
SMOOTH

MuGrid宇生繆成像系统

NED&CAGD 2024

余涛 白爱毓 袁意 宁云松 孙铭辰

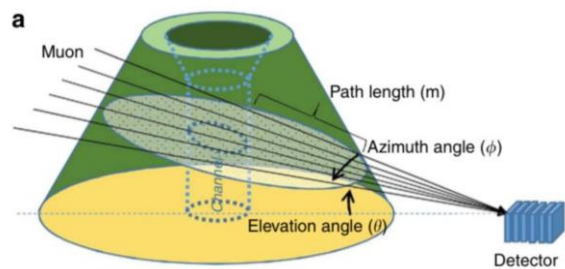
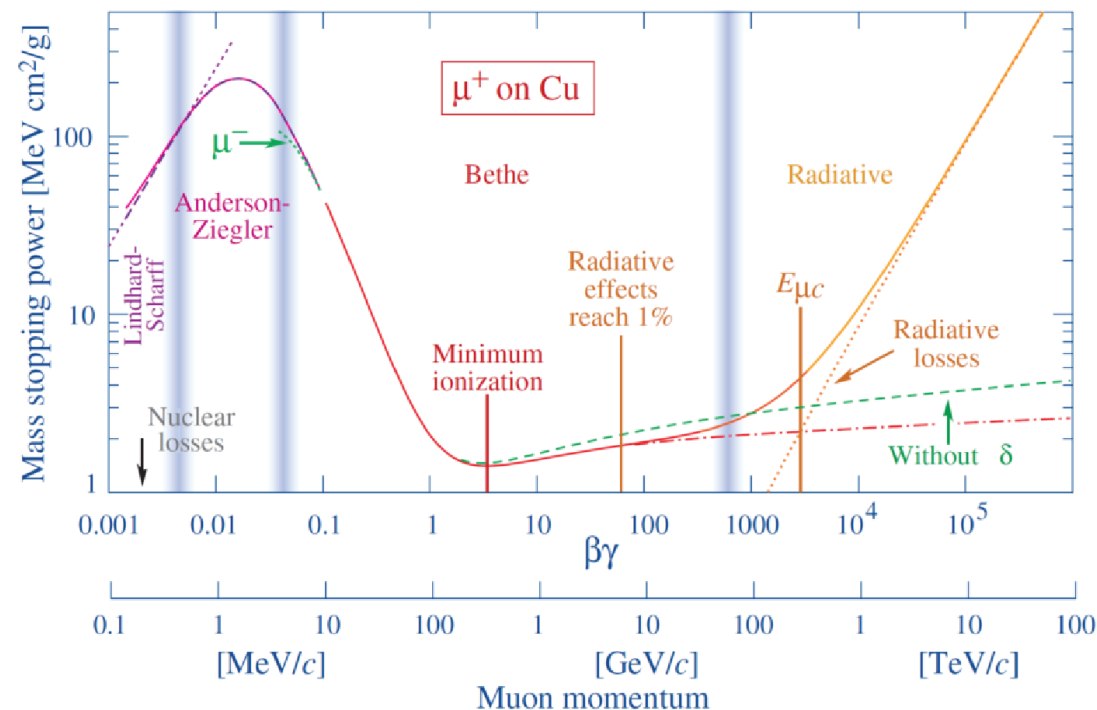
唐健 陈羽

中山大学物理学院

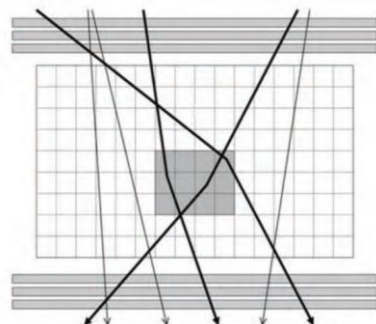


中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

- 缪子是轻子的一种，其性质和电子类似，但是质量是电子的207倍，韧致辐射损失的能量很少，因此具有很强的穿透力。
- 宇生缪子是宇宙线与大气作用产生的次级粒子。
- 缪子成像技术不需要引入额外的辐射源，完全依靠宇宙线缪子，无辐射危害。
- 缪成像分为散射和透射两种不同的成像原理。透射适合大型目标的无损成像，例如矿产、山体、冰川等。散射则适合对小体积的高Z材料成像



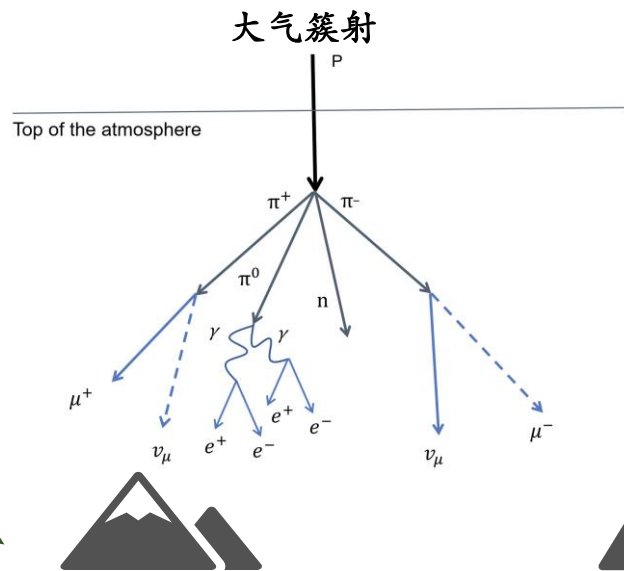
透射成像原理



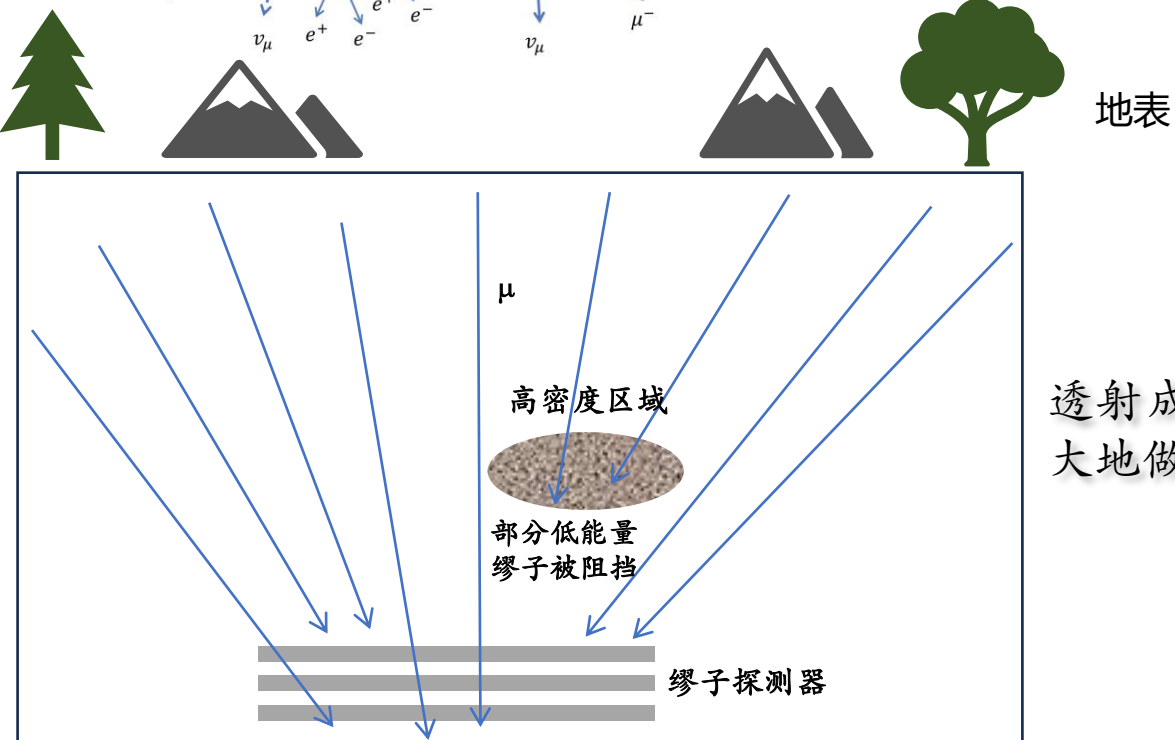
散射成像原理

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

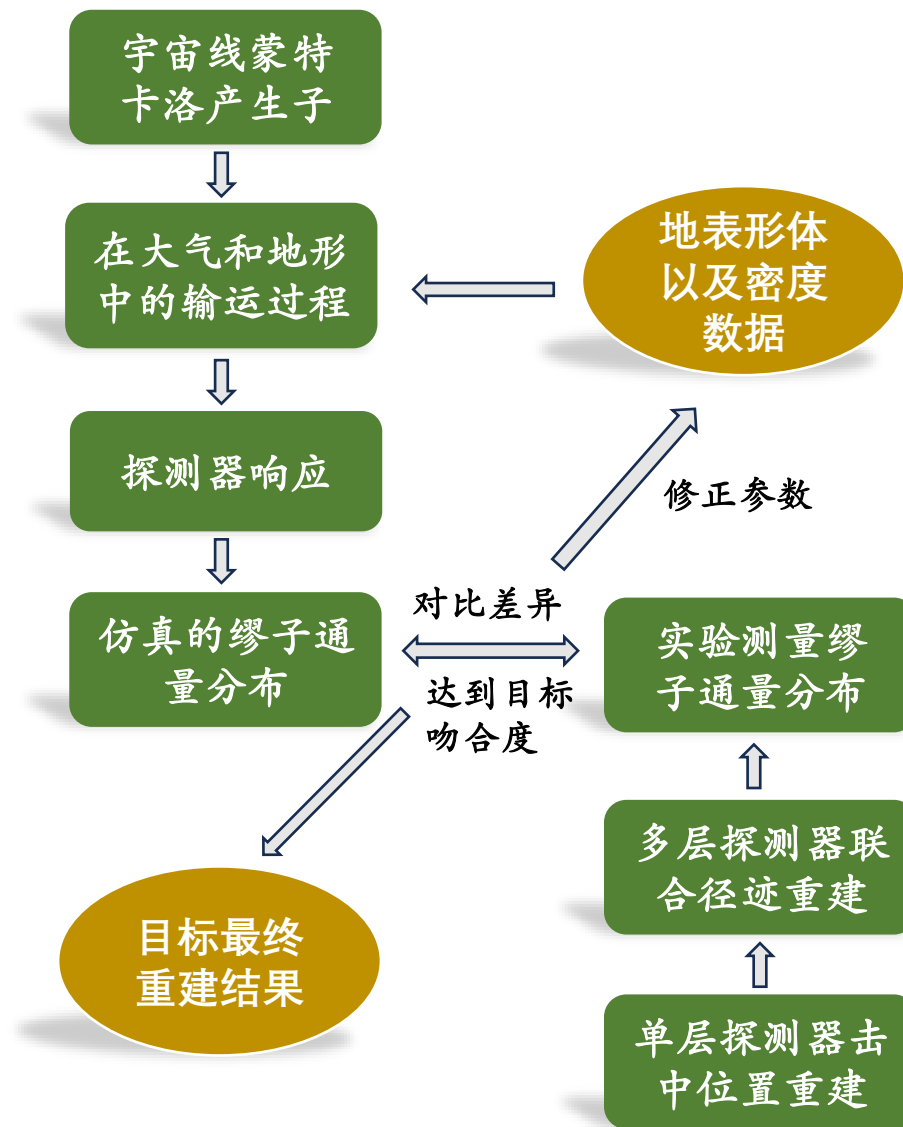
Bethe-bloch公式



- 原初宇宙线与大气发生相互作用，产生 π 、K介子，继而衰变为缪子等次级粒子



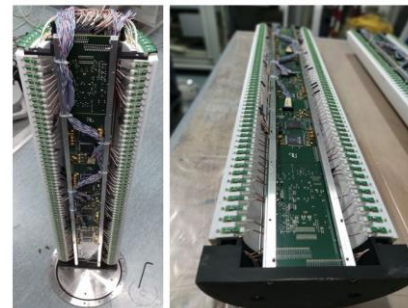
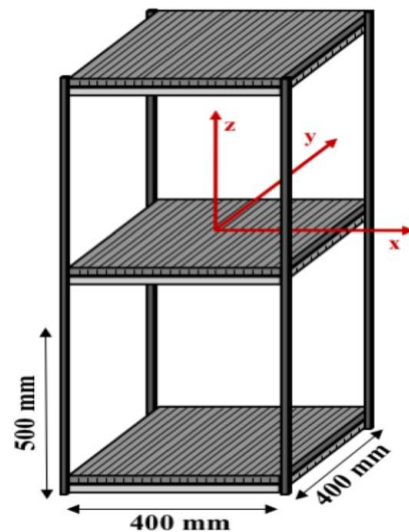
透射成像相当于对大地做“CT”成像



常见宇生缪子成像探测器与构型

➤ 气体探测器 (Micromegas)

- 性能优良
- 价格便宜
- 需要一定的维护



G. Saracino et al Sci Rep 7, 1181 (2017)

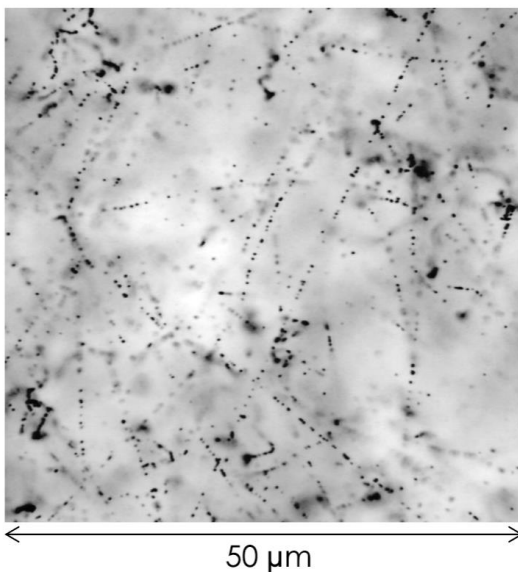


J. Li et al 2022 JINST 17 P05029

圆筒形构型性，适合地下
长条形平板构型
三菱柱构型+WLS光纤

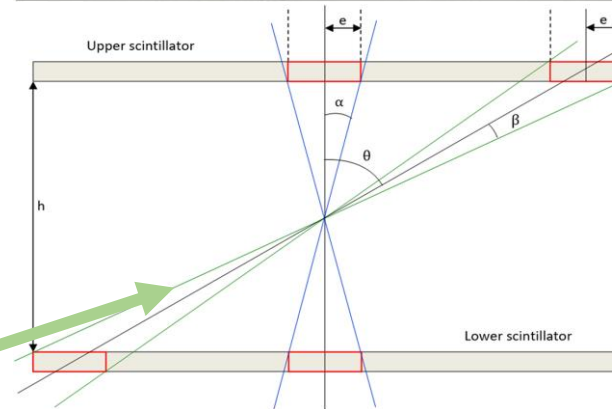
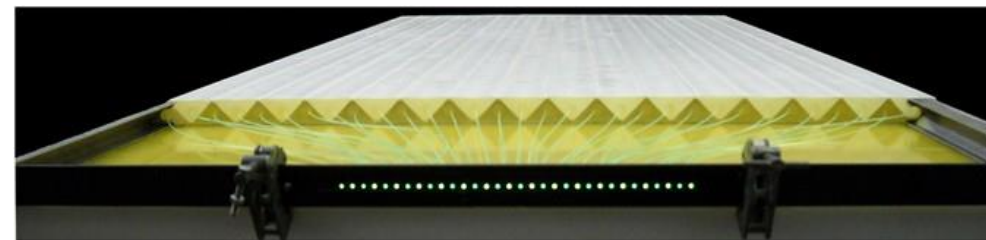
➤ 核乳胶探测器

- 分辨率极高
- 读出较为复杂
- 高温会融化



➤ 闪烁体探测器

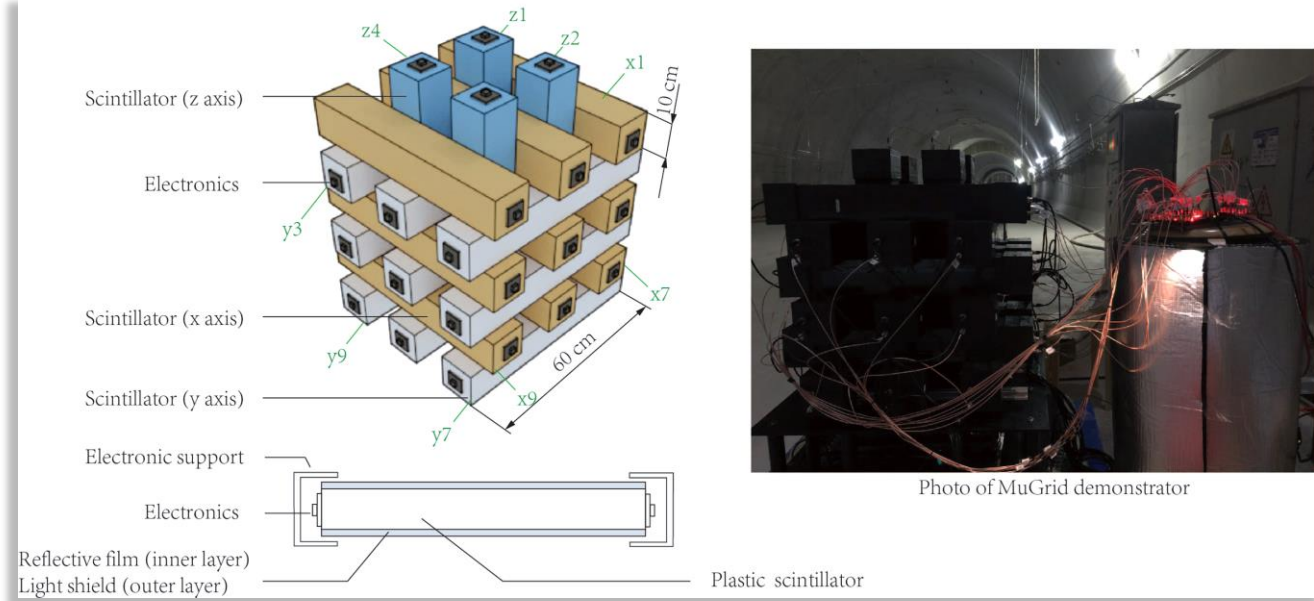
- 性能相对不如前两者
- 结构更灵活
- 环境适应能力强，可以部署到复杂环境中
- 需要在角分辨率和有效接收角之间取舍



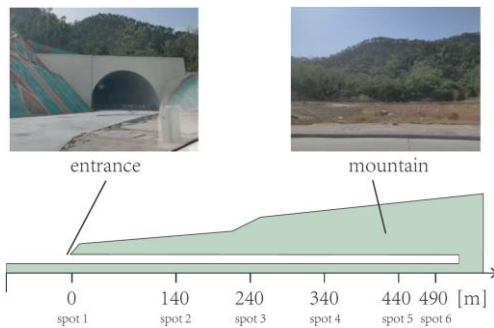
提高分辨率的方法

- 增大板间距
- 减小闪烁体尺寸

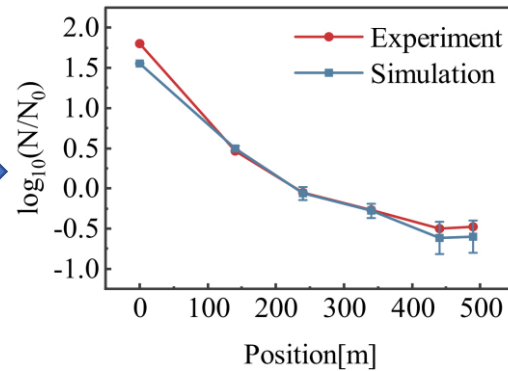
- 第一代探测器，主要为验证技术可行性并积累实验经验。
- 将探测器单元模块化，可以根据需要组合成为合适的几何构型。
- 实现了 4π 的全立体角接受范围。
- 在 Z 方向添加了探测器模块实现了对横向缪子的排除。
- 电子学读出系统可实现实时远程监控工作状态。
- 在中山大学珠海校区天琴山洞进行了野外实验，成功重建出山体在不同点位的厚度分布。



探测器构造&野外实验实景图

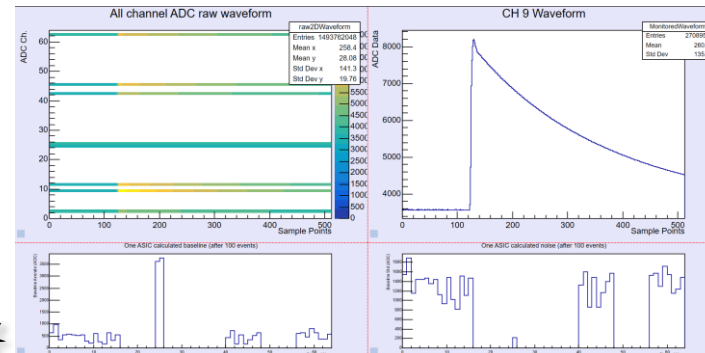


山洞外景 & 山体走向

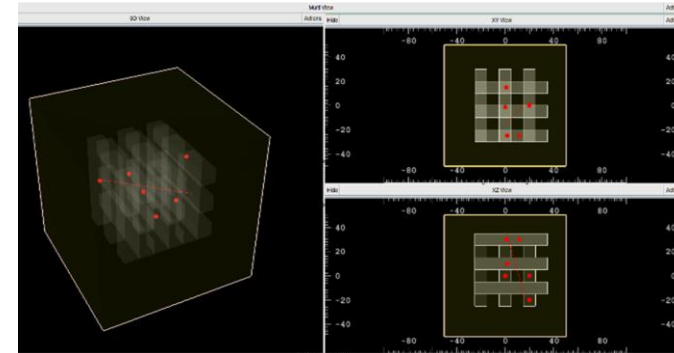


利用厚度分布模拟的缪通量与测量结果的对比

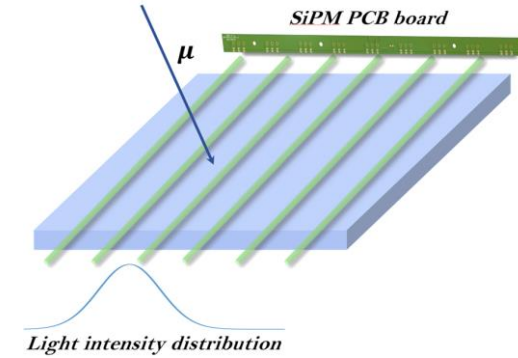
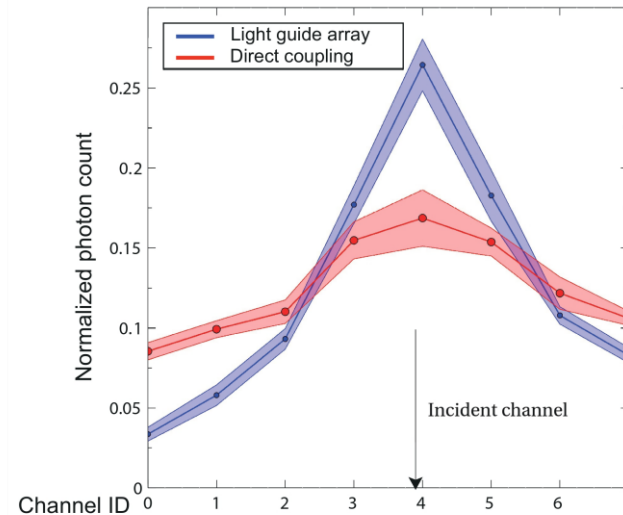
远程监控界面



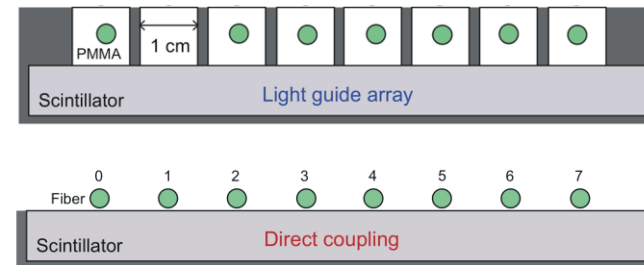
径迹重建界面



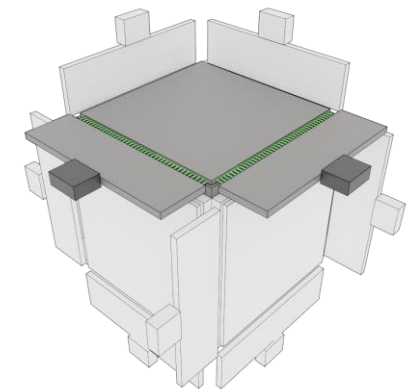
- 提出光导阵列分割闪烁体，避免了对闪烁体的切割，以较低的成本提升探测器的空间分辨率。
- 利用光纤收集闪烁光，从闪烁体侧面读出，降低通道开销的同时可以获得光强的二维分布，而后通过x、y两个方向探测到的光强分布，用重心重建或高斯分布拟合，可以重建出缪子击中的位置。
- 常见将光纤耦合到闪烁体内部或表面的设计，前者需要对做钻孔处理，对于大尺寸探测器加工难度较大，后者光收集效率相对较低。
- 新的光导阵列的设计增加了信号的显著度，在位置重建上更具优势，并且一方面简化了封装流程、降低了探测器成本，一方面保留了上代探测器模块化的优点，可以分块运输，在部署上更具灵活性。



利用光强重建
击中位置

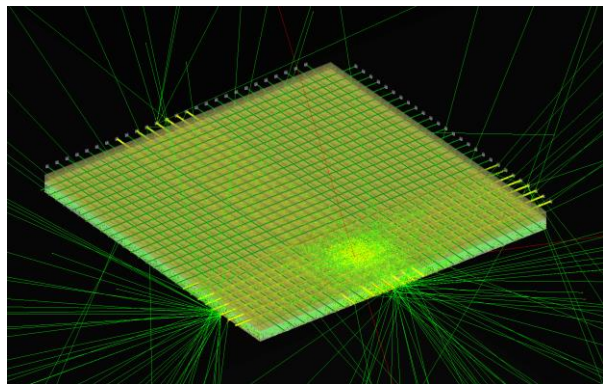


光导分割闪烁体，
提高信号显著度

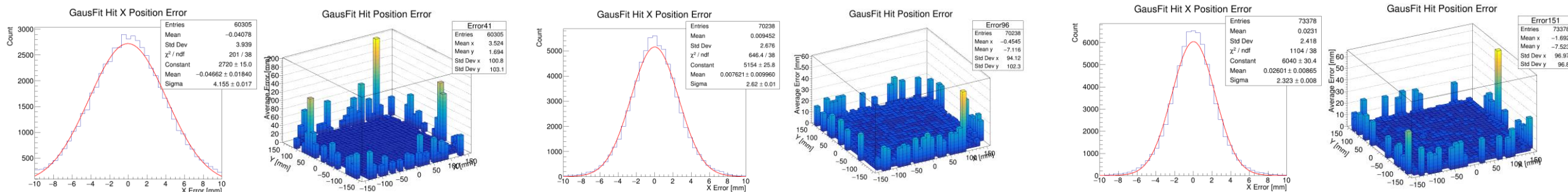


MuGrid_v2
整体结构示意

模拟结果对比



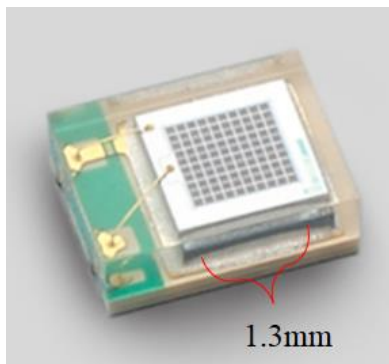
- 对光纤的三种耦合模式: 表面耦合、内部耦合、光导阵列进行了 Geant4模拟仿真。
- 闪烁体大小为30cm*30cm, 每个方向上通道数为27。
- 模拟结果显示光导耦合方式在三种模式中具有最好的空间分辨率



耦合方式	内部耦合	表面耦合	光导阵列
重建方法			
重心重建分辨率/mm	15.46 ± 0.82	3.576 ± 0.012	2.706 ± 0.009
拟合重建分辨率/mm	4.155 ± 0.017	2.62 ± 0.01	2.323 ± 0.008

分辨能力
最佳

➤ SiPM选型



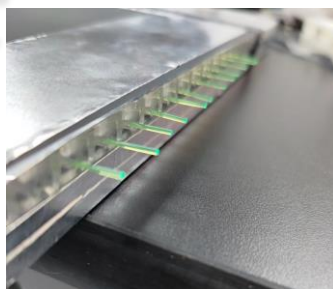
➤ S13360 series

- Size: 1.3mm × 1.3mm
- Gain: 1.7×10^6
- V_{BR} : 53 ± 5 V

➤ WLS光纤选型

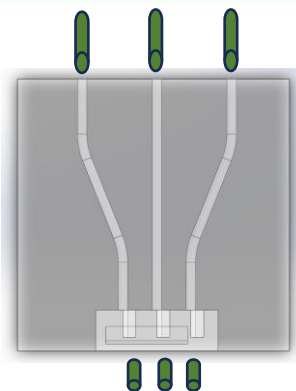
➤ Kuraray Y-11

- Diameter: 1mm
- Emission Peak: 476 nm
- Attention Length: 3.5 m



- 利用宇生缪子对探测器样机进行了通道均匀性测试，统计每个通道的平均计数率以及信号幅度。

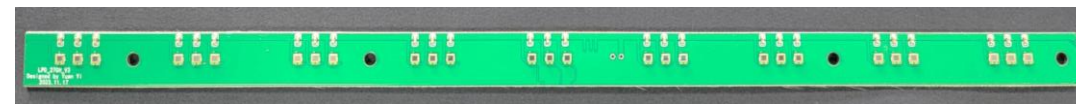
➤ 光纤耦合机械结构设计



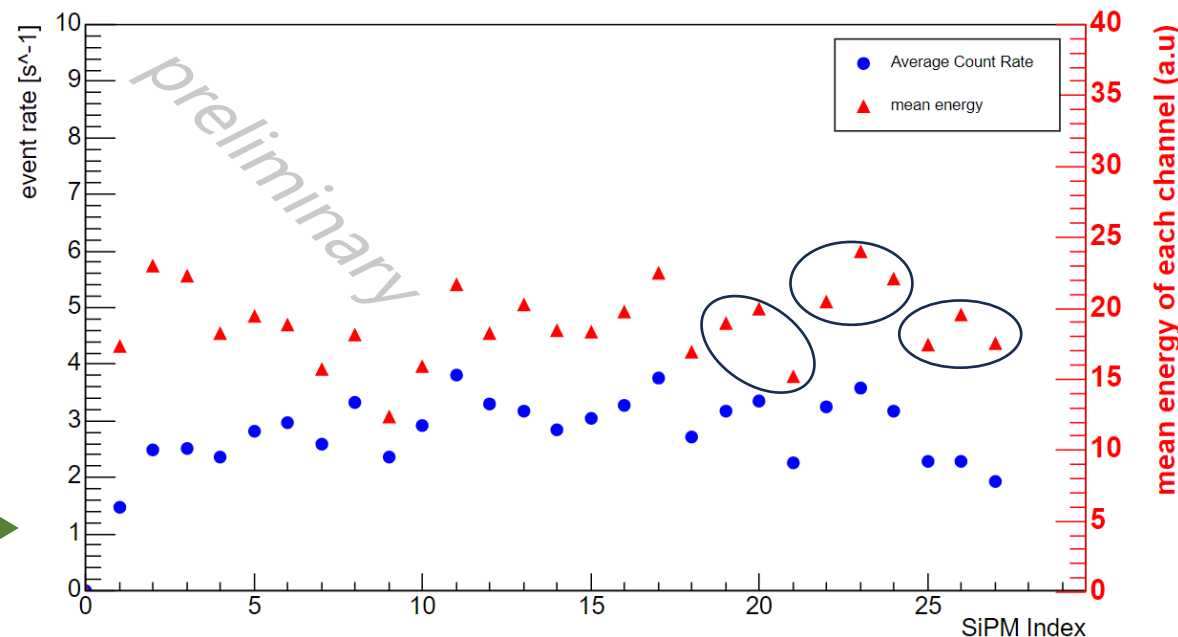
光纤收束固定
后耦合到SiPM



➤ SiPM载板

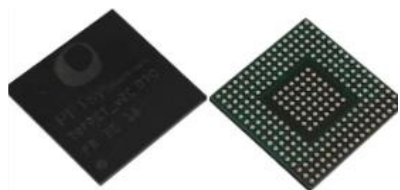


➤ 通道均匀性测试



- 采用了商用SiPM信号读出芯片——TOFPET2 ASIC芯片做电子学读出。
- 提供了T1、T2、E 三种可以独立设置阈值的甄别器，其调节步长依次变大，可以组合不同的触发逻辑。
- 对于小信号的应用，主要采用T1和T2组合来判定过阈。

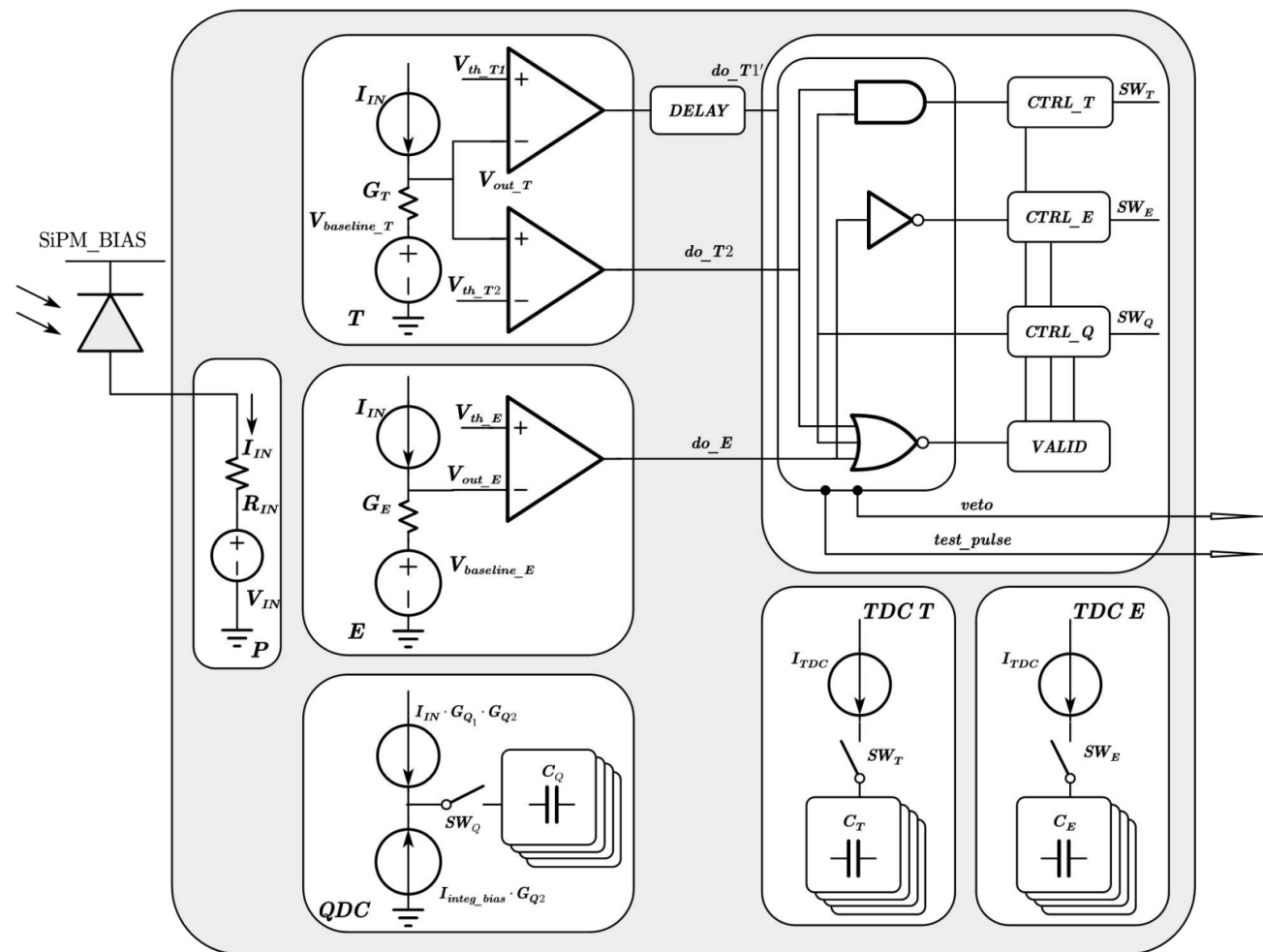
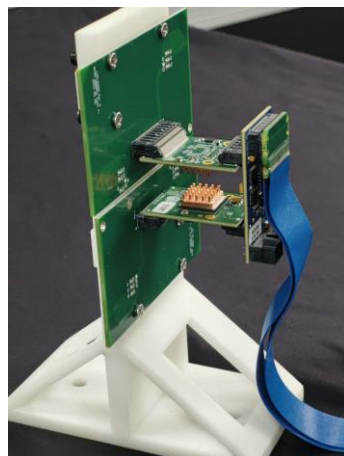
➤ ASIC 选型



➤ TOFPET2 ASIC features

- 64 independent channels
- Max channel hit rate: 600 kHz
- TDC time binning: 30 ps.
- Dynamic range: 1500 pC.

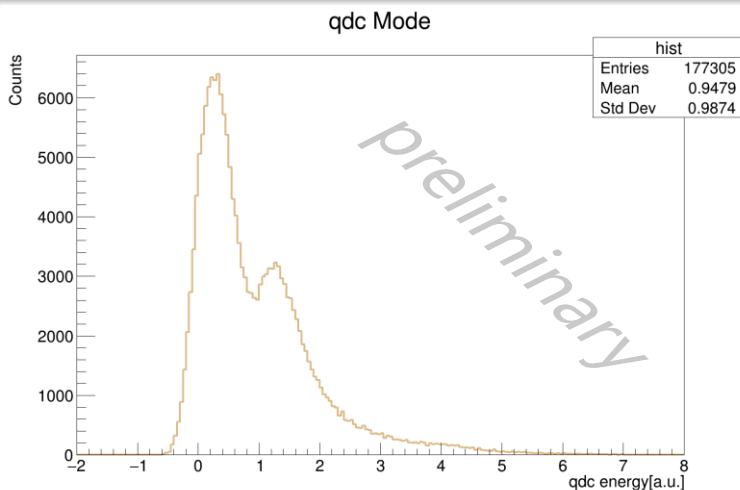
➤ 电子学前端板



➤ TOFPET2 ASIC 逻辑框图

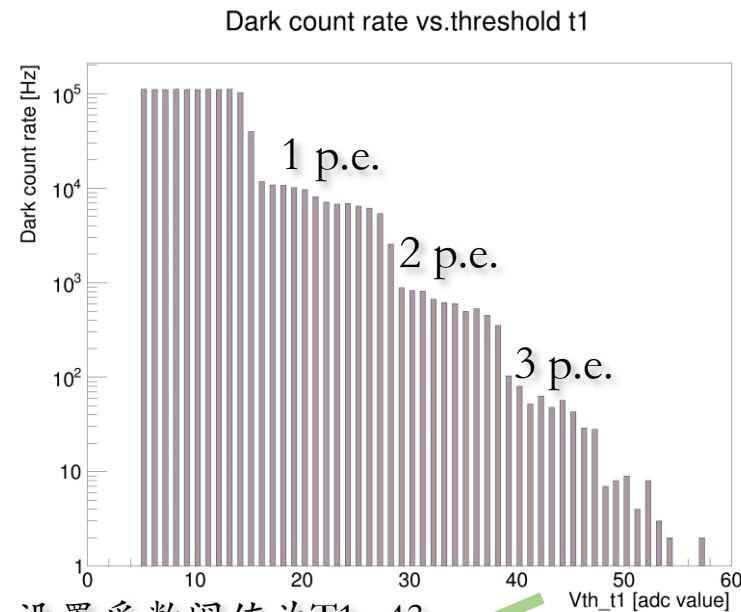
- TOFPET2 ASIC提供了QDC & ToT 两种信号测量方式，由于芯片动态范围较大，QDC模式LSB在5-20p.e. 左右，不能准确反应光强，影响重建的精度
- ToT模式相比之下，对小信号和超大信号有较好的甄别能力。但是具有一定的非线性。
- 在两种模式下分别进行了LED测试，ToT模式的能量分辨显著高于QDC模式，因此后续都采用ToT模式进行采数。

只使用T1甄别器的阈值做判选，进行暗计数标定测试，随阈值升高可以看到明显的“台阶”效应

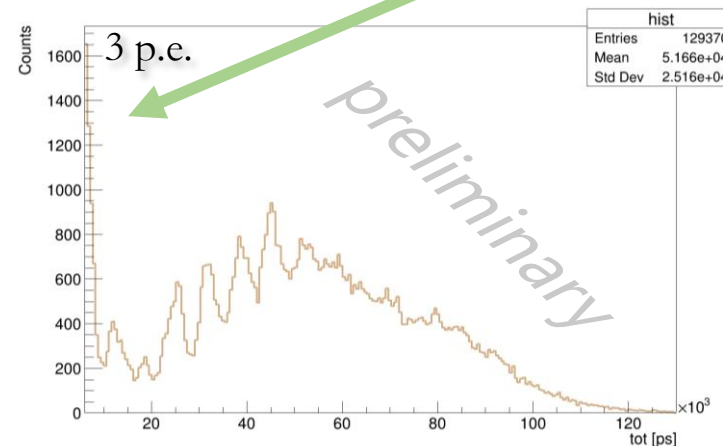


qdc 模式，无法区分光子数

采集到的第一个峰即为当前阈值对应的光子数，后续可以精确计数至约10p.e. 的动态范围

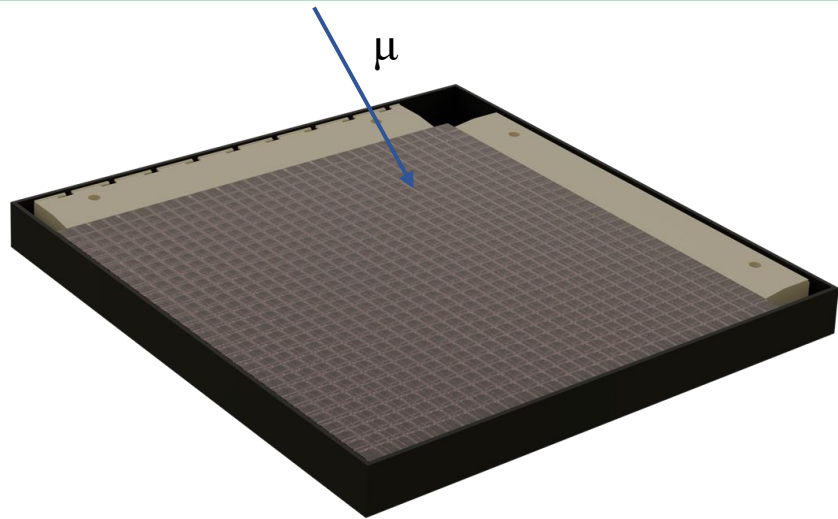


设置采数阈值为T1=43

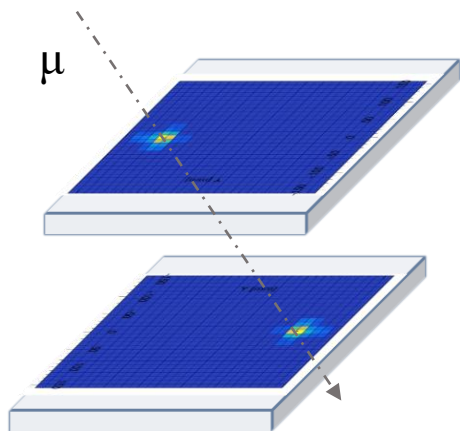


ToT模式多光电子谱标定结果

MuGrid_v2.0 工作流

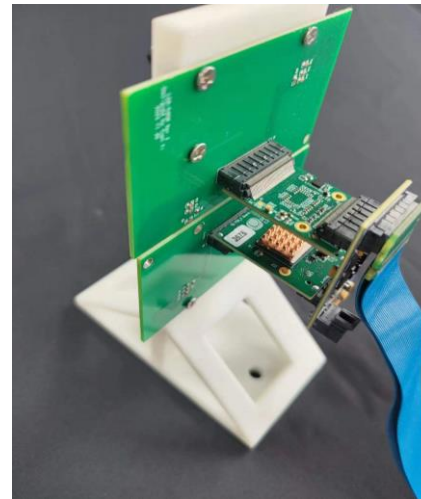


MuGrid detector



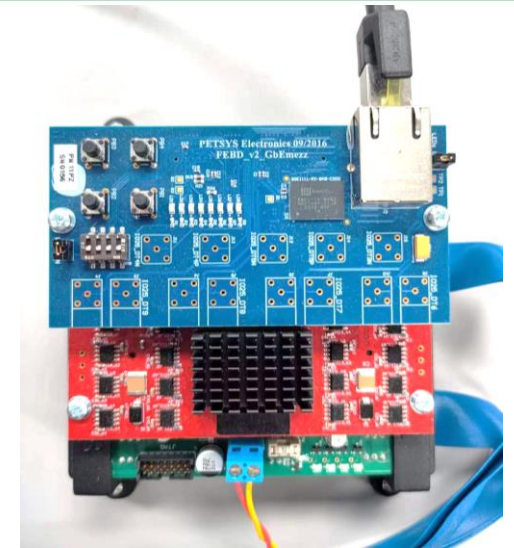
Track reconstruction

Current signal



FEB module &
TOFPET ASIC

Digital signal



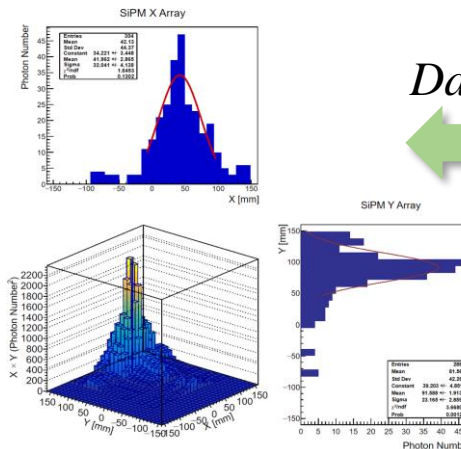
Mother board

Data acquisition



Upper computer

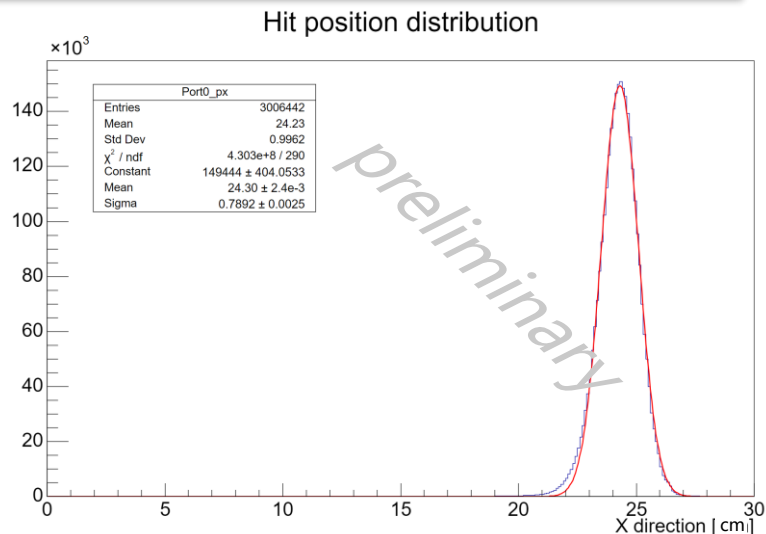
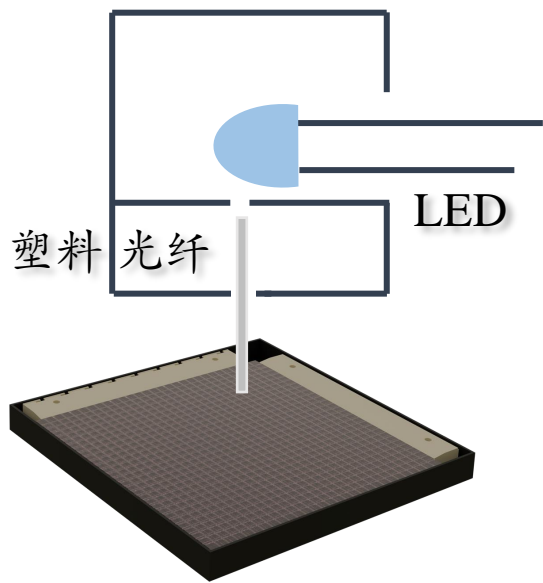
Analysis



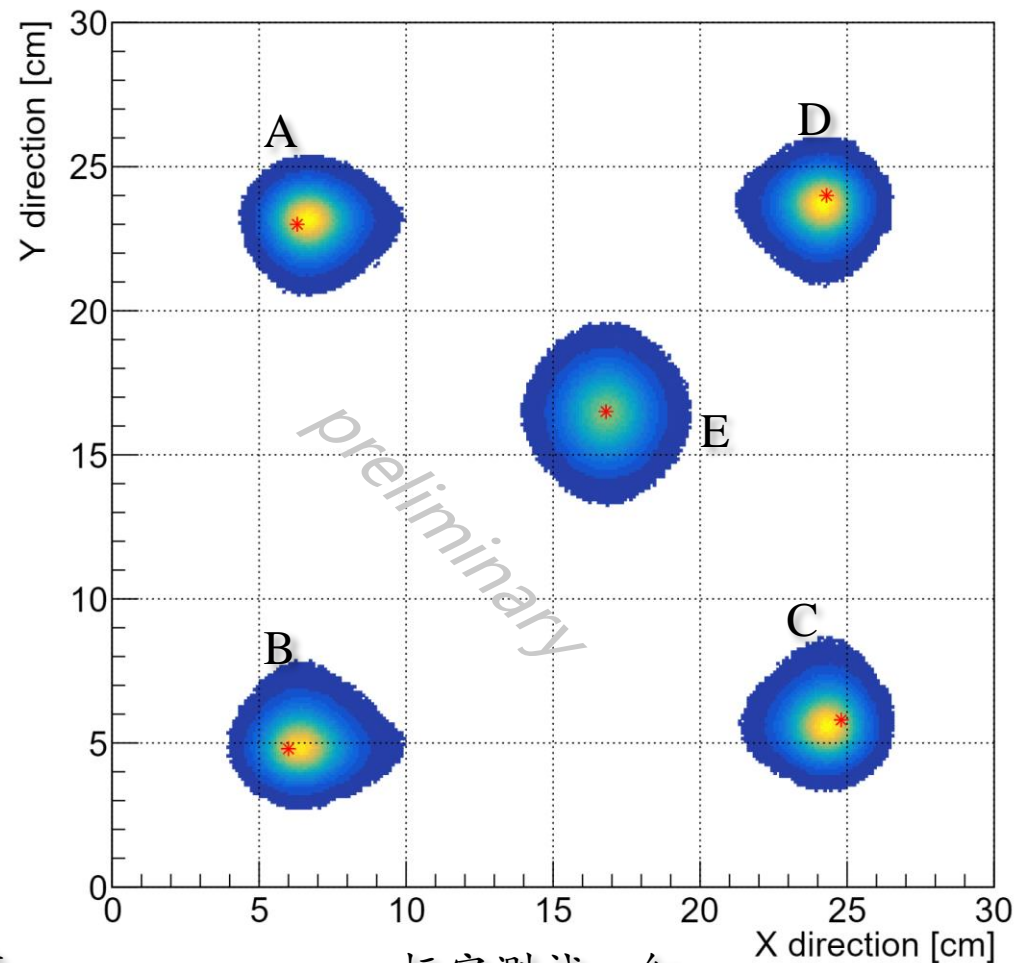
Hit position reconstruction

MuGrid_v2.0 探测器性能初步测试

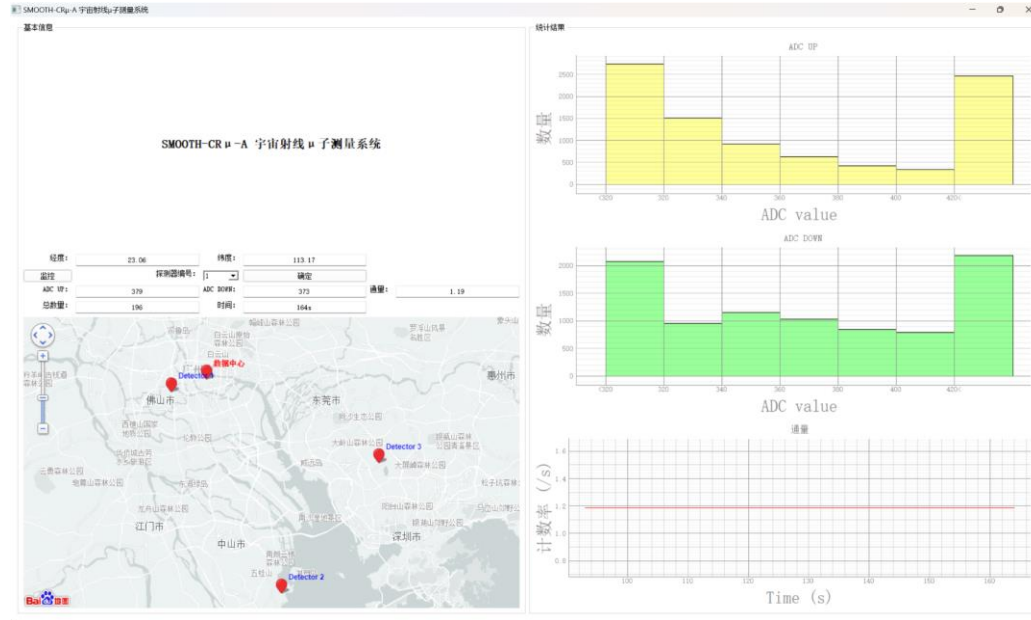
- 采用了LED+光纤的方法对探测器进行了位置分辨性能标定，在探测器上一共选取了5个点进行测试。
- 右图采用重心加权法对探测器数据进行击中位置的重建。
- 当前重建结果有一定程度的畸变，边缘点的重建位置相较真实位置向中间偏移，需要对算法进行优化以矫正偏差。
- 当前空间分辨率约为8mm，后续修正算法以期分辨率进一步提升。



以D点为例，对其在X方向上的重建位置分布进行拟合，sigma约为0.8cm

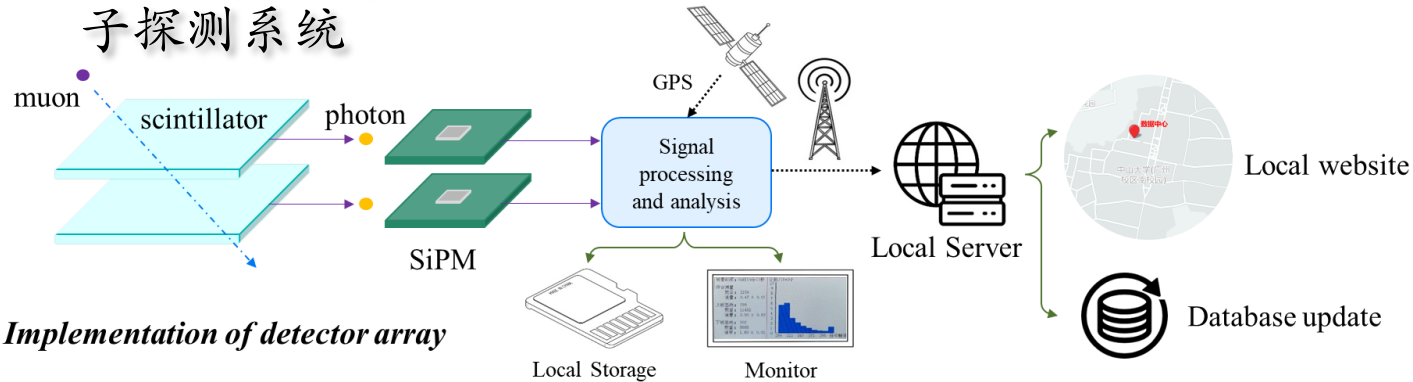


标定测试，红点为真实位置

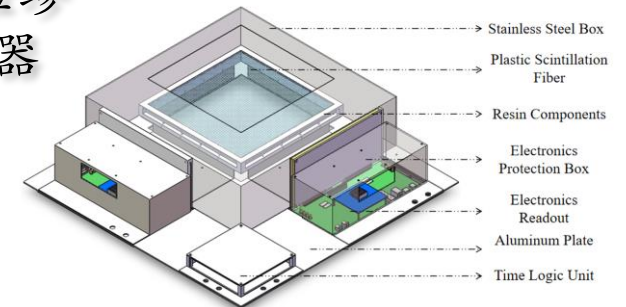


CRMuSR

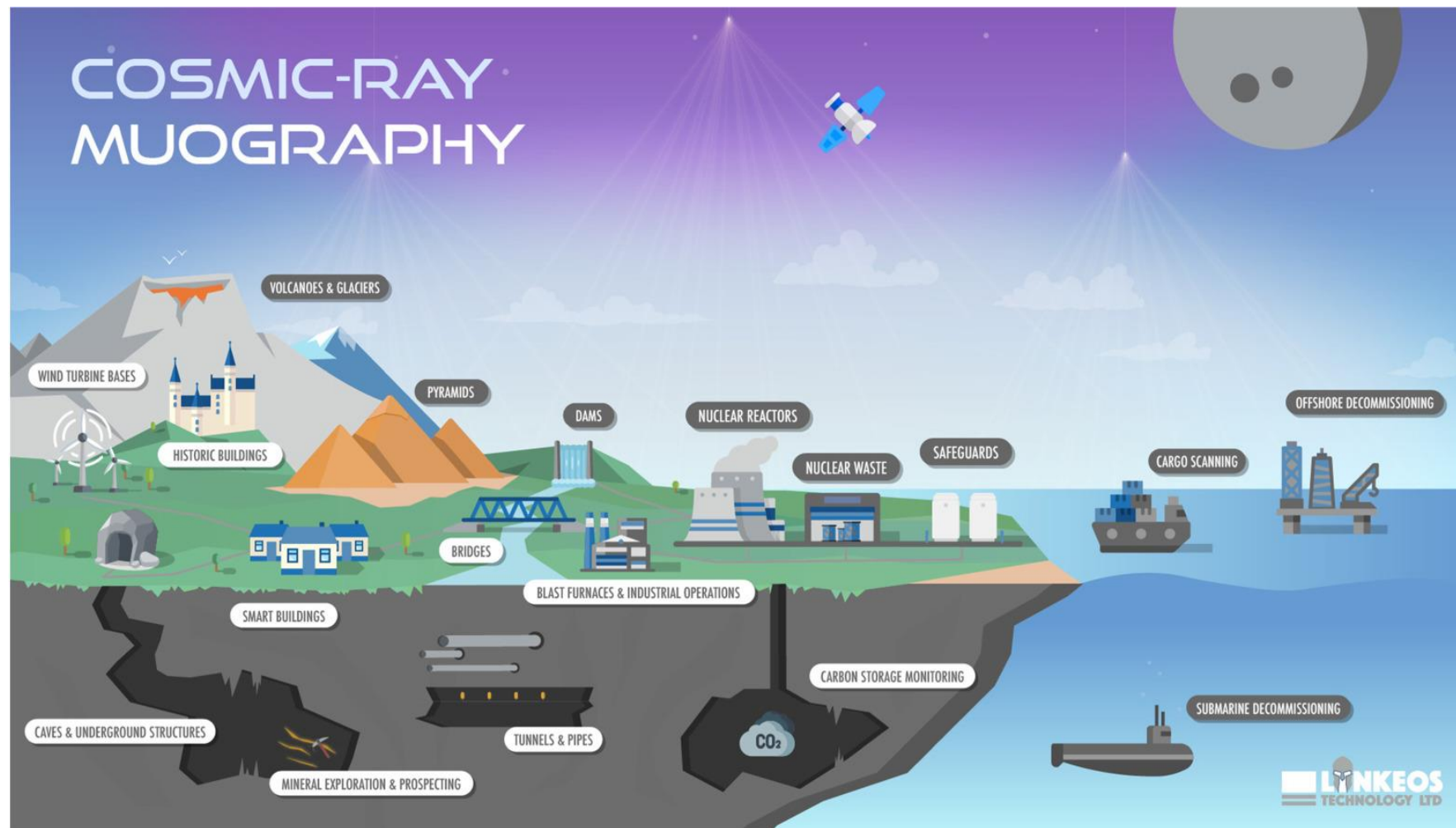
便携式宇生缪子探测系统



COMET实验缪子束流监测器



- 提出一种利用光导阵列提升闪烁体探测器分辨率的方法。
- 用TOFPET2 ASIC, 使用ToT测量模式, 标定SiPM多光电子谱。
- 制作了探测器样机, 标定了空间分辨率接近8mm, 有望通过优化算法进一步提升。
- 缪子成像技术作为绿色环保的新兴成像技术, 在多个交叉学科有广阔的应用前景。
- 国内缪子成像技术蓬勃发展, 相关应用方兴未艾, 期待缪子成像技术应用到更多行业更多场景。





敬請老師同學
批評指導



敬請老師同學
批評指導