



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

基于闪烁光纤的高位置分辨粒子探测器 的研制与国产化方案

刘栋，刘亚楠，赵文萍，王博，李莎，胡坤，冯存峰

山东大学
2026年7月16日

2026年7月广州-中国物理学会高能物理分会第十二届全国会员代表大会暨学术年会

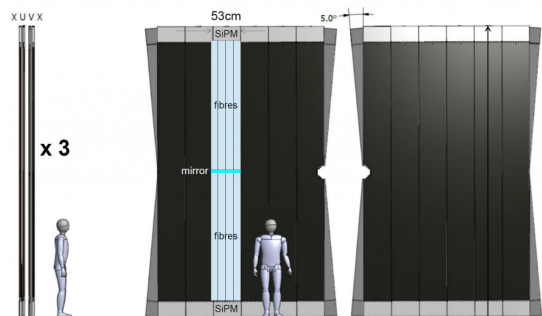
Outline



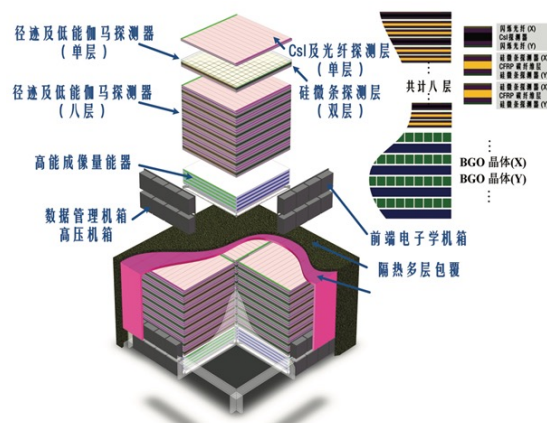
- 1 研究背景&目的
- 2 基于SiPM的逐路读出方案
 - 结构、各组成部分、整体性能测试
- 3 基于PMT编码读出的大面积方案
- 4 其他闪烁光纤探测器
- 5 主要部件国产化
- 6 小结

1 研究背景

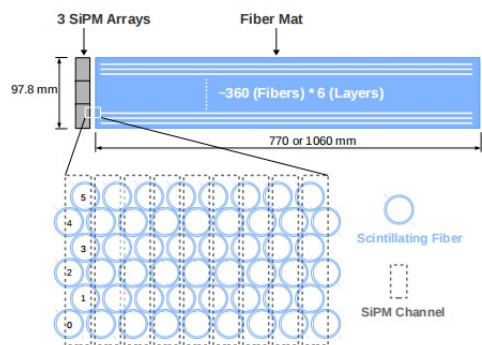
高能物理实验



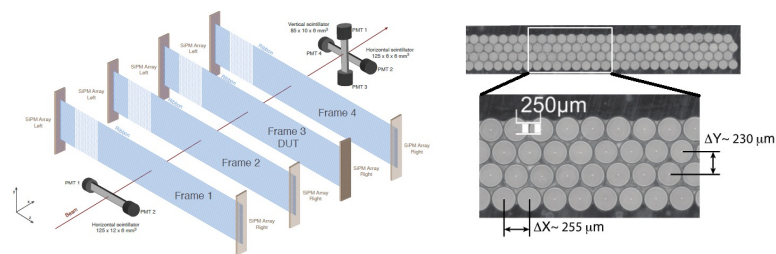
LHCb SciFi Tracker



VLAST



HERD的光纤径迹仪（旧计划）

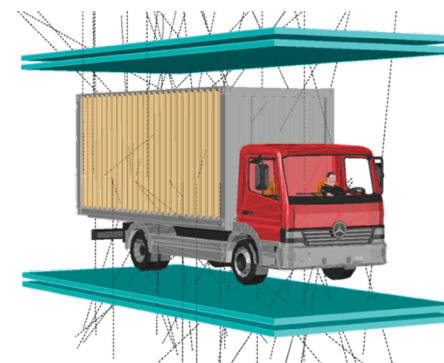


Mu3e 实验的闪烁光纤探测器

缪子成像

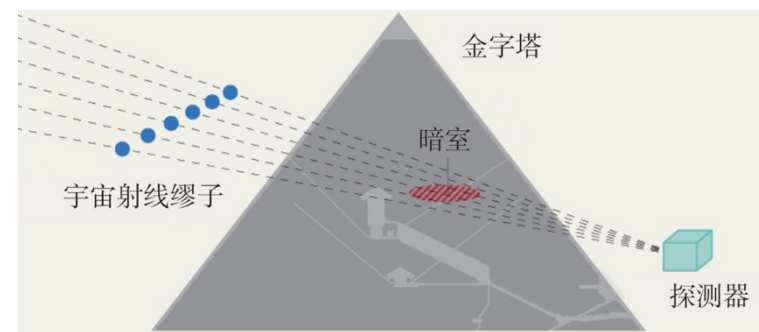
□ 散射成像：

高Z物质、海关、核材料反应堆等；



□ 透射成像

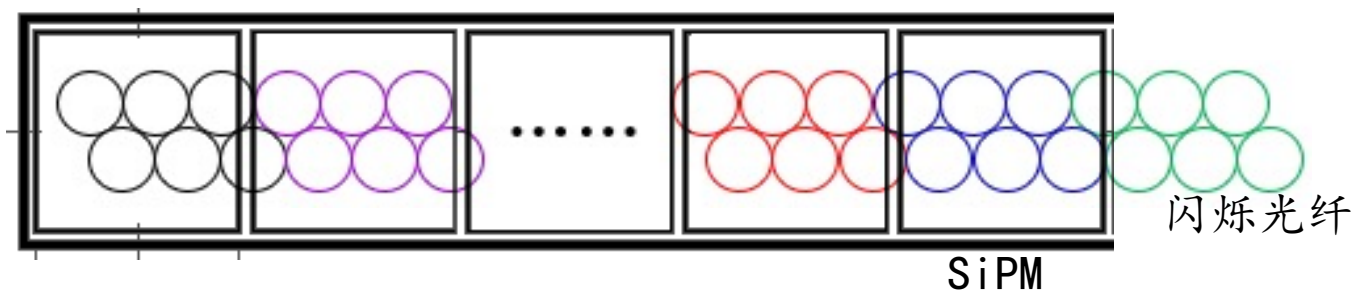
科技考古（金字塔）、火山、隧道、矿藏勘探等；



2基于SiPM的逐路读出方案

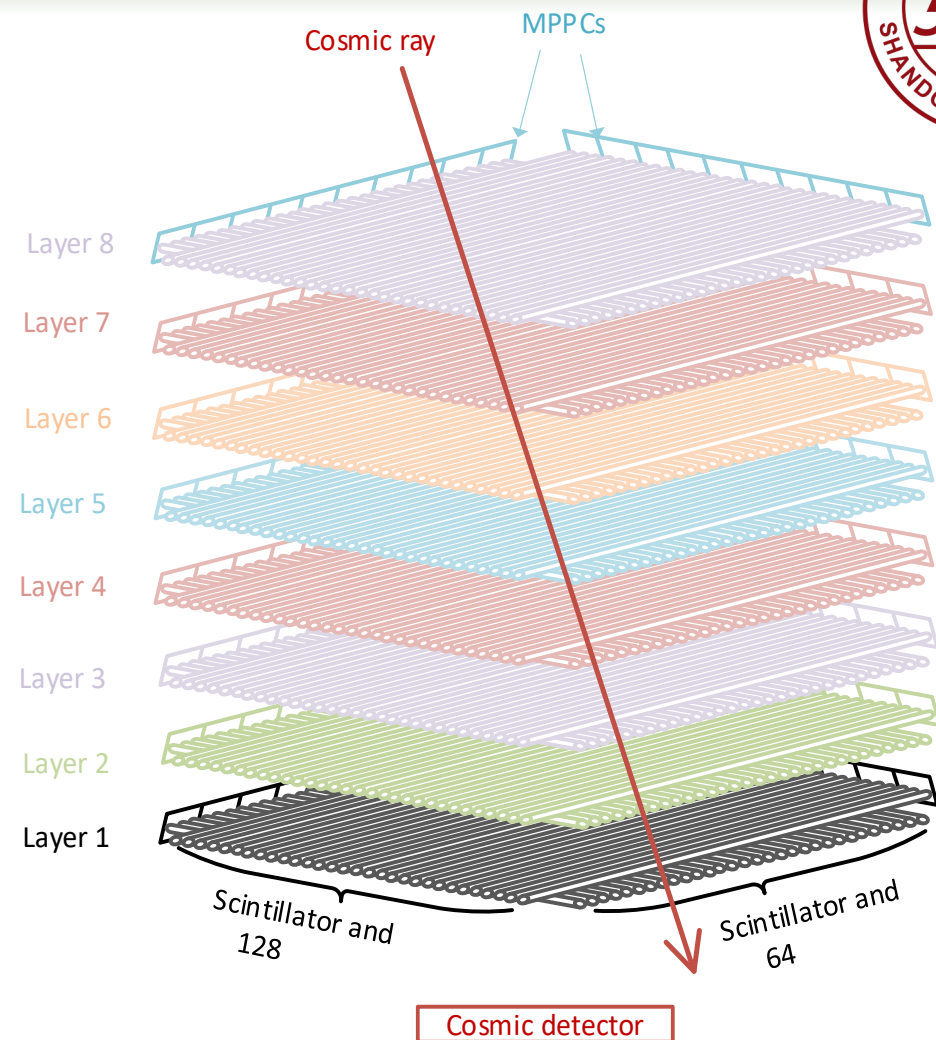
□几何设置:

- 八层单元探测器摞放
- 单层探测器同时得到x和y坐标;
 - 闪烁光纤直径1mm
 - 双层光纤垫 40cm x 20cm, xy正交摆放
 - 闪烁光纤端面硅脂耦合 $3 * 3\text{mm}^2$ 的SiPM阵列

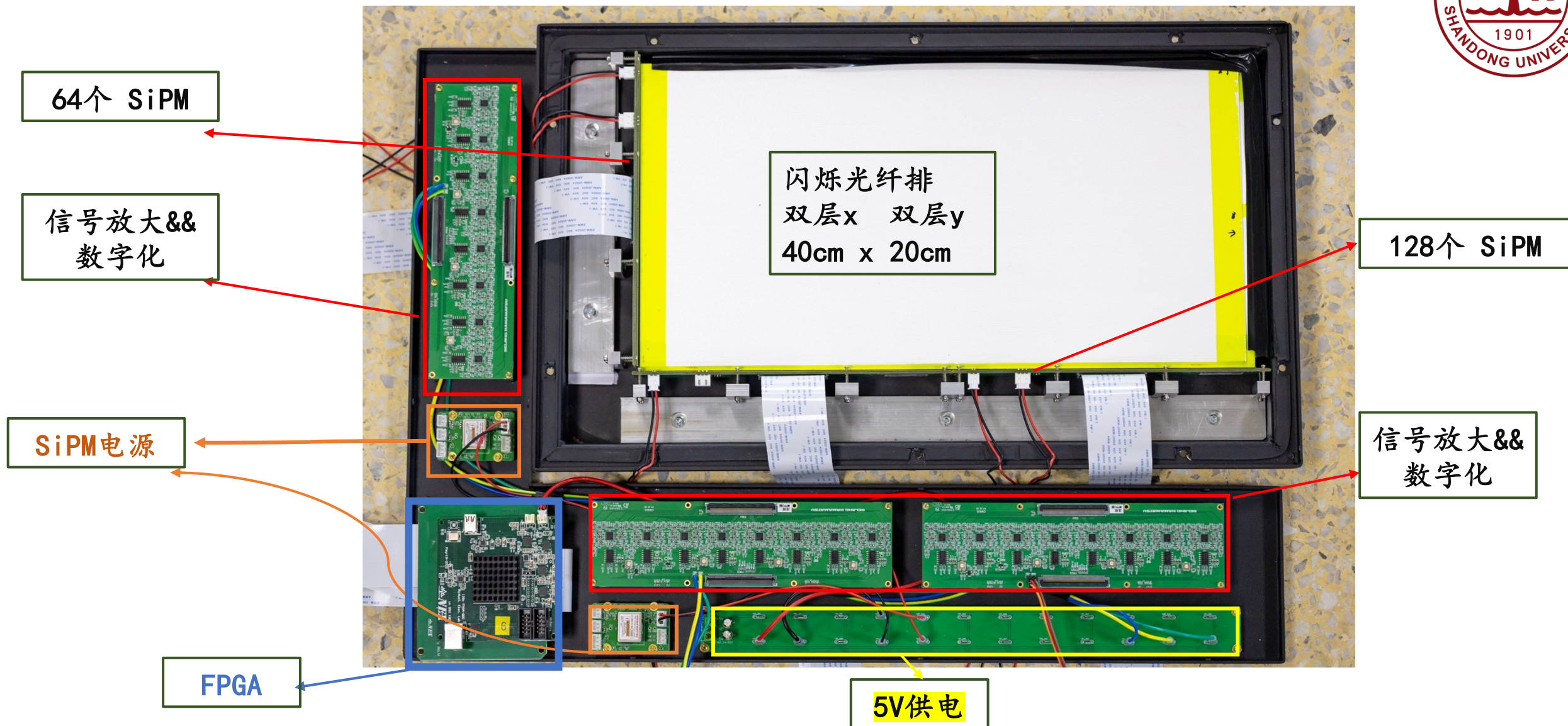


□信号读出方案

- 每层192个通道: 128通道x + 64通道y
- 单层探测器的192路信号连接到1个FPGA;
- 8层*192路的信号汇总到开发板读出
- SiPM的编号确定击中位置

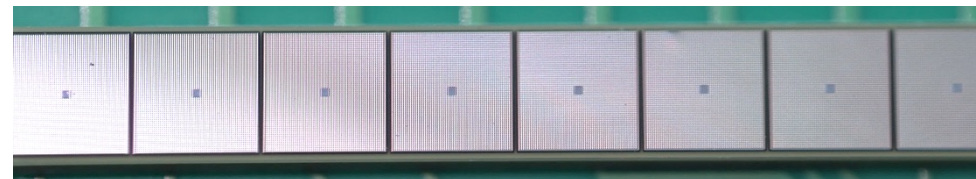


2.1 单层探测器实物图



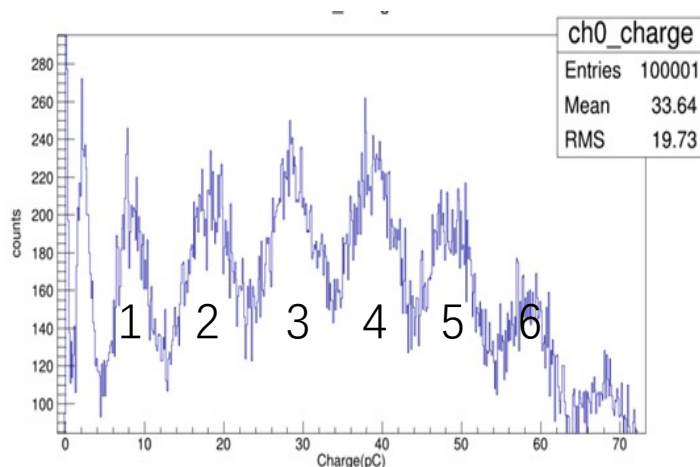
2.2 闪烁光纤探测器SiPM

➤ SiPM: 滨松S13363-3050NE-16

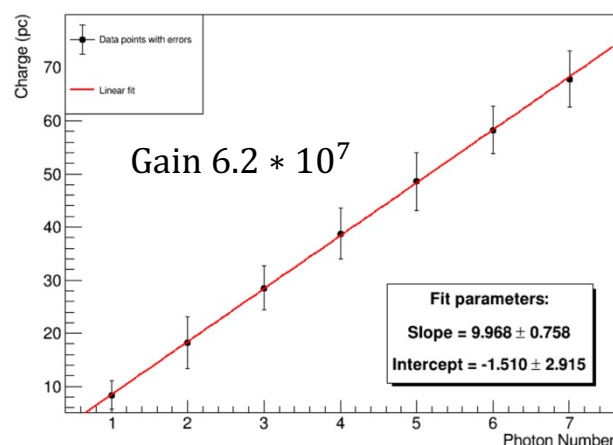


局部放大

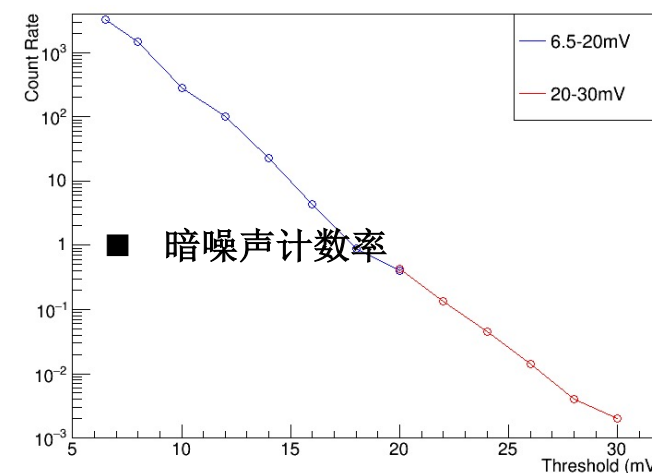
单块电路板: 4片S13363-3050NE-16 = 64通道 ~ 20cm
每层需要3块电路板 = 2块x+1块y



■ SiPM的光子峰 (LED照射)



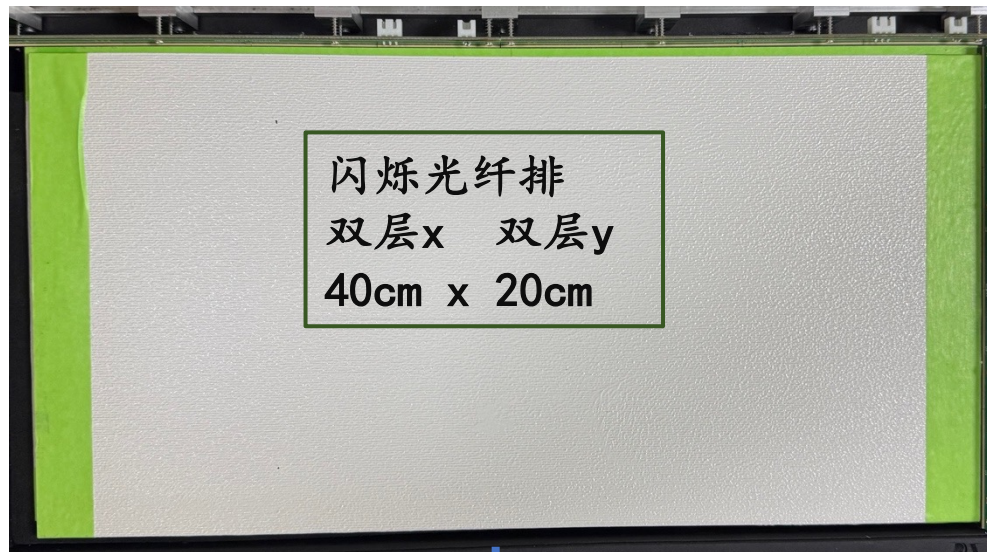
■ SiPM电荷量随入射光子数的分布



- 经测试, SiPM的增益一致性较好, 均具备单光子分辨能力
- 64 /128 个SiPM共享高压电源 阈值6光子

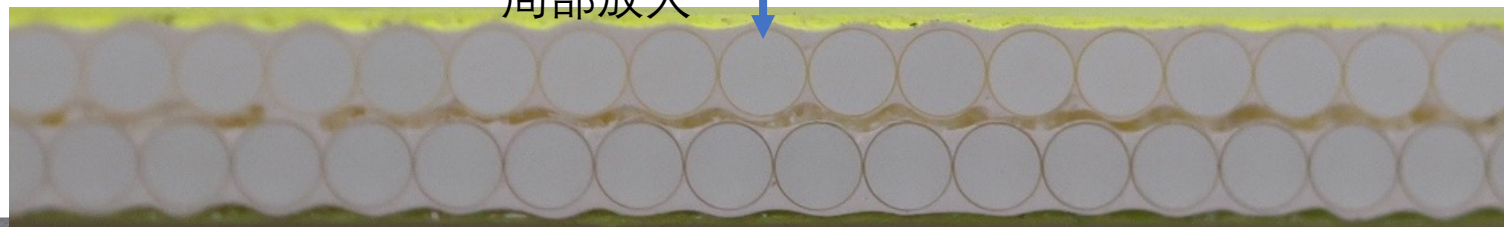
2.2 闪烁光纤探测器各组分

闪烁光纤垫

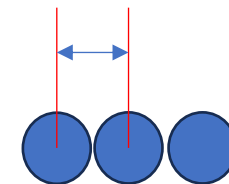
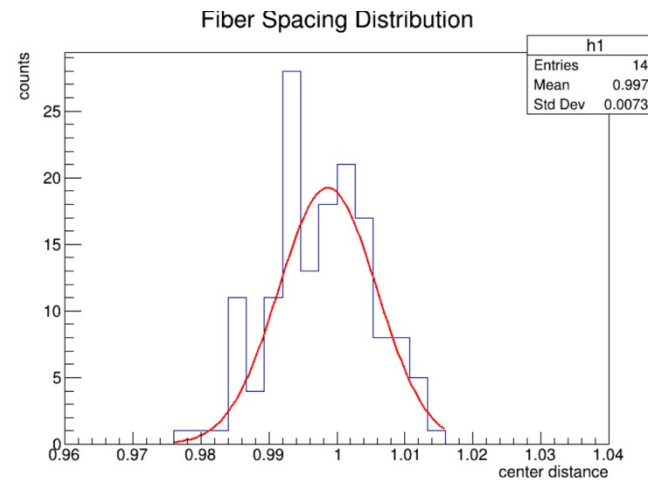


双层侧面

局部放大



➤ 光栅尺测量光纤中心间距

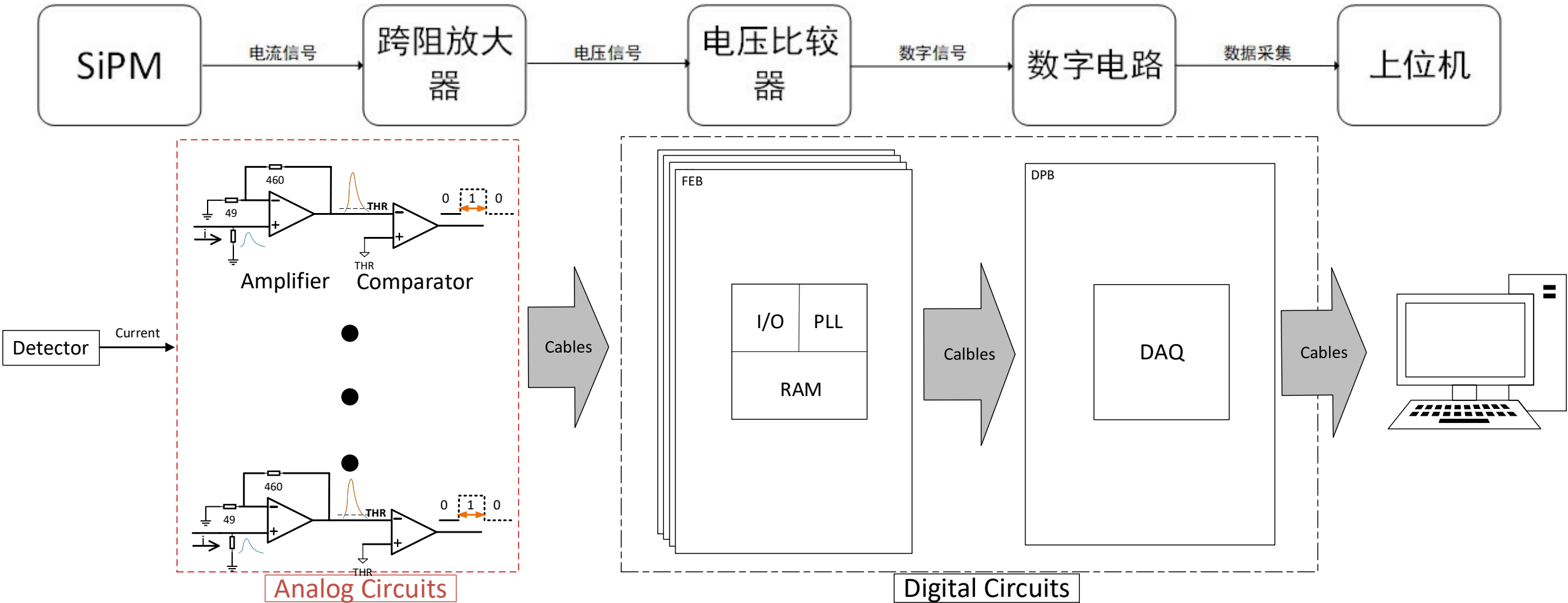


➤ 光纤的中心间距1mm

2.2 闪烁光纤探测器各组分

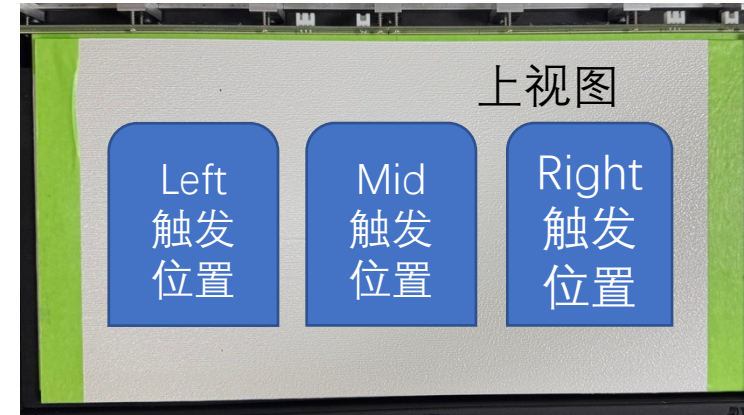
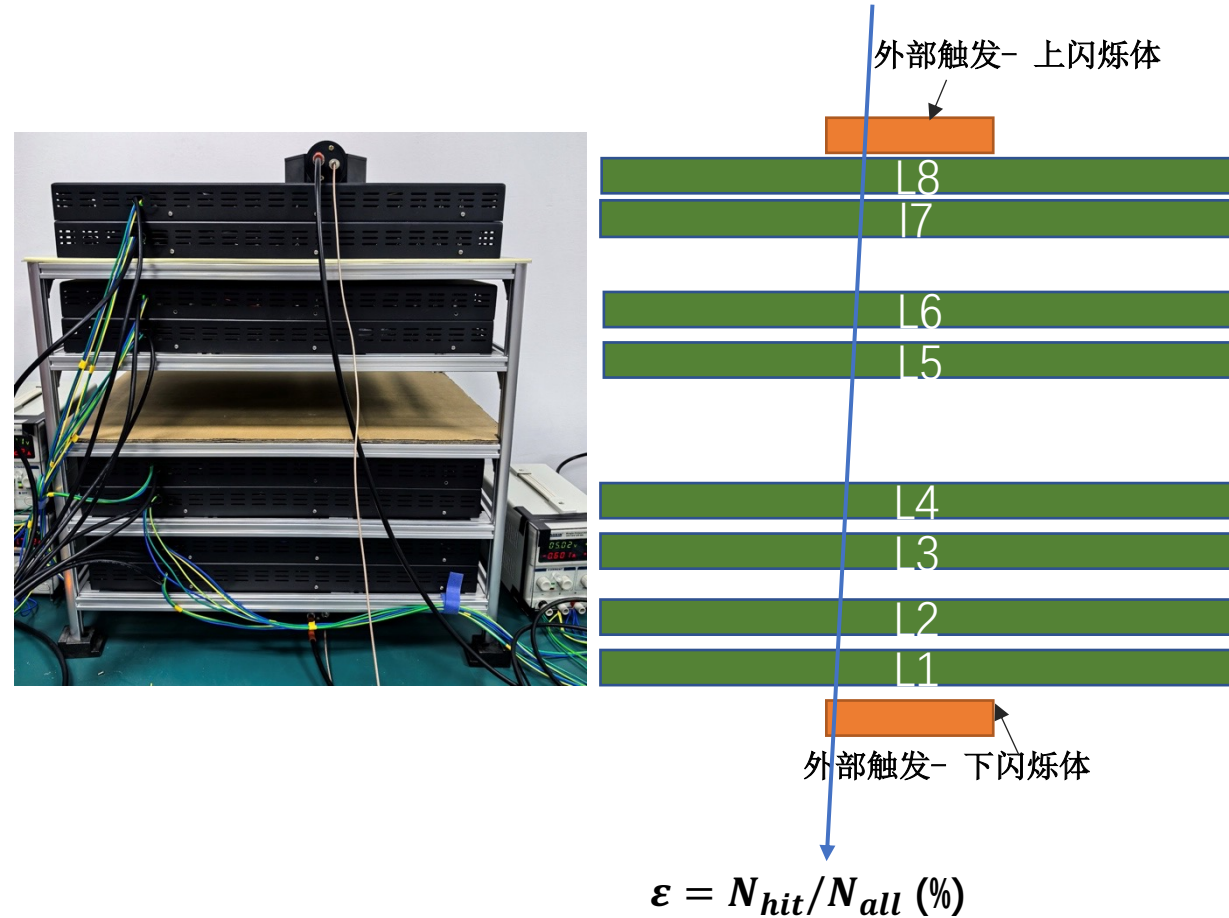
□ 信号采集过程

记录过阈的时间宽度TOT (Time Over Threshold)



2.3 性能测试-探测效率

➤ 外部触发模式下位置响应分布

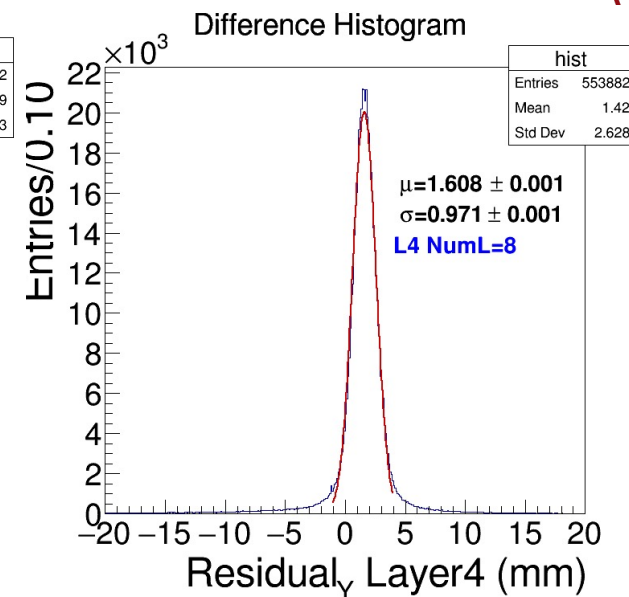
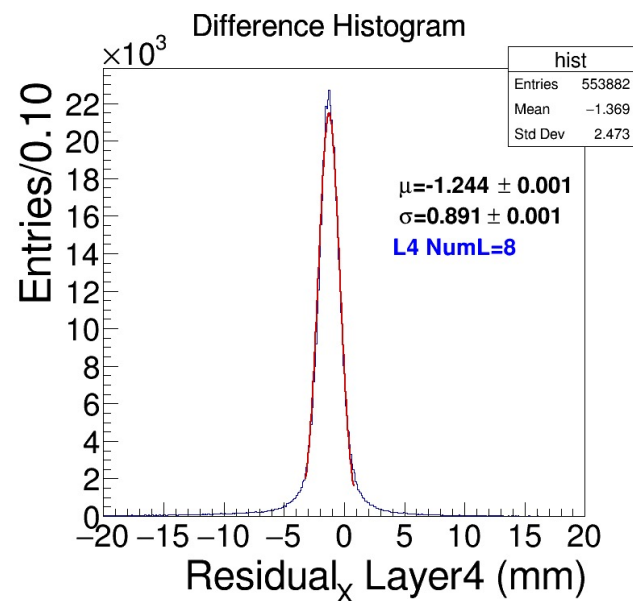
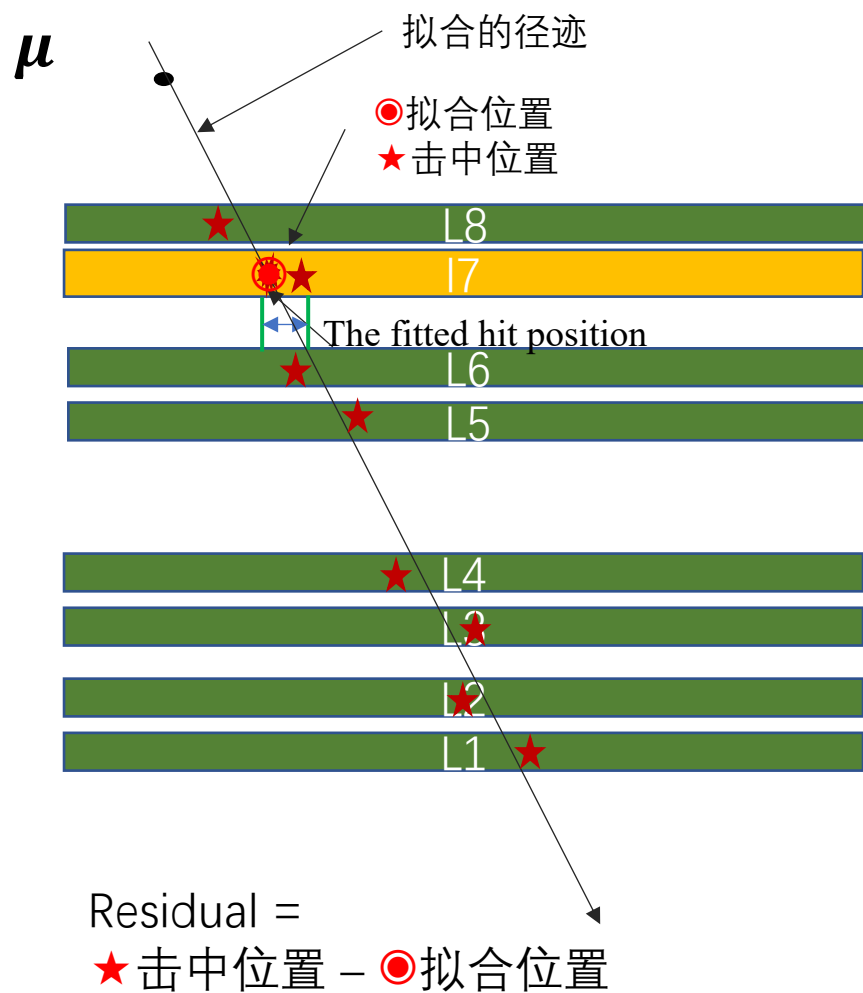


■ 在不同外部触发位置下，单元探测器中SiPM响应情况分布

效率%	8层总体	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8
Right	80.9	98.3	98.0	92.8	97.2	94.5	96.9	98.1	97.1
Mid	79.5	98.3	98.1	92.4	96.2	94.6	95.0	97.8	98.5
Left	82.3	97.6	97.5	94.0	96.3	96.4	96.8	97.2	98.3

- 单元探测器的探测效率92% – 98%;
- 8层总体探测效率~80%
- *少数通道工作不正常

2.3 性能测试-位置分辨



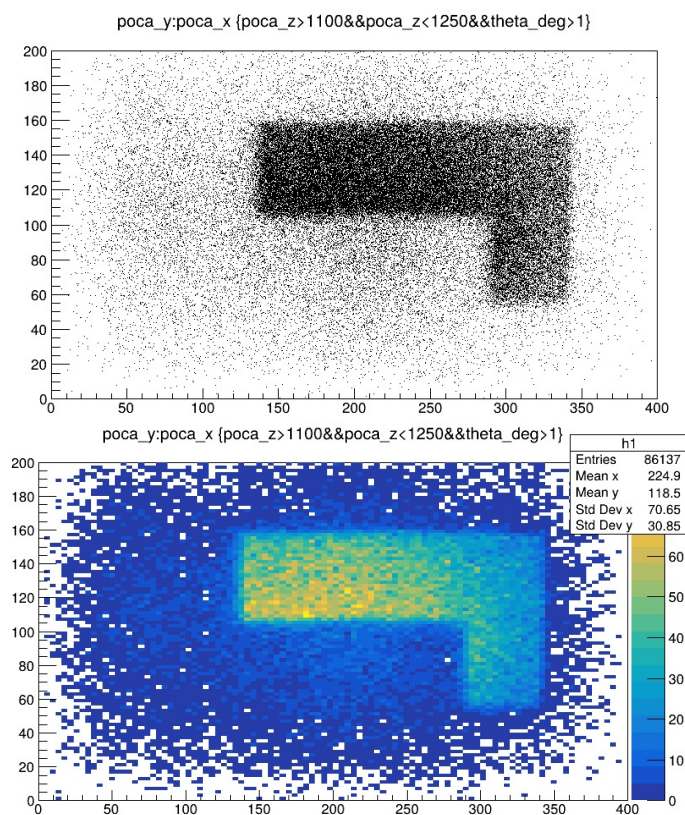
■ 每层击中位置的残差分布(以layer4为例)

- σ 单元探测器位置分辨 $\sim 1\text{mm}$ 。
- μ 单元探测器的位置偏移

2.3 散射成像



铅块照片

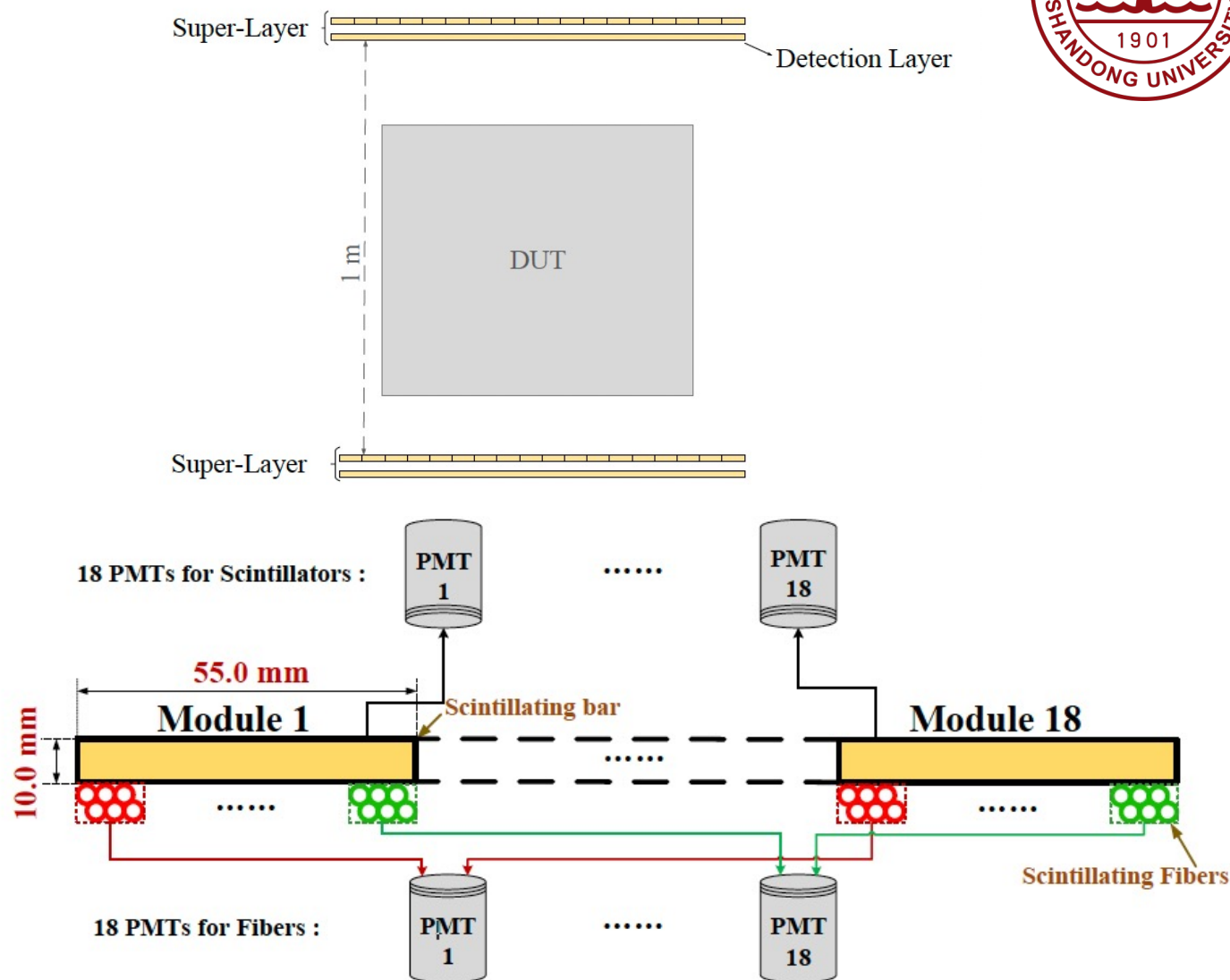


铅块成像：
PoCA点分布



3 基于PMT编码读出的大面积方案

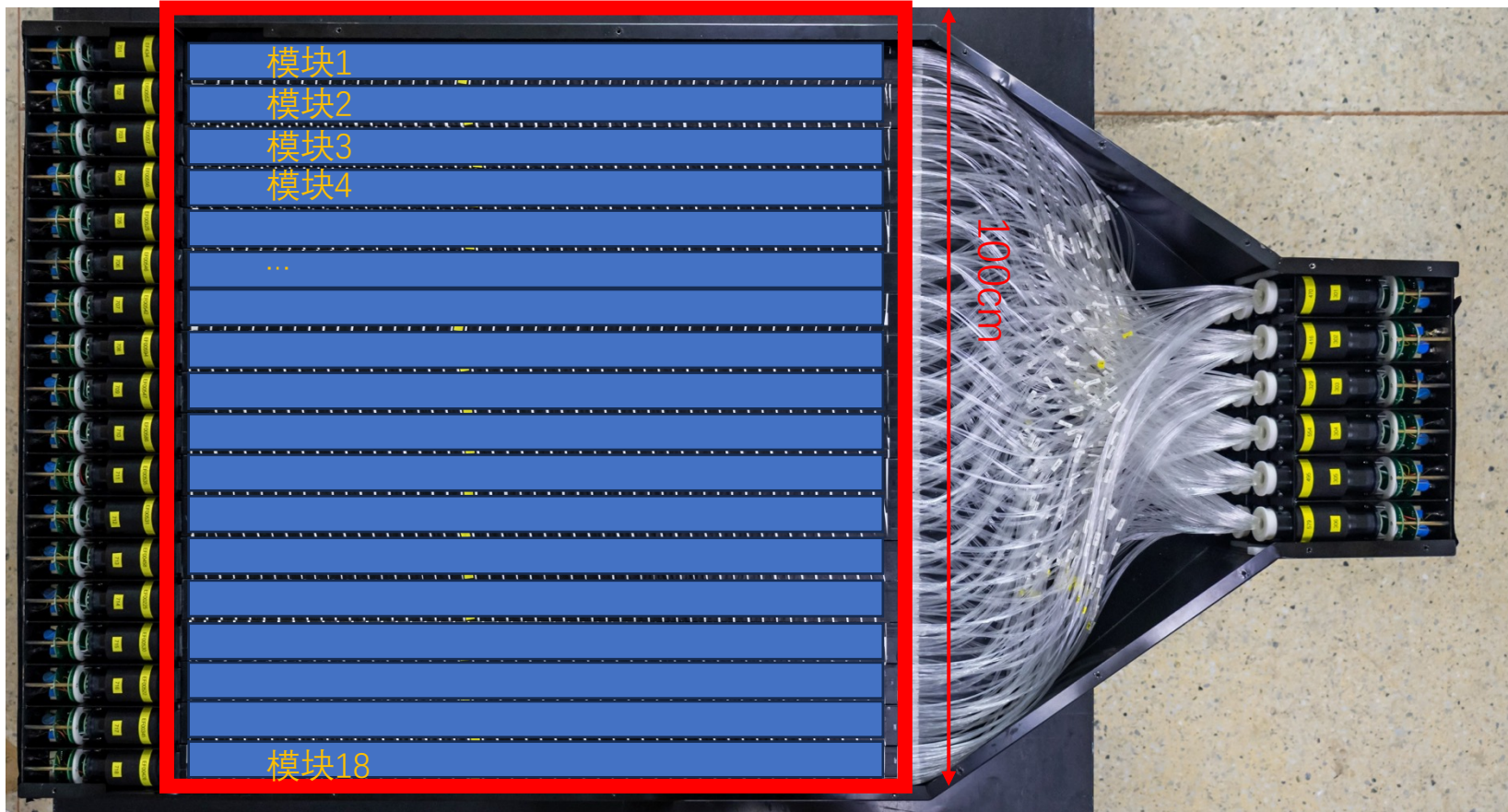
- 100cm*100cm 单方向探测 4层 (xy-xy)
 - 闪烁光纤编码读出
 - 单层探测器：18个模块平行排列构成 1 m²
 - 信号读出：总计144道，每x或者y36道
 - ✓ 每个模块中的闪烁体通过单独的PMT读出；
 - ✓ 光纤垫中的光纤分组编号[1-18]，单层中各个模块的相同编号的光纤组连接同一个PMT；
- 闪烁体长条发光进行粗定位，对应的闪烁光纤组精细定位；
- 两个正交单层构成大层，上下两个大层相距1m
- 组成描述仪；



3.1 大面积方案单层解构

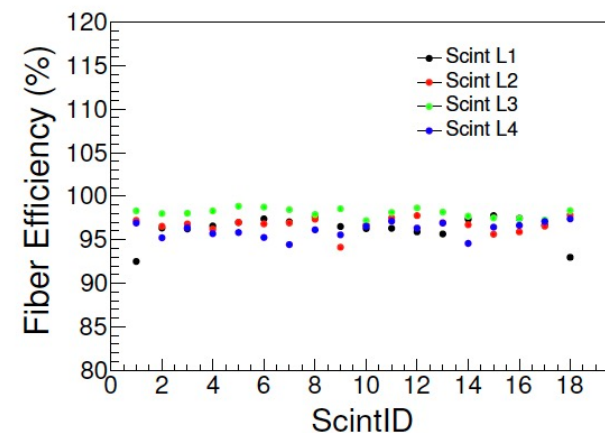
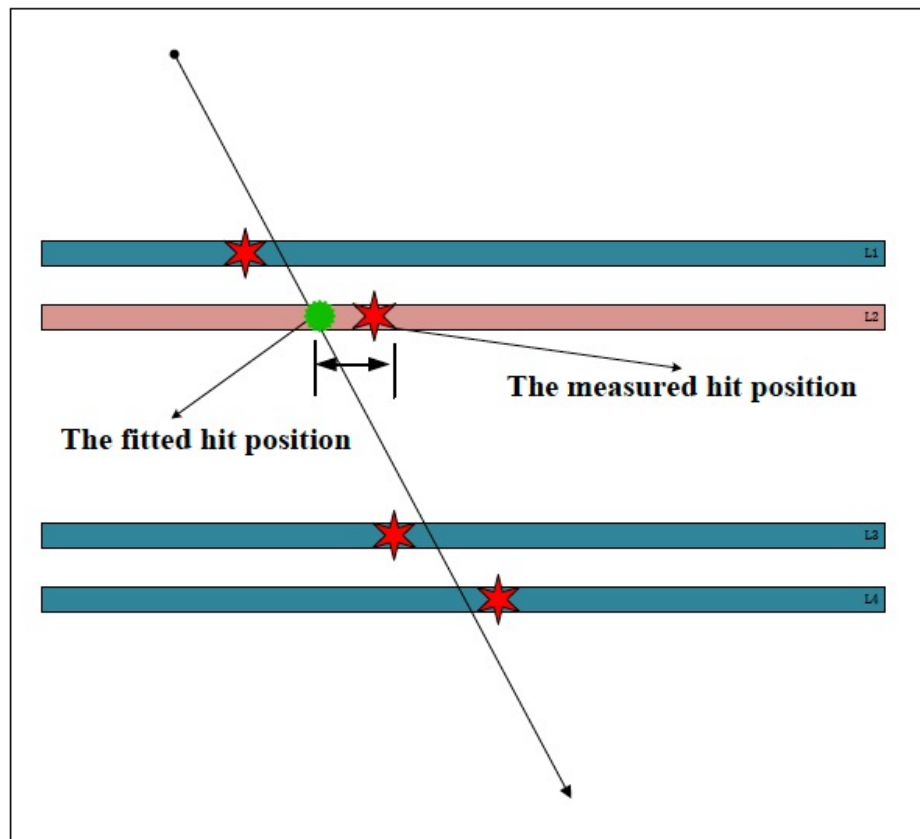
单层36路，测量x或y

100cm

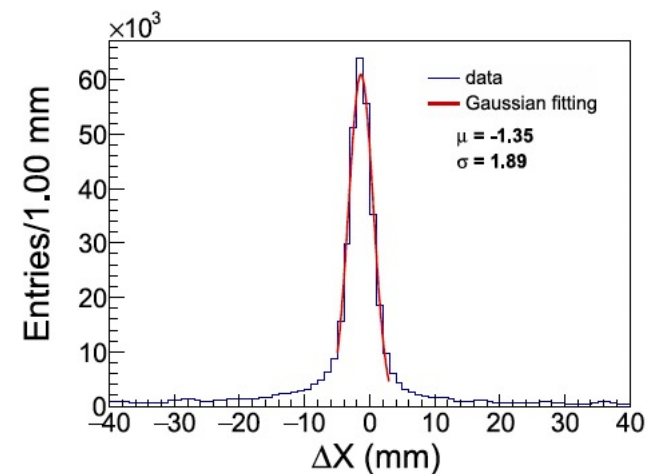


3.2 基于PMT的大面积方案- 探测效率和位置分辨测试

4层平行摆放，测试位置分辨率



单层光纤的探测效率 ~96%

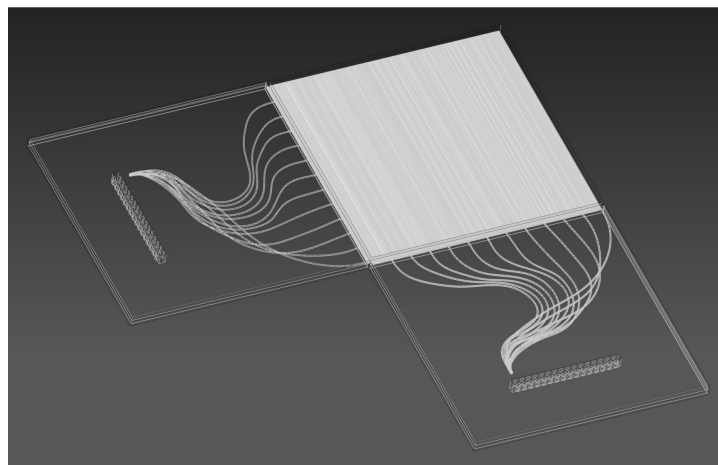


位置分辨 ~1.4mm

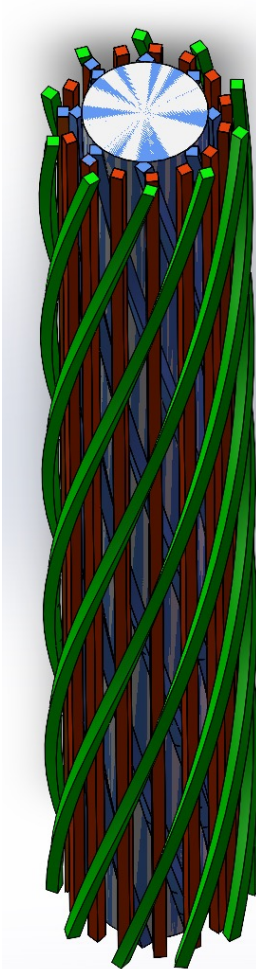
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2026.171658>, May 2026

4 其他已有闪烁光纤探测器成品

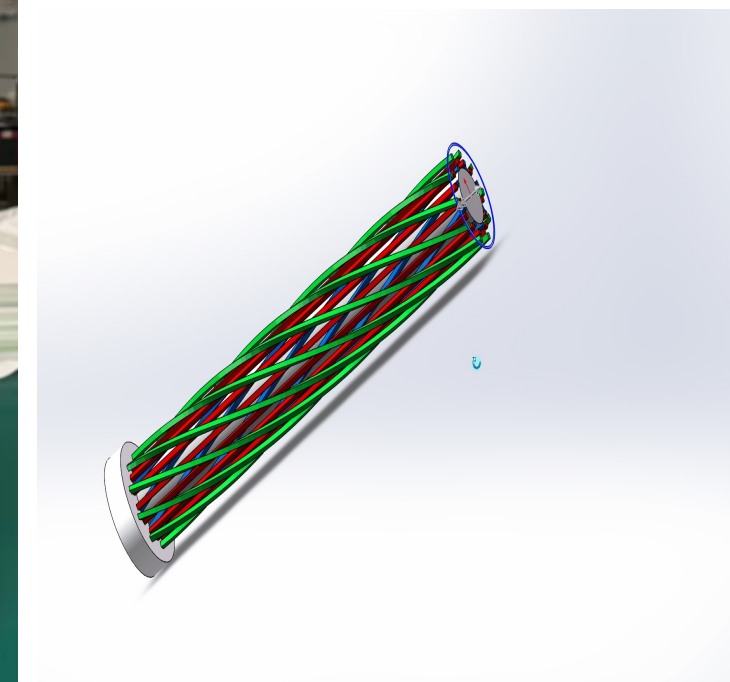
用于质子治疗束流监测



钻井探矿缪子探测器
(直径10cm 长60cm)

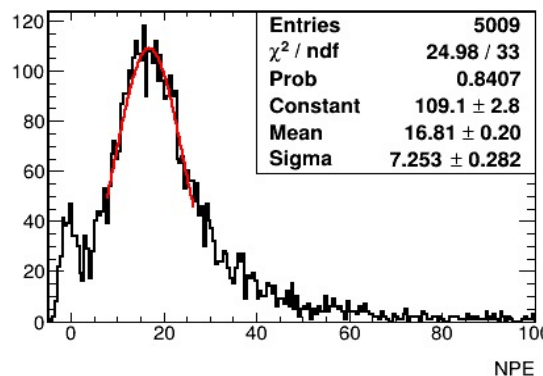
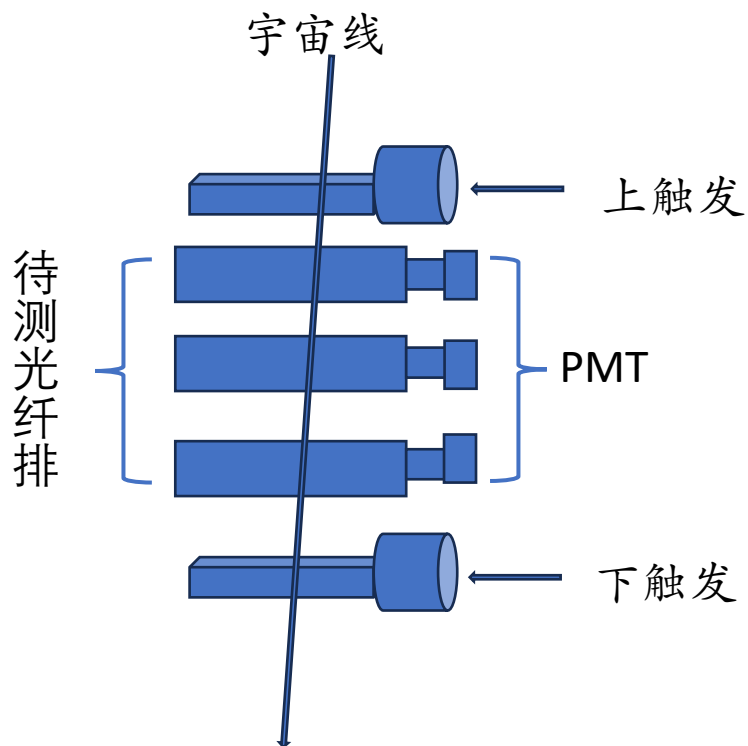


样品局部图

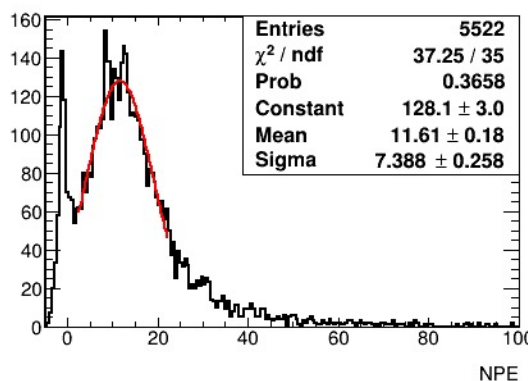


5 国产闪烁光纤

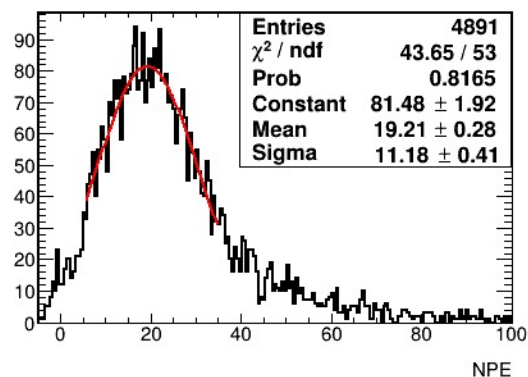
安徽大学生产闪烁光纤
用PMT测试宇宙线穿过光纤排光产额



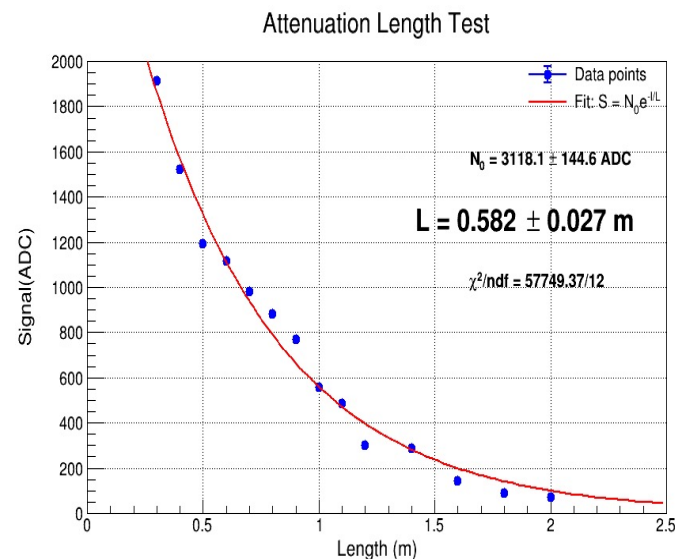
单层
kuraray SCSF78
NPE 16.8



单层
国产
NPE 11.6



双层
国产
NPE 19.2

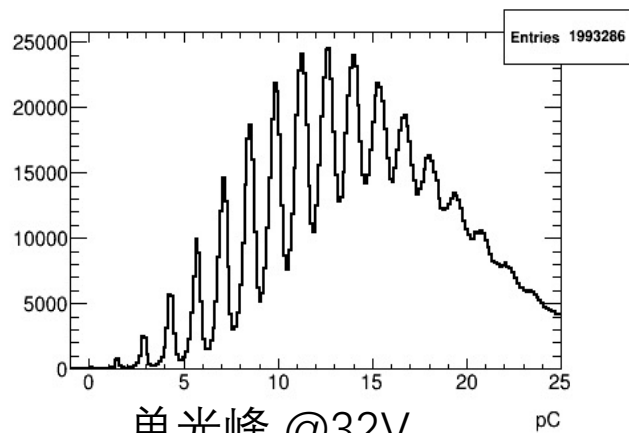


衰减长度 $0.58 \pm 0.03(\text{m})$

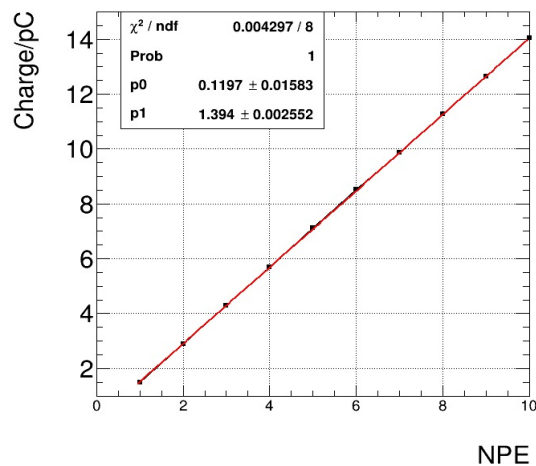
kuraray scsf-78 衰减长度 $>4\text{m}$ (出厂手册)

5 国产SiPM

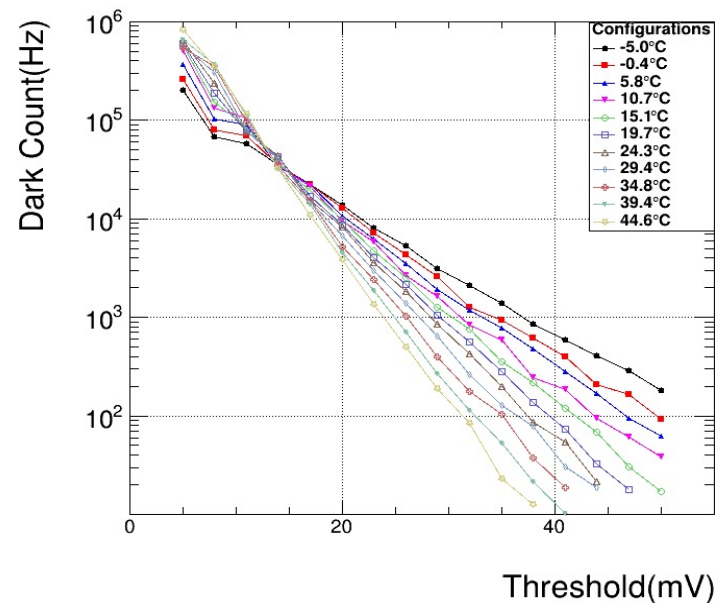
	中广核京师光电
Type	EQR20 -3030D
Pitch	20 μm
Element Number	1×1、8×8
Active Area	3.0×3.0 mm^2
Micro-cell Number	2500 / mm^2
Breakdown Voltage (VB)	26.4 V
Recommended Voltage	VB + 6.8 V
Peak PDE @420nm	44 %
Gain	8.5×10^5
Dark Count Rate (DCR)	260 kHz/mm^2
Terminal Capacitance	5.6 pF/mm^2



单光峰 @32V



单光子对应1.41pC,增益8.8E6



不同温度下的暗计数率

□完成基于SiPM和PMT的闪烁光纤的位置灵敏探测器研制

- 完成探测器设计和各部件测试
- 组装2套探测器
- 进行功能测试，单元探测器的性能如下：
 - 位置分辨 $\sim 1\text{mm}$;
 - 单层探测效率 $\sim 96\%$

□国产化

- 国产闪烁光纤已可满足需求，光产额和衰减长度有待进一步提高
- 国产SiPM已具备较好的光子探测能力