻孔

图4.6展示了不同参数组合下 SiPM 接收到的光子数比较。

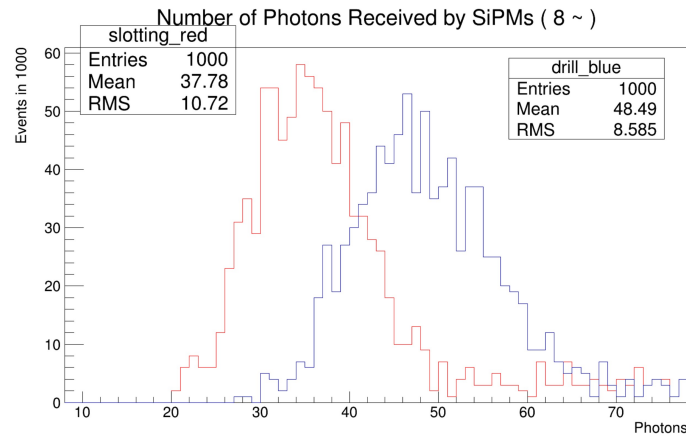
分析结果表明：

1. **光纤直径影响**：2 mm 直径的光纤相比 1.2 mm 直径的光纤能捕获更多的光子，平均提高光子收集效率约 32%。
2. **嵌入方式影响**：钻孔方式相比挖槽方式能捕获更多的光子，平均提高光子收集效率约 28%。这是因为钻孔方式使光纤与闪烁体的接触面积更大，增加了光子进入光纤的概率。
3. **闪烁体长度影响**：随着闪烁体长度从 1.5 m 增加到 4 m，光子收集效率下降约 34%。这主要是因为模拟参考的 Kuraray Y11(200) 光纤的衰减长度约为 3.5 m，导致光子在长距离传输过程中损失。

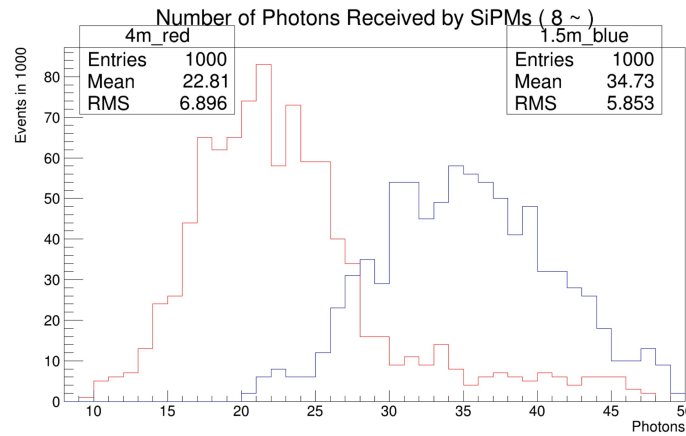
这些结果为实际探测器设计提供了重要参考。在实际应用中，需要综合考虑性能提升与成本增加之间的平衡。因此，最终的设计选择需要根据具体实验需求、预算限制和技术可行性进行综合权衡。



(a)



(b)



(c)

图 4.6 不同参数组合下 SiPM 接收到的光子数比较: (a) 光纤直径比较 (1.2 mm vs 2 mm); (b) 光纤嵌入方式比较 (挖槽 vs 钻孔); (c) 闪烁体长度比较 (1.5 m vs 4 m)

第五章 基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器设计与优化

Belle II 实验中的长寿命中性 K 介子 (K_L^0) 为研究长寿命粒子探测技术提供了理想的标准参考。本章以 Belle II 实验的 GAZELLE 探测器为原型，设计并优化了一种基于自发衰变原理的长寿命粒子远端探测器，通过系统的模拟研究，评估了不同设计参数对探测效率的影响，为未来长寿命粒子探测器的开发提供了重要参考。

第一节 有机闪烁体远端探测器设计原理与模型构建

本研究与后续章节中的 CEPC 缪子探测器设计工作不同，在本章节的工作中，采用了基于现有实验设计原型的优化策略。具体而言，本研究使用 Belle II 实验中的 GAZELLE 探测器的几何参数，构建了一个基于闪烁体超层结构的远端探测器，重点评估有机闪烁体探测器在这一特定设计框架下的性能表现。这种基于成熟设计原型的研究方法，使我们能够在已验证的实验基础上进行针对性优化，同时由于其几何参数的设计是基于原有探测器进行的，对有机闪烁体探测器在这些参数下的表现评估，不仅可以为 Belle II 实验提供直接适用的技术改进方案，还能为其他实验中的远端探测器未来优化提供有价值的参考依据。

有机闪烁体远端探测器由多个紧密相连的超层组成（如图5.1所示），每个超层包含两层正交排列的闪烁体条阵列，这种结构设计能够提供完整的三维空间信息。探测器的基本工作原理是捕获 K_L^0 自发衰变产生的 π^+ 和 π^- 粒子，通过同时探测这两个带电粒子，可以有效重建 K_L^0 的衰变顶点和动量信息。远端探测器在空间布局和几何构型上的独特优势，结合先进的读出电子学和信号处理技术，共同提供了更高的分辨率和更有效的背景抑制能力。

第二节 原型探测器尺寸选择考量

在远端探测器的设计中，虽然较大尺寸理论上能提供更高的立体角覆盖率，但实际应用中存在多种限制因素。特别是当闪烁体条长度过长时，会出现机械形变问题，影响探测精度和信号质量。

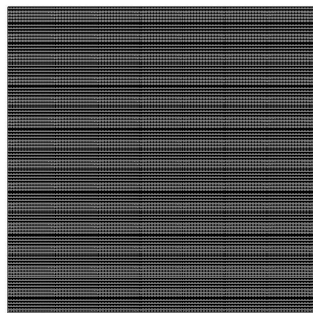


图 5.1 Geant4 模拟中的 Baby-GAZELLE 探测器整体结构图。该模型作为本研究的远端探测器单元基准，采用了适中的尺寸设计，便于实现和测试。

已有的远端探测器实验采用的尺寸基本都达到了数十米的量级，这类探测器需要进行闪烁体条的拼接，引入额外复杂度。考虑到这些因素，我们选择以 GAZELLE 中的 Baby-GAZELLE 探测器 (BG) 尺寸为参考基准，作为探测器单元的初步模型。BG 探测器具有适中的尺寸，能在不需要复杂拼接的情况下实现，同时提供足够的探测效率用于初步测试。

这种“先小后大”的策略体现在我们可以将这一适中尺寸的探测器作为基本构建单元，通过多个单元的拼接组合来构建更大规模的探测系统。这种模块化设计方法具有多重优势：首先，单个探测器单元的制造和测试相对简单，可以确保每个模块的性能达到预期标准；其次，模块化结构便于系统的扩展和维护，可根据实验需求灵活调整探测器的整体规模；最后，通过标准化的单元设计，可以降低整体系统的复杂度和成本。

以下将从两个关键方面进行讨论：一方面分析构成探测器单元的基本探测结构（光纤的放置方法和直径）对探测效率的影响；另一方面评估探测器单元的整体尺寸参数对探测立体角的影响。这些研究结果将共同为模块化有机闪烁体远端探测器系统的优化设计提供全面指导。

第三节 参数化模拟框架

在这项模拟工作的代码中采用了双层参数封装的架构以实现高效且安全的探测器模拟。第一层封装将所有探测器参数（包括几何尺寸、材料特性和结构配置等一众涉及修改和调整的参数）从核心模拟代码中分离，集中存储于专用头文件中。这种分离使得参数调整不会影响模拟逻辑，保证了代码的稳定性和可维护性。第二层封装则通过定义宏指令将常用参数组合定义为配置开关，例

如光纤直径（1.2 mm 或 2.0 mm）和嵌入方式（挖槽式或钻孔式）等离散选项。

这种双层封装架构显著提高了模拟效率：第一层封装确保了参数修改的灵活性和代码的模块化；第二层封装则简化了特定配置之间的切换操作，使得系统性参数扫描和对比研究变得高效可行。通过这种方法，本研究能够系统地评估不同闪烁体条构型对探测效率的影响，为远端探测器的优化设计提供了坚实的数据基础。

第四节 探测单元的结构影响下探测器效率差异对比

一、模拟设置与数据收集

粒子枪被放置在距离探测器前表面一定距离处，模拟 K_L^0 粒子以固定角度指向远端探测器中心。对于四种不同的闪烁体条配置（挖槽式或钻孔式嵌入、1.2 mm 光纤或 2 mm 光纤），每种配置分别模拟了 100000 个事例，并记录了相应的探测器响应数据。探测器记录的原始数据包括：

- **层数**：被击中的闪烁体条所在的层数，同时层数的奇偶性指示闪烁体条的排列方向（奇数层为横排，偶数层为纵排）
- **条数**：表示在该层中被击中的闪烁体条的编号
- **最快击中时间**：这条被击中的闪烁体第一个光子到达 SiPM 的时间
- **击中光子数**：150 ps 时间窗口内接收到的光子数

二、数据处理与击中点重建

为了从原始数据中重建有效击中点，应用了以下数据处理算法：

1. **SiPM 响应阈值**：模拟中考虑了 SiPM 的实际工作特性，即只有当 150 ps 时间窗口内接收到至少 5 个光子时，SiPM 才会记录有效的击中信息。这一阈值反映了实际探测器中 SiPM 的响应特性。
2. **超层关联**：在同一超层中关联横排（奇数层）和纵排（偶数层）的击中信息。横排层提供击中点的 x 坐标，纵排层提供 y 坐标。如果某超层只有单方向（仅横排或仅纵排）的信息，则该超层的击中被视为不完整，不纳入后续分析。
3. **时间匹配**：当同一超层中存在多个横排和纵排的击中时，通过比较最快击中时间（ $t_{\min}$ ）进行匹配，将时间最接近的横排和纵排击中组合在一起，以确保正确重建三维空间点。这种时间匹配方法有效解决了多重击

中情况下的空间点重建问题。

4. **三维坐标重建：**对于有效击中，x 坐标由横排层（奇数层）中被击中的闪烁体条的位置确定，y 坐标由纵排层（偶数层）中被击中的闪烁体条的位置确定。由于超层中的两层实际上有轻微的 z 方向偏移，最终的 z 坐标通过光子数加权平均计算：

$$z = \frac{N_x \cdot z_x + N_y \cdot z_y}{N_x + N_y} \quad (5.1)$$

其中 N_x 和 N_y 分别是横排层和纵排层闪烁体条接收到的光子数， z_x 和 z_y 是对应层的 z 坐标。

三、 探测效率比较

基于处理后的数据，计算了不同配置的探测效率。探测效率定义为能够被正确重建击中点的事件数与总模拟事件数的比值。表5.1展示了四种配置的探测效率比较。

表 5.1 不同闪烁体条配置的探测效率比较

配置	光纤直径 (mm)	探测效率 (%)
挖槽式嵌入	1.2	54.8%
挖槽式嵌入	2.0	61.4%
钻孔式嵌入	1.2	67.1%
钻孔式嵌入	2.0	78.3%

研究结果表明，钻孔式嵌入方式相比挖槽式嵌入具有明显的探测效率优势，而较大直径的光纤（2.0 mm）也能提供更高的探测效率。特别是钻孔式嵌入配合 2.0 mm 光纤的组合，其探测效率高达 78.3%，显著优于其他配置。这些结果为远端探测器的设计提供了客观的性能数据，可结合成本因素进行综合评估，以确定最终的探测器配置方案。

第五节 远端探测器立体角覆盖分析

一、 角度扫描模拟方法

在模拟中，粒子枪被放置在距离探测器前表面 10 m 处，与 BG 探测器在实际实验中的摆放位置相符。粒子枪从 90° 开始，每次旋转 1°，共旋转 90°，每个角度模拟 100000 次 K_L^0 的打出。通过 G4Track 记录的 PDG 信息和 G4Step 记录

的 Volume 信息筛选 $\pi^\pm$ 在探测器中的击中情况。探测器同时记录到 π^+ 和 π^- 的击中信息，才被认为是有效探测，这基于实际物理分析需求，即需要同时探测到两个带电粒子才能有效重建 K_L^0 的衰变顶点和动量。

二、 探测器尺寸参数与立体角计算

本研究考察了探测器尺寸对立体角覆盖效率的影响。在距离相互作用点 10 m 的位置，我们通过模拟分析了不同宽度 (100-1100 cm) 对探测效率的影响，同时将深度固定为 400 cm。

对于从固定点（相互作用点）向探测器发射粒子的情况，立体角覆盖率计算如下：

$$\eta = \frac{\Omega_{effective}}{4\pi} \times 100\% = \frac{2\pi(1 - \cos(\theta/2))}{4\pi} \times 100\% = \frac{1 - \cos(\theta/2)}{2} \times 100\% \quad (5.2)$$

其中 θ 是从相互作用点看向探测器时的张角，定义为在该角度范围内至少 50% 的事件能够同时探测到 π^+ 和 π^- 。

在本研究的模拟中，我们采用简化策略，仅考虑粒子从探测器正面入射的情况。初步模拟结果表明，在这种情况下，探测器的宽度是影响立体角覆盖率的主要因素，而深度对结果影响不显著。这种简化模型足以为我们提供关键的设计参数指导。

值得注意的是，虽然我们的模拟仅考虑正面入射情况，但在实际探测器建造时，由于 K_L^0 粒子及其衰变产物可能从各个方向入射探测器，“宽度”和“深度”的概念区分将变得模糊。因此，实际建造时应采用立方体结构，其尺寸可基于本研究中确定的最优宽度参数，以确保对各方向入射粒子的有效探测。

三、 宽度对立体角覆盖的影响

图5.2展示了在固定深度和距离条件下，不同宽度对立体角覆盖率的影响。结果显示，在 10 m 的工作距离下，立体角覆盖率与探测器宽度呈现近似线性的正相关关系，在测试范围内没有观察到明显的饱和趋势。这一结果与理论预期相符：在远距离条件下，探测器的有效立体角主要由其横截面积决定，而与深度关系较小。这是因为在远距离下，入射粒子的角度分布更加集中，探测器的横向尺寸对捕获这些粒子更为关键。

然而，对于单个探测器单元而言，光纤读出存在实际限制。随着闪烁体条长度增加，光信号在光纤中的衰减加剧，过长的光纤会显著降低信号强度。因

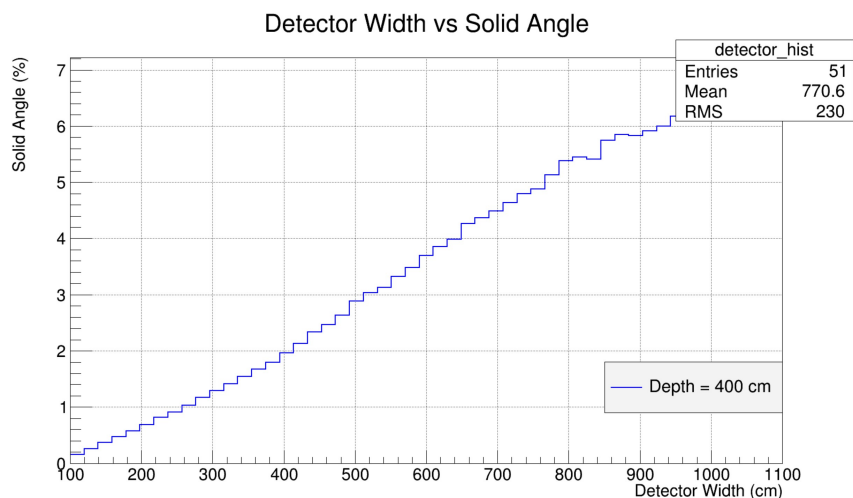


图 5.2 不同宽度对应的立体角覆盖率 (深度 400 cm, 距离 10 m)

此，单个探测器单元的尺寸存在上限，进一步扩大探测器整体尺寸需要考虑多个单元拼接方案。

这些结果为基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器设计提供了重要依据。作为初步研究，本章聚焦于单个探测器单元的优化，未来研究将结合更多实际因素，包括多单元拼接方案、信号读出电子学优化以及与 Belle II 主探测器的协同工作策略，进一步完善远端探测器的整体设计，为长寿命粒子物理研究提供更加强大的实验工具。

第六章 CEPC 实验的缪子探测器设计

第一节 桶部设计

CEPC 缪子探测器桶部采用了创新的设计方案，旨在最大化探测效率并减少探测死区。本节将详细介绍桶部探测器的几何结构、探测单元排列以及其相较于传统设计的优势。

一、 探测器整体结构

缪子探测器的桶部采用了十二边形桶状结构，围绕束流管和内部探测器构成最外层探测系统。整体结构由 12 个相同的扇形单元围成一个完整的圆桶，如图6.2所示。与传统设计（图6.1）相比，新设计优化了探测单元的排列方式，显著减少了探测死区。

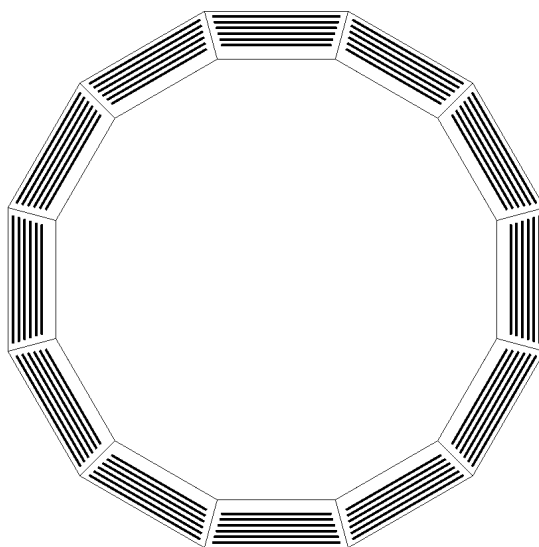


图 6.1 传统设计的缪子探测器结构示意图，虽然同样采用十二边形结构，但探测单元采用常规排列方式，在单元连接处存在探测死区

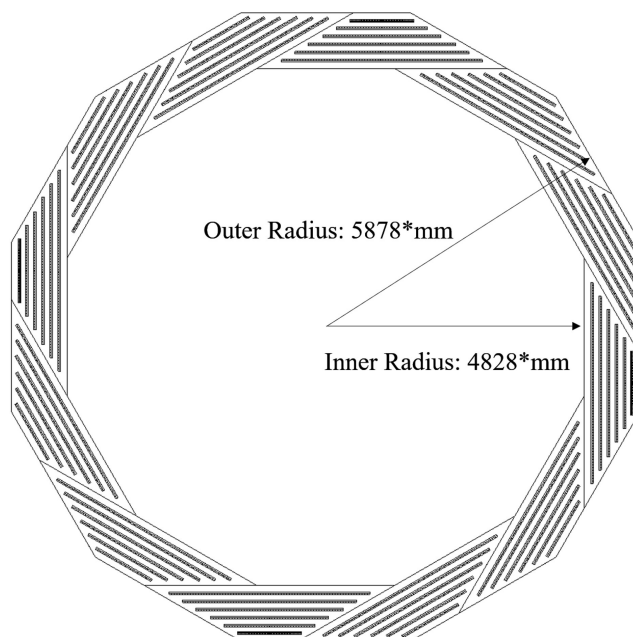


图 6.2 CEPC 新设计的缪子探测器桶部整体结构，采用十二边形结构，优化了探测单元的排列方式，减少了探测死区

二、超层结构设计

在 CEPC Muon 探测器中，超层是基本的探测单元，定义为两层正交排列的闪烁体条构成的探测单元，整体呈长方体形状。每个扇形单元内部包含 6 个这样的超层，超层之间夹有铁吸收体层。每个超层的厚度约为 2 厘米，而相邻超层之间的铁吸收体厚度为 10 厘米。此外，每个超层外部包覆的铝膜和空气间隙共占约 2 厘米厚度，因此两个相邻超层中心之间的总距离为 14 厘米。这种结构设计既确保了足够的材料厚度用于吸收非 μ 子粒子，又保持了探测器的紧凑性。每个超层中的两层闪烁体条分别沿不同方向排列，提供完整的二维空间信息：

- **周向排列层（奇数层）**：闪烁体条沿扇形单元的周向排列，对应表格中的第 1,3,5,7,9,11 层
- **轴向排列层（偶数层）**：闪烁体条与桶部轴线平行排列，对应表格中的第 2,4,6,8,10,12 层

超层的设计遵循一个重要的几何关系：由于整个超层呈长方体结构，一层闪烁体条的长度由另一层闪烁体条的数量和宽度决定。具体而言：

- 奇数层（周向排列）闪烁体条的长度 = 同一超层中偶数层闪烁体条的数量

- × 闪烁体条宽度
- 偶数层（轴向排列）闪烁体条的长度 = 同一超层中奇数层闪烁体条的数量 × 闪烁体条宽度

图6.3展示了当 μ 子穿过探测单元时，闪烁体超层内光子传播的模拟情况，直观地展示了探测过程。

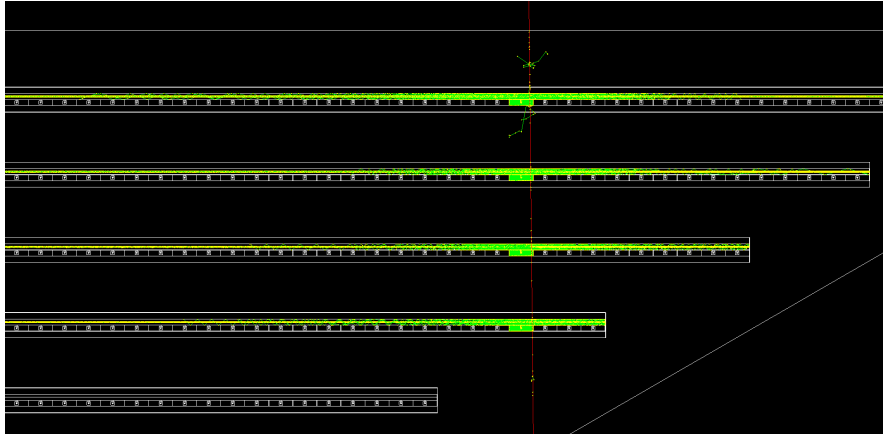


图 6.3 μ 子击中 1/12 扇形单元后，闪烁体超层内光子传播的模拟图像，展示了探测过程中的光信号收集

为了使模拟结果更加贴近实际安装和运行条件，在模拟设计中特别考虑了以下工程细节：

- **铝膜包覆：**每个超层的外部都包覆了一层薄铝膜，模拟实际探测器中用于保护和支撑闪烁体条的结构元素。
- **空气间隙：**在模拟中加入了超层之间的空气层，以反映实际安装过程中不可避免的间隙。

这些细节的加入使得模拟更加真实，能够更准确地预测实际探测器的性能表现。

三、桶部组装与交错结构

完整的桶部由两个子桶（Barrel 1 和 Barrel 2）组成，它们在轴向上交错排列，以消除连接处的探测死区。图6.4展示了两个桶部之间的交叠结构，这种设计确保了在桶部连接处也有完整的探测覆盖。两个子桶的详细参数如表6.1所示。

从表中数据可以观察到以下规律和特点：

- **周向排列层（奇数层）：**闪烁体条数量从内到外逐渐增加（26 至 86 条），反映了桶部半径的增大。由于偶数层主要使用 106 条或 115 条闪烁体条，对

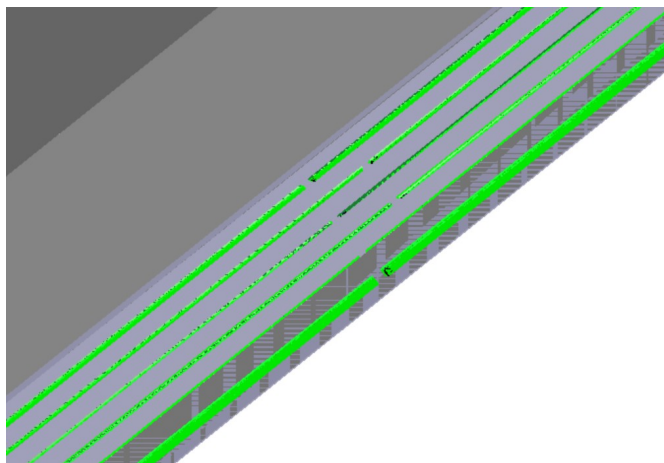


图 6.4 两个桶部之间的交叠结构示意图，展示了如何通过交错排列消除连接处的探测死区

表 6.1 CEPC 缪子探测器桶部闪烁体条参数

Barrel	Layer	Stripe_Num	Length/m
1	1	26	4.60
1	2	115	1.04
1	3	38	4.24
1	4	106	1.52
1	5	50	4.60
1	6	115	2.00
1	7	62	4.24
1	8	106	2.48
1	9	74	4.60
1	10	115	2.96
1	11	86	4.24
1	12	106	3.44
2	1	26	4.24
2	2	106	1.04
2	3	38	4.60
2	4	115	1.52
2	5	50	4.24
2	6	106	2.00
2	7	62	4.60
2	8	115	2.48
2	9	74	4.24
2	10	106	2.96
2	11	86	4.60
2	12	115	3.44

应的奇数层闪烁体条长度主要为 4.24 米（对应 106 条）或 4.60 米（对应 115 条）。

- **轴向排列层（偶数层）：**闪烁体条数量相对固定（主要为 106 条或 115 条），但长度从内到外逐渐增加（从 1.04 米增至 3.44 米）。这是因为从内到外，奇数层的闪烁体条数量逐渐增加，导致偶数层闪烁体条长度相应增加。
- **互补设计：**两个子桶在相应位置的层通常采用互补设计，如当 Barrel 1 的某层使用 4.60 米长闪烁体条时，Barrel 2 的对应层则使用 4.24 米长闪烁体条，反之亦然。这种设计确保了在两个子桶连接处的完整覆盖。

四、 模拟思路与总结

在 CEPC 缪子探测器桶部的模拟过程中，我们采取了一系列系统化的思路和方法，旨在实现高效且贴近实际的探测器设计，同时确保模拟结果能够为后续的实际工程建设提供可靠指导：

- **几何结构优化：**从传统的规则排列结构出发，通过详细分析探测死区的空间分布和影响因素，我们优化了闪烁体条的排列方式，特别是在扇形单元连接处和子桶连接处，采用了交错排列的设计理念。这种创新的排列方式显著减少了探测死区，保证了对于那些穿过连接区域的粒子轨迹的探测，提高了整体探测效率。
- **工程实用性考量：**为了使模拟更加贴近实际工程实现，我们特意在模型中加入了铝膜包覆和空气间隙等工程细节。通过精确模拟这些工程细节，我们能够更准确地预测实际探测器的性能表现，并提前识别可能的工程挑战。
- **多层次验证：**模拟过程采用了从微观到宏观的多层次验证方法，包括单个闪烁体条的光学特性验证、超层结构的几何优化验证，以及整个探测器系统的性能评估。这种层层递进的验证策略确保了每个组件和整体系统的性能都符合设计预期，同时也为不同层次的优化提供了针对性的反馈数据。

这些模拟思路的系统应用使我们能够在理论设计阶段就充分考虑到实际应用中可能遇到的各种问题和挑战，为 CEPC 缪子探测器桶部的实际建造提供了可靠的理论基础和技术参考。在这个阶段，我们已在本地计算机上完成了独立（stand-alone）的探测器模拟，并通过多种性能指标的评估确认了设计的可行性和优越性。

然后，我们需要将这个经过优化的缪子探测器模拟整合到基于 DD4hep 的 CEPCSW 框架中，作为 CEPC 主探测器系统的有机组成部分，与其他探测器子系统（如径迹探测器、量能器等）进行协作模拟。这种集成模拟将更全面地评估缪子探测器在整个探测系统中的性能表现，包括探测效率、动量分辨率、粒子识别能力等关键指标，并进一步优化设计参数，为 CEPC 实验的顺利开展和物理目标的实现提供有力支持。这一集成过程也将验证不同子系统之间的兼容性和协同工作能力，确保整个探测器系统的一致性和完整性。

第二节 端盖设计

CEPC 缪子探测器除了桶部结构外，还需要在两端配备端盖探测器以实现向前向和后向区域的 μ 子探测。端盖探测器与桶部探测器共同形成对 μ 子的近 4π 立体角覆盖，确保实验对 μ 子事件的高效探测。

一、端盖探测器整体结构

CEPC 缪子探测器在桶部两端各设置一个端盖探测器，每个端盖由 6 个超层组成，超层之间夹有 10 厘米厚的铁吸收体。每个超层由两个正交排列的闪烁体条层组成，提供完整的二维空间信息。这种设计使得探测器能够精确重建 μ 子的穿越轨迹，同时有效区分 μ 子与强子簇射。

二、闪烁体条层的结构设计

每个闪烁体条层由四个相同的 $1/4$ 圆环单元拼接而成，形成一个完整的圆环探测层。如图 6.5(a) 所示，在每个 $1/4$ 圆环单元中，闪烁体条采用平行排列方式，形成扇形结构。四个这样的单元拼接后形成完整的内部层和外部层，如图 6.5(b) 和图 6.5(c) 所示。闪烁体条在每个 $1/4$ 圆单元内的数量分配如下：

- 内部 (inner) 部分：68 条闪烁体条，每条宽度为 4 cm
- 外部 (outer) 部分：125 条闪烁体条，每条宽度为 4 cm

闪烁体条的具体长度根据其在圆环结构中的位置而变化，详细参数可参见附录中的表 A.1 和表 A.2。

三、闪烁体条的分段设计

端盖设计的一个关键特点是将每条闪烁体分为内部 (inner) 和外部 (outer) 两段，而不是使用单一的长条。这种分段设计主要基于以下考虑：

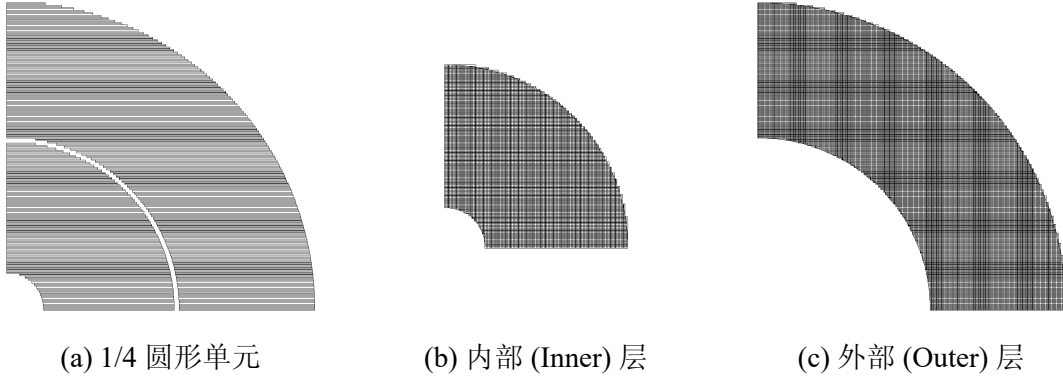


图 6.5 缪子探测器端盖结构示意图：(a)1/4 圆形基本单元；(b) 拼接形成的超层内部部分；(c) 拼接形成的超层外部部分

- **机械稳定性：**过长的闪烁体条容易产生机械形变，影响探测精度。通过将闪烁体条分为两段，显著提高了结构的机械稳定性。
- **信号收集效率：**较短的闪烁体条有利于光信号的收集，减少了光在传输过程中的衰减，提高了探测效率。
- **安装和维护便利性：**分段设计使得安装和后期维护更加便捷，有问题的部分可以单独更换，无需更换整条闪烁体。

内部和外部闪烁体条的长度分布显示出明显的规律性变化，这种变化是为了适应圆形几何结构的需要。从附录的表格数据可以看出，内部闪烁体条的长度范围为 0.465-2.653 m，而外部闪烁体条的长度范围为 0.631-4.142 m。

第三节 缪子探测器有效面积与整体协同设计

CEPC 缪子探测器由桶部和两个端盖组成，它们共同提供了近 4π 立体角的覆盖。本节将讨论探测器的有效探测面积计算方法以及桶部与端盖之间的协同设计。

一、探测器有效面积计算

缪子探测器的有效探测面积可以通过所有闪烁体条的总长度乘以条宽来计算：

$$A_{\text{eff}} = L_{\text{total}} \times W \quad (6.1)$$

其中， A_{eff} 为有效探测面积， L_{total} 为闪烁体条总长度， W 为闪烁体条宽度 (4 cm)。根据对闪烁体条的数据统计：

- 桶部探测器的总有效面积为 2864.3328 m^2
- 两个端盖探测器的总有效面积约为 1832.4858 m^2 （单个端盖约 916.2429 m^2 ）

因此，CEPC 缪子探测器的总有效探测面积约为 4696.8186 m^2 。这种大面积覆盖确保了对 μ 子事件的高效探测，同时闪烁体条的排列方式保证了较高的空间分辨率。表6.2总结了缪子探测器各部分的有效探测面积。

表 6.2 缪子探测器各部分有效探测面积统计

探测器部分	有效面积 (m^2)
桶部	2864.3328
端盖 (两个)	1832.4858
总计	4696.8186

二、桶部与端盖的协同设计

桶部探测器与端盖探测器在设计上进行了系统性优化，旨在最大化探测覆盖范围并保持探测性能的一致性。主要的协同设计考虑包括：

- **几何结构互补：**端盖探测器的内径与桶部探测器的端面直径经过计算，尽可能减小两者连接区域的不敏感区域，优化对大极角范围内 μ 子的探测覆盖。
- **结构层次一致性：**端盖和桶部的超层和铁层结构采用相似的设计原理，确保探测器在不同极角区域具有相近的探测性能，维持物理分析所需的均匀性。
- **读出系统兼容性：**两个部分采用相似的构成逻辑，为后续信号读出的数据处理和分析奠定基础。

通过这种协同设计策略，CEPC 缪子探测器实现了对接近 4π 立体角的高效探测覆盖，为高精度 μ 子识别提供了必要的技术保障。

第四节 CEPCSW 中的集成

为了实现 CEPC 实验探测器的全面模拟，本研究加入了基于 DD4hep 框架的模拟系统 CEPCSW，与其他探测器进行协作。DD4hep (Detector Description for High Energy Physics) 是一个为高能物理实验提供统一探测器描述的软件框架，能够从单一信息源为模拟、重建和分析等应用提供一致的探测器视图。本章将

详细介绍缪子探测器在 DD4hep 中的实现过程，包括 CEPCSW 软件框架的应用、DD4hep 集成系统的特点、读出电子学设计以及与其他探测器协作的模拟精简策略。

通过 DD4hep 框架，我们能够实现从探测器几何结构描述到物理响应模拟的完整流程，确保模拟结果与实际探测器性能的一致性。这种基于统一描述的模拟方法不仅提高了模拟的准确性，也为后续的探测器优化和物理分析奠定了坚实基础。

一、CEPCSW 软件框架概述

CEPCSW (CEPC Software) 是为环形正负电子对撞机 (CEPC) 实验专门开发的软件框架，它基于现代软件工程理念，整合了 DD4hep 作为其核心探测器描述工具。CEPCSW 的设计目标是提供一个统一、灵活且高效的软件环境，支持从探测器概念设计到物理分析的全过程。

DD4hep 作为 CEPCSW 的核心组件，提供了以下关键功能：

- **统一探测器描述：**DD4hep 允许从单一信息源（通常是 XML 格式的紧凑描述文件）生成探测器的完整描述，包括几何结构、材料特性、读出系统等。这确保了在模拟、重建和分析过程中使用一致的探测器信息。
- **通用探测器模型：**DD4hep 实现了一个通用的探测器描述模型，其核心是 DetElement 类，它作为探测器元素的中心实体，提供了访问与探测器设备相关的所有数据的入口点。
- **几何表示与转换：**DD4hep 利用 ROOT 几何包进行探测器几何的表示，并提供自动转换机制，将几何信息转换为 Geant4 等模拟工具可用的格式。
- **扩展机制：**通过扩展和视图机制，DD4hep 允许用户添加特定功能，如重建算法所需的特殊功能，而无需修改核心代码。

在 CEPCSW 中，缪子探测器的模拟实现遵循以下工作流程：

1. 通过 XML 格式的紧凑描述文件定义缪子探测器的基本参数和结构
2. 使用专门的探测器构造器 (Detector Constructors) 解释 XML 数据，并在内存中构建探测器模型
3. 通过 DD4hep 的自动转换机制，将探测器模型转换为 Geant4 可用的格式
4. 配置 Geant4 模拟参数，包括物理过程、敏感探测器响应等
5. 执行模拟并收集结果数据

6. 将模拟结果转换为标准数据格式，便于使用框架内的其他软件进行重建和分析

CEPCSW 框架的模块化设计使得缪子探测器的模拟可以与其他子探测器的模拟无缝集成，形成完整的 CEPC 探测器系统模拟。同时，框架的灵活性也允许我们针对不同的研究目的（如探测器优化、物理性能评估等）进行特定配置。

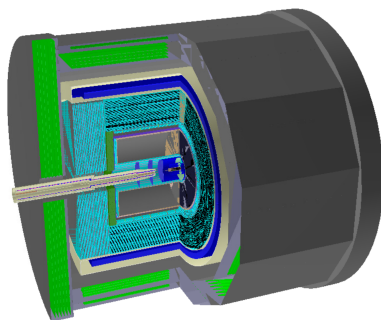
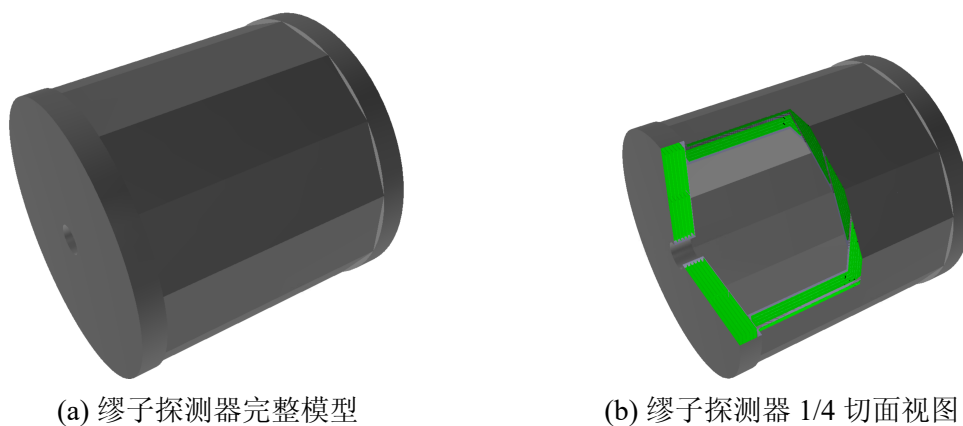


图 6.6 CEPC 主探测器在 CEPCSW 中的模拟示意图

如图6.6所示，通过使用 CEPCSW，能够完整地模拟 CEPC 的主探测器，为探测器的优化设计和性能评估提供了强大的工具支持。

二、 缪子探测器在 CEPCSW 中的模拟实现

基于 DD4hep 框架，我们在 CEPCSW 中完成了缪子探测器的详细模拟实现。图6.7展示了模拟中的缪子探测器模型，包括完整视图 (a) 和切开 1/4 后的内部结构视图 (b)。在模拟实现中，我们特别关注了探测器的几何结构细节、材料属性和敏感区域定义。图6.8展示了缪子探测器的几个细节部分。



(a) 缪子探测器完整模型

(b) 缪子探测器 1/4 切面视图

图 6.7 CEPCSW 中缪子探测器的模拟模型

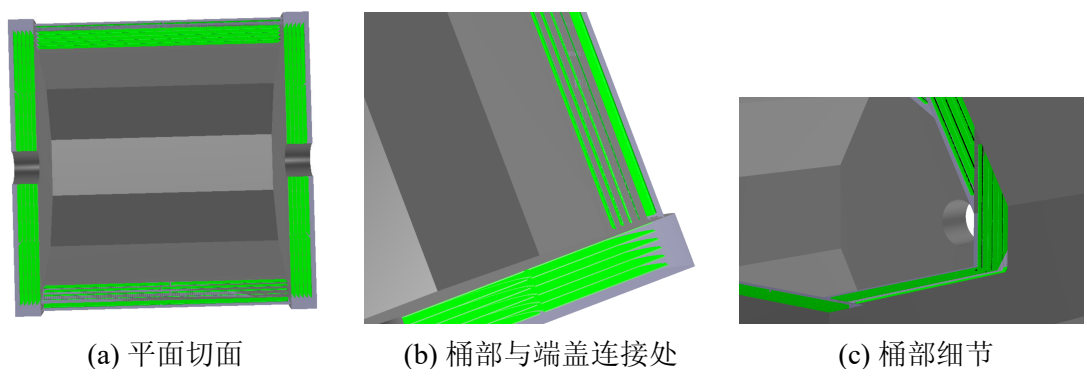


图 6.8 CEPCSW 中缪子探测器的部分细节

在 Geant4 中，我们通过敏感探测器来模拟探测器敏感区域对粒子的响应。在 CEPCSW 中，封装了对敏感探测器的编号系统，允许通过设置编号索引来记录在特定敏感区域中发生的物理过程 (G4step) 信息。为了实现高效的数据读出和处理，我们为缪子探测器设计了层次化的编号系统，桶部和端盖采用相似的编码逻辑，以保证一致的数据处理流程：

- 桶部编码结构：

1. 桶部编号
2. 1/12 扇区编号
3. 超层编号
4. 层编号
5. 条编号

- 端盖编码结构：

1. 端盖编号
2. 1/4 区间编号
3. 超层编号
4. 层编号
5. 条编号

值得注意的是，虽然端盖采用分段式设计，但我们在编码系统中保持了与桶部相似的逻辑结构，以简化数据处理流程。在端盖的条编号中，内部区域 (inner) 的编号靠前，外部区域 (outer) 的编号靠后，这种设计便于后续的数据重建和分析。

在模拟过程中，当粒子穿过闪烁体条时，Geant4 会记录能量沉积、时间、位

置等信息。通过上述编码系统，我们可以通过编号对这些信息进行分析，完成对粒子径迹的重建。

第五节 集成优化

在将缪子探测器模拟集成到 CEPC 整体探测系统中时，我们面临两个主要挑战：一是如何实现参数与代码的完全分离以提高模拟的灵活性和可维护性；二是如何在保证物理性能的前提下简化探测器结构以降低计算资源消耗。本节将详细介绍针对这两方面挑战所采取的优化策略。

一、参数分离与配置自动化

虽然 DD4hep 框架通过 XML 结构将部分参数与解析代码分离，但在通过循环逻辑生成大量闪烁体条的过程中，仍有一些几何逻辑不可避免地被封装在解析代码区域。这种耦合不仅降低了代码的可维护性，也限制了模拟更复杂探测器结构的灵活性。

为了彻底解决这一问题，我们开发了基于 Python 的几何配置生成脚本。该脚本能够自动计算每一层闪烁体条的位置参数，并生成标准的 XML 配置文件，从而将位置管理与核心 C++ 代码完全隔离。这种参数分离的方法带来了以下显著优势：

- **提高灵活性：**几何设置与核心代码分离后，可以更容易地模拟更复杂但更贴近实际的情况，例如为电子学结构添加烟囱通道、实现非标准宽度的闪烁体条等。
- **简化维护：**参数修改只需调整 Python 脚本生成更新后的 XML 文件，无需修改和重新编译 C++ 代码。
- **提高可读性：**将几何参数集中在 XML 文件中，使探测器配置更加清晰和系统化。
- **促进协作：**标准化的 XML 配置文件便于不同团队之间共享和交流探测器设计。

通过这种方法，我们实现了参数与代码的完全分离，大大提高了缪子探测器模拟的灵活性和可维护性，为后续更复杂的探测器结构模拟奠定了基础。

二、 探测器结构简化与内存优化

在 CEPC 整体探测系统模拟中，当缪子探测器不是主要研究对象时，其过于精细的结构模拟会占用大量计算资源。为了解决这一问题，我们开发了一种简化的缪子探测器模型，通过减少几何细节来降低内存消耗，同时保持物理响应的准确性。

简化模型的核心思想是不再生成具体的闪烁体条，而是生成整块闪烁体板，然后通过分段 (Segmentation) 机制对超层进行切分以生成读出 ID。在读出机制方面，我们进行了以下优化：

- **从 NoSegmentation 到 CartesianGridXY**：原始实现使用 NoSegmentation，需要为每个探测单元添加单独的 ID。优化后，我们采用 CartesianGridXY 分段方法，可以自动处理击中位置信息。
- **简化几何构建**：通过分段机制，大幅简化了几何构建过程，减少了内存消耗。
- **保持物理响应**：虽然几何细节减少，但通过适当的参数设置，确保简化模型的物理响应与详细模型保持一致。

需要注意的是，简化模型虽然大幅降低了内存占用，但不适用于需要详细和真实模拟的场景。它主要用于 CEPC 整体探测系统模拟中，当其他探测器作为主要研究对象时，缪子探测器仅需提供正确的背景框架的情况。

通过这两方面的优化，我们实现了缪子探测器模拟在灵活性、可维护性和资源效率方面的显著提升，为 CEPC 整体探测系统的高效模拟提供了有力支持。

第七章 总结与展望

本研究通过 Geant4 模拟框架，围绕有机闪烁体超层探测器在高能物理实验中的应用，开展了两个相互独立但技术方法相关的研究内容：基于 Belle II 实验的长寿命粒子远端探测器优化研究和 CEPC 实验缪子探测器的模拟设计和集成。本章将总结研究的主要成果，分析研究中的局限性，并对未来的研究方向提出展望。

第一节 研究成果总结

本研究首先在 Geant4 模拟框架下完成了两个研究方向的基础工作：闪烁体材料模拟和单条闪烁体模拟。在材料模拟方面，建立了精确的闪烁体材料光学模型，模拟了粒子与闪烁体的相互作用过程；在单元结构方面，系统研究了不同光纤耦合方式和闪烁体条长度等参数对光子收集效率的影响。这些基础工作为后续两个研究方向提供了重要的技术支持。

在第一个研究方向中，基于 Belle II 实验中 GAZELLE 探测器的设计原型，我们构建了探测长寿命粒子的有机闪烁体远端探测器模型，并进行了系统优化。主要成果包括：

1. 建立了参数化的远端探测器模拟框架，实现了对不同几何配置的高效模拟
2. 分析实际实验使用的闪烁体条构成的探测器在光子收集效率方面的具体数据
3. 研究了简单探测器单元的立体角覆盖，为未来可能的探测器拓展提供了基础数据
4. 评估了不同配置下的探测效率，为远端探测器的实际设计提供了技术参考

在第二个研究方向中，我们完成了 CEPC 实验缪子探测器的模拟设计与集成。主要成果包括：

1. 设计了缪子探测器的桶部和端盖结构，包括整体几何布局、超层结构和组装方式

2. 通过桶部与端盖的协同设计，计算了缪子探测器的有效面积，确保探测器性能满足 CEPC 实验要求
3. 实现了缪子探测器在 CEPCSW 软件框架中的集成，完成了探测器几何模型的构建和参数配置
4. 开发了基于 Python 的几何配置生成脚本，实现了参数与代码的分离，提高了模拟的灵活性和可维护性
5. 通过探测器结构简化和 segmentation 机制优化，显著降低了内存消耗，提高了模拟效率

这两个研究方向的工作，不仅为 Belle II 实验和 CEPC 实验提供了技术支持，也为高能物理实验中有机关体超层探测器的设计与优化提供了方法论参考。

第二节 研究局限性与未来展望

尽管本研究取得了一定的成果，但仍存在一些局限性，这些局限性也为未来的研究工作指明了方向。本节将分析目前研究的局限性，并基于这些局限性提出未来的研究展望。

一、远端探测器优化研究的局限性与展望

在远端探测器优化研究方面：

1. **电子学模拟的缺失与展望：**当前模拟中并未实际执行电子学模拟，缺乏对 SiPM 响应特性和读出电路的详细模拟。未来可采用专业模拟软件（如 SPICE 或 Cadence）进行精细化的电子学模拟，包括 SiPM 的暗计数、串扰、温度依赖性等特性，以及前端读出电路的响应特性，提高模拟的真实性。
2. **协同模拟的缺乏与展望：**目前未能与 Belle II 实验的其他探测器系统进行协同模拟，无法对真实的背景事件进行综合评估。未来可利用 DD4hep 框架将远端探测器与其他 Belle II 探测器系统集成模拟，更真实地模拟实际实验环境，包括背景事件、磁场影响等因素，全面评估探测器在实际运行条件下的性能。
3. **粒子源简化与展望：**模拟中使用的粒子源较为简化，未能完全反映实际实验中复杂的粒子分布情况。未来可结合 Belle II 实验的实际数据，构建

更加真实的粒子源模型，或直接使用实验数据作为模拟输入，提高模拟的准确性。

4. **大尺寸探测器模拟的缺失与展望：** 尚未进行对于拼接探测单元的大尺寸探测器的模拟。未来可拓展拼接探测器单元，模拟结构更加复杂、尺寸更大的远端探测器，探索模块化设计和大面积覆盖方案，为未来可能的探测器升级提供技术储备。

二、 缪子探测器设计的局限性与展望

在缪子探测器设计方面：

1. **几何模型简化与展望：** 未来可根据 CEPCSW 的粒子重建结果，进一步优化缪子探测器的几何参数和物理性能，在保持计算效率的同时提高模拟精度。
2. **机械约束考虑不足与展望：** 未能充分考虑实际机械结构的约束条件，如支撑结构、电缆布线等。未来可与负责实际建造的机械组密切协调，分析模拟参数在实际机械建造中的可行性，更加精细化地模拟实际探测器的结构，包括支撑结构、冷却系统、电缆布线通道等，确保设计的实际可行性。
3. **电子学模拟缺失与展望：** 缺乏对探测器响应的详细电子学模拟，特别是 SiPM 的非线性响应和温度依赖性。未来可结合专业电子学模拟工具，对缪子探测器的读出电子学进行更详细的模拟，提高信号响应模拟的准确性。
4. **物理性能验证不足与展望：** 目前的内存占用仍然偏高，可进一步优化模拟算法和数据结构，减小内存占用，提高计算效率，使模拟能够处理更复杂的几何结构和更大规模的事件样本，为 CEPC 实验的物理研究提供更强大的模拟支持，并通过与实验数据的比对验证模拟的准确性。

总的来说，未来的研究将朝着更高精度、更高真实性和更高效率的方向发展，通过多学科交叉和多软件平台协同，进一步提升有机闪烁体超层探测器在高能物理实验中的应用水平。这些工作不仅对 Belle II 实验和 CEPC 实验具有直接价值，也将为高能物理领域的探测器技术发展做出贡献。

参考文献

- [1] ABE T, et al. Belle II Technical Design Report[J]. 2010.
- [2] CABIBBO N. Unitary Symmetry and Leptonic Decays[J]. Phys. Rev. Lett., 1963, 10: 531–533. doi: 10.1103/PhysRevLett.10.531.
- [3] KOBAYASHI M, MASKAWA T. CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction[J]. Progress of Theoretical Physics, 1973, 49 (2): 652–657. doi: 10.1143/PTP.49.652.
- [4] BURAS A J. Weak Hamiltonian, CP violation and rare decays[C] // Les Houches Summer School in Theoretical Physics, Session 68: Probing the Standard Model of Particle Interactions. [S.l.]: [s.n.], 1998: 281–539. arXiv: hep-ph/9806471.
- [5] ALIMENA J, et al. Searching for long-lived particles beyond the Standard Model at the Large Hadron Collider[J]. J. Phys. G, 2020, 47 (9): 090501arXiv: 1903.04497 [hep-ex]. doi: 10.1088/1361-6471/ab4574.
- [6] LEE L, OHM C, SOFFER A, et al. Collider searches for long-lived particles beyond the Standard Model[J/OL]. Progress in Particle and Nuclear Physics, 2019, 106: 210–255. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641019300109>. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnpnp.2019.02.006>. ISSN: 0146-6410.
- [7] CURTIN D, et al. Long-Lived Particles at the Energy Frontier: The MATHUSLA Physics Case[J]. Rept. Prog. Phys., 2019, 82 (11): 116201arXiv: 1806.07396 [hep-ph]. doi: 10.1088/1361-6633/ab28d6.
- [8] ALPIGIANI C. Explore the lifetime frontier with MATHUSLA[J/OL]. Journal of Instrumentation, 2018, 15: C06026–C06026. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:125332744>.
- [9] OTONO H. Search for long-lived, massive particles in events with displaced vertices and missing transverse momentum in $\sqrt{s}=13$ TeV pp collisions with the ATLAS detector[J]. PoS, 2017, EPS-HEP2017: 713. doi: 10.22323/1.314.0713.
- [10] SUAREZ R G. Long-lived Particles at Future Colliders[J/OL]. Acta Physica Polonica B, 2021. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:231925115>.
- [11] LI G, RAMSEY-MUSOLF M J, VASQUEZ J C. Unraveling the left-right mixing using $0\nu\beta\beta$ decay and collider probes[J/OL]. Phys. Rev. D, 11 2022, 105: 115021. <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.105.115021>. doi: 10.1103/PhysRevD.105.115021.
- [12] OBLAKOWSKA-MUCHA A. Reconstruction techniques and physics case for displaced tracks and vertices at LHC[J]. PoS, 2024, VERTEX2023: 011. doi: 10.22323/1.448.0011.

- [13] FUKUDA H, NAGATA N, OTONO H, et al. Higgsino dark matter or not: Role of disappearing track searches at the LHC and future colliders[J/OL]. *Physics Letters B*, 2017. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119462093>.
- [14] PETRERA S. Experiments and Detection Methods[J/OL]. *UNITEXT for Physics*, 2019. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199288589>.
- [15] GRAHAM P W, HOWE K, RAJENDRAN S, et al. New Measurements with Stopped Particles at the LHC[J/OL]. *Physical Review D*, 2011, 86: 034020. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:119185041>.
- [16] BONIVENTO W M, TERRANOVA F. The science and technology of liquid argon detectors[J/OL]. *Reviews of Modern Physics*, 2024. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:269502298>.
- [17] CHAO W, WANG L. 暗物质研究进展[J/OL]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2022. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:247920154>.
- [18] RUBBIA A. Neutrino detectors for future experiments[J/OL]. *Nuclear Physics B - Proceedings Supplements*, 2005, 147: 103–115. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920563205004573>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysbps.2005.03.013>. ISSN: 0920-5632.
- [19] LACY J L, ATHANASIADES A, MARTIN C, et al. Long range neutron-gamma point source detection and imaging using unique rotating detector[J/OL]. *2007 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, 2007, 1: 185–191. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:8149152>.
- [20] PIRRÒ S, MAUSKOPF P D. Advances in Bolometer Technology for Fundamental Physics[J/OL]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 2017, 67: 161–181. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:125695237>.
- [21] YUE Q. The application of high purity germanium detector in particle and astroparticle physics[J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2011, 41 (12): 1434–1440. DOI: 10.1360/132011-965.
- [22] JANDA J, PIPAL V. The use of plastic scintillation microspheres in flow scintillation analysis[J/OL]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2022, 190: 110475. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0969804322003608>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2022.110475>. ISSN: 0969-8043.
- [23] ZHANG J, MA X, ZHANG B, et al. 宽能域 γ 成像探测器仿真设计及性能评价[J/OL]. *SCIENTIA SINICA Technologica*, 2023. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:256969640>.
- [24] GOLA A, ACERBI F, CAPASSO M, et al. NUV-Sensitive Silicon Photomultiplier Technologies Developed at Fondazione Bruno Kessler[J/OL]. *Sensors*, 2019, 19 (2). <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/2/308>. DOI: 10.3390/s19020308. ISSN: 1424-8220.

- [25] ROMEO G, BONANNO G, SIRONI G, et al. Novel silicon photomultipliers suitable for dual-mirror small-sized telescopes of the Cherenkov telescope array[J/OL]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 908: 117–127. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900218309884>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.035>. ISSN: 0168-9002.
- [26] KAZKAZ K, SWANBERG E. Survey of Current and Future PMT Replacement Technology[R/OL]. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 2018. <https://www.osti.gov/biblio/1770516>. DOI: 10.2172/1770516.
- [27] CHARTIER L, QI Y, PETASECCA M, et al. Performance uniformity evaluation of two SensL's SiPM modules[C] // 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (2013 NSS/MIC). [S.l.]: [s.n.], 2013: 1–3. DOI: 10.1109/NSSMIC.2013.6829319.
- [28] NAVAS S, et al. Review of particle physics[J]. *Phys. Rev. D*, 2024, 110 (3): 030001. DOI: 10.1103/PhysRevD.110.030001.
- [29] ADAM J, et al. The MEG detector for $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decay search[J]. *Eur. Phys. J. C*, 2013, 73 (4): 2365arXiv: 1303.2348 [physics.ins-det]. DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2365-2.
- [30] AEBISCHER J. Kaon physics overview[J/OL]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2446 (1): 012001. <https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2446/1/012001>. DOI: 10.1088/1742-6596/2446/1/012001.
- [31] COMMINS E D, BUCKSBAUM P H, WEISBERGER W I. Weak Interactions of Leptons and Quarks[J/OL]. *American Journal of Physics*, 1985, 53 (1): 92–93. <https://doi.org/10.1119/1.13982>. DOI: 10.1119/1.13982. ISSN: 0002-9505.
- [32] DONOGHUE J F, GOLOWICHE, HOLSTEIN B R. Dynamics of the Standard Model[M]. Vol. 2. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 297–305. ISBN: 9780521476522.
- [33] BIGI I I, SANDA A I. CP Violation[M]. 2nd ed. Vol. 28. Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology. Cambridge: Cambridge University Press, 2009: 58–72. ISBN: 9780521847940.
- [34] PERKINS D H. Introduction to High Energy Physics[M]. 4th ed. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. ISBN: 0-521-62196-8.
- [35] LEE T D, WU C S. Weak Interactions[J]. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 1981, 31: 711–761. DOI: 10.1146/annurev.ns.31.120181.003431.
- [36] ALEKHIN S, et al. A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case[J]. *Rept. Prog. Phys.*, 2016, 79 (12): 124201arXiv: 1504.04855 [hep-ph]. DOI: 10.1088/0034-4885/79/12/124201.
- [37] BEACHAM J, et al. Physics Beyond Colliders at CERN: Beyond the Standard Model Working Group Report[J]. *J. Phys. G*, 2020, 47 (1): 010501arXiv: 1901.09966 [hep-ex]. DOI: 10.1088/1361-6471/ab4cd2.
- [38] ARIGA A, et al. FASER: ForwArd Search ExpeRiment at the LHC[J]. 2019 arXiv: 1901.04468 [hep-ex].

- [39] CHOU J P, CURTIN D, LUBATTI H J. New Detectors to Explore the Lifetime Frontier[J]. Phys. Lett. B, 2017, 767: 29–36arXiv: 1606.06298 [hep-ph]. DOI: 10.1016/j.physletb.2017.01.043.
- [40] CALEFICE L, HENNEQUIN A, HENRY L, et al. Effect of the High-Level Trigger for Detecting Long-Lived Particles at LHCb[J]. Frontiers in Big Data, 2022. DOI: 10.3389/fdata.2022.838923.
- [41] ENGL A, BIEBEL O, HERTENBERGER R, et al. ATLAS monitored drift tube chambers for super-LHC[J/OL]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 623 (1): 91–93. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210004250>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.02.158>. ISSN: 0168-9002.
- [42] FELTRE M. Characterization of the ERAM Detectors for the High Angle TPC of the T2K near Detector Upgrade[J/OL]. Physical Sciences Forum, 2023, 8 (1). <https://www.mdpi.com/2673-9984/8/1/47>. DOI: 10.3390/psf2023008047. ISSN: 2673-9984.
- [43] KEIZER F. Sub-nanosecond Cherenkov photon detection for LHCb particle identification in high-occupancy conditions and semiconductor tracking for muon scattering tomography[J/OL]. 2020. <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/298766>. DOI: 10.17863/CAM.45822.
- [44] HAUSER J. Primitives for the CMS Cathode Strip Muon Trigger[C/OL] //. [S.l.]: [s.n.], 1999. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:59042660>.
- [45] DREYER S, FERBER T, FILIMONOVA A, et al. Physics reach of a long-lived particle detector at Belle II[J]. 2022 arXiv: 2105.12962 [hep-ph].
- [46] ABDALLAH W, et al. CEPC Technical Design Report: Accelerator[J]. Radiat. Detect. Technol. Methods, 2024, 8 (1): 1–1105eprint: 2312.14363 (physics.acc-ph).
- [47] KNOLL G F. Radiation Detection and Measurement[M]. 4th ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010. ISBN: 978-0-470-13148-0.
- [48] BIRKS J B. The Theory and Practice of Scintillation Counting[M]. [S.l.]: Pergamon Press, 1964. ISBN: 978-0-08-010472-0.
- [49] Saint-Gobain Crystals. BC-418, BC-420, BC-422 Premium Plastic Scintillators[R/OL]. Data Sheet. Saint-Gobain Crystals, 2018. <https://www.luxiumsolutions.com/radiation-detection-scintillators/plastic-scintillators/fast-timing-bc-418-bc-420-bc-422-bc-422q>.
- [50] NURIHL, PANCOKO M, JAMI A, et al. Fabrication of Plastic Scintillator Using Polystyrene Matrix Based[J]. SPEKTRA: Jurnal Fisika dan Aplikasinya, 2022, 7 (3): 141–150. DOI: 10.21009/SPEKTRA.073.03.
- [51] GHASSEMI A, SATO K, KOBAYASHI K. Technical guide to silicon photomultipliers (MPPC)[R/OL]. Ed. by OHASHI Y, ENOMOTO Y, ADACHI Y. KAPD9005E. Literature. Hamamatsu Photonics K.K., 2022. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mppc_kapd9005e.pdf.

致谢

在这篇论文即将完成之际，我怀着无比感恩的心情回顾这段研究历程。

首先，我要向我的导师赵明刚教授致以最诚挚的谢意。感谢您在学术道路上的悉心指导，您严谨的治学态度、渊博的专业知识以及对科研的执着精神，为我树立了榜样。您不仅在专业上给予我指导，更在思维方法和学术规范上给予我宝贵的启发。

同时，我要特别感谢复旦大学 KLM 实验室的王小龙副教授，是您为我提供了宝贵的实验平台和技术支持。在论文研究过程中，您的专业建议和实验指导让我得以顺利开展工作，克服了诸多技术难题。您对科研的热情和对细节的一丝不苟的态度，深深地影响了我。

感谢实验室的各位同学们，与你们的讨论和合作让我受益匪浅。你们的建议和帮助是我完成这项研究的重要支持。

最后，我要感谢我的朋友 Dondurma。在我为论文忙碌、情绪波动的日子里，是你的包容、理解和陪伴给了我前行的力量。你的鼓励和支持，是我攻坚克难的动力源泉。

衷心感谢所有在我求学路上给予帮助与支持的人们！

附录 A 缪子探测器端盖闪烁体条长度参数

表 A.1 端盖内部 (Inner) 闪烁体条长度参数

序号	长度 (m)	序号	长度 (m)	序号	长度 (m)
0	2.120	23	2.560	46	2.003
1	2.121	24	2.545	47	1.966
2	2.124	25	2.530	48	1.927
3	2.129	26	2.513	49	1.886
4	2.137	27	2.496	50	1.843
5	2.147	28	2.479	51	1.799
6	2.159	29	2.460	52	1.753
7	2.175	30	2.441	53	1.704
8	2.194	31	2.421	54	1.653
9	2.216	32	2.400	55	1.599
10	2.243	33	2.378	56	1.543
11	2.276	34	2.356	57	1.483
12	2.317	35	2.332	58	1.420
13	2.370	36	2.308	59	1.352
14	2.446	37	2.282	60	1.280
15	2.653	38	2.256	61	1.202
16	2.644	39	2.228	62	1.117
17	2.634	40	2.200	63	1.024
18	2.623	41	2.170	64	0.919
19	2.612	42	2.139	65	0.799
20	2.600	43	2.107	66	0.655
21	2.587	44	2.074	67	0.465
22	2.574	45	2.039		
总长度: 139.207 m					

表 A.2 端盖外部 (Outer) 闪烁体条长度参数

序号	长度 (m)	序号	长度 (m)	序号	长度 (m)	序号	长度 (m)
0	2.200	31	2.333	62	3.042	93	3.341
1	2.200	32	2.343	63	3.098	94	3.296
2	2.200	33	2.353	64	3.161	95	3.250
3	2.201	34	2.364	65	3.232	96	3.202
4	2.202	35	2.375	66	3.313	97	3.154
5	2.203	36	2.387	67	3.410	98	3.104
6	2.205	37	2.399	68	3.531	99	3.053
7	2.206	38	2.412	69	3.698	100	3.000
8	2.208	39	2.425	70	4.142	101	2.946
9	2.210	40	2.439	71	4.115	102	2.890
10	2.213	41	2.454	72	4.087	103	2.833
11	2.215	42	2.469	73	4.059	104	2.774
12	2.218	43	2.485	74	4.030	105	2.713
13	2.222	44	2.502	75	4.000	106	2.650
14	2.225	45	2.520	76	3.970	107	2.585
15	2.229	46	2.539	77	3.939	108	2.517
16	2.233	47	2.558	78	3.907	109	2.448
17	2.237	48	2.579	79	3.875	110	2.375
18	2.242	49	2.600	80	3.842	111	2.299
19	2.247	50	2.623	81	3.808	112	2.220
20	2.252	51	2.647	82	3.774	113	2.138
21	2.258	52	2.672	83	3.739	114	2.051
22	2.264	53	2.699	84	3.703	115	1.960
23	2.270	54	2.728	85	3.666	116	1.863
24	2.277	55	2.758	86	3.629	117	1.760
25	2.284	56	2.790	87	3.590	118	1.650
26	2.291	57	2.825	88	3.551	119	1.530
27	2.299	58	2.861	89	3.511	120	1.400
28	2.307	59	2.901	90	3.470	121	1.255
29	2.315	60	2.944	91	3.428	122	1.089
30	2.324	61	2.991	92	3.385	123	0.891
						124	0.631
总长度: 338.003 m							

个人简历

白子冰，出生于 2000 年 08 月 26 日。在 2022 年毕业于南开大学应用物理学专业并获得学士学位。于 2022 年至今在南开大学就读粒子物理与原子核物理研究生。