



# 对低Z和高Z材料进行鉴别的 缪子散射成像系统

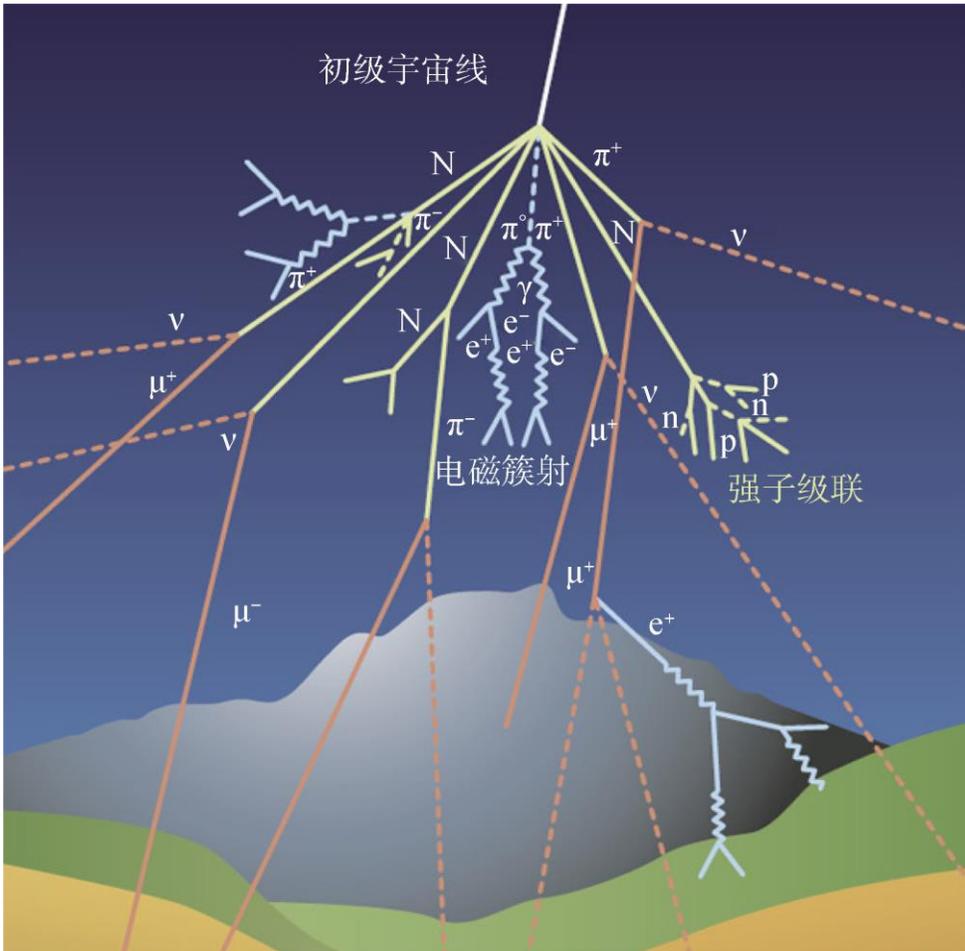
李慧玲

山东高等技术研究院

2023年8月11日，湖北恩施

第二十一届全国核电子学与核探测技术学术年会

# 宇宙线缪子



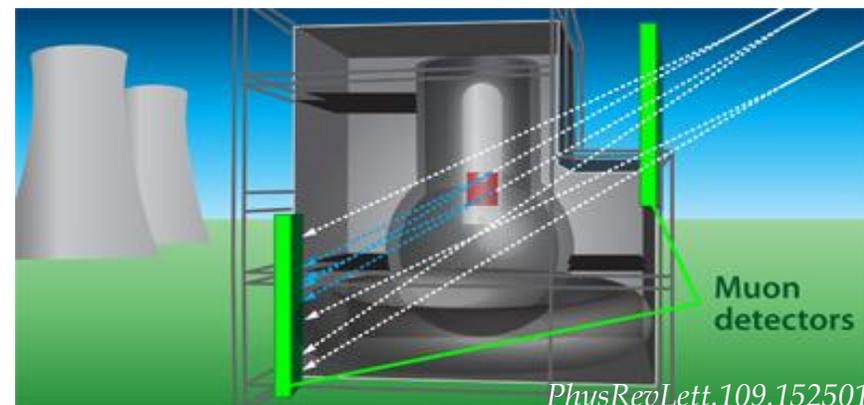
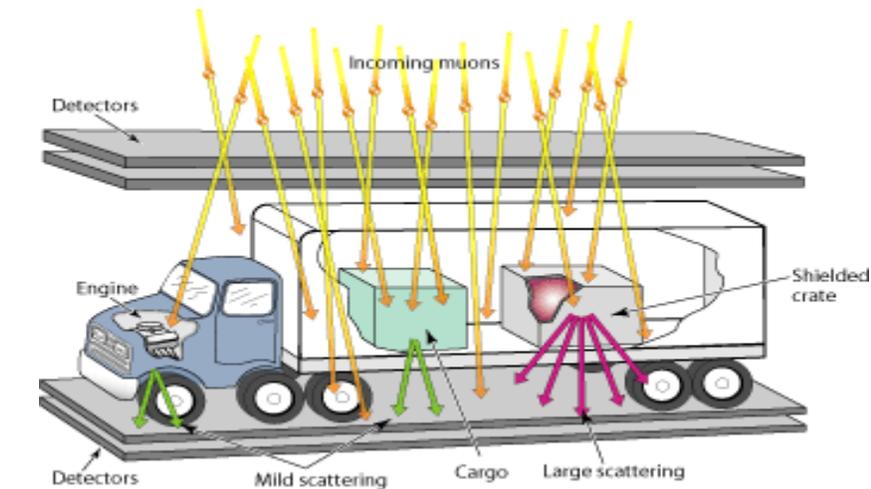
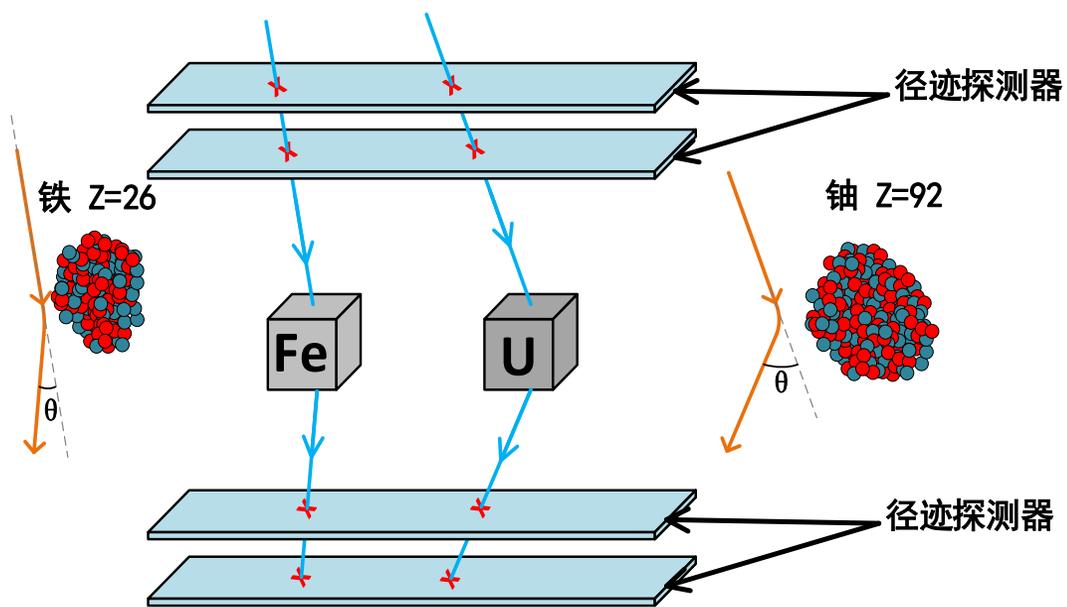
初级宇宙射线进入大气后发生大气簇射:

- 大气层中的原子核(主要是氮和氧)发生高能碰撞, 产生次级宇宙射线粒子。
- 其中能够到达海平面的绝大部分是 $\mu$ 子

宇宙线缪子是天然的粒子源, 在海平面处的通量约为  $60 - 70\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$ :

- 大约每秒有1个缪子穿过手掌
- 通量在天顶(垂直)处最大, 近似正比于 $\cos^2(\theta)$
- 平均能量为3-4GeV

# 缪子散射成像

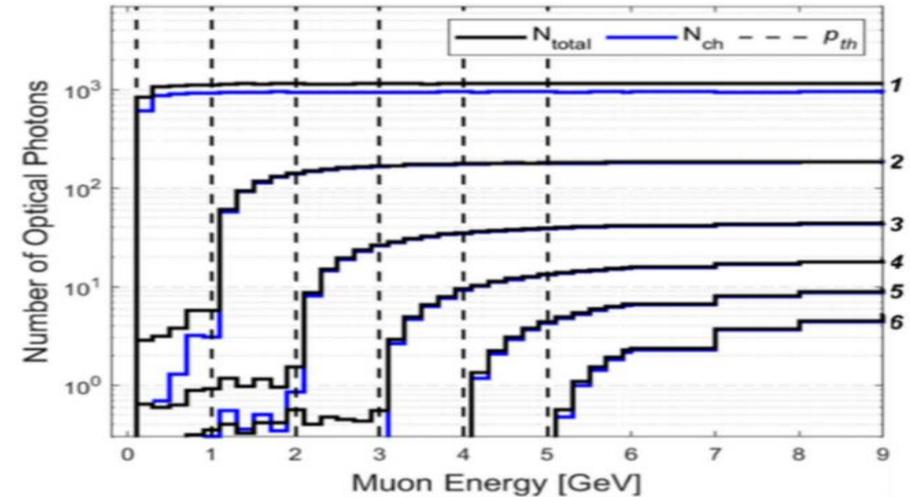
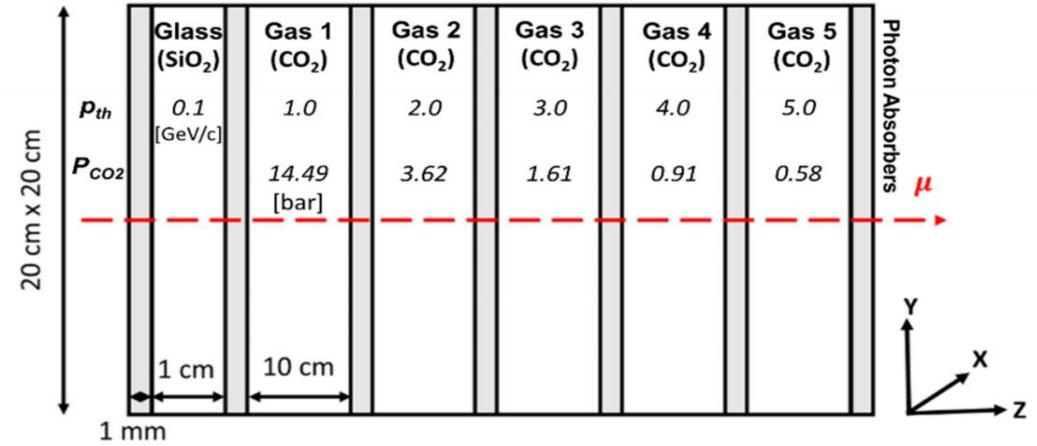
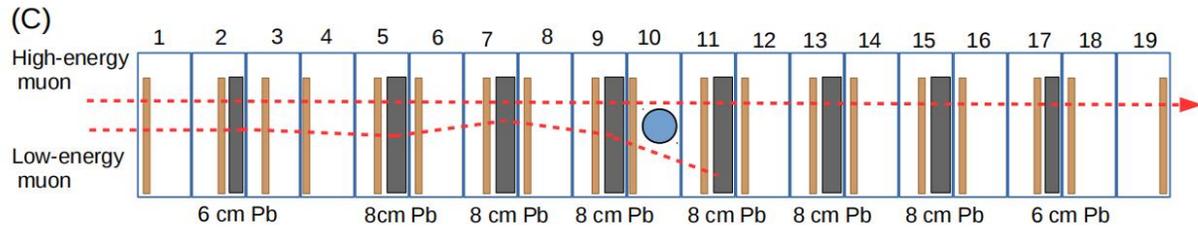
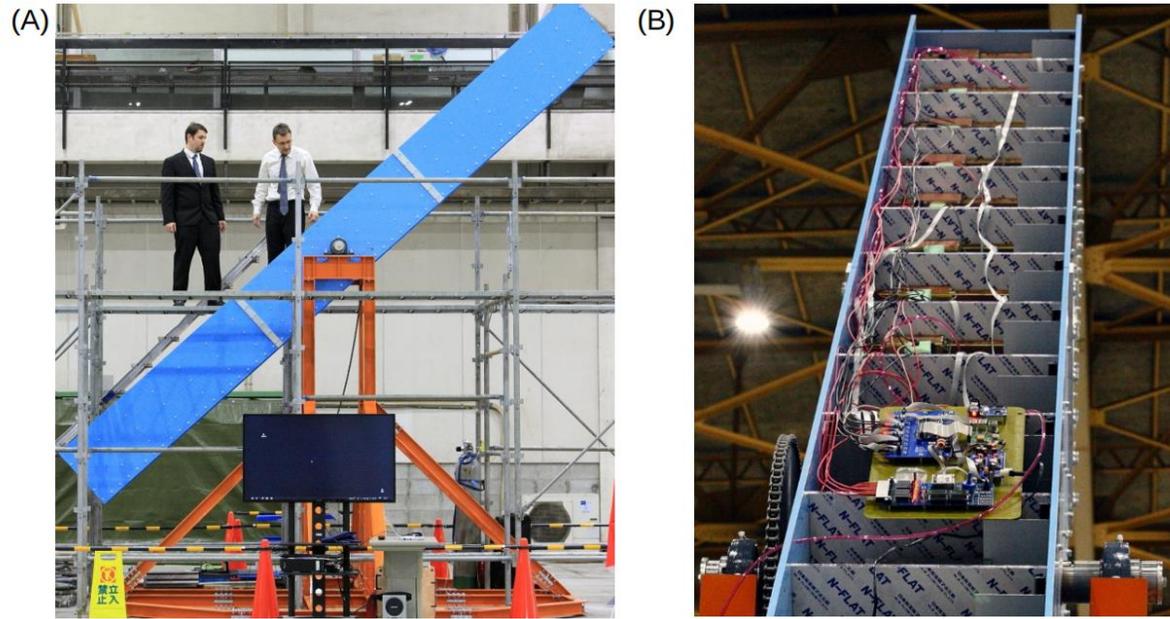


$$\sigma_{\theta} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[ 1 + 0.038 \ln \left( \frac{x}{X_0} \right) \right]$$

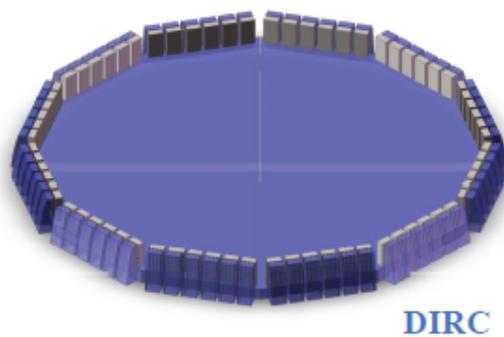
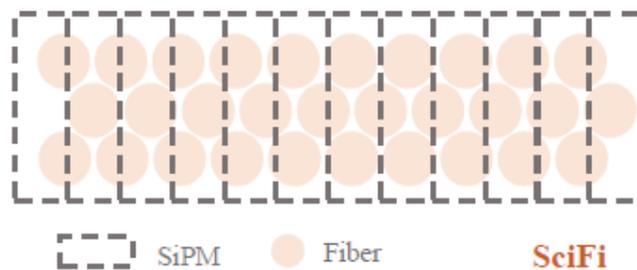
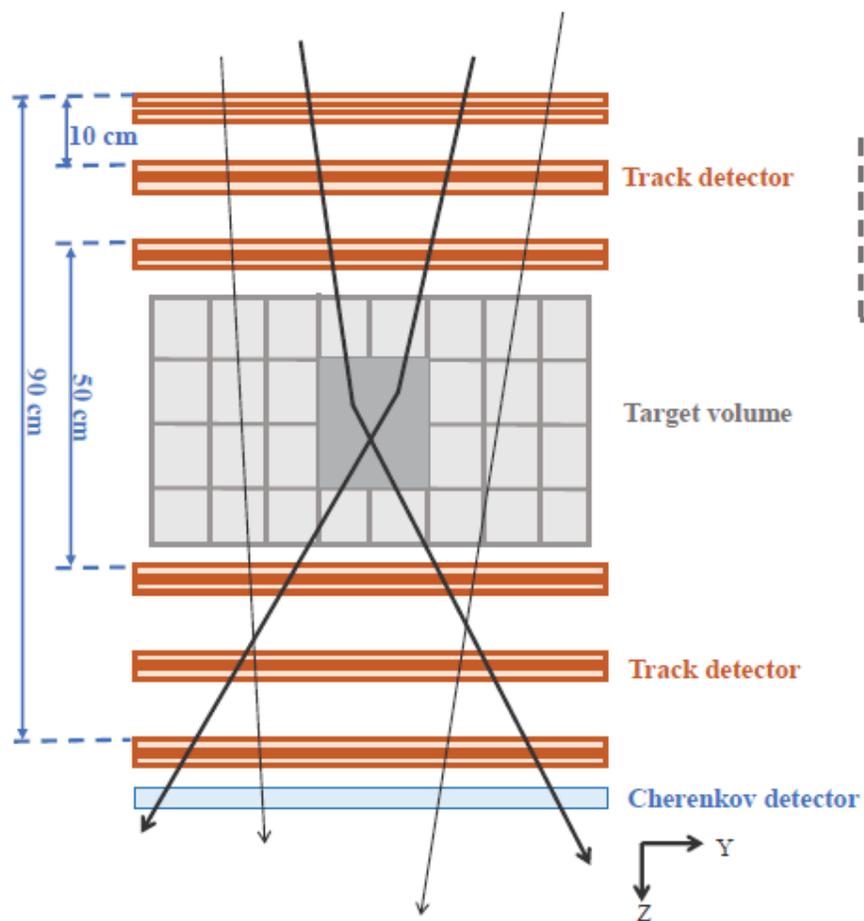
$$X_0 = \frac{716.4 (g/cm^2)}{\rho} \frac{A}{Z(Z+1) \log(287/\sqrt{Z})}$$

- 缪子在不同物质中的多次弹性散射导致的径迹偏转程度不同。
- 通过测量缪子在进入待测物质前后的径迹，可对重核材料进行鉴别，位置探测器精度0.1mm量级（间距10cm量级下）
- 缺少对粒子动量的测量，难以对毒品、爆炸物等低Z材料进行鉴别。

# 缪子动量测量方法



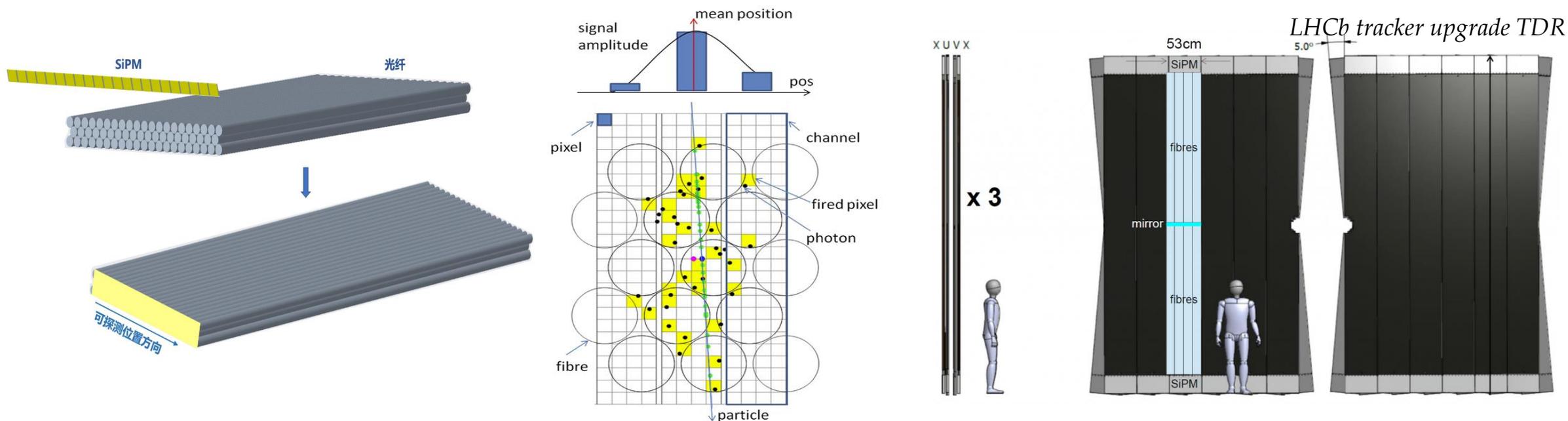
# 成像系统方案



2023 JINST 18 P08008

- 塑料闪烁光纤探测器实现缪子位置的高分辨测量
- 内反射切伦科夫探测器实现低能缪子动量测量
- 固体探测器, 结构紧凑, 性能相对更稳定

# 成像系统：塑料闪烁光纤探测器

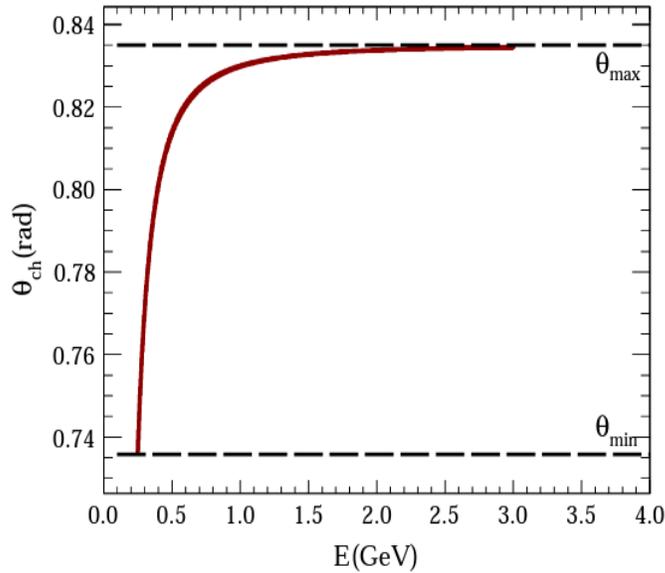
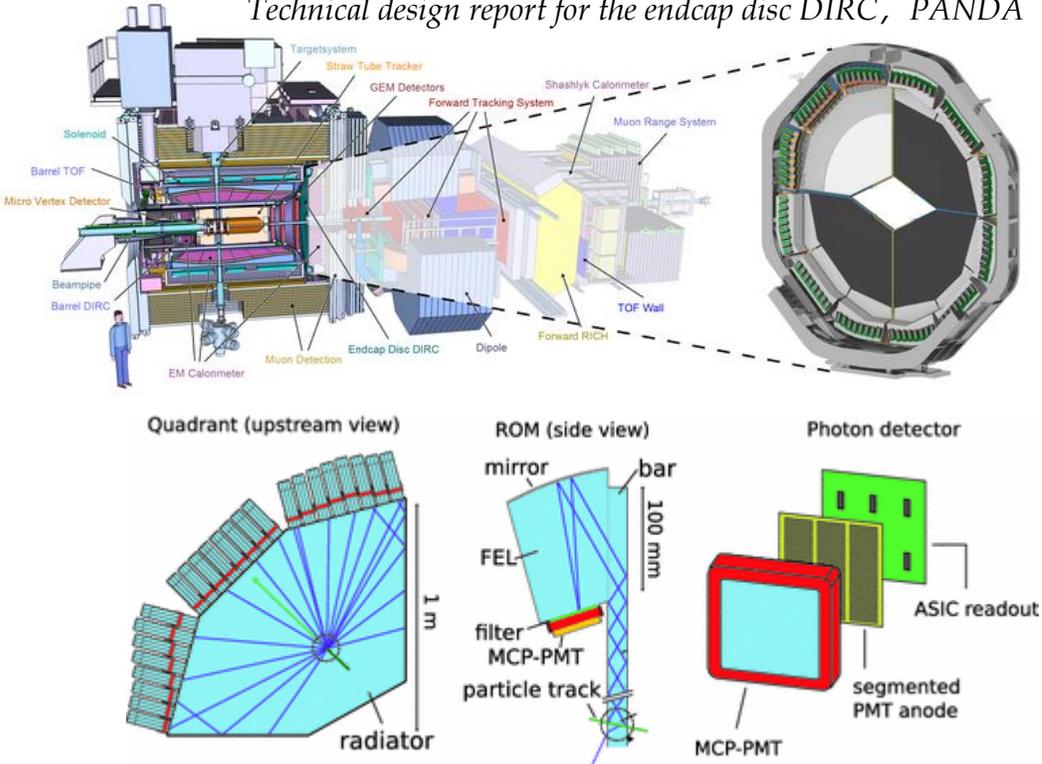


- 塑料闪烁光纤探测器：光纤探测主体和1维SiPM光电转换
- 探测器位置分辨正比于光纤直径，约为 $d/\sqrt{12}$
- 目前在研的最细塑料闪烁光纤直径为 $125\mu\text{m}$ ，可实现与传统硅微条探测器相当的位置分辨能力

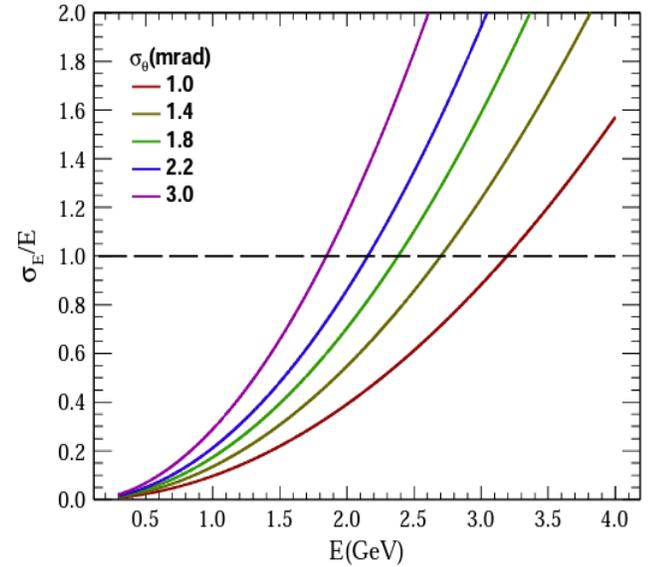
LHCb SciFi 径迹探测器  
长2.5m，位置分辨 $<100\mu\text{m}$

# 成像系统：内反射切伦科夫探测器

Technical design report for the endcap disc DIRC, PANDA



$$\cos \theta_{\text{ch}} = \frac{1}{n\beta}, \quad \beta > \beta_{\text{thr}} = \frac{1}{n}$$

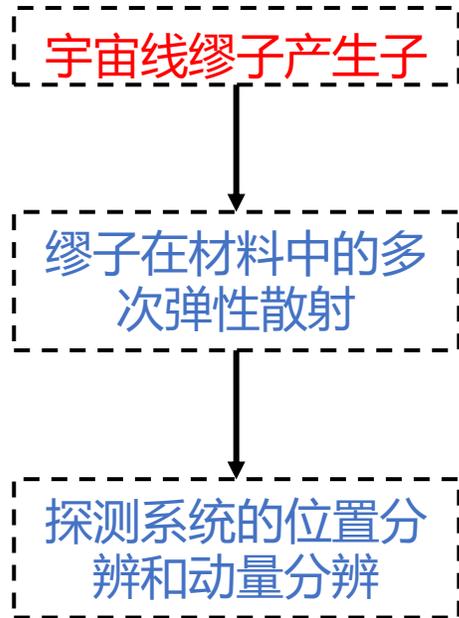


$$\sigma_E = \frac{E\beta}{1 - \beta^2} \sigma_\beta, \quad \sigma_\beta = \beta \sigma_\theta \tan \theta_{\text{ch}}$$

- 切伦科夫探测器辐射体采用熔融二氧化硅，可实现米量级大尺寸加工，可精确测量低能宇宙线缪子动量
- PANDA的端盖DIRC探测器2cm厚辐射体预计实现1.2mrad-2mrad 角度分辨

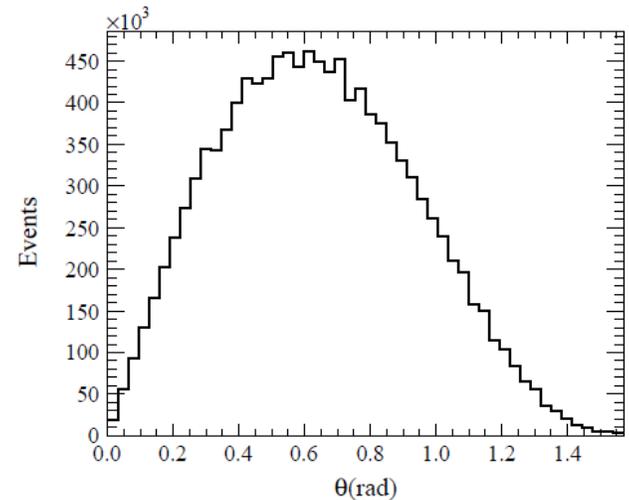
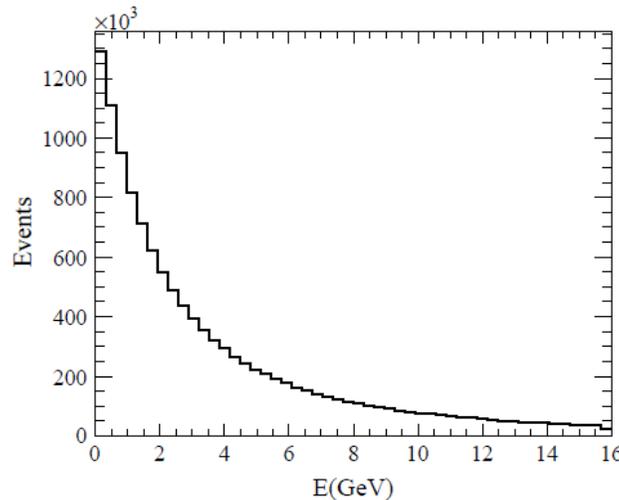
# 缪子物理过程模拟

缪子的Toy MC模拟



海平面上的缪子通量：低能修正后的Gaisser公式 (*arXiv:1509.06176*)

$$\frac{dI}{dE d \cos \theta} = 0.14 \left[ \frac{E}{\text{GeV}} \left( 1 + \frac{3.64(\text{GeV})}{E(\cos \theta^*)^{1.29}} \right) \right]^{-2.7} \left[ \frac{1}{1 + \frac{1.1E \cos \theta^*}{115\text{GeV}}} + \frac{0.054}{1 + \frac{1.1E \cos \theta^*}{850\text{GeV}}} \right];$$
$$\cos \theta^* = \sqrt{\frac{(\cos \theta)^2 + P_1^2 + P_2(\cos \theta)^{P_3} + P_4(\cos \theta)^{P_5}}{1 + P_1^2 + P_2 + P_4}}$$



# 缪子物理过程模拟

缪子的Toy MC模拟

宇宙线缪子产生子

缪子在材料中的多次弹性散射

探测系统的位置分辨和动量分辨

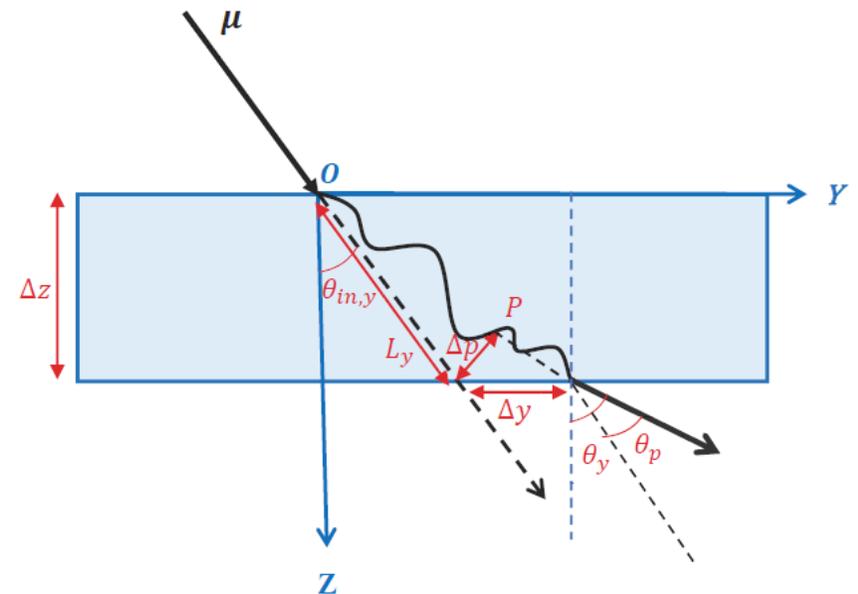
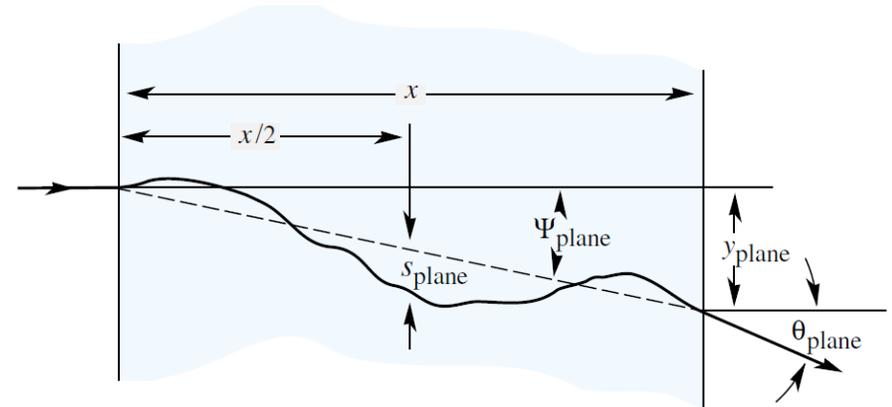
在粒子坐标系 $x'y'z'$ 下抽样得到缪子穿过 $L$ 距离材料后的多测弹性散射效应

$$\Delta y' = c_1 L \theta_0 / \sqrt{12} + c_2 L \theta_0 / 2 ;$$

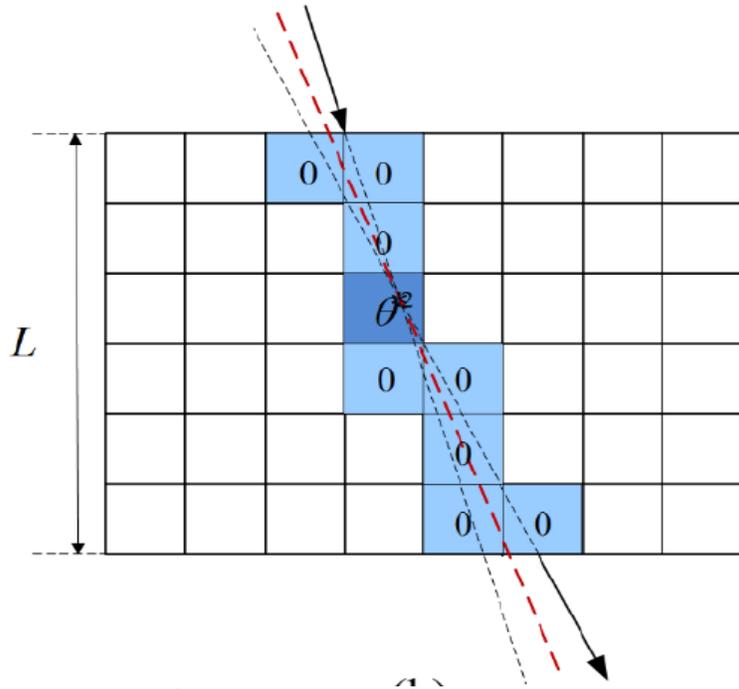
$$\theta_{y'} = c_2 \theta_0 .$$

粒子坐标系中的出射位置和方向信息变换到探测器坐标系 $xyz$ 之后

$$\Delta y = \frac{\Delta p \cos \theta_p}{\cos \theta_y}, \quad \theta_y = \theta_{in,y} + \theta_p .$$



# 重建算法

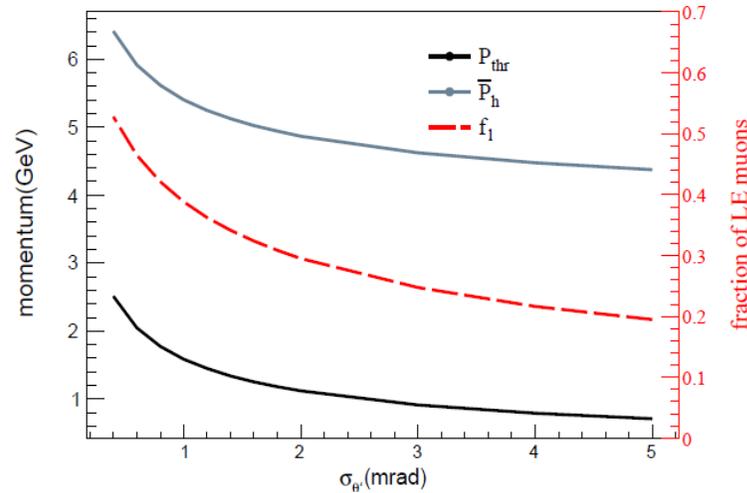


PoCA算法:

$$s_i^2 = \frac{1}{2} \left[ \left( \theta_{x_i}^{\text{out}} - \theta_{x_i}^{\text{in}} \right)^2 + \left( \theta_{y_i}^{\text{out}} - \theta_{y_i}^{\text{in}} \right)^2 \right].$$

无动量测量:

$$\lambda_k^{\text{ave}} = \left( \frac{\bar{\beta} c \bar{P}}{13.6 \text{ MeV}} \right)^2 \frac{1}{N_k L_k} \sum_{i=1}^{N_k} s_i^2.$$



重建得到的切伦科夫角度

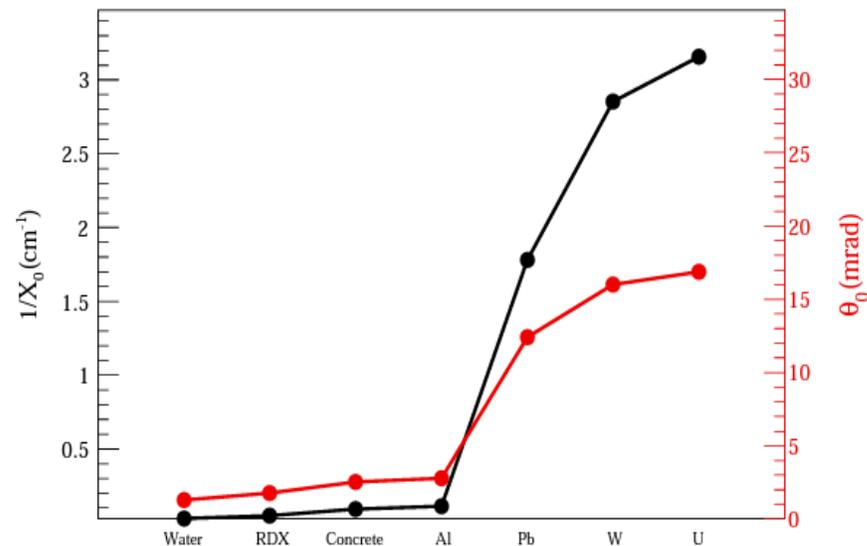
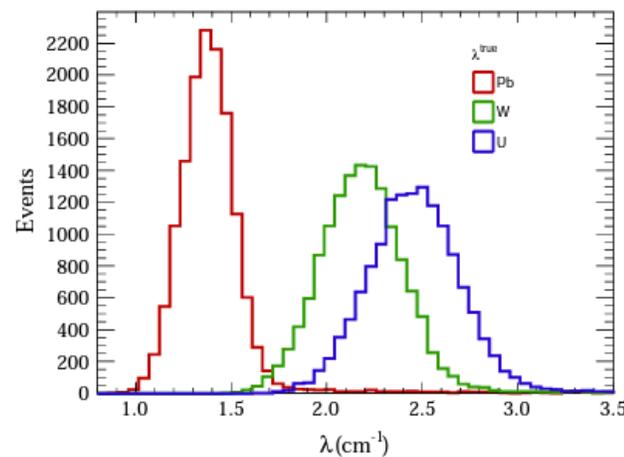
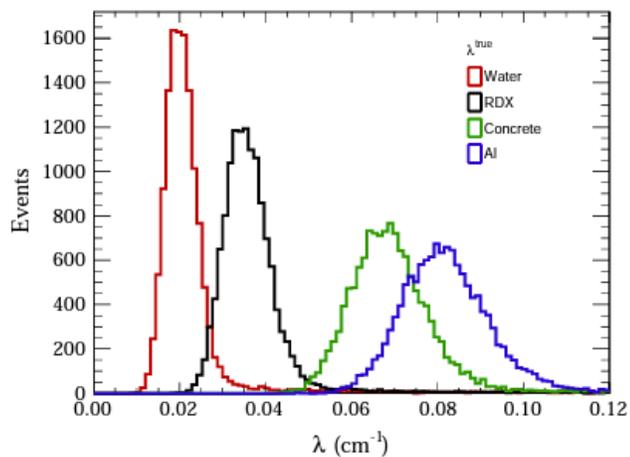
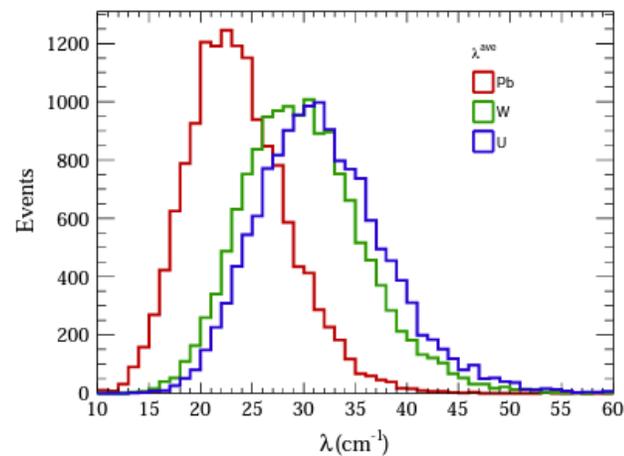
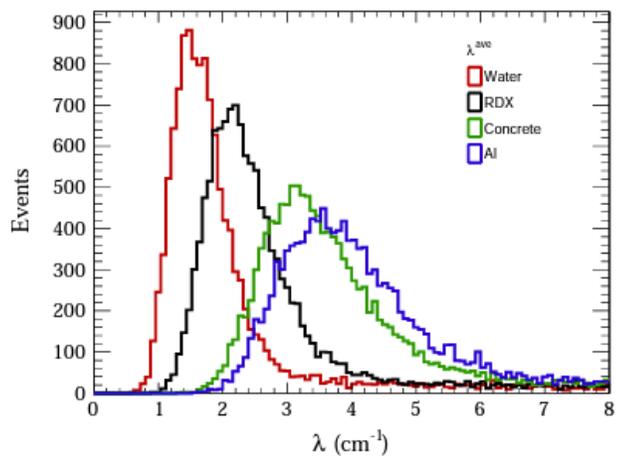
- 小于  $\theta_{\text{max}} - 2\sigma_\theta$ : LE 缪子
- 大于  $\theta_{\text{max}} - 2\sigma_\theta$ : HE 缪子

含动量测量:

$$\lambda_k^l = \frac{1}{N_k^l L_k} \sum_{i=1}^{N_k^l} \left( \frac{\beta_i c P_i}{13.6 \text{ MeV}} \right)^2 s_i^2 \quad P_i \leq P_{\text{thr}},$$

$$\lambda_k^h = \left( \frac{\bar{\beta}_h c \bar{P}_h}{13.6 \text{ MeV}} \right)^2 \frac{1}{N_k^h L_k} \sum_{i=1}^{N_k^h} s_i^2 \quad P_i > P_{\text{thr}}.$$

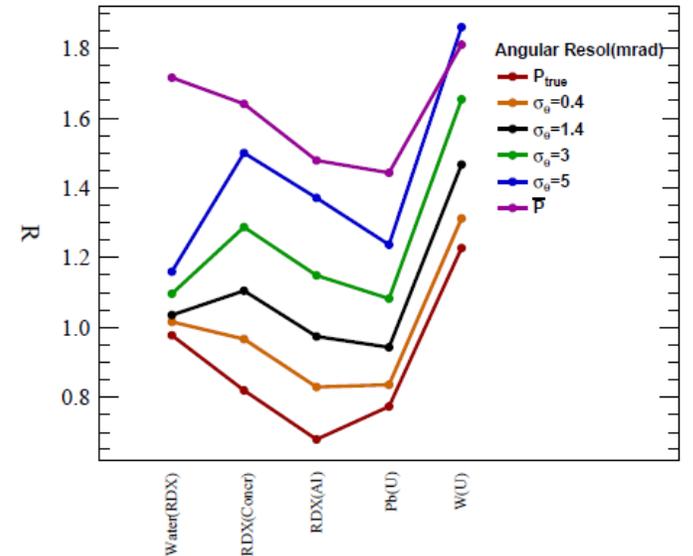
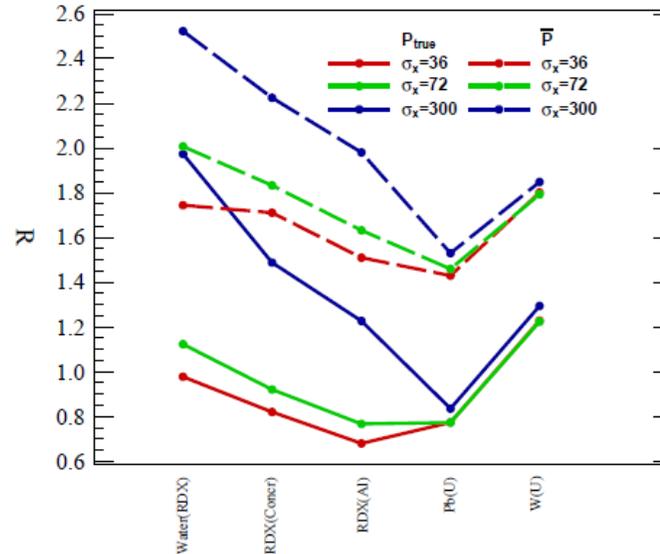
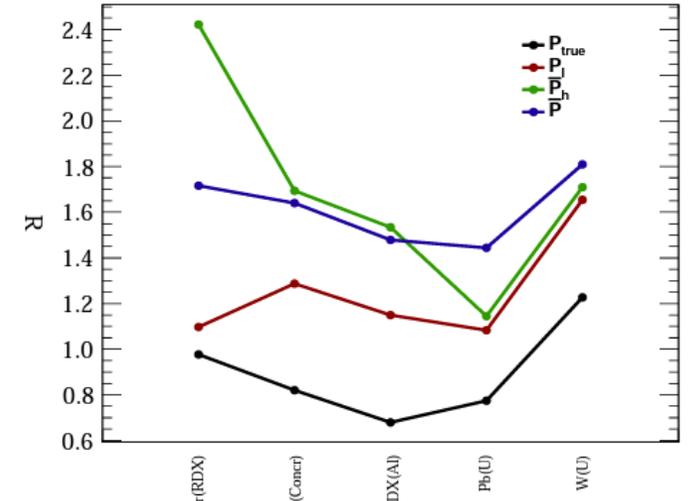
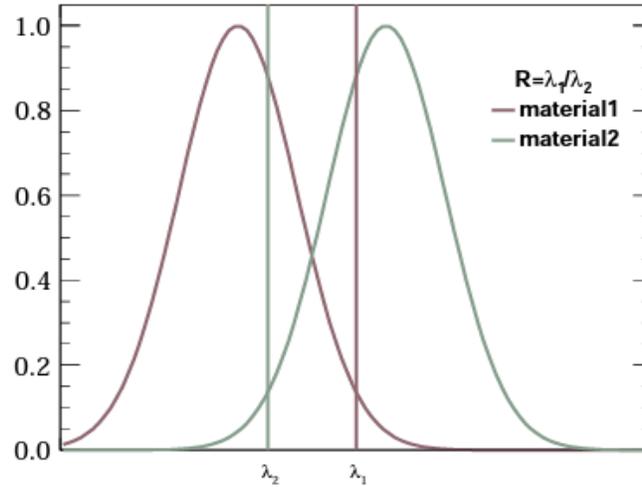
# 材料鉴别



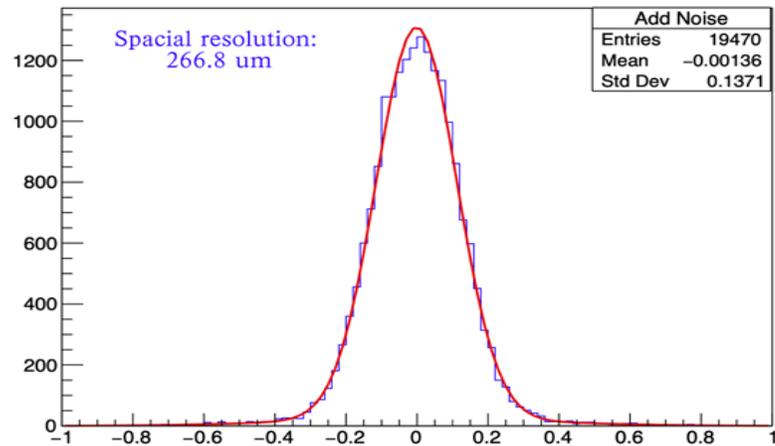
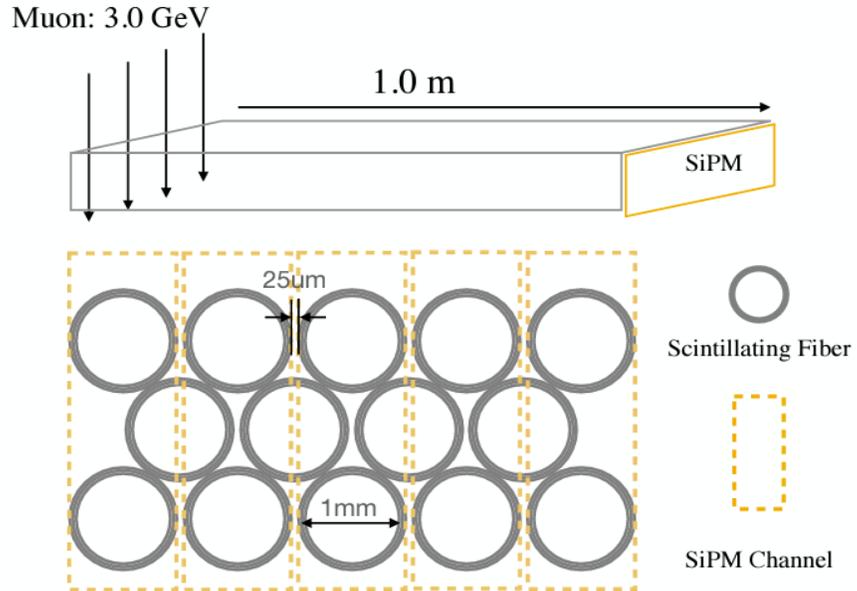
- 缪子动量信息可以提高低Z和高Z材料的鉴别能力
- 缪子动量信息可以使重建得到的材料散射密度值更接近于真实值。

# 材料鉴别

- 相对于传统平均动量的重建，低能缪子的动量信息对低Z和高Z材料的鉴别都有帮助，但是对低Z材料鉴别帮助更明显
- 同一图像重建精度要求下，低Z材料鉴别相对于高Z材料需要更高的位置分辨能力 (10 $\mu\text{m}$ 量级)
- 针对该成像系统，缪子动量测量的切伦科夫角度分辨能力需要好于5mrad



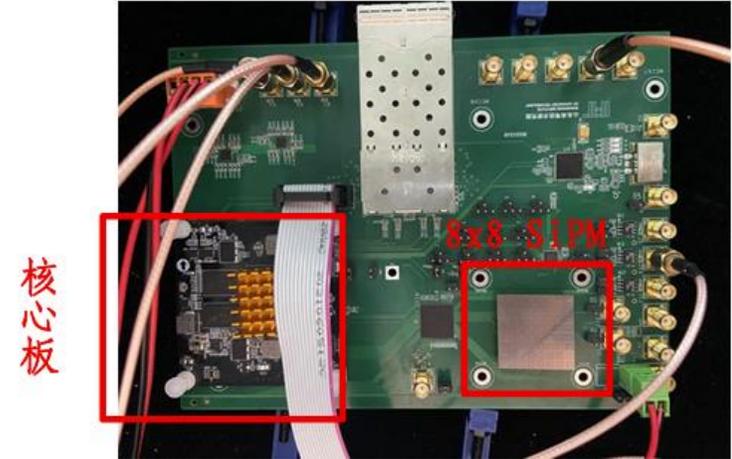
# 探测系统研制



## 光纤模块



## 前端电子学



正在开展塑料闪烁光纤探测器的模拟和研制

# 总结展望

- 提出采用塑料闪烁光纤和内反射切伦科夫探测器构建缪子散射成像系统，以实现低Z和高Z材料的鉴别
- 利用简单MC和动量相关的PoCA算法检验了成像系统对低Z和高Z材料的鉴别能力，验证低能缪子信息对低Z材料的鉴别有明显效果
- 后面将考虑缪子的能量损失，采用更精细的探测器模拟和重建算法，在新成像系统下实现更精确的图像重建
- 初期研制塑料闪烁光纤探测器，搭建测试原型机

谢谢!