



復旦大學
FUDAN UNIVERSITY

宇宙线探测装置介绍

王曦阳 邹世明

指导老师：王小龙

现代物理研究所/核科学与技术系

2025.1.13

01 探测器原理简介

- 闪烁体
- 硅光电倍增器
- 电子学

02 宇宙线相关实验介绍

- 宇宙线科普实验
- 宇宙线相关参数测量实验
- 探测器性能测试实验

03 未来展望

宇宙线科普实验

- 小型宇宙线探测器组装
- 宇宙线径迹显示系统

宇宙线相关参数测量实验

- 宇宙线通量随探测器立体角变化
- 宇宙线通量的天顶角分布
- 宇宙线速度精确测量
- 宇宙线寿命测量
- 切伦科夫光相关测量

探测器性能测试实验

- 闪烁体探测效率测试
- 闪烁体衰减长度测试
- SiPM增益、暗计数率、击穿电压测试。

闪烁体：与粒子/辐射发生相互作用后产生闪烁光的探测物质。

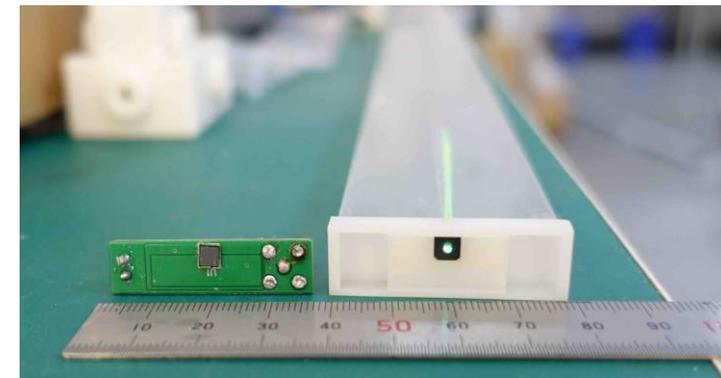
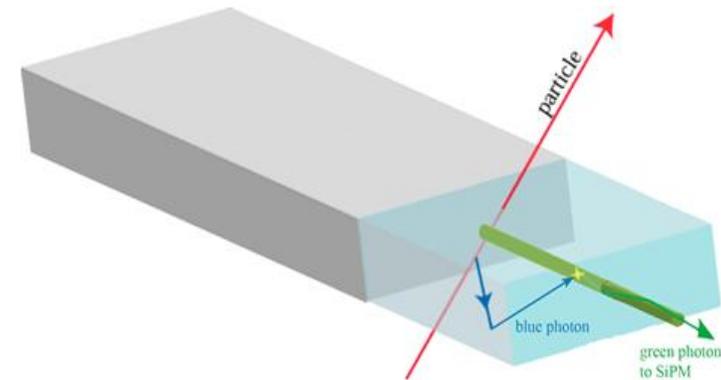
闪烁体探测器基本工作原理

入射粒子/辐射进入闪烁体中沉积能量，引起闪烁体内原子分子的**激发**。

原子或分子**退激发**，产生大量光子，部分传到到光电器件。

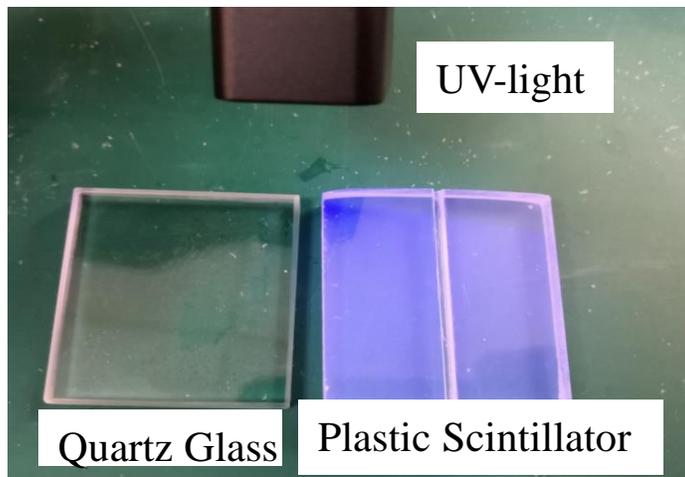
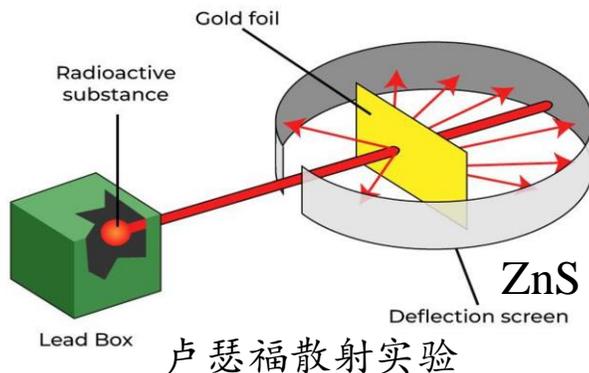
光电器件(SiPM)通过光电效应将光子转换为电信号。

电信号经过前端电子学的放大、甄别、成形后进行数据获取系统(DAQ)。



闪烁体嵌入波长位移光纤(WLS)

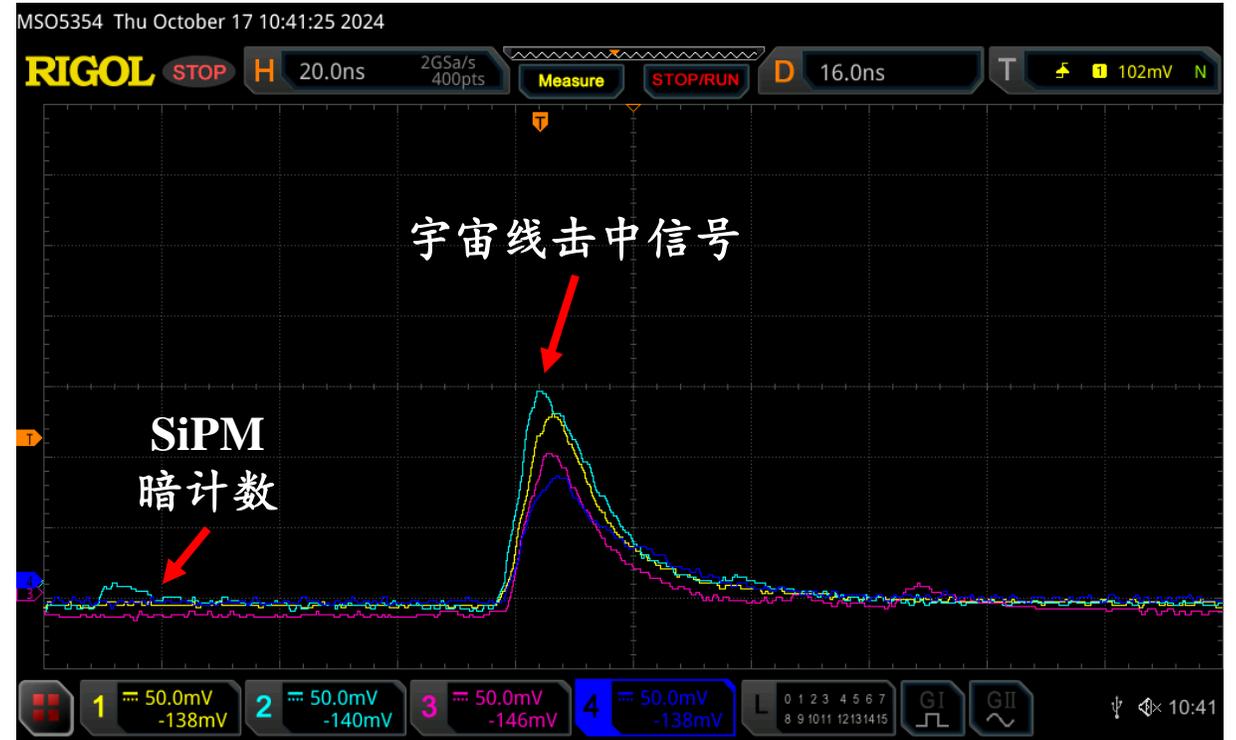
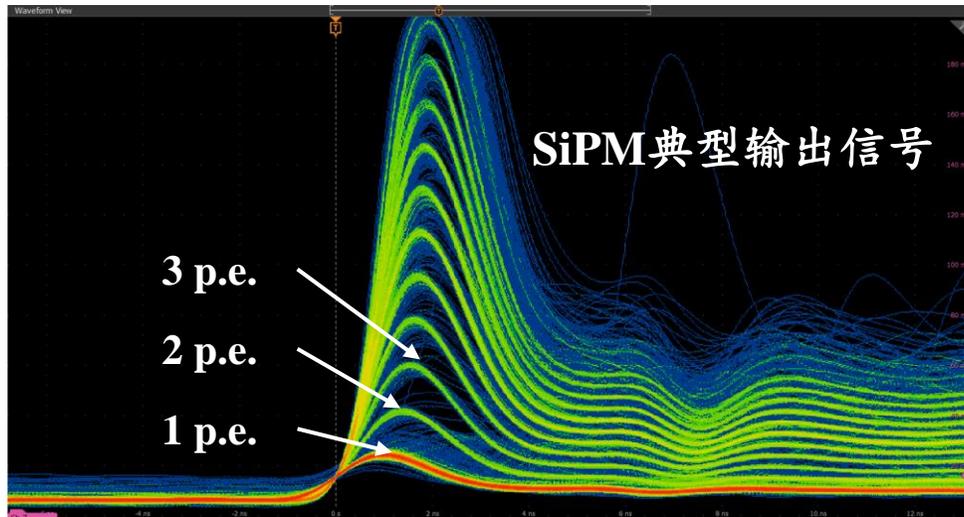
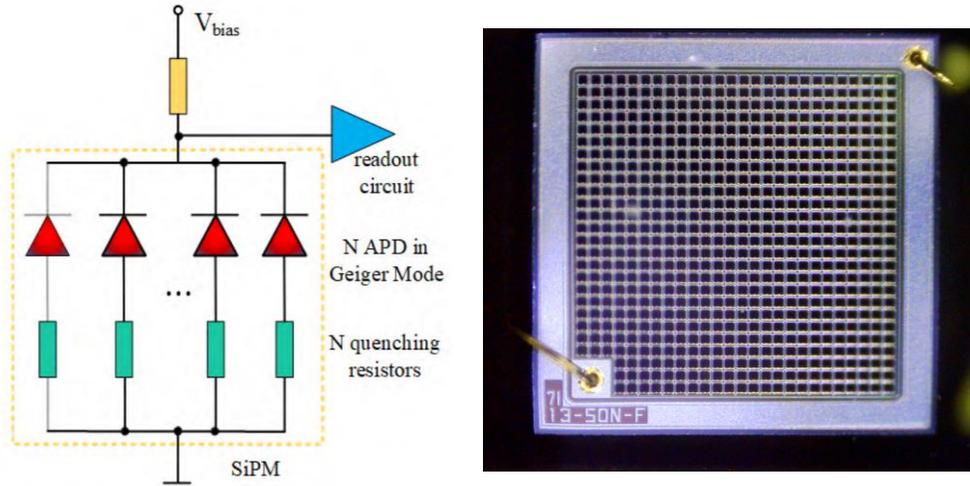
- 收集闪烁光传导至SiPM灵敏区
- 改变光波长与SiPM效率相匹配



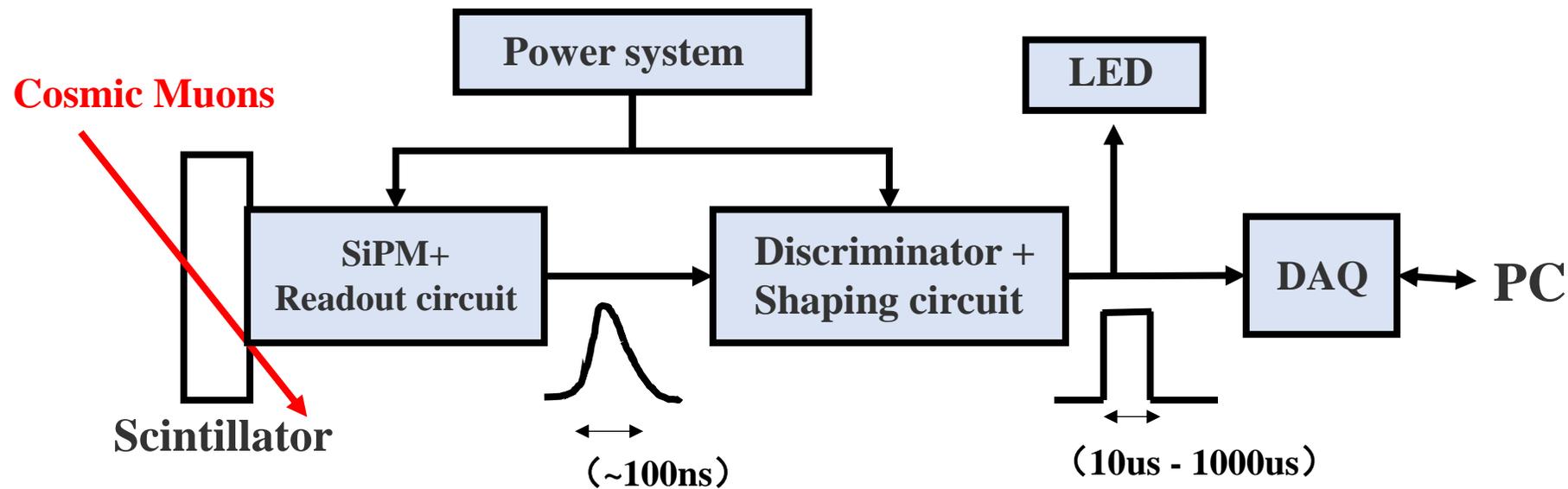
硅光电倍增器 (Silicon photon-multiplier, SiPM)



SiPM: 新型硅基光电转换器件, 由盖革模式下的APD并联组成。像素尺寸一般为几十微米。



SiPM暗计数: 暗状态下, 由载流子热运动引起的雪崩。
电子学中设计甄别器对信号与暗计数进行幅度甄别。



➤ 前端信号处理

- ✓ 放大器：对SiPM输出信号进行预放大。
- ✓ 甄别器：区分SiPM暗计数与真实信号。
- ✓ 单稳态电路：产生数字脉冲信号，驱动LED。

➤ 电源系统(Power system)

- ✓ 监控，并为SiPM与电子学提供工作电压；
- ✓ 温度补偿、欠压保护、过流保护。

➤ 数据获取系统 (DAQ)

- ✓ 统计宇宙线击中并与PC端通讯。

装置特点:

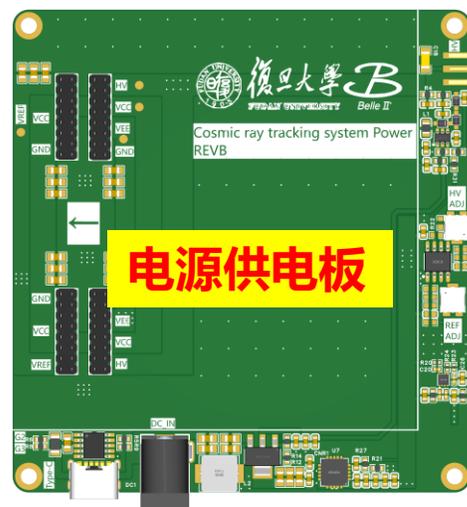
将宇宙线击中信号转换为驱动LED发光的脉冲信号，实现宇宙线径迹**实时显示**。



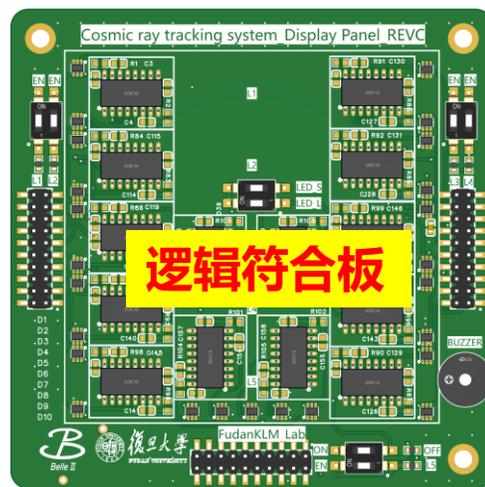
放大器阵列



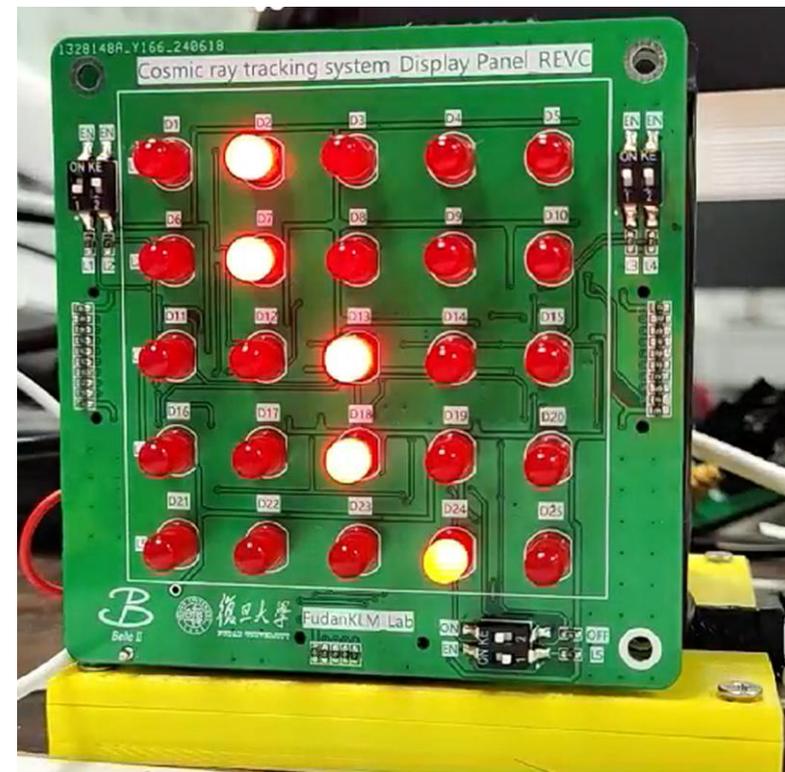
甄别器阵列



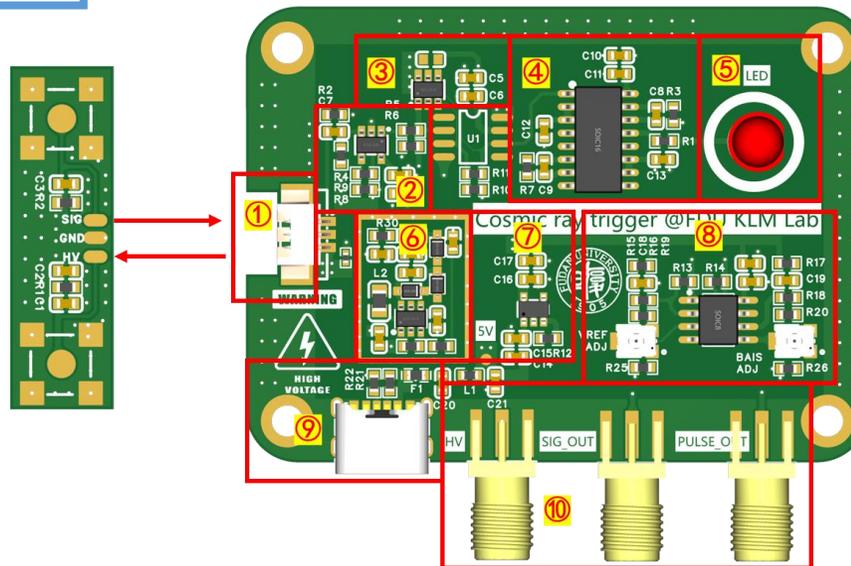
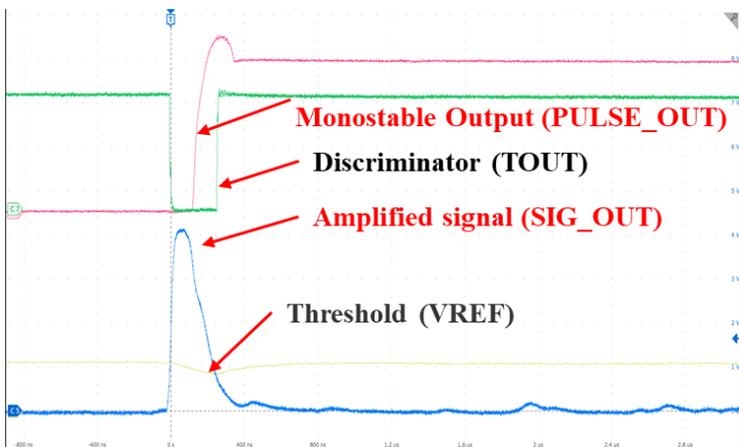
电源供电板



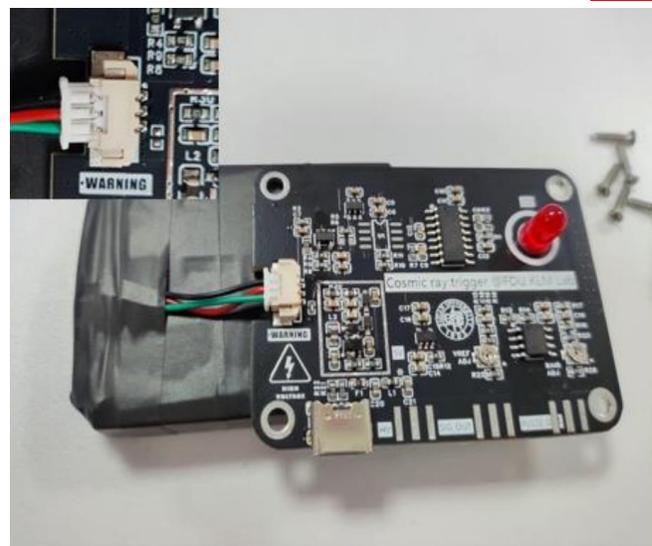
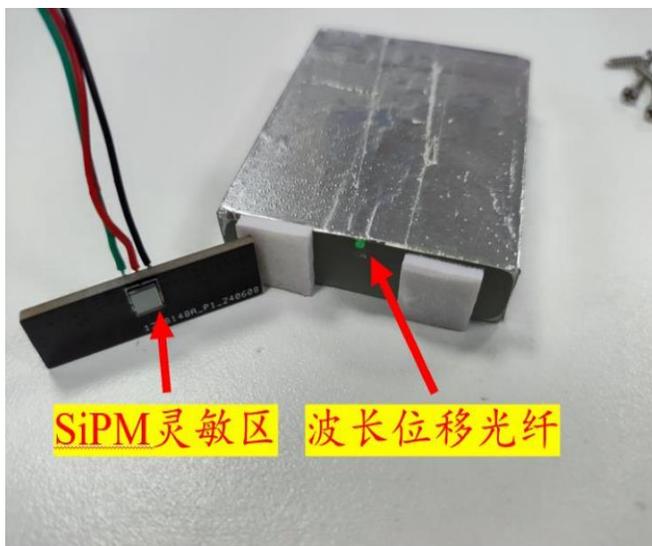
逻辑符合板



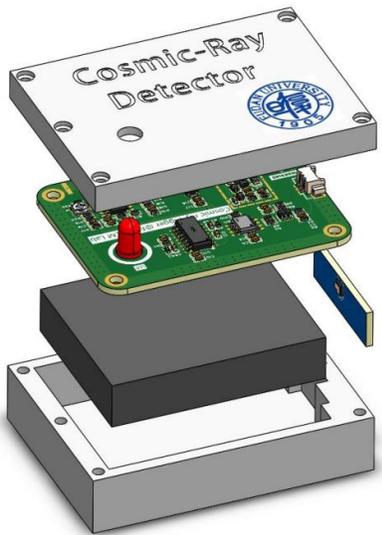
装置特点：高度集成化电子学，低成本



- ①: 电子学接口, 连接SiPM
- ②: 前置放大器
- ③: 甄别器
- ④: 单稳态电路
- ⑤: 宇宙线显示
- ⑥: SiPM高压产生电路
- ⑦: LDO稳压器
- ⑧: 甄别器阈值调节+SiPM高压细调
- ⑨: Type-C电压输入(+5V)
- ⑩: 典型信号输出



宇宙线探测器实验讲义 1



Cosmic-Ray
Detector



宇宙线探测器实验讲义
(V 1.0)

复旦大学核科学与技术系

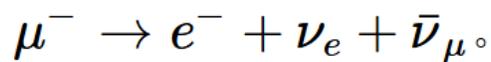
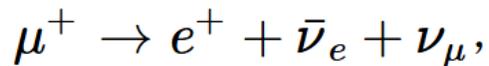
《核科学与技术前沿科研课堂》实验课



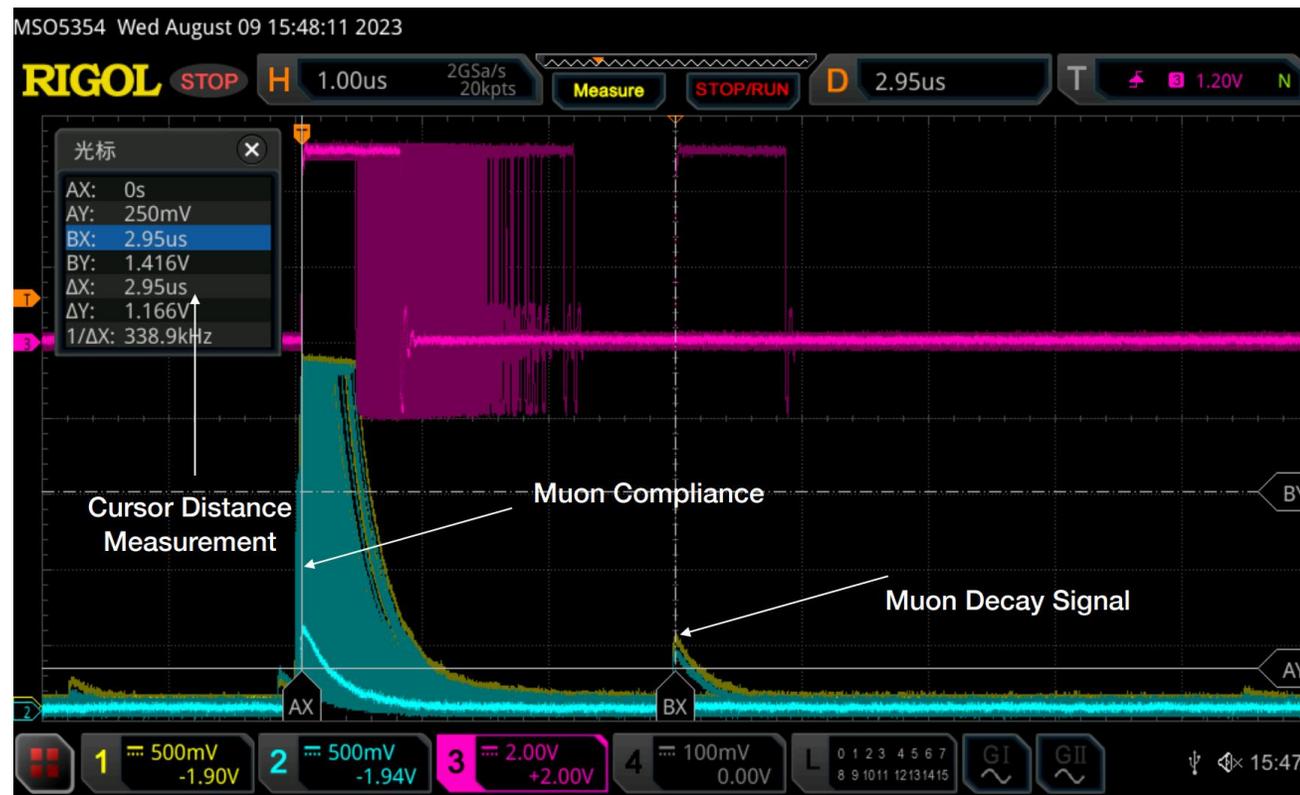
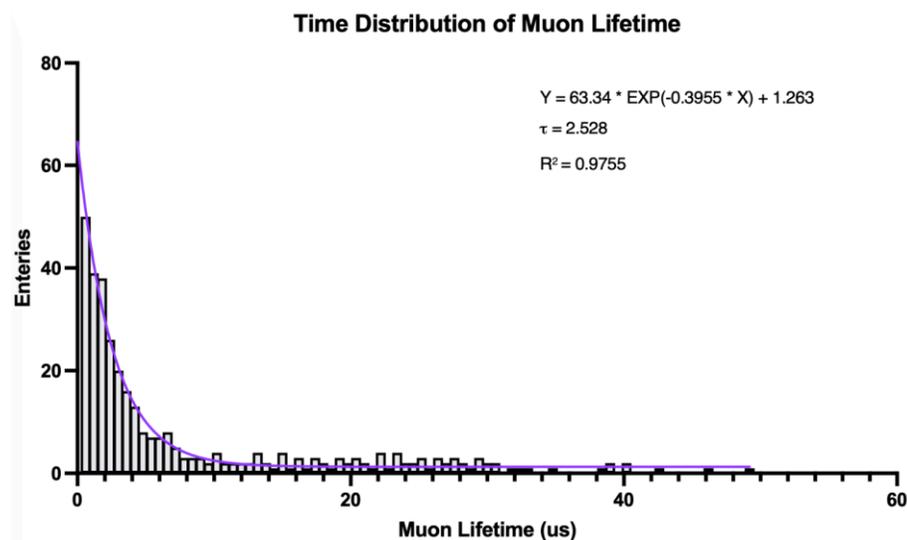
《复旦交叉学科高中生夏令营》实验课



海平面平均能量大约为4GeV，缪子到达我们的闪烁体探测器，会在闪烁体中沉积能量，大部分缪子会直接穿过探测器，但部分低能的缪子会在闪烁体中**沉积完所有能量**并停止在闪烁体中，发生衰变。



$$\lambda_\mu = \frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^2 c^2}{192\pi^3 \hbar^7}, \quad \text{缪子的静止寿命为 } 2.2 \mu\text{s}$$



通过测量初始缪子进入闪烁体的信号和衰变产物的电子在闪烁体内发出的第二个信号之间的时间差，可以测量缪子的寿命。

宇宙线符合计数实验——宇宙线通量测量



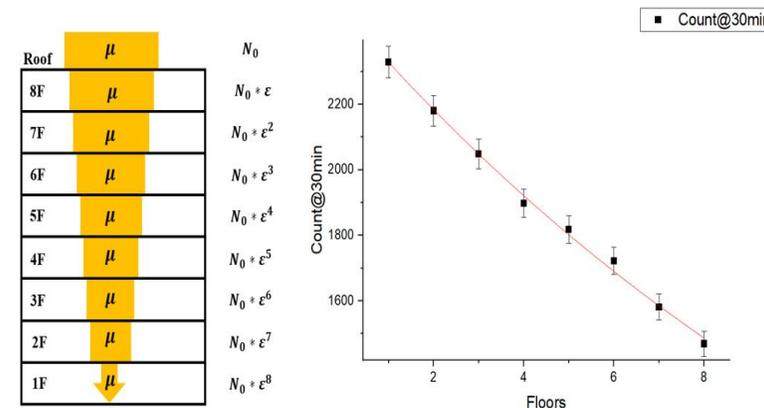
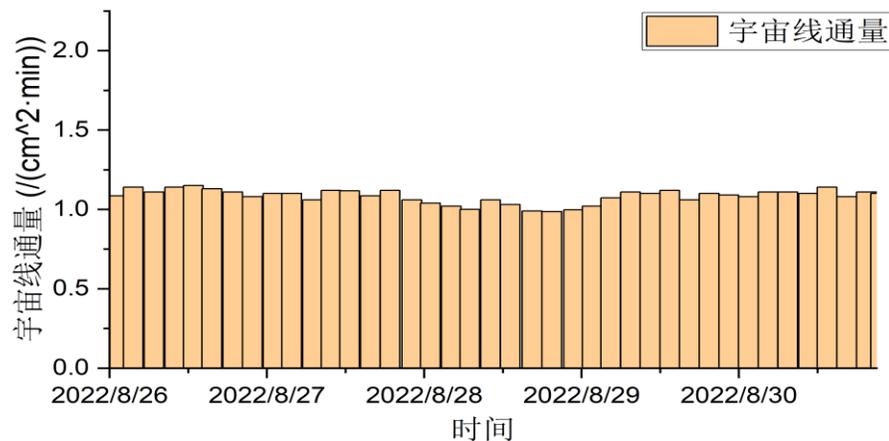
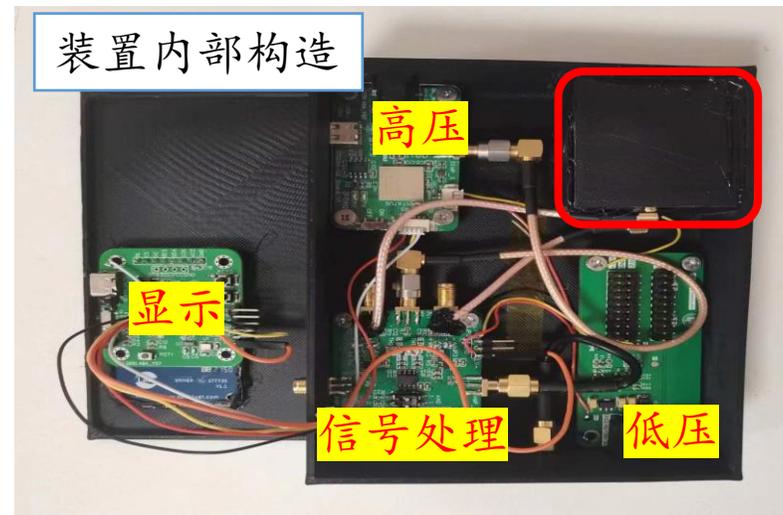
宇宙线通量：单位时间内穿过单位面积的宇宙线数量。

基于塑闪信号的时间符合测量：当宇宙线连续穿过两个塑闪模块时，它们同时给出响应信号。

宇宙线通量测试装置

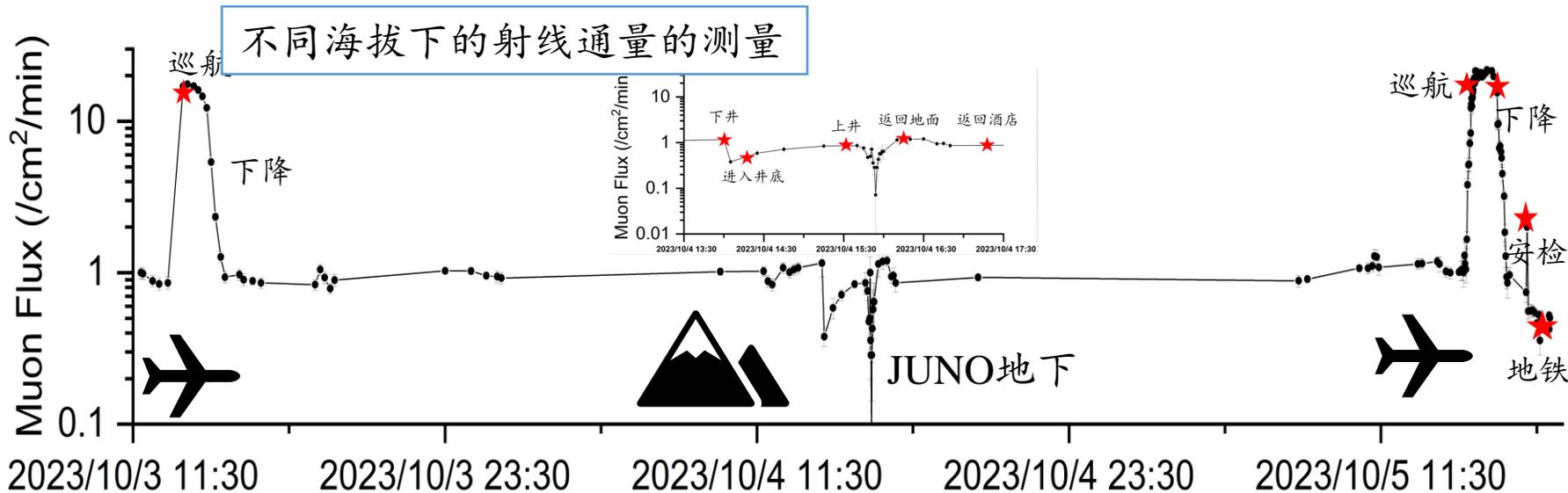


装置内部构造



宇宙线通量的长期监测&模块稳定性测试
宇宙射线通量与气压变化

宇宙线通量随楼层数的变化@逸夫科技楼
每层楼对于宇宙线的衰减~7%

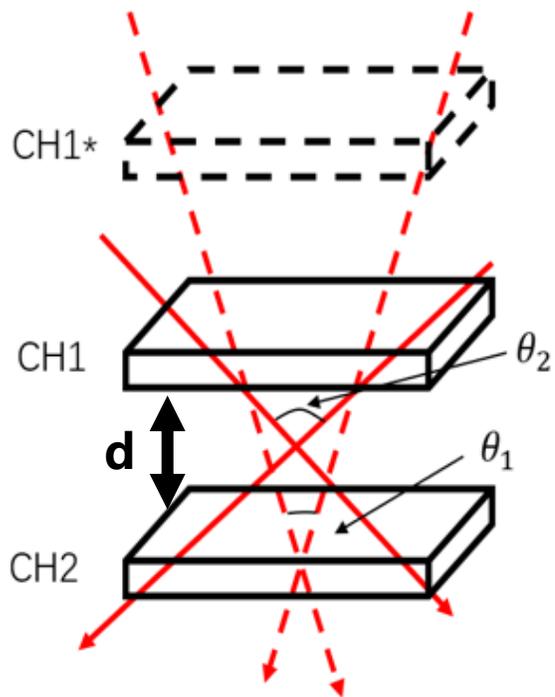


- **地面**上对于宇宙线通量的测量无明显变化。
- **高空**中的宇宙线通量比地面的高一个量级。
 - 飞机巡航高度~10000 m。
- **JUNO地下**宇宙线通量较地面显著降低。
 - JUNO主体位于地下700m。
- 经过**安检**时X射线会造成探测器计数增加, 约为地面普通环境的2倍。
- **地铁**环境下的宇宙线通量约为地面环境的50%。上海地铁深度~20m。

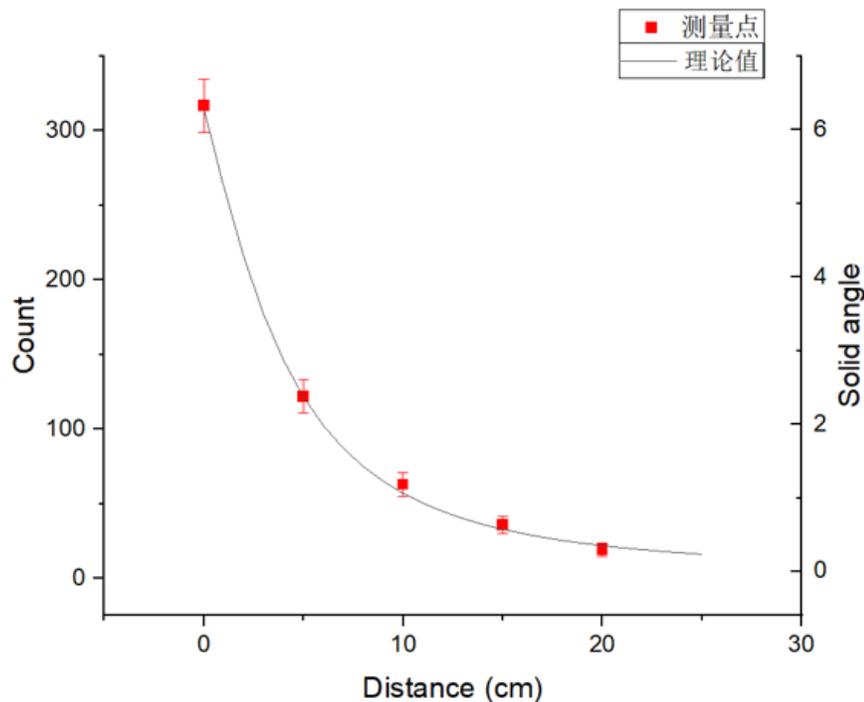


探测立体角可以点放射源对长方体探测器立体角的理论公式计算：

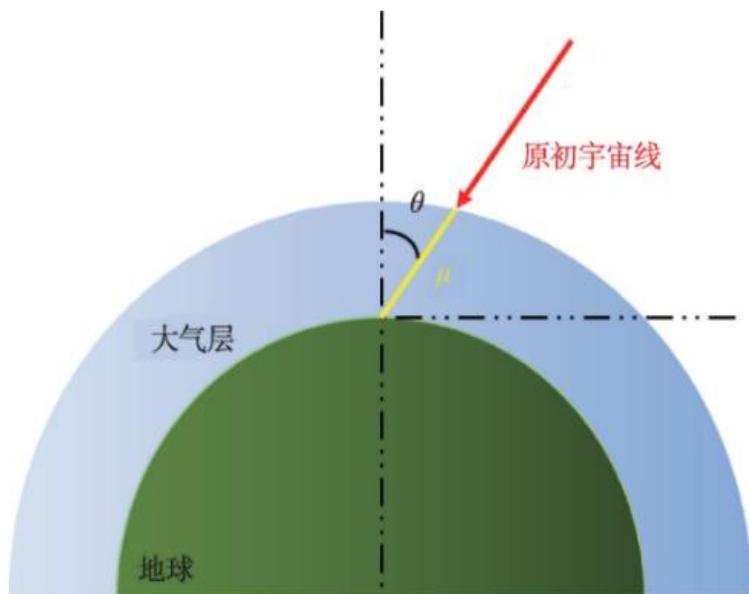
$$\Omega = 4 \times \left(\frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{2bd}{\sqrt{(a^2 + b^2)(a^2 + 4d^2)}} - \arcsin \frac{2ad}{\sqrt{(a^2 + b^2)(b^2 + 4d^2)}} \right)$$



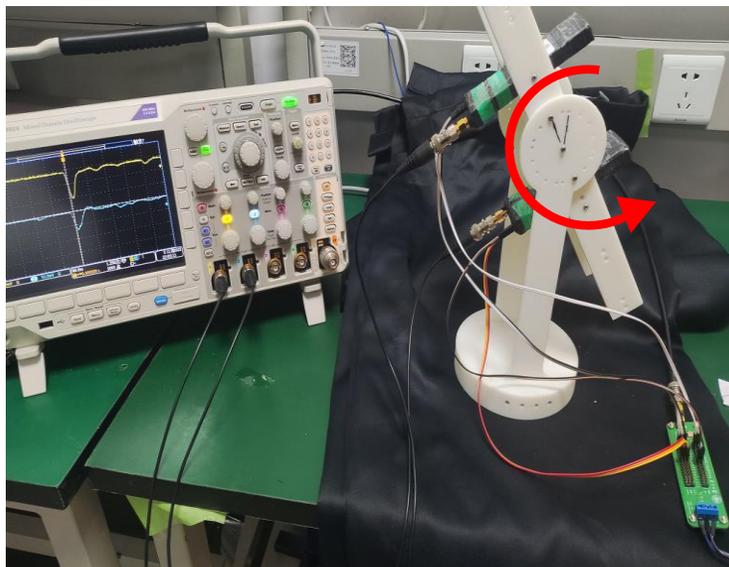
立体角与探测器间距d示意图



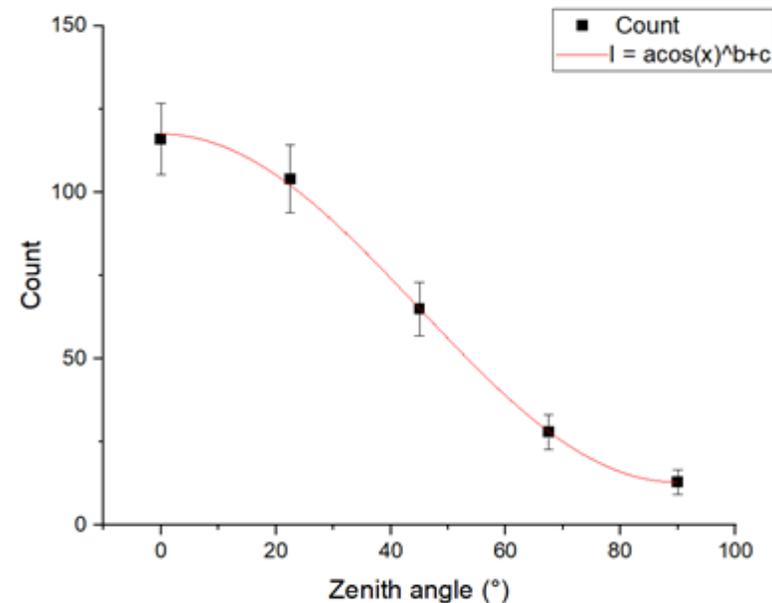
符合测量时，只有同时穿过两个探测模块的宇宙线的信号才会被记录，随着探测器间距的增加，探测立体角逐渐变小，单位时间内测量的宇宙线计数也会减少。测量值与理论计算结果符合良好。



不同角度入射地球的宇宙射线穿过地球大气层厚度不同



天顶角测量装置



天顶角分布测量与拟合结果

天顶角分布应服从 $\cos^2 \theta$ 的分布规律。

• 实验数据拟合结果：

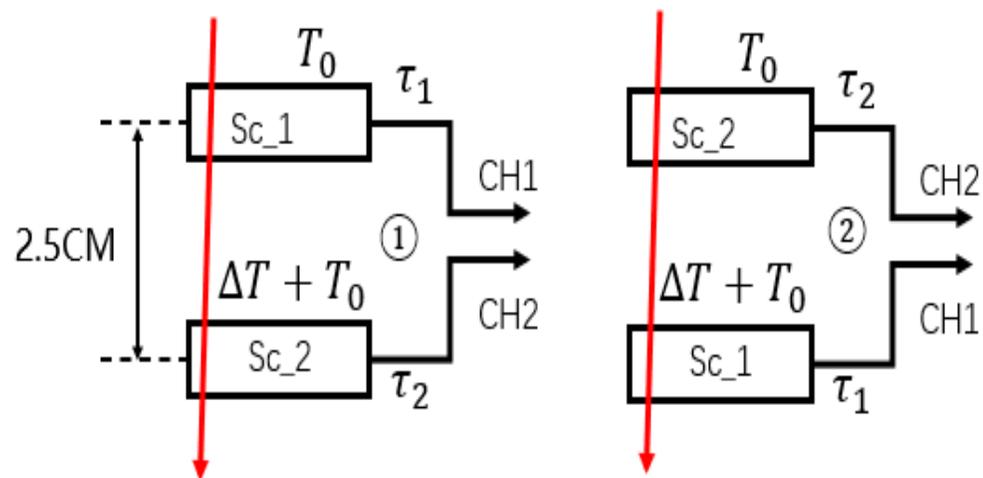
$$b = 2.01 \pm 0.06$$

与理论结果符合良好

初级宇宙射线在经地球大气时会发生广沿大气簇射，簇射产生的次级缪子的平均能量为4GeV。
根据狭义相对论可知，缪子的平均速度已经达到了99.99%的光速，测量缪子的速度即是光速的间接测量。

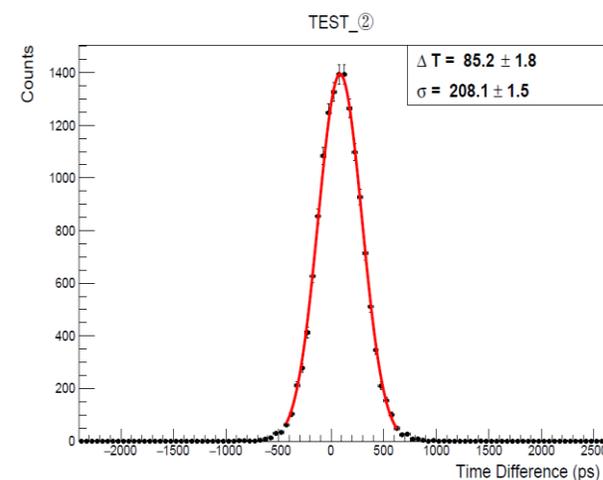
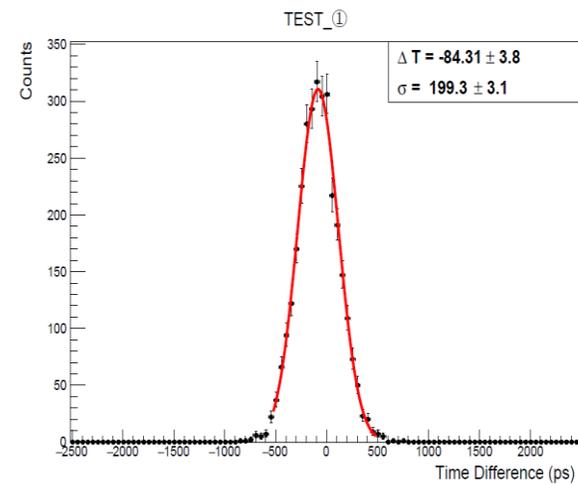
高时间分辨探测器优化：时间分辨好的塑料闪烁体、探测面积大的SiPM、高速高带宽的前置放大器。
探测器的高时间分辨性能 (<100ps) 允许在优先的空间内，对缪子速度进行精确测量。

考虑电子学和传输线缆引起的时间差。



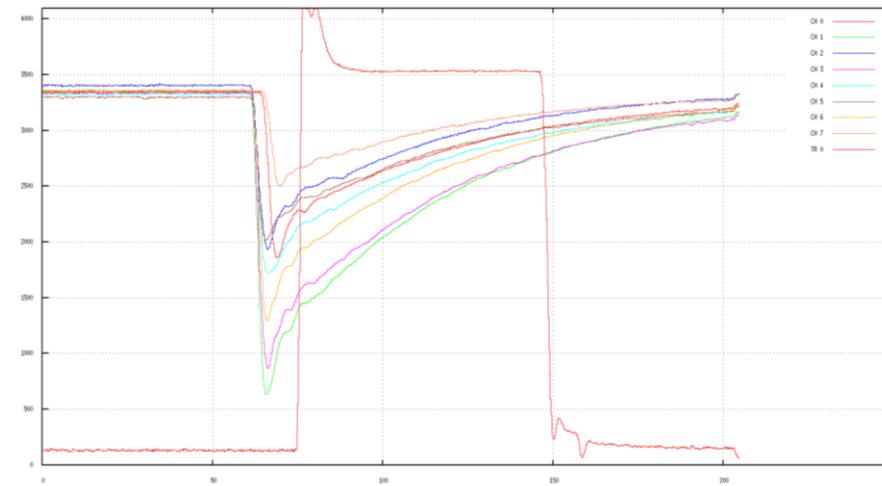
$$\Delta T_1 = \tau_1 - \tau_2 - \Delta T$$

$$\Delta T_2 = \tau_1 - \tau_2 + \Delta T$$



海平面平均缪子速度: 29.5 ± 1.5 (cm/ns)

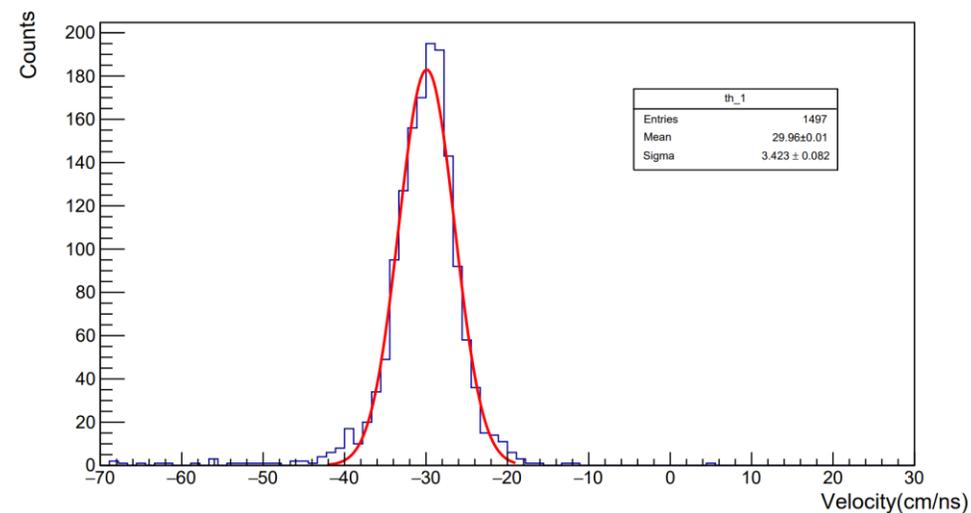
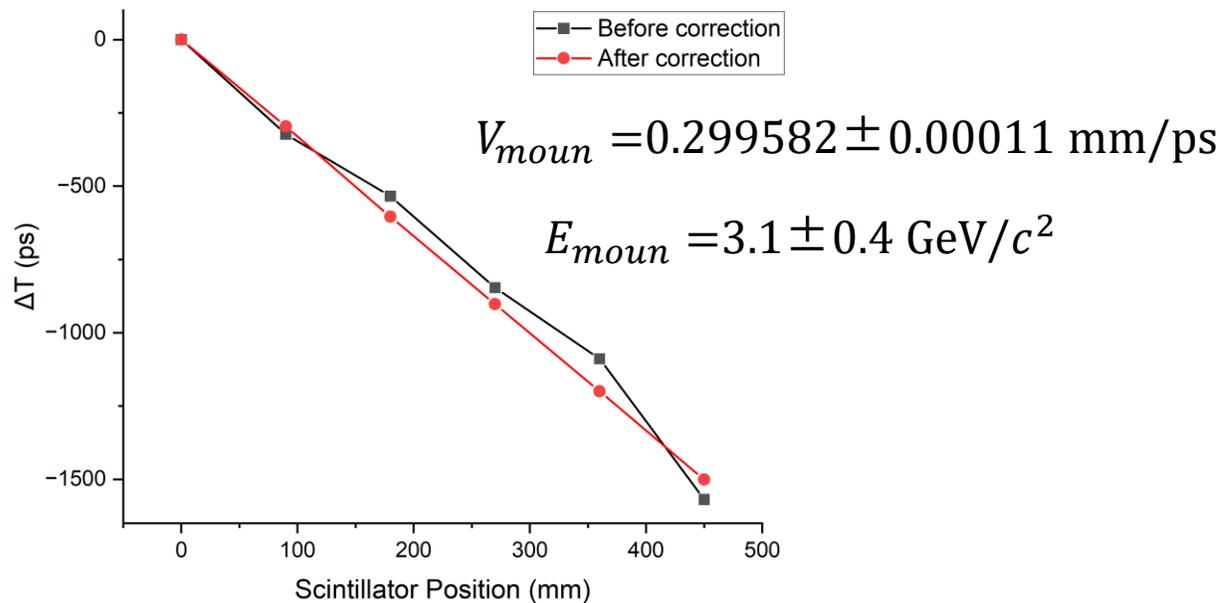
宇宙线速度的精确测量-A



Prototype test setup

Time Calibration of prototype

DT5742 signal waveform



Muon velocity distribution of cosmic rays

宇宙线速度的精确测量-B



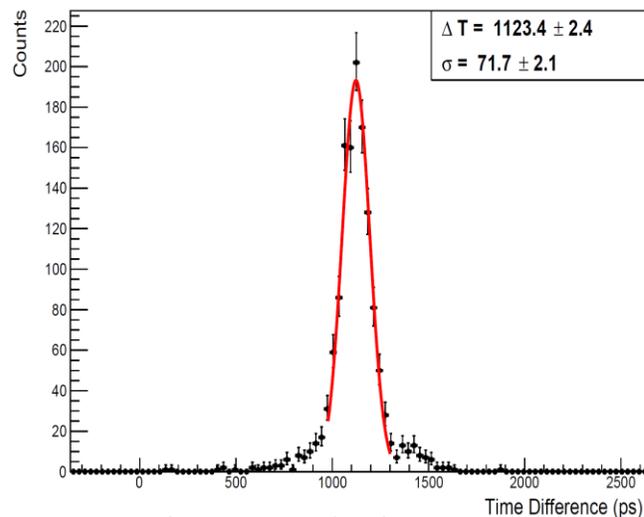
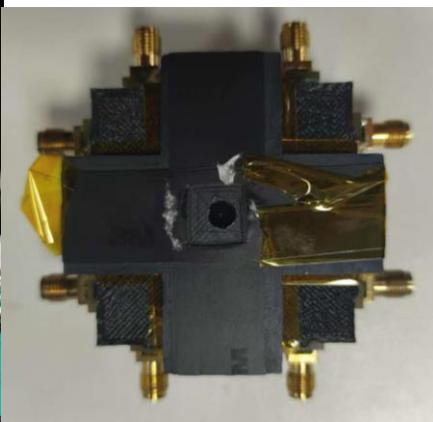
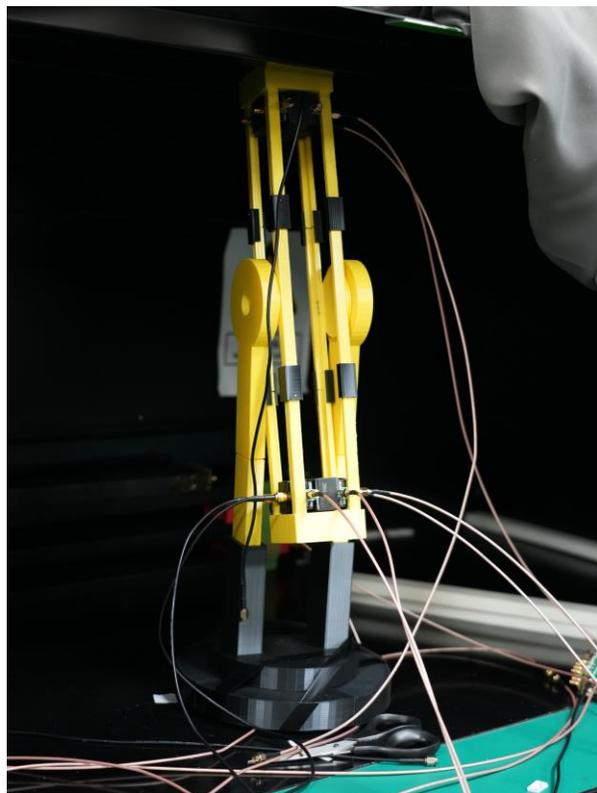
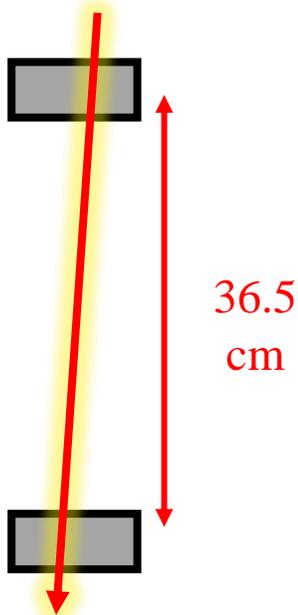
提高测量精度的方案:

增加探测器相对距离

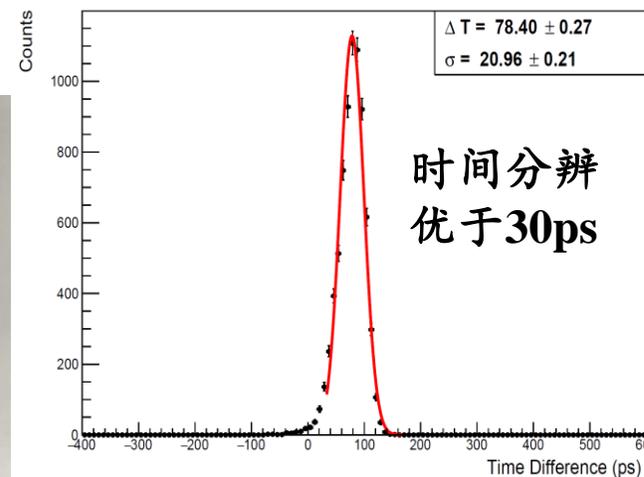
阵列SiPM读出提高光收集

多路读出进一步提高时间分辨

Cosmic ray

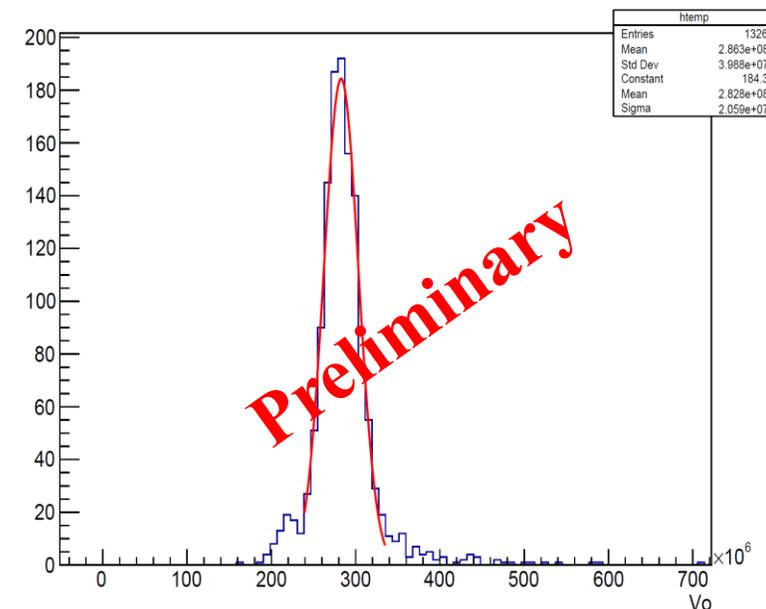


Time resolution result



Calibration result

时间分辨
优于30ps

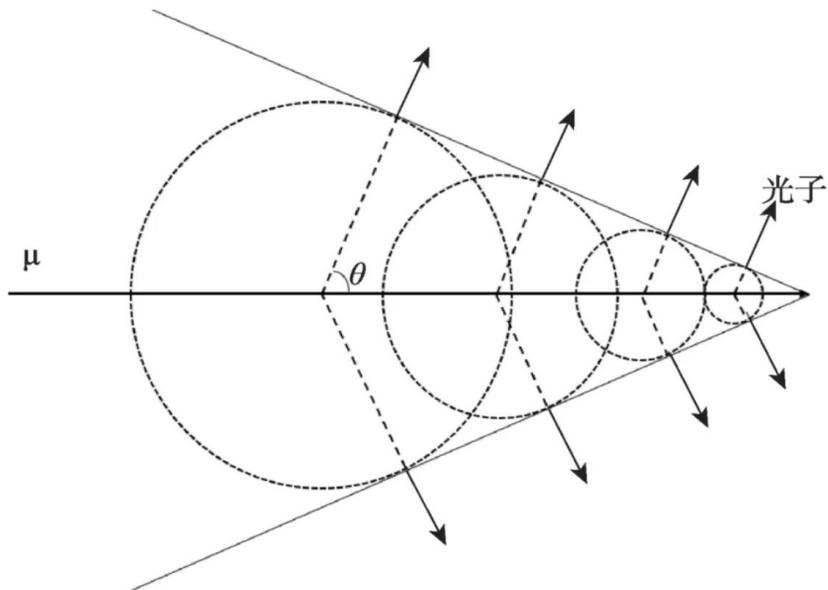


Preliminary

Velocity distribution

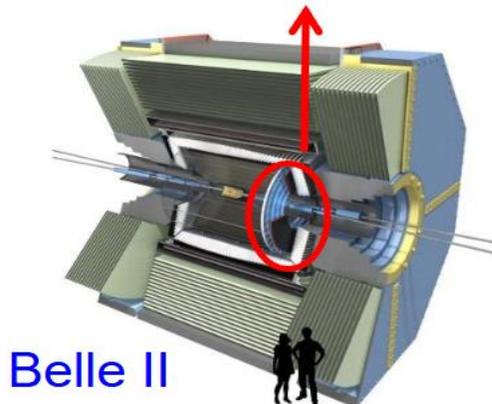
Mean = 2.828×10^8 m/s

线缆传输时间刻度有待检查



媒质中的光速比真空中的光速小，粒子在媒质中的传播速度可能超过媒质中的光速，在这种情况下会发生辐射（切伦科夫辐射），称为切伦科夫效应（Cherenkov effect）。

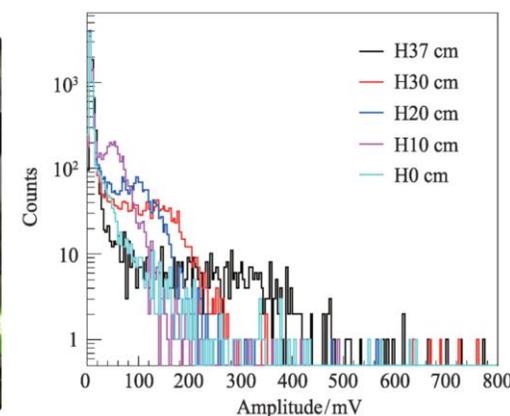
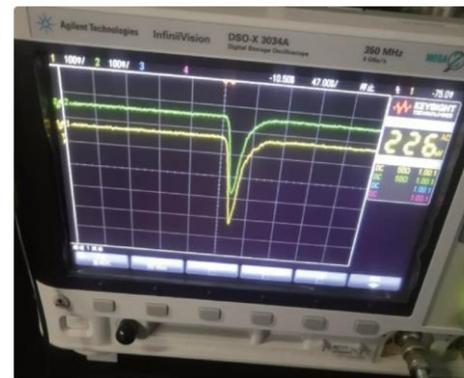
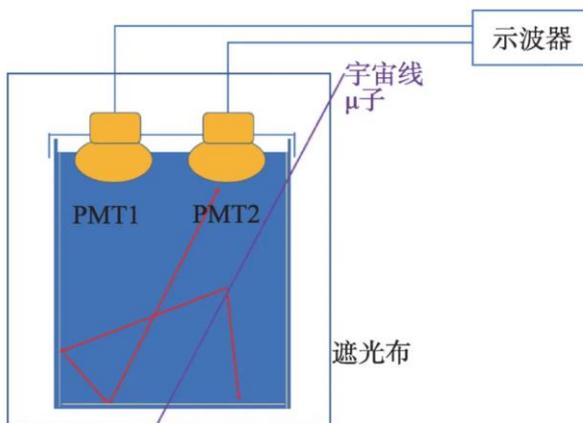
Aerogel RICH (ARICH)



Belle II



Belle II实验上的基于气凝胶的环形切伦科夫探测器 (ARICH)



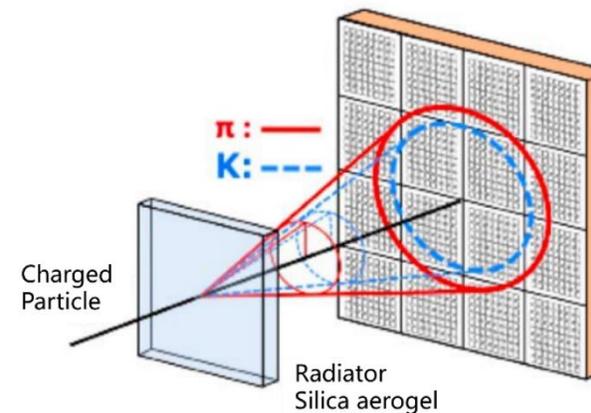
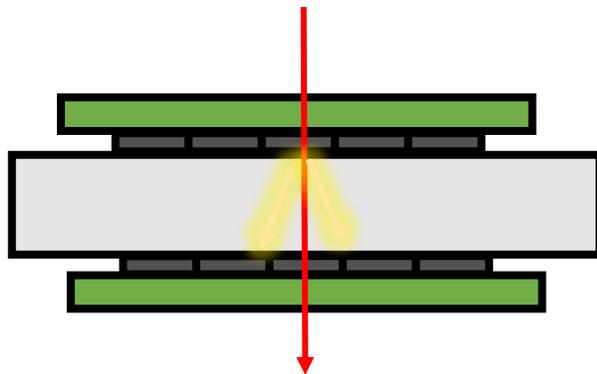
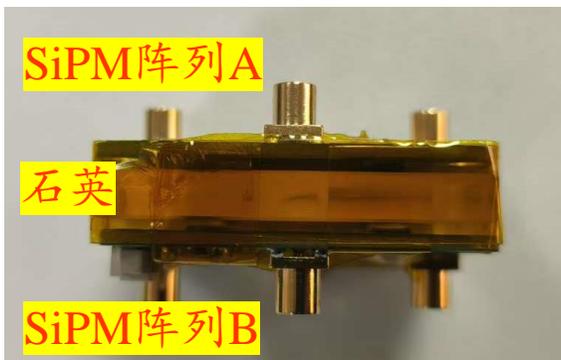
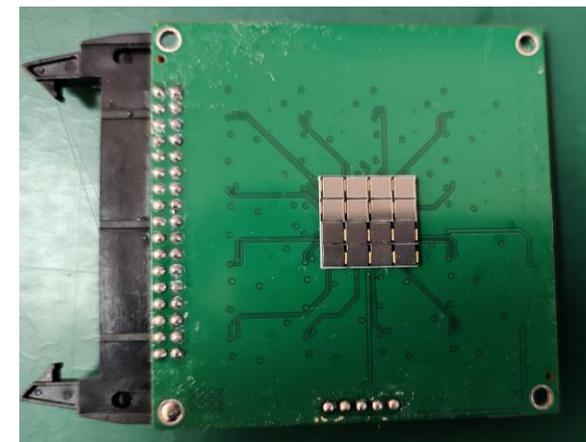
高能所水桶实验示意图以及不同水深的信号幅度分布

使用SiPM用于切伦科夫光的探测



切伦科夫探测器的原理是带电粒子进入辐射体产生切伦科夫光锥时，**切伦科夫角大小与相对论速度 β 有关**。切伦科夫光的探测难点主要在于其光子数较少（10-30光子）。

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n} = \frac{\sqrt{(m/p)^2 + 1}}{n}$$

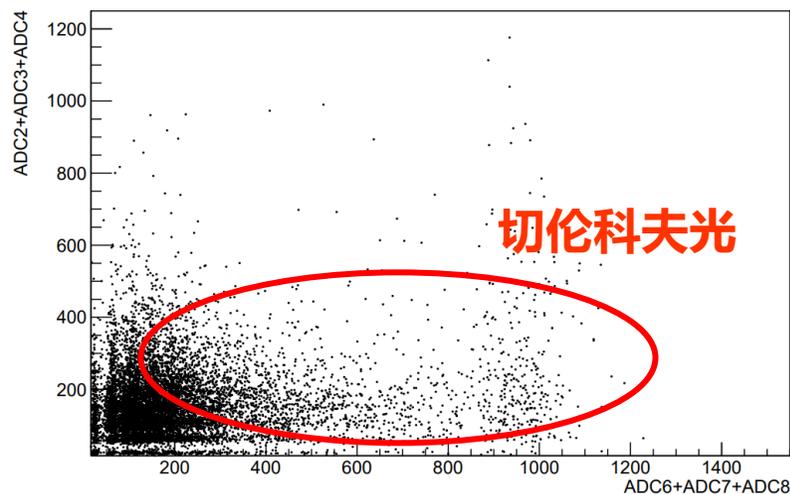


实验中常用的切伦科夫辐射体包括

石英、高纯水、气凝胶等。

(高的透明度)

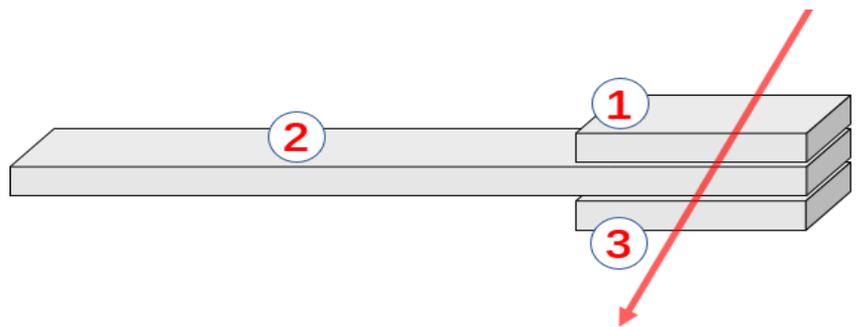
SiPM阵列A
信号幅度



SiPM阵列B
信号幅度

当有带电粒子轰击塑料闪烁体时，闪烁体有一定的几率给出信号，我们将这个几率称为闪烁效率。

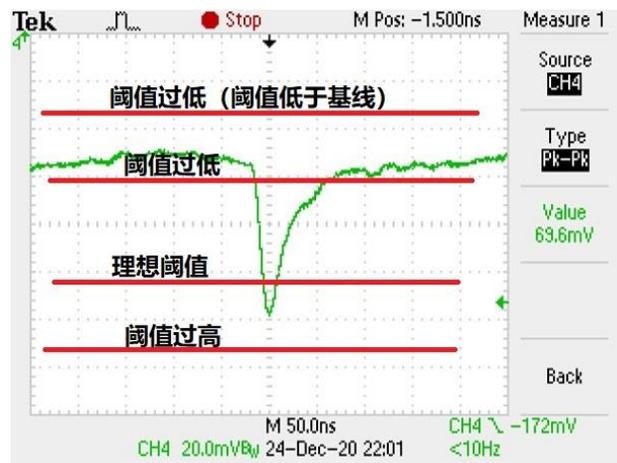
当1号闪烁体与3号闪烁体同时有信号时，该宇宙射线必然经过2号。



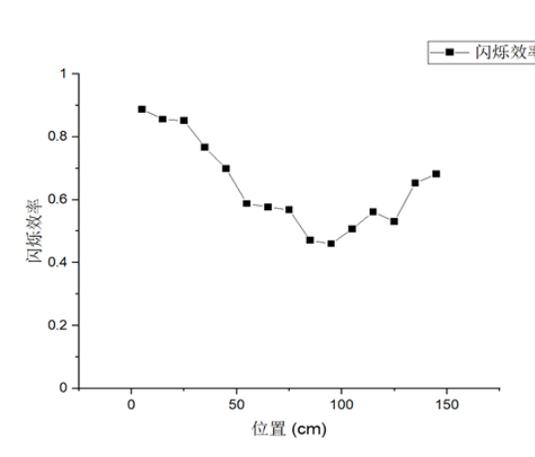
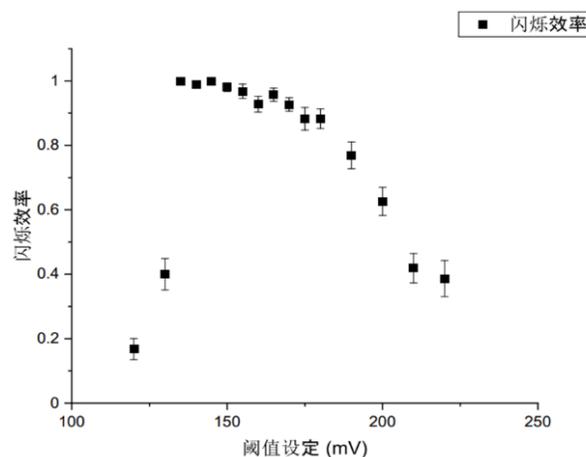
$$\epsilon = \frac{N_{123}}{N_{13}} \times 100\%$$

$$\sigma_{\epsilon} = \sqrt{\frac{\epsilon(1-\epsilon)}{N_{13}}}$$

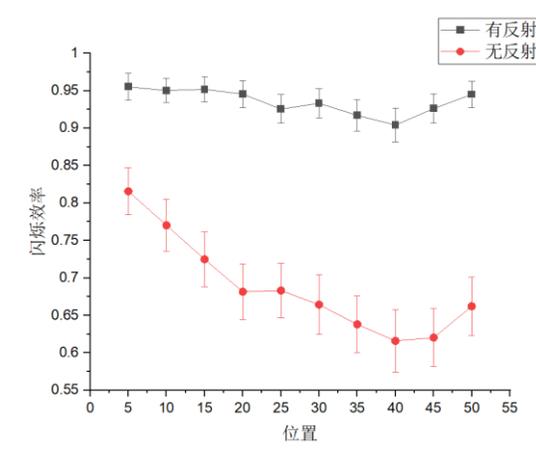
测量结果满足
二项分布



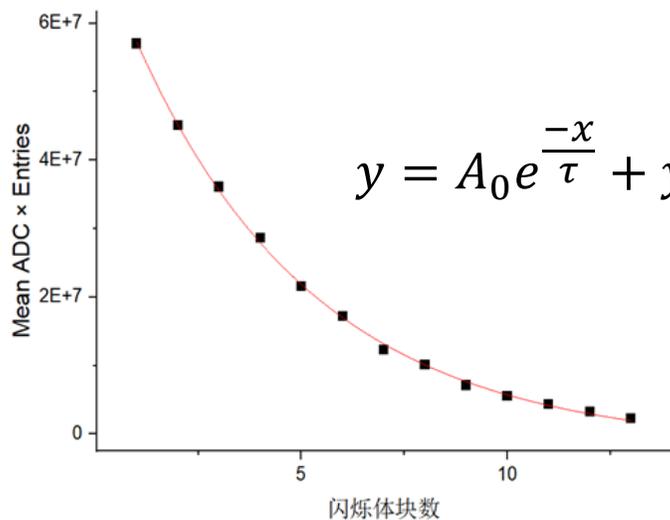
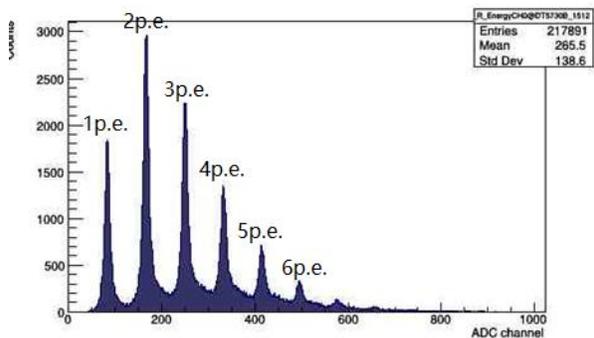
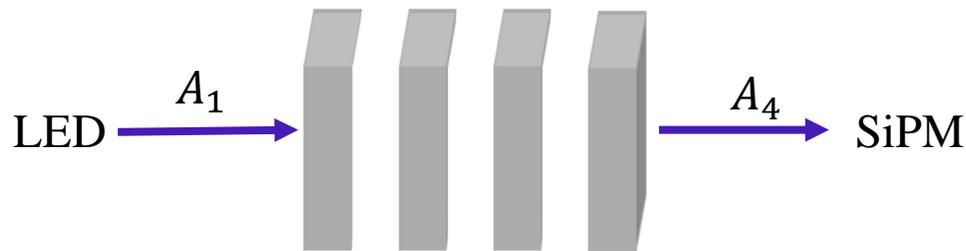
闪烁体探测效率与阈值的关系



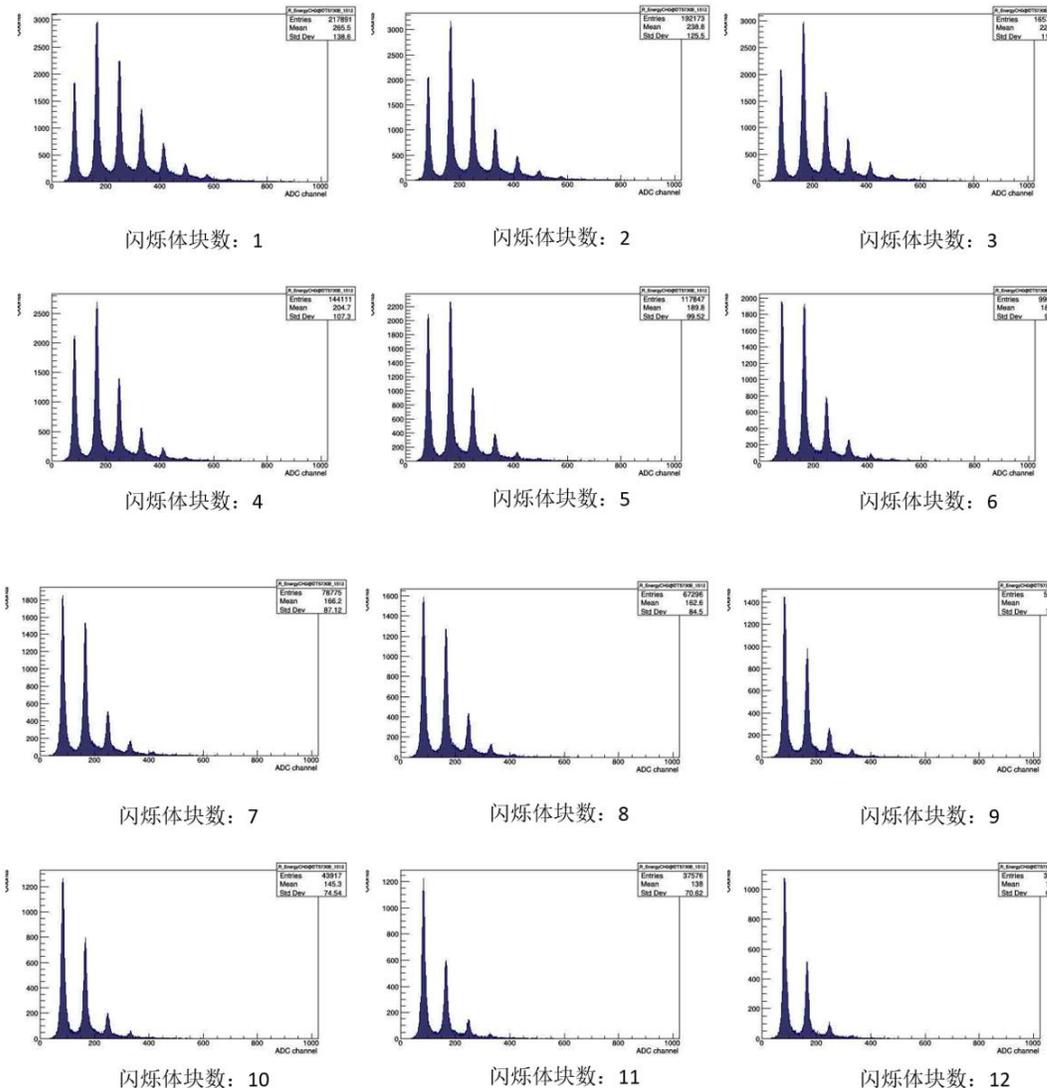
闪烁体不同位置的探测效率



宇宙线符合计数实验——闪烁体衰减长度测试 方法A

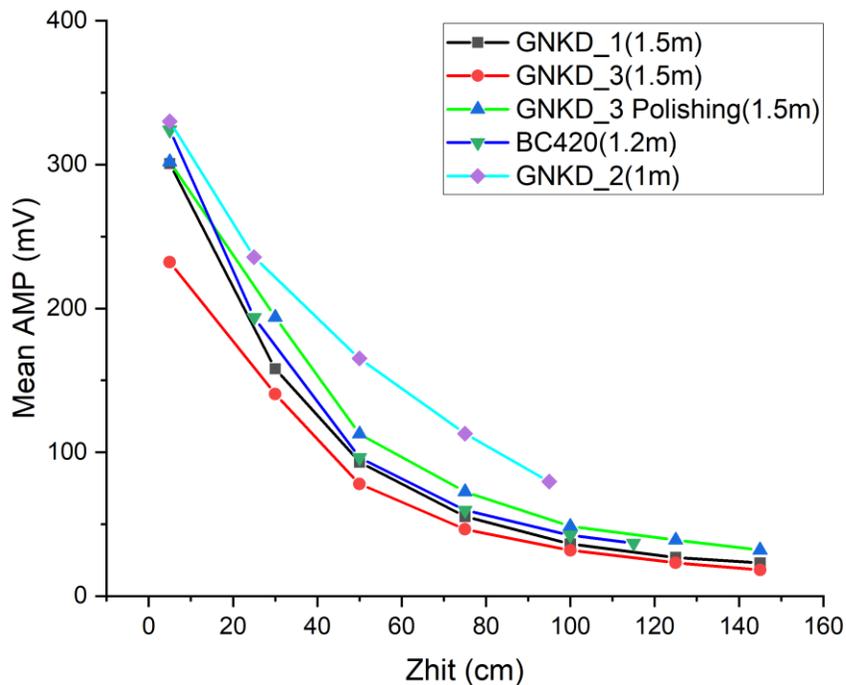
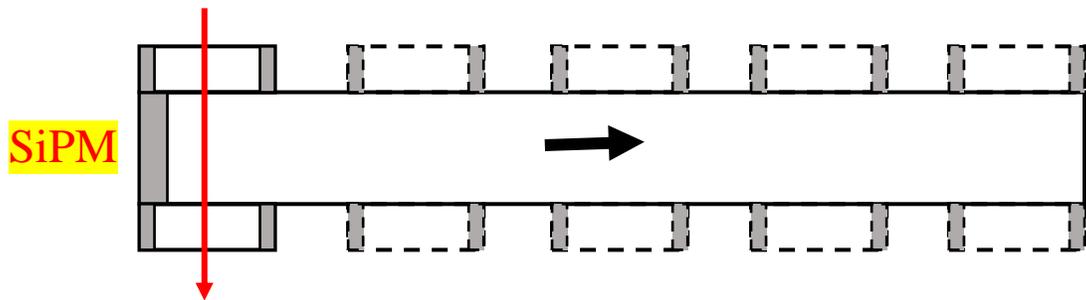


对测量结果进行
指数拟合得到闪
烁体衰减长度

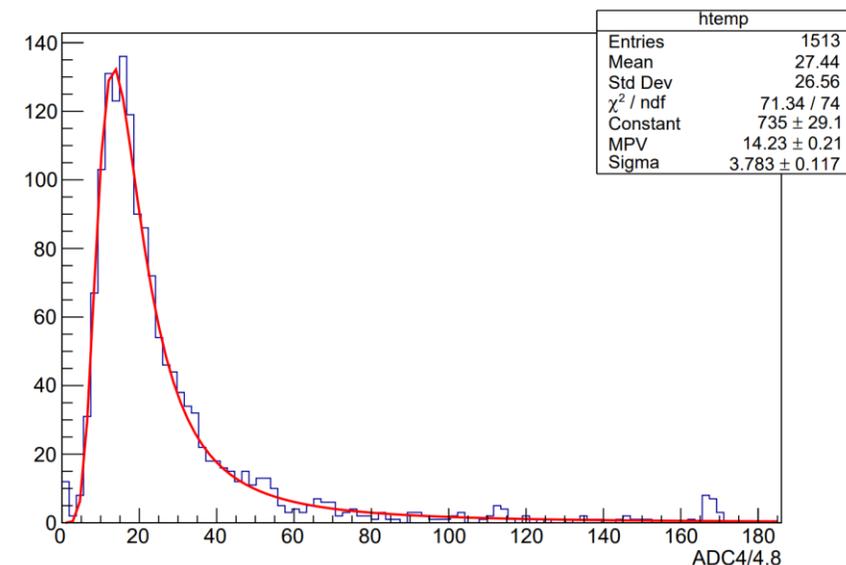
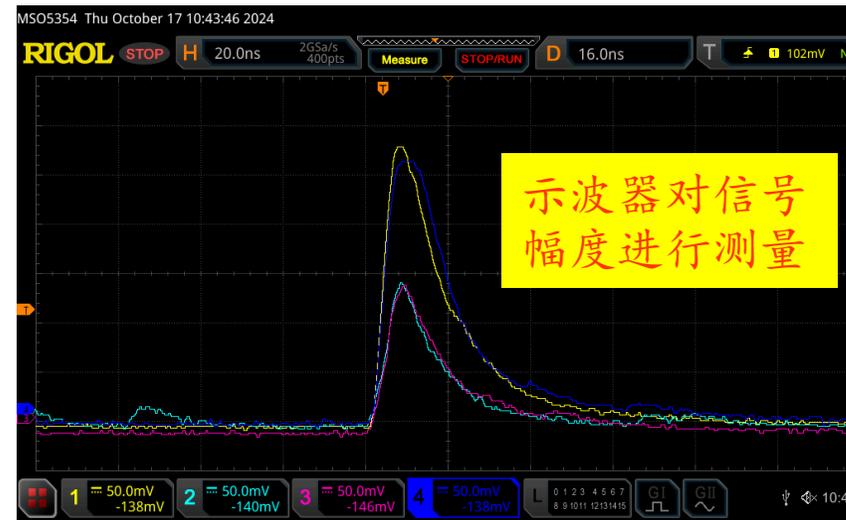


不同闪烁体块数对应的幅度谱

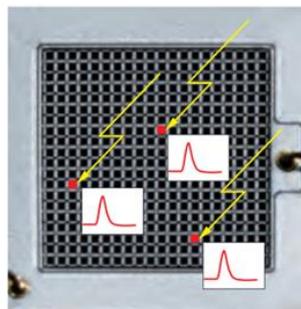
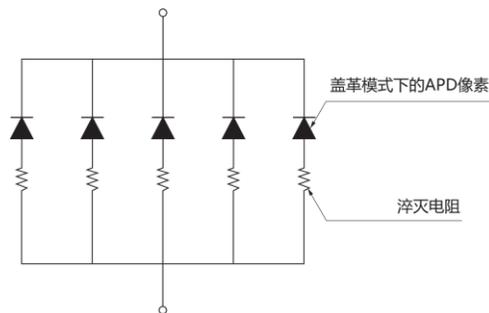
利用示波器获取信号的脉冲幅度分布 (宇宙线MIP)



信号幅度 (MIP) 随击中位置的变化

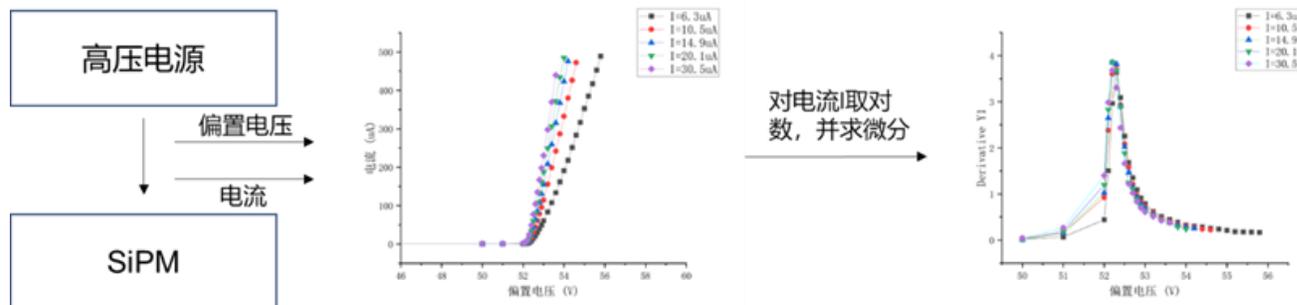


宇宙线在薄塑闪中沉积的能量服从朗道分布



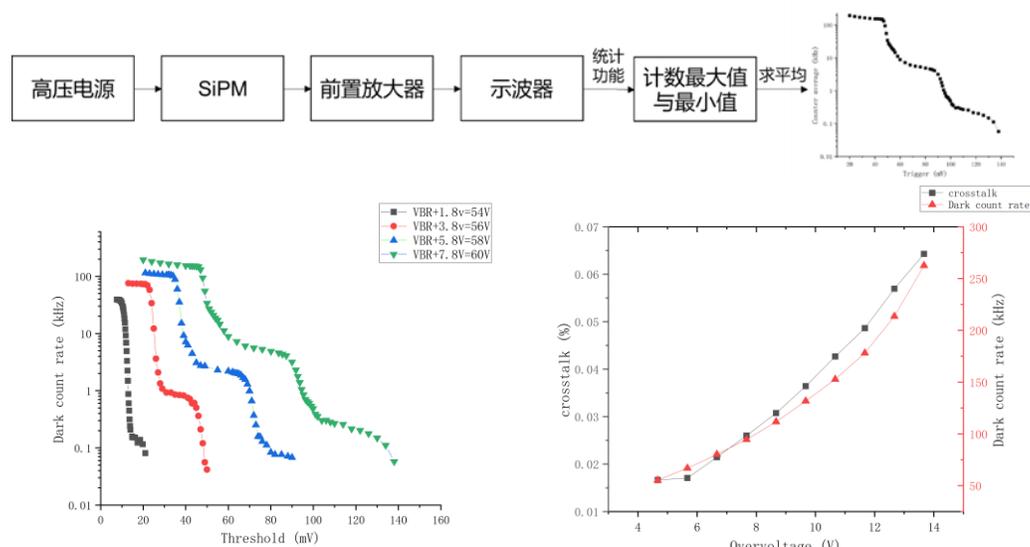
硅光电倍增器工作原理示意图

➤ 硅光电倍增器击穿电压测试

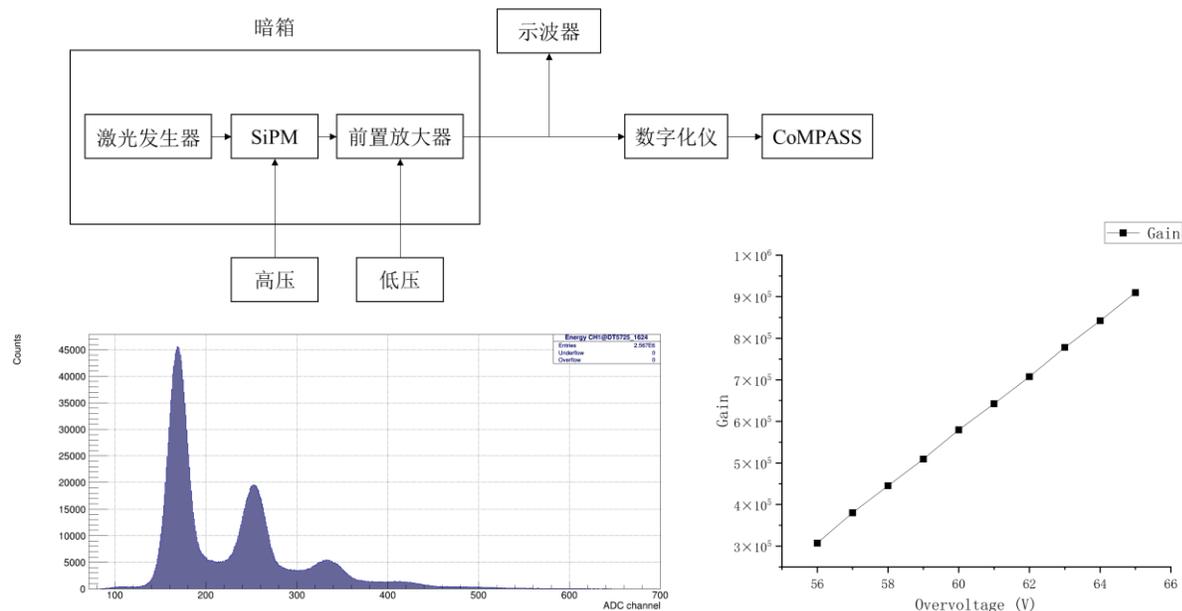


峰值点对应横坐标即为击穿电压

➤ 硅光电倍增器暗计数测试



➤ 硅光电倍增器增益测试



探测器性能相关测试

- 闪烁体探测效率测试
- 闪烁体衰减长度测试
- SiPM增益、暗计数率、击穿电压测试。

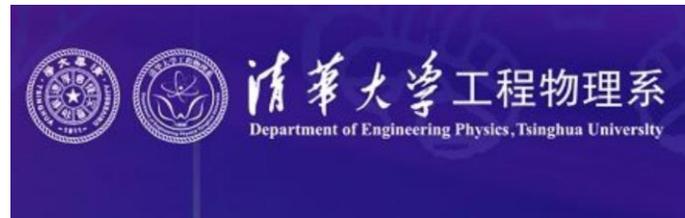
宇宙线相关参数测量实验

- 宇宙线通量随探测器立体角变化
- 宇宙线通量的天顶角分布
- 宇宙线速度精确测量
- 宇宙线寿命测量
- 切伦科夫光相关测量

宇宙线科普实验

- 小型宇宙线探测器组装
- 宇宙线径迹显示系统

清华大学工程物理系宇宙线实验参考：



高能宇宙线粒子探测实验

本实验组包括五个子实验：

实验一. 观察PMT上的信号。

实验二. 宇宙线缪子计数测量。

实验三. 宇宙线缪子寿命测量。

实验四. 宇宙线缪子飞行时间测量。

实验五. 闪烁体中的光衰减长度。

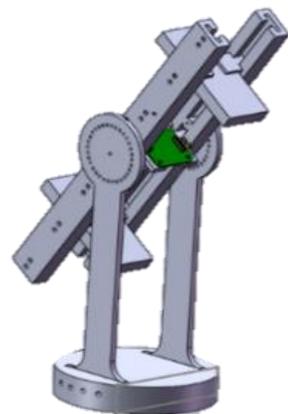
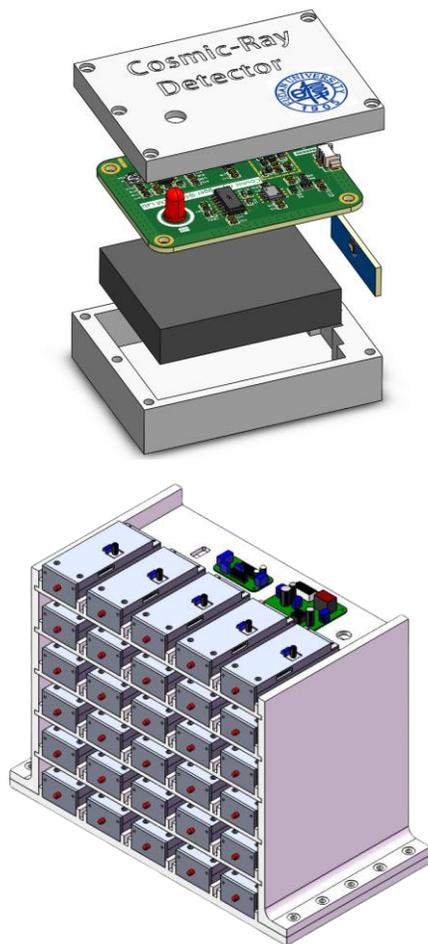
<https://hep.tsinghua.edu.cn/training/cosmicRay/index.html>

固体探测器，容易操作。

SiPM代替传统PMT，成本低，工作电压低，探测效率高。

探测器时间分辨好。

➤ 授权实用新型专利一项、一项发明专利进入实质审查阶段。



宇宙线计数、寿命、速度相关测量实验优化计划:

- 根据不同的实验要求, 改进探测器的机械结构设计, 保证实验装置的稳定可靠。
- 扩展实验内容, 规范实验测量流程, 确保实验数据的可重复性和可比性。

宇宙线径迹显示系统优化计划:

- 增加阵列数目, 由 5×5 阵列增加到 10×10 阵列。
- 扩展阵列维度, 采用行列读出的方式, 对宇宙线入射径迹进行三维重建。
- 完善逻辑判选电路, 采用FPGA处理击中数据, 并优化数据采集系统 (DAQ) 及相关上位机软件。

基于SiPM的切伦科夫光探测实验计划:

- SiPM具有出色的光子数分辨能力, 非常适合用于探测切伦科夫光等微弱光信号。
- 单个SiPM体积小, 有望实现切伦科夫环的重建。
- 目前已成功利用SiPM在石英中探测到切伦科夫光信号, 验证了该方案的可行性。