



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

基于SiPM和闪烁光纤的位置灵敏探测器

刘栋，牛艳，王博，黄子奇，秦小帅，冯存峰

山东大学
2025年8月1日

2025年 高能宇宙线物理及下一代空间探测器装置研讨会·新疆

Outline



01

研究背景&目的

02

闪烁光纤探测器的几何结构

03

探测器的各组分

04

单层探测器实物图

05

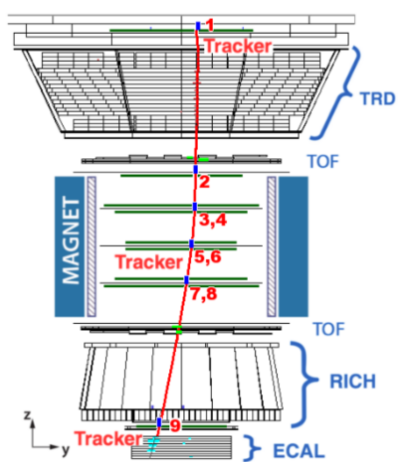
整体性能测试

06

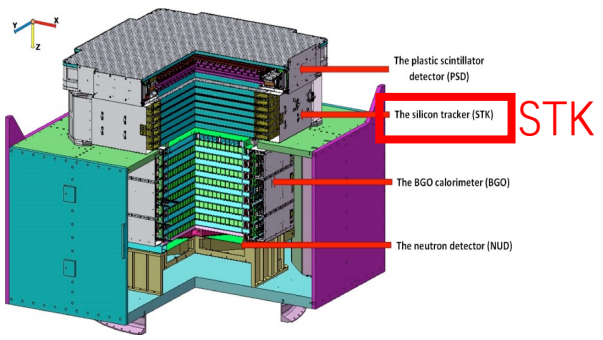
总结与计划

01 研究背景

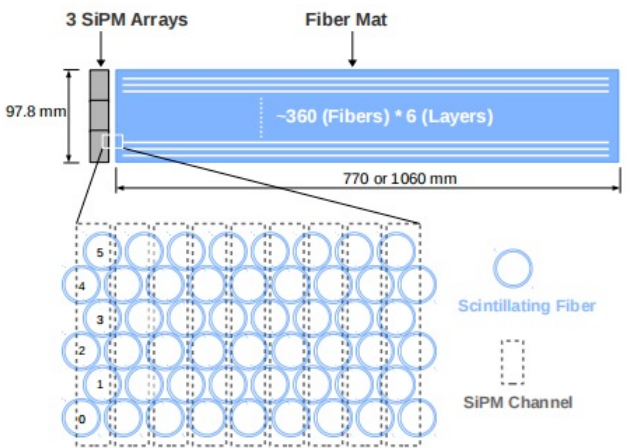
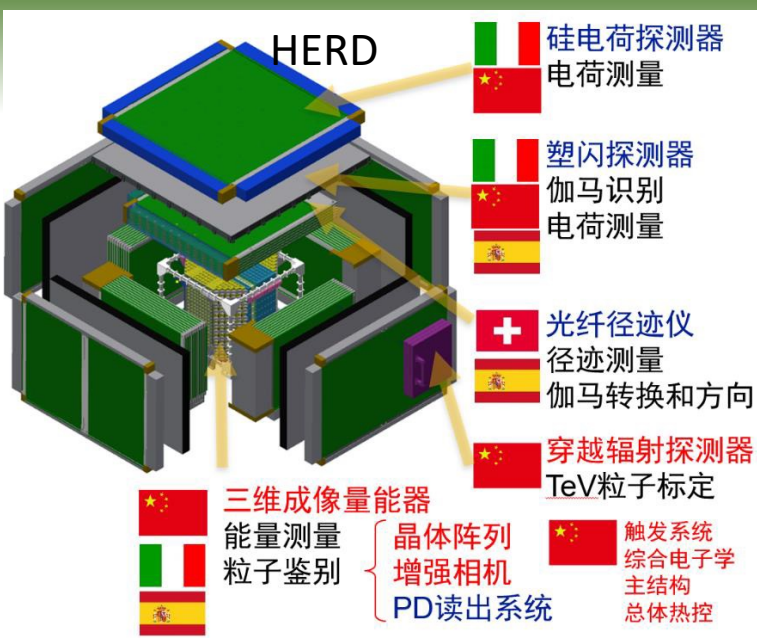
宇宙线径迹探测



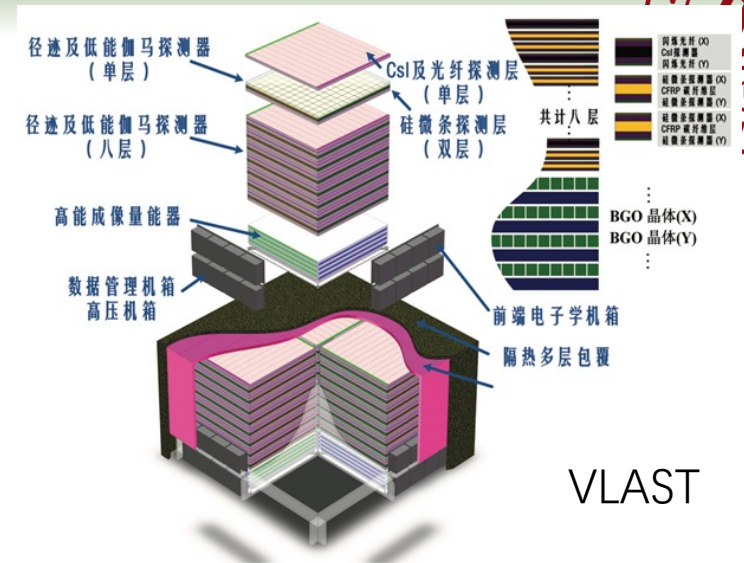
AMS-02



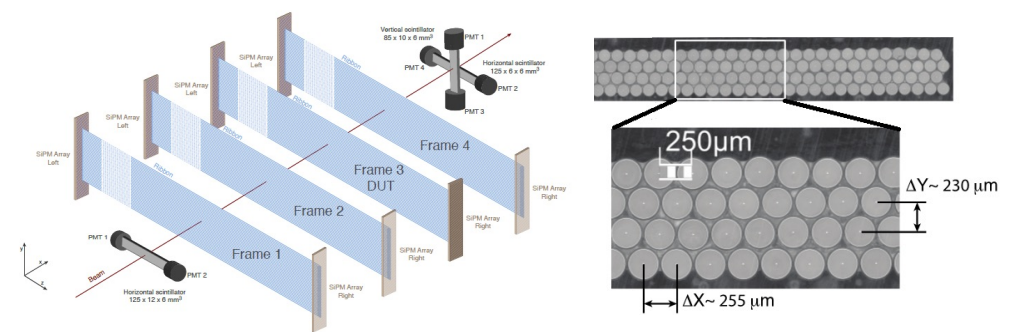
DAMPE



HERD的光纤径迹仪 (旧计划)



VLAST



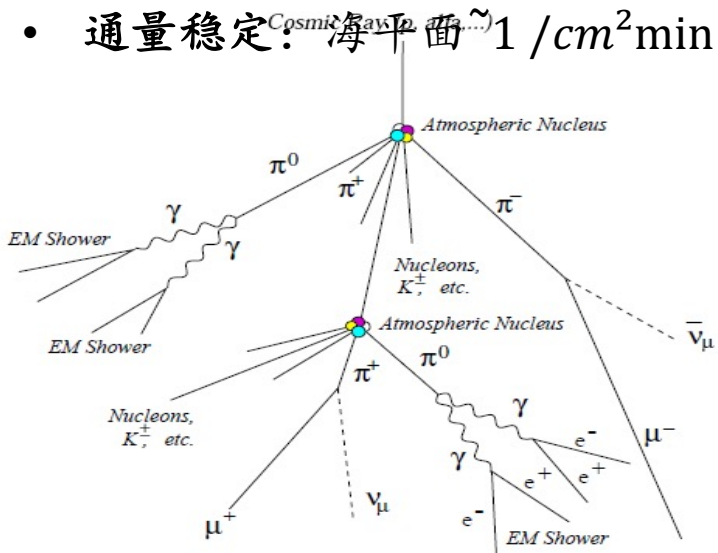
Mu3e 实验的闪烁光纤探测器

01 研究背景

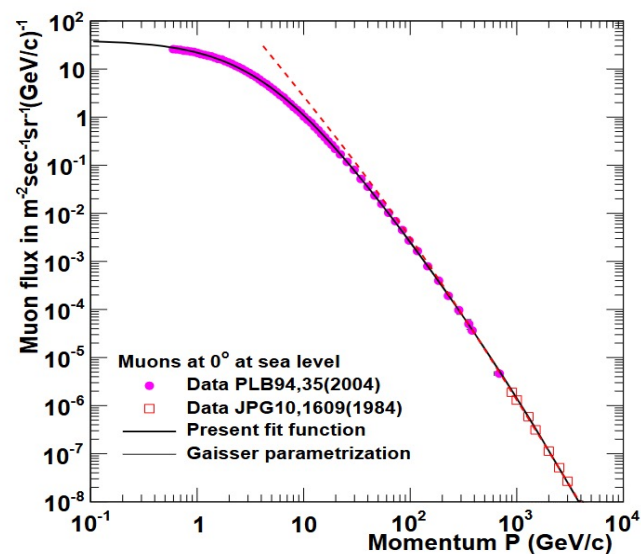
□ 也可用于缪子成像或者其他位置灵敏探测

□ 宇宙射线粒子进入大气层后产生缪子：

- 高能量：平均能量 $\sim 4\text{GeV}$
- 能量范围宽： $<1\text{GeV}$ 约均匀分布， $>10\text{GeV}$ 指数递减
- 穿透性强
- 通量稳定：海平面 $\sim 1/\text{cm}^2\text{min}$



■ 广延大气簇射示意图

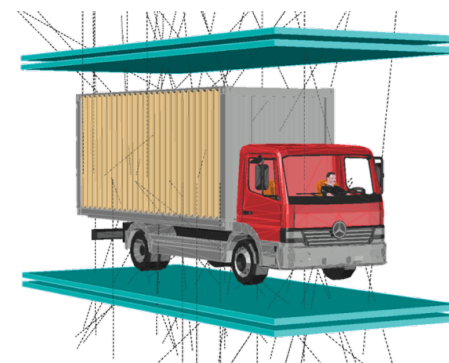


■ 宇宙线缪子的通量分布^[1]

[1] arXiv:1606.06907

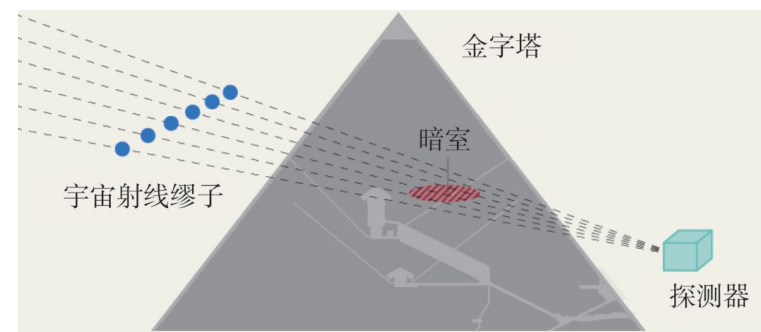
□ 散射成像：

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；



02 闪烁光纤探测器的几何解构

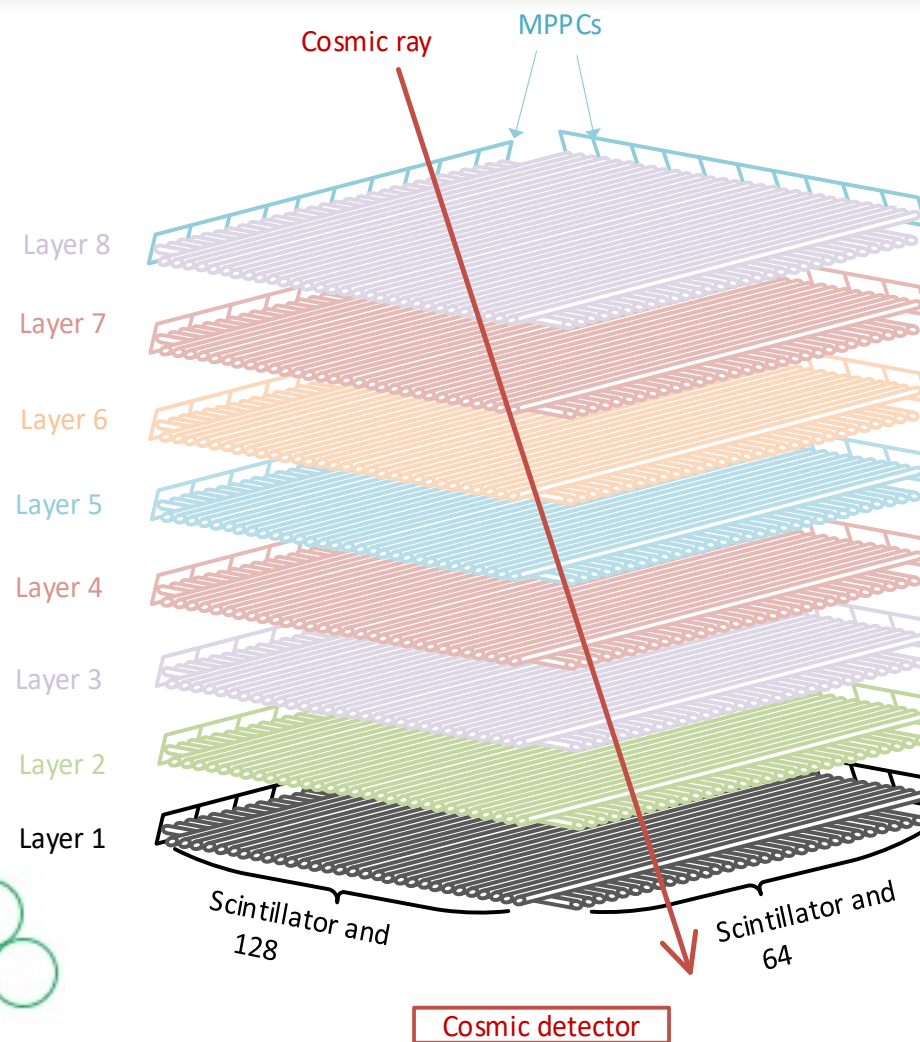
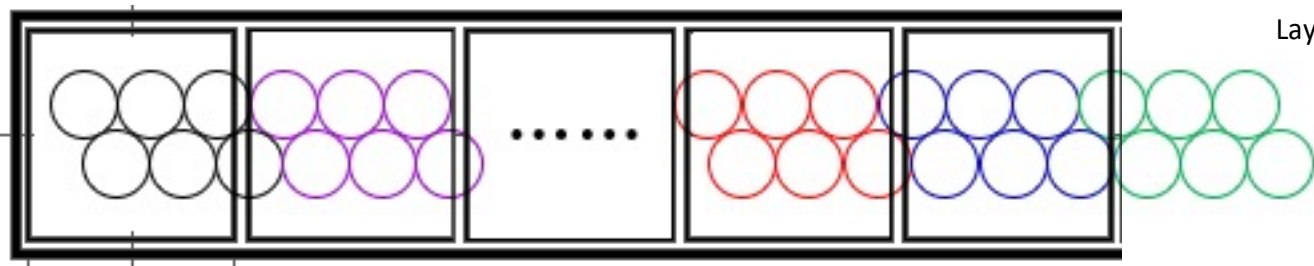


□几何设置:

- 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
 - 闪烁光纤端面空气耦合3 * 3mm²的SiPM阵列
 - 每层192个通道: 128通道x + 64通道y

□信号读出方案

- 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

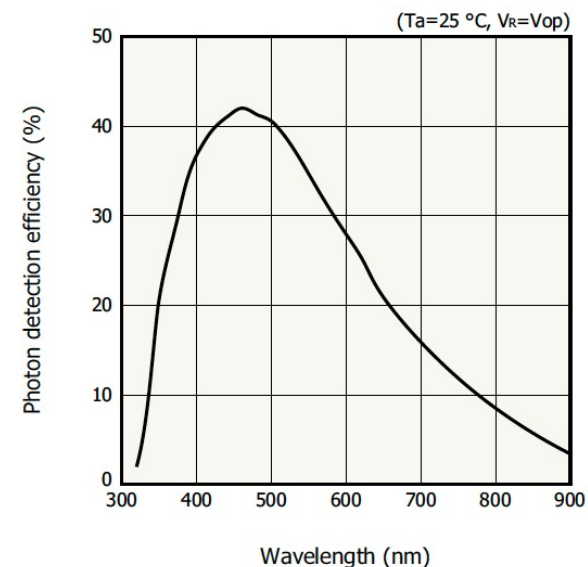


大尺度、低成本、时间敏感、耐辐射、耐磁场、几何灵活

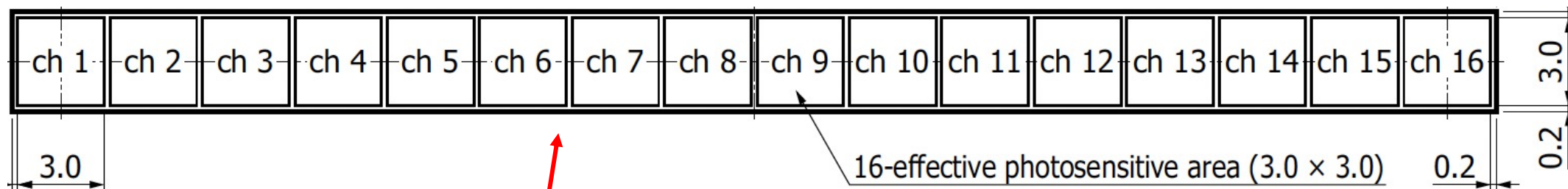
03 闪烁光纤探测器各组分

► SiPM: 滨松S13363-3050NE-16

参数	
通道数	16
有效光敏面积	3mm x 3 mm
像素间距	50 μ m
像素数/通道	3584
填充因子	74%



量子效率

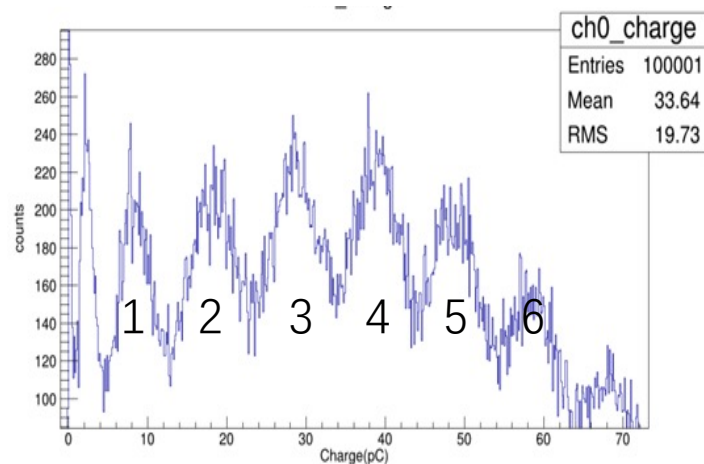


4片 S13363-3050NE-16 = 64通道 ~ 20cm
每层需要3片 = 2x+1y

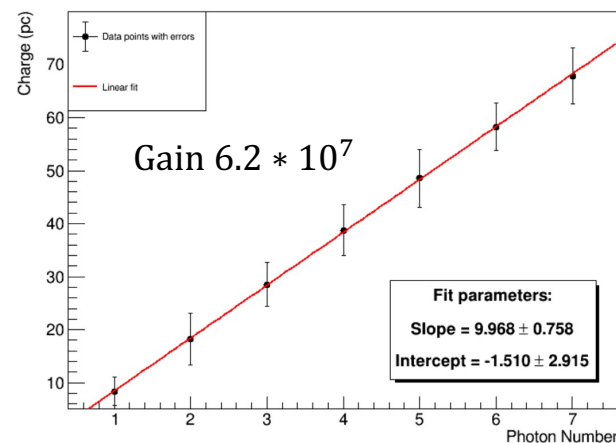
局部放大

03 闪烁光纤探测器各组分

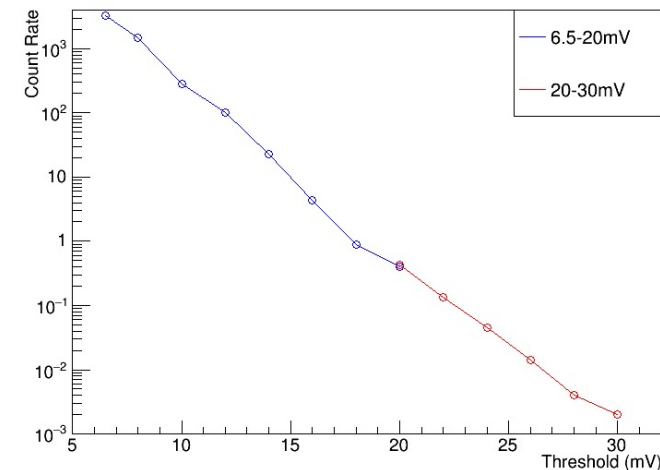
SiPM的标定(信号放大后)



■ SiPM的光子峰



■ SiPM电荷量随入射光子数的分布



■ 暗噪声计数率

- 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

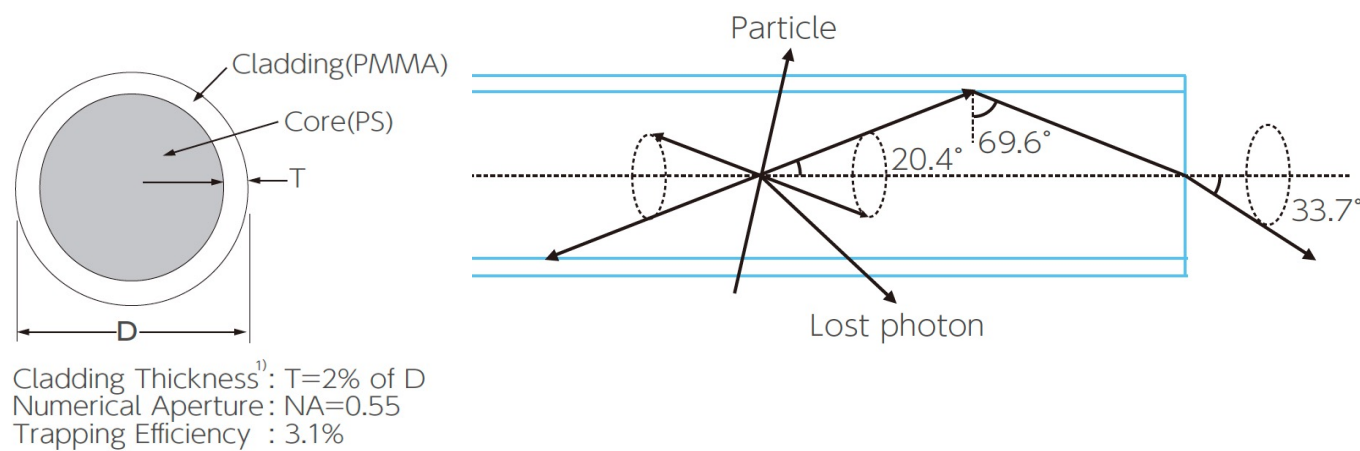
03 闪烁光纤探测器各组分

KURARAY 塑料闪烁光纤SCSF-78 $\varnothing 1mm$

Decay Time 2.8ns

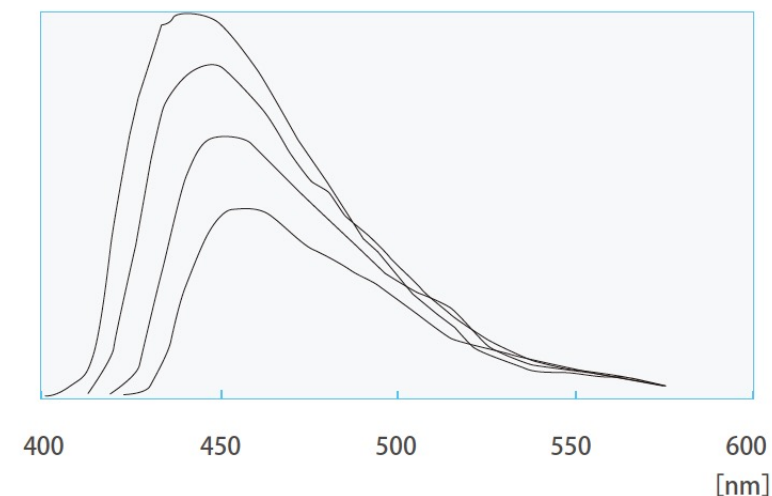
衰减长度 >4.0米

单包层



Emission Spectra

SCSF-78

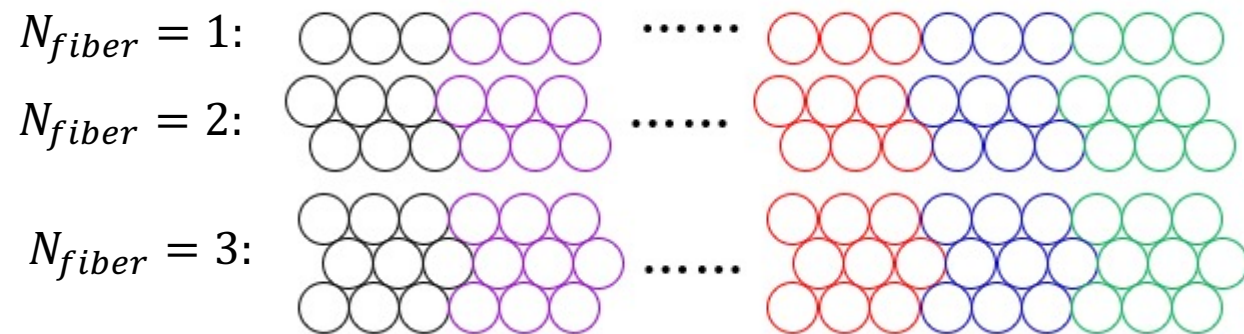
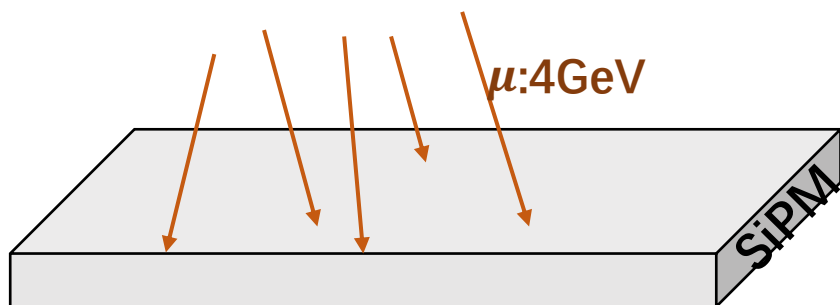


发光光谱
峰值~450nm

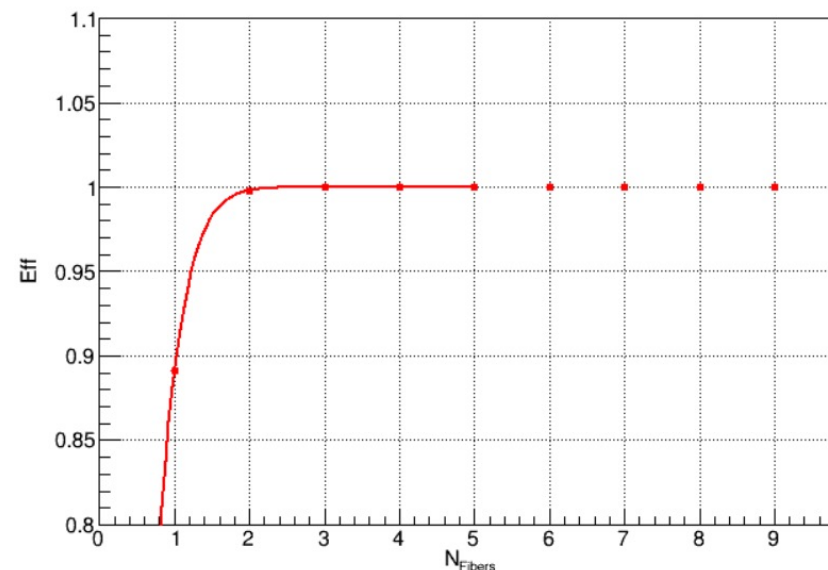
03 闪烁光纤探测器各组分

□ 光纤排布层数的确定

- 利用Geant4模拟了不同层数的光纤垫探测效率



➤ $\varnothing 1\text{mm}$ 光纤的排布模拟结果



■ 光纤垫探测效率随着光纤垫层数的变化

✓ 双层光纤探测效率接近100%;

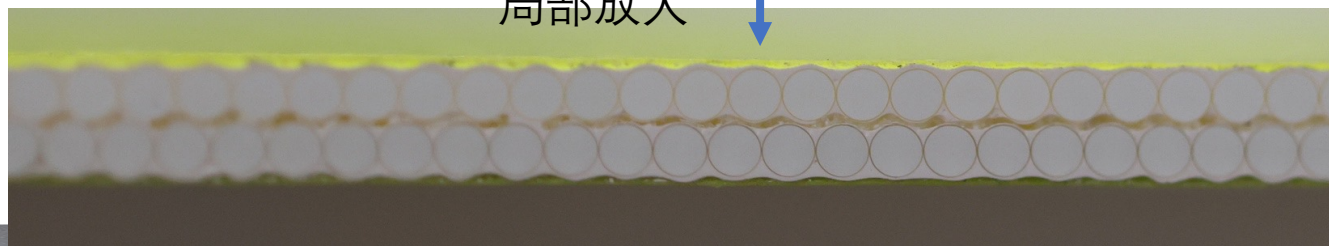
03 闪烁光纤探测器各组分

闪烁光纤垫

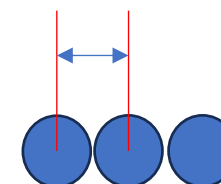
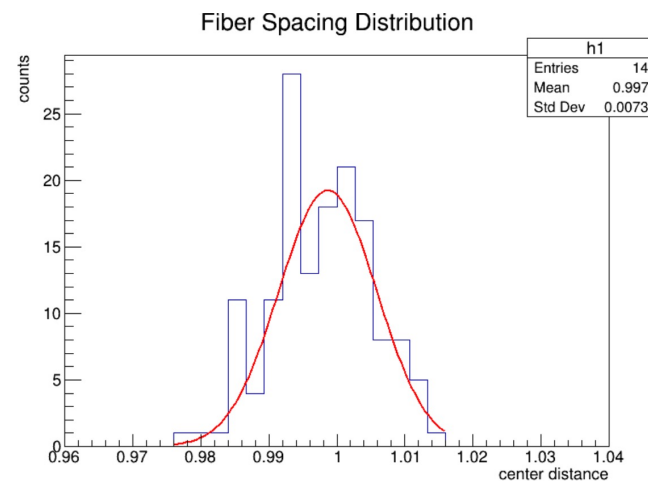


侧面

局部放大



➤ 光栅尺测量光纤中心间距

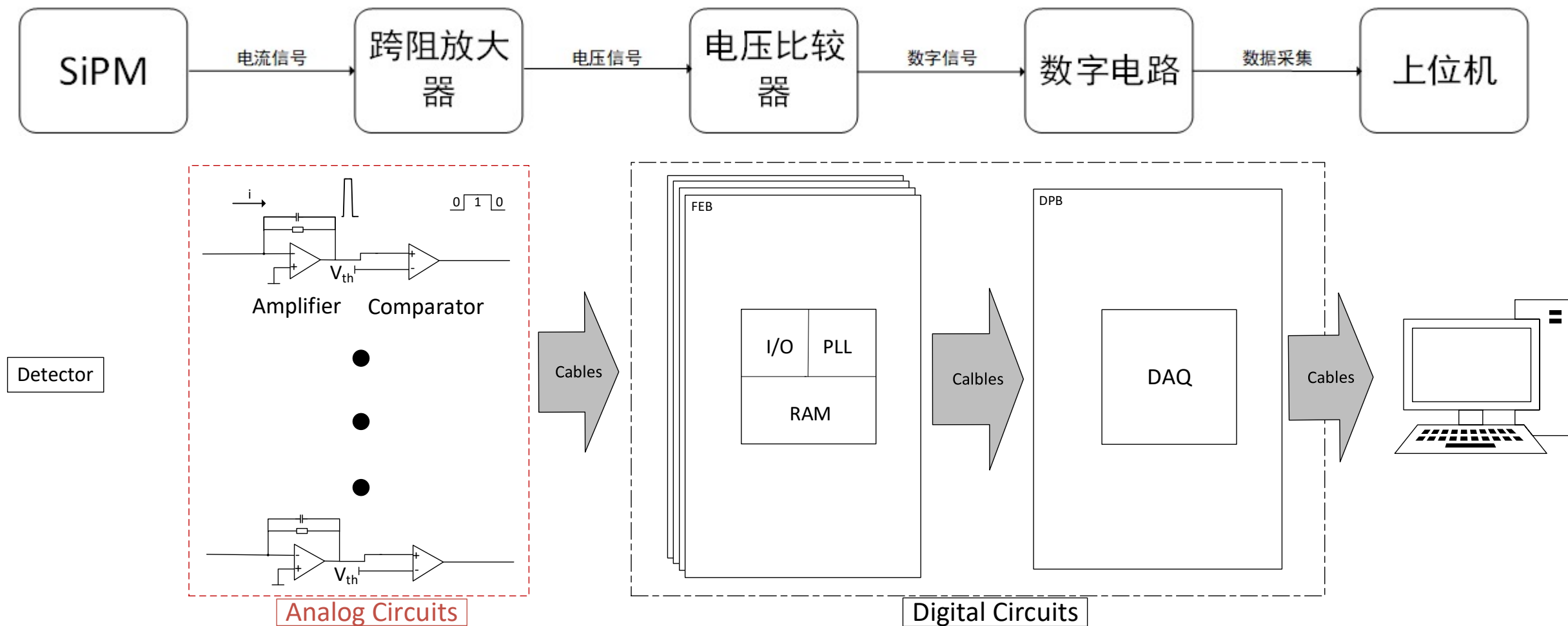


➤ 光纤的中心间距1mm

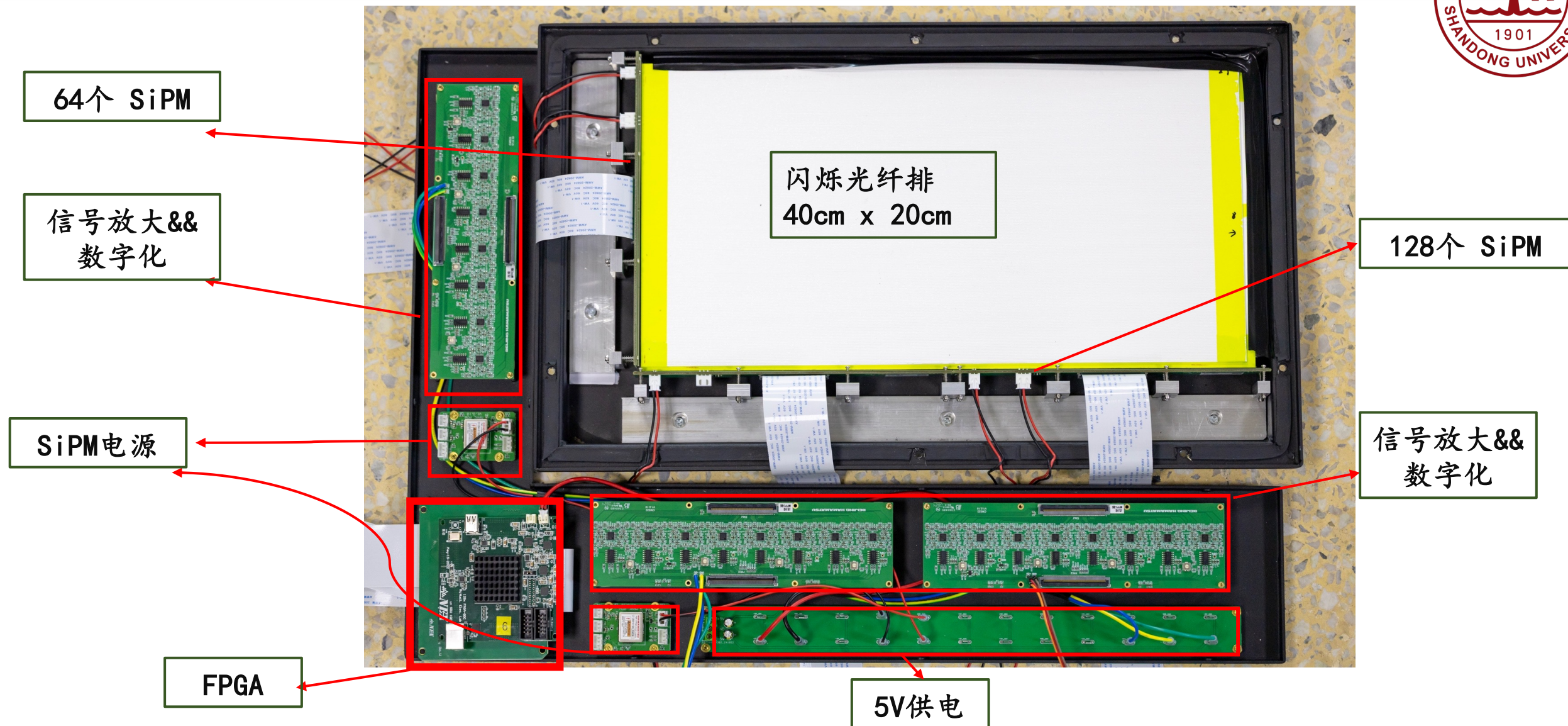
03 闪烁光纤探测器各组分

□ 信号采集过程

记录过阈的时间宽度TOT (Time Over Threshold)



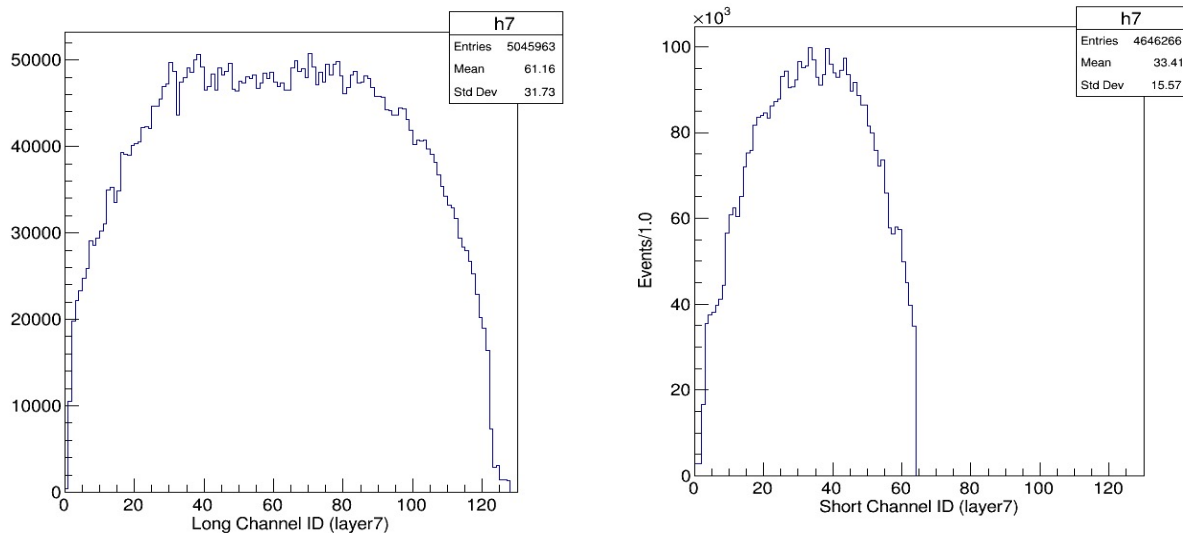
04 单层探测器实物图



05 整体性能测试

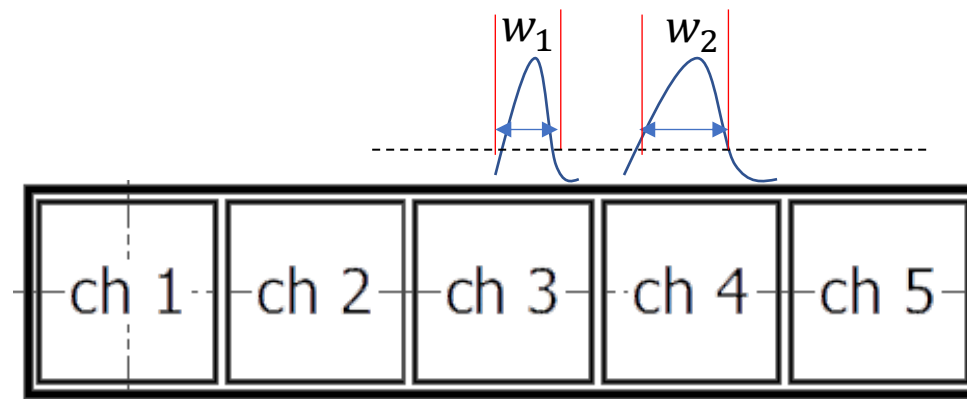
□ 闪烁光纤探测器位置重建

如果击中相邻多个SiPM，利用重心法确定位置



■ 单层探测器中长边与短边处光纤响应情况分布

- 中心区域平坦，边缘值较低。
- 边缘区域的有效接收角较小，导致光纤被击中的概率较低，与预期的分布特性一致。

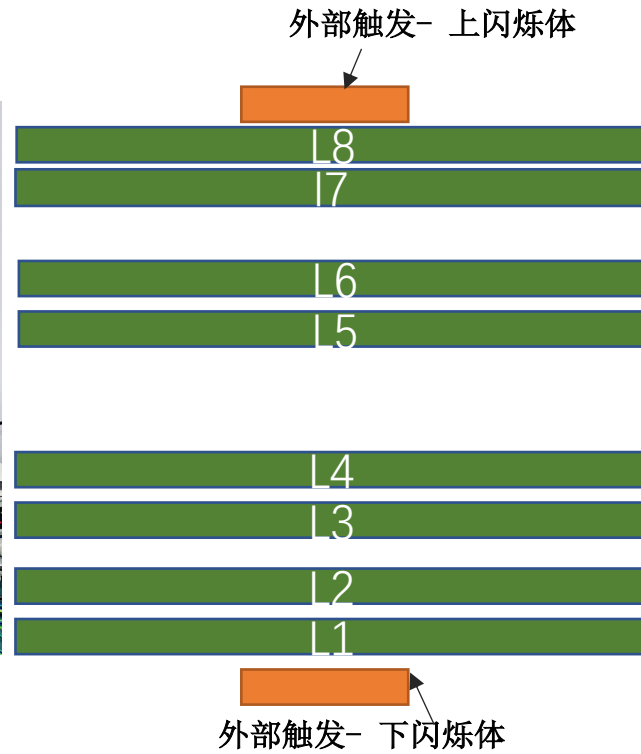


- 考虑信号脉冲宽度的存在：

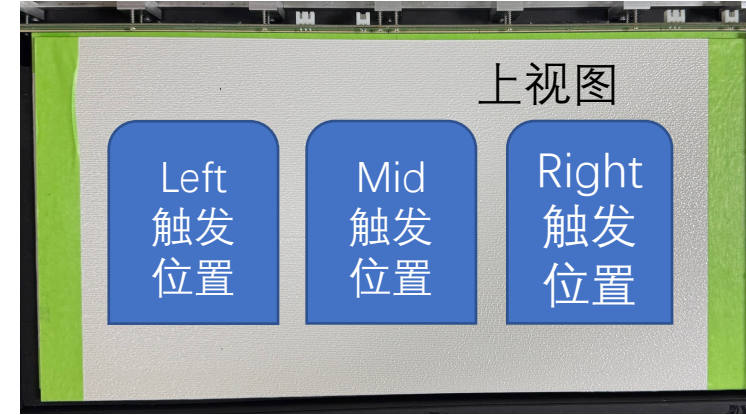
$$\text{Position} = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} (w_i * Pos_i)}{\sum_{i=0}^{i=n} w_i}$$

05 性能测试-探测效率

➤ 外部触发模式下位置响应分布



$$\varepsilon = N_{hit}/N_{all} (\%)$$



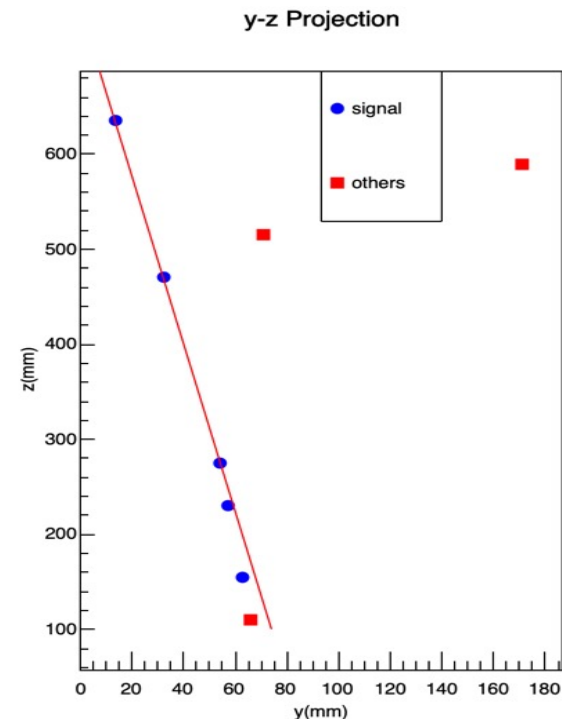
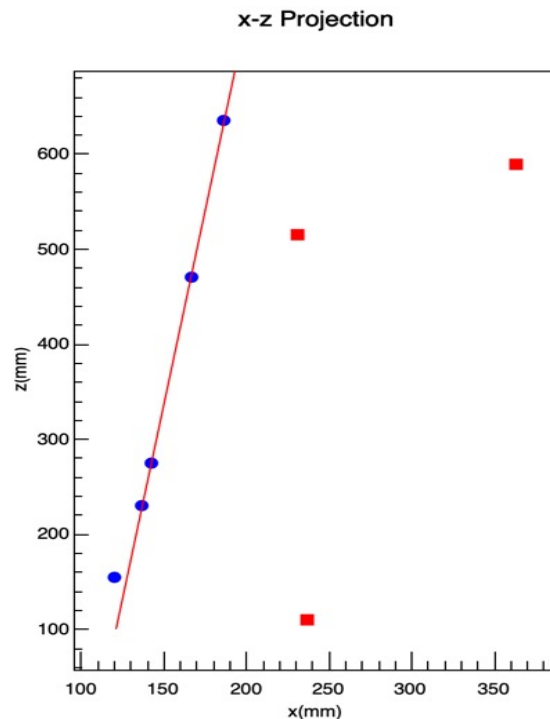
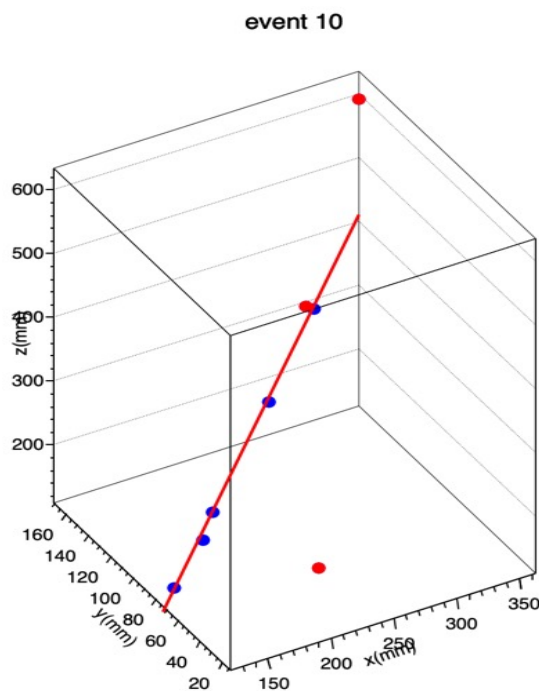
■ 在不同外部触发位置下，单元探测器中SiPM响应情况分布

效率%	Total	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

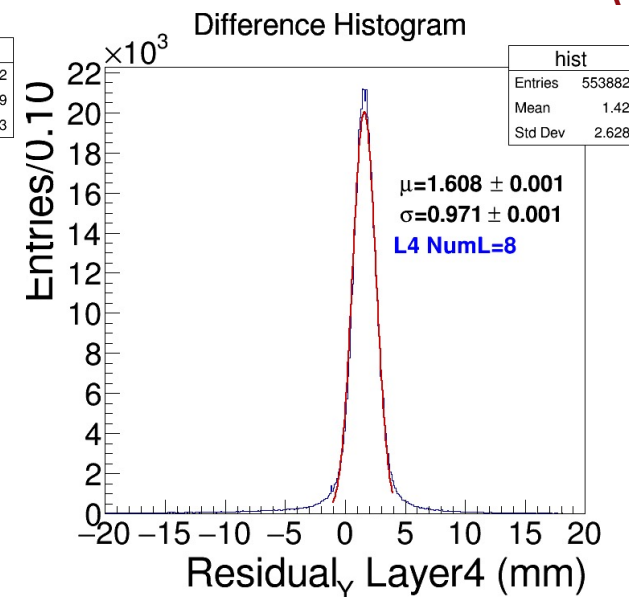
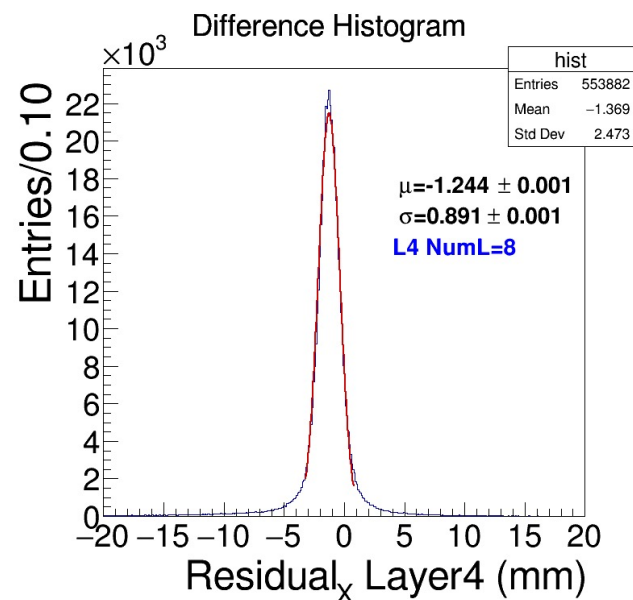
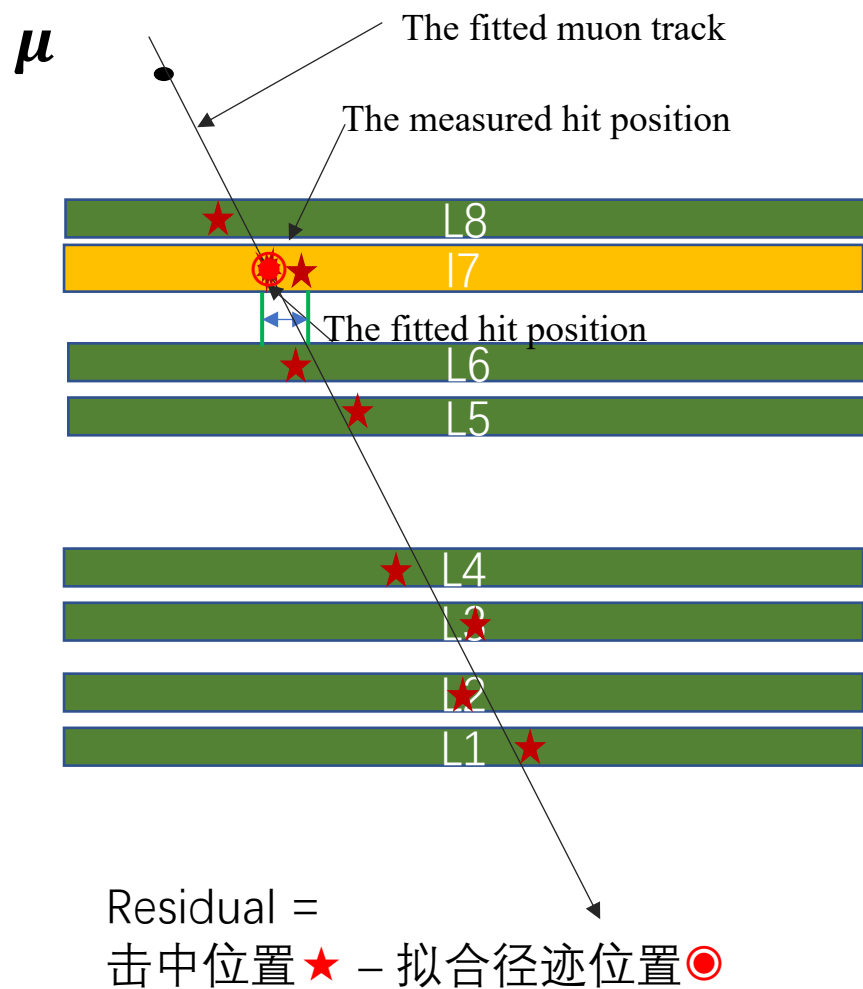
- 单元探测器的探测效率92% – 98%;
- 8层总体探测效率~80%
- *少数通道工作不正常

05 性能测试-径迹重建

- 对获取的数据利用LineRANSAC方法进行分析：
 - 随机选两个数据点构建直线；
 - 遍历所有点，计算距离，统计内点；
 - 更新当前最佳模型（最多内点）；



05 性能测试-位置分辨

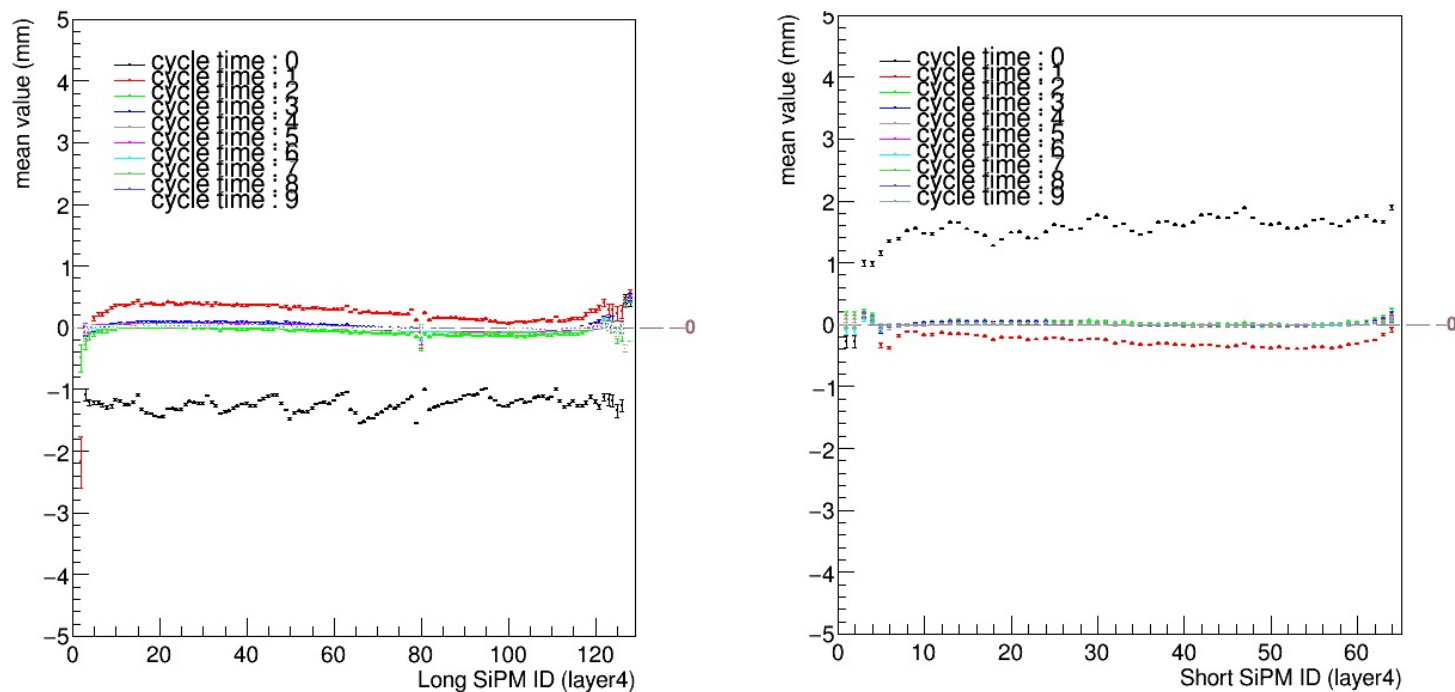


■ 每层击中位置的残差分布(以layer4为例)

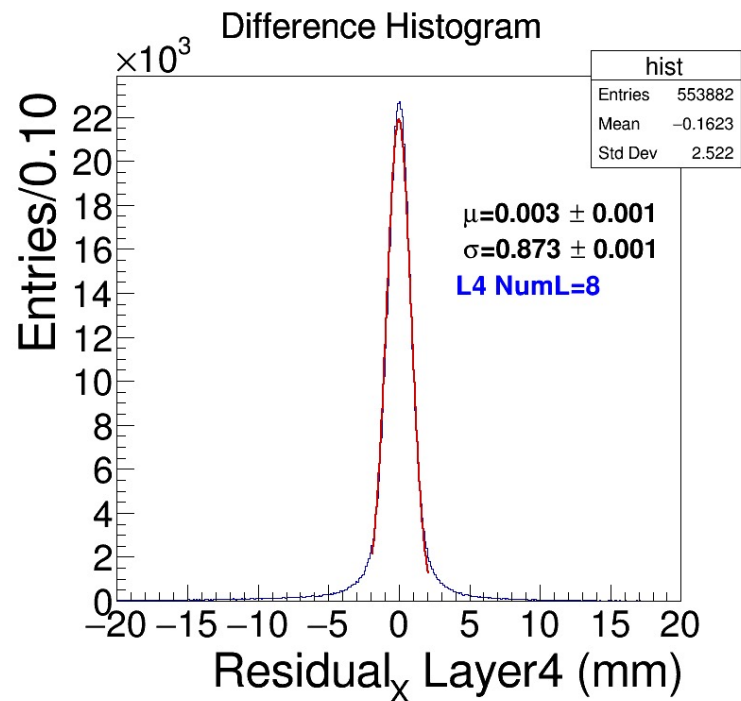
- σ 单元探测器位置分辨 $\sim 1\text{mm}$ 。
- μ 单元探测器的位置偏移

- 修正每层探测器的位置偏移 μ 后，重新拟合径迹
- 重复以上过程10次

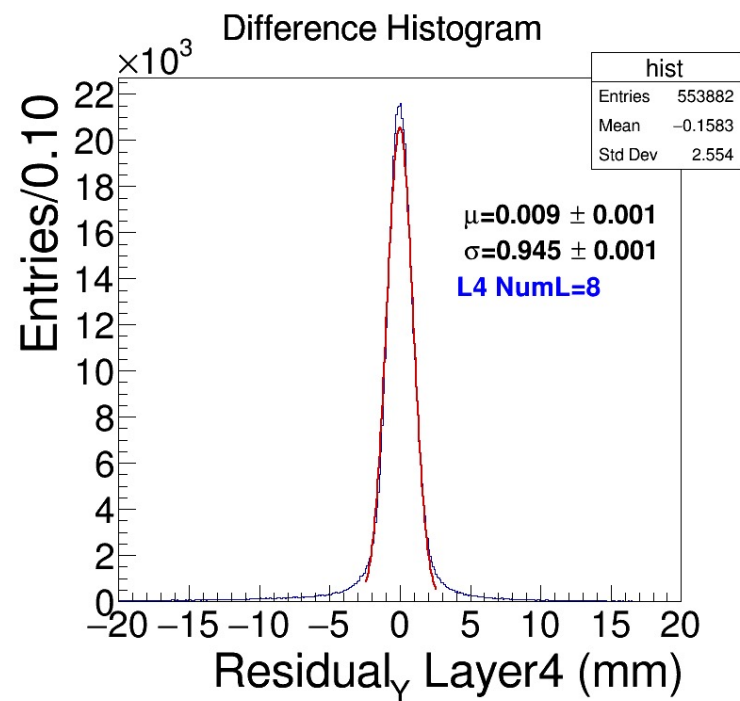
以layer4为例，重新得到每个SiPM的位置偏移



□ 闪烁光纤探测器位置分辨



位置分辨率 x方向 0.873mm



y方向 0.945mm

06 总结与计划



□完成基于SiPM和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8层单元探测器
- 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 $> 90\%$; 8层总体探测效率 $\sim 80\%$

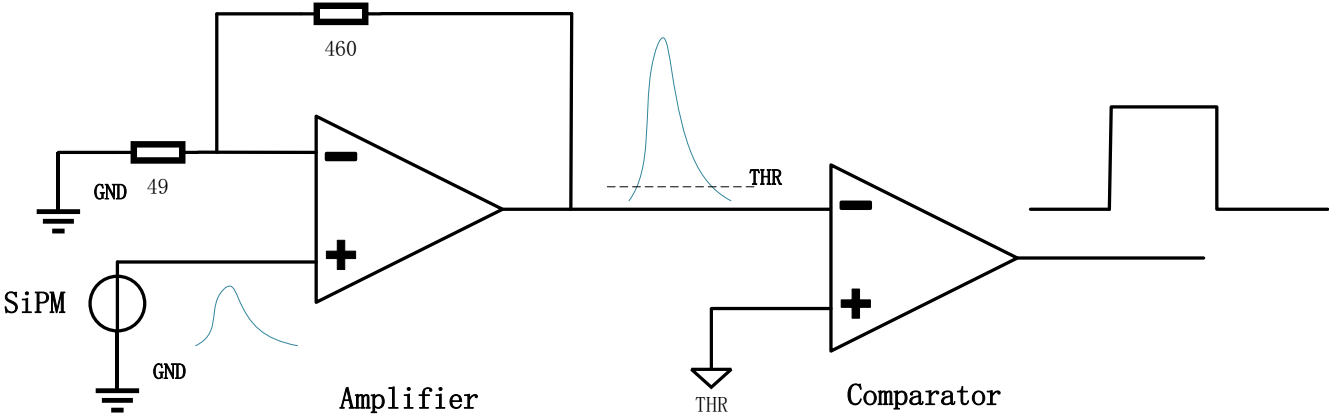
□下一步

- 优化探测器性能和径迹重建
- 缪子透射&散射成像研究工作正在展开中

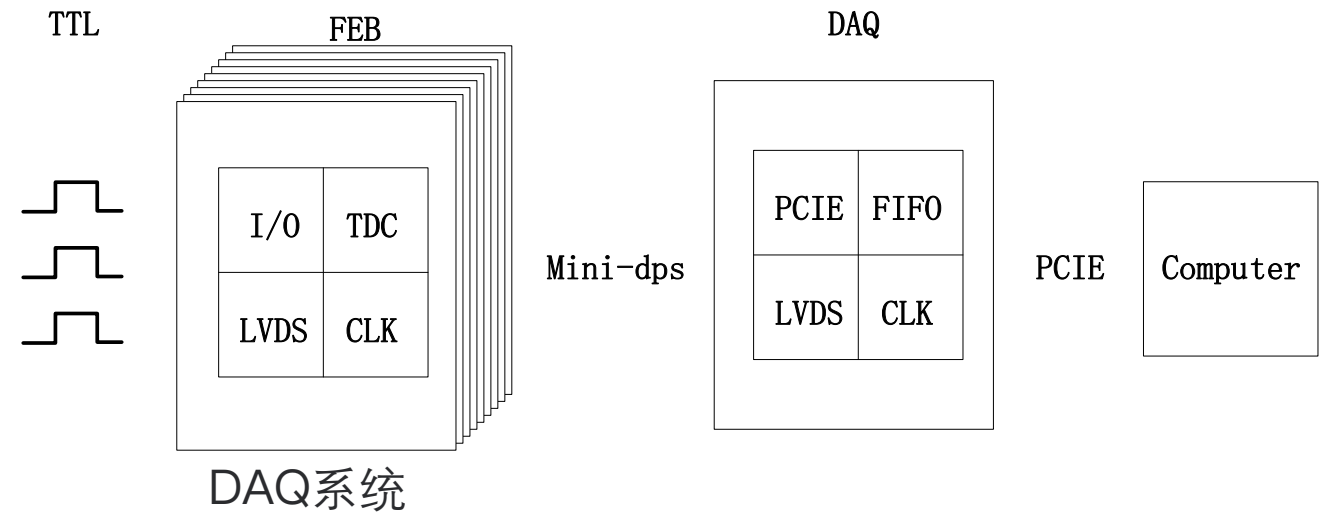


Back Up

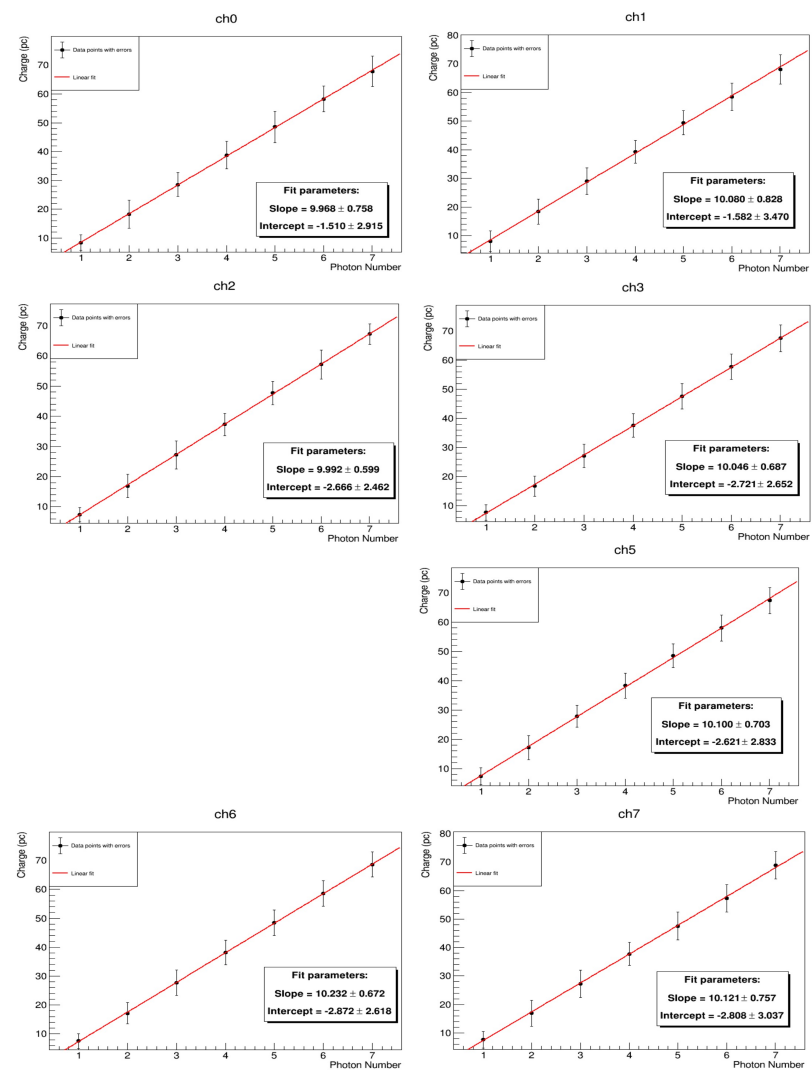
04 电子学器件设计&逻辑电路原理图



前端电子学原理图



所有通道的增益



除ch4没有测到信号，对其余7个通道测量的charge直方图分别拟合得到各峰位对应charge，分别拟合，得到各斜线斜率如下，并由此计算各通道gain值。

峰	0	1	2	3	4	5	6	7	拟合斜率		gain
ch0	mean值	2.22	8.383	18.24	28.53	38.78	48.54	58.27	67.87	9.968	6.22
ch1	mean值	2.06	8.05	18.4	29.12	39.31	49.42	58.53	68.13	10.08	6.29
ch2	mean值	1.776	7.431	16.92	27.2	37.29	47.67	57.13	67.23	9.992	6.24
ch3	mean值	1.975	7.67	16.73	27.12	37.6	47.55	57.84	67.54	10.046	6.27
ch4	mean值	no signal									
ch5	mean值	1.476	7.411	17.12	27.8	38.27	48.52	57.99	67.34	10.1	6.30
ch6	mean值	1.534	7.526	17.12	27.73	38.16	48.47	58.62	68.64	10.232	6.39
ch7	mean值	1.563	7.619	16.89	27.28	37.76	47.56	57.23	68.9	10.121	6.32
	峰	0	1	2	3	4	5	6	7		
ch0	sigma	1.22	2.73	4.9	4.15	4.73	5.5	4.49	5.34		
ch1	sigma	1.52	3.69	4.36	4.63	3.99	4.21	4.77	5.12		
ch2	sigma	1.184	2.357	3.858	4.678	3.716	3.898	4.762	3.406		
ch3	sigma	0.866	2.627	3.453	3.98	3.996	4.361	4.361	4.631		
ch4	sigma	no signal									
ch5	sigma	1.169	2.823	4.068	3.722	4.329	4.089	4.398	4.457		
ch6	sigma	0.9928	2.531	3.656	4.401	4.285	4.401	4.401	4.401		
ch7	sigma	1.266	2.938	4.547	4.829	4.057	4.829	4.829	4.829		

ch0: $gain = \frac{9.968pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.22 \times 10^7$ ch1: $gain = \frac{10.08pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.26 \times 10^7$

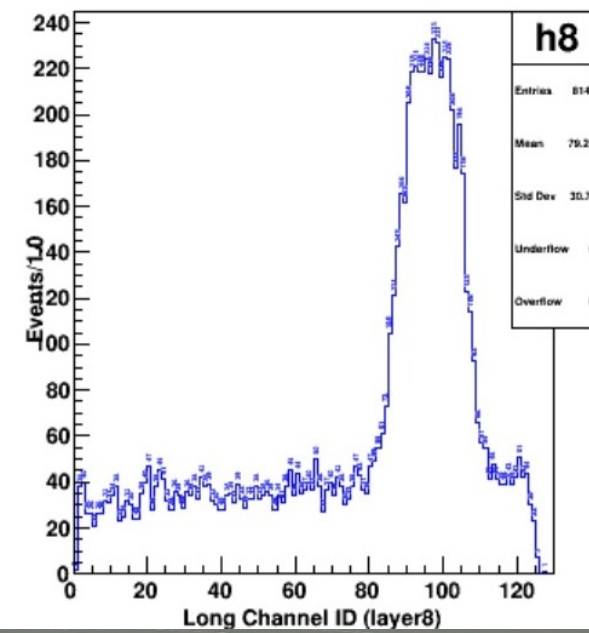
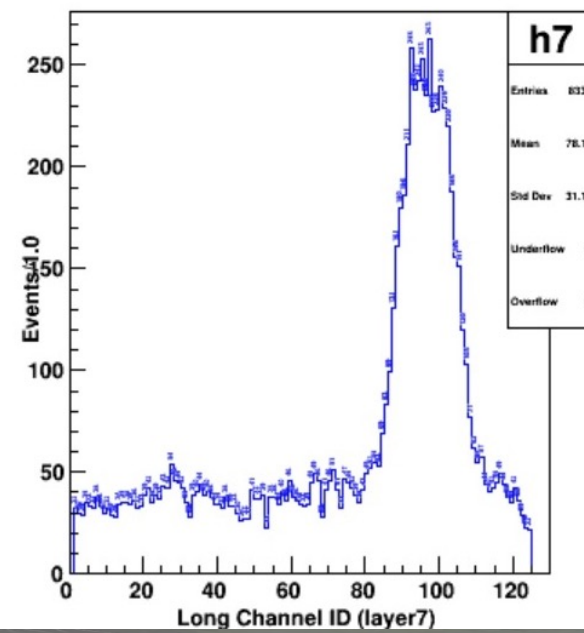
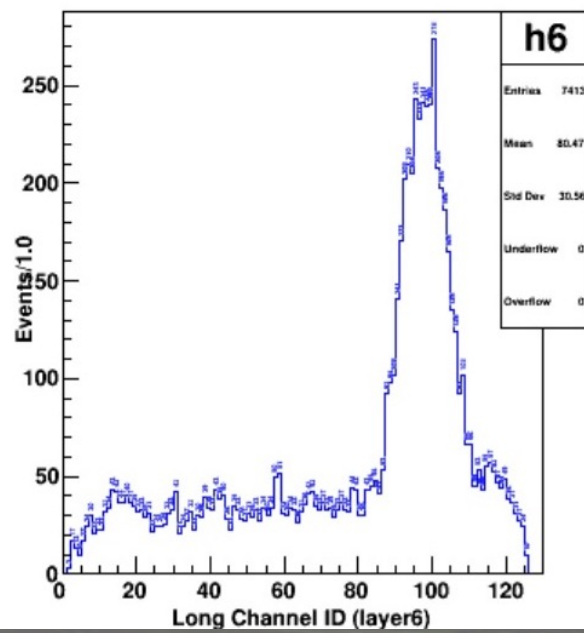
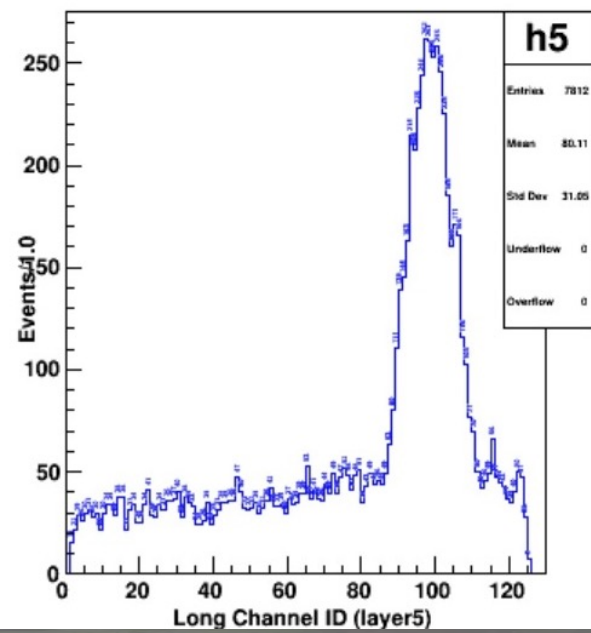
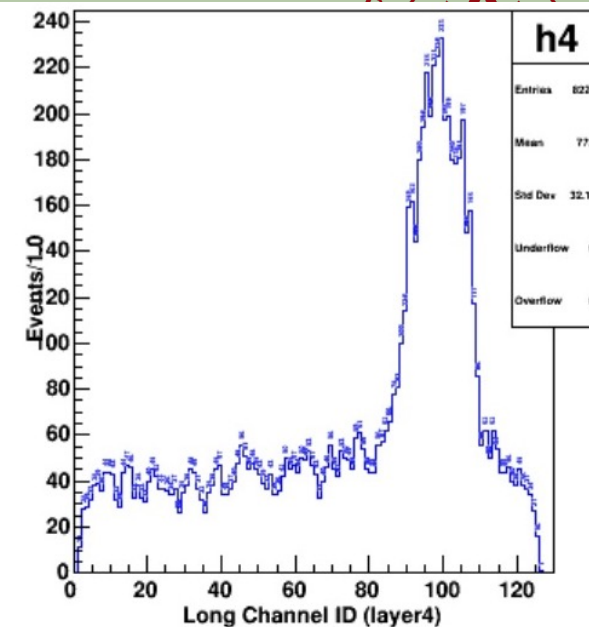
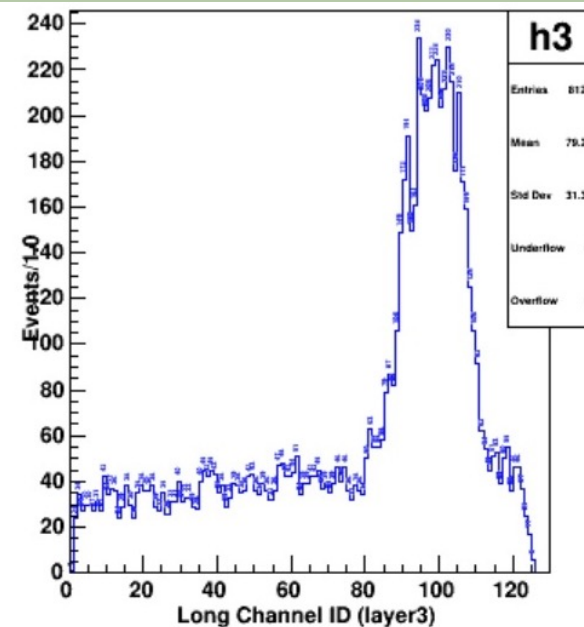
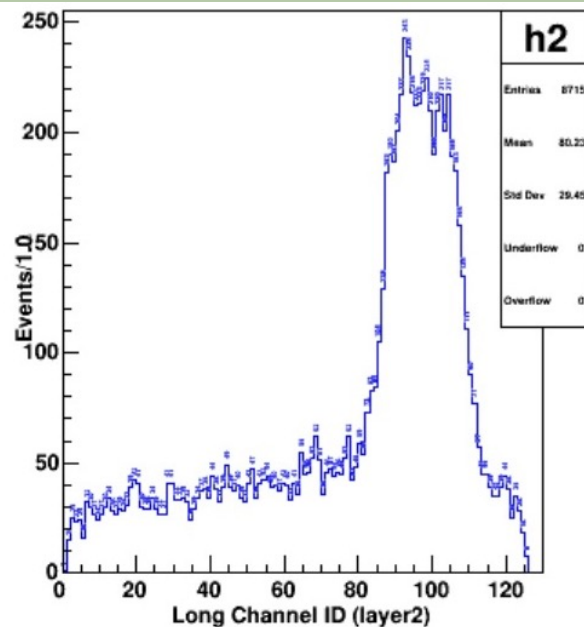
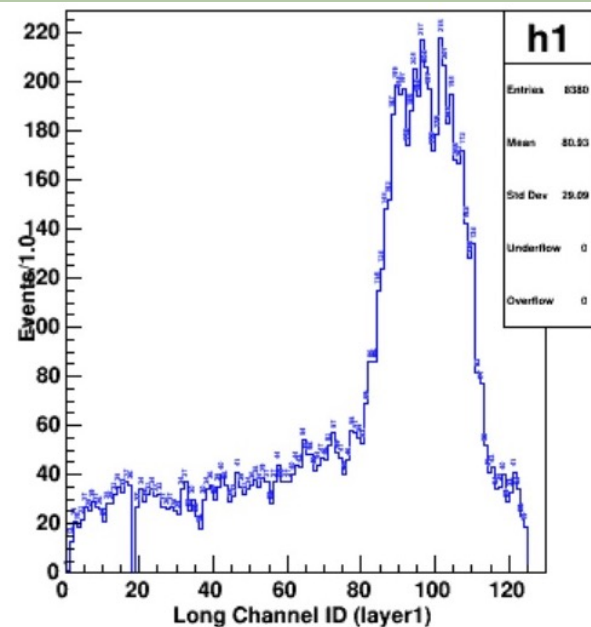
ch2: $gain = \frac{9.992pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.24 \times 10^7$ ch3: $gain = \frac{10.046pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.27 \times 10^7$

ch5: $gain = \frac{10.1pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.30 \times 10^7$ ch6: $gain = \frac{10.232pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.39 \times 10^7$

ch7: $gain = \frac{10.121pc}{1.602 \times 10^{-7} pc} = 6.32 \times 10^7$

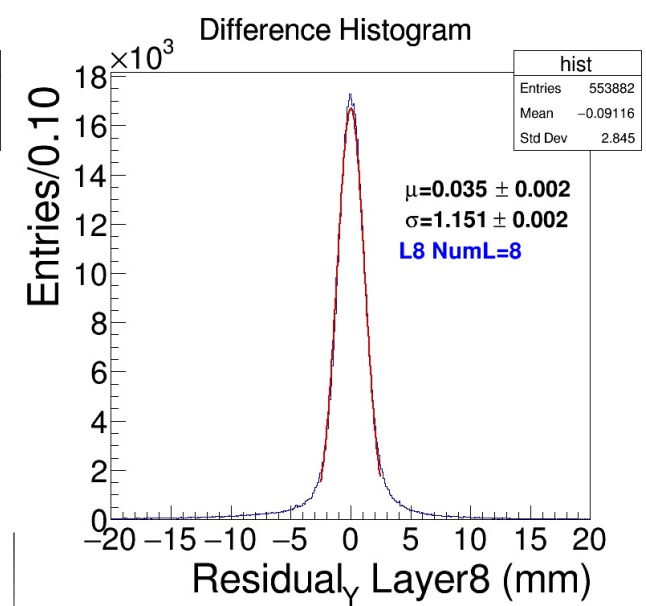
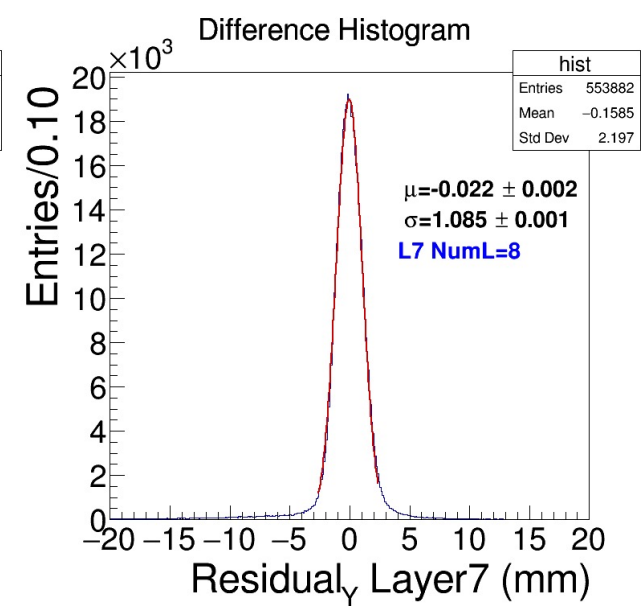
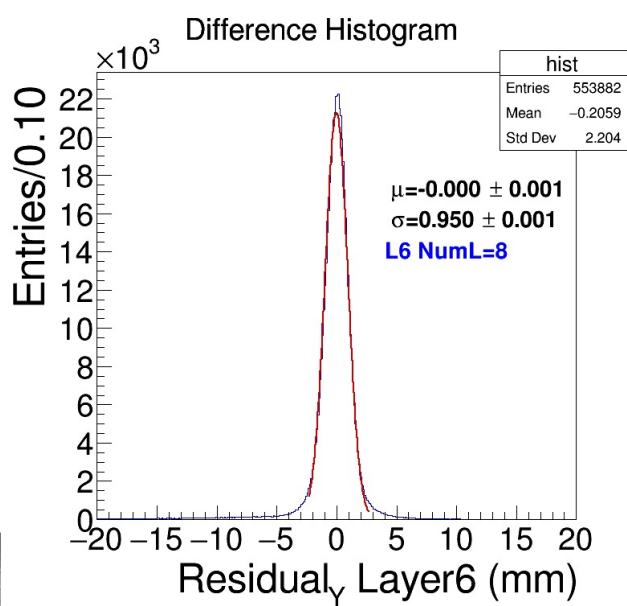
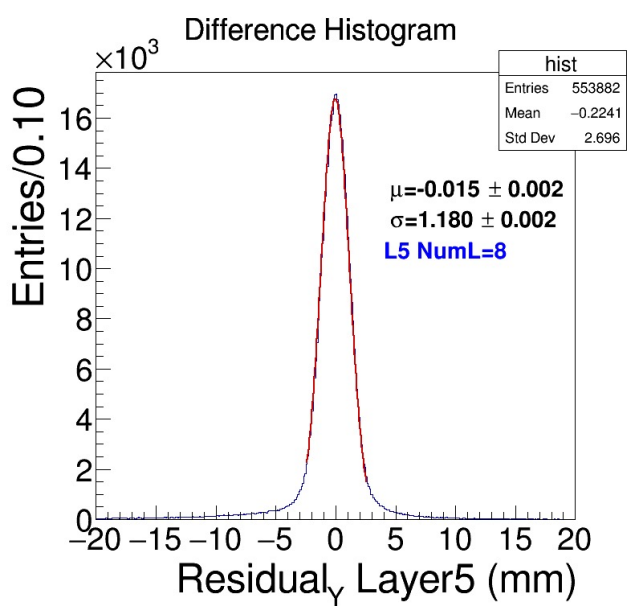
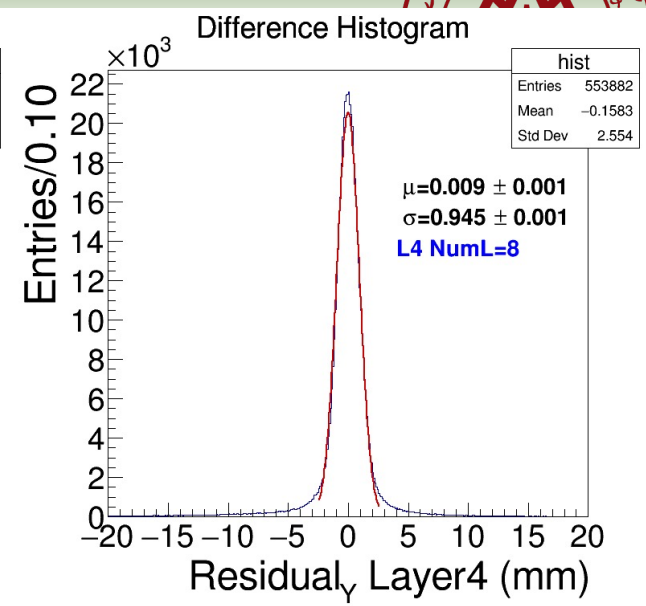
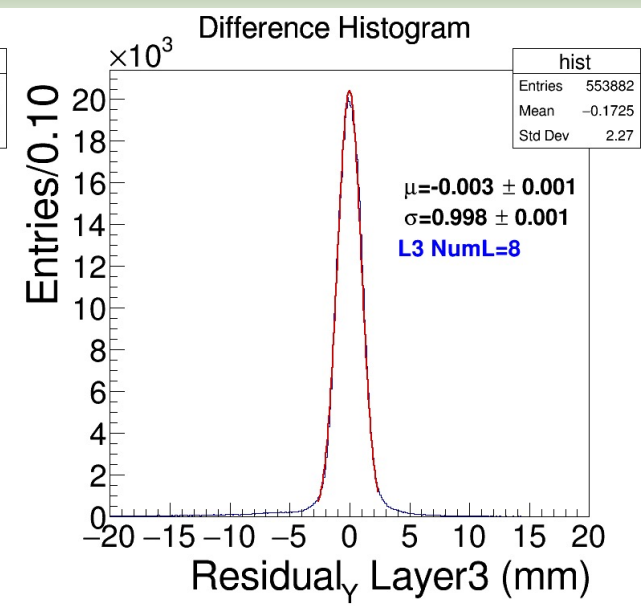
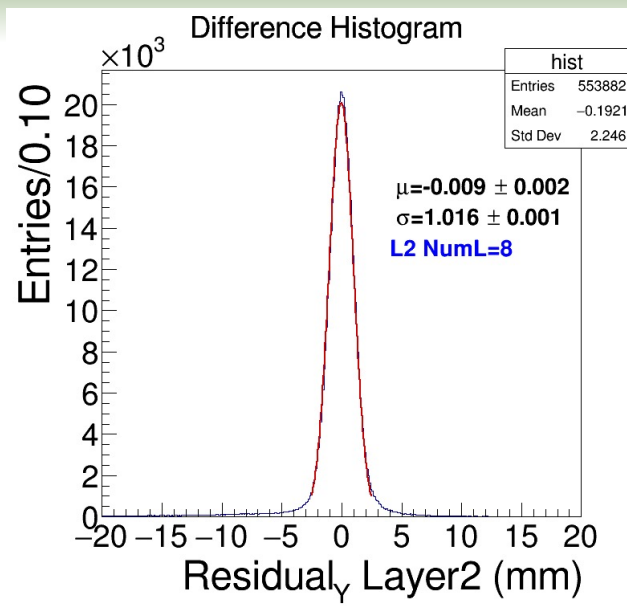
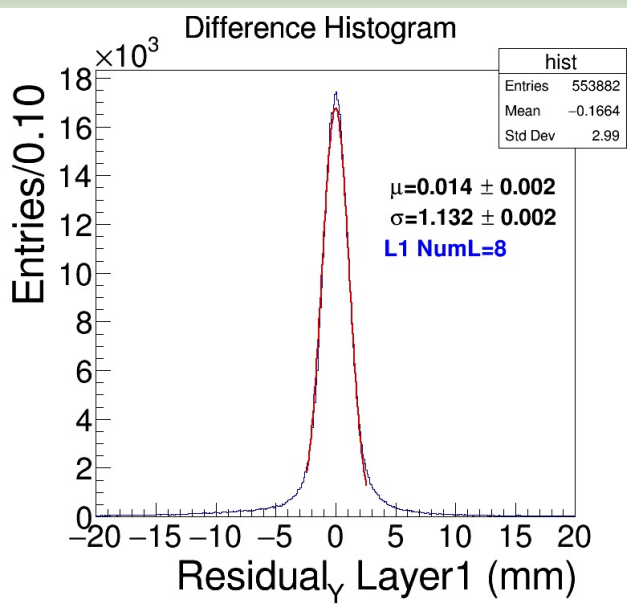
gain_average = 6.29×10^7 ，即SiPM的增益标定为 **6.29×10^7** （含放大）。

长边数据击中情况分布





校准后的Y轴残差分布情况





校准后的X轴残差分布情况

