



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

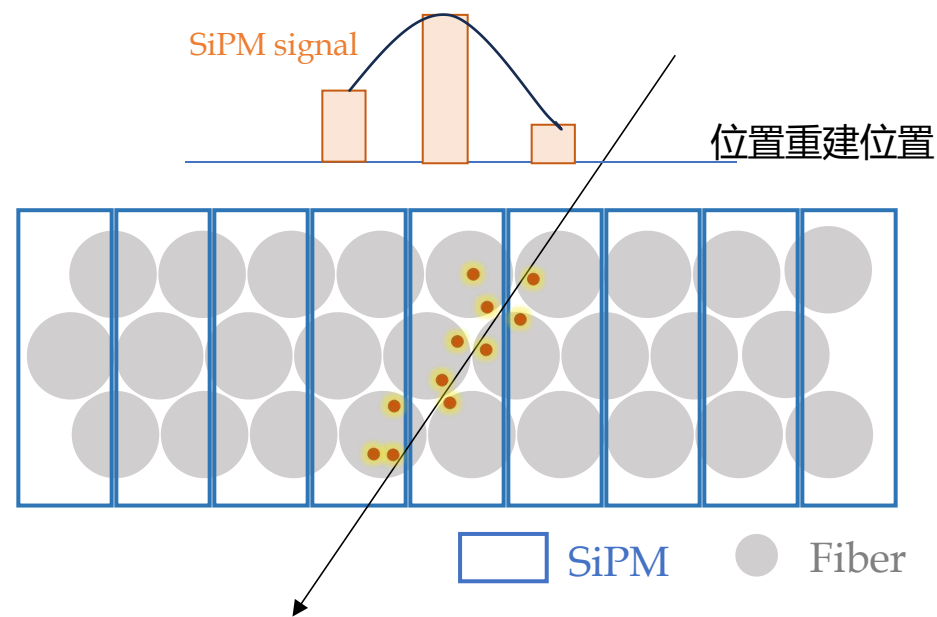
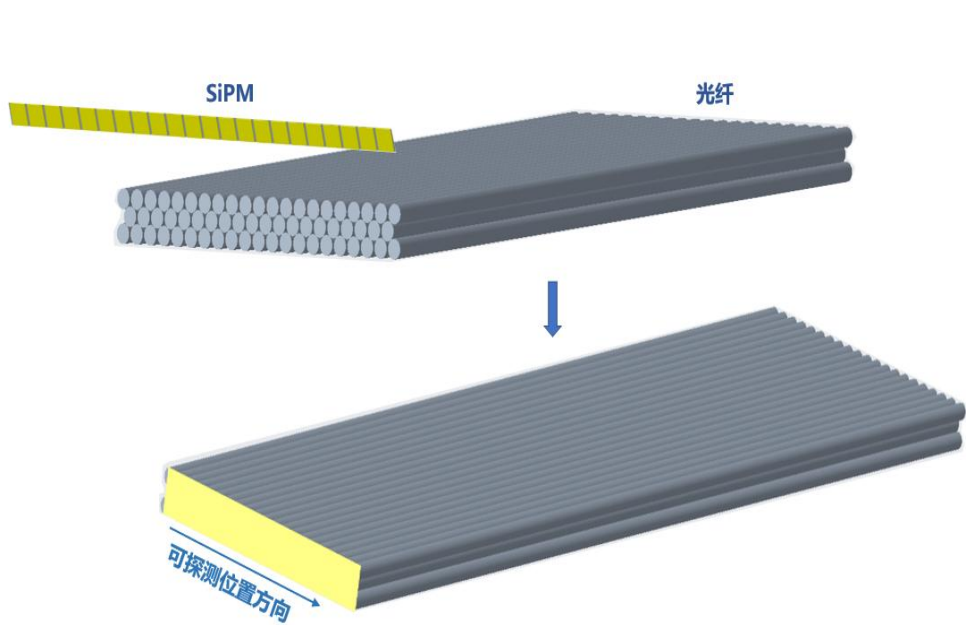
李慧玲

山东高等技术研究院

2026年03月28日，济南

第二届非加速器实验粒子探测和电子学技术研讨会

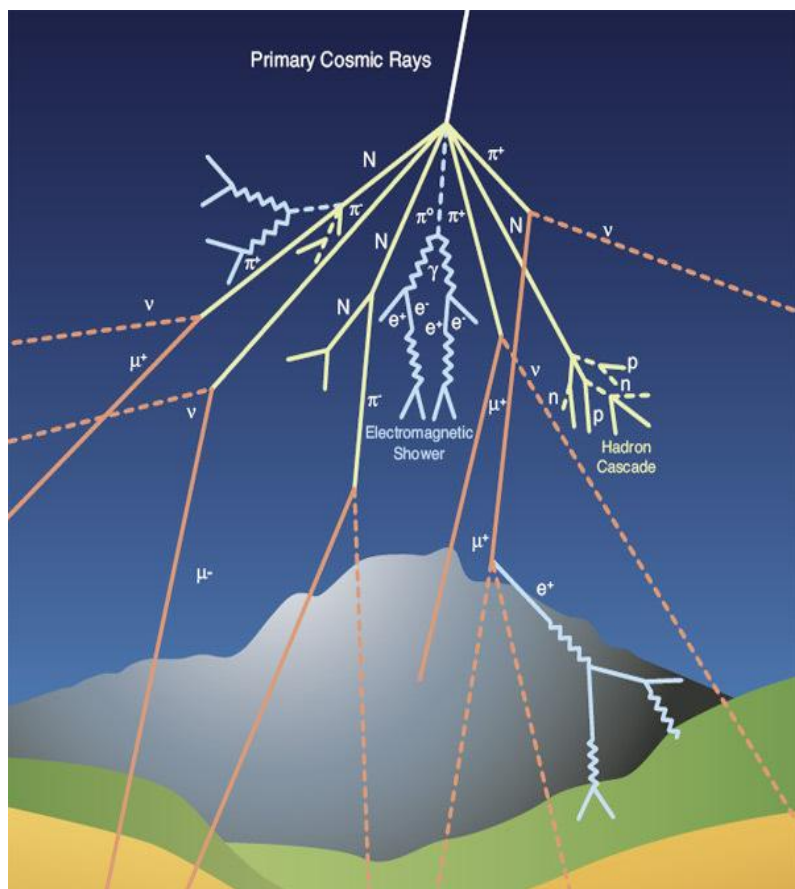
塑闪光纤探测器



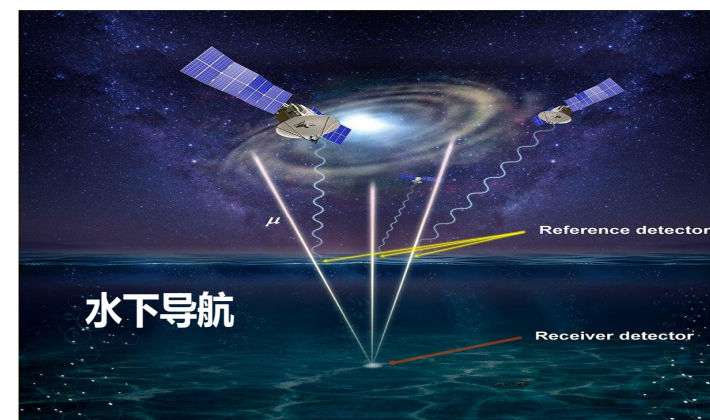
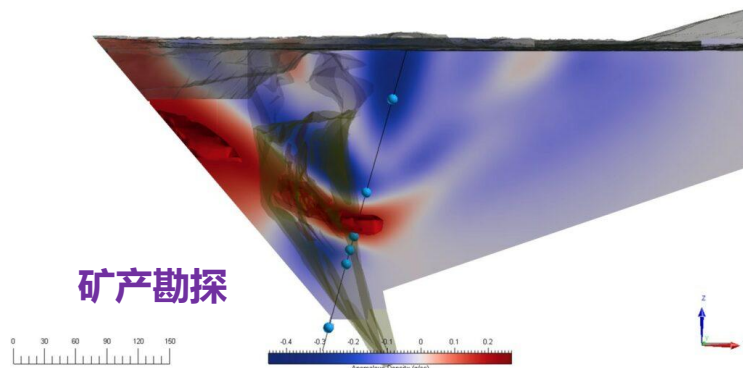
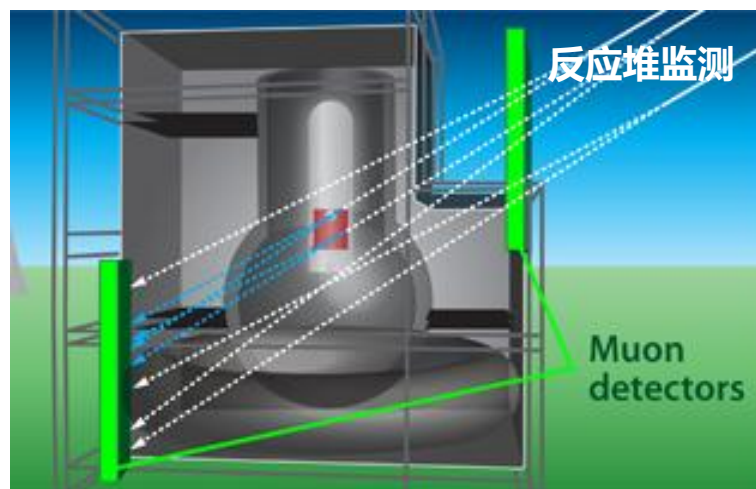
- 塑料闪烁光纤探测器：光纤探测主体和1维SiPM光电转换器件
- 光纤交叠紧密排布，可实现多种尺寸和形状的制备
- 可实现与传统硅微条探测器相当的位置分辨能力，但设计制造上的成本和复杂度低
- 国内有相关塑料闪烁光纤和SiPM器件产品，未来有望实现国产化

宇宙线缪子成像

宇宙线缪子

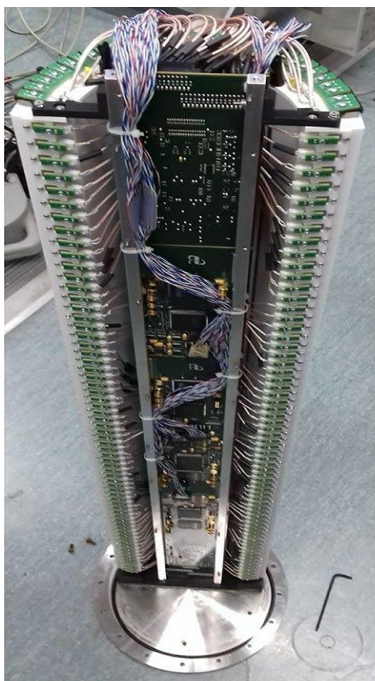


缪子散射成像 & 缪子透射成像

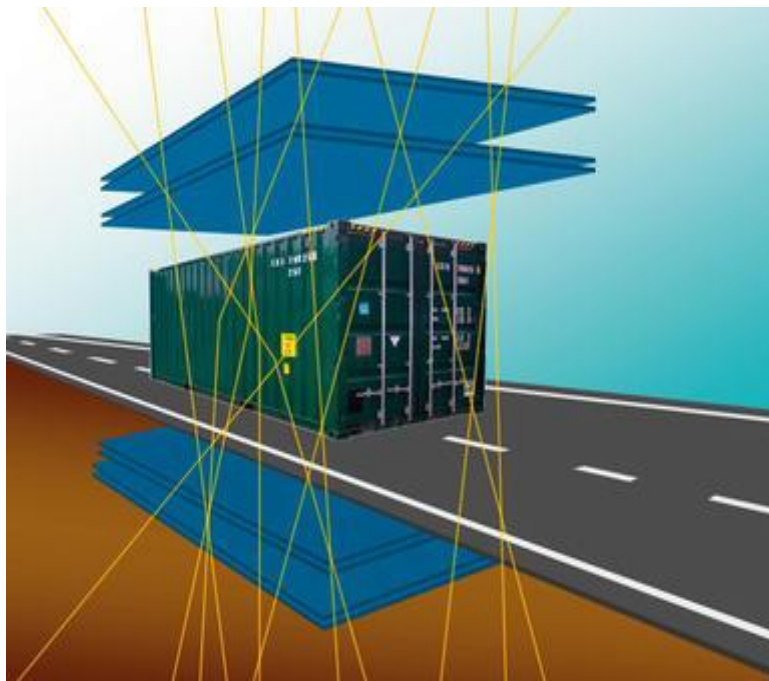


宇宙线缪子成像

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

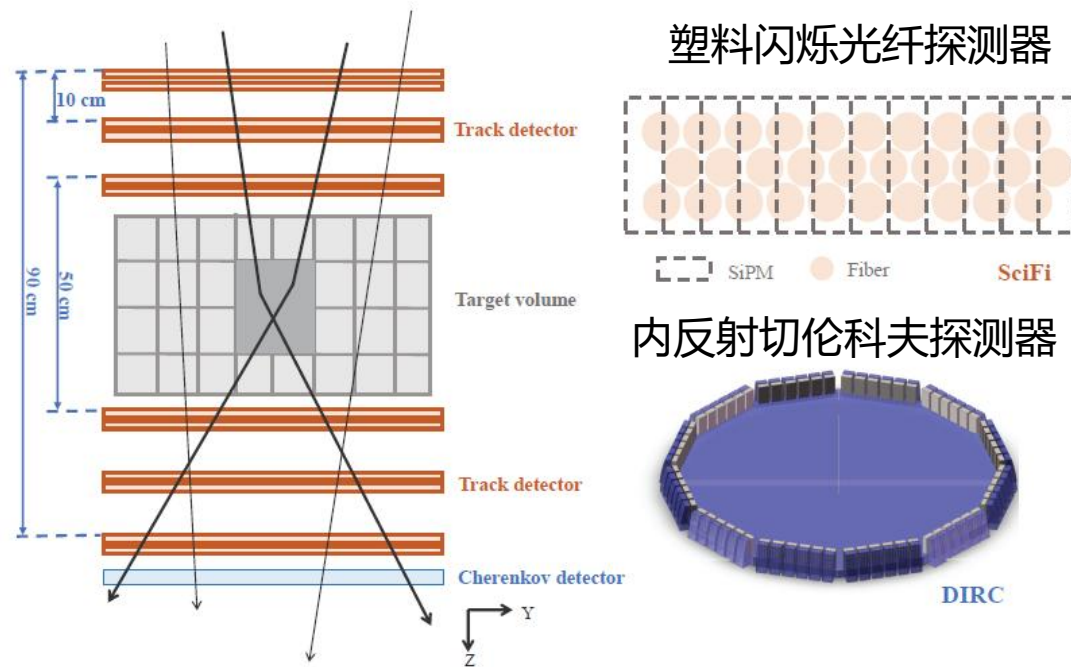


井眼式



平板式

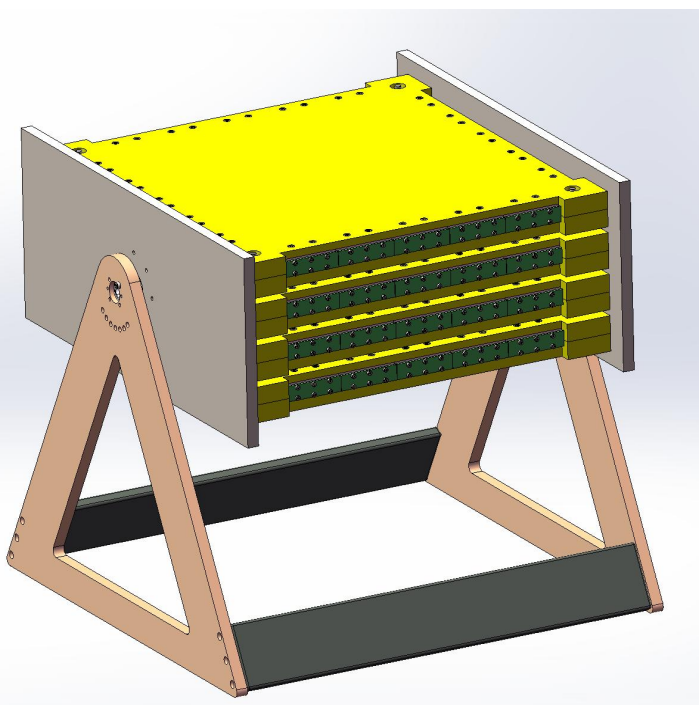
同时实现对高Z和低Z物质鉴别的新型探测系统



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 $\leq 1\text{mrad}$

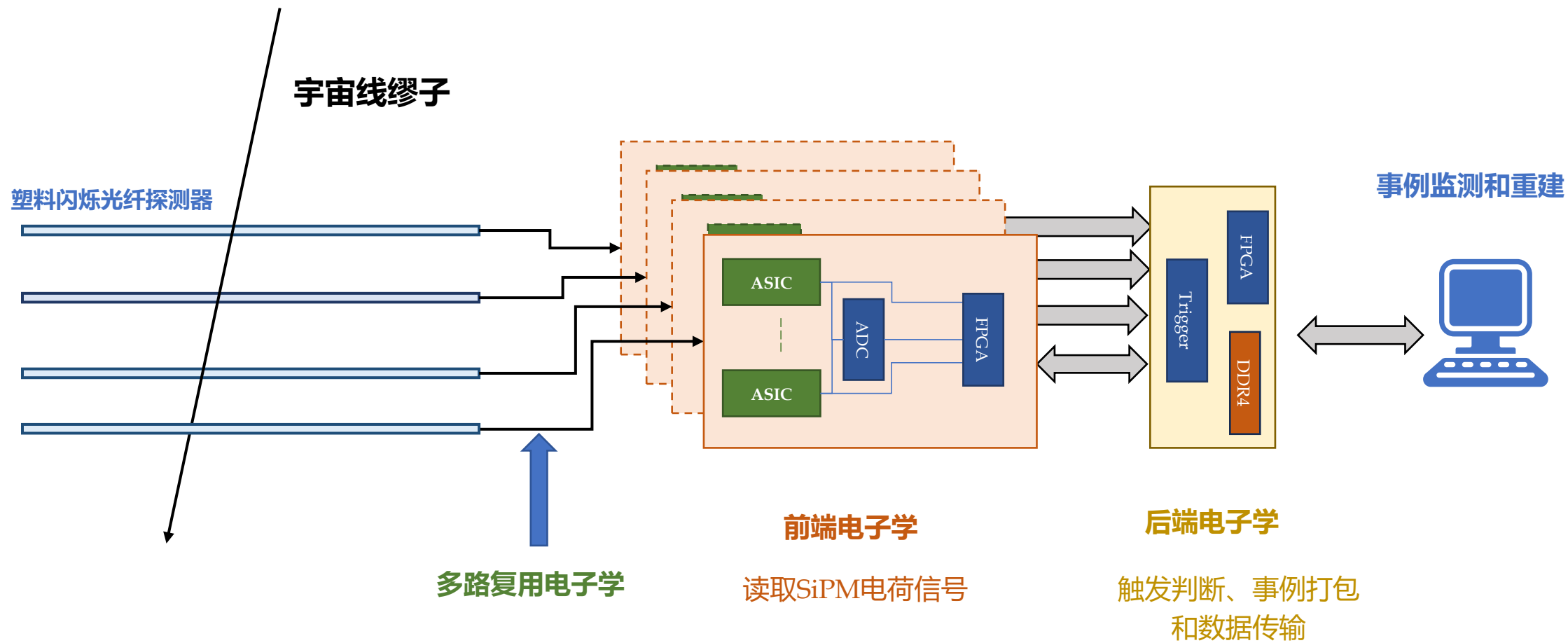
前端电子学:

- 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

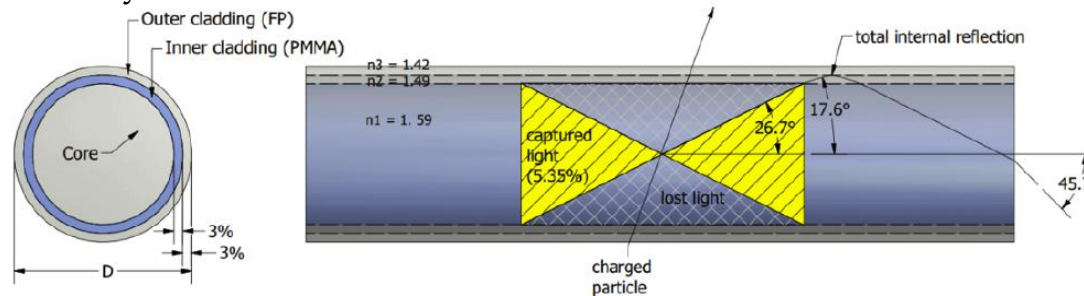
探测器设计方案



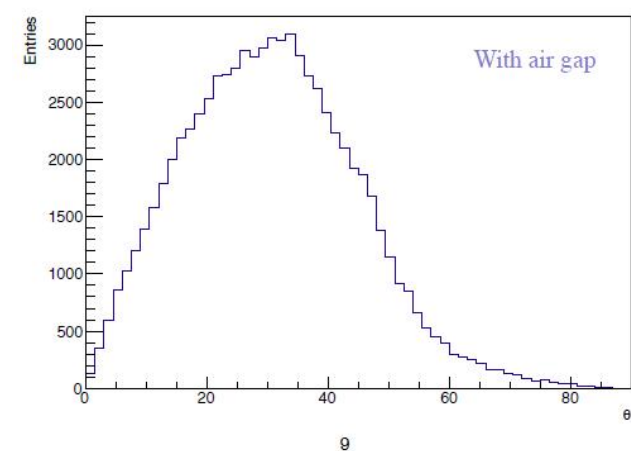
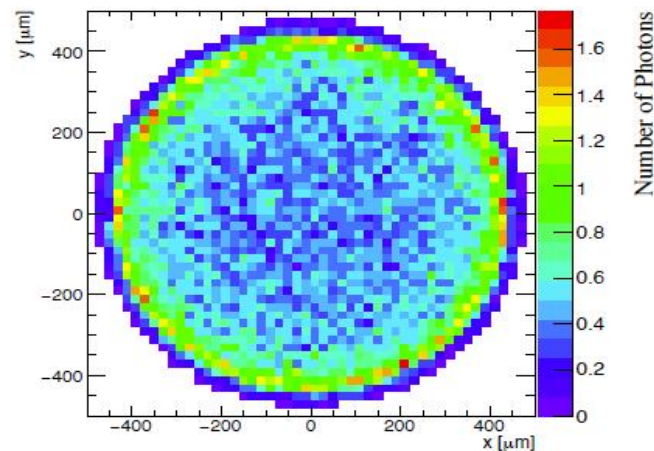
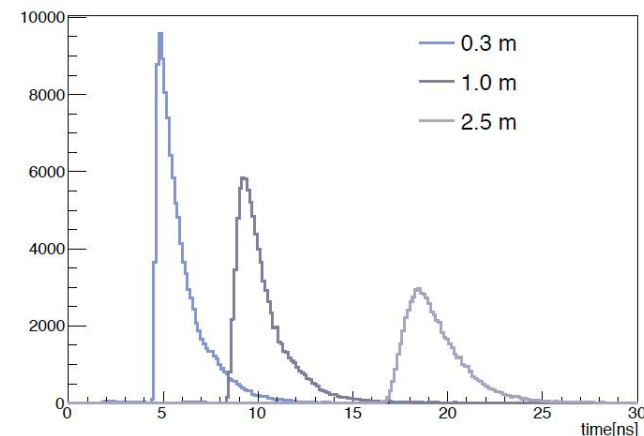
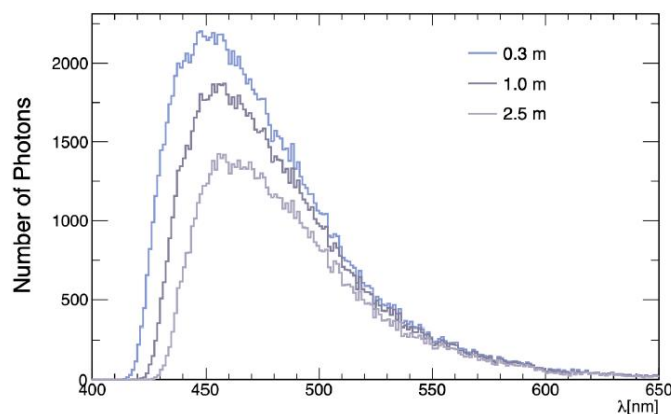
塑料闪烁光纤

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

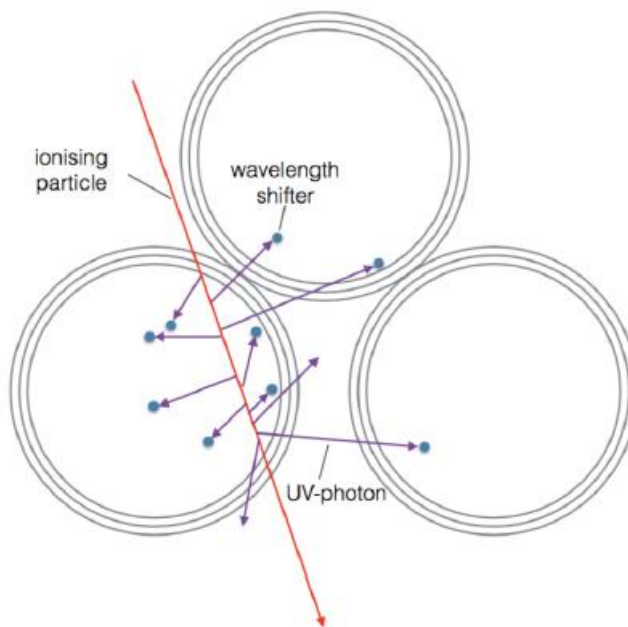


- 带电粒子探测: 光产生和光导
- 光产额 ~ 8000 ph/MeV
- 衰减长度 >4 m,
- 快衰减时间 ~ 2.8 ns
- 光纤束缚效率 $\sim 5.4\%$



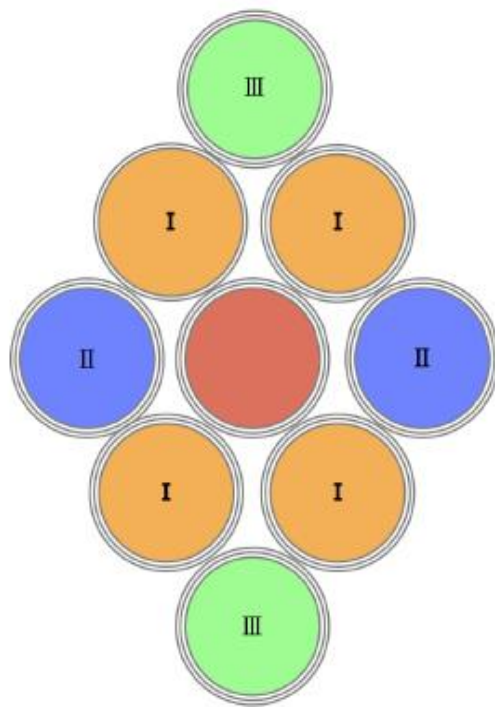
光纤间的串扰

串扰由发生WLS过程前的紫外光子激发临近光纤导致



THESIS-Stephan Escher-2017-331

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。



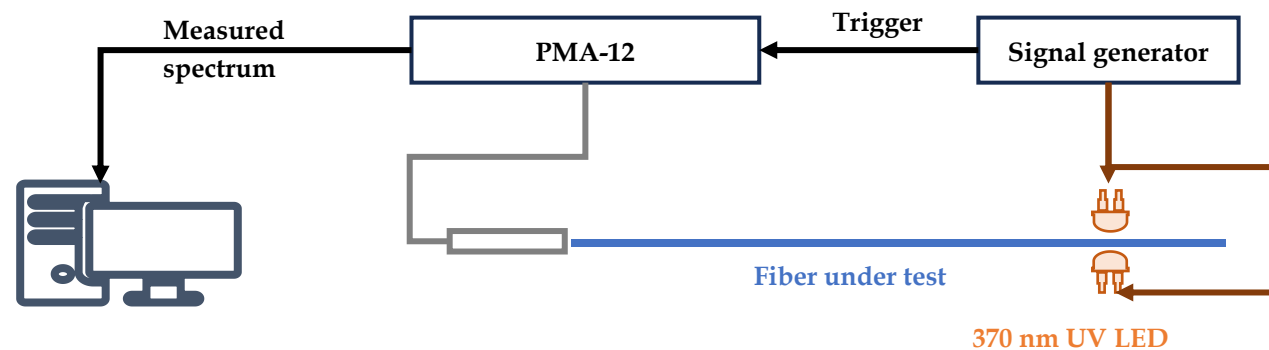
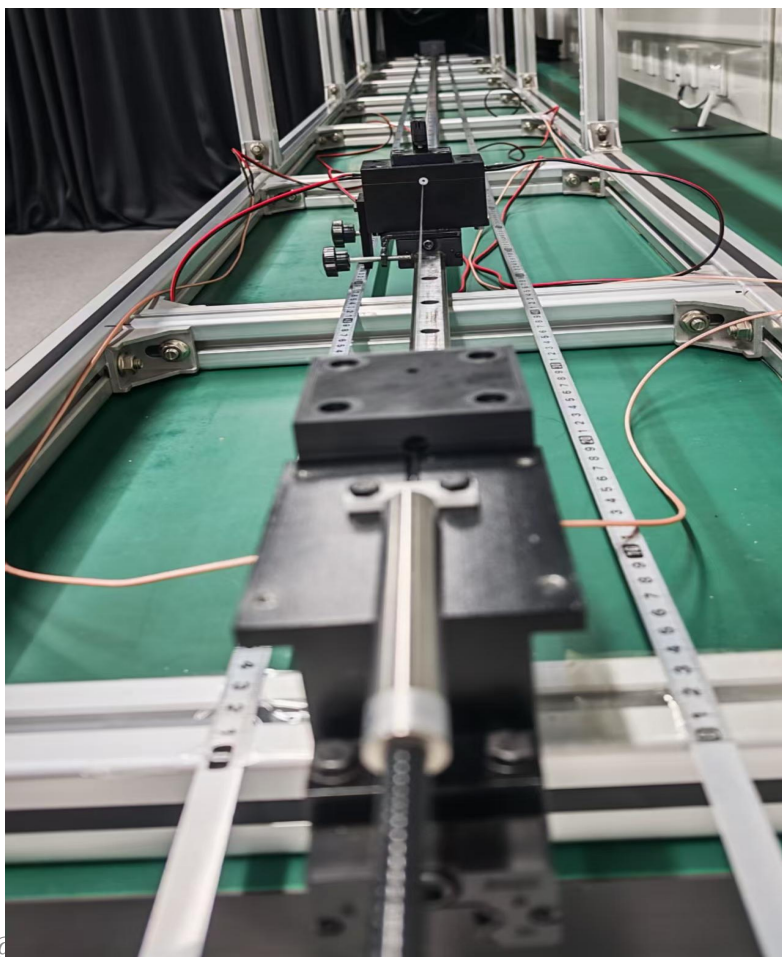
光纤串扰概率

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%

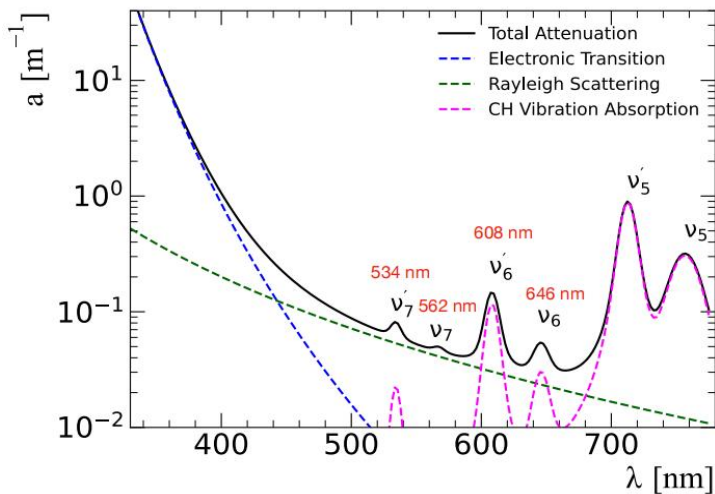
制备时可通过在光纤间的胶水中添加TiO₂来降低串扰

塑闪光纤性能测试

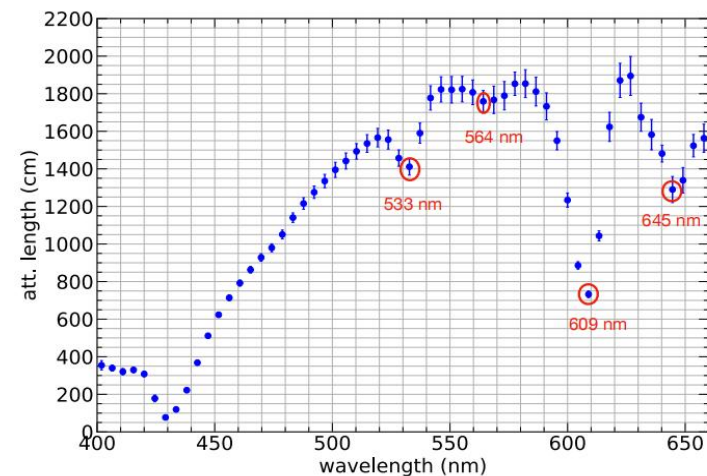
光纤测试平台



Theory

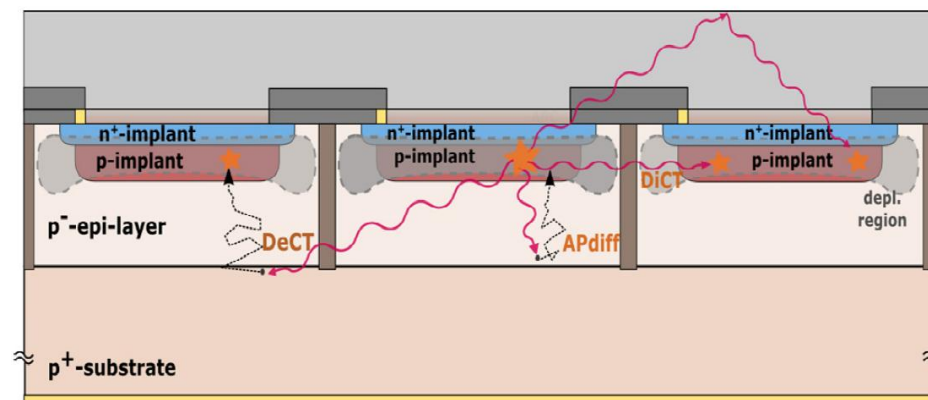
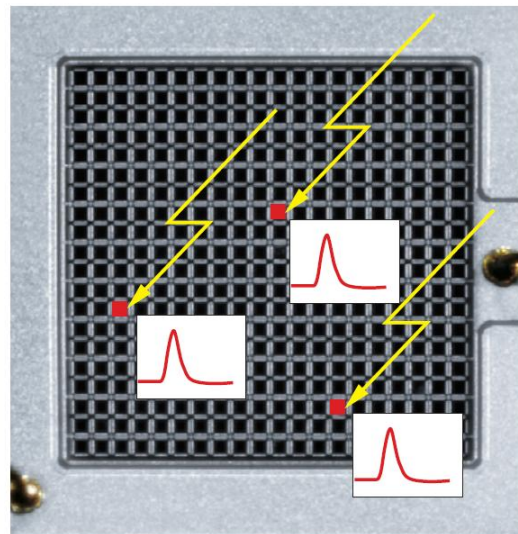
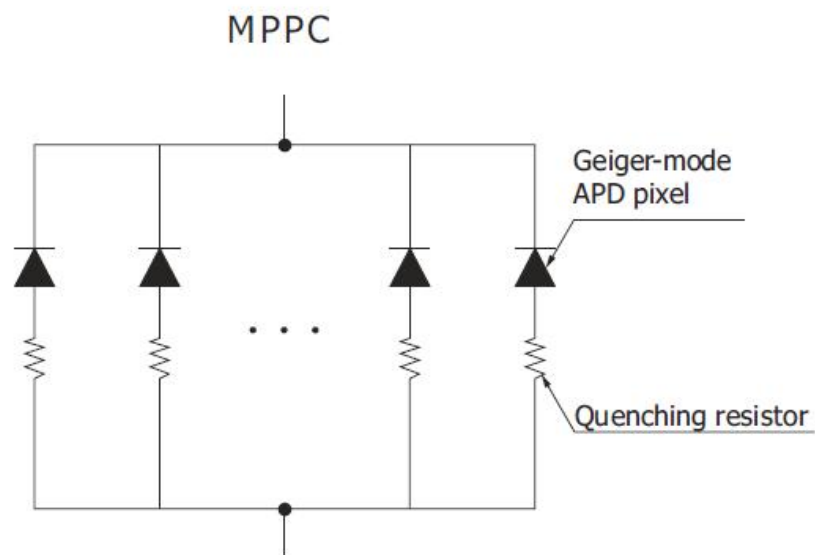


Measurement



- 利用Kuraray SCSF-78M 1mm 直径光纤测试验证了系统可靠性
- 多家国产光纤衰减长度较好的可达1m, 相关工艺正在进一步完善

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:

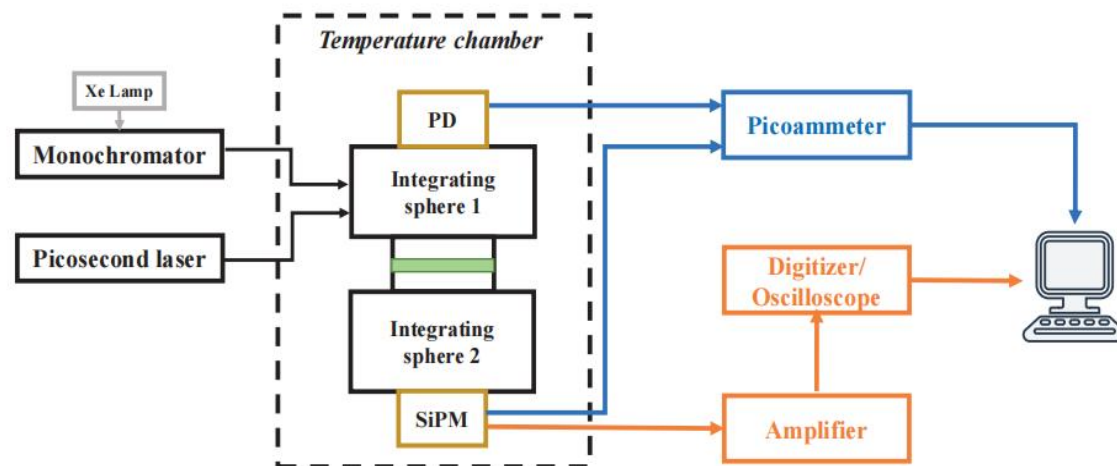
- 主噪声: 热激发的或隧穿效应产生的载流子引发的雪崩脉冲
- 关联噪声: 光串扰和后脉冲

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

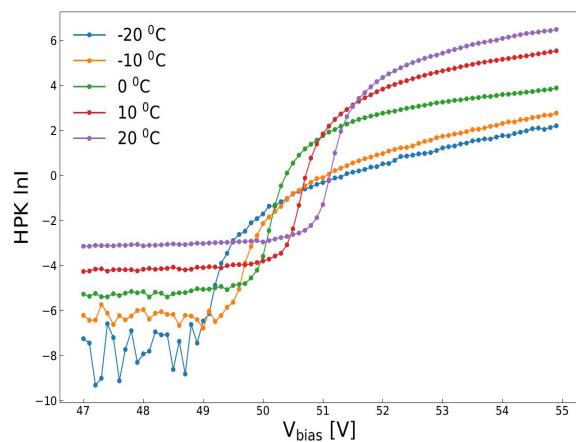


SiPM性能测试原理

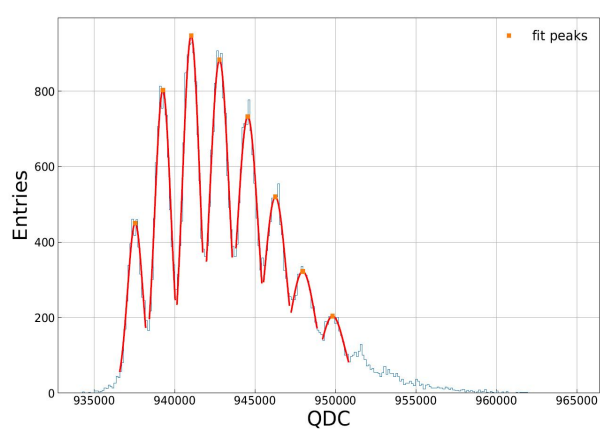
SiPM性能测试

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

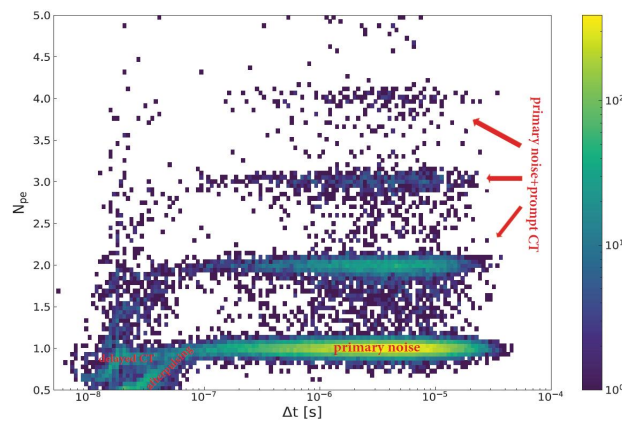
击穿电压



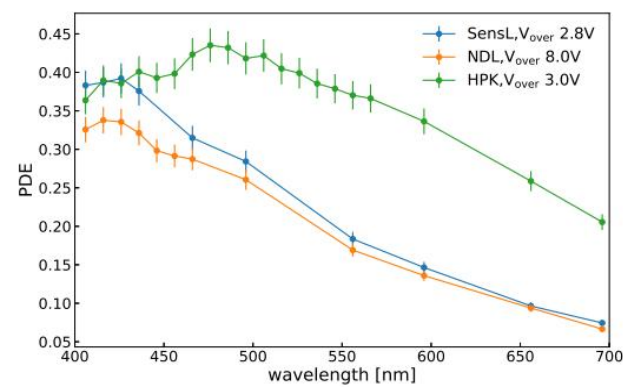
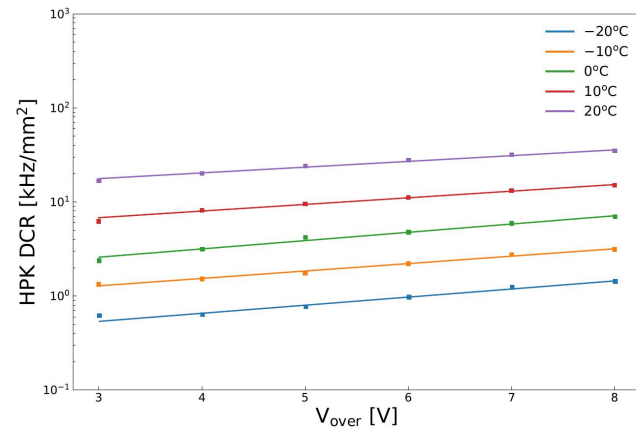
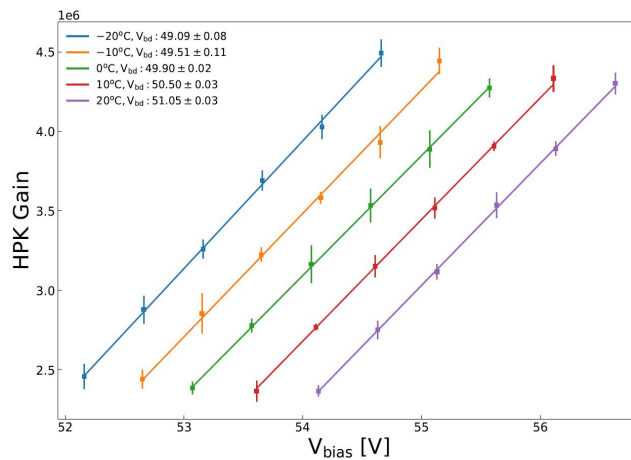
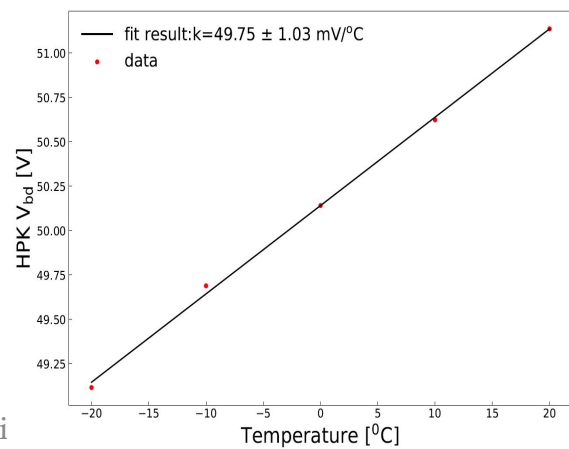
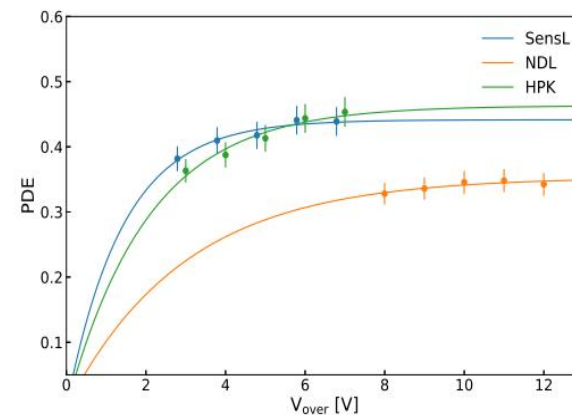
增益



暗噪声

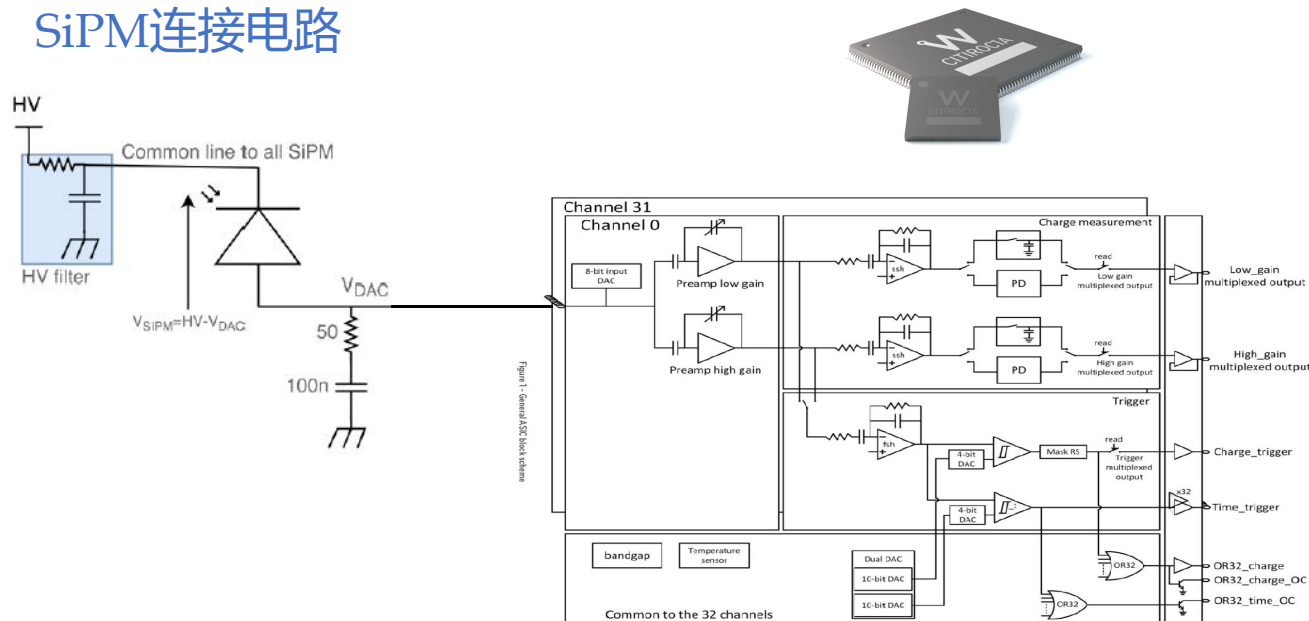


探测效率



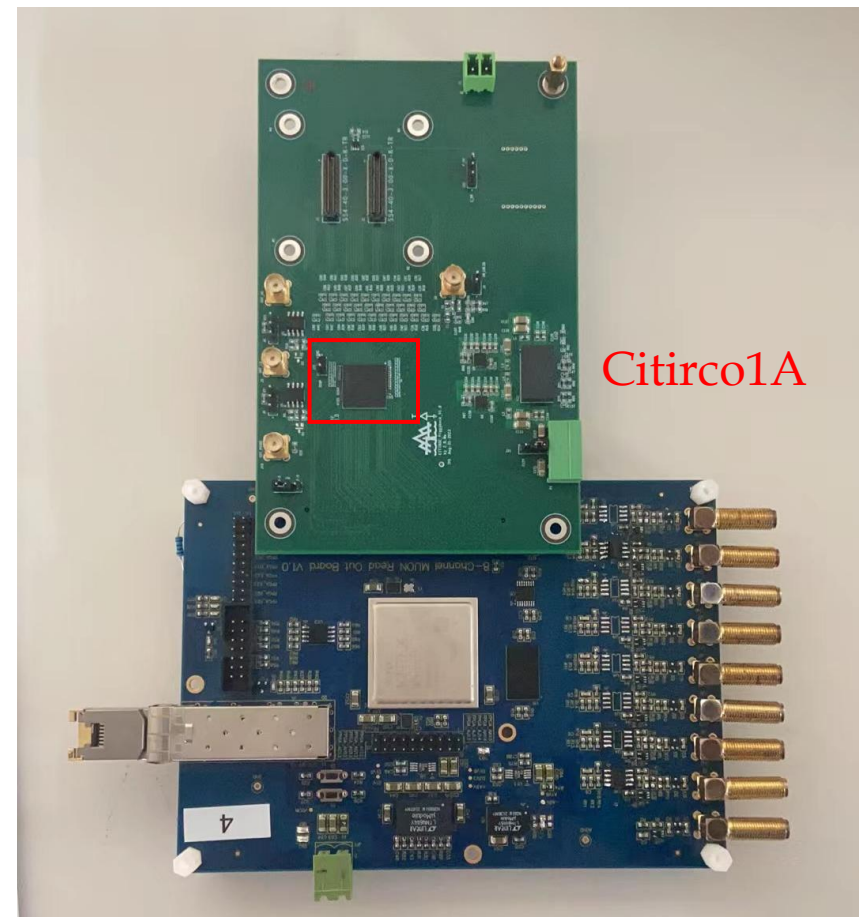
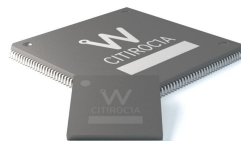
前端电子学

SiPM连接电路



Citiroc1A

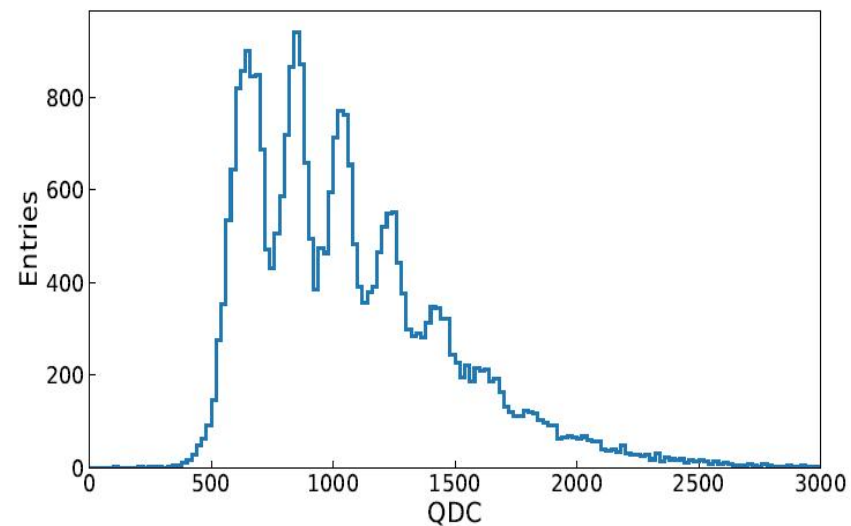
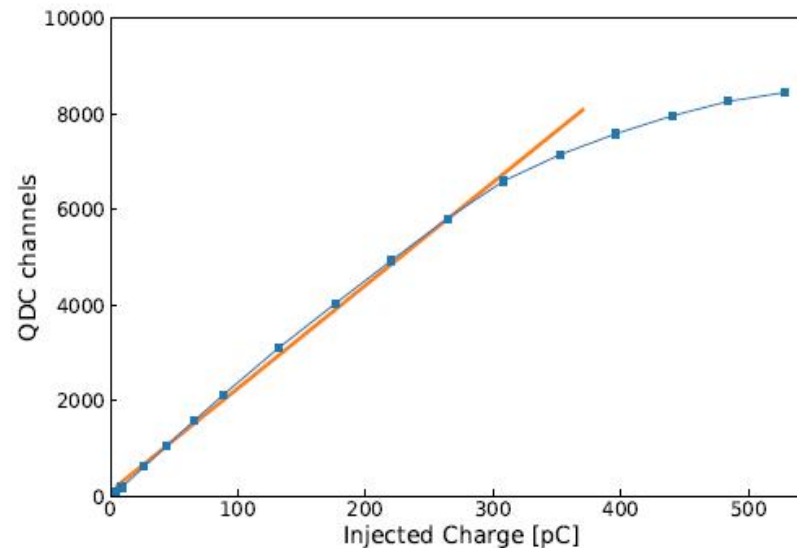
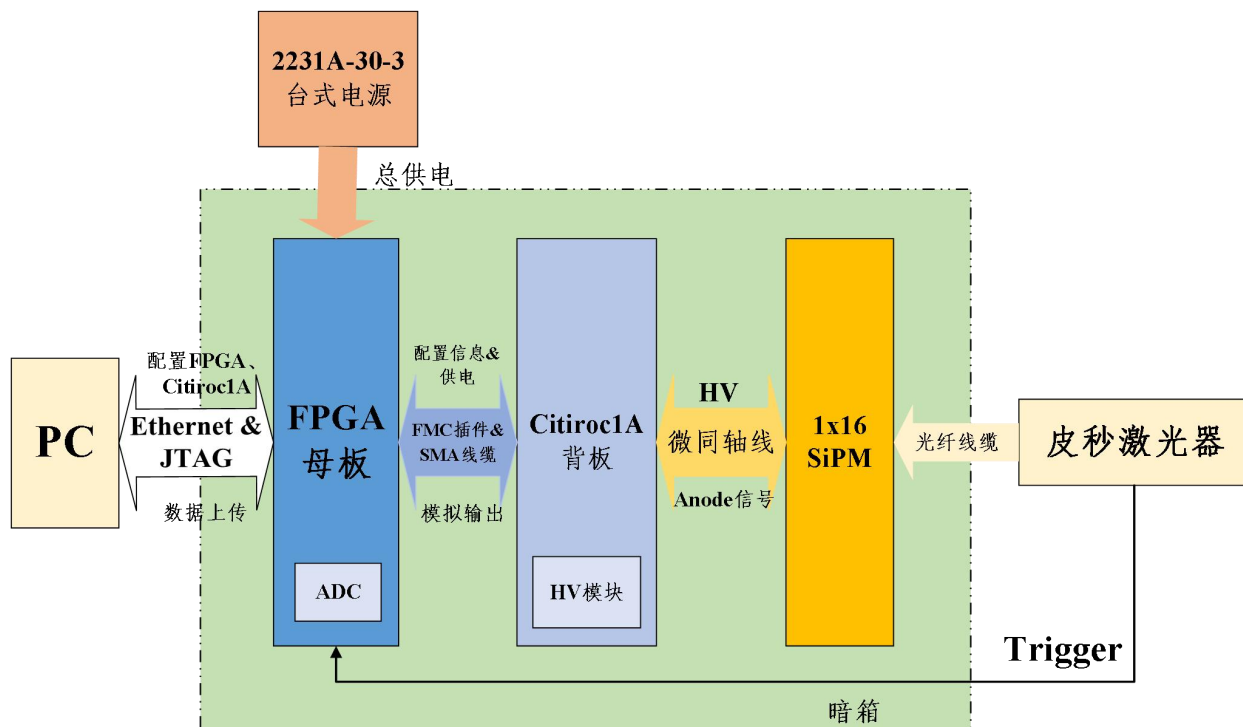
- 32 channels with HV adjustment for SiPM
- CR-RC² slow shaper with 12.5-87.5ns peaking time
- 2 multiplexed analogue charge output of HG and LG
- Dynamic range: 0-400 pC, up to 2500 pe @ 10⁶ SiPM gain



前端电子学

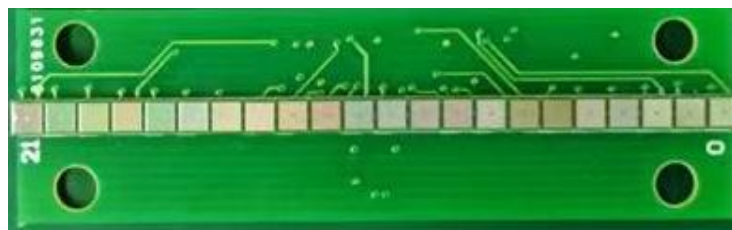
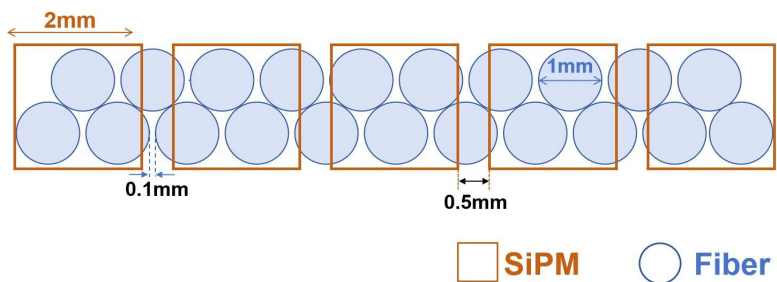
基于Citiroc1A的前端电子学板可以实现从单光子到300pC信号的大动态范围响应

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



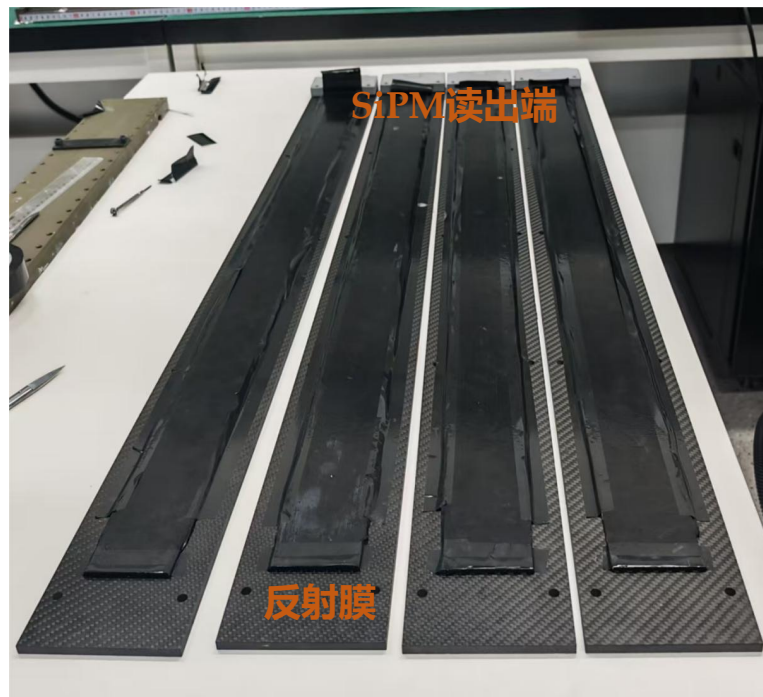
光纤模块制备

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）

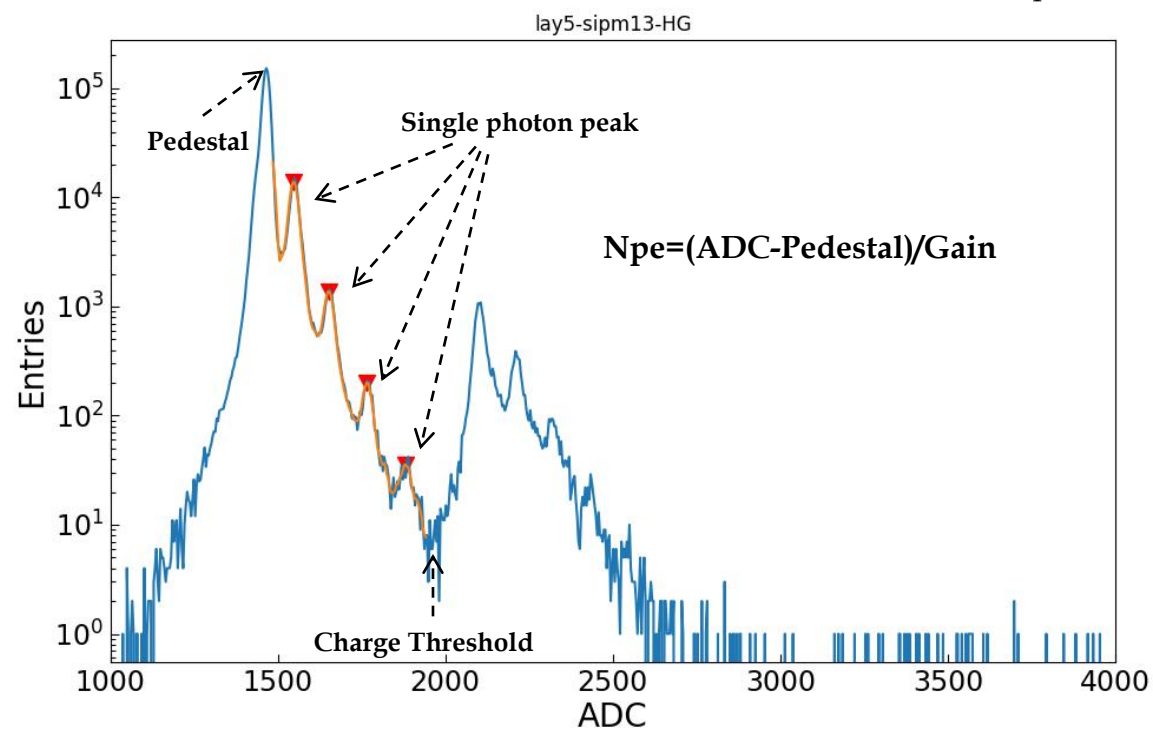


模块测试

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



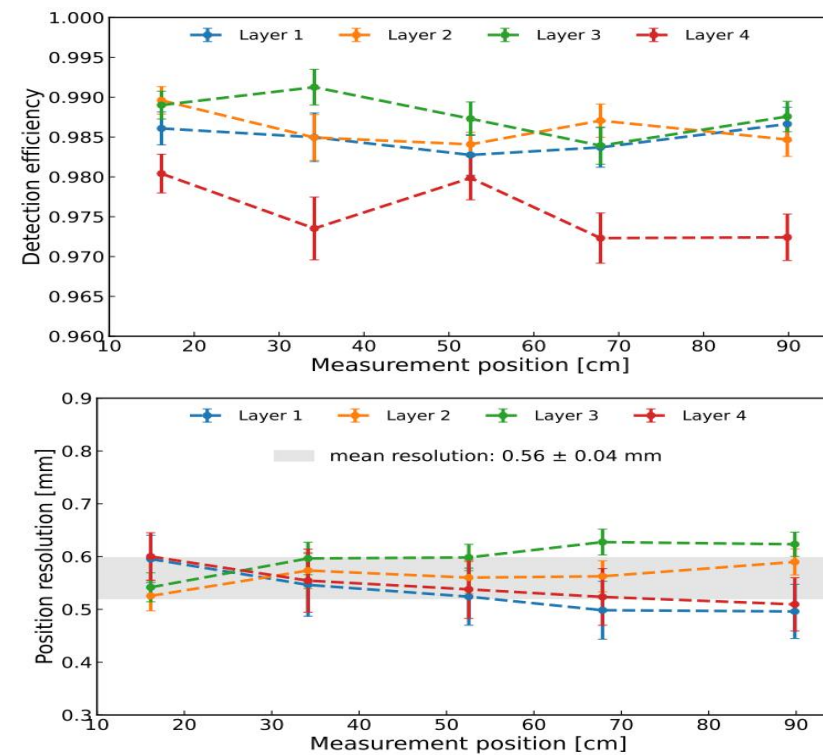
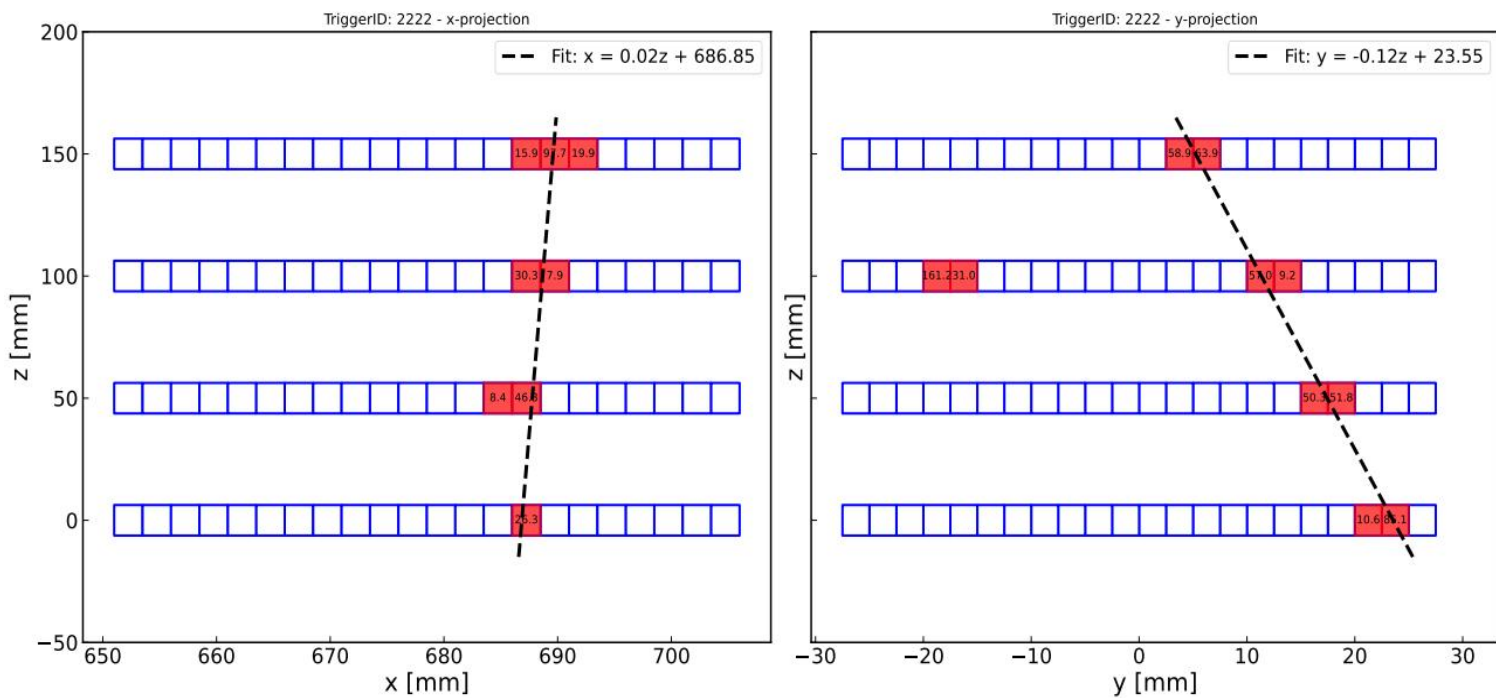
利用电荷触发模式下HG通道的ADC谱刻度增益，
进而重建每个通道信号对应的光电子数 N_{pe}



模块测试

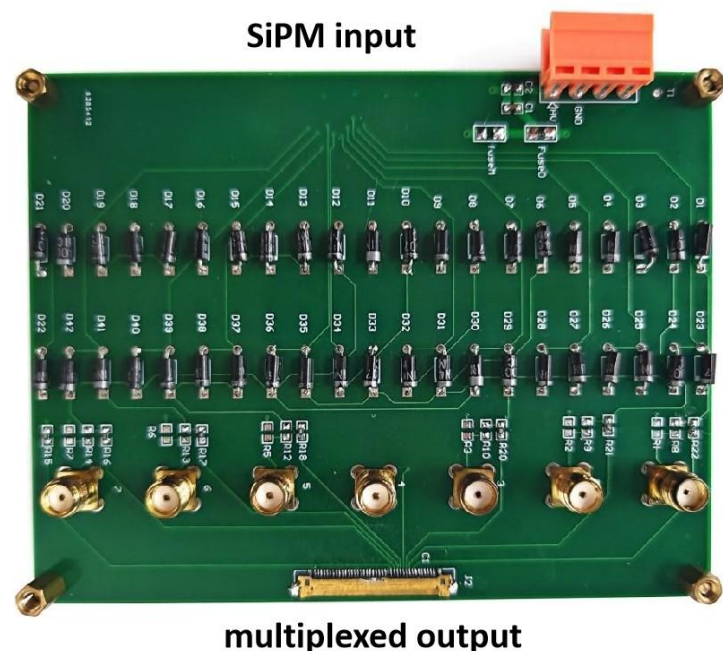
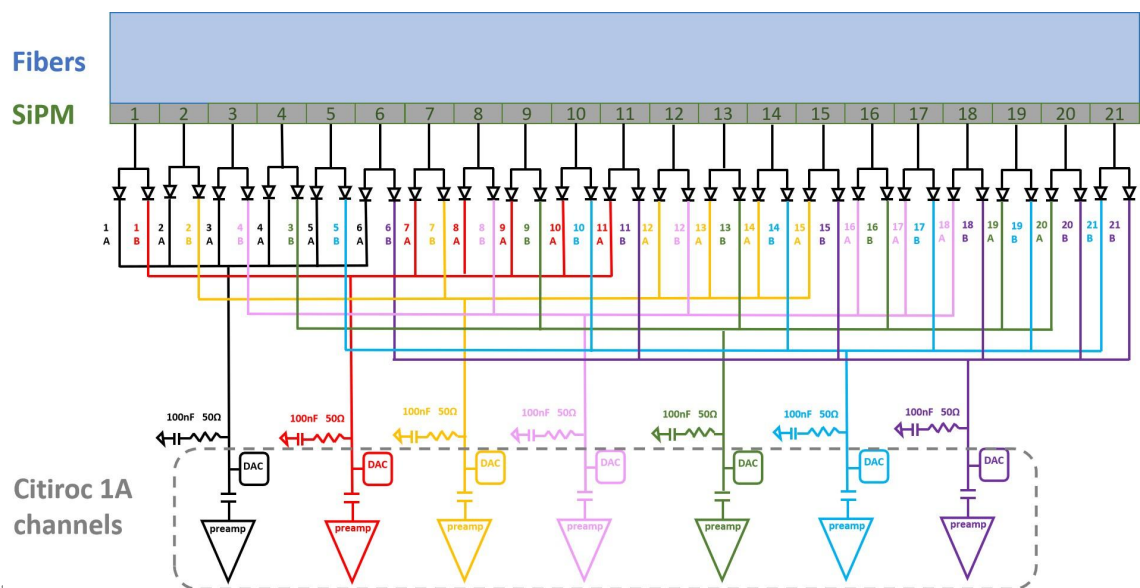
探测器准直后，利用最小二乘法重建径迹

1 m长光纤模块位置分辨约 0.56 ± 0.04 mm、
探测效率超97%，相关文章在审
([arXiv:2509.14674](https://arxiv.org/abs/2509.14674))

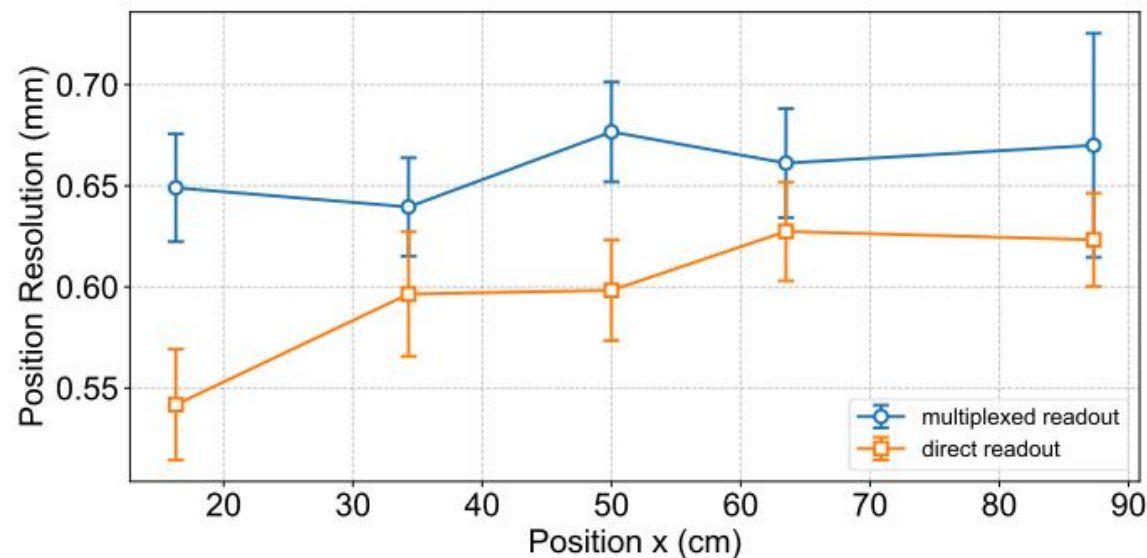
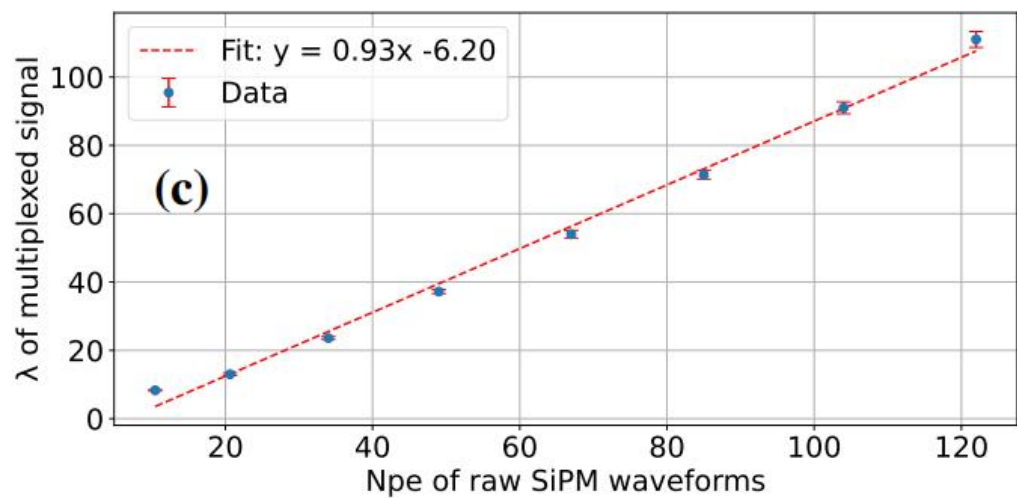
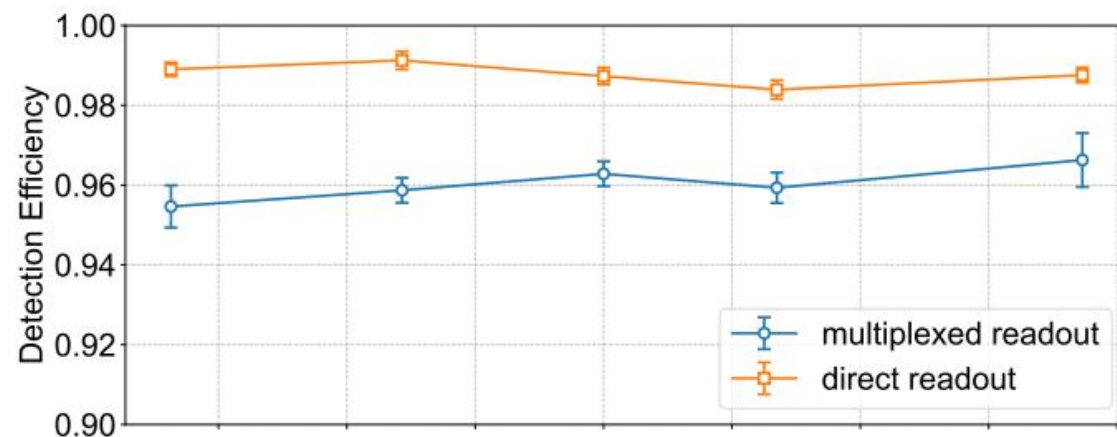
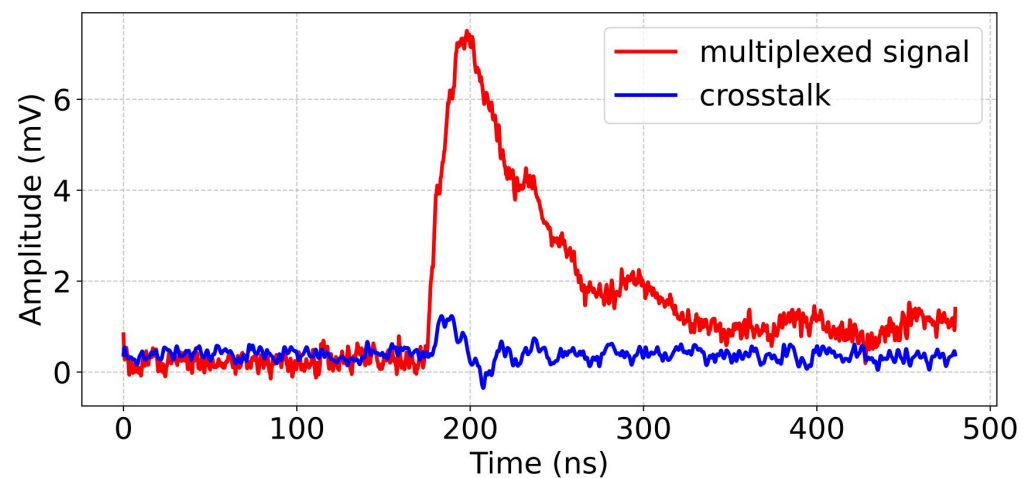


多路复用电子学

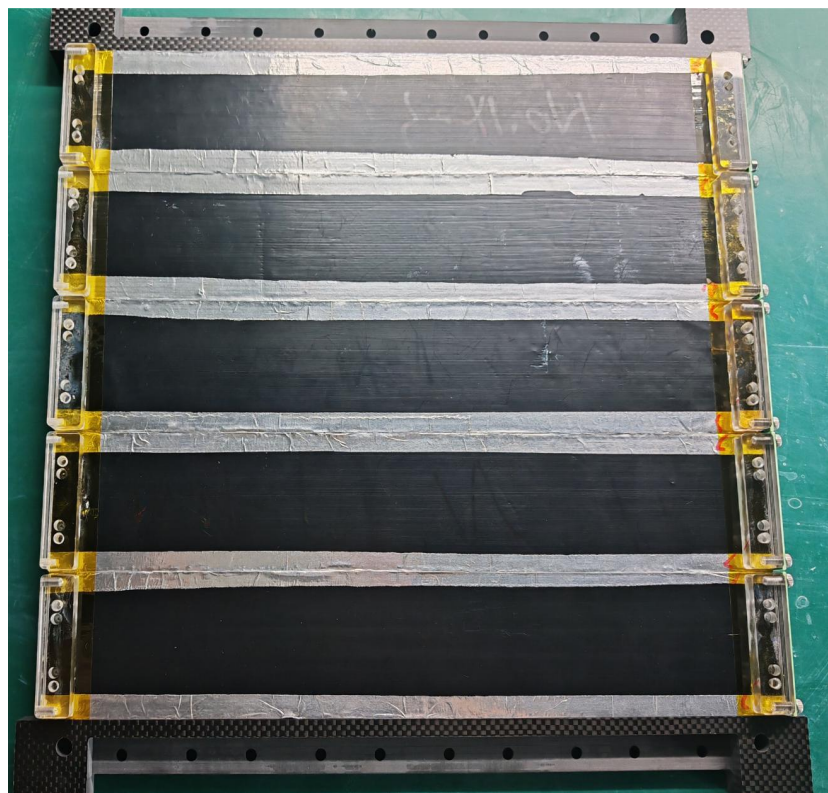
- 提出了一种基于二极管电荷分割和位置编码的多路复用策略，相关文章已接收 ([arXiv:2511.16185](https://arxiv.org/abs/2511.16185))
- 利用单个光纤模块制备了复用电子学，将21道SiPM信号压缩至7道电子学读出
- 该方法通道间串扰低、对10-122 p.e.的SiPM信号线性响应，对探测器探测效率和位置分辨影响较小
- 对含有类似一维SiPM阵列读出的闪烁探测器具有普适性



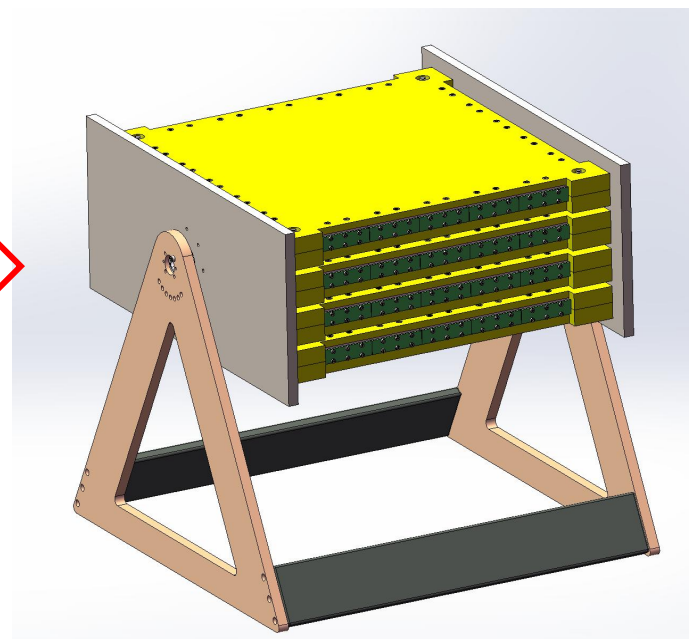
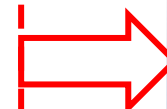
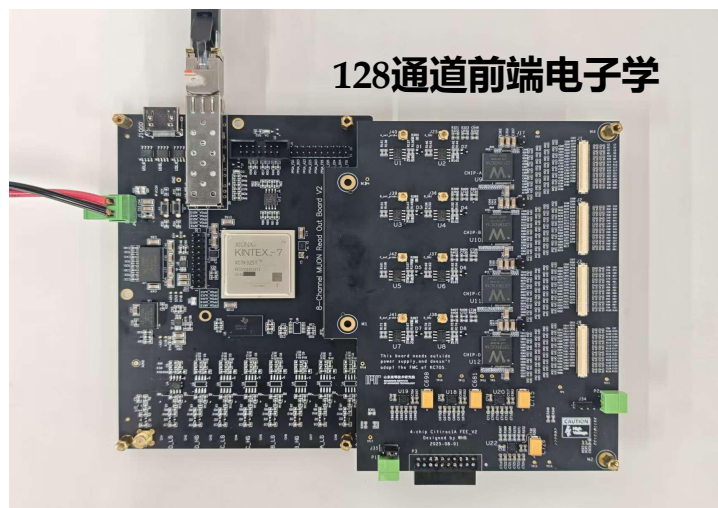
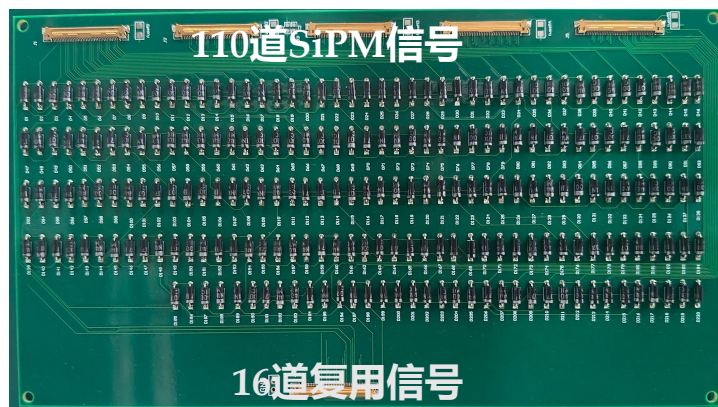
多路复用电子学



成像探测器系统

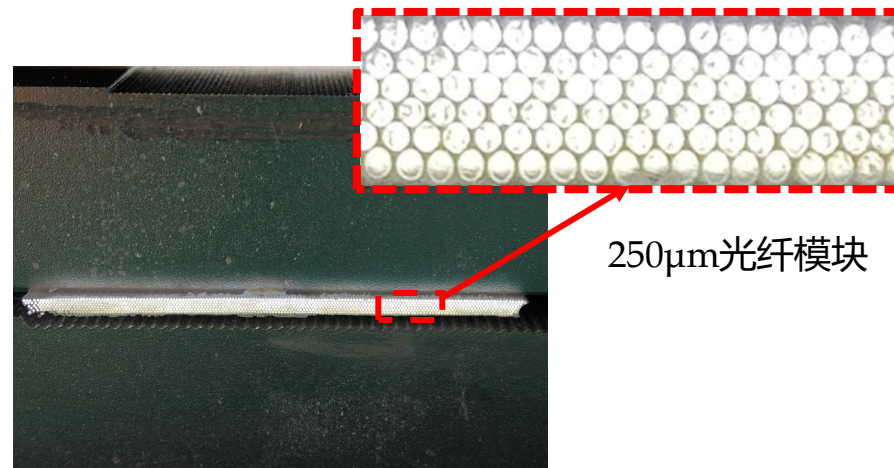
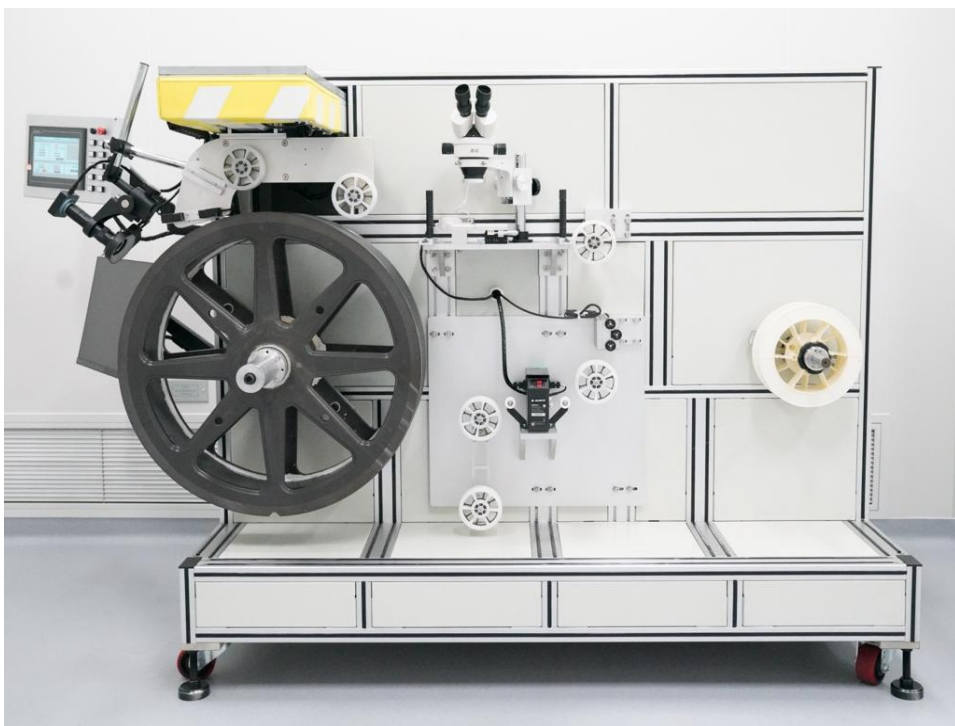


25cm×25cm XY探测层



高精度塑闪光纤探测器

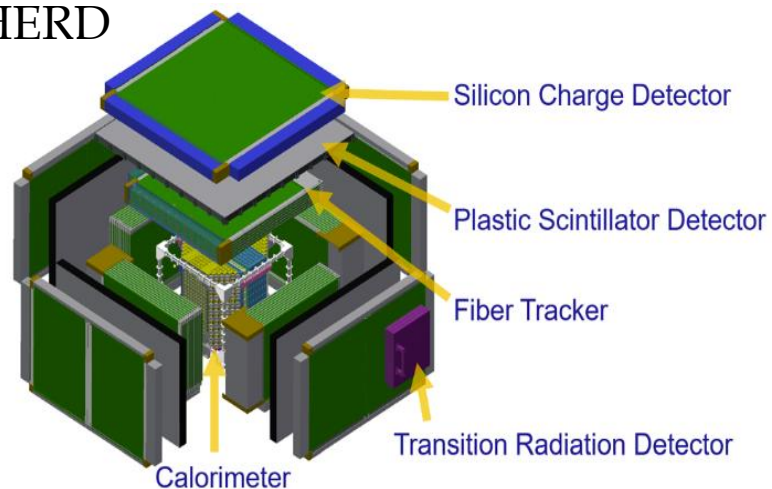
- 塑料闪烁光纤探测器位置分辨正比与光纤直径，现有最细双包层光纤产品直径为 $250\mu\text{m}$
- 高位置分辨的光纤探测器的研制需要对细径光纤实现精准排布
- 针对于 $<0.5\text{mm}$ 直径的光纤，联合厂家研制了绕线机设备，可实现 $250\mu\text{m}$ 以及更细光纤的排布



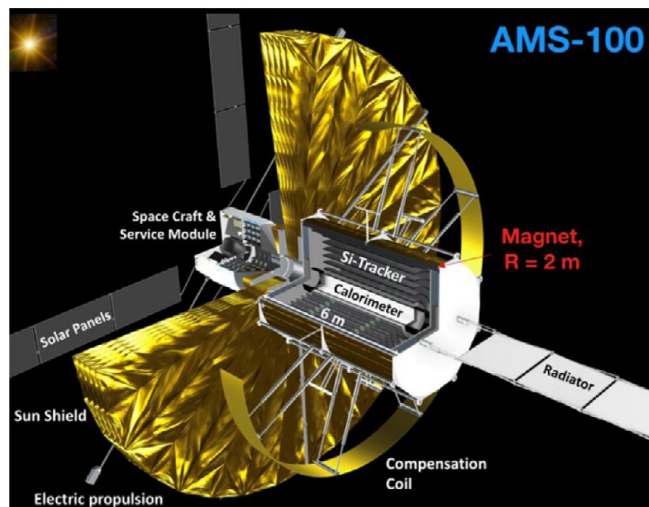
粒子探测实验

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，可用于地面和空间带电粒子探测。

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



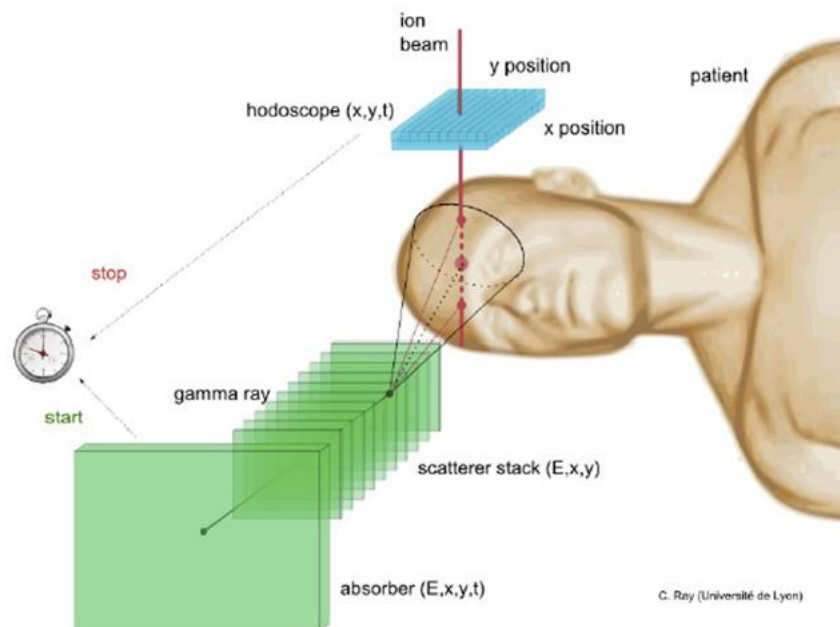
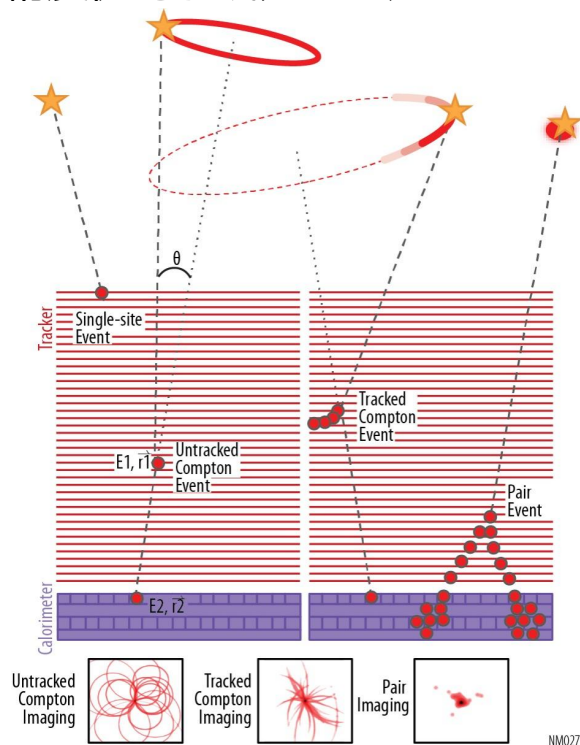
12层 $\text{\O}125\mu\text{m}$ 光纤交叠排布，以实现 $13\mu\text{m}$ 的高位置分辨率



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

MeV伽马射线探测器

- 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康普顿散射反冲电子径迹，从而实现高精度伽马射线方向重建



谢谢大家!