

山东高等技术研究院

SHANDONG INSTITUTE OF ADVANCED TECHNOLOGY

塑料闪烁光纤探测器及其应用

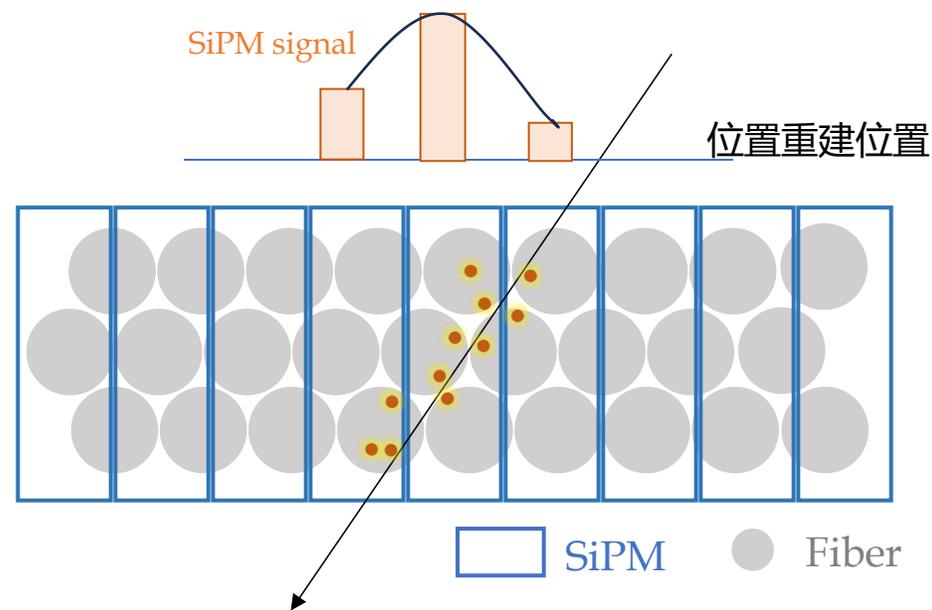
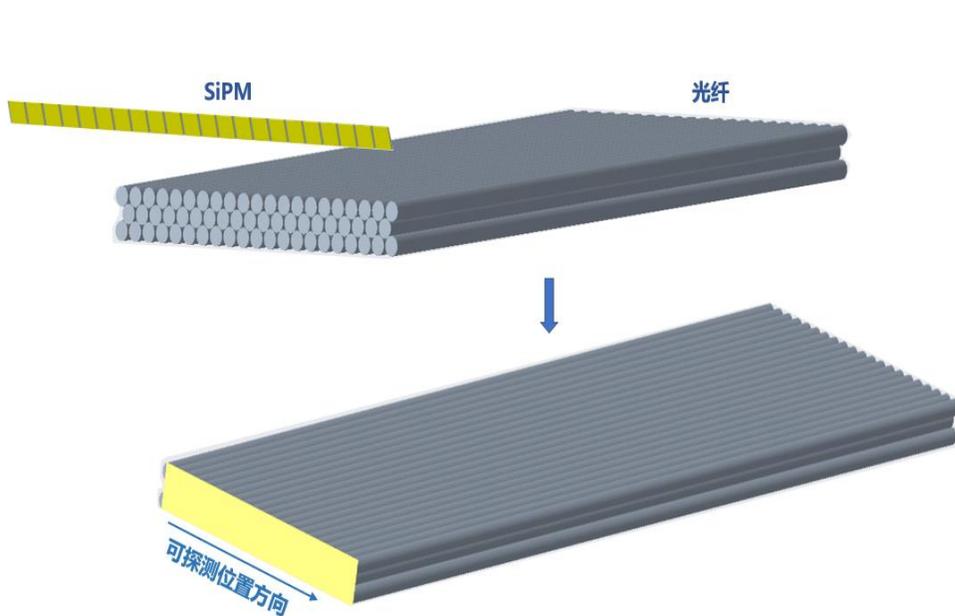
李慧玲

山东高等技术研究院

2025年08月01日，乌鲁木齐

高能宇宙线物理及下一代空间探测装置研讨会

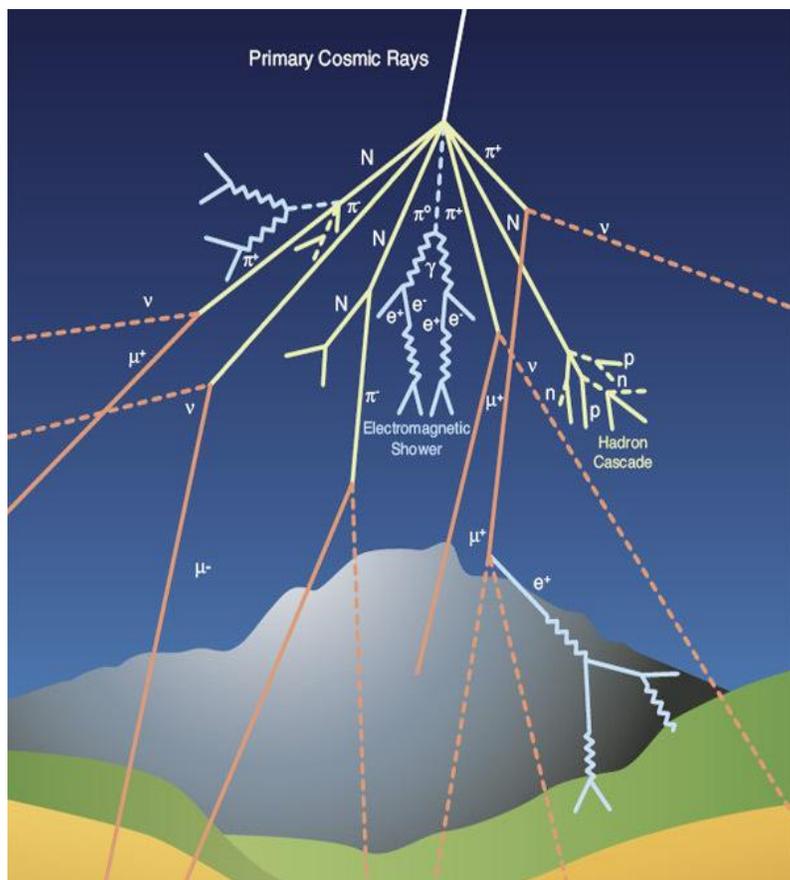
塑闪光纤探测器



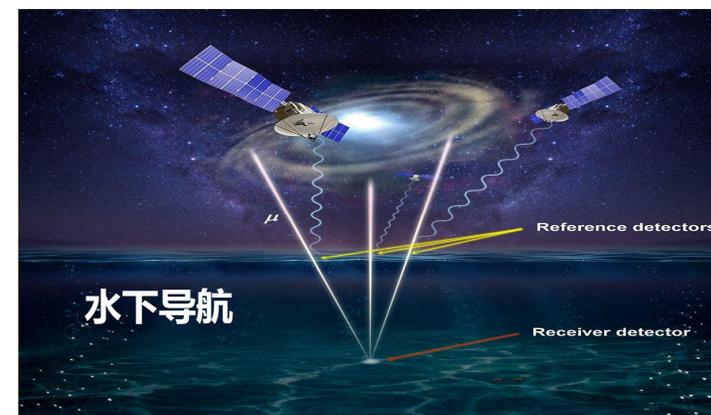
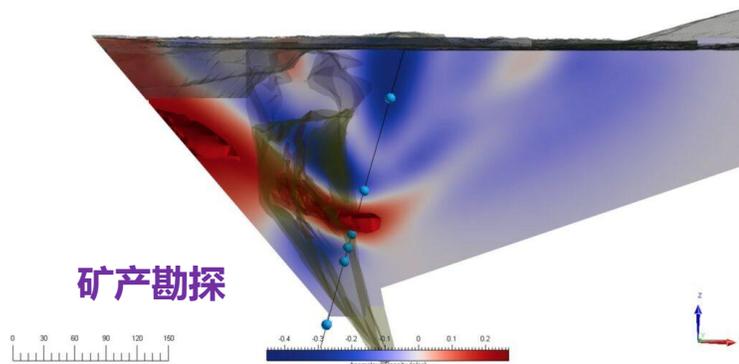
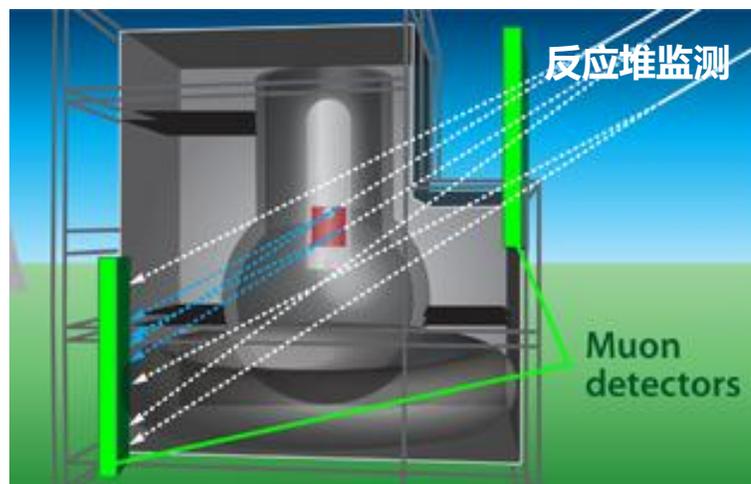
- 塑料闪烁光纤探测器：光纤探测主体和1维SiPM光电转换器件
- 光纤交叠紧密排布，可实现多种尺寸和形状的制备
- 可实现与传统硅微条探测器相当的位置分辨能力，但设计制造上的成本和复杂度低
- 国内有相关塑料闪烁光纤和SiPM器件产品，未来有望实现国产化

宇宙线缪子成像

宇宙线缪子

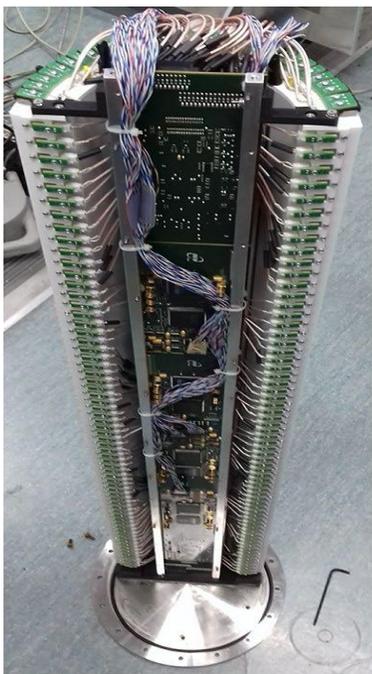


缪子散射成像 & 缪子透射成像

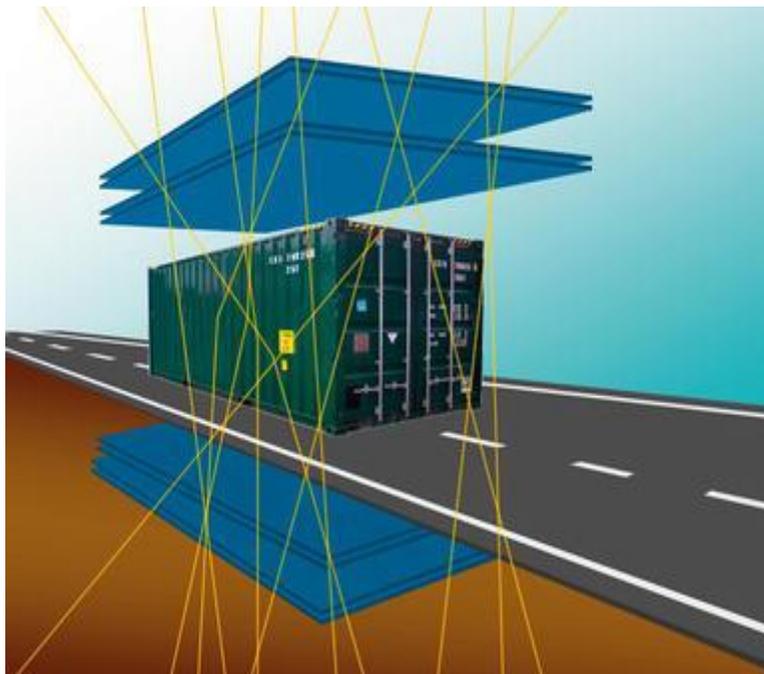


宇宙线缪子成像

塑料闪烁光纤探测器满足缪子成像对探测器的要求：
米量级大尺寸、高位置分辨、性能稳定等

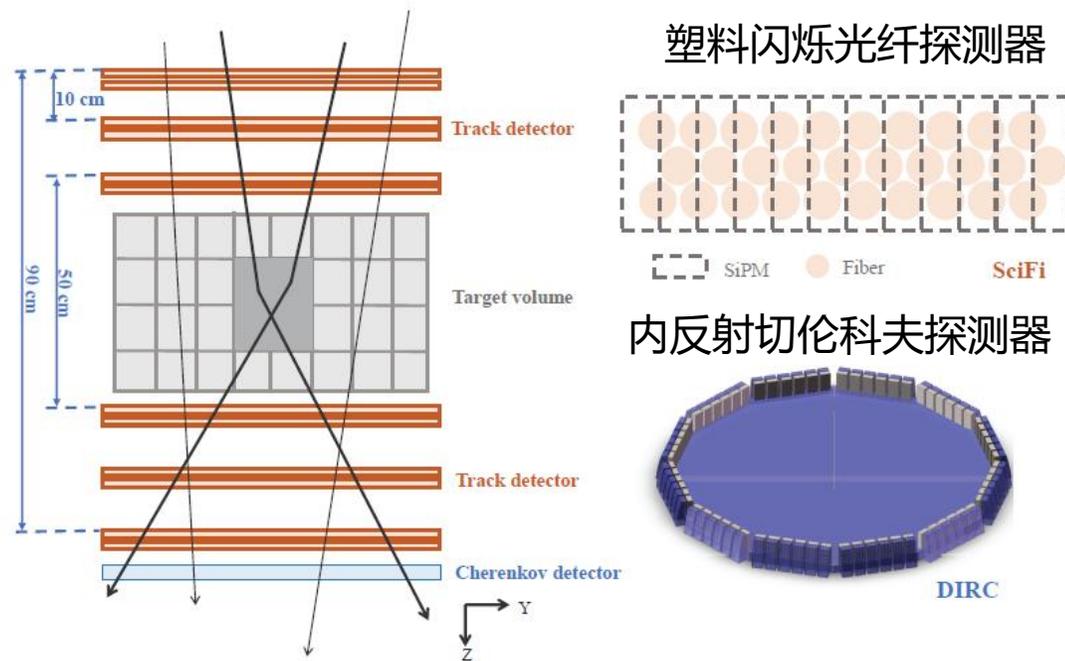


井眼式



平板式

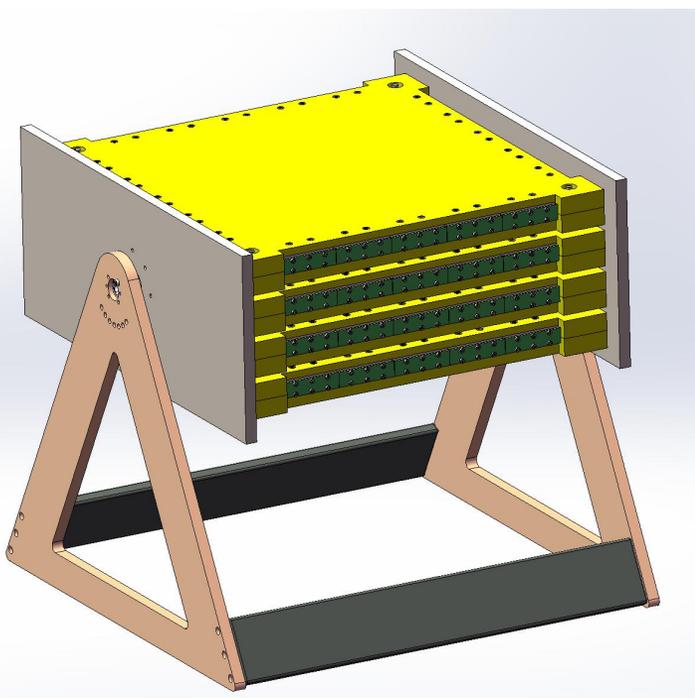
同时实现对高Z和低Z物质鉴别的新型探测系统



Towards a muon scattering tomography system for both low-Z and high-Z materials, 2023 JINST 18 P08008

塑闪光纤探测器

多层平板式探测器



探测器指标

径迹探测器:

- 单方向亚毫米位置分辨精度
- 单层探测效率 $\geq 95\%$
- 角分辨精度 $\leq 1\text{mrad}$

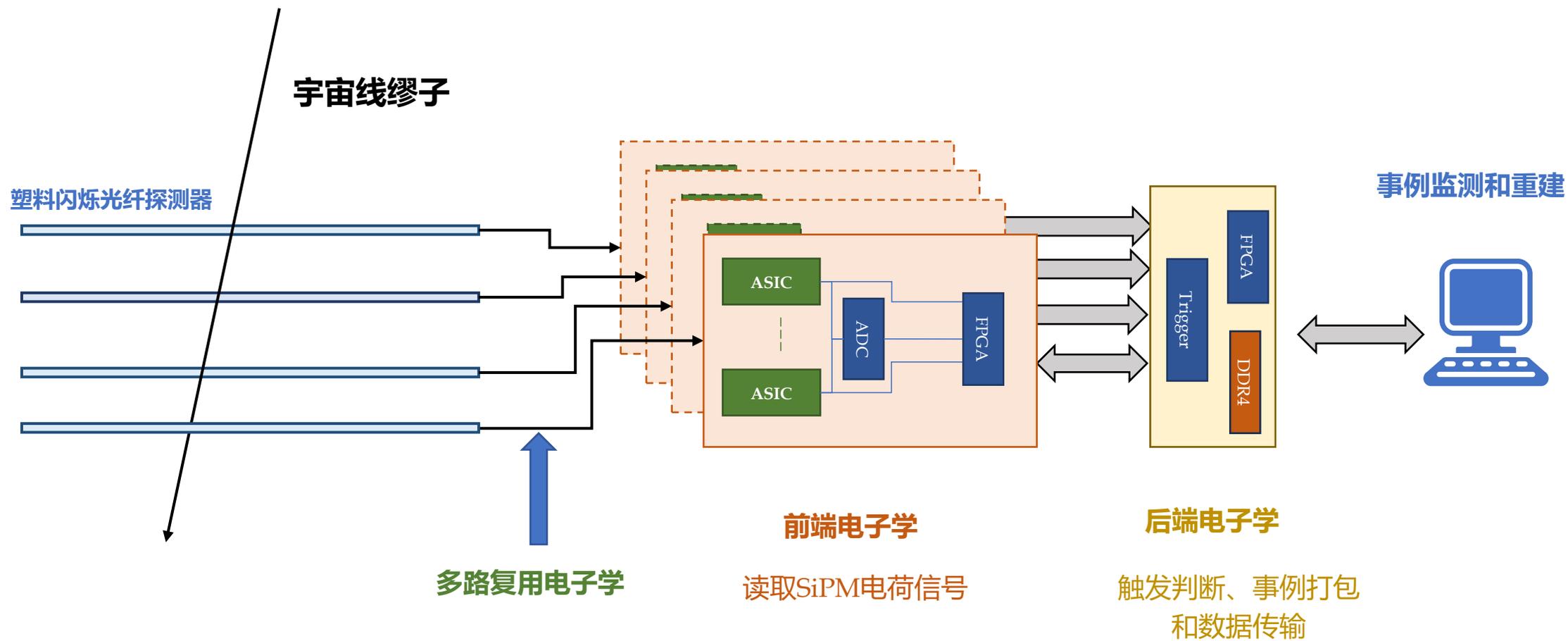
前端电子学:

- 可鉴别SiPM单光子信号
- 动态范围 $> 200\text{p.e.}$

关键技术

- ① 探测器响应模拟
- ② 关键器件性能测试
- ③ 前端读出电子学
- ④ 光纤精确排布工艺
- ⑤ 探测器性能评估
- ⑥ 多路复用电子学

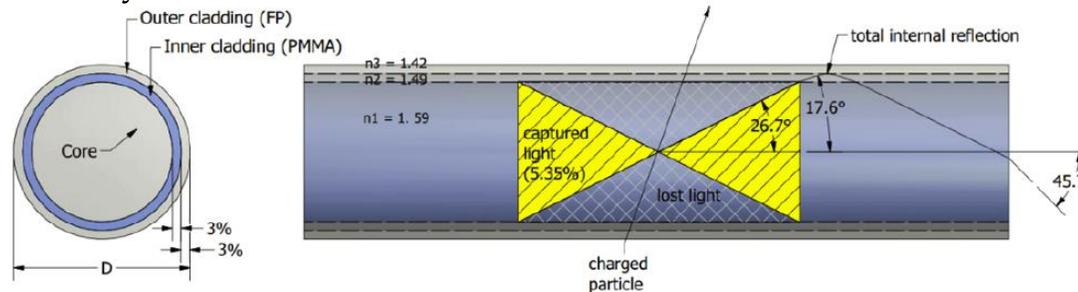
探测器设计方案



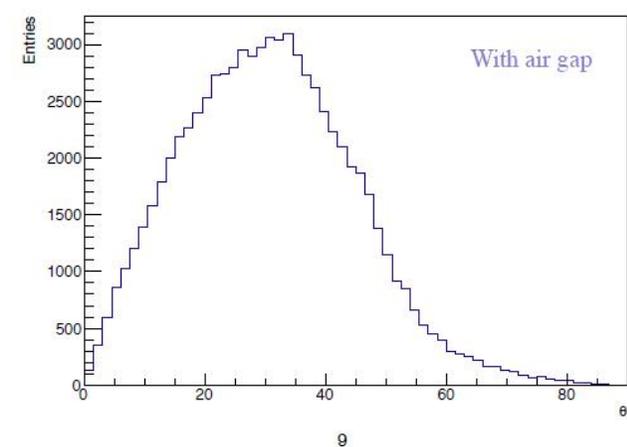
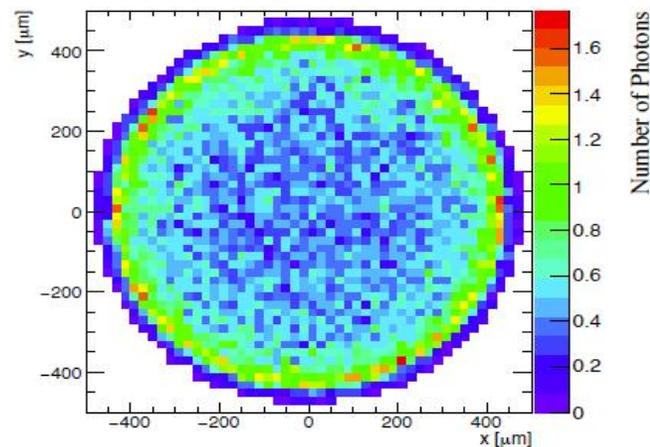
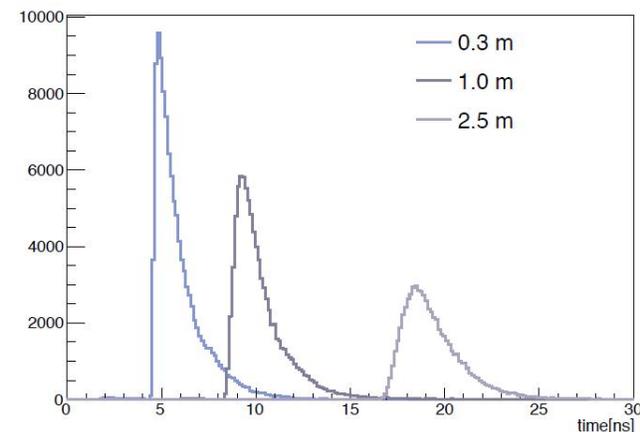
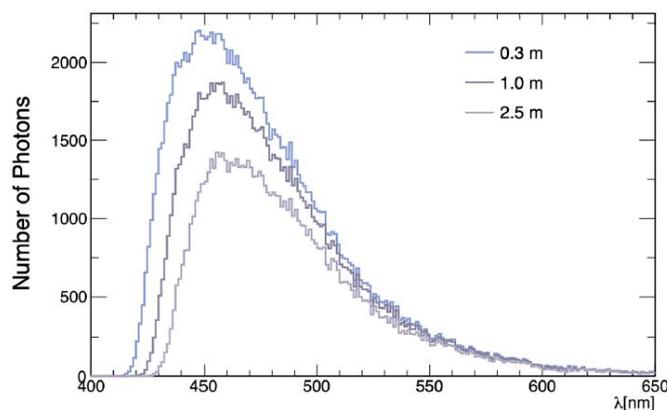
塑料闪烁光纤

通过模拟光纤的发光、波长位移、光收集和光衰减等过程，得到光纤端面光子的空间和时间分布信息

Kuraray SCSF 78M

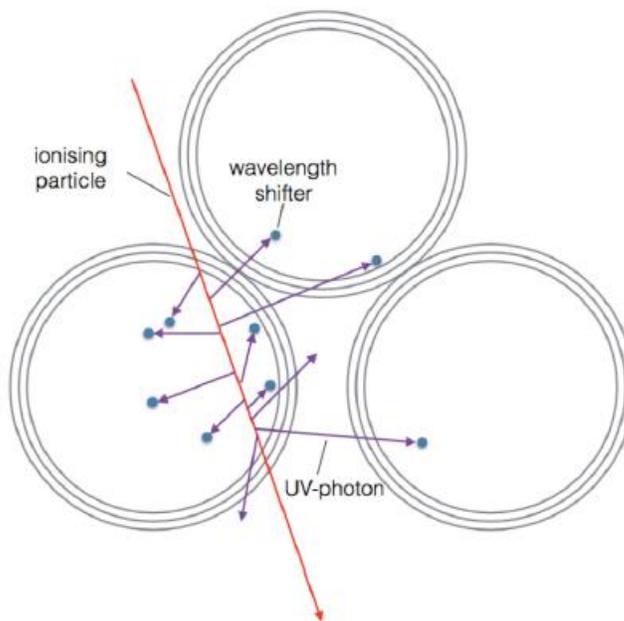


- 带电粒子探测: 光产生和光导
- 光产额 ~ 8000 ph/MeV
- 衰减长度 >4 m,
- 快衰减时间 ~ 2.8 ns
- 光纤束缚效率 $\sim 5.4\%$

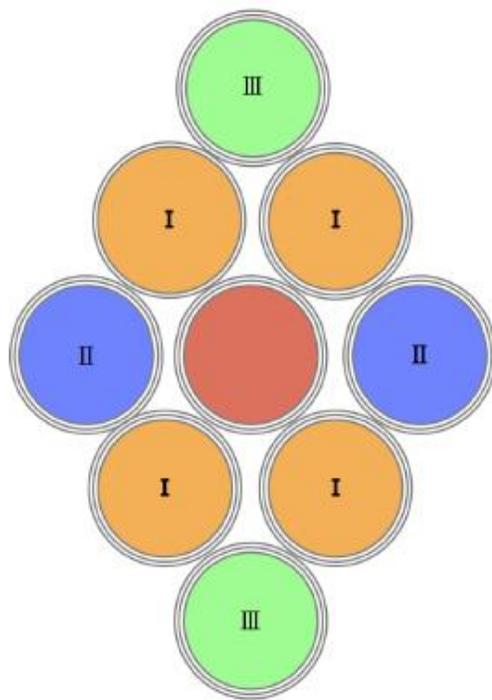


光纤间的串扰

串扰由发生WLS过程前的紫外光子激发临近光纤导致



通过模拟单根光纤中的紫外光，研究不同距离的临近光纤的串扰几率。



光纤串扰概率

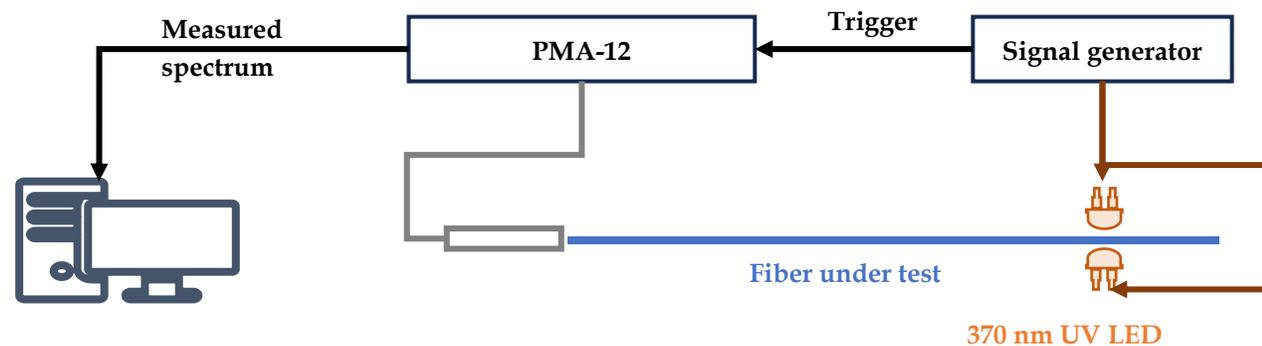
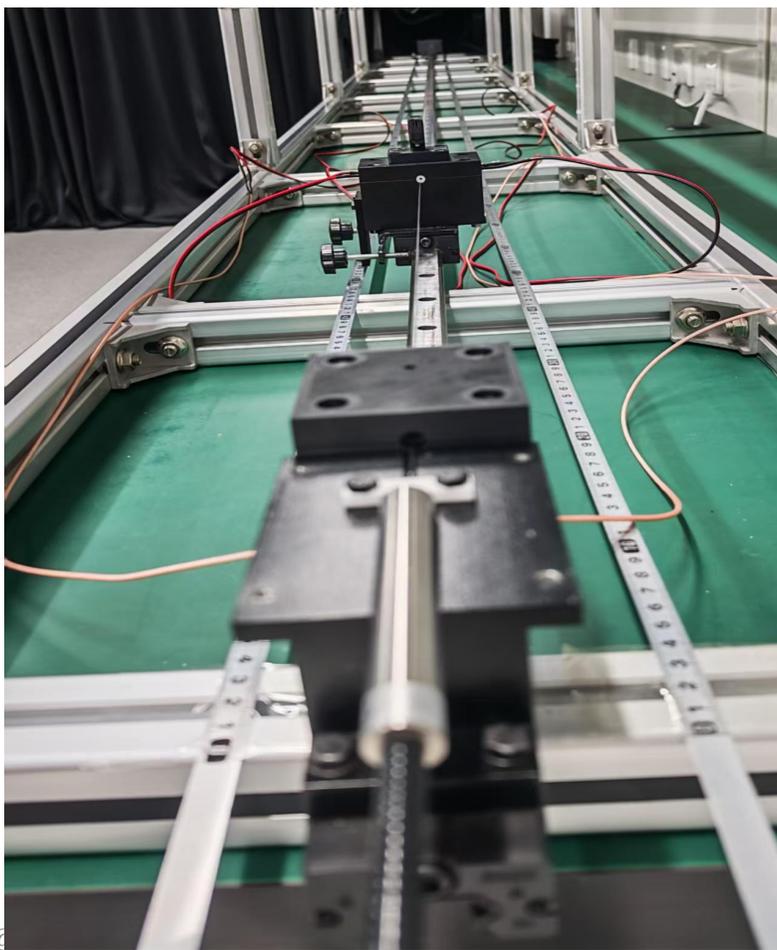
Diameter	Center fiber	Class I	Class II	Class III	X-talk
0.25 mm	0.8257	0.1136	0.0510	0.0096	~17%
1.00 mm	0.9543	0.0363	0.0175	0.0013	~5%

制备时可通过在光纤间的胶水中添加TiO₂来降低串扰

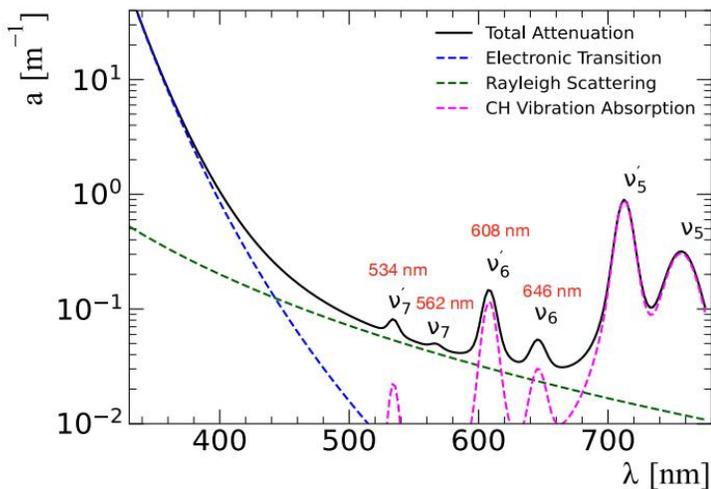
THESIS-Stephan Escher-2017-331

塑闪光纤性能测试

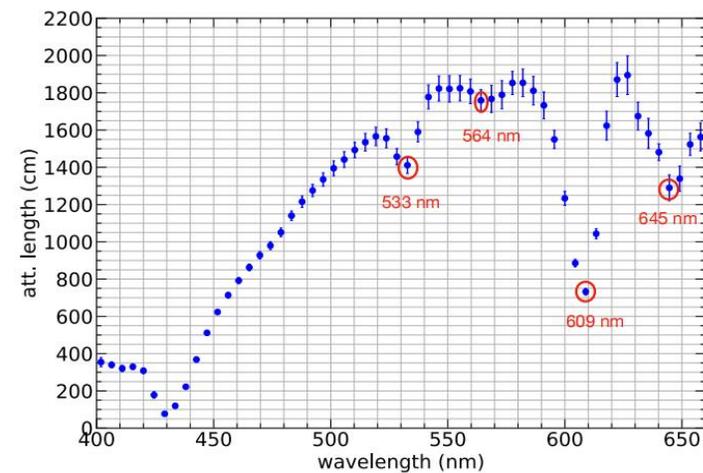
光纤测试平台



Theory

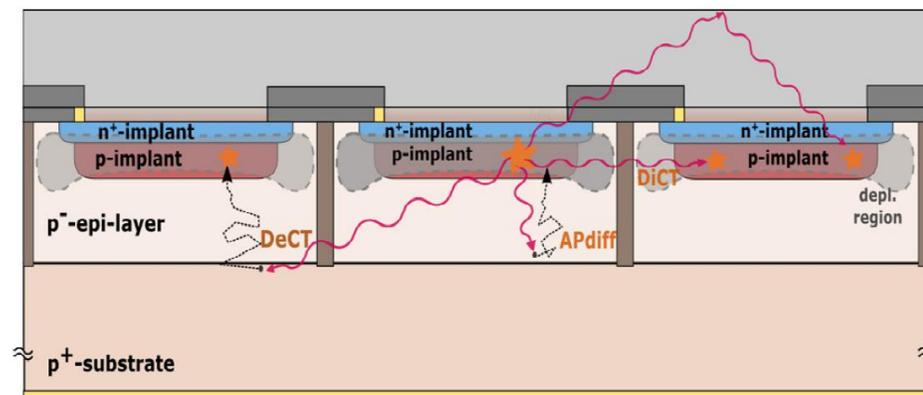
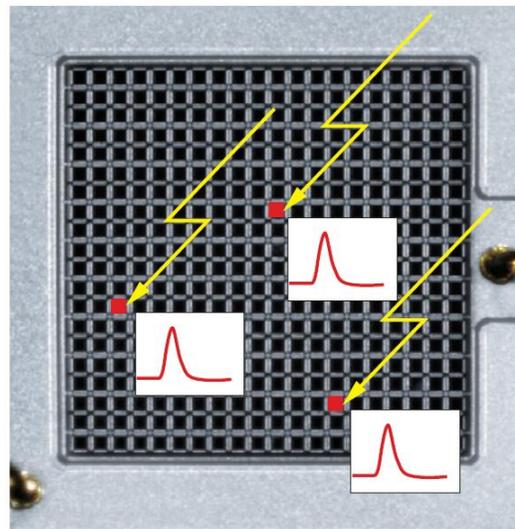
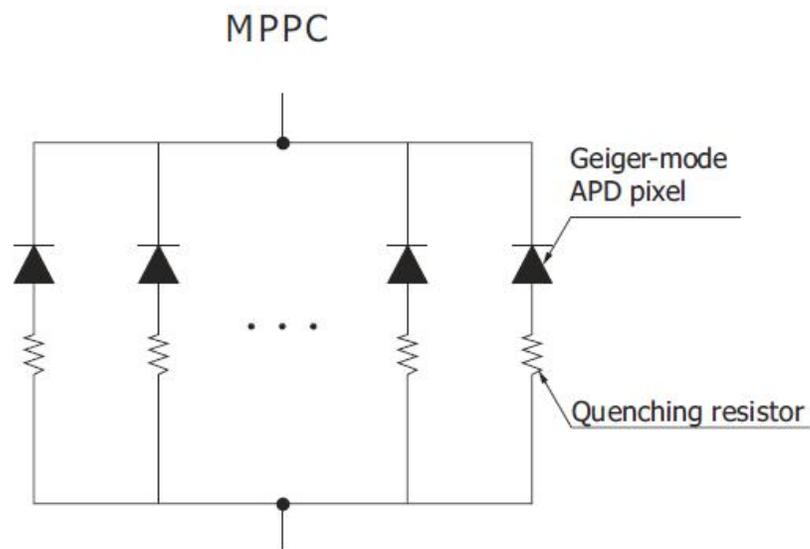


Measurement



- 利用Kuraray SCSF-78M 1mm 直径光纤测试验证了系统可靠性
- 多家国产光纤测试得到的衰减长度小于1m, 需进一步完善工艺

硅光倍增器SiPM



NIM A 926 (2019)
16-35

优点:

结构紧凑, 不同通道尺寸易加工

像素工作在在Geiger模式下

所需偏压低, 增益约 10^6 量级, 探测效率高

缺点: 噪声大, 且受温度影响

噪声主要包括:

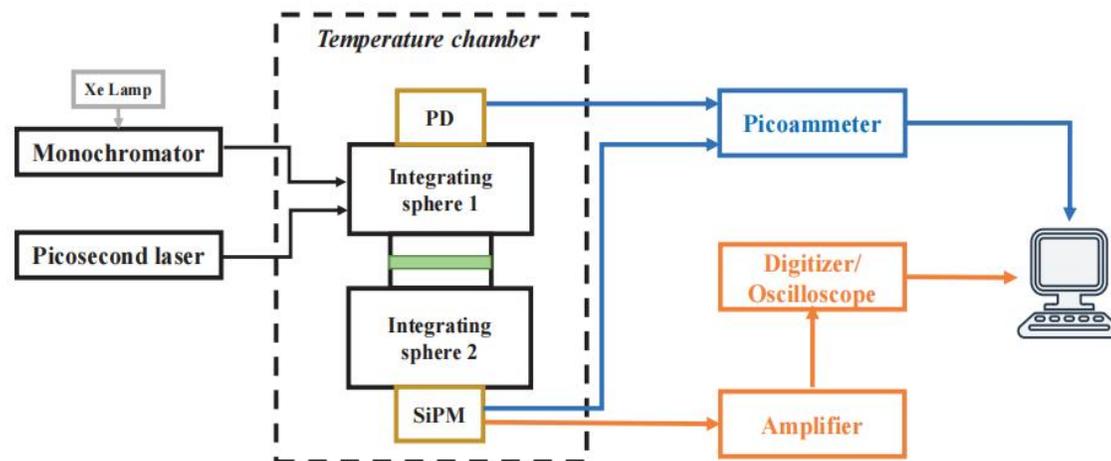
- 主噪声: 热激发的或隧穿效应产生的载流子引发的雪崩脉冲
- 关联噪声: 光串扰和后脉冲

SiPM性能测试

SiPM性能参数:

- 击穿电压、增益, 温度补偿系数
- 暗噪声, 探测效率, 波形时间特征

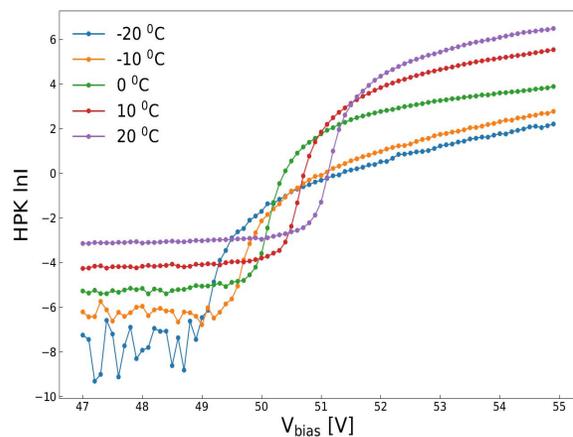
评估不同型号SiPM, 挑选合适的产品



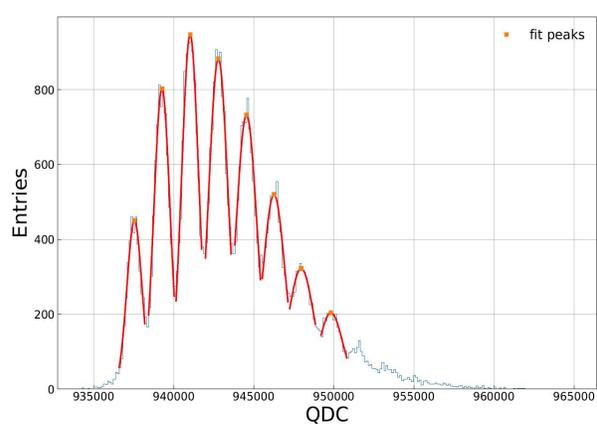
SiPM性能测试

Binghao Sun et al 2025 *JINST* **20** T02003

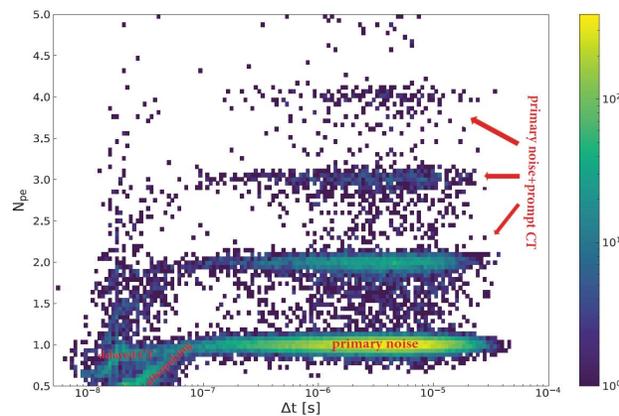
击穿电压



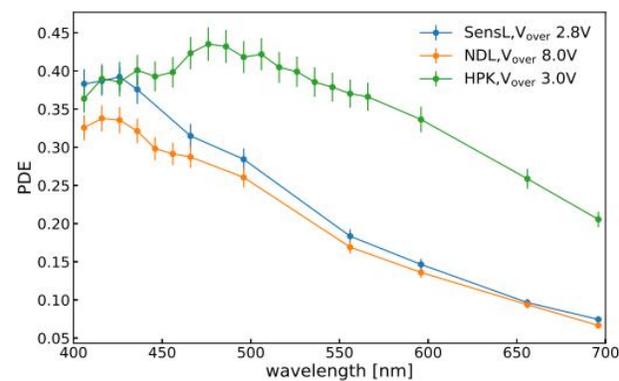
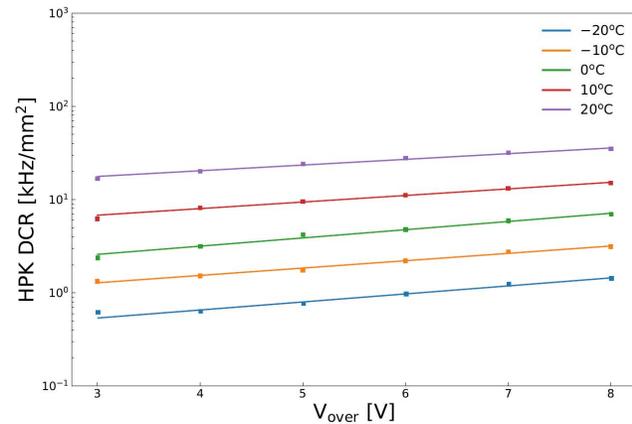
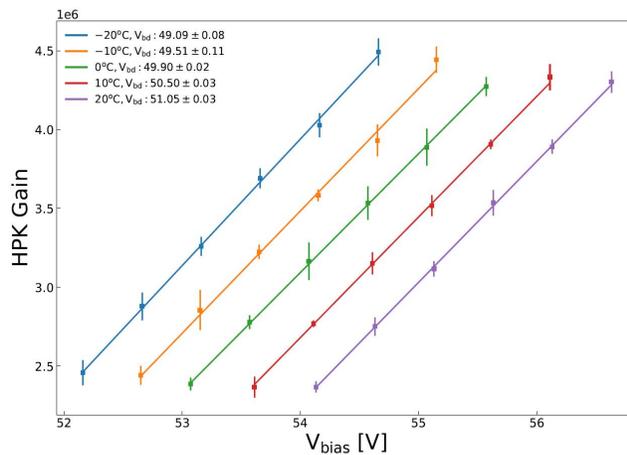
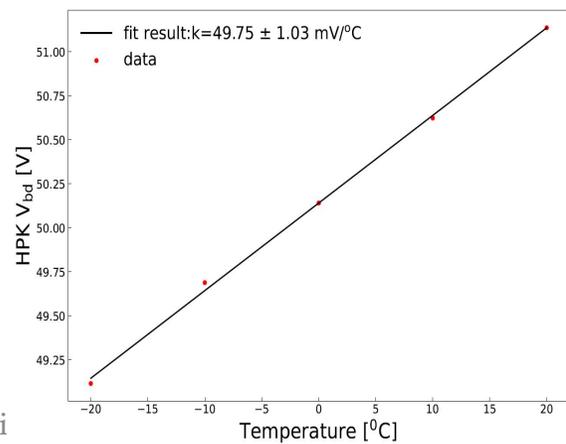
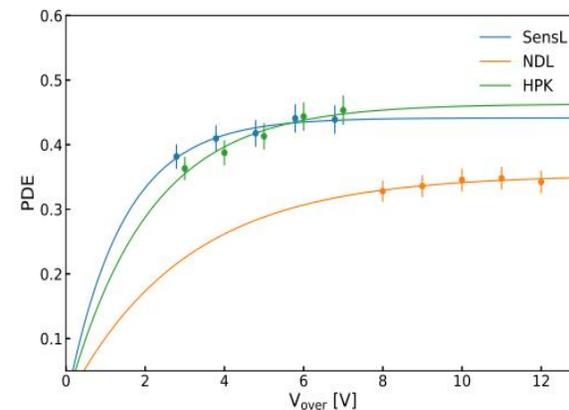
增益



暗噪声

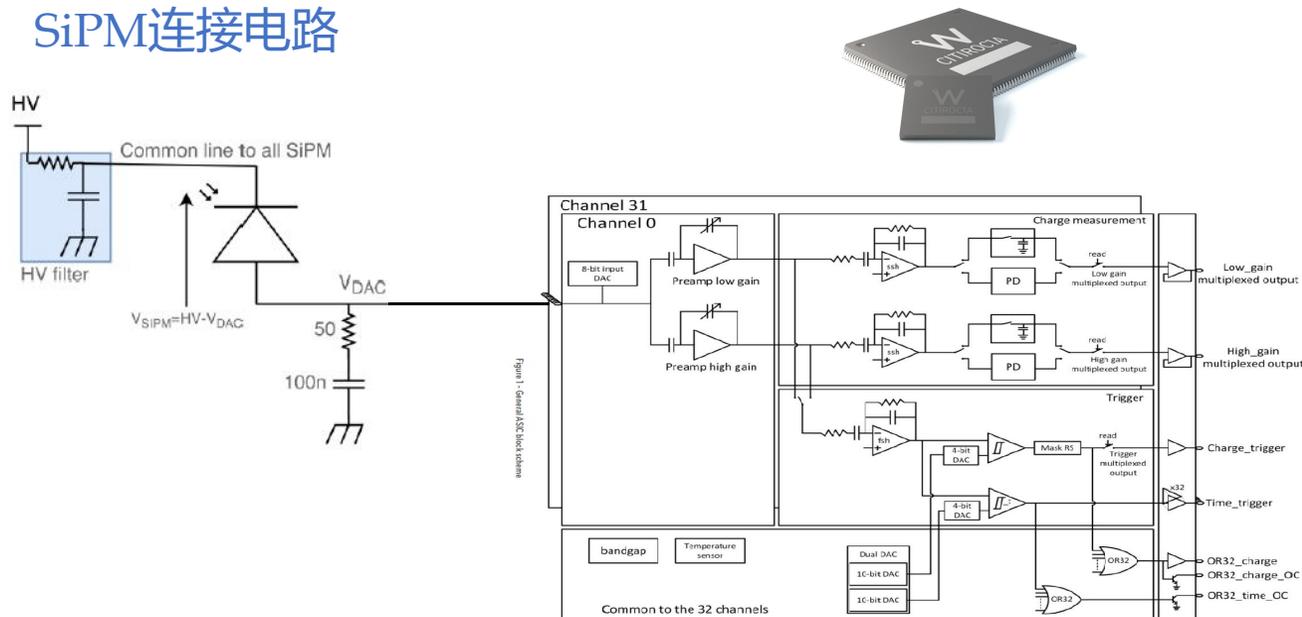


探测效率



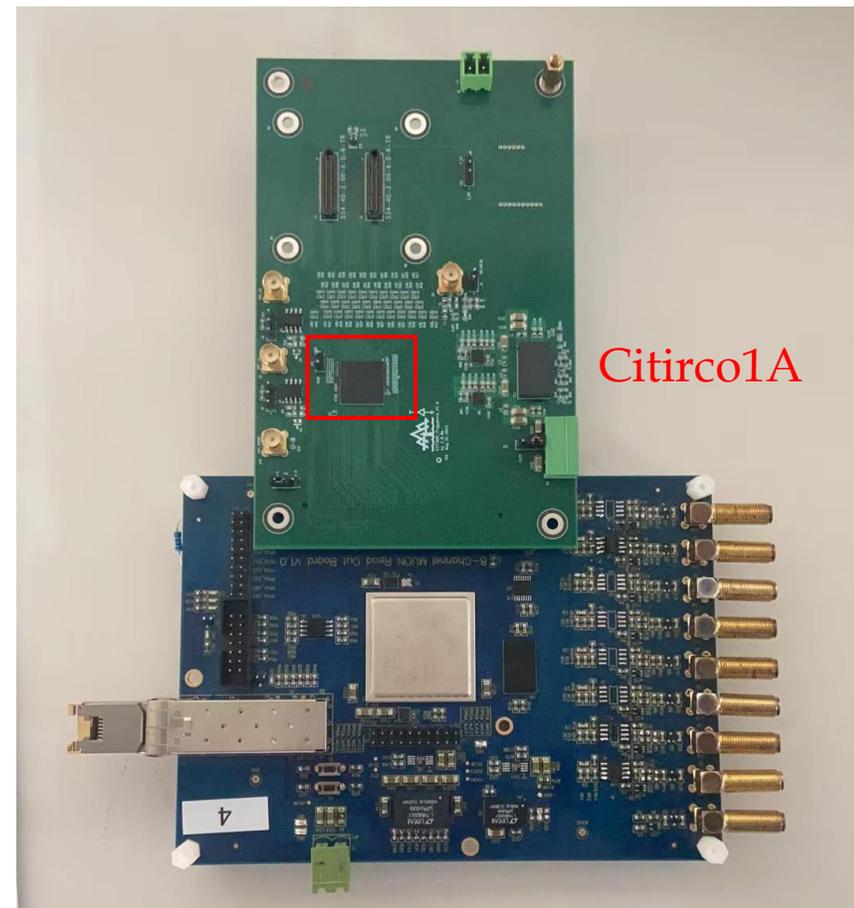
前端电子学

SiPM连接电路



Citiroc1A

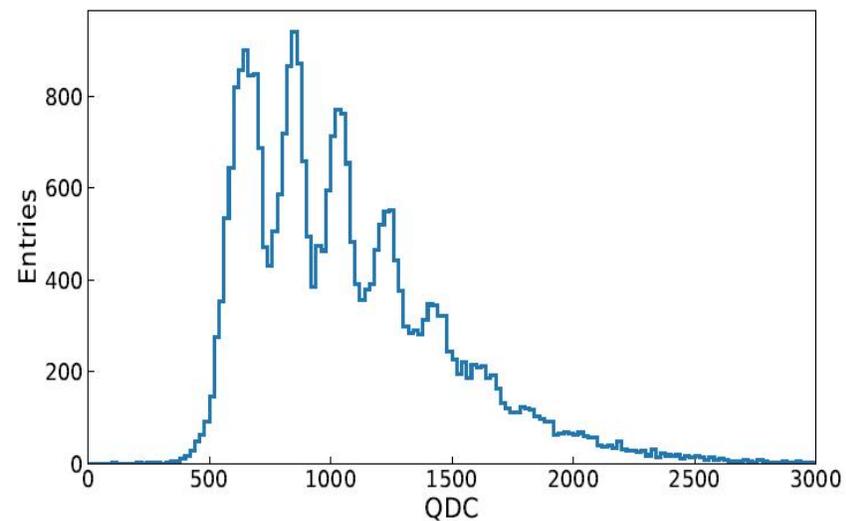
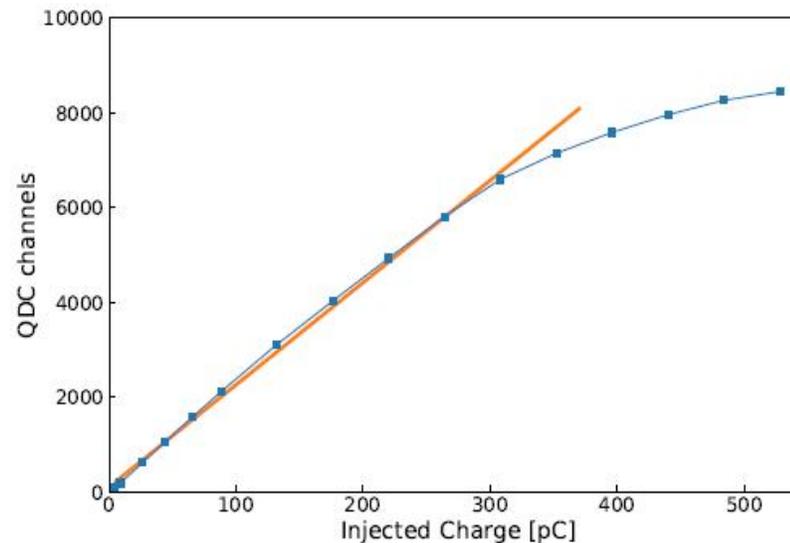
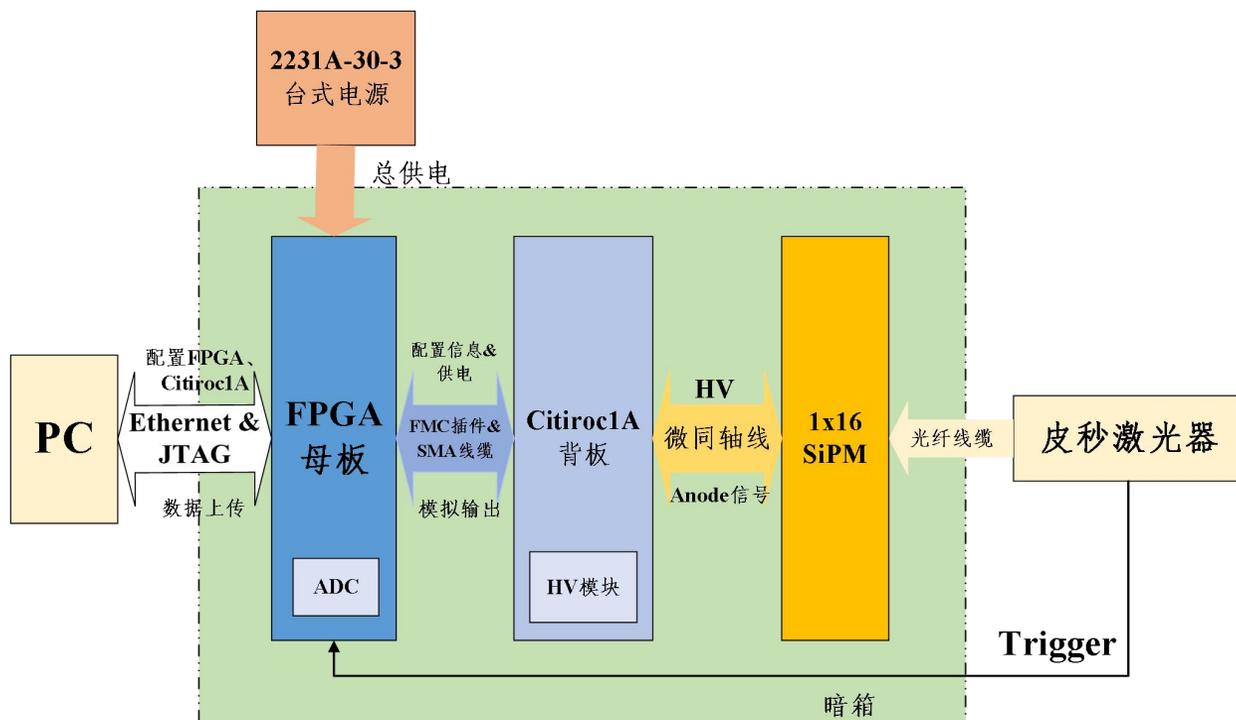
- 32 channels with HV adjustment for SiPM
- CR-RC² slow shaper with 12.5-87.5ns peaking time
- 2 multiplexed analogue charge output of HG and LG
- Dynamic range: 0-400 pC, up to 2500 pe @ 10⁶ SiPM gain



前端电子学

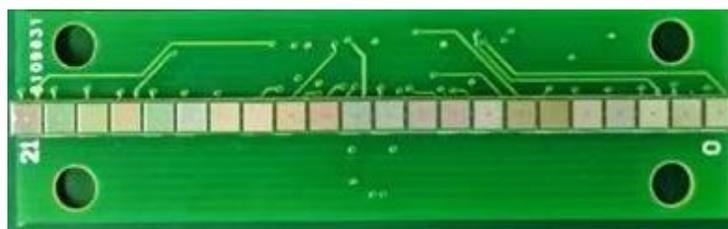
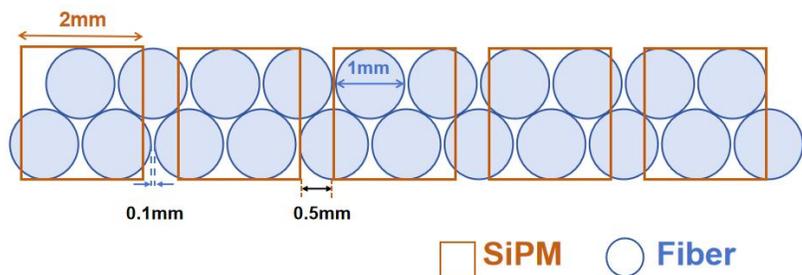
基于Citiroc1A的前端电子学板可以实现从单光子到300pC信号的大动态范围响应

(Wu et al *JINST* 19 (2024) 11, C11014)



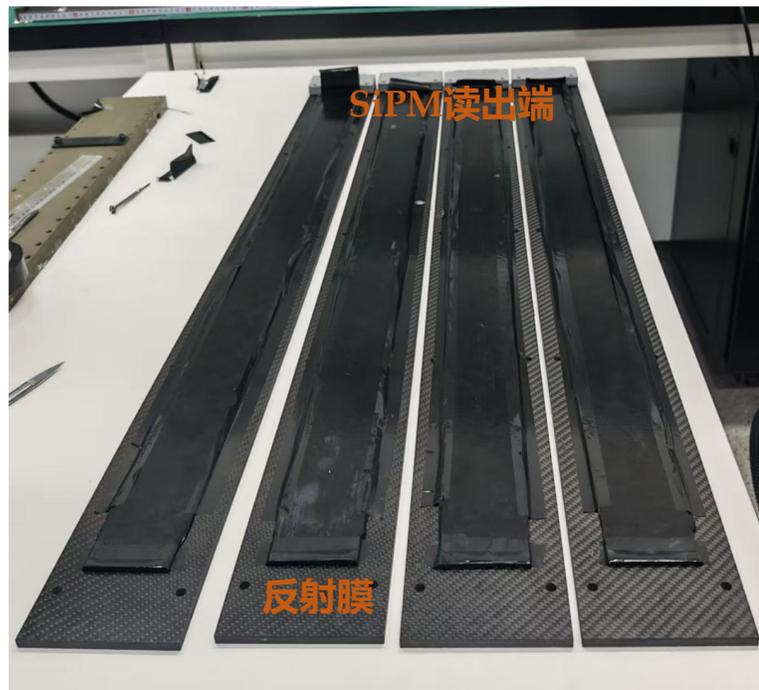
光纤模块制备

单端读出的亚毫米位置分辨模块结构设计



22通道的S13360-2050VE SiPM阵列

针对直径 $\geq 1\text{mm}$ 塑闪光纤，发展大尺寸光纤模块手动排布工艺，含模具、排纤、掺胶、端面切割打磨以反射膜贴覆等（国家发明专利，ZL202410222440.5）

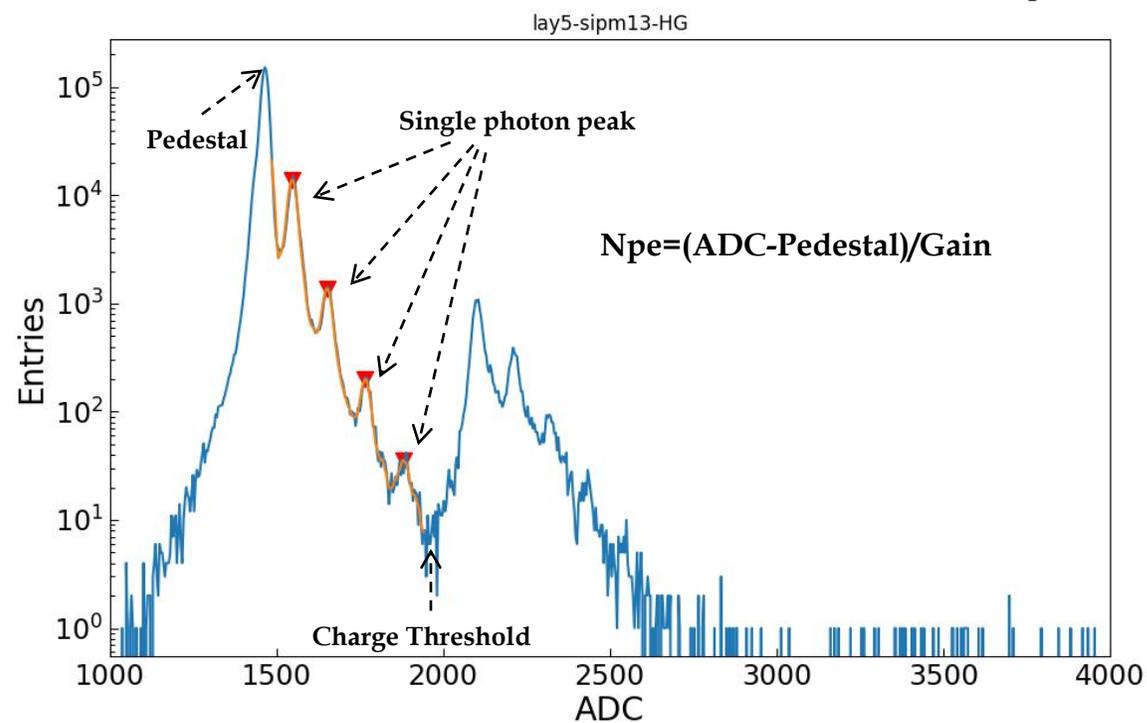


模块测试

短模块提供触发，约1m长模块接收触发
相同trigger ID数据进行事例组装

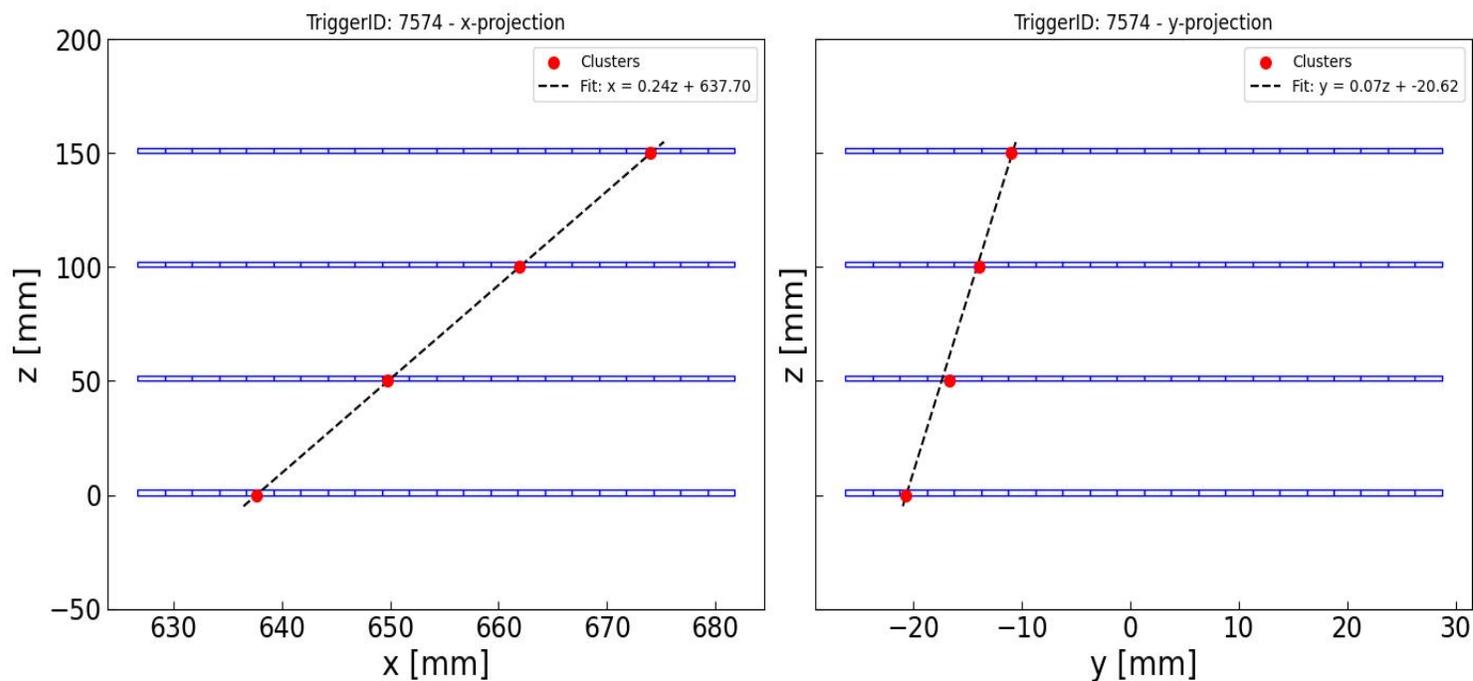


利用电荷触发模式下HG通道的ADC谱刻度增益，
进而重建每个通道信号对应的光电子数 N_{pe}

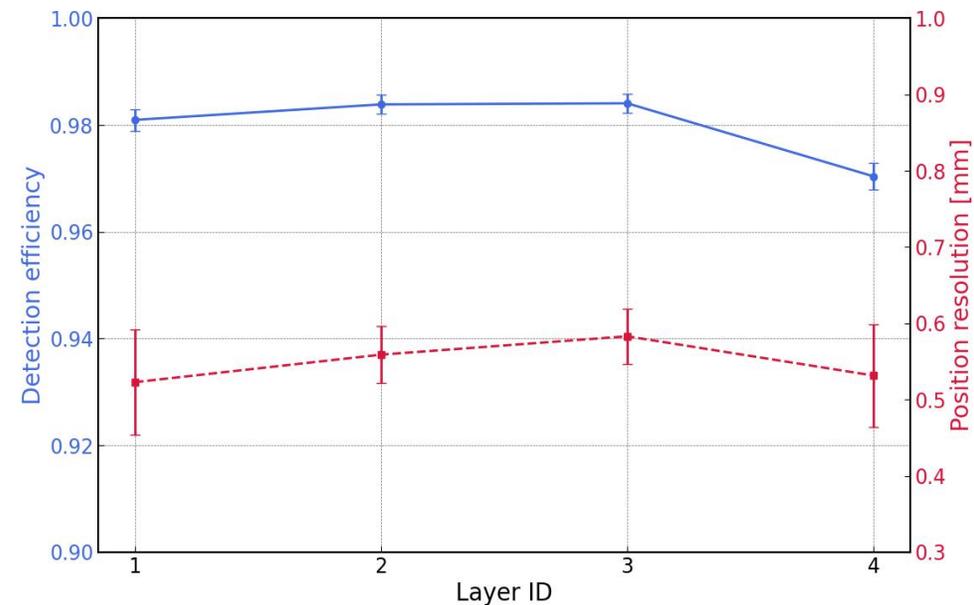


模块测试

探测器准直后，利用最小二乘法重建径迹

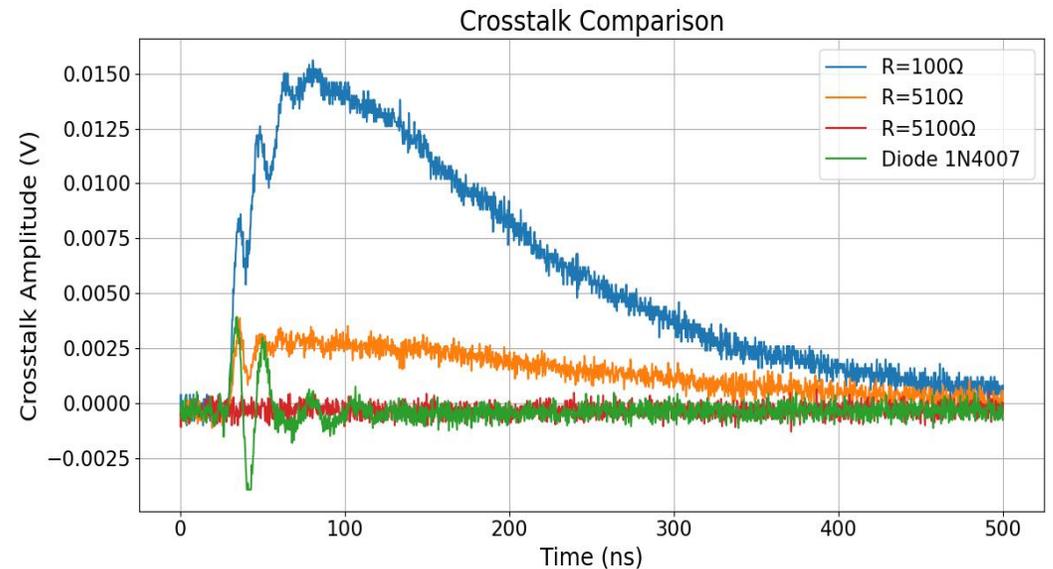
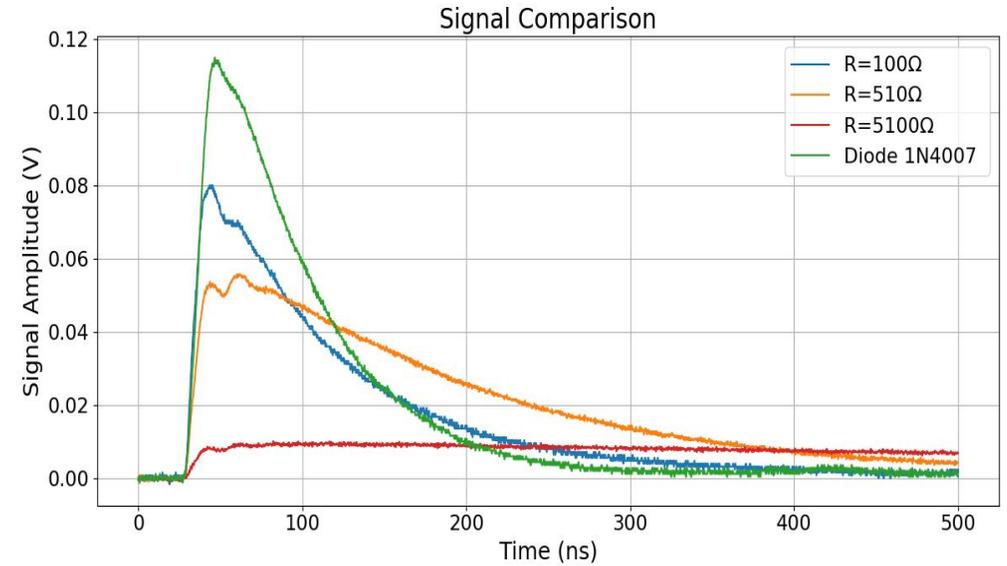
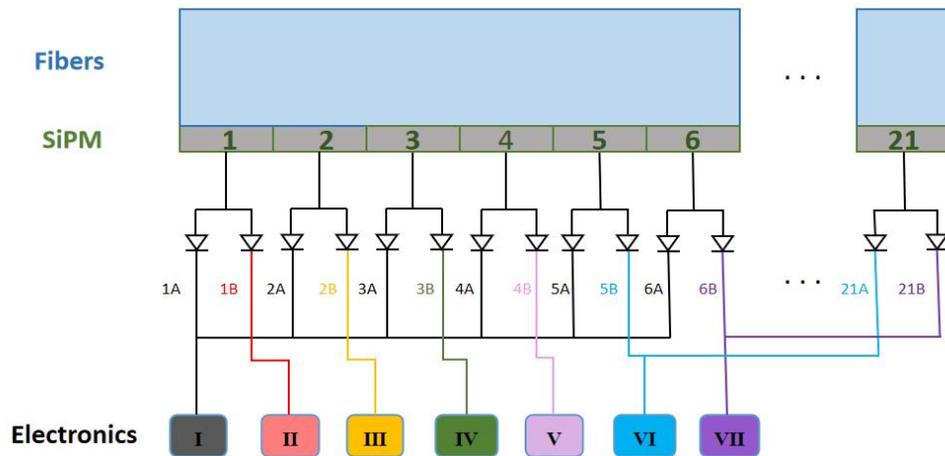


距离SiPM读出端约900mm处的模块性能
探测效率>97%，位置分辨~0.55mm



多路复用电子学

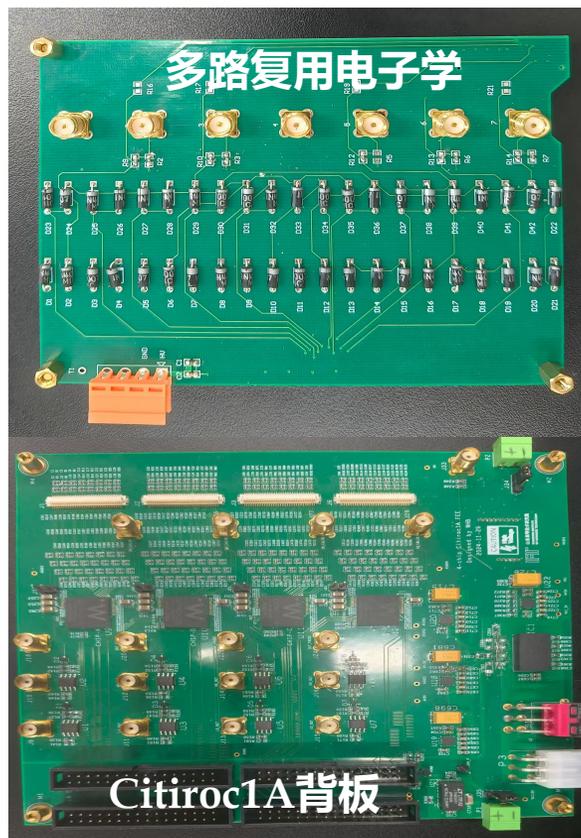
- 为了减少缪子成像系统所需读出电子学通道数，降低探测器成本，开展多路复用电子学研究
- 利用二极管实现单个SiPM信号的电荷分割并降低通道间信号串扰
- 正在开展多路复用电子学和模块的联调测试，评估复用策略对探测器位置分辨和探测效率性能的影响。



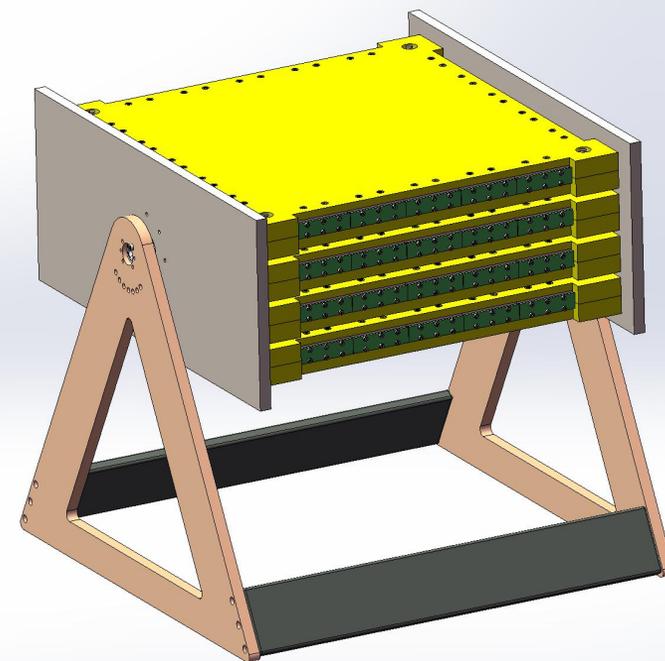
缪子成像设备研制



单层约30×30cm

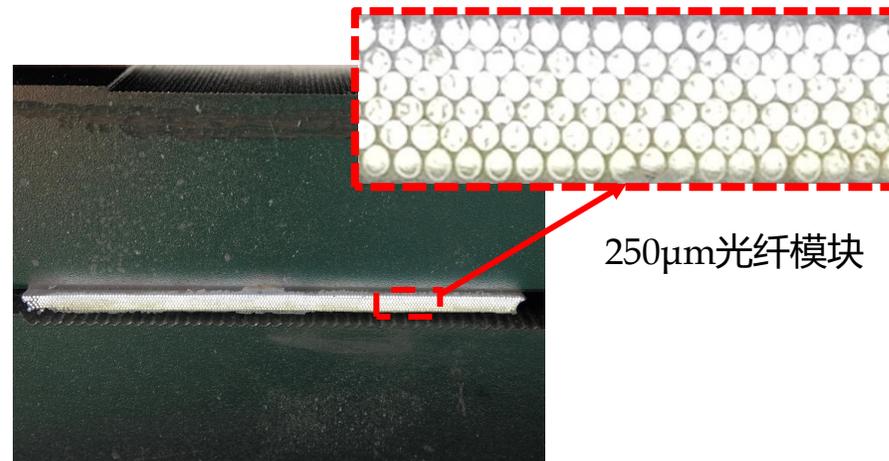
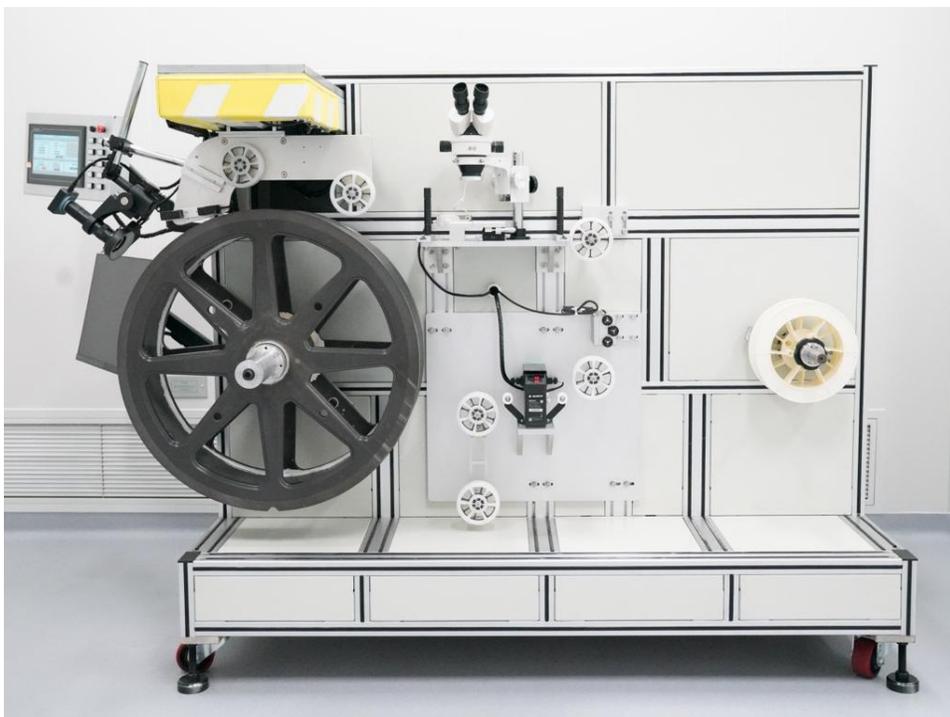


正在推进原型样机的研制



高精度塑闪光纤探测器

- 塑料闪烁光纤探测器位置分辨正比与光纤直径，现有最细双包层光纤产品直径为 $250\mu\text{m}$
- 高位置分辨的光纤探测器的研制需要对细径光纤实现精准排布
- 针对于 $<0.5\text{mm}$ 直径的光纤，联合厂家研制了绕线机设备，可实现 $250\mu\text{m}$ 以及更细光纤的排布



$250\mu\text{m}$ 光纤模块

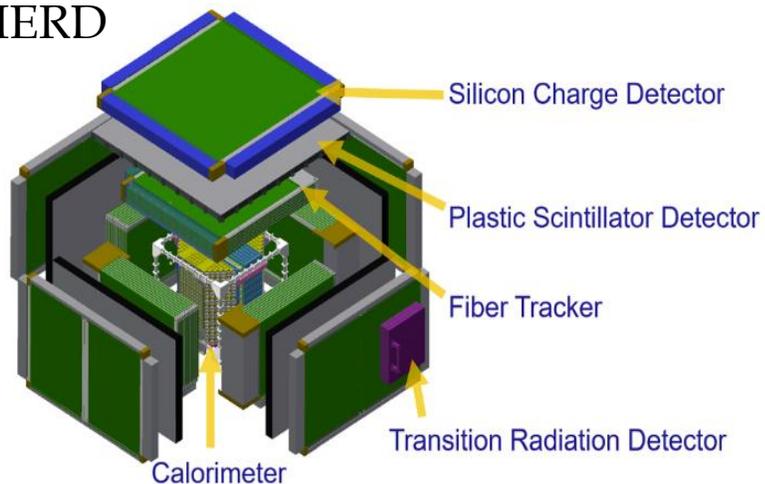


Hamamatsu S13552, 通道尺寸约 $250\mu\text{m}$

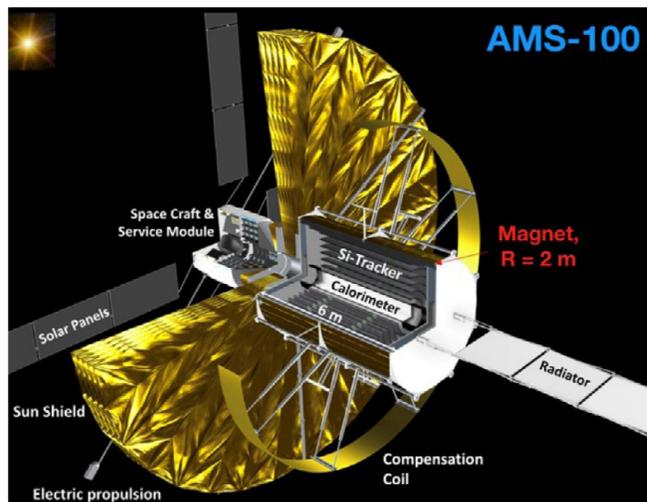
光纤探测器的应用

通过调整所用光纤直径、SiPM通道尺寸和动态范围以及读出电子学方案等，塑闪光纤探测器可实现对电荷、位置以及时间等信息的测量，可用于宇宙线粒子和太阳高能粒子探测。

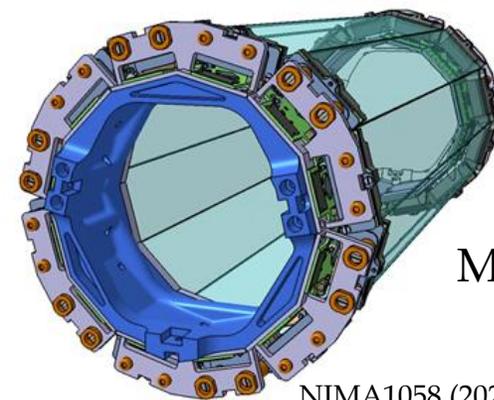
HERD



采用6层 $\text{\O}250\mu\text{m}$ 光纤交叠排布，实现 $<100\mu\text{m}$ 高位置分辨；更大动态响应范围，测量宇宙线粒子的电荷



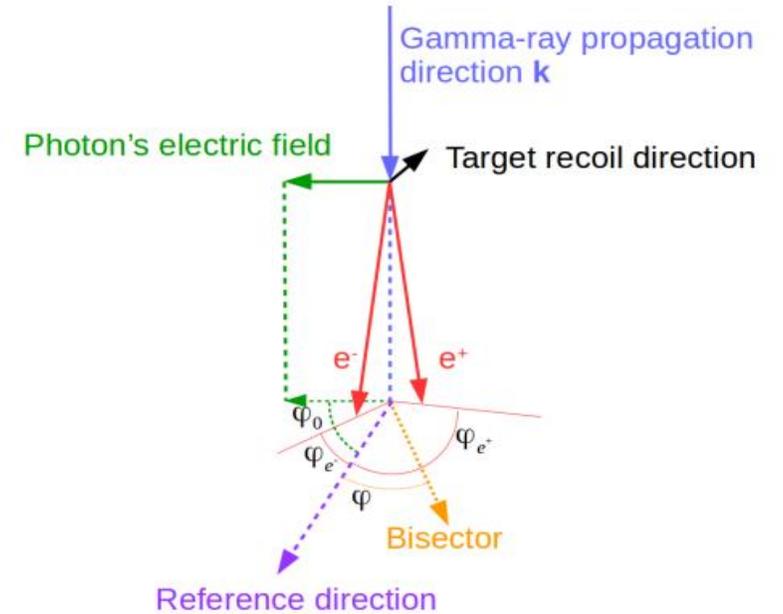
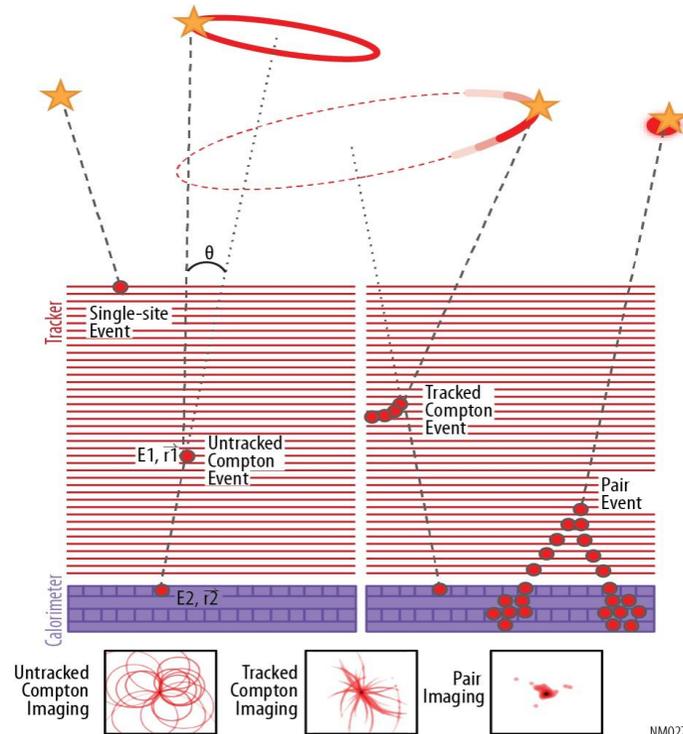
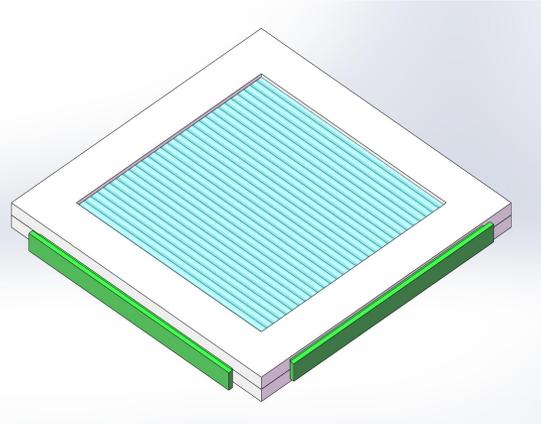
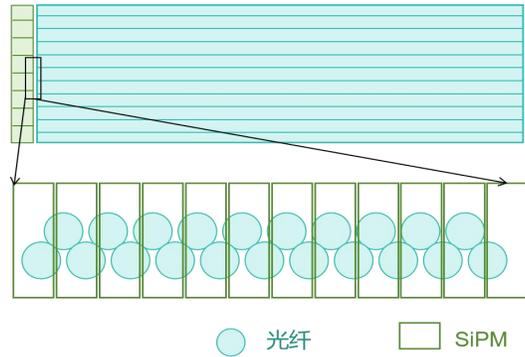
12层 $\text{\O}125\mu\text{m}$ 光纤交叠排布，以实现 $13\mu\text{m}$ 的高位置分辨率



3层 $\text{\O}250\mu\text{m}$ 交叠排布，同时实现 250ps 时间分辨和 $100\mu\text{m}$ 位置分辨率

光纤探测器的应用

- 在相同的探测器厚度下，粒子在塑闪光纤中的多次弹性散射偏角比硅探测器可以减少约一半
- 塑闪光纤探测器制备工艺更简单，可以实现更灵活的结构设计，且成本较低
- 研制高位置分辨和低物质的量的塑料闪烁光纤探测器有助于探测MeV-GeV能区的伽马射线偏振



NM027

谢谢大家!