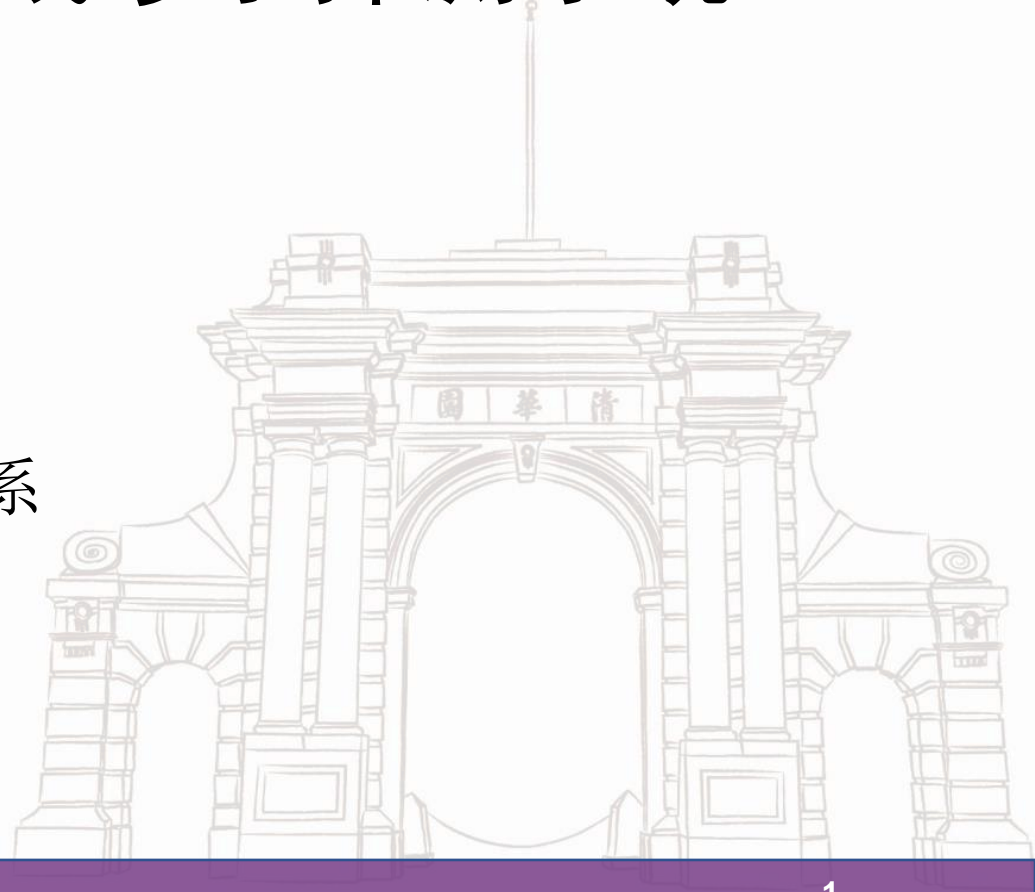




具有动量测量功能的宇宙射线缪子探测系统

王义

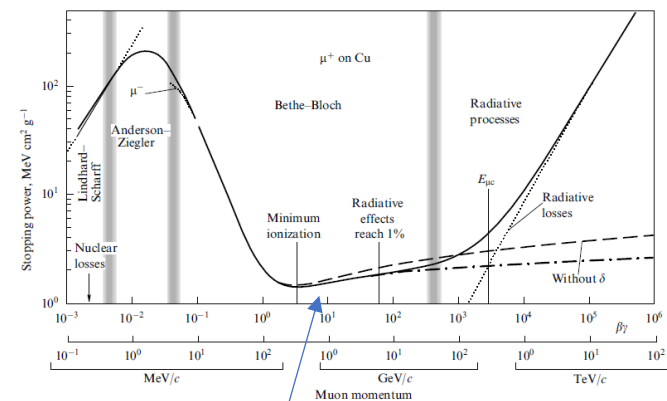
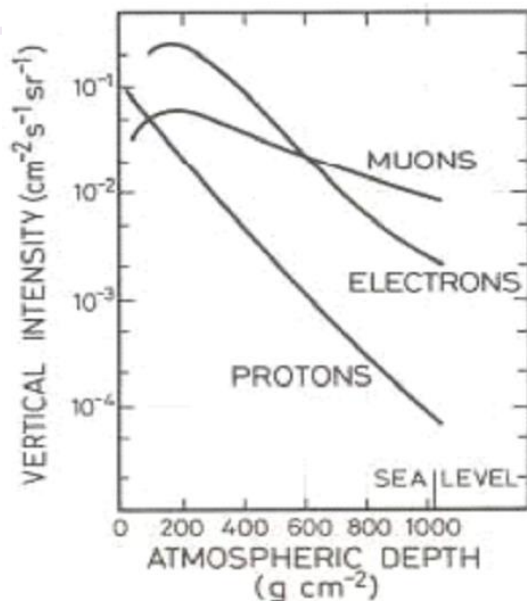
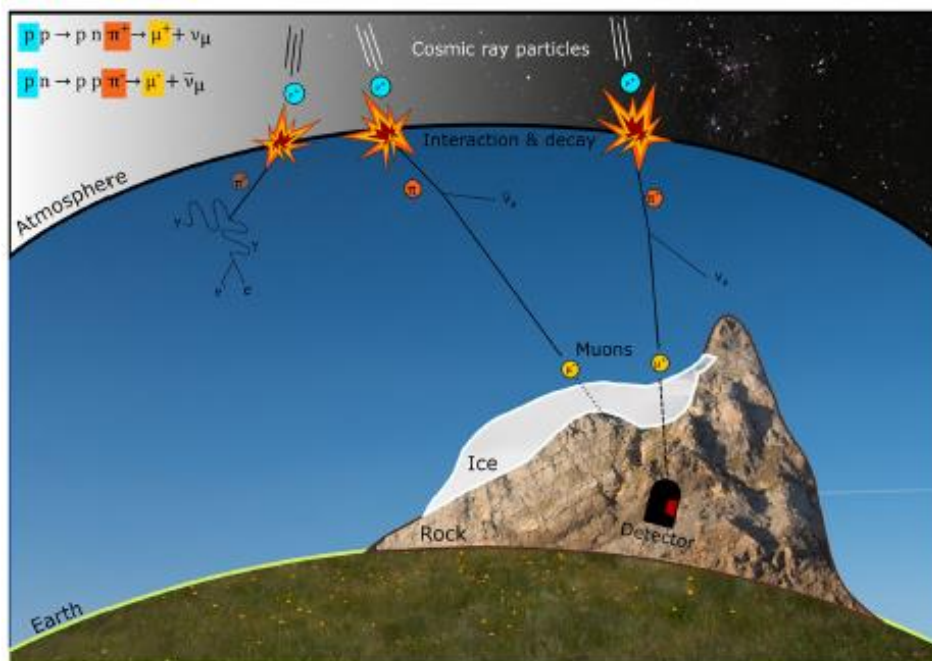
清华大学工程物理系



提纲

- 宇宙射线缪子散射成像技术及应用
- 具有动量测量功能的闭气式缪子散射检测系统组成及指标
- 系统性能模拟结果及分析
- 总结

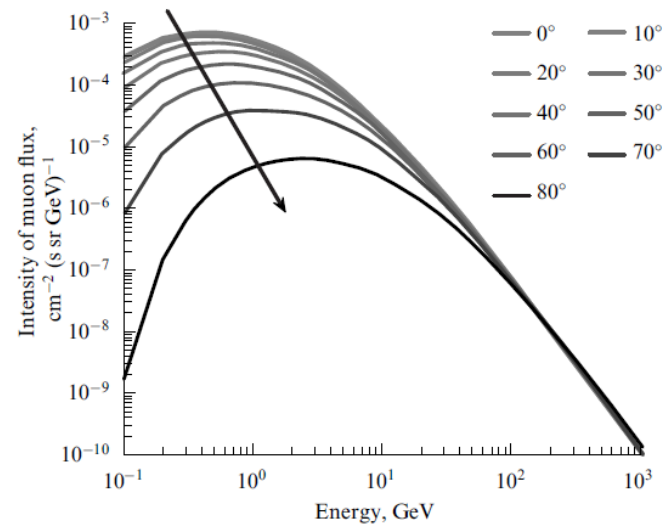
宇宙射线缪子介绍



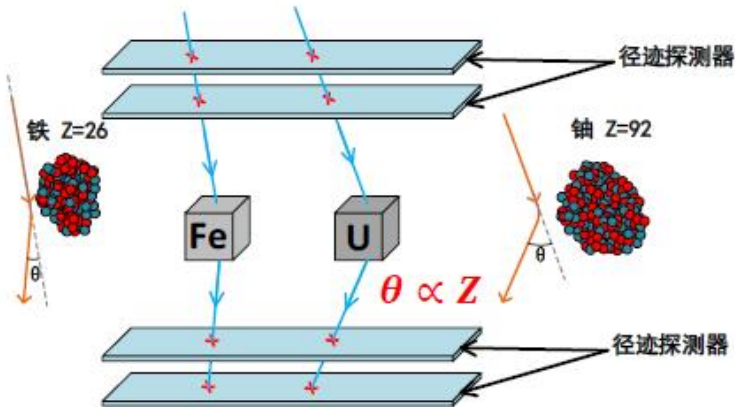
几GeV能区，主要作用为电离

产生：高能宇宙射线与大气作用产生的 π 和K的衰变产物

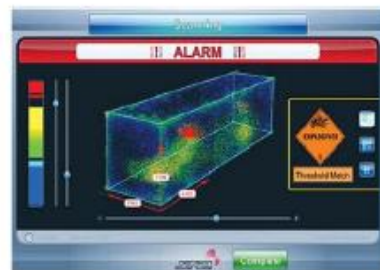
性能：寿命： $1.197 \times 10^{-6} \text{s}$ ，飞行10-20km & E_μ
 质量：电子质量206倍；平均能量：3-5GeV
 平均通量：约为130个/ $\text{m}^2 \cdot \text{s}$



宇宙射线缪子散射成像的应用

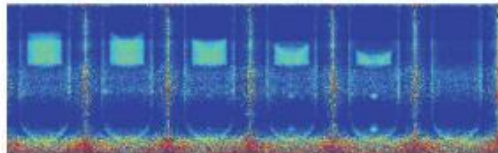
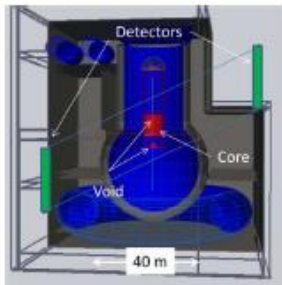


(a)



(b)

DSC公司的缪子成像检测装置

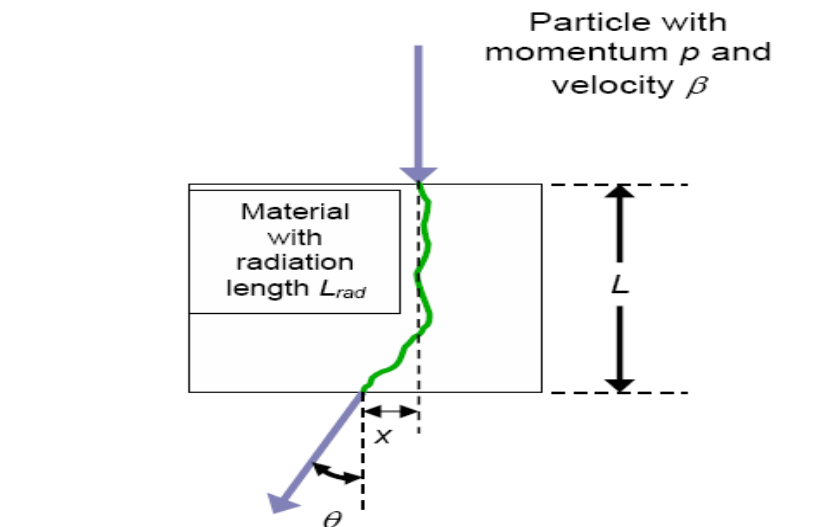


美国Los Alamos国家实验室：
福岛反应堆堆芯成像模拟，
验证了堆芯监测的可行性
(2012, PRL)



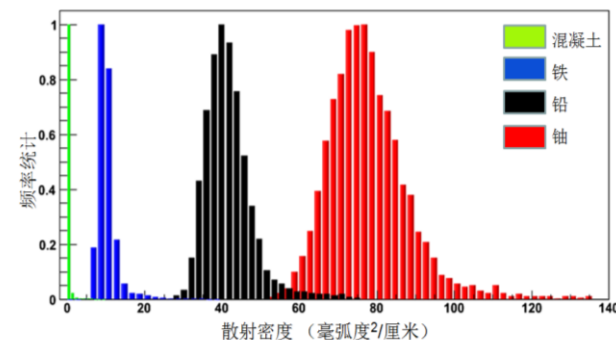
福岛第一核电站的缪子
成检测装置

核安全检测，海关检测，核武器监测等



$$\sigma_{\theta} = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c p} \sqrt{\frac{L}{L_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) \right]$$

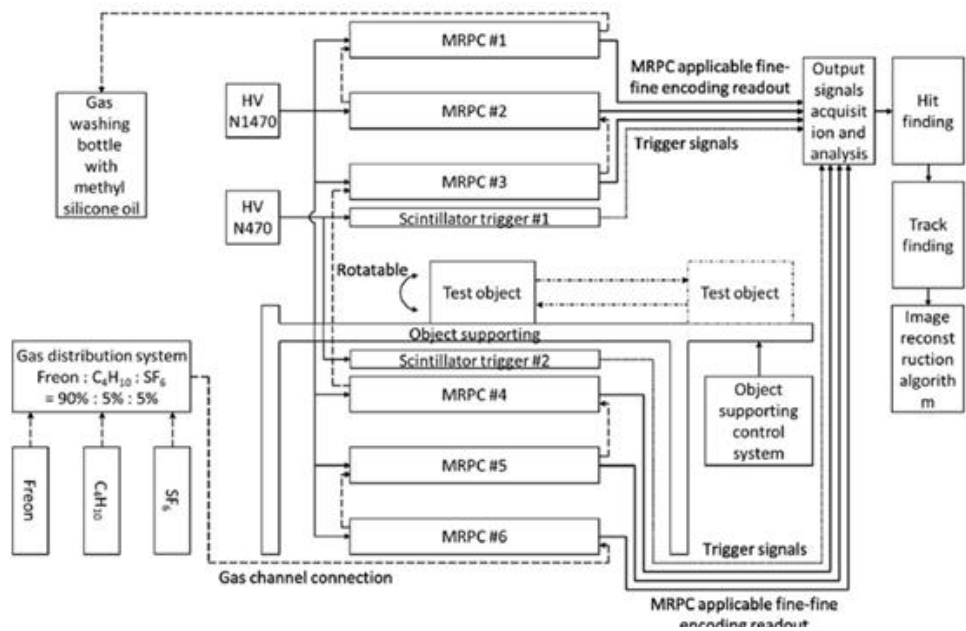
散射角与缪子动量直接相关！



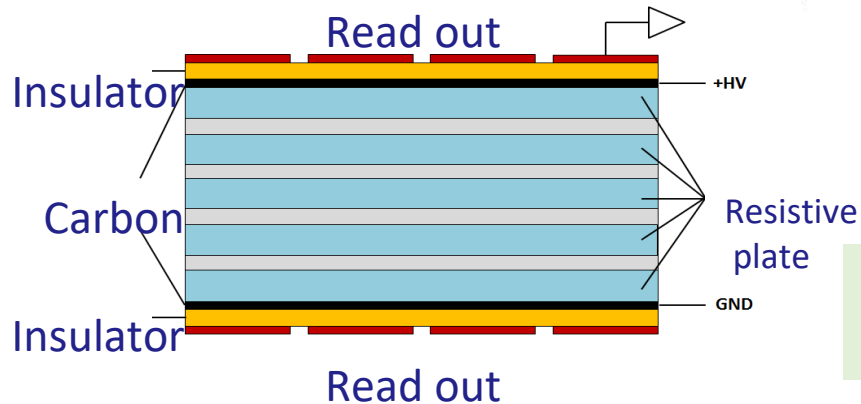
理想情况

研究基础

- 清华大学缪子成像装置（TUMUTY），基于传统MRPC搭建的缪子散射成像系统



探测器参数	数值
MRPC数量	6个
耗气率	800sccm
位置分辨	~0.5mm (2.54mm读出条)
灵敏面积	1m × 1m



由于MRPC气隙窄，读出条的宽度决定了空间分辨率

多气隙电阻板室（MRPC）有制作成本低，位置分辨率高，便于大面积制作的特点，已被证实能够很好地用于搭建缪子成像系统

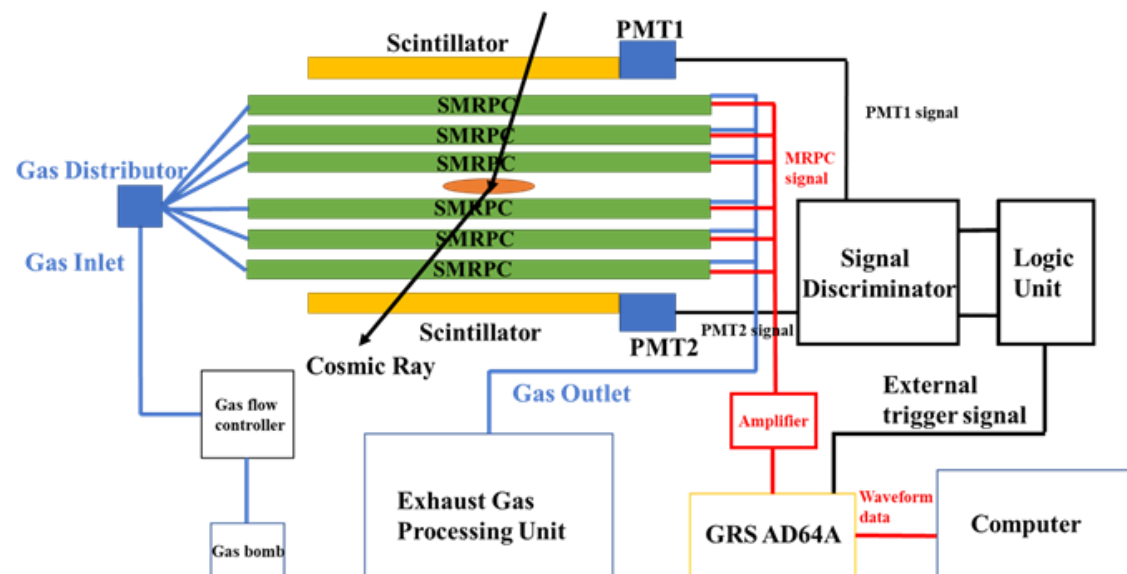
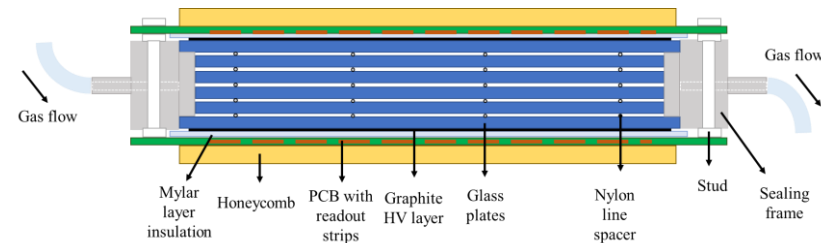
升级版的探测系统

- 采样自密封MRPC，5气隙，气隙宽度0.25mm，工作高压： $\pm 6.5\text{kV}$

XY二维读出，读出条：1.44+1.1mm

读出电子学：前放+80MHz 波形采样

工作气体：90% F134A+5% Iso-butane+5% SF6

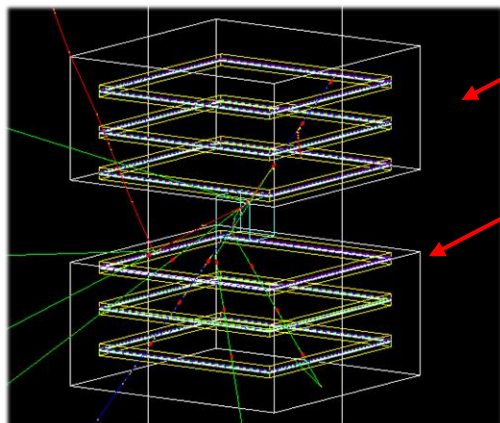


系统指标:

- 1) 成像面积：50cm×50cm
- 2) 读出电子学通道数：384
- 3) 位置分辨：0.5mm
- 4) 探测器个数：6个
- 5) 模块闭气工作时间>180天

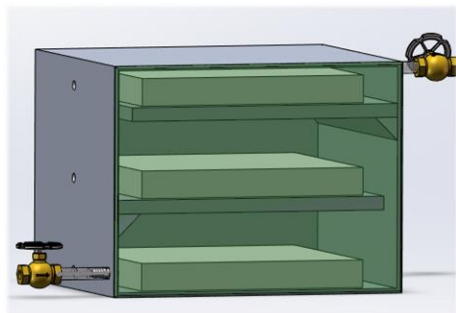


径迹探测器模块



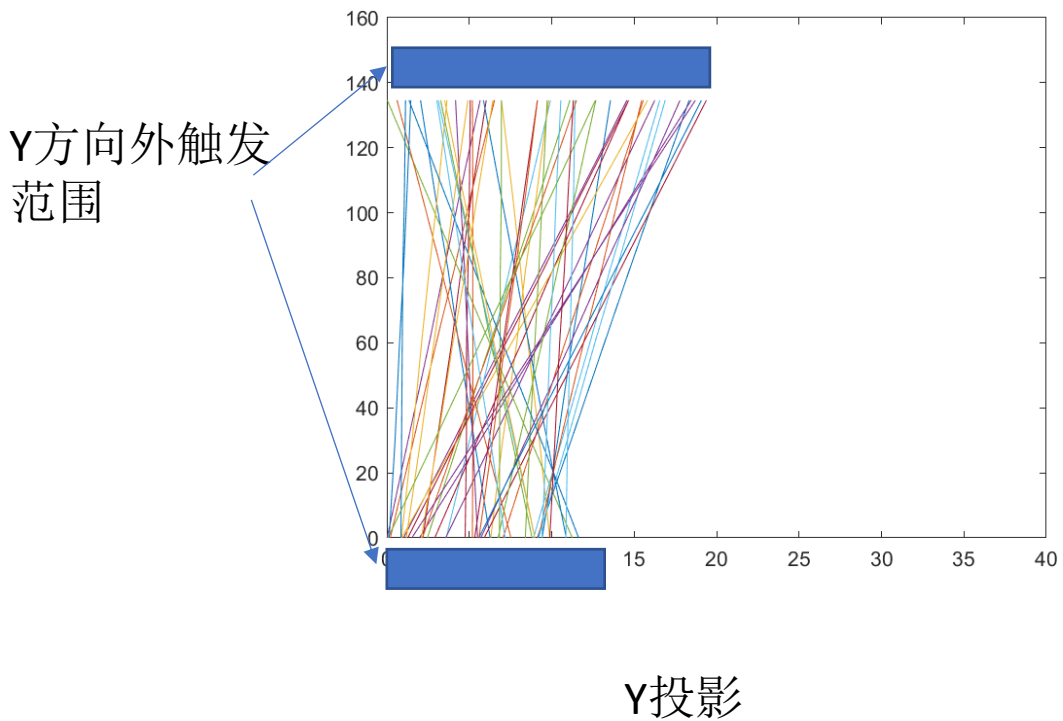
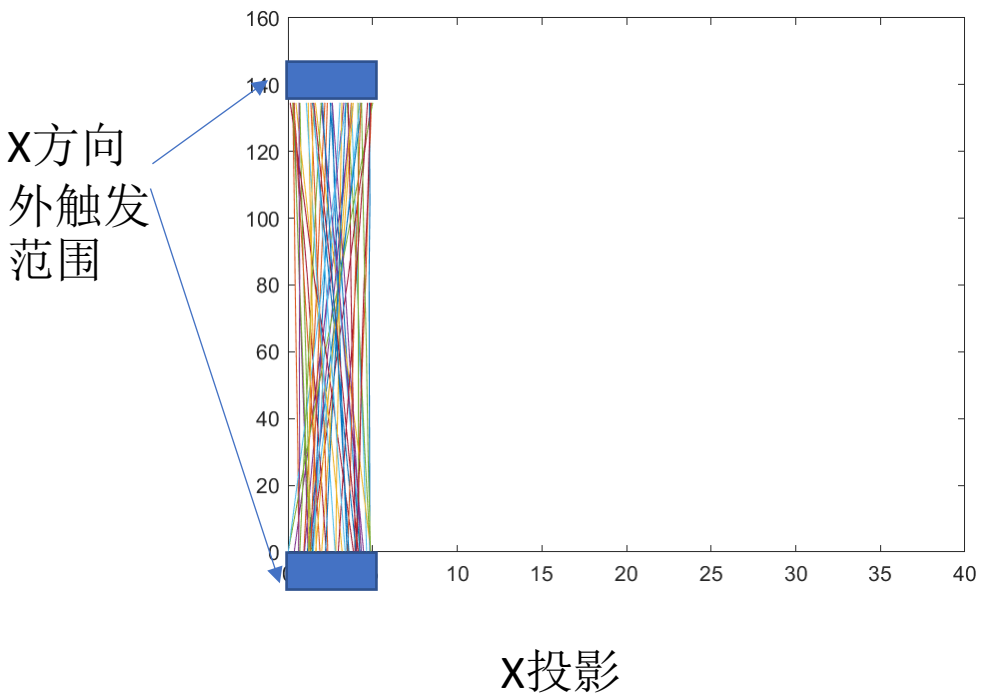
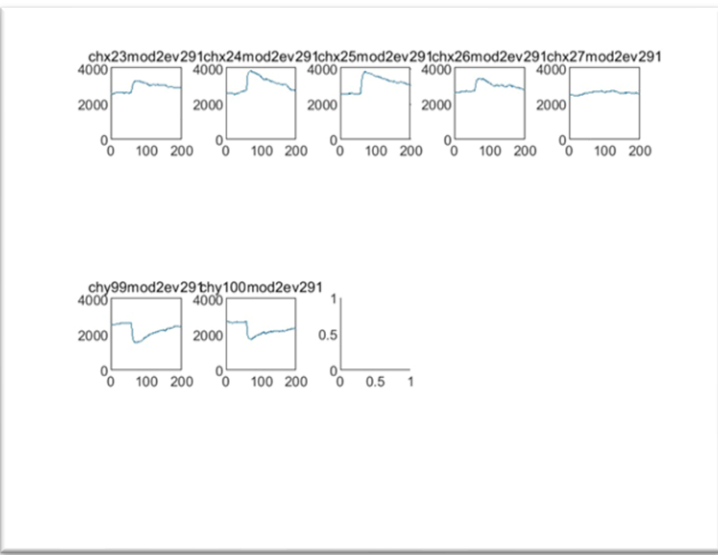
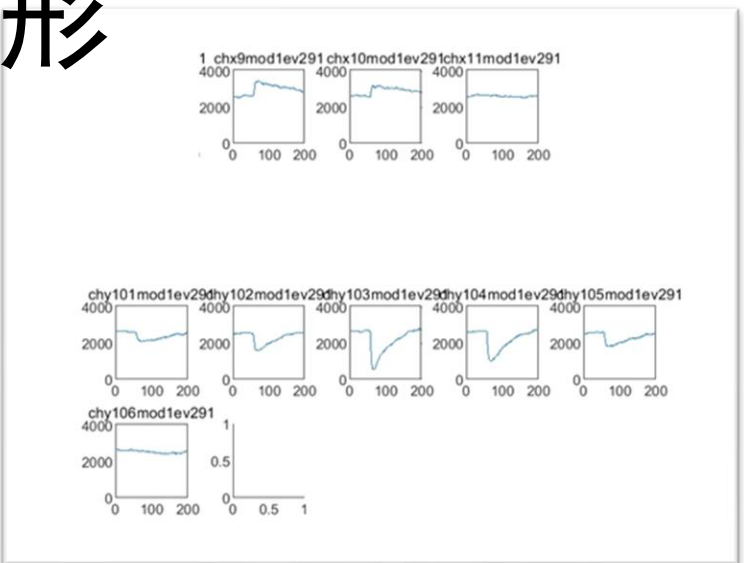
入射径迹模块

出射径迹模块



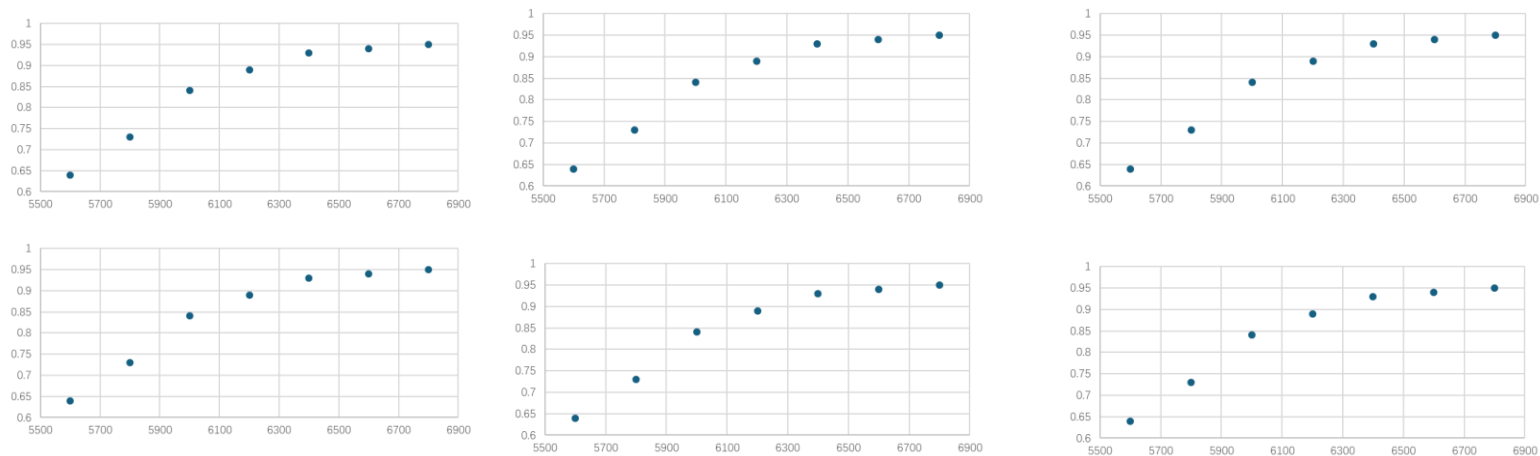
- 整个径迹系统由两个模块组成
- 每个模块包含三个自密封探测器
- 模块里面充工作气体
- 双重气密封技术
- 实时监测探测器电流，温度和气压
- 闭气工作时间：>180天
- 运行节能环保

缪子信号波形

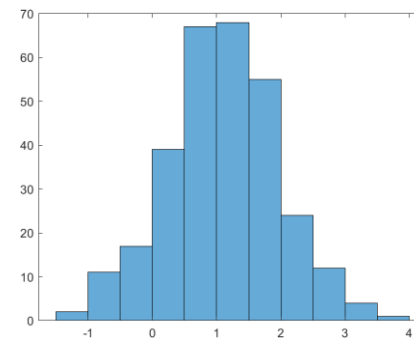
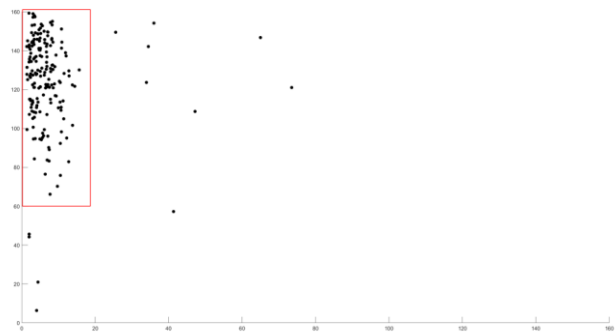
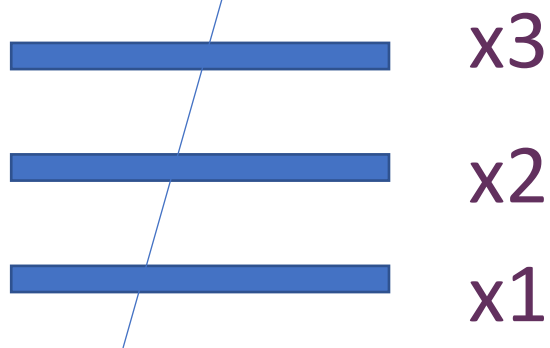


系统探测效率和位置分辨

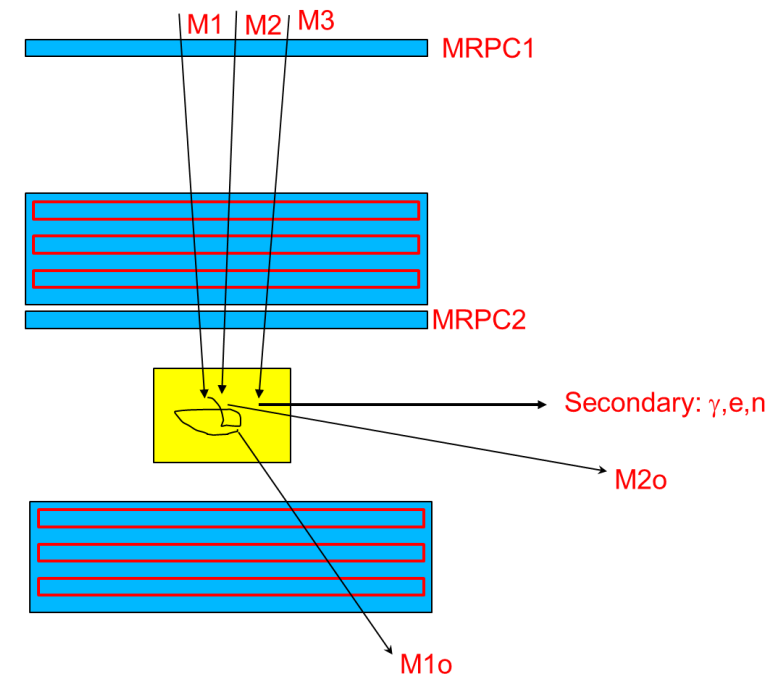
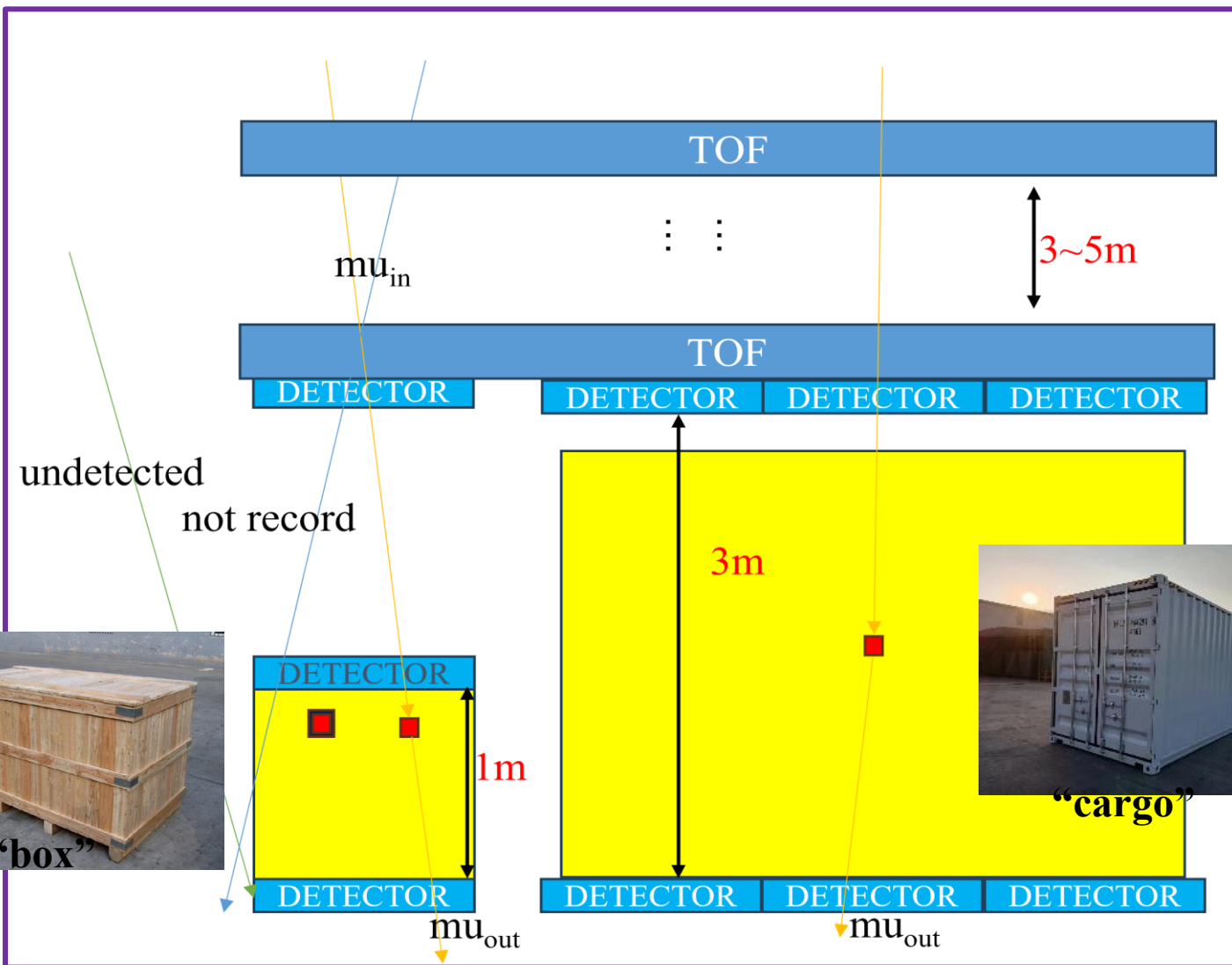
- 系统性能初步测试
 - 探测器效率坪曲线：探测效率均高于95%



- 位置分辨宇宙线测试：三探测器径迹拟合，得到位置分辨率0.5mm左右



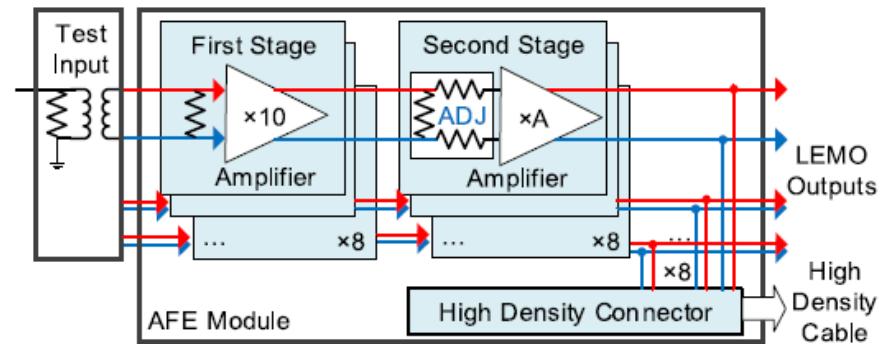
具有动量测量功能的宇宙射线缪子探测系统



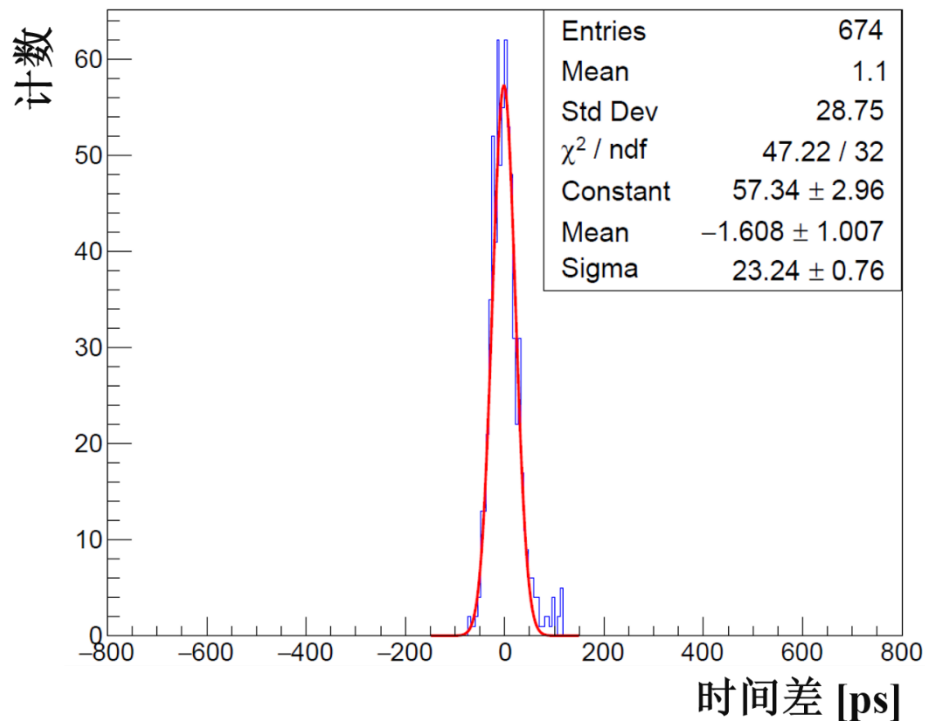
TOF: 1GeV and 2GeV can be discriminate for 3m distance
 Statistics and analysis: fast discriminate by analysis the performance of different particles \propto energy \propto material

高时间分辨MRPC探测器	
气隙宽度/微米	128
气隙个数	4 室 x 8 层 = 32
玻璃材料	普通玻璃
玻璃厚度/微米	400
读出条	7 mm 宽 (3 mm 间隙)
缪子能损	0.7MeV

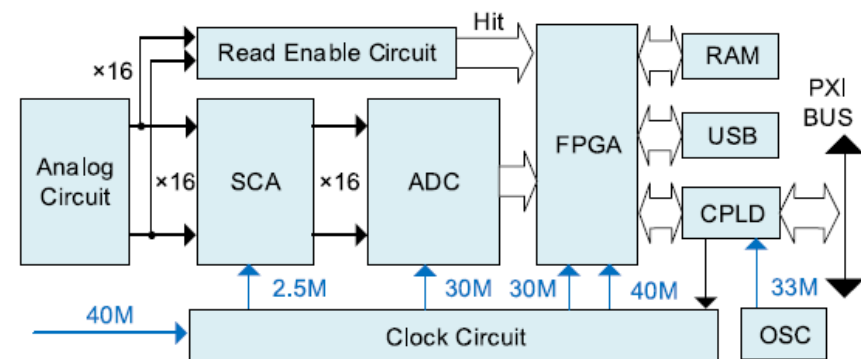
20ps时间分辨MRPC



前端电子学模块示意图



时间分辨率: 16.4 ps

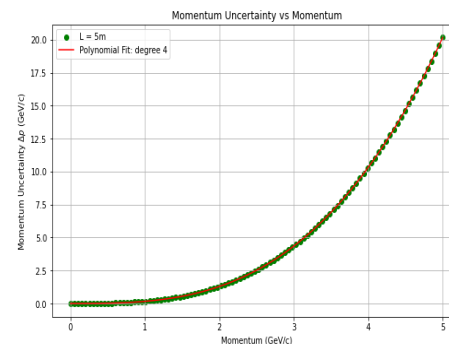
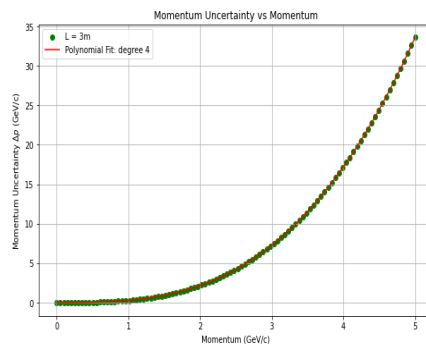
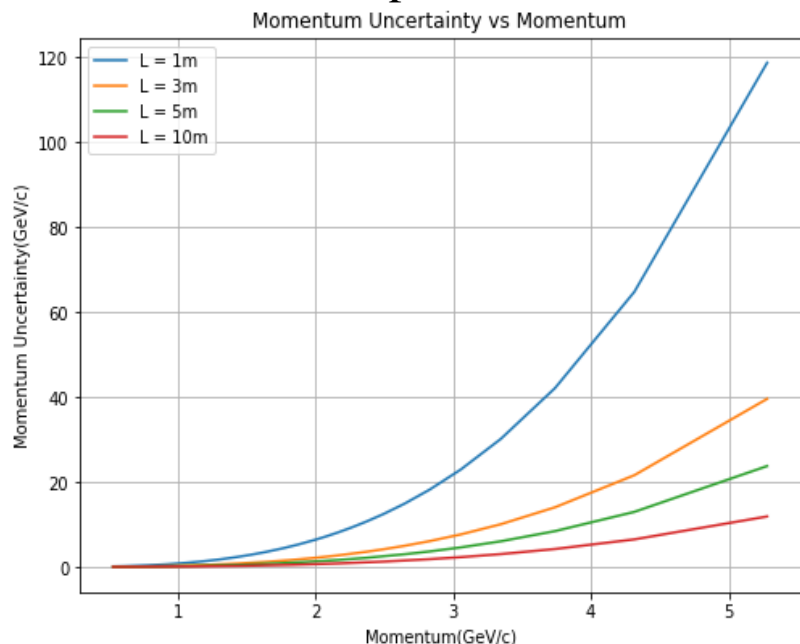


波形数字化模块框图

缪子动量的模拟分析

■ 模拟MRPC-TOF的动量测量性能

时间分辨能力: 30ps



多项式拟合结果

L = 3m

$$\sigma \approx 0.269 \cdot P^3$$

L = 5m

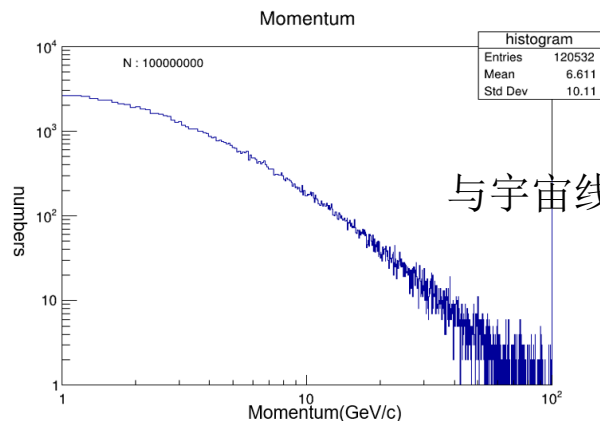
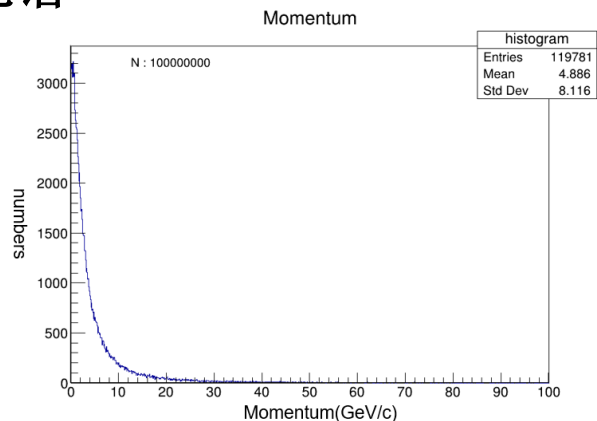
$$\sigma \approx 0.161 \cdot P^3$$

★ 缪子能量越大/TOF间距越小，测量不确定度越大。TOF间距为3m，入射宇宙线缪子能量达到1.5GeV时，不确定度达到60%(占有所有缪子35.83%); 间距为5m，达到同样不确定度为2GeV(44.73%)。

→ 模拟过程中为了表征动量测量的不确定度，较低能量的μ子测量值服从高斯分布（以动量真实值为均值，公式计算出的不确定度为标准差）；较高能量的μ子则假设呈均匀分布(3~5GeV)。

材料鉴别能力

宇宙线能谱

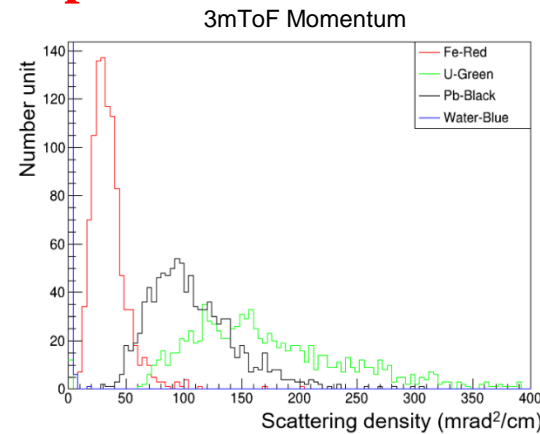
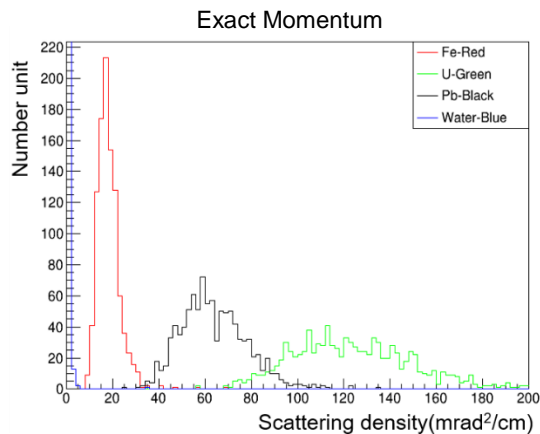
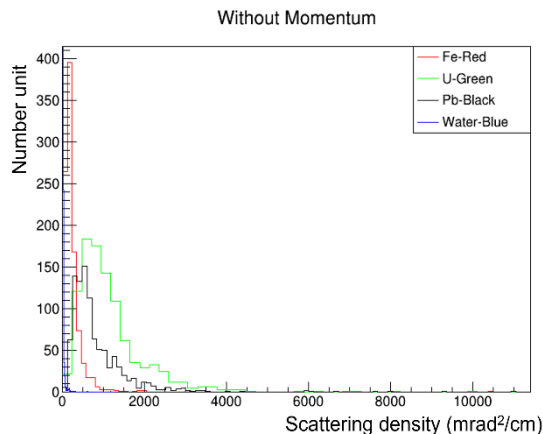


与宇宙线实际能谱一致

Bugaev/Reyna Model: $\Phi_B(p) = A_B p^{- (a_3 y^3 + a_2 y^2 + a_1 y + a_0)}$ $\Phi_R(p, \theta) = \cos^3(\theta) \Phi_B(p \cos \theta)$ $y = \log_{10} p$

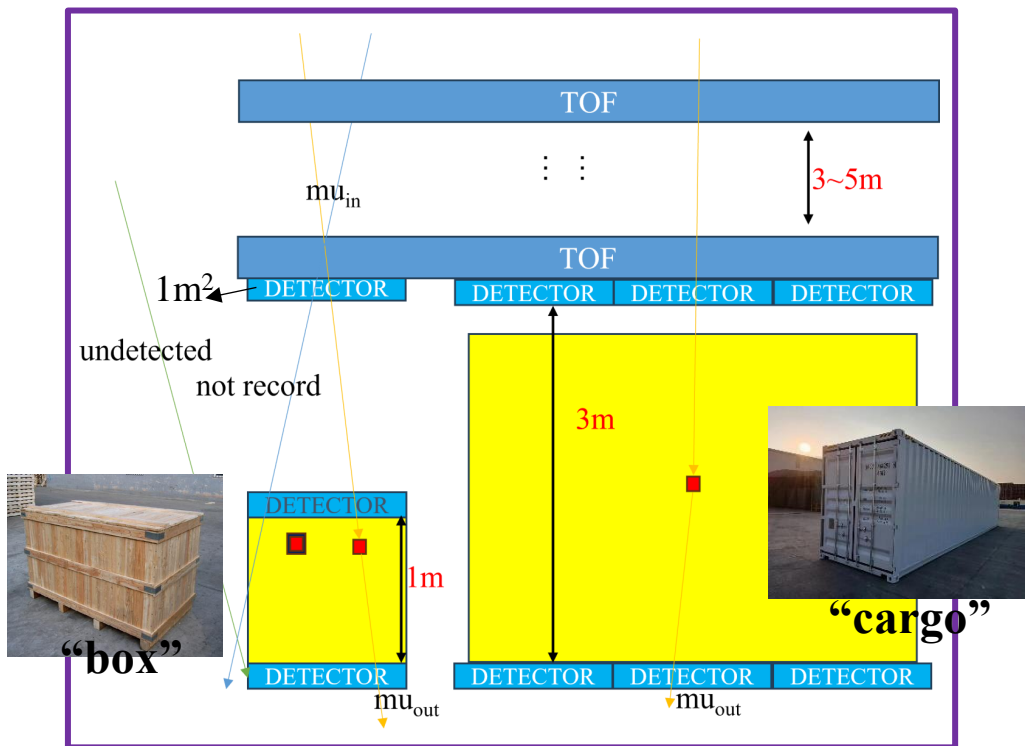
不同动量精度下缪子散射成像系统的鉴别能力

exposure time: 60s



相比于没有动量的情形，采用3米间距的MRPC-TOF获取 μ 子动量可以获得更好的物质鉴别能力。

■ 基于Geant4的不同模拟检测情景



★ 几何接收度(GA):

径迹探测器之间间隔3m → 18.8%

径迹探测器之间间隔1m → 45.2%

★ 灵敏面积: 1m²

★ 模拟模型:

小体积: “box”model 高度: 1m

大体积: “cargo”model 高度: 2.6m

★ 填充材料(Background):

(材料的密度达到重量限制)

Wood, Fe

★ 曝光时间:

30s, 45s, 60s, 120s(only for cargo)

(假设缪子通量: 10,000 min⁻¹m⁻²)

★ 模型中的可疑物质:

(位置随机放置)

■ U块(10cm cube) ←对比→ 无特殊材料

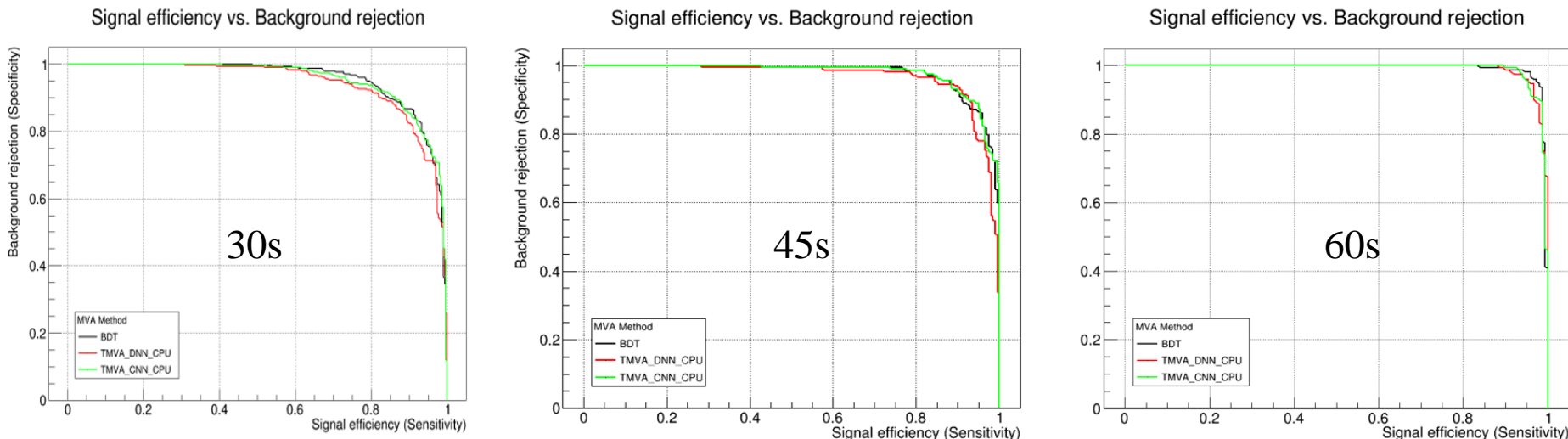
■ Pb屏蔽的U块(1, 2, 5cm)

↑↓对比

■ Pb块(同等大小)

快速检测速度研究

30ps-TOF ROC曲线结果:



45.2% GA



Wood "box"

■ U block (10cm cube)

相同数据在3m MRPC-TOF的动量测量不确定度下可取得相对较好的结果

AuCs		Method		
		BDT	CNN	DNN
time/s	30	0.956	0.954	0.944
	45	0.976	0.978	0.967
	60	0.992	0.991	0.991

Accuracy/%		Method		
		BDT	CNN	DNN
time/s	30	88.58	89.08	86.08
	45	91.5	92.75	91
	60	96.75	96.08	94.58

对于和模型同等大小的货箱，在45s内检测10cm边长的U块的准确率可以达到92%，如果将宇宙线缪子曝光时间延长到60s，则可以达到96%。

■ 降低几何接收度后30ps-TOF结果：

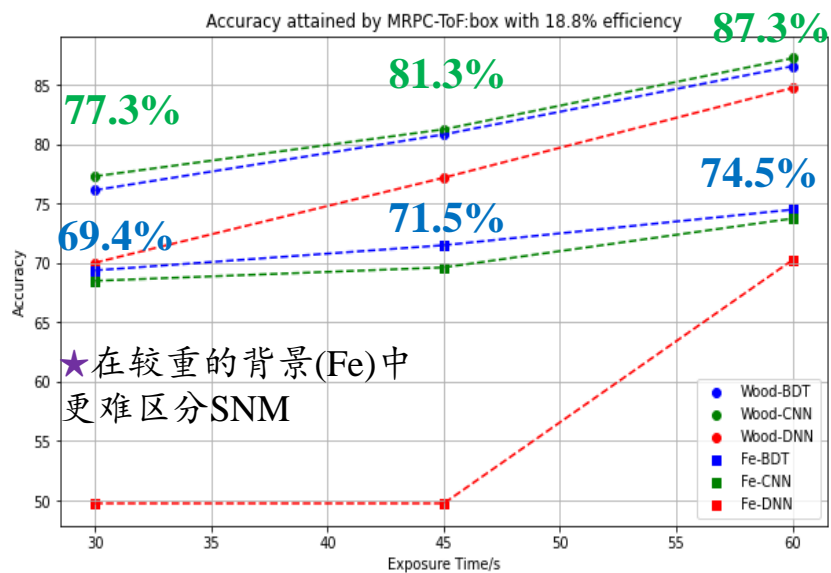
几何接收度GA= 18.8% 径迹探测器间隔3m (30s,45s,60s)：



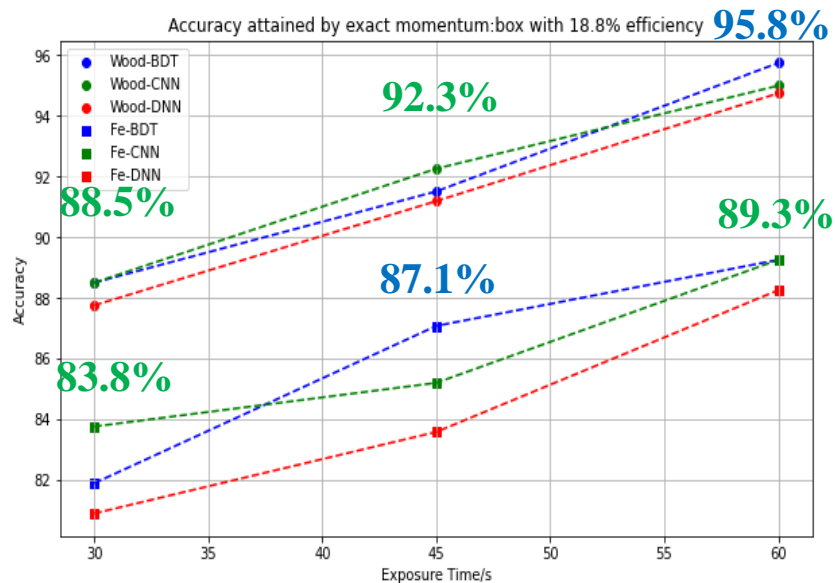
“box”

■ U block (10cm cube)

所有标出的数字是同种情景下3种数据分析方法的最好结果



30ps-TOF

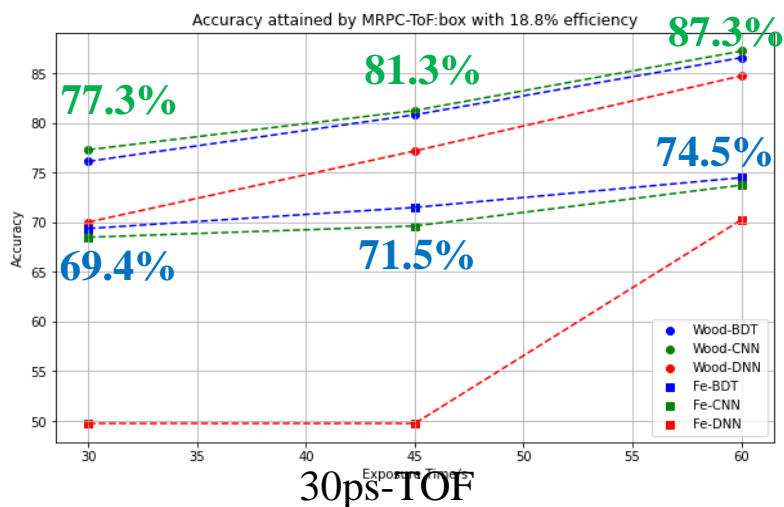


精确动量

模拟场景越困难，动量信息造成的准确性损失就越大，进一步凸显了动量在 MST 中的重要性。

不同几何接收度下的检测时间

几何接收度GA= 18.8% (30s,45s,60s) :



■ U block (10cm cube)

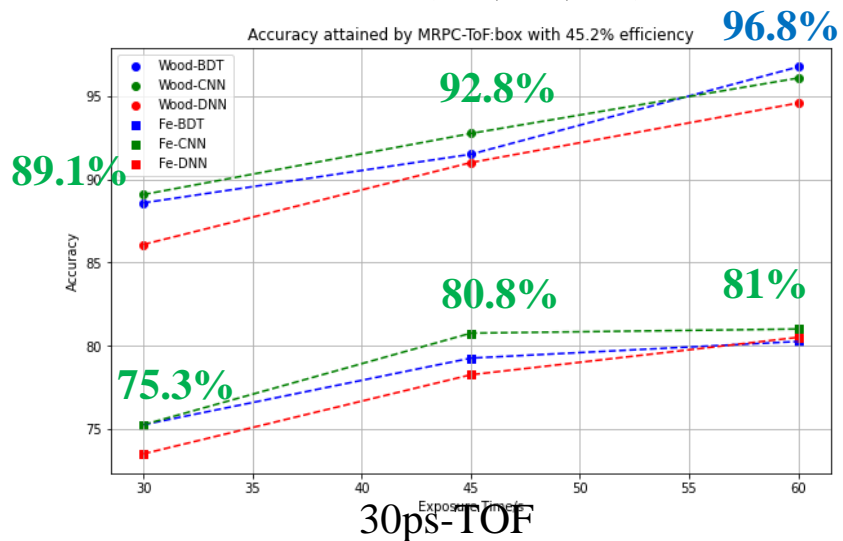
★ 几何接收度显著影响MST的性能。

显然!

虽然都改变了有效缪子数量，但并不和曝光时间冲突：

1. GA与探测器（系统结构）更相关
2. GA通过增大对宇宙线缪子的响应立体角来增加有效缪子数
3. 有着更大入射角（入射角实际上与动量相关）的缪子可以被捕获到

几何接收度GA= 45.2% (30s,45s,60s) :



■ 对于屏蔽模型的检测结果(30, 45, 60s)

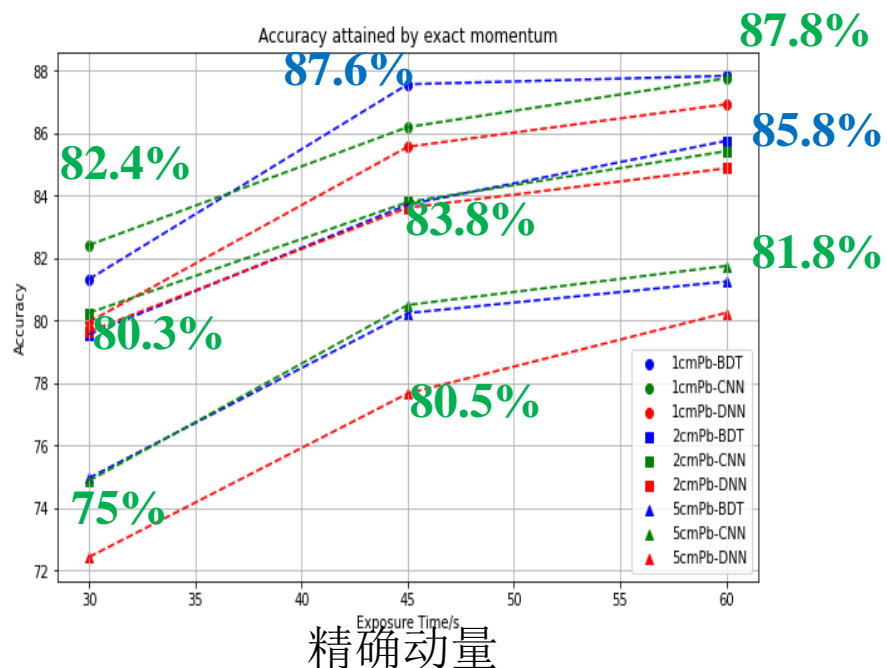
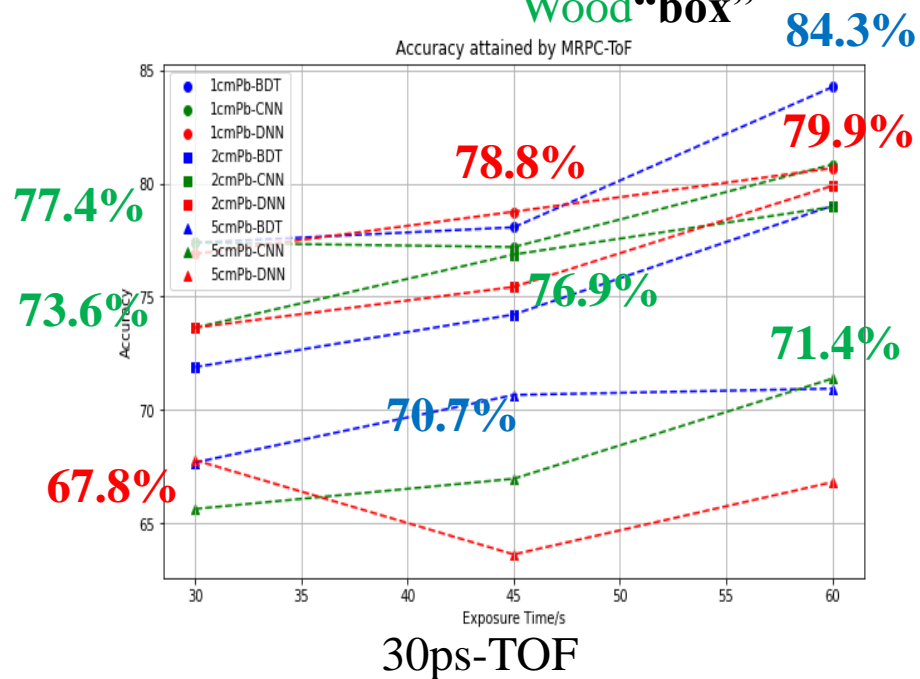
45.2% GA



Wood "box"

■ Pb块(同等大小)

■ Pb屏蔽的U块(1cm,2cm,5cm)

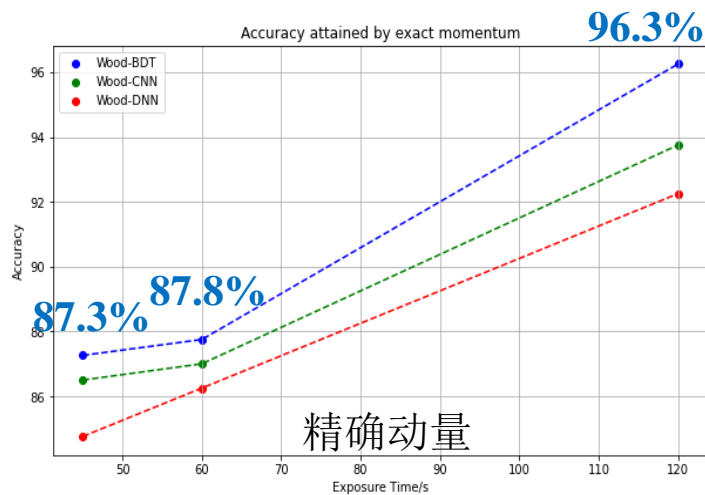
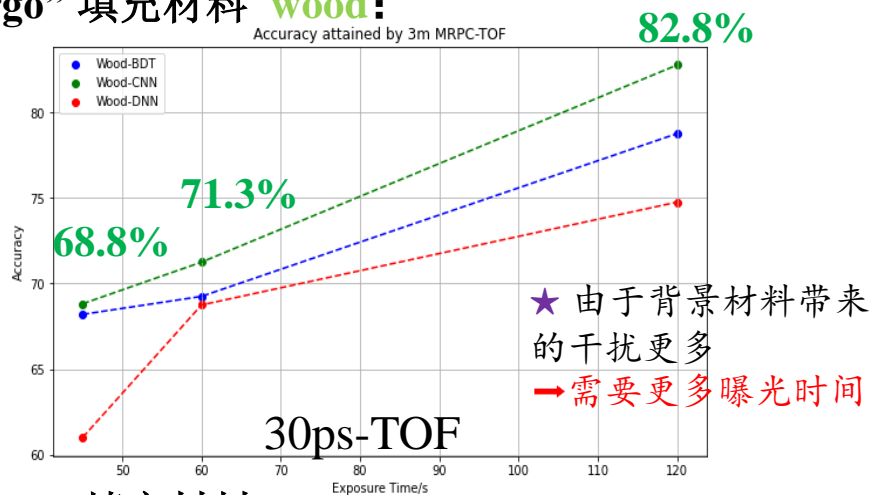


可见在短时间的宇宙线缪子曝光内结果仍然不错，表明在MRPC-TOF的加持下，MST系统仍然有潜力检测出一些隐藏较深的材料。

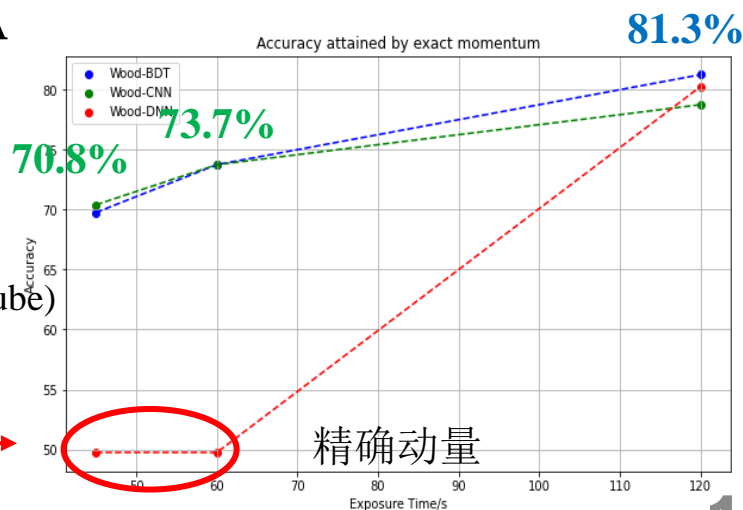
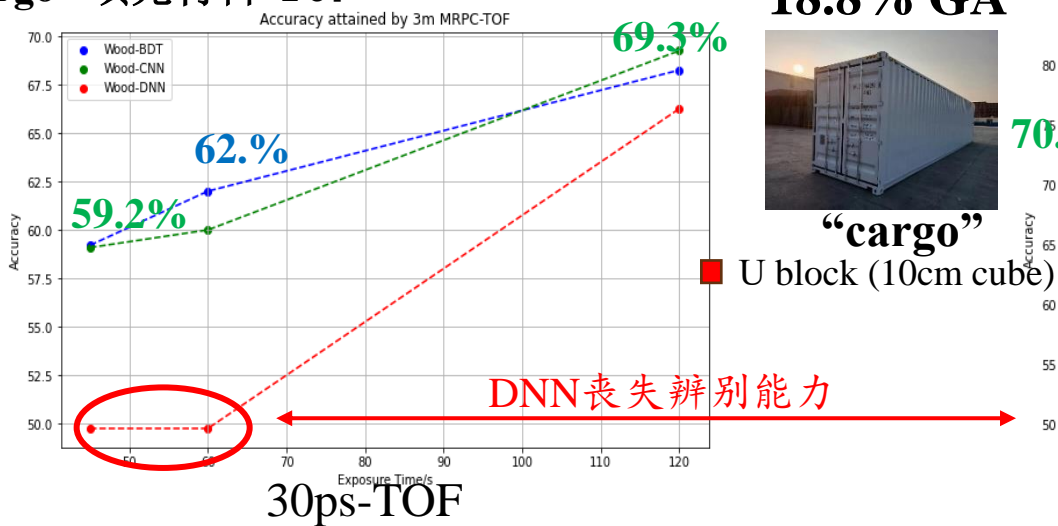
集装箱里的快速检测

“cargo” model以及相应结果(45s,60s,120s)

“cargo” 填充材料 wood:



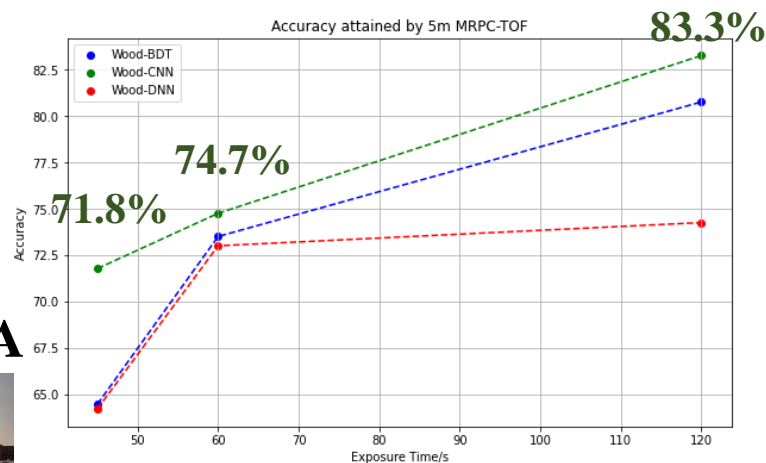
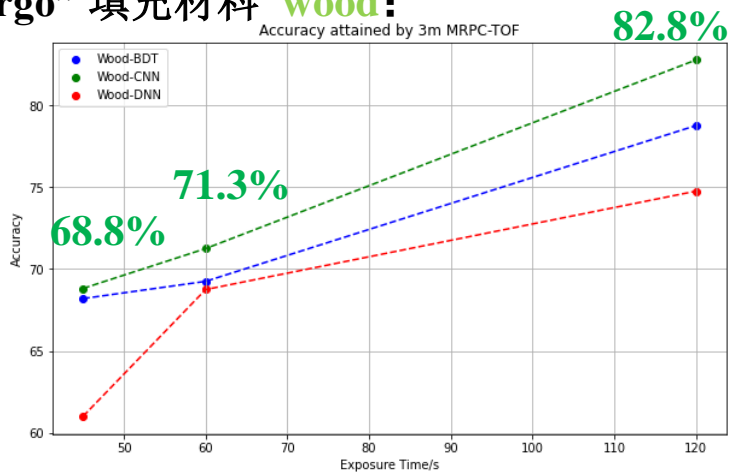
“cargo” 填充材料 Fe:



不同飞行距离比较

3m TOF → 5m TOF (45s, 60s, 120s)

“cargo” 填充材料 **wood**:

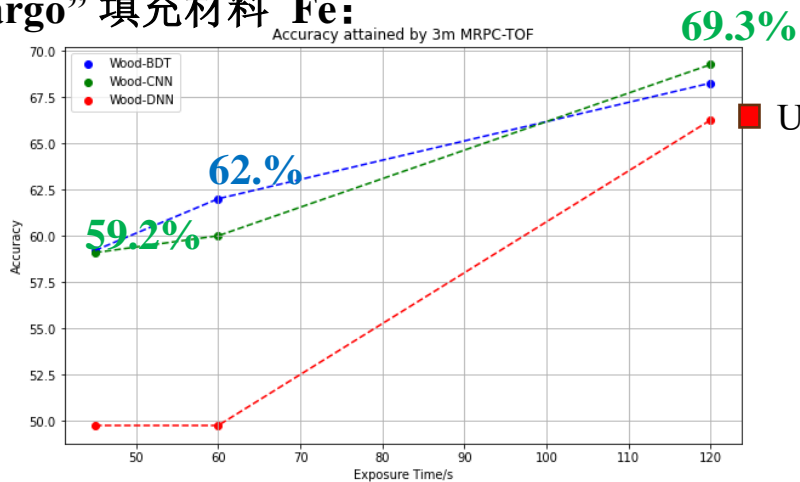


18.8% GA



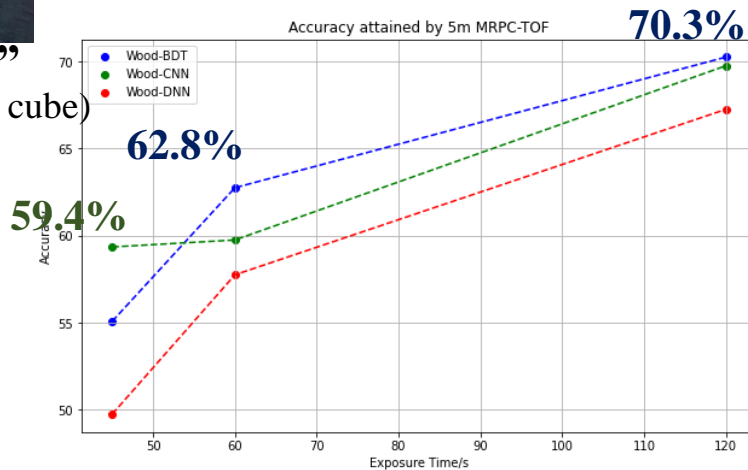
可以看出，5m间距比3m间距稍有提高！

“cargo” 填充材料 **Fe**:



“cargo”

U block (10cm cube)



20

总结

- 宇宙射线缪子散射成像技术在反恐，材料检测等方面具有很好应用前景
- 对缪子动量进行测量分区能够大幅提高检测速度和精度
- 高精度径迹探测器也重要！
- 加速器缪子射线源也很关键！

谢谢！