

# 中国科学技术大学

# 学士学位论文



## 一个基于闪烁光纤的宇宙线望远镜 的研制

作者姓名：石禹坤

学科专业：粒子物理专业

导师姓名：刘建北 教授 张云龙 特任副研究员

完成时间：二〇一六年五月

University of Science and Technology of China  
A dissertation for bachelor's degree



**A cosmic ray telescope based on  
scintillating fiber**

Author's Name:

Yukun Shi

Speciality:

Particle Physics

Supervisor:

Prof. Jianbei liu Associate Prof. Yunlong Zhang

Finished Time:

May, 2016

## 致 谢

在研究学习期间，我有幸得到了两位老师的教导，他们是：我的导师，中国科大刘建北教授和张云龙特任副研究员。刘老师治学态度严谨，对学生非常关心；张老师认真细致，胸怀宽广。在我本科期间，我从两位老师处学习颇多，获益匪浅。所以在此衷心感谢他们多年来给予我的悉心教导和热情帮助。

本科学习过程中，赵政国、韩良、黄光顺、张仁友等老师在学业上给予了很多指导，让我在科学探索的道路上稳步前进，在此衷心感谢他们多年教导。

实验研究过程中，张志永，魏逸丰，薛明萱，武立波等师兄给了我很多指点和照顾，让我迅速适应了实验室的工作，在此衷心感谢他们的帮助。

日常生活中，我的同学舍友共同生活学习，与他们的讨论常常使我收获不少，在此衷心感谢他们的陪伴

最后，在此衷心感谢一直支持鼓励我的家人，你们永远是我一往无前的勇气与信心。

# 目 录

摘要 .....	7
Abstract .....	8
第一章 绪论 .....	9
第一节 引言 .....	9
第二节 闪烁体探测器 .....	12
一、闪烁体探测器简介 .....	12
二、闪烁光纤探测器 .....	13
三、SiPM .....	15
第三节 宇宙射线望远镜 .....	15
一、宇宙射线 .....	15
二、宇宙射线探测 .....	16
第二章 宇宙射线望远镜系统的设计 .....	17
第一节 闪烁光纤阵列探测器 .....	17
一、总体设计 .....	17
二、闪烁光纤 .....	18
三、光学耦合剂 .....	19
四、SiPM 阵列板 .....	19
五、读出系统 .....	21
六、暗盒 .....	23
第二节 塑料闪烁计数器 .....	24
一、总体设计 .....	24
二、塑料闪烁体 .....	24
三、波长位移光纤 .....	25
四、光电倍增管 .....	26
五、暗盒 .....	26
第三节 宇宙射线望远镜系统 .....	27
第三章 宇宙线望远镜系统的制作 .....	28
第一节 闪烁光纤阵列探测器的制作 .....	28
一、闪烁光纤的切割研磨 .....	28
二、SiPM 阵列板元件的焊接 .....	29

---

第二节 塑闪计数器的制作 .....	31
第三节 宇宙线望远镜系统的搭建 .....	33
第四章 宇宙线望远镜系统的测试 .....	35
第一节 塑闪计数器的宇宙线测试 .....	35
第二节 MPPC 阵列板暗计数测试 .....	36
一、暗信号波形 .....	36
二、暗信号谱形 .....	36
第三节 宇宙射线望远镜测试 .....	37
第五章 总结 .....	38
参考文献 .....	39

## 图目录

1.1 标准模型粒子 .....	10
1.2 LHC 概念图 .....	12
1.3 DØ 的径迹探测器示意图 .....	14
1.4 宇宙射线在大气中的簇射 .....	16
2.1 闪烁光纤阵列探测器逻辑图 .....	17
2.2 闪烁光纤结构示意图 .....	18
2.3 闪烁光纤发射波谱 .....	19
2.4 MPPC 几何尺寸 .....	20
2.5 部分 SiPM 阵列板原理图 .....	21
2.6 SiPM 阵列板 PCB 设计图 .....	21
2.7 柔性连接板 .....	22
2.8 sma 读出板 PCB 设计图 .....	23
2.9 VATA 读出板 .....	23
2.10 闪烁光纤阵列探测器暗盒设计图 .....	24
2.11 塑料闪烁计数器逻辑图 .....	24
2.12 EJ-200 发射波谱 .....	25
2.13 BCF-92 吸收发射波谱 .....	25
2.14 R5610A 光谱响应 .....	26
2.15 暗盒设计图 .....	27
2.16 宇宙射线望远镜系统 .....	27

3.1 BCF-92 切割效果图 .....	28
3.2 暗盒实物图 .....	29
3.3 SiPM 阵列板手工焊接图 .....	30
3.4 SiPM 阵列板机械焊接图 .....	31
3.5 SiPM 阵列板与光纤耦合图 .....	31
3.6 RTV-615 抽真空 .....	32
3.7 塑闪计数器耦合过程 .....	32
3.8 硅胶柱端面 .....	33
3.9 宇宙射线望远镜系统 .....	34
4.1 塑闪计数器测试平台示意图 .....	35
4.2 塑闪计数器宇宙线谱 .....	35
4.3 MPPC 阵列板暗信号波形 .....	36
4.4 MPPC 阵列板暗信号能谱 .....	37
4.5 宇宙线能谱 .....	37

## 表目录



## 算法索引

## 摘 要

大型对撞实验探测系统中，径迹探测器是非常重要的部分，其性能的好坏直接关系到该实验的物理目标能否达成，而闪烁光纤阵列探测器作为一种传统的径迹探测器，很早便在很多大型实验中应用了，D0，MICE 实验上就使用了 VLPC（Visible-Light Photon Counters）作为读出的闪烁光纤阵列探测器，并且达到了百微米级的精度。近年来，随着技术水平的发展，硅光电倍增管（Silicon Photomultipliers，简称 SiPM）因其更好的性能逐渐取代了 VLPC，在 LHCb 的实验上，就计划使用闪烁光纤搭配 SiPM 作为径迹探测器，而此探测器在测试中也达到了  $70\mu\text{m}$  的分辨率

为满足实验室测试对高位置分辨的宇宙射线望远镜的需要，并掌握闪烁光纤与 SiPM 耦合的技术，我们使用边长 1mm 的方形光纤研制了一个单层 50 根的阵列闪烁光纤探测器，其探测面积为  $50\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，使用的 SiPM 是 hamamatsu 的 MPPC（Multi-Pixel Photon Counter）S13360-1350PE，我们还制作了两个塑闪计数器做符合测量，搭建了宇宙射线望远镜系统。

初步的测试结果表明，我们的宇宙线望远镜能成功看到宇宙线信号，下一步我们将进行位置分辨测试

**关键词：**闪烁光纤   Silicon photomultiplier   SiPM   宇宙射线望远镜系统

## Abstract

tracker is an important part of large collider detectors, the performance of the tracker directly influences our final goal. As a traditional tracker, scintillating fibre tracker has been used in many experiments, for example: scintillating fibre tracker with VLPC (Visible-Light Photon Counters) were used on D0, MICE, reaching the position resolution of hundreds of microns. In recent years, with the development of technology, SiPM (Silicon Photomultiplier) replace VLPC for its better performance. On LHCb, they plan to use scintillating fiber tracker which reached the resolution of  $70\mu\text{m}$  in beam test.

My lab plan to make a high position resolution telescope and know more about scintillating fibre and SiPM, so we make a scintillating fibre tracker with 50 square fibers whose length is 1mm, the detection size of our detector is  $50\text{mm} \times 60\text{mm}$ , our SiPM is MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) S13360-1350PE made by Hamamatsu, we make two plastic scintillator counter to do coincidence measurement, with them we build the cosmic ray telescope system.

Preliminary results show that our telescope detects cosmic ray effectively, next we will measure the position resolution.

**关键词:** scintillating fiber   Silicon photomultiplier   SiPM   cosmic ray telescope system

# 第一章 绪论

## 第一节 引言

人类总是不断追问世界的本质为何，为了回答这个问题，物理学家往往从微观和宏观两个角度去追寻答案。宏观方面我们发展了天文学，微观方面则是粒子物理。

从微观方面探寻世界本质，首先面对的问题便是组成世界的基本物质是什么。古代人类因此提出了诸如元素说，原子论等假说，但这些假说都是没有任何实验支持的。后来道尔顿提出了近代原子理论，门捷列夫总结了元素周期表，人类在微观领域前进了一大步，人类曾经以为明白了组成世界的所有，直到 1900 年左右，汤姆逊发现了电子，卢瑟福发现原子内部还有更精细的结构，人类明白了原来原子不是组成世界的最基本粒子，这时候人类才算真正向粒子物理领域迈出了第一步。

万事开头难，之后我们在粒子物理领域飞速前行着，各种夸克，轻子，场粒子相继被发现，1937 年从宇宙线中发现  $\mu$  子，后来证实它不参与强作用，它和与之相伴的  $\mu$  中微子同电子及与之相伴的电子中微子可归入一类，统称为轻子。1947 年发现  $\pi^\pm$  介子，1950 年发现  $\pi^0$  介子，1947 年还发现奇异粒子。50 年代粒子加速器和各种粒子探测器有了很大发展，从而开始了用加速器研究并大量发现基本粒子的新时期，各种粒子的反粒子被证实；发现了为数不少的寿命极短的共振态。基本粒子的大量发现，其中大部分是强子，人们怀疑这些基本粒子的基本性。人们尝试将强子进行分类，提出颇为成功的强子分类的“八重法”。1964 年 M. 盖耳曼和 G. 茨威格在强子分类八重法的基础上分别提出强子由夸克构成，夸克共有上夸克  $u$ 、下夸克  $d$  和奇异夸克  $s$  三种，它们的电荷、重子数为分数。夸克模型可以说明当时已发现的各种强子。夸克模型得到后来进行的高能电子、高能中微子对质子和中子的深度非弹性散射实验的支持，实验显示出质子和中子内部存在点状结构，这些点状结构可以认为是夸克存在的证据。1974 年发现  $J/\psi$  粒子，其独特性质必须引入一种新的粲夸克  $c$ ，1979 年发现另外一种独特的新粒子  $Y$ ，必须引入第 5 种夸克，称为底夸克  $b$ 。另一方面，1975 年发现重轻子  $\tau$ ，并有迹象表明存在与  $\tau$  相伴的  $\tau$  中微子，于是轻子共有 6 种。迄今的实验尚未发现轻子有内部结构。人们相信轻子是与夸克属于同一层次的粒子。轻子与夸

克的对称性意味着存在第 6 种顶夸克  $t$ 。1994 年 4 月 26 日，美国费米国家实验室宣布已找到顶夸克存在的证据。直到近年 higgs 在 LHC 上被发现，标准模型的大厦已经基本完成。



图 1.1 标准模型粒子

粒子物理领域的实验大都是碰撞实验，通过探测射出的粒子来发现某些粒子的内部结构，或者直接找到新的粒子。早期的实验主要是利用放射源的放射线来进行研究，卢瑟福在 1919 年用天然放射源实现了历史上第一个人工核反应，1930 年，Earnest.O. Lawrence 制作了第一台回旋加速器，这台加速器的直径只有 10cm。随后，经 M. Stanley Livingston 资助，建造了一台 25cm 直径的较大回旋加速器，其被加速粒子的能量可达到 1MeV。几年后，他们用由回旋加速器获得的 4.8MeV 氢离子和氘束轰击靶核产生了高强度的中子束，还首次生产出了  $N_{a24}$ 、 $P_{32}$  和  $I_{131}$  等人工放射性核素。1944 至 1945 年间，美国姆克米兰 (Mcmillan) 和苏联的维克斯勒 (B. M. Bekcnep) 先后几乎同时独立地发现了准共振加速器以之为基础的“自动稳相原理”，使各类准共振加速器在近似共振的回旋加速器的基础上迅速地向前推进。1946 年，第一台稳相加速器在美国伯克利 (Berkley) 建成，获能量为  $1.9 \times 10^8 \text{eV}$  的氘核和  $3.8 \times 10^8 \text{eV}$  的口粒子。至 60 年代，该类加速器的最高能量被提高到  $10^9 \text{eV}$ 。1947 年，美国综合电气研究实验室率先建成  $7 \times 10^7 \text{eV}$  电子同步加速器。往后该类同步加速器的最高加速能量被提高到  $1.2 \times 10^9 \text{eV}$  水

平。1952 年,美国布鲁克海文 (Brookhaven) 国家实验室最早建成能量为  $3 \times 10^9 \text{eV}$  的质子同步加速器 (即同步稳相加速器), 定名为“宇宙加速器”(Cosmotron)。至 1958 年,苏联把该类加速器能量提高到  $1010 \text{eV}$  水平,轨道半径为  $28 \text{m}$ ,磁铁重量达  $3.6 \times 10^7 \text{kg}$ ,是迄今为止世界上最重的加速器。与此同时,在二次世界大战后,随着雷达技术的发展,高频和微波技术有了很大发展,驻波型和行波型的直线共振加速器也有了新的突破。1947 年,美国伯克利实验室在阿尔伐瑞兹 (Alvarez) 领导下建成  $3.2 \times 10^7 \text{eV}$  质子驻波直线加速器。最早的电子行波直线加速器是在英国 Harwell 建成的,能量为  $4 \text{MeV}$ 。60 年代初,英国最先将电子直线加速器用于癌症治疗。随后,美国致力于该类加速器的研制,斯坦福 (Stanford) 电子直线加速器中心,于 1966 年建成能量为  $2.2 \times 10^{10} \text{eV}$  的电子行波直线加速器,加速器总长达  $3 \text{km}$ ,是迄今能量最高的直线共振加速器。1952 年,美国布鲁克海文国家实验室古兰特 (Courant)、里文斯顿 (Livingston)、斯内德 (Snyder) 等人提出了交变梯度聚焦 (AG 聚焦, Alternating Gradient Focusing) 的原理,受到人们的重视。这以前,一位希腊工程师克利斯多菲勒斯 (N. C. Christofilos) 早于 1950 年就已写出了一份未发表的名为“磁共振加速器中离子和电子的聚焦系统”的报告,阐述了强聚焦原理。之后他应邀赴美国,与里文斯顿等人合作进行了强聚焦同步加速器的研究。1959 年,日内瓦西欧原子核研究中一 L(CERN) 最早建成  $30 \times 10^9 \text{eV}$  强聚焦质子同步加速器。1972 年,美国建成  $500 \times 10^9 \text{eV}$  强聚焦质子同步加速器,西欧中心则于 1976 年建成能量为  $400 \times 10^9 \text{eV}$  的同类加速粒子加速器,简称 SPS。上述两台加速器自建成起,直至 80 年代末,长期保持其最高能量加速器的世界领先地位。至今,应用强聚焦原理的电子同步加速器,最高能量则可达  $12 \times 10^9 \text{eV}$ 。60 年代末至 70 年代初,人们进一步创造性地运用相对论原理的粒子对撞机得到了迅速发展,这使提供给粒子的有效作用能量得以提高几个数量级之多。最早的对撞机是意大利于 1969 年建成的,它是一台名为 ADoNE 的直线加速器型电子对撞机,加速的电子能量为  $1.5 \times 10^9 \text{eV}$ 。美、法等国随后建成同类对撞机。70 年代初期,苏联、西德等国率先相继建成能量更高的电子同步加速器型对撞机,目前能量最高的对撞机是位于日内瓦的 LHC,已经达到了  $14 \text{TeV}$ ,并且在运行期间发现了标准模型的最后一个粒子-higgs。

随着加速器,对撞机的发展,我们要探测的粒子能量越来越高,亮度也不断增强,,对探测器性能提出了更多的要求,各种各样的探测器开始出现。从材料上有气体,半导体,闪烁体等探测器;从结构上有电离室,多丝室这种室,有平行板,多气隙电阻板这种用板子隔开的,有微结构的硅微条,硅像素;从工作区



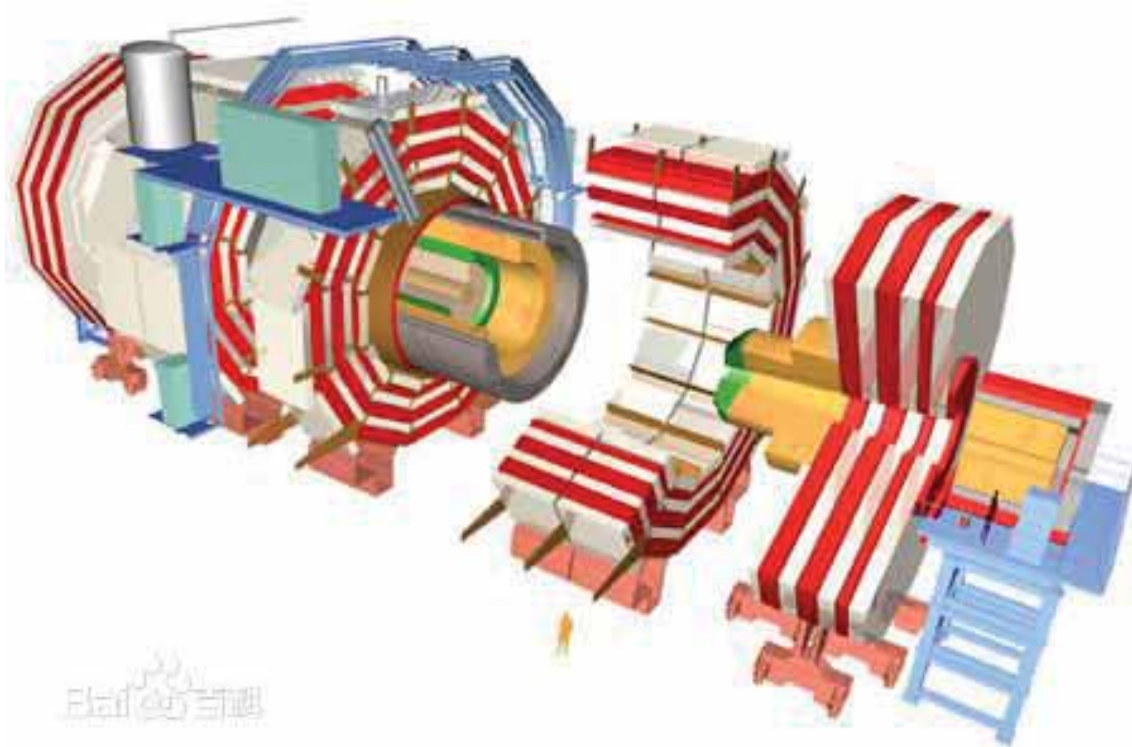


图 1.2 LHC 概念图

域有电离区，正比区，盖格区等；从工作原理有气体电离，雪崩放大，光电效应等。本文宇宙线望远镜的主体便是闪烁光纤探测器。

## 第二节 闪烁体探测器

### 一、闪烁体探测器简介

闪烁体探测器大都是由闪烁体、光导、光电转换器件和电源组成的辐射探测器。早在 1903 年，威廉·克鲁克斯就发明了由硫化锌荧光材料制成的闪烁镜并用其观察镭衰变放出的辐射；卢瑟福在其著名的卢瑟福散射实验中也曾使用硫化锌荧光屏观测  $\alpha$  粒子。随着光电转换器件（主要是光电倍增管）的发展与各种闪烁体材料的出现，闪烁体探测器得到了长足的发展，由于具有探测效率高、分辨时间短、使用方便、适用性广等特点，闪烁体探测器在某些方面的应用已超过气体探测器，并为  $\gamma$  射线谱学的形成和发展提供了可能。

闪烁体探测器作为一种传统的探测器，从闪烁体上来说有有机，无机闪烁体，闪烁光纤，液体闪烁体等。其中无机闪烁体以 NaI, BGO 为主；有机闪烁体主要是有机晶体，塑料等。不同闪烁体发射波长，光产额，衰减时间，辐射长度，

密度，硬度，抗磁性都不同，要根据实际测量需求来选择最合适的闪烁体材料。首先发射波长要和后端器件的接受波长相符合，对于要求能量分辨的探测器，应考虑高光产额的闪烁体；对于要求时间分辨的探测器，应考虑衰减时间短的闪烁体；对于要求位置分辨的探测器，应考虑密度硬度等特性，例如闪烁光纤径迹探测器，往往使用直径 1mm 以下的光纤，这时候其几何结构往往会成为决定探测效率的主要因素，而几何上的设计往往涉及到光纤的硬度密度延展性等特性，所以对要求位置分辨的探测器，需要考虑这些特性。

闪烁体后端一般与光电转换器件相耦合，光电转换器件将闪烁体产生的光子转换成电子，一般还会将转换出的电子进行雪崩放大。光电转换器经过多年的发展，目前有 APD，CCD，PMT，SiPM 等类型。

闪烁体探测器经过多年发展，在实验与应用领域都有广泛应用：在高能物理中，闪烁体探测器可以应用于量能器，飞行时间探测器，触发望远镜系统，径迹探测器；闪烁探测器还在医学中用于计数测量，成像测量。

## 二、闪烁光纤探测器

闪烁光纤探测器是近年来得到广泛运用的一种闪烁体探测器，主要利用闪烁光纤进行阵列排布来进行高精度位置测量，并且随着与之搭配的光电倍增器件不断进步，闪烁光纤探测器的空间分辨能力也不断进步，在实验与应用两方面都表现不俗。

相比于传统的块状闪烁体，光纤的外包层，限制了光子的传输路径，几何尺寸减小，使闪烁光纤探测器具有更好的空间分辨率，搭配高增益的光电倍增器件，能同时满足能量分辨率，空间分辨率两方面的要求。随着技术的进步，现在已经可以制作百微米级的光纤与光电倍增管，利用这些元件制作的阵列径迹探测器，能达到百微米甚至十微米级别的空间分辨，并且闪烁光纤本身价格低廉，在大型对撞实验中，可以大面积使用闪烁光纤探测器作为径迹探测器；在应用领域，因其高空间分辨，闪烁光纤探测器作为成像仪器也被广泛使用。

DØ 实验的径迹探测器便采用了闪烁光纤探测器<sup>[1]</sup>，其所用的光纤连涂层直径 835 $\mu\text{m}$ ，长度有 1.66、2.52m 两种。闪烁光纤按照两层共 256 根转配起来，然后放置到固定位置。闪烁光纤是单端读出，另一端反射率大约 90%，读出端用普通光纤导出到 VLPC（Visible Light Photon Counters），VLPC 作为一种光电倍增器件，增益能达到  $10^4$ ，线性范围到几百个光子，并且具有单光子探测能力。这



样的设计使得该探测器最终达到百微米左右的空间分辨。

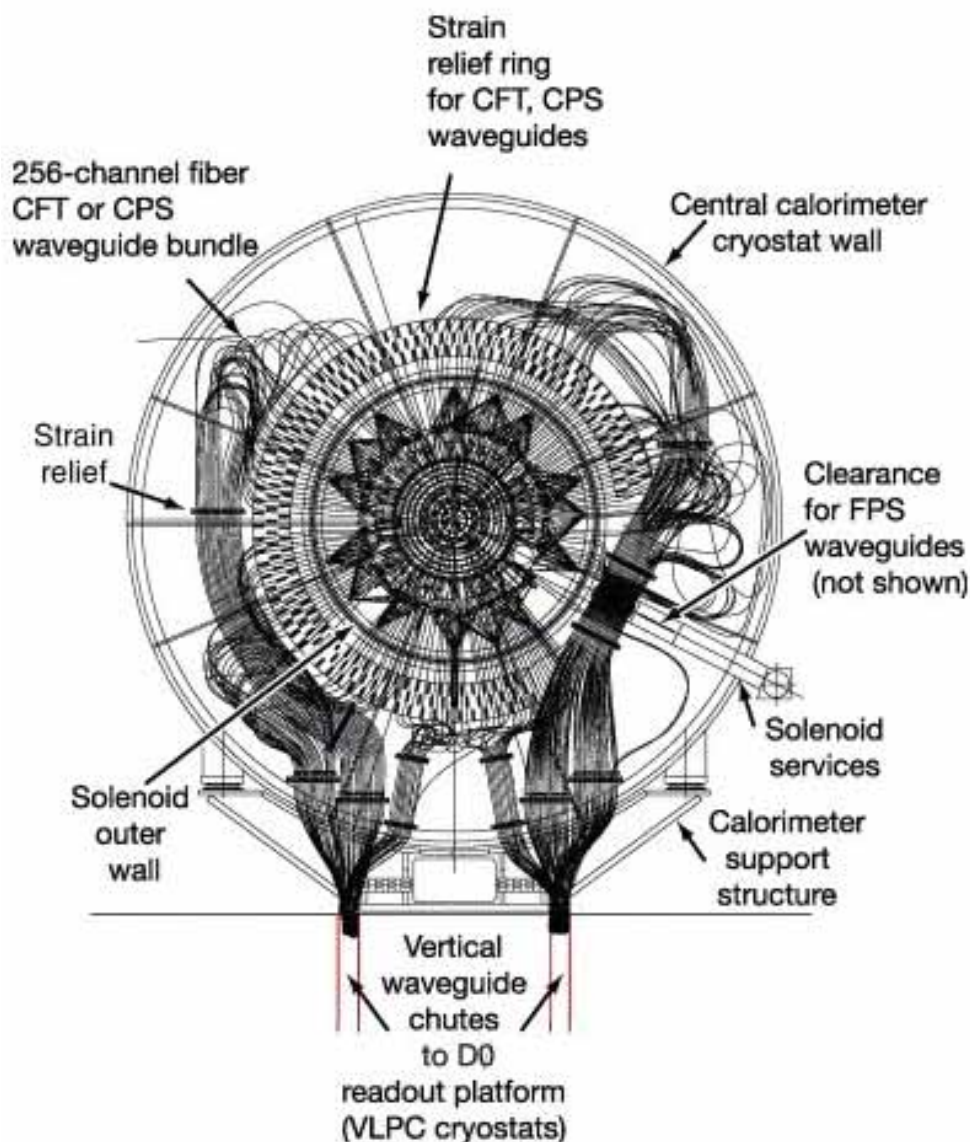


图 1.3 DØ 的径迹探测器示意图

而计划在 2021 年左右运行的 LHCb 实验目前也打算使用闪烁光纤探测器作为径迹探测器<sup>[2]</sup>，目前正在测试的闪烁光纤探测器采用了  $250\mu\text{m}$  的光纤，有共计 144 个光纤单元覆盖  $360\text{m}^2$  的区域，每个光纤单元有光纤呈蜂窝状排列而成。光电倍增器件则采用了 SiPM (Silicon photomultiplier)，SiPM 的几何尺寸可以小到与光纤直径相当，所以该探测器采用 SiPM 阵列与光纤头直接耦合，没有用其他光导。相较于 VLPC，SiPM 的增益能达到  $10^5$  到  $10^6$ ，探测效率能达到 50%，并且无需在低温下工作（VLPC 工作环境在 6K 左右），还具有较强抗磁抗辐照能力。目前已经制作出的闪烁光纤探测器已经达到  $70\text{-}80\mu\text{m}$  的空间分辨并且能

适应 LHC 的高亮度。

### 三、SiPM

对于闪烁体探测器而言，光子的探测是非常重要的环节，一般都使用光电倍增管来进行光子采集和放大，SiPM (Silicon photomultiplier) 则是近年来广泛在闪烁体探测器上使用的光电倍增器件，其量子效率能达到 60% 以上，增益能达到  $10^5$ ，时间分辨好且体积小，在几何尺寸上可以很好的和光纤搭配，并且灵敏区占 50% 以上，工作在盖格模式，对于最小电离粒子在 1mm 的闪烁光纤产生的约 10 个光子也能进行有效光电转换并雪崩放大，并且具有单光电子探测能力。

SiPM 对于磁场，外部撞击还有很好的抵抗性，而且相比于工作在 6K 温度的 VLPC，SiPM 对温度可以说几乎没有要求，这些优点使其成为闪烁光纤探测器的光电倍增器件的不二之选，最新的使用了 SiPM 的闪烁光纤阵列探测器甚至已经达到最好了  $70\mu\text{m}$  的空间分辨。

优异的性能也让 SiPM 在应用领域快速取代了传统的光电倍增器件，在成像领域得到广泛应用。

## 第三节 宇宙射线望远镜

### 一、宇宙射线

宇宙射线是来自外太空的带电高能次原子粒子。它们可能会产生二次粒子穿透地球的大气层和表面。主要的初级宇宙射线（来自深太空与大气层撞击的粒子）成分在地球上一般都是稳定的粒子，像是质子、原子核、或电子。但是，有非常少的比例是稳定的反物质粒子，像是正电子或反质子，这剩余的小部分是研究的活跃领域。大约 89% 的宇宙线是单纯的质子，10% 是氦原子核（即  $\alpha$  粒子），还有 1% 是重元素。这些原子核构成宇宙线的 99%。孤独的电子（像是  $\beta$  粒子，虽然来源仍不清楚），构成其余 1% 的绝大部分； $\gamma$  射线和超高能中微子只占极小的一部分。

在粒子物理的领域，宇宙射线扮演着重要的作用，在历史上，1932 年 C.D. 安德森 (Carl David Anderson) 在宇宙线中发现了正电子，1936 年  $\mu$  子在宇宙射线中被发现，之后人们在宇宙射线中发现了大量的奇异粒子： $K^0$ ， $\pi$  介子等。直至今今天，高能宇宙射线的能量仍远超加速器所能制造的粒子束能量，所以宇宙射

线中还很可能有我们所期待的新物理。

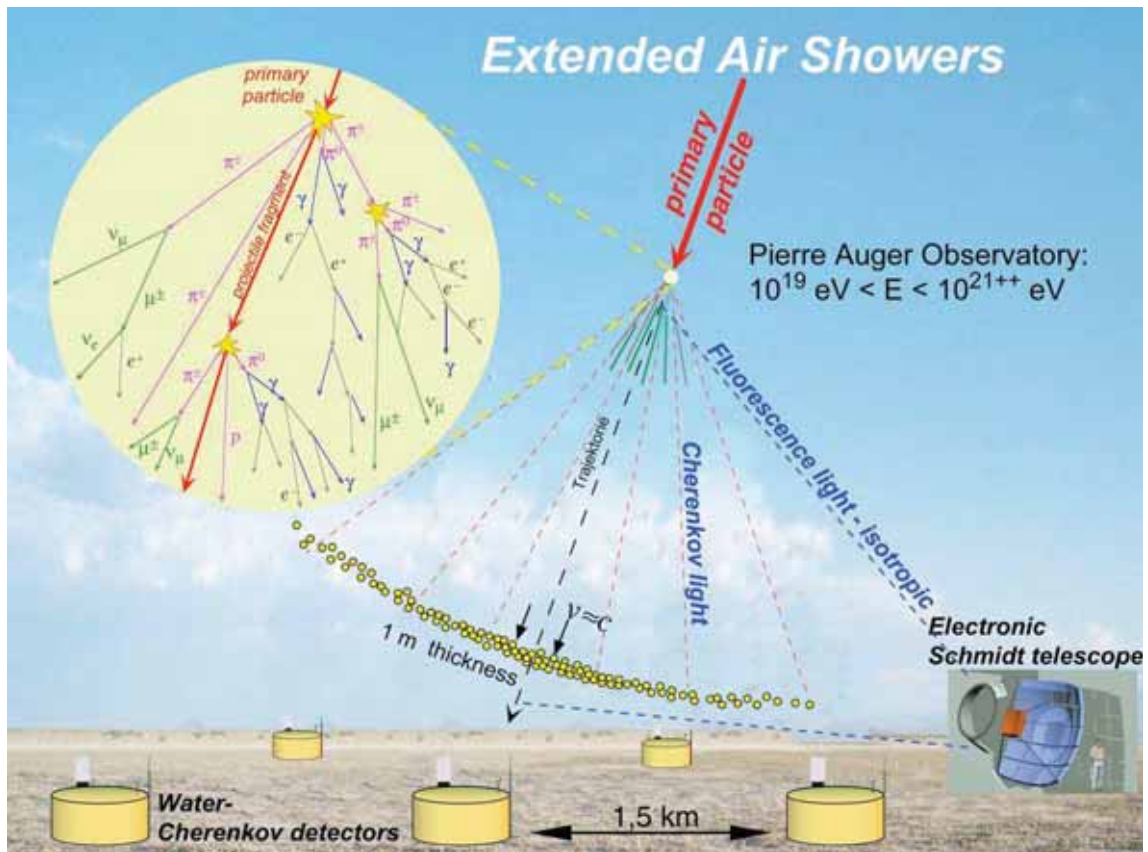


图 1.4 宇宙射线在大气中的簇射

## 二、宇宙射线探测

为了探测宇宙射线，粒子物理学家建造了专门的探测器。类比于天文学常用的光学望远镜，这种探测器往往被称为宇宙射线望远镜。宇宙射线望远镜不仅可以用于发现宇宙射线中的新物理，还可以提供宇宙射线测试平台。在实验室中，经常会需要粒子束来进行各种测试，而宇宙射线便是常用的粒子束，所以对于实验室来说，一个宇宙射线测试平台是十分重要的。

本文制作了一个宇宙射线望远镜，该望远镜有一个闪烁光纤阵列探测器和两个塑闪计数器组成，探测面积为  $50\text{mm} \times 60\text{mm}$ ，能有效探测宇宙线信号，并且能达到较高位置分辨。

## 第二章 宇宙射线望远镜系统的设计

本章进行了宇宙射线望远镜系统的设计，该系统主要由闪烁光纤阵列探测器和塑料闪烁计数器组成。闪烁光纤探测器进行宇宙线粒子探测，采用逐条读出的方式，理论上其位置分辨为条间距的  $\frac{1}{\sqrt{12}}$ ，所以为达到较高位置分辨，将闪烁光纤进行密排，然后根据闪烁光纤的几何设计依次设计 SiPM 阵列板，sma 读出板或 DAQ 读出板，暗盒。塑料闪烁计数器进行宇宙线符合测量，望远镜使用了两个塑料闪烁计数器，分别位于闪烁光纤阵列探测器上下方，用两个塑料闪烁计数器的与信号作为触发来记录数据，塑料闪烁计数器由塑料闪烁体，波长位移光纤，光电倍增管组成。

### 第一节 闪烁光纤阵列探测器

#### 一、总体设计

图 2.1 展示了闪烁光纤阵列探测器的整体结构设计，为达到高位置分辨，将闪烁光纤密排，然后根据闪烁光纤尺寸，决定采用单端间隔读出的方式，依此设计了 SiPM 阵列板，用 RTV-615 硅胶将 SiPM 阵列板与闪烁光纤读出端耦合，闪烁光纤和 SiPM 阵列板都置于暗盒中，采用柔性板引出 SiPM 阵列板的信号，可采用 VATA 读出板-PC 和 sma 读出板-示波器两种读出方式，前者主要用于数据采集分析，后者主要用于探测器调试。



图 2.1 闪烁光纤阵列探测器逻辑图

## 二、闪烁光纤

对于闪烁光纤阵列探测器，闪烁光纤本身的性质很大程度地决定了整个探测器的性能，同时探测器其他部件往往也要考虑是否与闪烁光纤性质相配合，所以闪烁光纤的各种属性对整个探测器是非常重要的。

此次我所用的是 Saint-Gobain Crystals 这个公司制造的单包层光纤 BCF-20<sup>[3]</sup>，是一种边长 1mm 的方形光纤，内层材料是聚苯乙烯（Polystyrene），折射率 1.60，外包层材料是丙烯酸塑料（Acrylic），折射率 1.49，外包层厚度为光纤的 4%，最外层为涂层，来避免光纤间的串扰，厚度 10-15 $\mu\text{m}$ 。

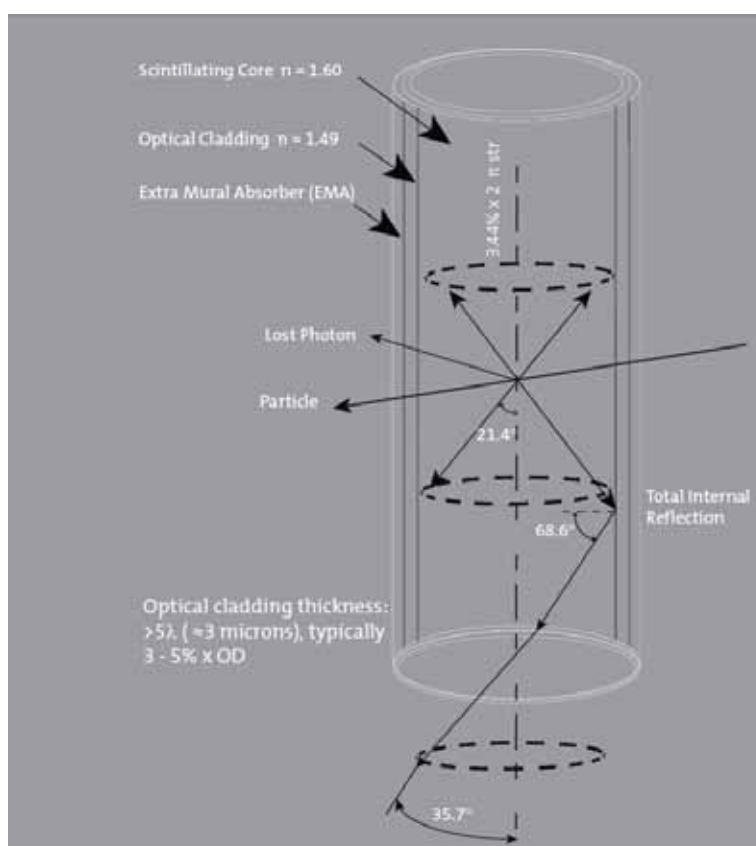


图 2.2 闪烁光纤结构示意图

BCF-20 产生荧光为绿光，发射波峰为 492nm，与光电倍增器件 SiPM 探测效率最高的波段相近；闪烁衰减时间 2.7ns，是相对比较快的一种闪烁体，对于宇宙线测量绰绰有余了；光子在光纤内衰减长度  $>3.5\text{m}$ ，相对于我们探测器 60mm $\times$ 50mm 的尺寸，几乎不用考虑衰减带来的影响；每 MeV 的沉积能量平均产生约 8000 光子，配合上 SiPM 的高增益，是探测器对低能区足够灵敏；总之 BCF-20 作为一种快速绿光闪烁体，能很好地满足我们的实验要求。

为满足对位置分辨的要求，设计将 50 根光纤密排，然后单端间隔读出，即



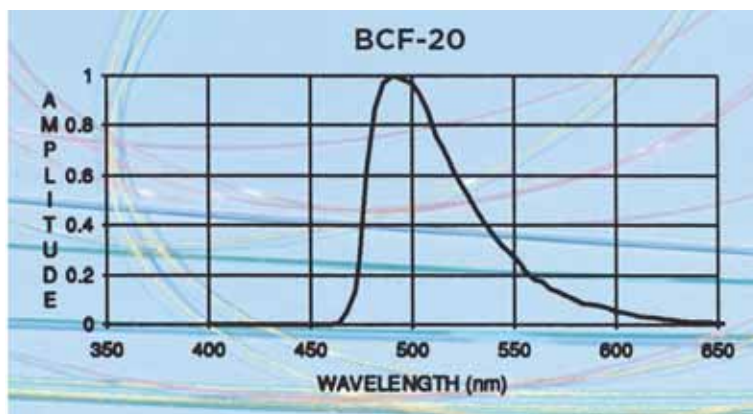


图 2.3 闪烁光纤发射波谱

第 1, 3, 5...49 这 25 根光纤读出端在一边, 剩下的光纤读出端在另一边。这种设计减小光纤间距的同时, 预留更多空间来排列后端的光电倍增器件 SiPM, 并且光纤间到 SiPM 的串扰也会减小。

### 三、光学耦合剂

光纤采用单端读出, 另一端用一种高反射率的漆涂上, 读出端与光电倍增器件 SiPM 之间用 RTV-615 这种硅橡胶进行耦合, RTV (Room Temperature Vulcanized) -615 是 Momentive 公司生产的一种光学耦合胶<sup>[4]</sup>, 目前在各方面均有广泛的应用, 其分为 A 液 B 液, 均为无色透明低粘性稠密液体, 按 10:1 的质量比混合后可在室温下凝固成弹性透明固体, 高温下凝固更快, 低温则更慢。这种硅橡胶一方面可以保护光纤端面和 SiPM, 避免灰尘进入, 并且具有一定抗震性; 另一方面有着较好的光传导率, 根据其产品说明, 1mm 厚的该硅橡胶对于我们探测波段的传导率 >95%

### 四、SiPM 阵列板

#### 1. SiPM

SiPM (Silicon photomultiplier) 是近年来在闪烁体探测器特别是使用闪烁光纤的探测器上使用较多的光电倍增元件, 其具有体积小, 增益高, 相应快, 探测效率高等优点。这次我们使用 SiPM 是 hamamatsu 生产的 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)<sup>[5]</sup>, 型号为 S13360-1350PE。MPPC 是工作在盖格模式下的一种光电倍增器件, 其结构上分为很多像素 (pixel), 每个像素从结构上来说就是一

个雪崩光电二极管（avalanche photodiode），对于盖格模式下的雪崩二极管，其输出信号大小与入射粒子能量无关；MPPC 的所有像素共用一个阳极作为信号输出端，所以 MPPC 输出信号大小仅与发生雪崩的像素个数有关，也就仅与入射光子个数有关，故名多像素光子计数器。

这次所使用的 S13360-1350PE 大小  $2.625\text{mm} \times 2.1\text{mm}$ ，感光区域  $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$ ，这两个尺寸与光纤截面大小，光纤读出端间距相当适宜，感光区域的窗面保护材料为环氧树脂（epoxy）。该 MPPC 工作波段在  $320\text{-}900\text{nm}$ ，最敏感波长  $450\text{nm}$ 。整片 MPPC 共计 667 个像素，像素大小  $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ ，电子学封装为贴片型，击穿电压  $53\text{V}$  左右，建议工作电压  $56\text{V}$ ，增益  $1.7 \times 10^6$  几何效率  $74\%$ ，光子探测效率  $40\%$

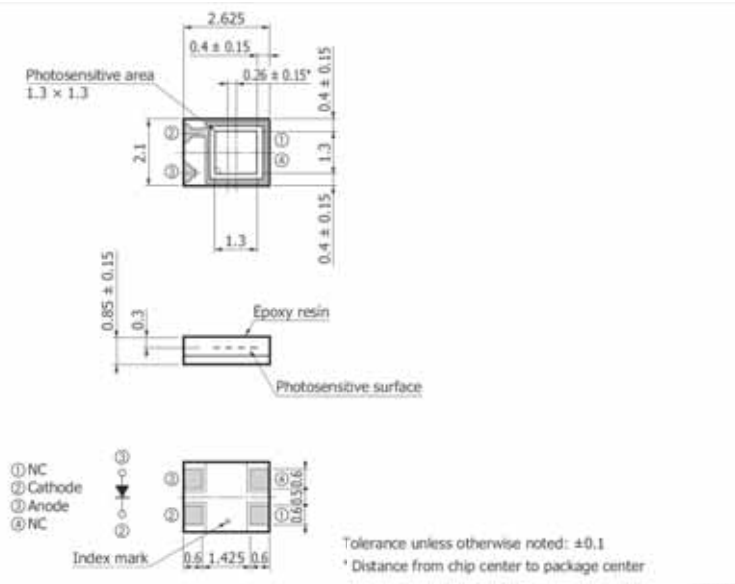


图 2.4 MPPC 几何尺寸

## 2. SiPM 阵列板

为接受 50 根光纤的光信号，我设计用 2 块相同的 SiPM 阵列板，每个板子上排布 25 个 MPPC。光纤边长  $1\text{mm}$ ，间隔读出，即相邻读出端间距在  $2\text{mm}$  左右，使用的 MPPC 宽  $2.1\text{mm}$ ，将 MPPC 密排后与光纤耦合，几乎完美的利用了空间，减小因几何问题带来的探测效率的损失。

图 2.5 为电路板原理图的一部分，是一个 MPPC 的信号通路，一个板子有 25 个这样的放大电路，这 25 个电路共用一个地和电源，信号输出端全部连接到一个插头上，插头可与后端的读出电子学连接。图 2.5 为电路板 PCB 设计图，电

路板共 4 层，其中 top, bottom 层放置元件，VCC, GND 层作为电源和地，其中 U1-U25 是 MPPC 的封装，它们全部位于 top 层，为方便和光纤进行耦合，top 层也仅放置了 MPPC 这种元件，其他的元件则全位于 bottom 层，连接后端读出电子学的插头位于 bottom 层正下。

该电路板一方面将 25 个 MPPC 密排，方便与光纤进行耦合；另一方面统一对 MPPC 进行了供电、信号采集，然后与读出电子学相连，实现了光电转换，信号放大的功能。

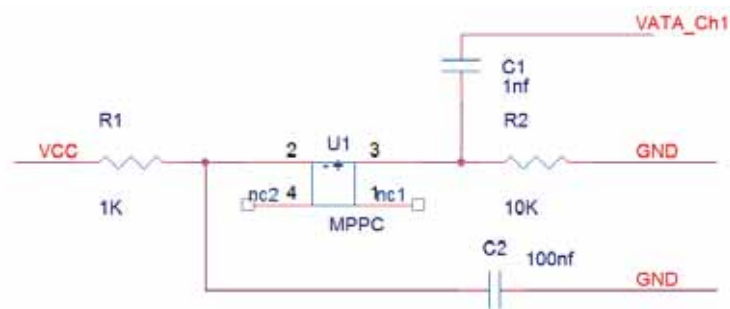


图 2.5 部分 SiPM 阵列板原理图



图 2.6 SiPM 阵列板 PCB 设计图

## 五、读出系统

### 1. 柔性连接板

该板由马思源师兄提供，主要起信号传输的作用。其插头与 MPPC 阵列板和之后介绍的 sma 读出板、VATA 读出板均相匹配。因为 MPPC 阵列板要和光纤一起放入暗盒，VATA 读出板也有相应的电磁屏蔽的盒子，所以专门用柔性板来做信号传输，这也是粒子物理实验里常见的做法。

### 2. sma 读出板

闪烁体产生的光子经过 MPPC 阵列板光电转换，然后由柔性连接板引出，最后还需要读出板我们才能真正的看到信号。我们使用了 sma, VATA 这两种读出板，其中 sma 读出板顾名思义，就是将接受到的信号分到 sma 头上，此次设计





图 2.7 柔性连接板

的 sma 板共有 32 条通路，即 32 个 sma 头（虽然闪烁光纤只提供 25 路信号，但柔性板和 VATA 板的接口都是 32 路的，所以都是使用 32 路的接口），原理图也就是将插头分别与 32 个 sma 封装相连，PCB 设计图如图 2.7。

sma 读出板为每一个通路（MPPC）提供了一个 sma 连接器作为输出，利用 sma 读出板我们可以用示波器来看任何一条通路的信号，在调试和检查的时候可以通过 sma 读出板来看具体是那一条通路出现了问题，虽然不是最后的读出装置，但也是相当重要的辅助设备。

### 3. VATA 读出板

前文介绍到 sma 读出板主要是用于测试检查的读出板，VATA 读出板则是用于甄别过阈数据并采集的读出板，使用的 VATA 读出板是 dampe 实验用剩下的板子，在 dampe 实验中经过多次测试，性能上完全能满足闪烁光纤阵列探测器

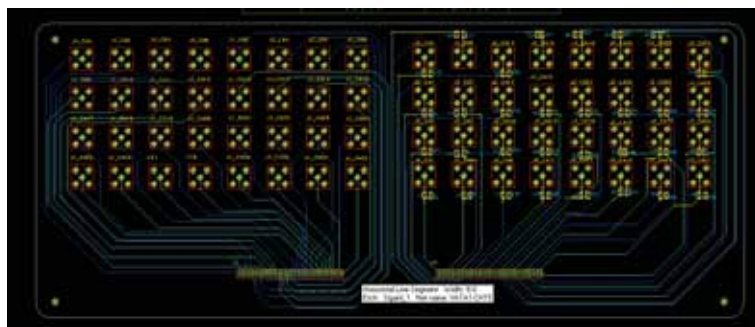


图 2.8 sma 读出板 PCB 设计图

的需求。VATA 读出板使用了 4 块 VATA-160 芯片，需要 5V 供电，可接受  $4 \times 32$  共 128 路信号，信号经过芯片处理后，由 USB 线输出到 PC，数据编码解码内容在后文具体介绍。该板具有自动刻度，产生 trigger，信号采集的功能。与之配套的程序也由马思源师兄提供，操作起来十分便捷，与之配套的还有一个铝制盒子，可以屏蔽部分电磁干扰，达到降噪功能，盒子上留有出口供电电源线，柔性连接板，USB 线使用。



图 2.9 VATA 读出板

## 六、暗盒

为降低噪声，闪烁光纤和 SiPM 阵列板必须放在暗盒中做避光处理，考虑到光纤需要密排，然后与 SiPM 进行耦合，我做了如图 2.9 的设计，光纤摆放时穿过方形孔直至另一端的壁面，MPPC 阵列板 top 层垂直纸面贴上去，图中类似台阶

的设计可以让 MPPC 刚好贴合上去，MPPC 与光纤的空隙则有 RTV 胶补上。图中只显示了暗盒主体部分，我还设计了一个盖子，盖上盖子后整个暗盒便有了较好的避光性。整个暗盒尺寸  $100mm \times 100mm \times 60mm$ ，全部由铝制成，表面做发黑处理。

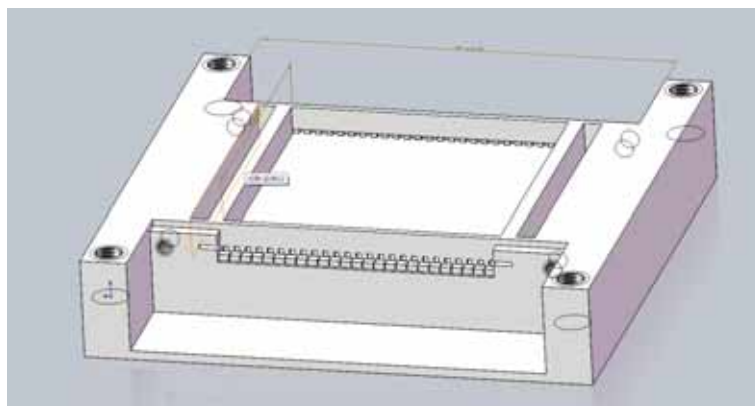


图 2.10 闪烁光纤阵列探测器暗盒设计图

## 第二节 塑料闪烁计数器

### 一、总体设计

图 2.11，展示了塑料闪烁计数器的整体结构设计，暗塑料闪烁体，波长位移光纤，光电倍增管都放在暗盒中，波长位移光纤与塑料闪烁体和 PMT 都用 RTV-615 耦合，PMT 输出端从暗盒开口伸出，与外部插件连接。选用的塑料闪烁体面积为  $60mm \times 60mm$ ，与闪烁光纤阵列探测器探测面积接近，采用波长位移光纤作为光导，光电倍增管采集信号后输出到外部逻辑插件进行符合测量。



图 2.11 塑料闪烁计数器逻辑图

### 二、塑料闪烁体

塑料闪烁计数器使用的闪烁体是 ELJEN TECHNOLOGY 生产的 EJ-200 塑料闪烁体<sup>[6]</sup>，该产品主要特点是衰减长度长，发光时间短，非常适合做计数符合。EJ-200 塑料闪烁体大小为  $10mm \times 60mm \times 60mm$ ，光在闪烁体内衰减长度

380cm，产生的脉冲上升沿 0.9ns，下降沿 2.1ns，脉宽 2.5ns，每 1MeV 的沉积能量能产生 10000 个光子，波峰在 425nm。

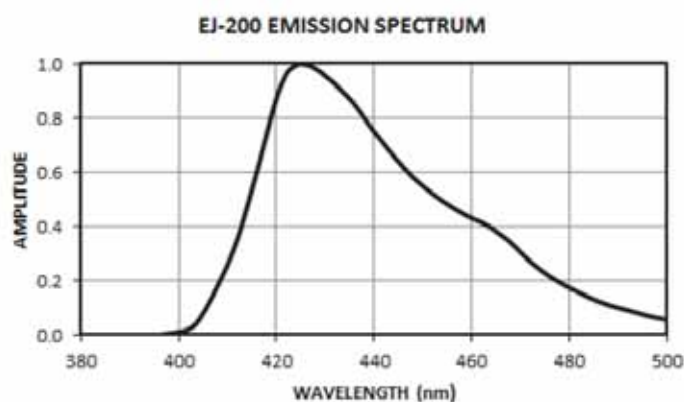


图 2.12 EJ-200 发射波谱

### 三、波长位移光纤

塑料闪烁计数器使用的光导为波长位移光纤 BCF-92<sup>[7]</sup>，与闪烁光纤阵列探测器用的 BCF-20 同为 Saint-Gobain Crystals 这家公司生产。BCF-92 作为波长位移光纤，能将蓝光转换成绿光，发光衰减时间 2.7ns，是一种非常快速的波长位移光纤，衰减长度 >3.5m，作为光导不必过于担心长度问题，吸收波峰大概 410nm，与 EJ-200 塑料闪烁体发射波峰相当接近，减小传输过程的信号损失，发射波峰 492nm。为采集塑料闪烁体的荧光，我在塑料闪烁体上开了槽，将光纤固定在槽内，然后用之前介绍过的 RTV-615 胶进行耦合，光纤另一端被中空的硅胶柱收束起来，硅胶柱直径大概 15mm，与 PMT 感光区对准后同样用 RTV-615 耦合。

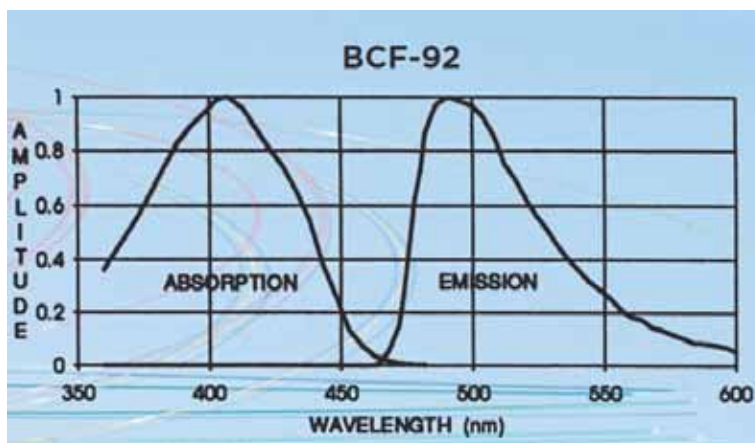


图 2.13 BCF-92 吸收发射波谱

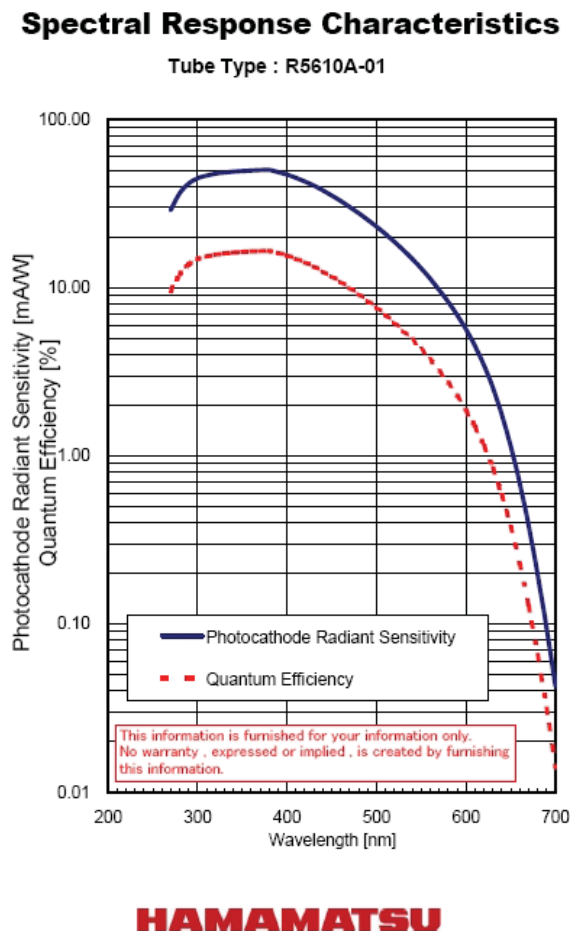


图 2.14 R5610A 光谱响应

#### 四、光电倍增管

塑料闪烁计数器使用的光电转换器件是 hammamatsu 生产的 R5610A 型光电倍增管 (PMT)<sup>[8]</sup>。R5610A 光阴极尺寸 15mm, 探测范围从 300nm 到 650nm, 峰值波长 375nm。R5610A 对光十分灵敏, 而且增益非常高, 其增益典型值为  $2 \times 10^6$ 。R5610A 同时对光响应十分快, 其典型上升时间 1.3ns, 典型渡越时间 12ns。

#### 五、暗盒

塑料闪烁计数器使用了一个暗盒将塑料闪烁体, 波长位移光纤, PMT 全装进去, 仅留一个信号出口。暗盒尺寸  $45mm \times 86mm \times 248mm$ , 结构如图 2.15 所示, 塑料闪烁体位于暗盒一端, 为使塑料闪烁体高度与 PMT 一致, 暗盒放塑料闪烁体的位置高度比其他地方高一些, PMT 在另一端, 设有一个凹槽来进行固定, 盒壁开有出口让输出端伸出。全盒由铝制成, 做发黑处理, 盖子和盒沿间有橡胶

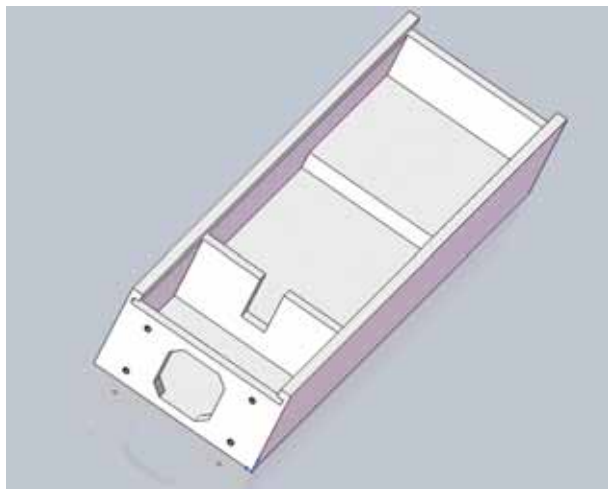


图 2.15 暗盒设计图

圈来保证密封避光。

### 第三节 宇宙射线望远镜系统



图 2.16 宇宙射线望远镜系统

宇宙射线望远镜系统逻辑结构如图 2.16 所示，当有宇宙射线打到探测系统时，闪烁光纤阵列探测器的信号由柔性板输入到 VATA 读出板，VATA 读出板会对这些信号进行一些积分成形等处理，另一方面两个塑料闪烁计数器的模拟信号都输出到甄别器，甄别器判断模拟信号是否过阈来输出数字电压信号到逻辑插件 CO4020，逻辑插件对 2 个塑料闪烁的信号做与运算后作为外触发输入到 VATA 读出板，若外触发信号为真，VATA 板接受到外触发 500ns（考虑对闪烁光纤阵列探测器的信号进行处理需要的时间）后会将数据通过 USB 线输出到电脑，若外触发信号为假，则不进行输出。



## 第三章 宇宙线望远镜系统的制作

### 第一节 闪烁光纤阵列探测器的制作

#### 一、闪烁光纤的切割研磨

我们所使用的塑闪光纤 BCF-92 是边长 1mm 的方形光纤，比普通光纤要厚了很多，普通的光纤切割机无法整齐地切割 BCF-92，普通的切割方法切割结果如图 3.1 所示，切割端面并不整齐，而且最外的涂层会产生形变并覆盖在切割面上，这样的光纤显然是无法满足探测器的光学要求，但限于实验室条件，只能使用机械切割的方法，所以我对切割出来的光纤端面进行了研磨。一开始使用实验室内的专门用于研磨闪烁体的机器进行研磨，但由于光纤固定不牢，机器配套的砂纸过于光滑，研磨效率相当低。之后决定使用较粗糙的砂纸进行手工研磨，整个光纤加工过程如下：先用光纤切割机将光纤切成 65mm 每段，然后 10 根一组在砂纸上研磨，研磨的同时要在接触面添加冰水混合物，避免端面温度过高而形变或光学性质变化，每组研磨 10-15 分钟，因为是单端读出所以只用研磨一端，另一端用反射率高的白漆涂上，闪烁光纤到此就算加工完了。接下来将光纤放到暗盒里即可。



图 3.1 BCF-92 切割效果图

## 1. 暗盒的制作



图 3.2 暗盒实物图

根据光纤密排和避光性的要求，我设计了一个暗盒，其设计图在第二章展示过了，但限于实验室条件，无法制成图示的暗盒，与技术人员讨论后，最终制作出如图 ?? 的暗盒，暗盒分为两个零件，之间用螺丝连接。其中一个零件用来摆放光纤，该零件上有锯齿状结构使光纤摆放整齐，另一个零件用来放 SiPM 阵列板，如图 3.4 所示，SiPM 阵列板一面上的 MPPC 阵列刚好能卡在改零件上。光纤，SiPM 阵列板都摆好后，经过简单的校准检查，确定光纤输出端面正对 MPPC 感光区后，就可以将两个零件拼接在一起了。

## 2. SiPM 阵列板的制作

我们使用的 SiPM 型号是 MPPC-s13360-1350PE，根据其工作原理我设计了 SiPM 阵列板，图 2.6 是 SiPM 阵列板的 PCB 设计图，该板集成了 25 路 MPPC 放大电路，将 25 个 MPPC 在 top 面排成一排，电压统一提供，信号从插头由柔性板引出。画好 PCB 设计图后，委托兴森快捷电路科技有限公司进行制板，一般一周就能收到板子。为满足测试需要，我一共设计制作了三个版本的 SiPM 阵列板，三种版本 MPPC 排列，电路原理图均相同，第一个版本是测试版本，后两种版本是在第一个版本基础上做了一些布线上的小优化，然后插头采用了不同的两种接口形成的版本，后两种版本的接口分别与 sma 读出板，VATA 读出板相对应。

## 二、SiPM 阵列板元件的焊接

为对 SiPM 阵列板以及 MPPC-s13360-1350PE 进行简单测试，我们手工焊了 5 条通路上的元件以及插头，电源线，然后进行了暗计数测量，但是后来相与光





图 3.3 SiPM 阵列板手工焊接图

纤进行耦合是，发现手工焊接的 SiPM 水平不够整齐，无法与暗盒设计贴合，导致 RTV-615 胶会泄露，耦合效果较差。但限于实验室条件，加之 SiPM 阵列板上的 SiPM 焊点间距很近，用焊笔很难保证 SiPM 阵列水平上能整齐，所以我们找到了可以进行机械焊接的科大国盾量子技术股份有限公司，希望他们能帮我焊接 SiPM 阵列板，使 MPPC 阵列足够整齐，能与暗盒边沿贴合到一起，与该公司技术人员交流后，决定按以下流程焊接 SiPM 阵列板：先按照 SiPM 阵列板焊盘制作模具，模具上对应焊盘位置开孔，然后将模具盖在 SiPM 阵列板上，刷一层锡膏，这样锡膏就会落在焊盘上，用镊子摆放好元件，把 SiPM 阵列板放入烘焙室加热使锡膏融化，然后冷却凝固，这样就焊接好一面的元件了，然后按同样步骤焊另一面，整个 SiPM 阵列板就焊接完成了，图 3.4 展示了机械焊接的 SiPM 阵列板，从图上可以看到该板 MPPC 阵列能与暗盒边沿很好地贴合在一起。

### 1. 闪烁光纤与 SiPM 阵列板的耦合

我使用 RTV-615 这种硅橡胶来耦合闪烁光纤和 MPPC，RTV-615 分为 A 液 B 液，需按 10:1 比例混合，然后过一段时间才凝固成硅橡胶，RTV-615 胶的具体混合步骤会在塑闪计数器制作过程中详细说明。之前提到，手工焊接的 SiPM 阵列板因 MPPC 阵列不够整齐，与暗盒间缝隙较大，将 RTV-615 灌入时会从缝隙中漏出，耦合效果较差。安徽量通公司为我们焊接的 SiPM 阵列板则能较好地贴合暗盒，加之我吸取了前一次失败经验，混合 RTV-615A 液 B 液后等其凝固一段时间，在其未完全凝固时倒入光纤与 MPPC 之间，最后耦合效果还是不错的。至

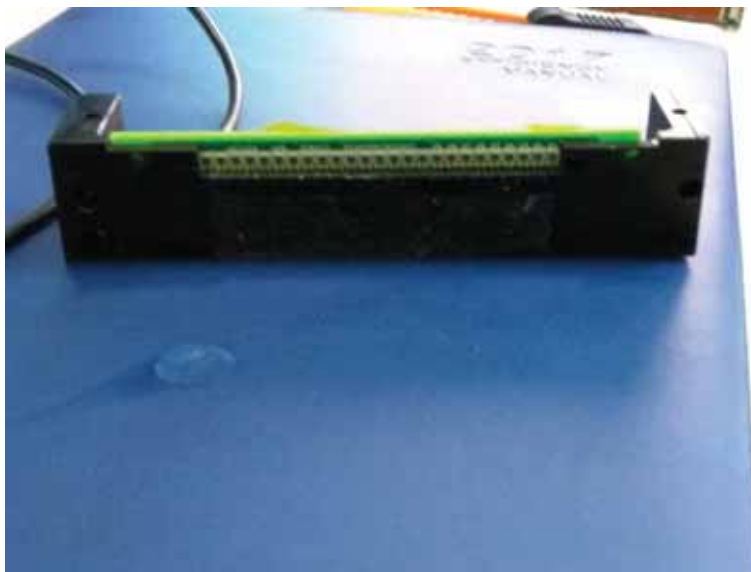


图 3.4 SiPM 阵列板机械焊接图

此，闪烁光纤阵列探测器的主体就算完成了，剩下的用柔性板引出信号接到需要的读出板即可。

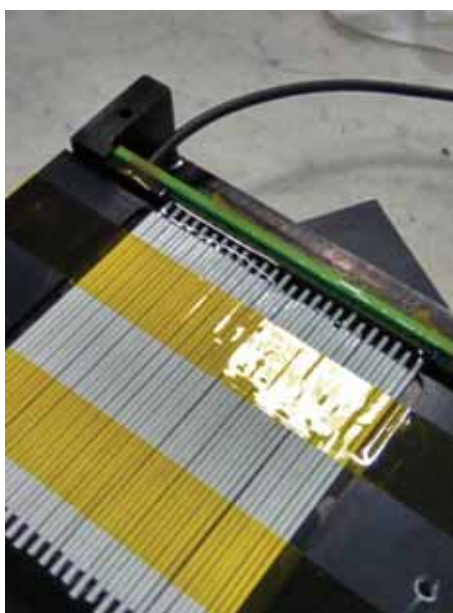


图 3.5 SiPM 阵列板与光纤耦合图

## 第二节 塑闪计数器的制作

塑闪计数器由闪烁体 EJ-200，波长位移光纤 BCF-92，光电倍增管 R5610A 组成，这三个器件全部都是直接购买，所以实际制作过程并不复杂。首先耦合闪烁体 EJ-200 和波长位移光纤 BCF-92，我在闪烁体上开了与光纤相对应的槽，一

面 8 个槽，一面 9 个槽，两面槽的位置错开分布。槽开完后将光纤放置其中，用 502 胶先固定。接下来就是 RTV-615 胶的混合，将 A 液 B 液按 10:1 的比例混合制作了 55ml 的 RTV-615 胶，将该胶放入真空箱抽真空 1 小时减少其中的气泡。



图 3.6 RTV-615 抽真空

RTV-615 胶制作完成后，用其把光纤和闪烁体进行耦合，为防止其泄露，我用透明胶在闪烁体周围做了类型围栏的结构，然后将 RTV-615 倒入。用 RTV-615 将光纤与闪烁体耦合同样是在真空箱内进行的，大概 12 个小时左右完成，一面的耦合完成后进行另一面，两面耦合都完成后，用避光材料将闪烁体和胶包起来。



图 3.7 塑闪计数器耦合过程

光纤另一端则用一个硅胶柱收束起来，方便与 PMT 想耦合，硅胶柱截面和 R5610A 感光区均为直径 15mm 的圆。光纤与硅胶柱之间的空隙同样用 RTV-615

填上，一方面固定光纤，另一方面增加光传导率。固定好光纤后对硅胶柱一头进行研磨，是光纤头能露出，增加光传导率。然后用 RTV-615 耦合硅胶柱和 PMT，最后将闪烁体，波长位移光纤，PMT 放入暗盒，盖上盖子，塑闪计数器就完成了。



图 3.8 硅胶柱端面

### 第三节 宇宙线望远镜系统的搭建

闪烁光纤阵列探测器和塑料闪烁计数器都制作完成后，下一步便是搭建宇宙射线望远镜系统，最好结果如图 3.9 所示，闪烁光纤阵列探测器位于中间，塑料闪烁计数器位于其上下方（为拍摄需要上方的塑料闪烁计数器被挪走了），闪烁光纤阵列探测器的信号有柔性板引出到 VATA 读出板，塑料闪烁计数器信号输出到逻辑插件做与运算后作为外触发提供给 VATA 读出板，VATA 读出板根据触发将数据发送到 PC。



图 3.9 宇宙射线望远镜系统

## 第四章 宇宙线望远镜系统的测试

闪烁光纤阵列探测器与塑闪计数器制作完成后，我对他们分别进行了宇宙线与暗计数测试，然后进行了一些改进，确定它们能正常运行后，搭建了宇宙线望远镜平台，进行宇宙线测试，来检验我的宇宙线望远镜的性能。

### 第一节 塑闪计数器的宇宙线测试

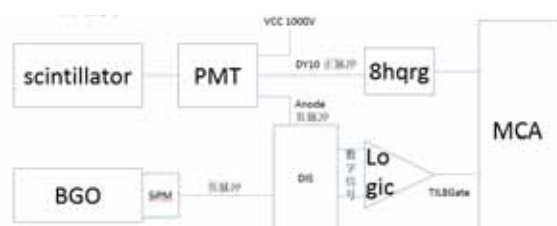


图 4.1 塑闪计数器测试平台示意图

图 4.1是我们用来测试塑闪计数器的实验平台示意图，我们使用了一个 BGO 探测器来做符合，符合结果作为外触发输入到多道分析仪上，多道分析仪根据符合结果来采集数据，给出结果。图 4.2是塑闪计数器的宇宙线测试结果，根据拟合结果，PMT 热激发产生的单光电子峰峰位为 41 道，宇宙线信号的峰位为 855 道，即宇宙线打在闪烁体上，PMT 接受到的闪烁体产生的光子数一般在 20 个左右，这样的光产额已经满足我们的需求了。

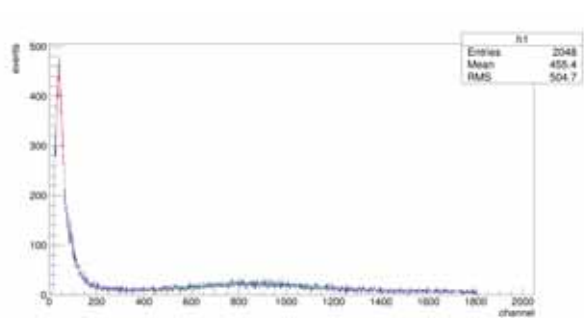


图 4.2 塑闪计数器宇宙线谱



## 第二节 MPPC 阵列板暗计数测试

为检测 MPPC 阵列板是否能正常工作以及测量电子学系统性能，我使用了 sma 读出板，VATA 读出板来读出 SiPM 热激发产生的暗信号。得到的数据分析表明 MPPC 阵列板上 25 个信号通路均正常工作，之后可能还会分析电子学系统带来的误差。

### 一、暗信号波形

用柔性板将 MPPC 阵列板的信号引出后输入到 sma 读出板，然后用示波器读出，每次只读一路（一个 MPPC）的暗信号，读出的信号波形如图 4.3 所示，可见其信号宽度在 50ns 以内，与 MPPC—s13360-1350PE 的产品说明相近，图中还可看见不同电子数的信号幅度为整数倍关系，（电子数不同是因为 MPPC 不同 pixel 间串扰造成，同时热激发多个电子的概率可以忽略不计）。

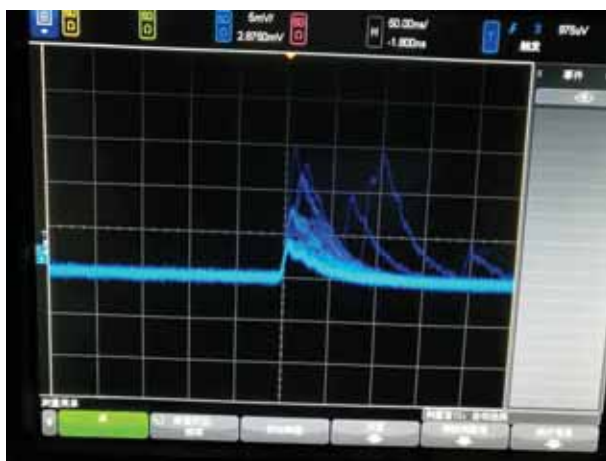


图 4.3 MPPC 阵列板暗信号波形

### 二、暗信号谱形

用柔性板将 MPPC 阵列板的信号引出后输入到 VATA 读出板，VATA 读出板将过阈信号输出到 PC，然后将 VATA 芯片的数据解码后进行分析。为理解不同工作环境下的 MPPC 工作状态，我们将阈值分别设为 100fc, 200fc, 300fc, MPPC 电压为 57V, 58V, 59V, 60V。图 4.4 为阈值 200fc, 电压 57V 测得的 MPPC 的暗信号能谱，去掉电子学台基后，可以看见 300, 600 道址处有两个峰，我认为对应的是两个光电子峰，根据电子学方面马师兄提供的参数，我们大概得知 1 个光电子

最后大致会产生 300fc 的信号被 VATA 读出板接受，大约估算出增益为  $2 \times 10^6$ ，与产品说明所给出的增益相符。

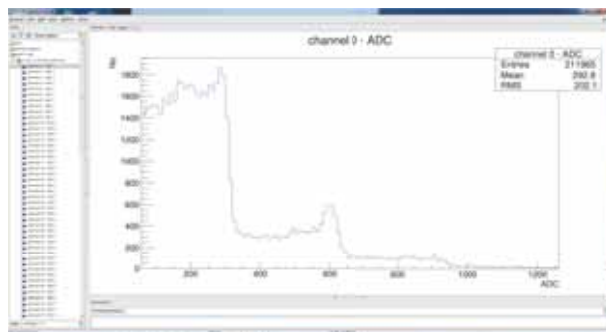


图 4.4 MPPC 阵列板暗信号能谱

### 第三节 宇宙射线望远镜测试

我们用两个塑闪计数器的与信号作为 VATA 芯片的外触发来进行宇宙射线的测量，将测到的数据去掉电子学台基，将 50 个通路的计数加到一起得到宇宙射线能谱，图 4.5 为 SiPM 阵列板电压 56V，VATA 读出板阈值 300fc 情况下的宇宙射线能谱，根据约 300 道址对应一个光电子，mip 的峰位大概位于 6000 道址左右，大致可以估算出一个 mip 在光纤内可以产生 20 个左右的光电子。我们为降低电子学噪声，进行了不同 SiPM 阵列板电压，不同 VATA 读出板阈值下的多组测量，最后发现在不太影响数据量的情况下，56V 的电压，300fc 的阈值能有较好的效果。

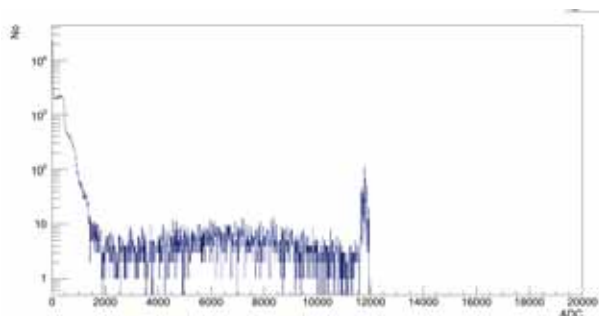


图 4.5 宇宙线能谱



## 第五章 总结

使用闪烁光纤与 SiPM 相组合制作了闪烁光纤阵列探测器，设计了 SiPM 阵列板，解决了光纤研磨耦合问题。使用塑料闪烁体和 PMT 相组合制作了塑闪计数器，尝试用波长位移光纤作为光导，并用 RTV-615 来耦合固定波长位移光纤。搭建了宇宙射线望远镜系统，将两个塑闪计数器的信号与运算后作为触发信号输入到 VATA 芯片，在 PC 上分析宇宙线能谱。根据已有的数据分析可知，全部 50 根光纤与 SiPM 耦合良好，SiPM 阵列板与 VATA 读出板工作正常，塑闪计数器的符合测量也正常运行，整个望远镜系统现在已经能正常工作，并且测到宇宙线能谱，看到 mip 信号，接下来我们计划进行更多的性能测试，包括位置分辨，探测效率，能量线性等。

## 参考文献

- [1] Baumbaugh B, Bertram I, Bross A, et al. Performance of a large scale scintillating fiber tracker using vlpc readout[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1996, 43 (3): 1146–1152.
- [2] Kirn T, collaboration L, et al. Scifi—a large scintillating fibre tracker for lhcb[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2017, 845: 481–485.
- [3] Chichester D L, Watson S M, Johnson J T. Comparison of bcf-10, bcf-12, and bcf-20 scintillating fibers for use in a 1-dimensional linear sensor[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013, 60 (5): 4015–4021.
- [4] Li W, Huber G. Optical characterization of rtv615 silicone rubber compound[J]. *Journal of Instrumentation*. 2014, 9 (07): P07012.
- [5] Mppc (multi-pixel photon counter)[M]. [S.l.]: HAMAMATSU, 2016.
- [6] General purpose ej-200, ej-204, ej-208, ej-212[M]. [S.l.]: ELJEN TECHNOLOGY, 2016.
- [7] Scintillating optical fibers[M]. [S.l.]: Saint-Gobain, 2016.
- [8] WANG X L, LI C, SHAO M, et al. Technique of particle detection[J]. *Hefei: Press of University of Science and Technology of China*. 2009: 250–266.