



ATLAS 前向缪子探测器研究进展

吕游 周意 刘建北

核探测与核电子学国家重点实验室
中国科学技术大学

LHC探测器升级研讨会
2020-8-11



报告概要

- **ATLAS 前向缪子探测器背景介绍**

- **探测器性能模拟研究**

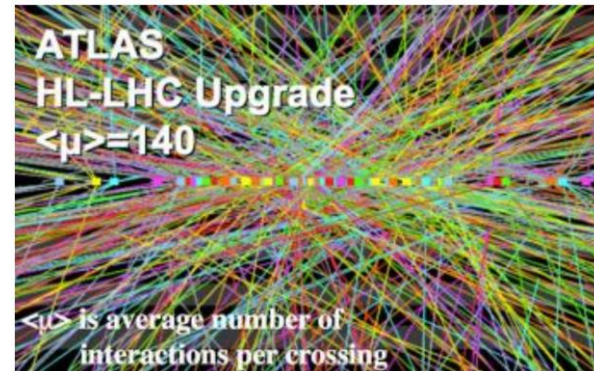
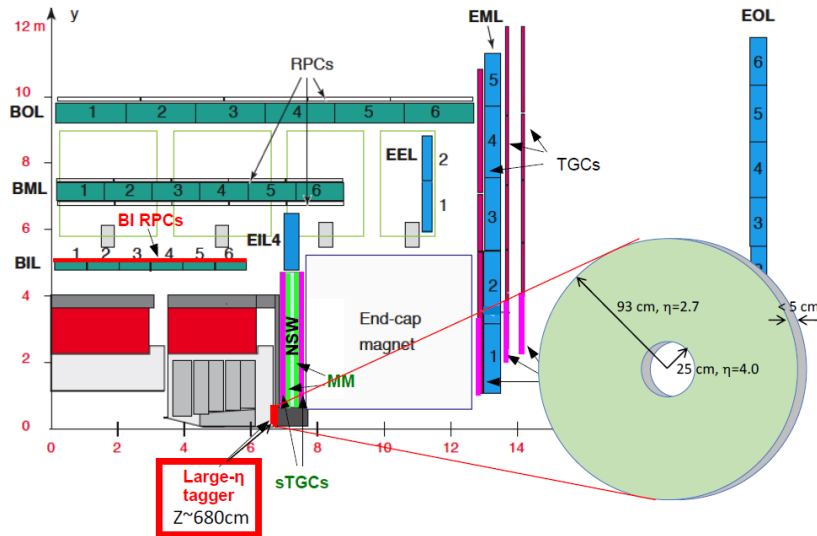
- **探测器研制**
 - **THGEM-FTM 探测器原型研制以及宇宙线效率测试**
 - **权场对探测器感应信号幅度的影响**
 - **RMSGC-FTM 探测器的设计**

- **总结**

ATLAS 前向缪子探测器升级

前向缪子探测器:

ATLAS muon 谱仪升级中，配合ATLAS ITK探测器在 $2.7 < |\eta| < 4$ 区域对muon子的重建，在量能器以及屏蔽盘之间(JD)安装一个新的探测器。



在下一代HL-LHC上，Pile-up 效应最高可达到200

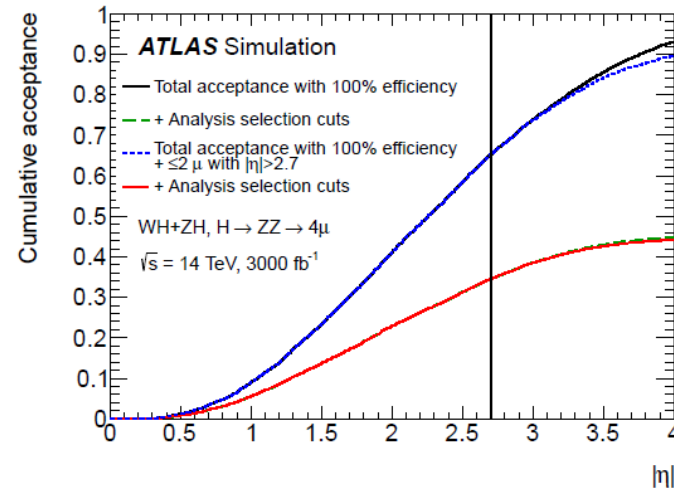
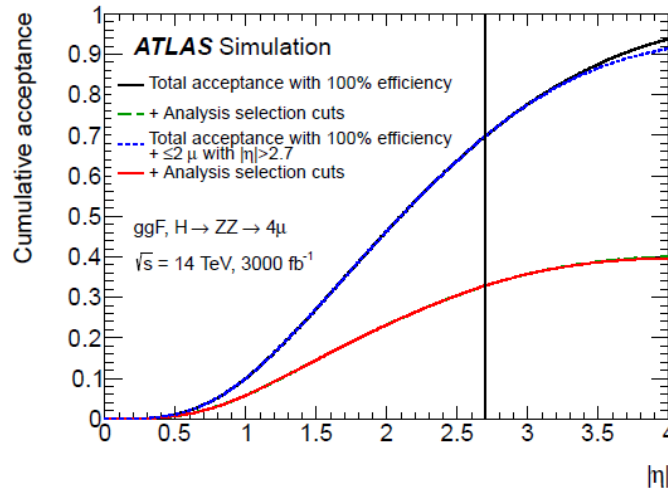
探测器位置: $|Z|=6800\text{mm}$ $2.7 < |\eta| < 4$ $25\text{cm} < R < 93\text{cm}$

性能需求: 高计数率性能, 较好的时间分辨以及位置分辨能力。

物理意义

1. Increased acceptance for

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow \mu\mu\mu\mu$$



- ggF process: **33%** @ $\eta < 2.7$ and **40%** @ $\eta < 4$ (**22%** improved)
- VH process: **35%** @ $\eta < 2.7$ and **45%** @ $\eta < 4$ (**30%** improved)

2. Look at asymmetry of forward-backward charge $q\bar{q} \rightarrow Z \rightarrow l^+l^-$

3. Additional lepton veto for $ZW \rightarrow l^+l^-l^+$ /bkg in $W^\pm W^\pm \rightarrow l^\pm l^\pm$

4. Increased acceptance for ZV multi \rightarrow leptons



- ATLAS 前向缪子探测器背景介绍
- 探测器性能模拟研究
- 探测器研制
 - THGEM-FTM 探测器原型研制以及宇宙线效率测试
 - 权场对探测器感应信号幅度的影响
 - RMSGC-FTM 探测器的设计
- 总结

探测器性能模拟研究流程

Geant4构建简化的
ATLAS探测器几何



PYTHIA8产生本底事例



探测器Hit点信息

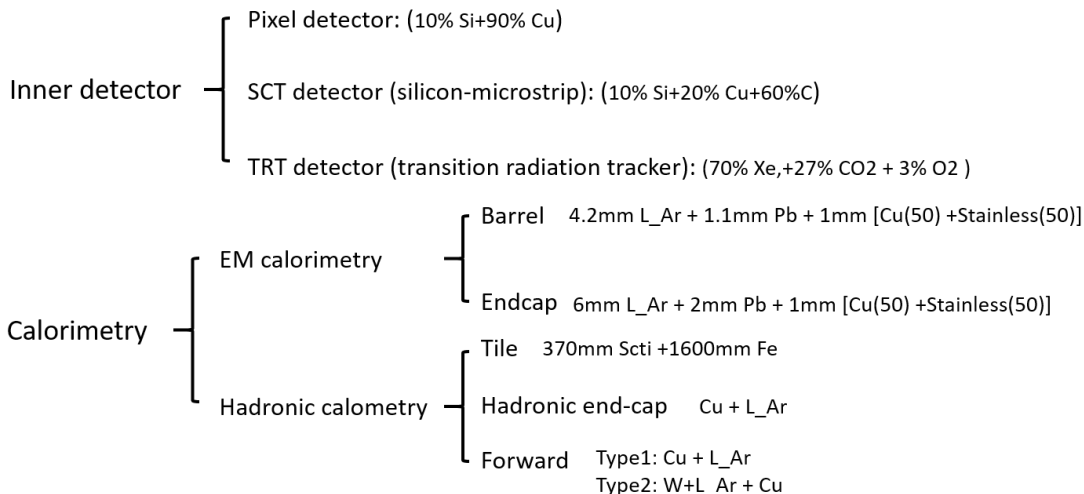


探测器性能需求 (计数
率能力, 位置分辨能力)

探测器几何

1. ATLAS探测器几何

Beam-pipe: 4mm AEROGEL + 1mm BERYLLIUM



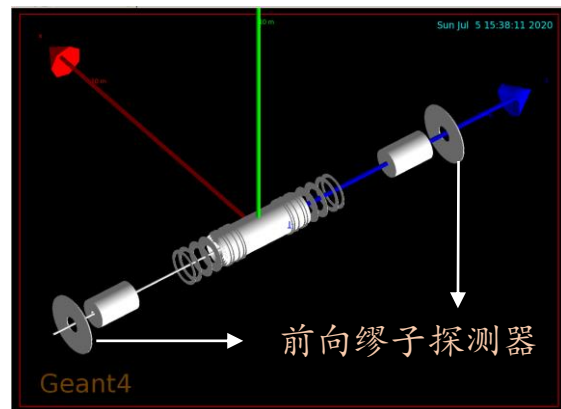
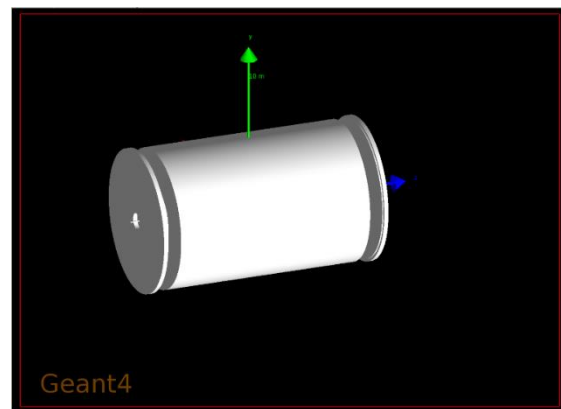
JD shielding disk: Iron

2. 前向缪子探测器几何

- 材料: 2mm PCB + 3mm 气体 + 2mm PCB
- 10个探测器模块(一边5个), 间距10mm。

Pythia8 产生本底事例输入到探测器

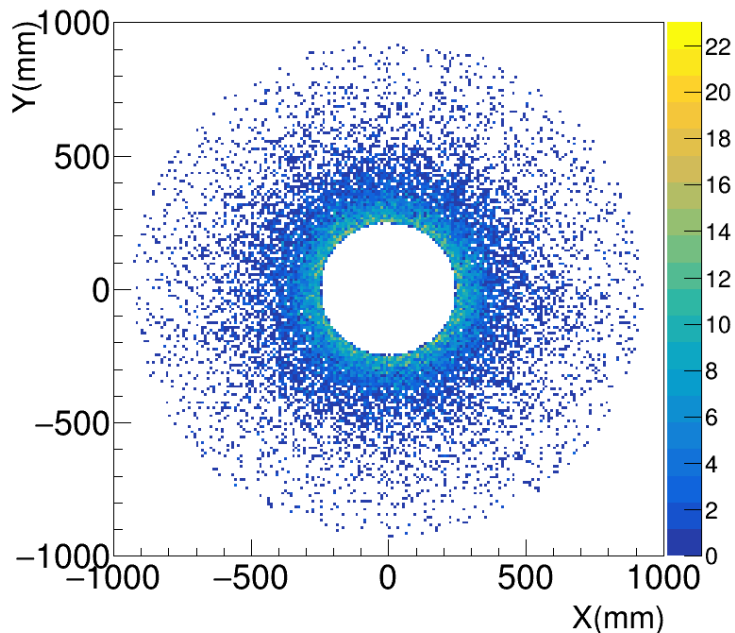
本底事例物理过程: [SoftQCD:nonDiffractive](#) (minimum-bias component)



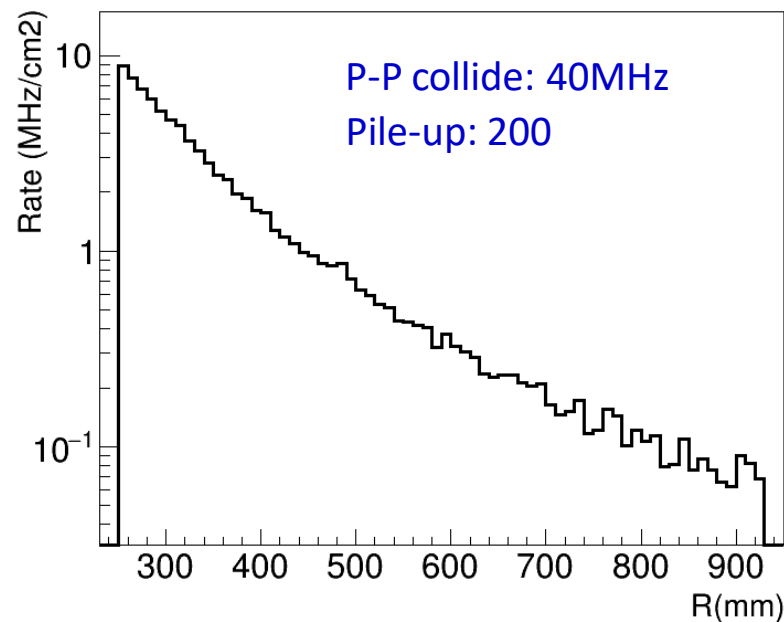
本底计数率

Pythia8产生10 K原初事例

二维hit点分布



计数率分布



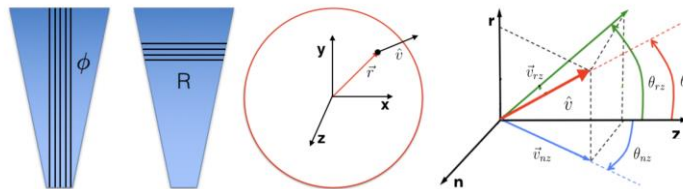
R (η)	250 (4)	340 (3.7)	450 (3.4)	610 (3.1)	830 (2.8)
Rate (MHz)	8.8	2.3	0.84	0.23	0.076

本底计数率随半径的变化 (最高 ~ 10 MHz/cm²)

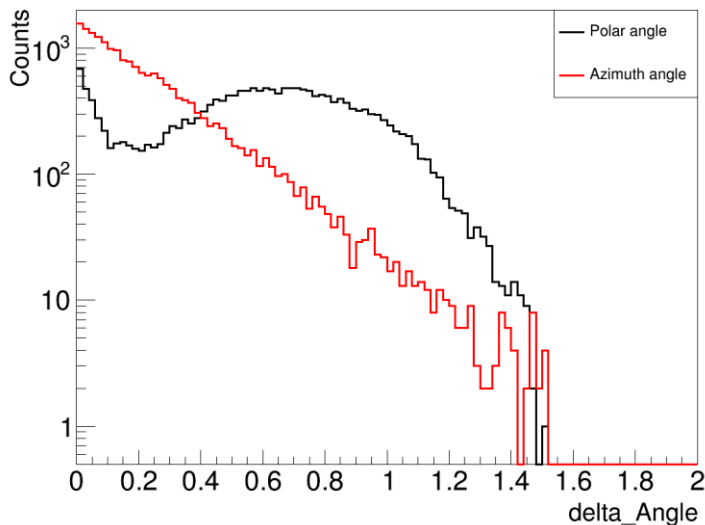
本底事例径迹段重建

重建本底事例在前向缪子探测器上的径迹段

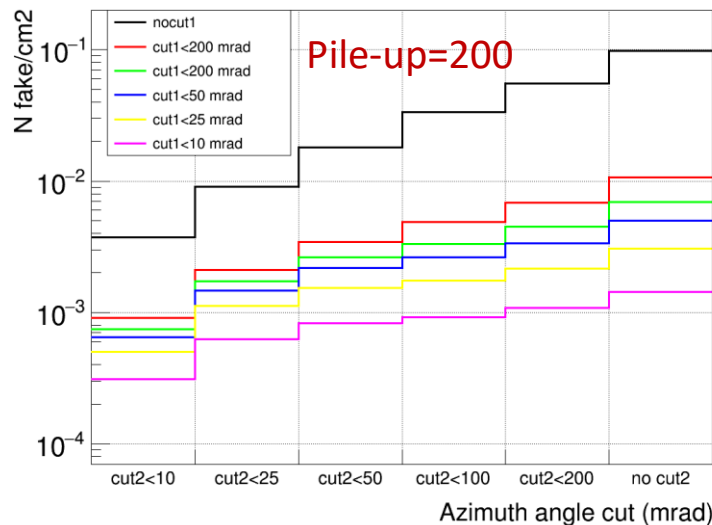
1. 本底径迹段Hit点>3时，重建径迹段。
2. 计算极角与方位角分布。
3. 判断径迹段的延长线是否过对撞点。



极角与方位角计算



极角与方位角分布

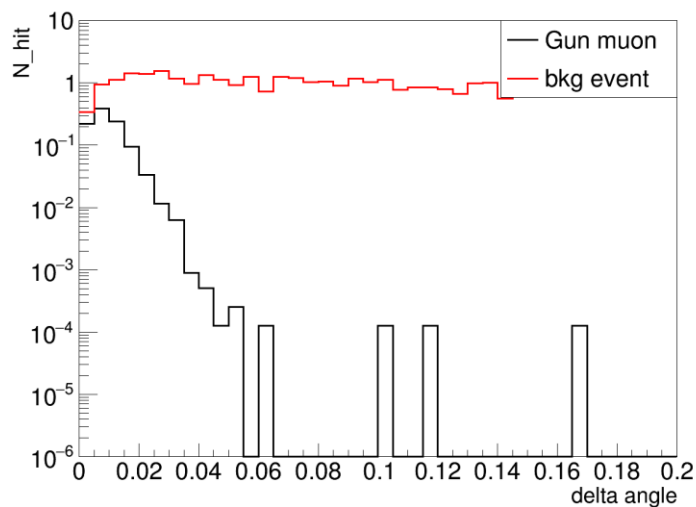
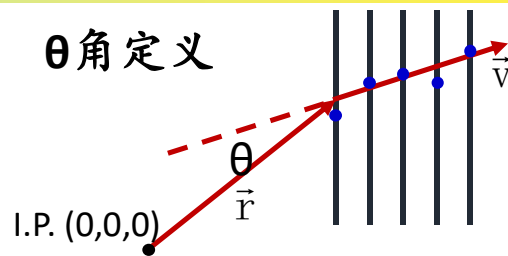


不同cut条件下的径迹段数目 ($3.7 < \eta < 4$)

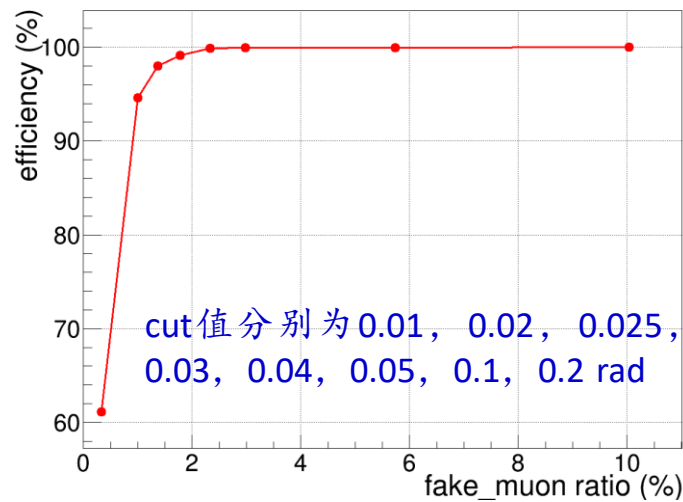
- 无cut条件: $1 \cdot 10^{-1} / \text{cm}^2$
- cut1<10 && cut2<25 : $6 \cdot 10^{-4} / \text{cm}^2$ 对应的位置分辨: $300 \mu\text{m} \ \&\& \ 900 \mu\text{m}$

muon 效率和本底假 muon 效率

- Muon事例: GEANT4 ParticleGun产生10k single muon事例 (20 GeV), 均匀分布。
- 计算重建径迹段与对撞点到Hit点连线之间的夹角分布。



muon径迹段与本底径迹段的 θ 角分布



muon效率以及本底假 muon 效率

归一化: PileUp=200, muon 事例归一化1, 本底事例归一化到200。

当cut取值为0.03、0.04 rad时, 保证较高效率的同时, 具有较好的本底排斥率, 对应的探测器位置分辨在数百微米。



探测器性能需求

1. 探测器计数率性能: 最高到达10MHz/cm² @η=4

R (η)	250 (4)	340 (3.7)	450 (3.4)	610 (3.1)	830 (2.8)
Rate (MHz)	8.8	2.3	0.84	0.23	0.076

2. 探测器位置分辨能力: 二维位置分辨, 数百微米

- 本底事例径迹段可以压制到 10^{-3} /cm² 以下。
- muon效率可以达到99%的同时, 本底事例假muon的效率可以压制到2%以下。

cut (rad)	0.1	0.04	0.03	0.02
Muon (%)	94.6	99.1	99.86	99.96
假 muon(%)	1	1.8	2.3	5.7

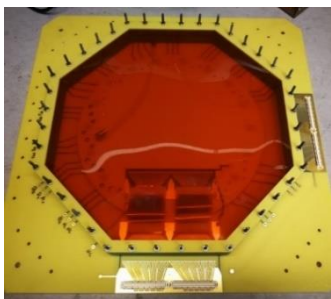
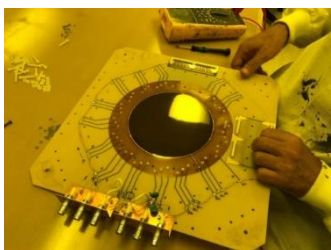


报告概要

- ATLAS 前向缪子探测器背景介绍
- 探测器性能模拟研究
- 探测器研制
 - THGEM-FTM 探测器原型研制以及宇宙线效率测试
 - 权场对探测器感应信号幅度的影响
 - RMSGC-FTM 探测器的设计
- 总结

探测器技术路线

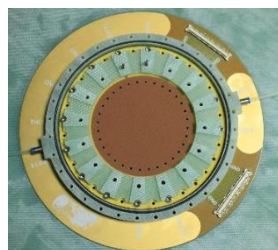
全阻性 GEM
探测器 (FTM)



2016-2018: 4层探测器原型研制，明显的电流信号，看不到感应信号，放弃此方案。

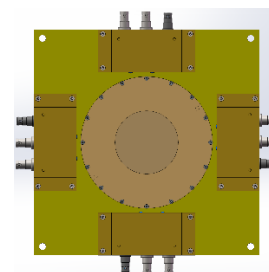
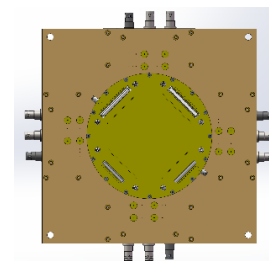
全阻性多气隙微结构气体探测器结构不可避免的会出现电场变弱导致感应信号幅度变低的问题。

THGEM-FTM
探测器



2018-2020: 单层探测器基本性能测试，4层探测器的宇宙线效率测试。

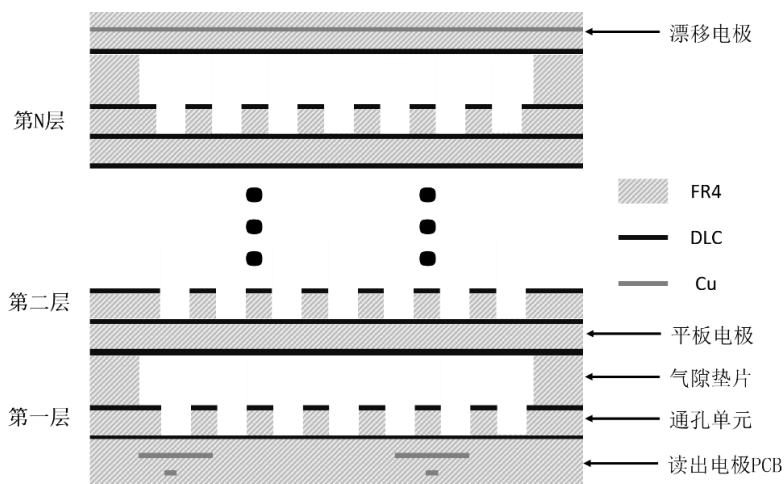
RMSGC-FTM
探测器



2020: 完成探测器的设计工作。

THGEM-FTM 探测器

阻性电极: 感应信号透明

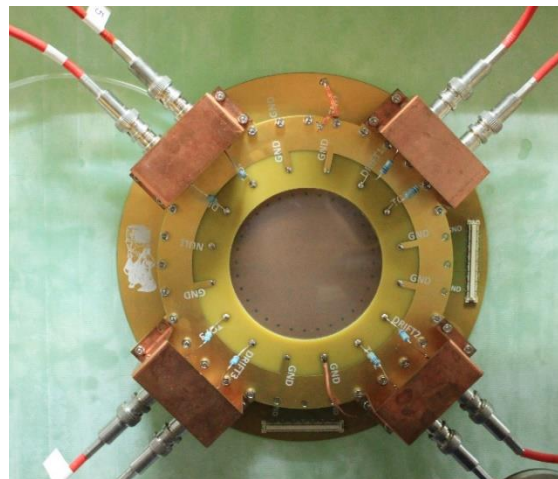


层数可扩展的THGEM-FTM 探测器结构图

探测器参数

- 放大区厚度: 0.4mm
- 孔径: 0.5mm @1mm pitch
- 漂移区厚度: 通过气隙垫片厚度可调整, 常用厚度为1mm和0.2mm

多层结构: 提高探测器时间分辨



四层THGEM-FTM (5cm X 5cm) 探测器

探测器工作环境

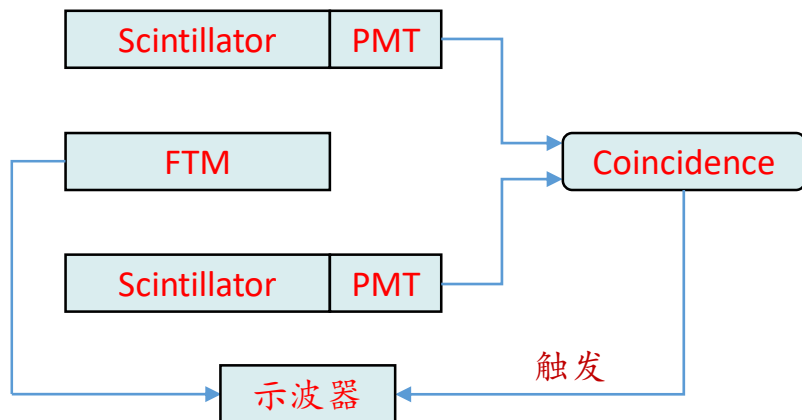
- 工作气体: $\text{Ne}/\text{CH}_4=95/5$
- 每一层探测器单独加高压
- 读出方式: 二维条状读出

宇宙线探测效率测试系统

两个PMT符合事例做触发



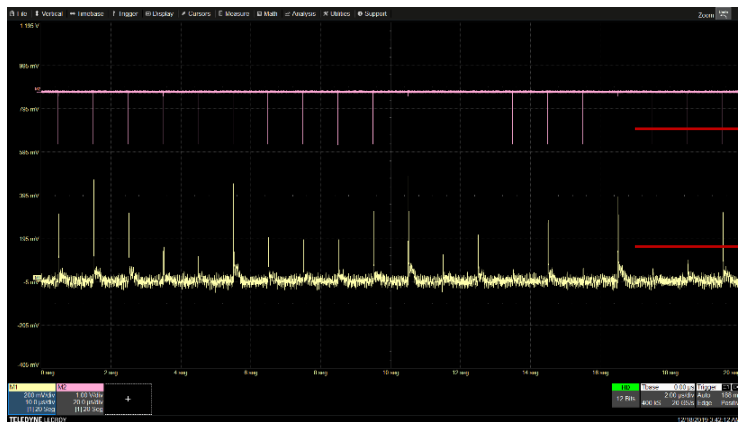
示波器记录波形数据



测试系统流程图



测试系统实物图



闪烁体触发信号

FTM信号

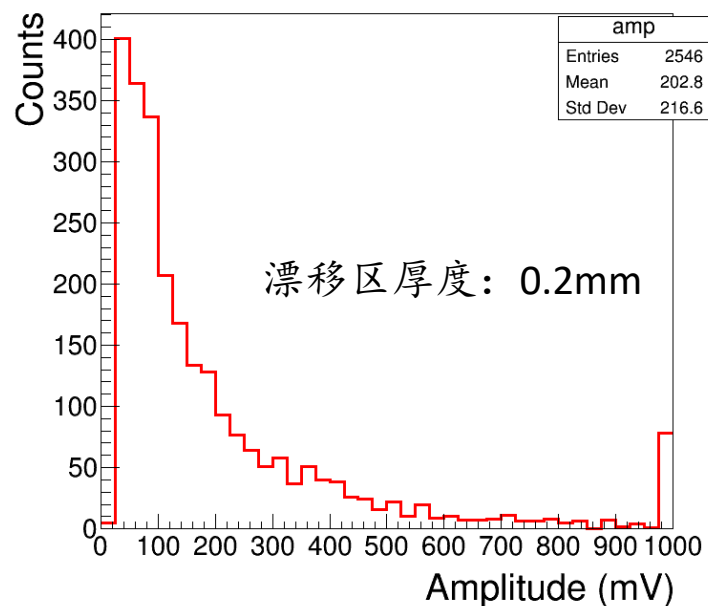
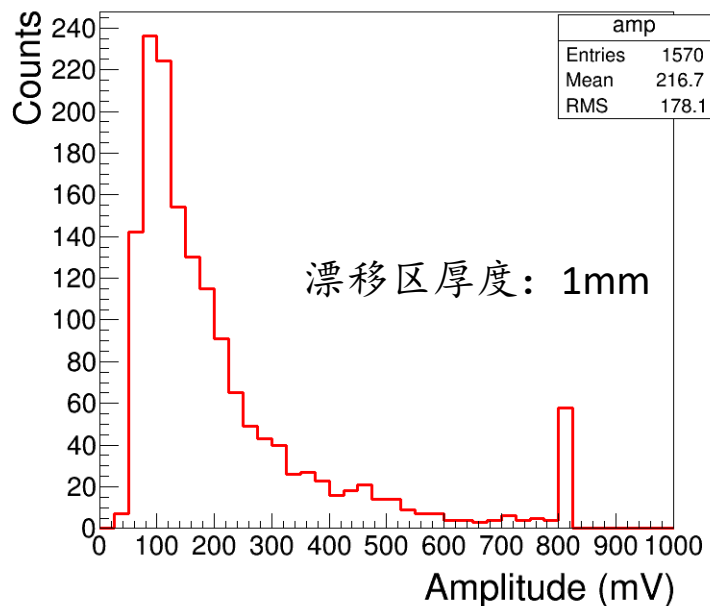
示波器波形图(Sequence 模式)



四层 THGEM-FTM 探测效率

宇宙线能谱

过阈宇宙线信号幅度分布



- 总的宇宙线事例数: $20 \times 105 = 2010$
- FTM过阈事例数: 1568
- 效率: $1568 / 2010 = 78\%$

- 总的宇宙线事例数: $20 \times 263 = 5260$
- FTM过阈事例数: 2546
- 效率: $2546 / 5260 = 48\%$

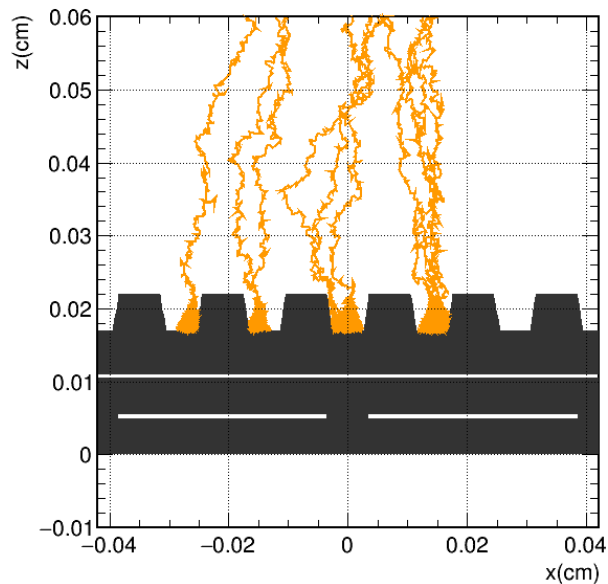
四层 THGEM-FTM 探测器探测效率: 78% @1mm 单气隙, 48% @0.2mm 单气隙

权场对井型探测器的影响

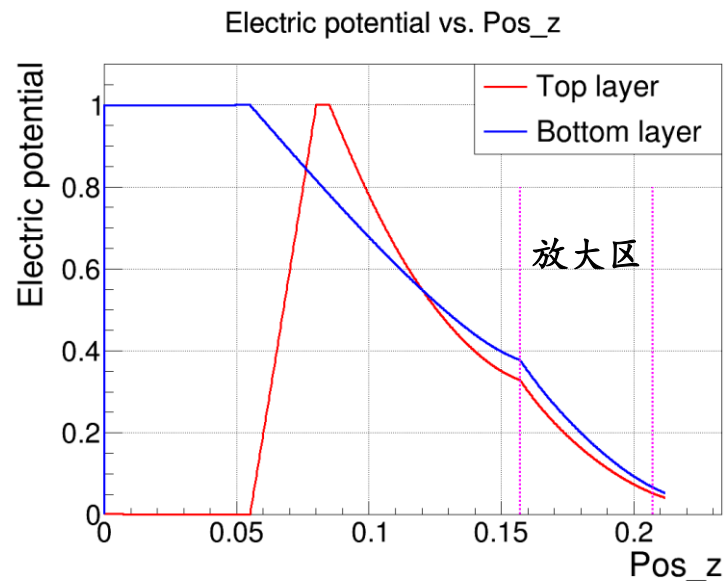
读出电极感应信号的 Ramo 定理

权场: 目标读出电极电压设为1, 其余电极设为0, 所得到的空间电场分布。

感应信号计算:
$$I_n^{ind}(t) = -qE_n(x(t)) \frac{dx(t)}{dt}$$



μRWELL探测器



权场分布

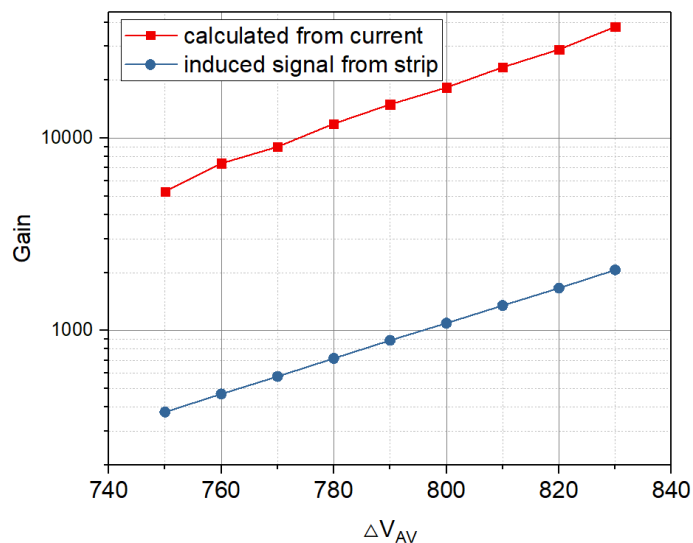
μRWELL探测器: 雪崩后次级粒子只能在井型孔里漂移, 在权场中运动所产生的有效电势差要小于1, 感应信号增益小于探测器的绝对增益, 约为0.3倍左右。

权场对全阻性多层结构探测器的影响

阻性电极: 对感应信号透明, 权场降低, 感应信号幅度下降。

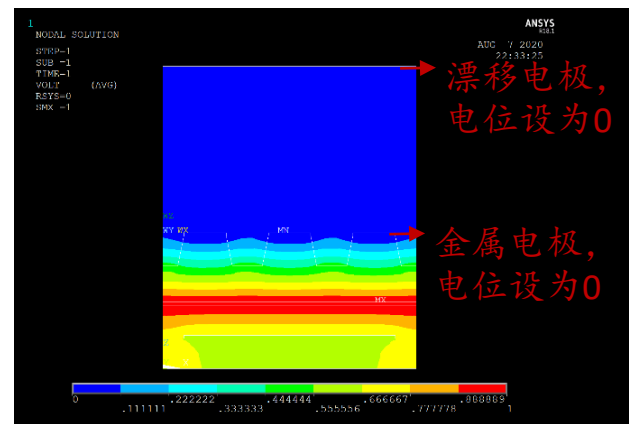
电流法: 绝对增益

能谱法: 感应信号增益

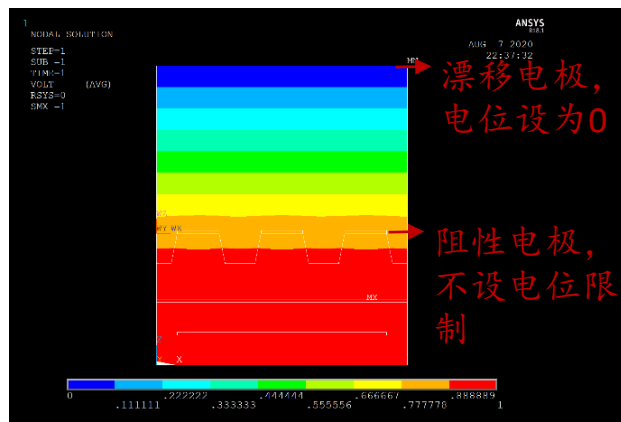


单层THGEM-FTM探测器增益曲线

由于阻性电极的存在, 对于全阻性多气隙探测器结构, 感应信号增益小于探测器绝对增益。



金属电极情况下的权场分布

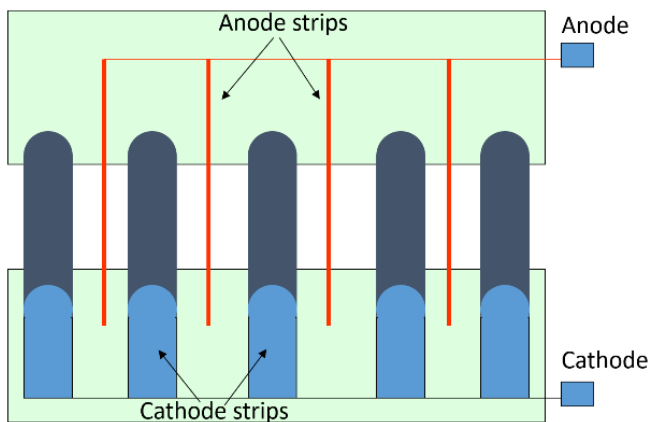


阻性电极情况下的权场分布

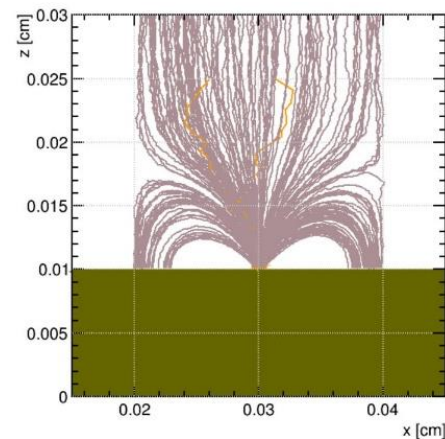
R-MSGC 探测器

R-MSGC: 条型放大结构的，相邻的金属电极为读出电极和漂移电极，有望克服孔型放大结构中存在的电场问题。

探测器优点: 制作与安装过程简单，造价低，容易清洁。



CERN PCB工厂制作出来的R-MSGC



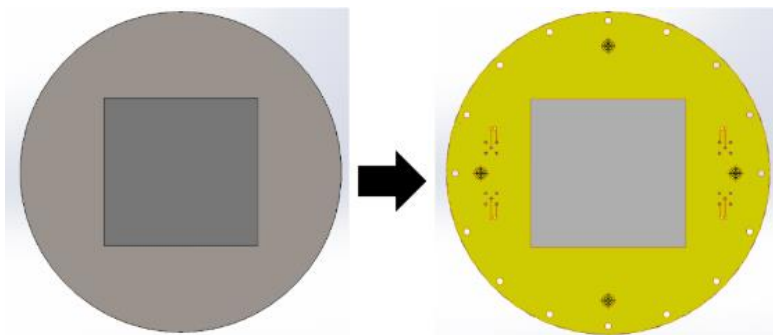
MSGC中的电荷漂移

R-MSGC面临的两个技术问题

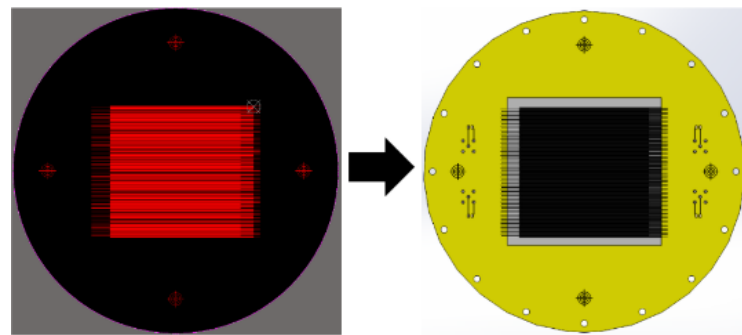
1. 阳极条厚度通常在 $5\mu\text{m} \sim 10\mu\text{m}$ 之间，无法做得更薄，对表面流光的抑制不够完美；
2. PCB基材在探测器工作时存在极化和充电效应，造成探测器计数率能力低，增益随时间变化；

科大R-MSGC 方案

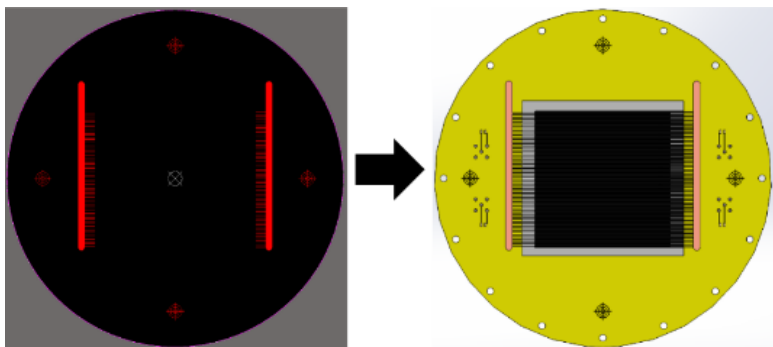
与兰州化学物理研究所和甘肃省科学院传感技术研究所合作，使用微机电系统制造技术加工制备R-MSGC探测器。



STEP1: 在有效区沉积一层高阻DLC



STEP2: 用剥离法沉积出阻性DLC电极



STEP3: 用剥离法沉积出供电的Cu线路

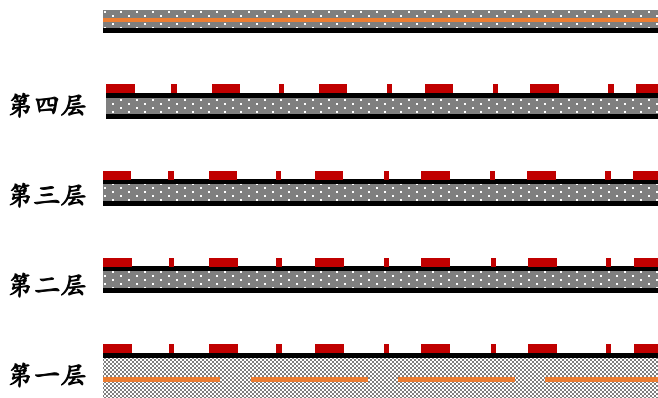
解决R-MSGC两个技术问题的方法:

1. 使用DLC阻性电极制作技术，在PCB上制作厚度很小(40nm~800nm)的DLC阻性条；
2. 在PCB基材沉积一层面电阻率为 $1\text{T}\Omega/\square \sim 1\text{P}\Omega/\square$ 的DLC，可以保证增益的稳定性；

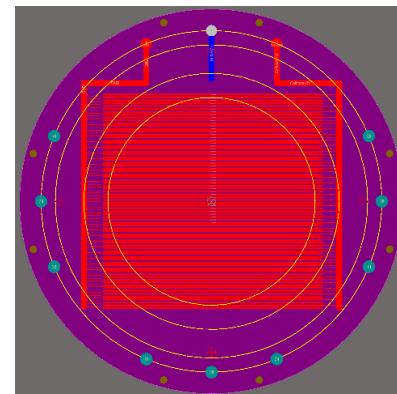
R-MSGC FTM 方案

R-MSGC 参数: 放大区 Pitch: 1 mm, 阳极条宽: 0.6 mm, 阴极条宽: 0.02 mm

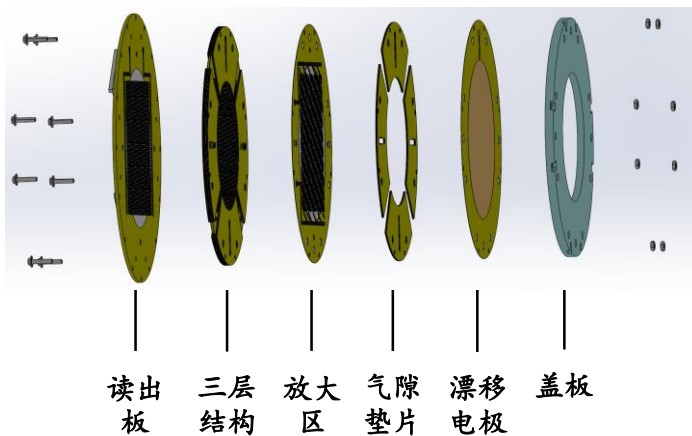
四层R-MSGC FTM结构示意图



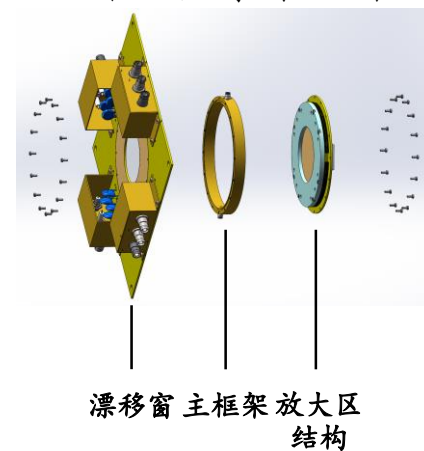
R-MSGC放大区



探测器放大区爆炸视图



探测器爆炸视图





总结

- 对ATLAS前向缪子探测器的工作环境进行了模拟，并得到了探测器的计数率性能指标以及初步的位置分辨需求
 - 本底计数率: 最高约 $\sim 10 \text{ MHz/cm}^2$
 - 位置分辨需求: 数百微米的二维位置分辨能力
- 制备了多层的THGEM-FTM探测器原型，测试了4层THGEM-FTM探测器原型的宇宙线探测效率
 - 探测效率: 78% @1mm 单层气隙 48% @0.2mm 单层气隙
- 完成了RMSGC-FTM探测器的设计工作