

CMS实验ME0 GEM探测器升级进展

何宗晟
北京大学

第十三届全国先进气体探测器研讨会, 上海
2025年8月21日

1. CMS实验ME0 GEM探测器升级项目介绍

- CMS GEM探测器的设计
- ME0 GEM探测器的生产方案

2. 北京大学组装测试的ME0 GEM探测器

- 组装
- 质控测试
- 常见问题及解决方法

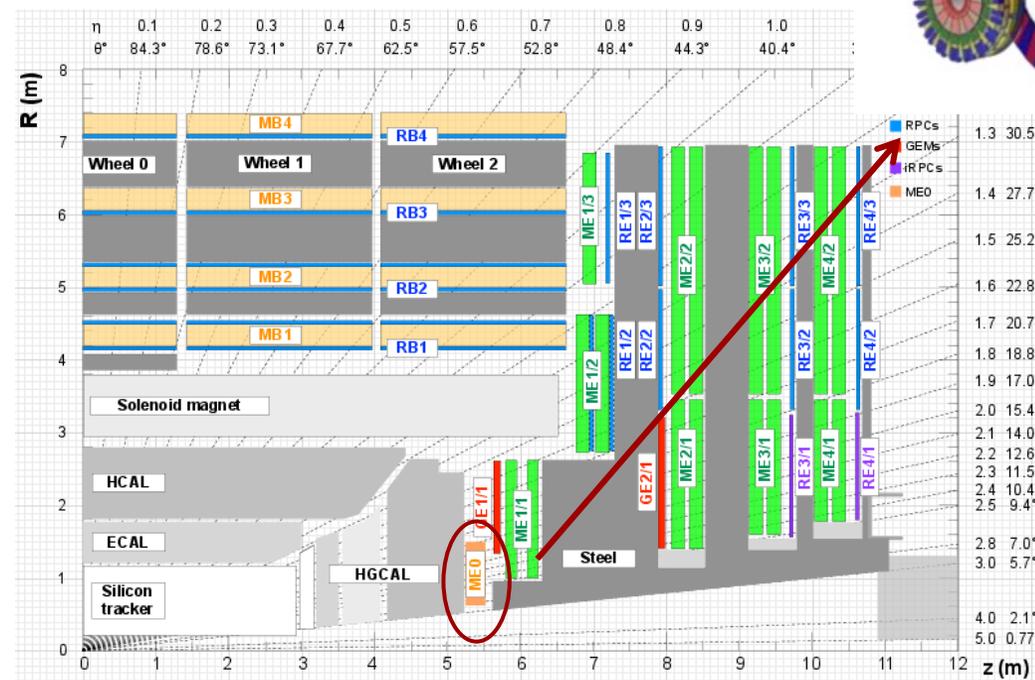
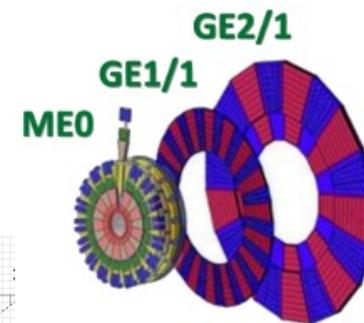
3. 在欧洲核子研究中心进行的后续组装和质控测试

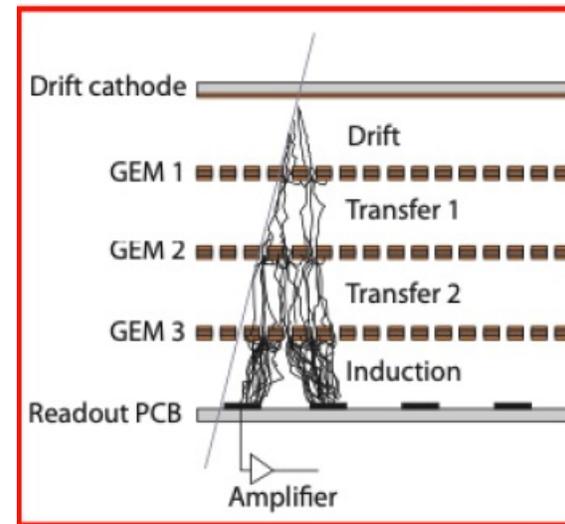
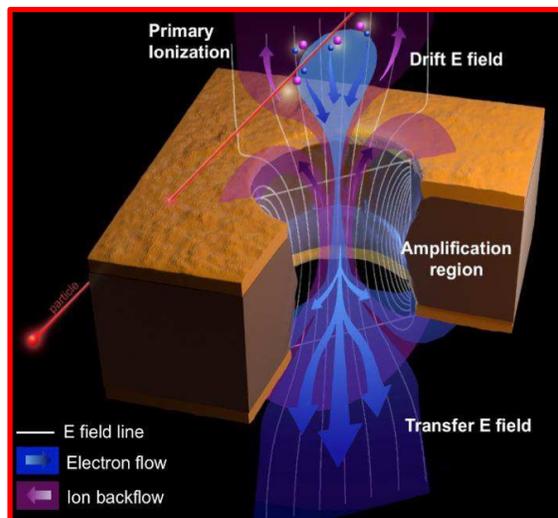
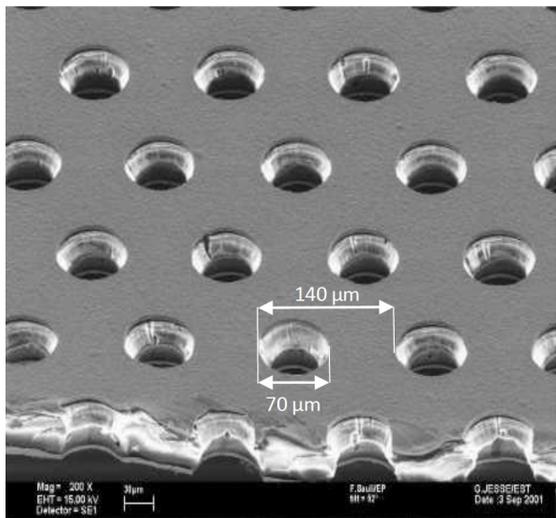
4. 总结

大型强子对撞机(LHC)计划在2029年升级为高亮度大型强子对撞机(HL-LHC)，伴随着束流亮度的提升，探测器也需要对应的升级。CMS实验的气体电子倍增探测器(GEM)升级项目通过在CMS端盖部分安装GEM探测器以维持CMS探测器对物理信号，尤其是缪子的探测效率。

ME0 GEM探测器更靠近束流($2.0 < \eta < 2.8$)，因此对其性能有更高的要求

- **计数率(Rate Capability):**
> 150kHz/cm²，对于GE2/1和GE1/1 GEM探测器仅为kHz/cm²量级
- **耐受力(Longevity):** 在7.9C/cm²的辐射环境下仍能工作





GEM膜是一种两面镀金属铜的绝缘薄膜，膜上均匀分布贯穿的小孔。绝缘薄膜厚度为 $25\mu\text{m}$ ，铜镀层厚度 $18\mu\text{m}$ 。在膜上通过刻蚀技术构造的小孔直径为 $70\mu\text{m}$ ，小孔之间间隔 $70\mu\text{m}$ 。每个GEM探测器内有三层GEM膜。

在膜上下表面电压差 200V 时，孔内的最大场强可达 40kV/cm ，上层工作气体电离出的电子漂移进入小孔后，在强大电场的作用下雪崩倍增并继续向下层膜漂移，雪崩放大产生的阳离子则沿反方向漂移并被电极吸收。

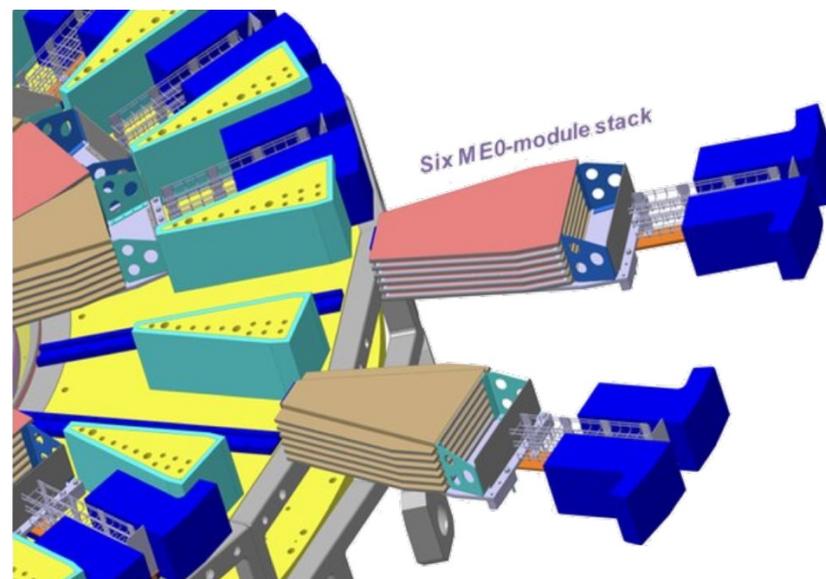
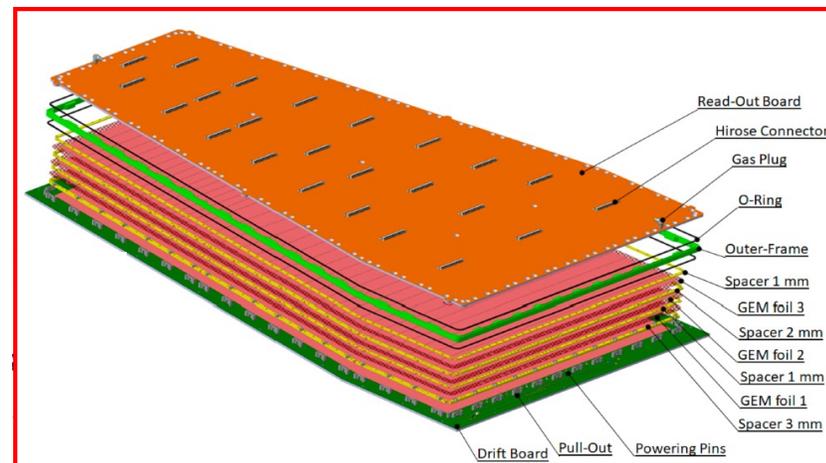
整体结构与GE1/1及GE2/1 GEM探测器相同，其中GE1/1 GEM探测器已经安装在CMS上，正在进行Run 3的运行。

整个系统由216块ME0探测器构成，每个端盖108块：

- 6个三层膜的GEM探测器构成一个stack
- 每个端盖有18个模块

技术要求：

- 模块效率超过97%
- 时间分辨率：8-10ns
- 增益非一致性：<15%
- 空间分辨率：<500 μ rad





- **Vendors**
 - Manufacturing of the detector components
 - Shipment to CERN
- **Central Site (at CERN)**
 - Material inspection (QC1/QC2)
 - Pre-assembly work
 - Preparation of assembly kits
 - Shipment to/back from production sites
- **Production Sites**
 - Module assembly
 - QC2-QC5 tests
 - Data Base updates

批次	1	2	3	4 & 5	6
时间	2024.7-2024.9	2024.10-2024.12	2025.2-2025.4	2025	2026

组装测试完成的ME0 GEM探测器被运往欧洲核子研究中心进行进一步的组装和测试，目前正在进行第4批次的ME0 GEM探测器组装测试的准备工作。



在北京大学组装的第一块ME0 GEM探测器

CERN

QC1: 检查探测器组装部件

QC2: GEM膜阻抗测量 (快速测量+长时间测量)

生产基地
(北京大学组)

QC2: GEM膜阻抗测量 (快速测量)

组装探测器模块

QC3: 模块气密性测量

QC4: 模块工作电压测试

QC5: 工作气体有效增益测量 (增益测量)

CERN

QC5: 工作气体有效增益测量 (均匀性测量)

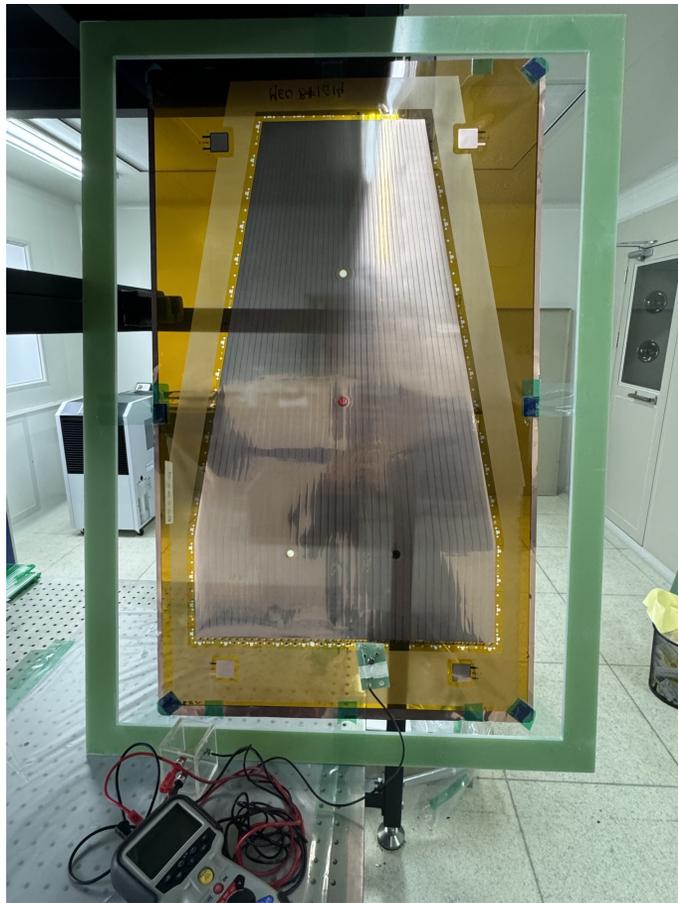
QC6: 模块高压稳定性测试

QC7: 读出电子学系统测试

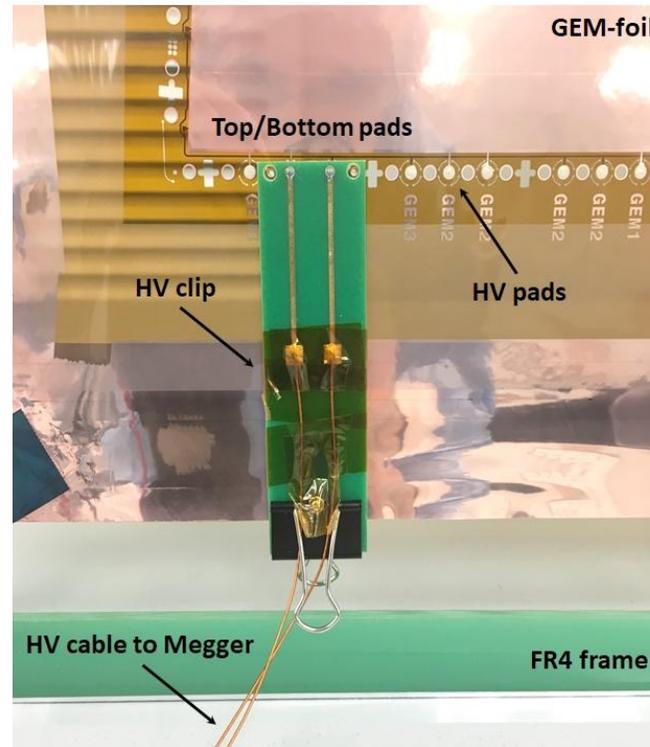
QC8: 宇宙线测试



在组装测试期间，与欧洲核子研究中心及其他生产站点进行间周组会，总结经验教训改进工作流程。



使用胶带固定GEM膜，使膜绷直

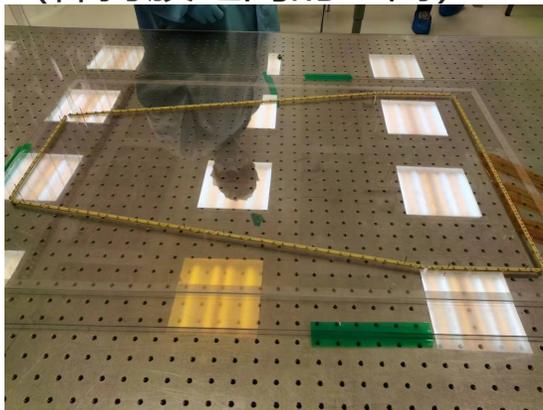


- 将万用表(Megger)连接到膜旁对应的高压接触点上，测量膜的阻抗
- 如果存在短路，观察电火花的位置，使用静电滚轮进行清洁

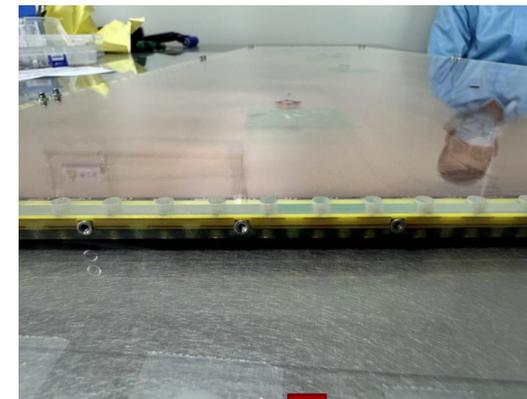
使用静电滚轮对GEM膜进行清洁



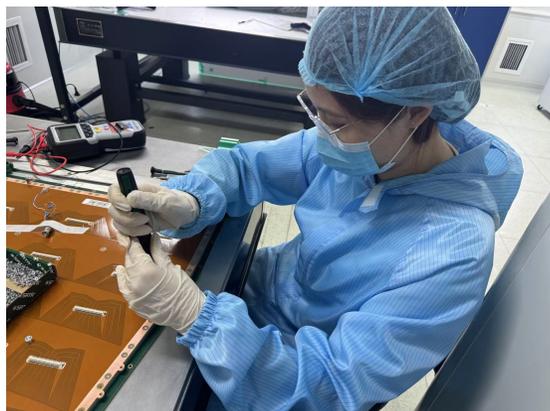
放置内框架和支撑柱
(保持膜之间的距离)



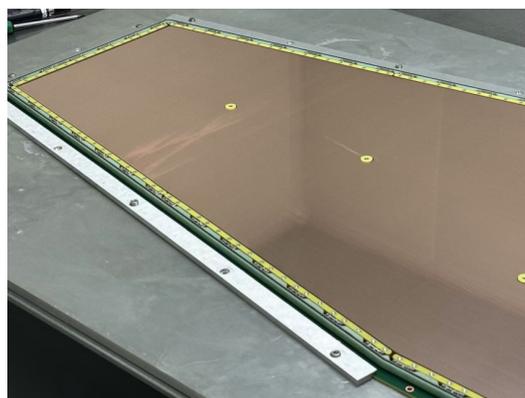
将3层GEM膜按次序放置



清洁漂移板(DB), 将组装好的3层膜放于其上



安装读出板(RB)

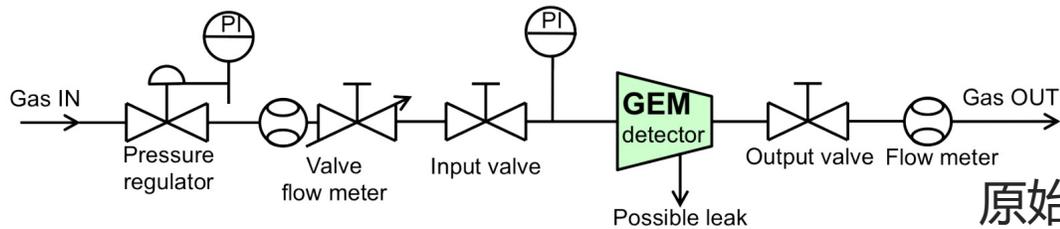


安装带有O圈的外框架

QC3: 气密性测试

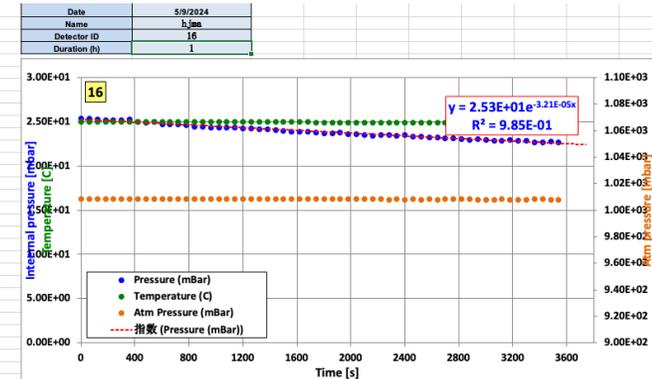


- 向探测器中通入CO₂, 使内外气压差超过25mbar, 关闭阀门, 等待1小时, 每分钟记录一次气压差
- 若1小时后内压下降不超过7mbar则该探测器通过QC3测试



原始数据

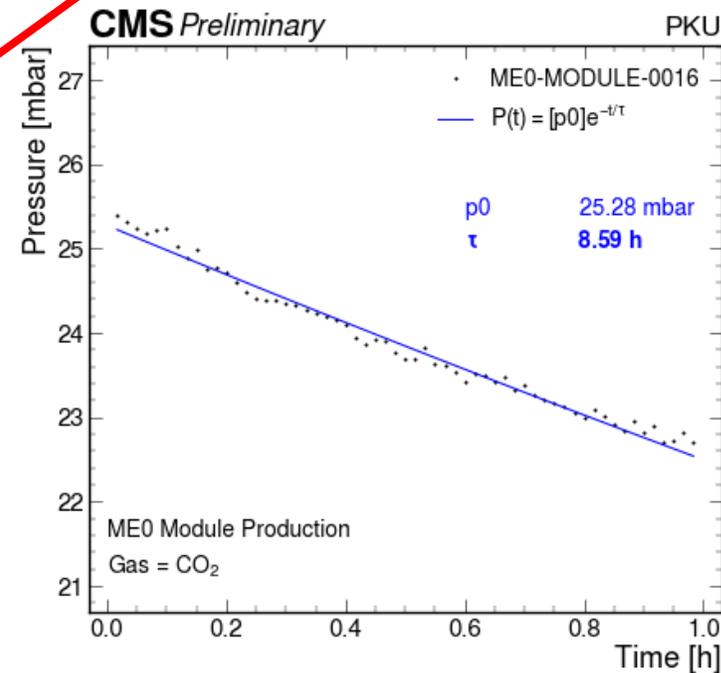
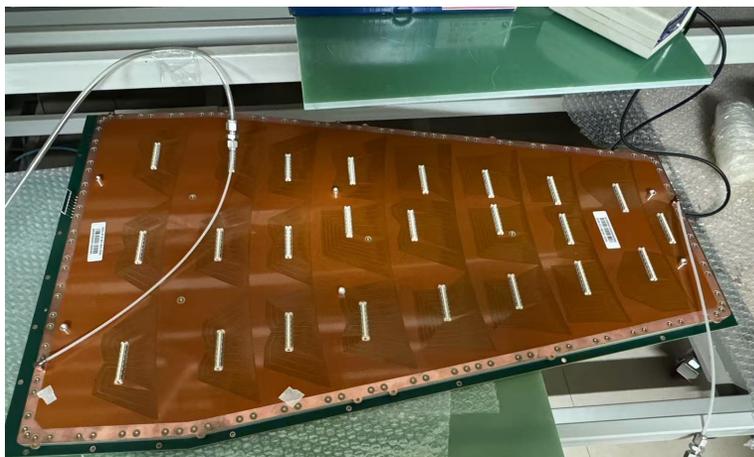
Time	Seconds	Pressure (mBar)	Temperature (C)	Atm Pressure (mBar)
11:46:24	0.00	2.54E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:47:24	60.00	2.54E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:48:24	120.00	2.53E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:49:24	180.00	2.52E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:50:24	240.00	2.52E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:51:24	300.00	2.52E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:52:24	360.00	2.52E+01	2.51E+01	1.01E+03
11:53:24	420.00	2.50E+01	2.51E+01	1.01E+03
11:54:24	480.00	2.49E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:55:24	540.00	2.50E+01	2.51E+01	1.01E+03
11:56:24	600.00	2.48E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:57:24	660.00	2.48E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:58:24	720.00	2.47E+01	2.50E+01	1.01E+03
11:59:24	780.00	2.47E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:00:24	840.01	2.45E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:01:24	900.01	2.44E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:02:24	960.00	2.44E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:03:24	1020.01	2.44E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:04:24	1080.01	2.44E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:05:24	1140.01	2.43E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:06:24	1200.01	2.43E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:07:24	1260.01	2.42E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:08:24	1320.01	2.42E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:09:24	1380.01	2.42E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:10:24	1440.01	2.41E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:11:24	1500.01	2.39E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:12:24	1560.01	2.40E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:13:24	1620.01	2.39E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:14:24	1680.01	2.39E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:15:24	1740.01	2.38E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:16:24	1800.01	2.37E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:17:24	1860.01	2.37E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:18:24	1920.01	2.38E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:19:24	1980.01	2.38E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:20:24	2040.01	2.36E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:21:24	2100.01	2.35E+01	2.50E+01	1.01E+03
12:22:24	2160.01	2.34E+01	2.49E+01	1.01E+03
12:23:24	2220.01	2.35E+01	2.49E+01	1.01E+03
12:24:24	2280.01	2.35E+01	2.49E+01	1.01E+03
12:25:24	2340.01	2.35E+01	2.49E+01	1.01E+03
12:26:24	2400.01	2.35E+01	2.49E+01	1.01E+03



Summary		Error
Temperature (C)	24.96133333	0.060013
Atm Pressure (mBar)	1008.3492	0.0982939
Initial pressure (mBar)	25.4103	
Final pressure (mBar)	22.8231	
Duration (h)	1	
Leak rate (mBar/h)	2.5872	
Exponential fit P0	25.28485046	
Exponential P1	-3.22461E-05	

气温

气压

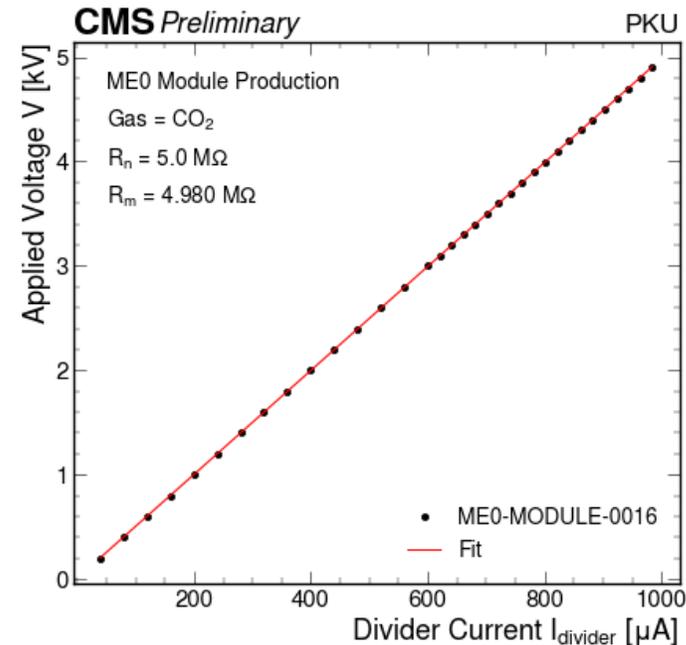
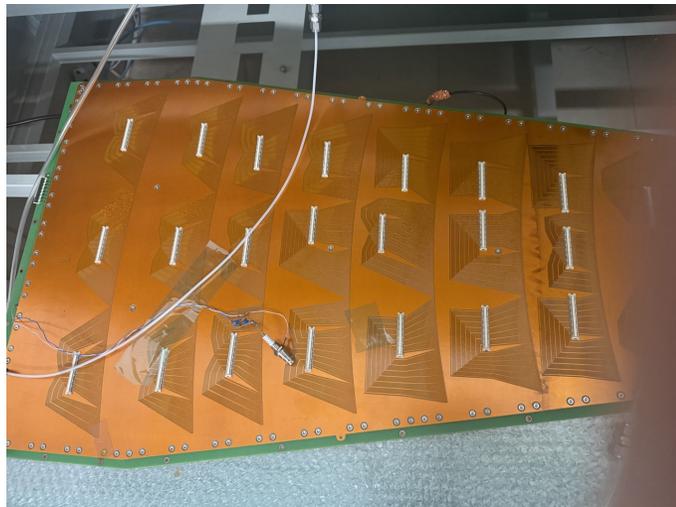
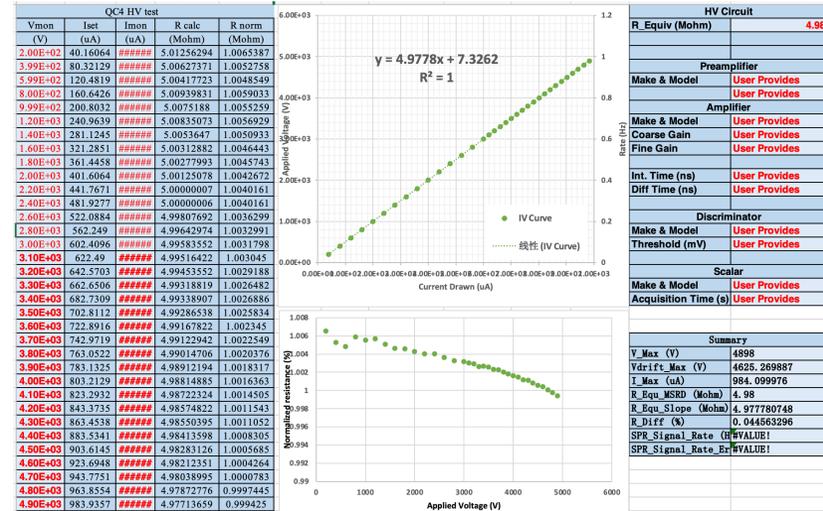
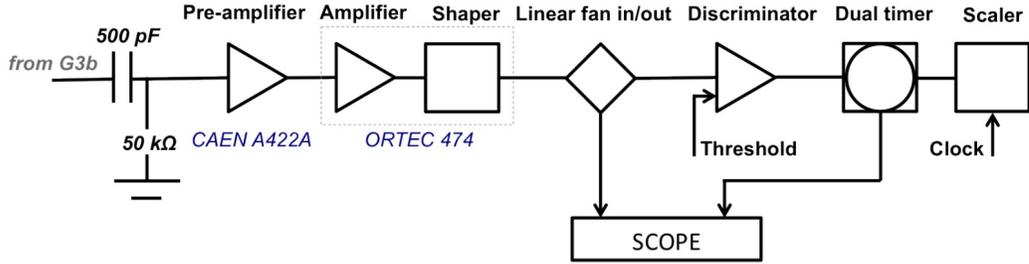


QC4: 高压测试 (伏安特性曲线测试)



为得到探测器的伏安特性曲线，向探测器中持续通入CO₂，并施加200V到4900V的高压

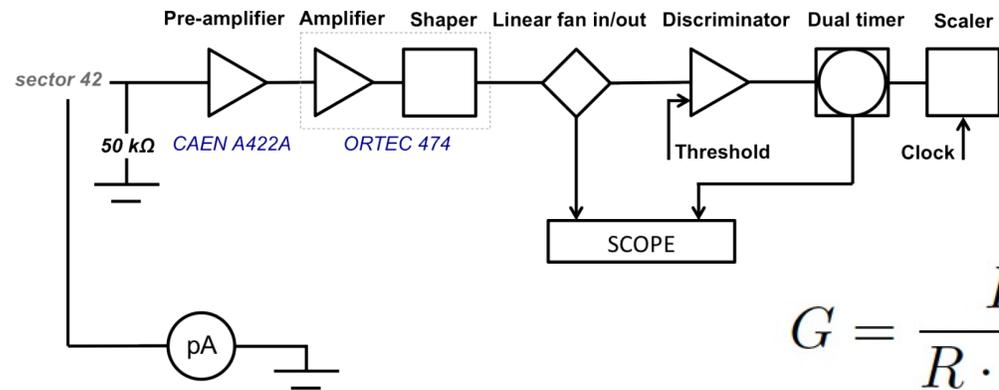
- 200V-3000V时，电压间隔200V；
3000V-4900V时，电压间隔100V
- 通过施加的电压和分压器上测到的电流计算得到伏安特性曲线



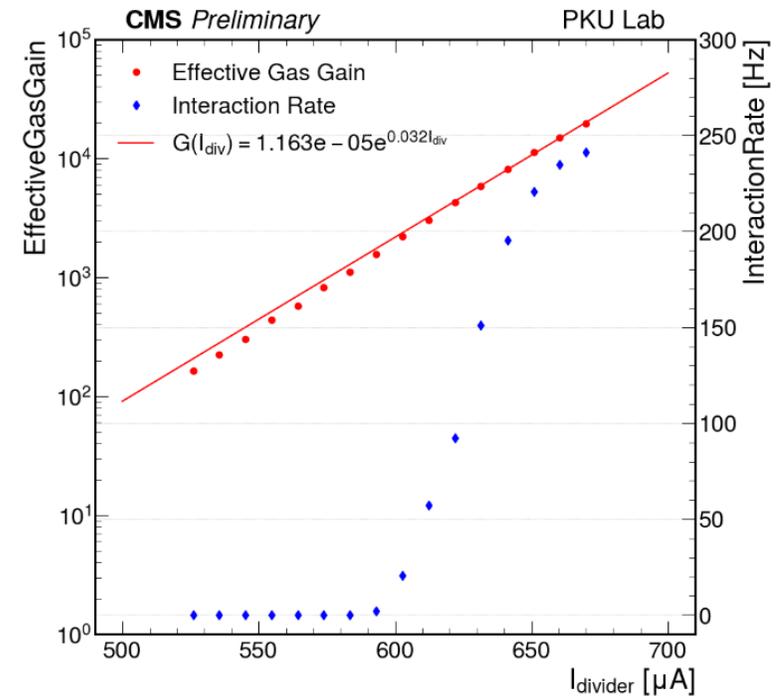
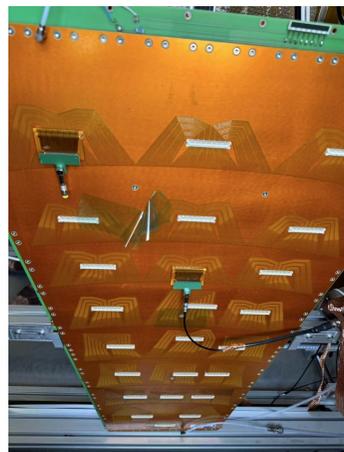
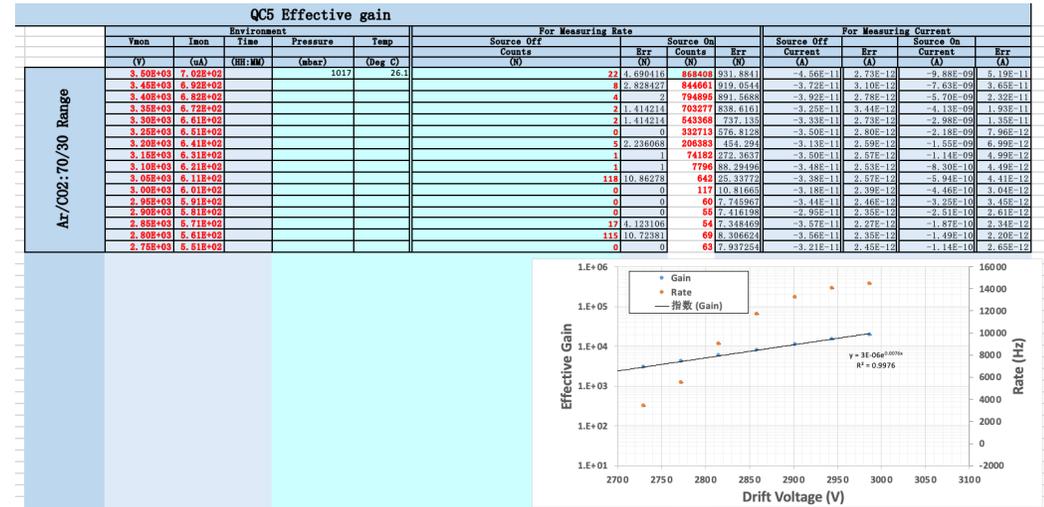
QC5 (阶段一) : 用X射线进行有效气体增益测试



- 向探测器中通入70%Ar, 30%CO₂的混合气, 分别在打开和关闭X射线源的条件下测量 (用于扣除本底) 得到有效气体增益与电压的关系
- 通过计数率和测量到的电流计算有效增益



$$G = \frac{I_{RO}}{R \cdot e \cdot N_p}$$

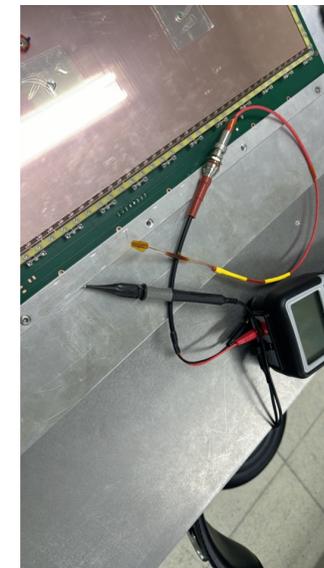


➤ 组装后出现短路

- 很可能是有灰尘落到了GEM膜上
- 如果短路发生在第3层膜，即靠近读出板的膜，移除读出板，使用静电滚轮进行清洁
- 如果短路发生在第1/2层膜，移除读出板和漂移板，使用挂钩在发生短路的部分 (sector) 上加高压进行清理

➤ 气密性不良

- 使用气体探测器 (mini-tracer) 来检查发生气体泄漏的位置
- 替换打入带有垫片的螺丝
- 在气嘴附近补充AB胶进行密封

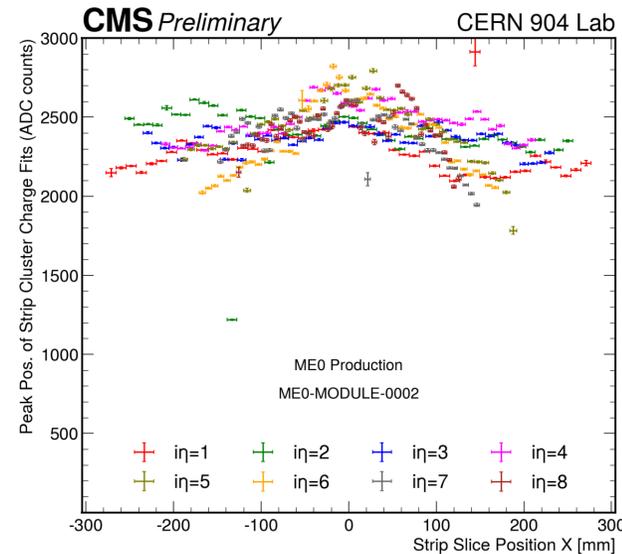
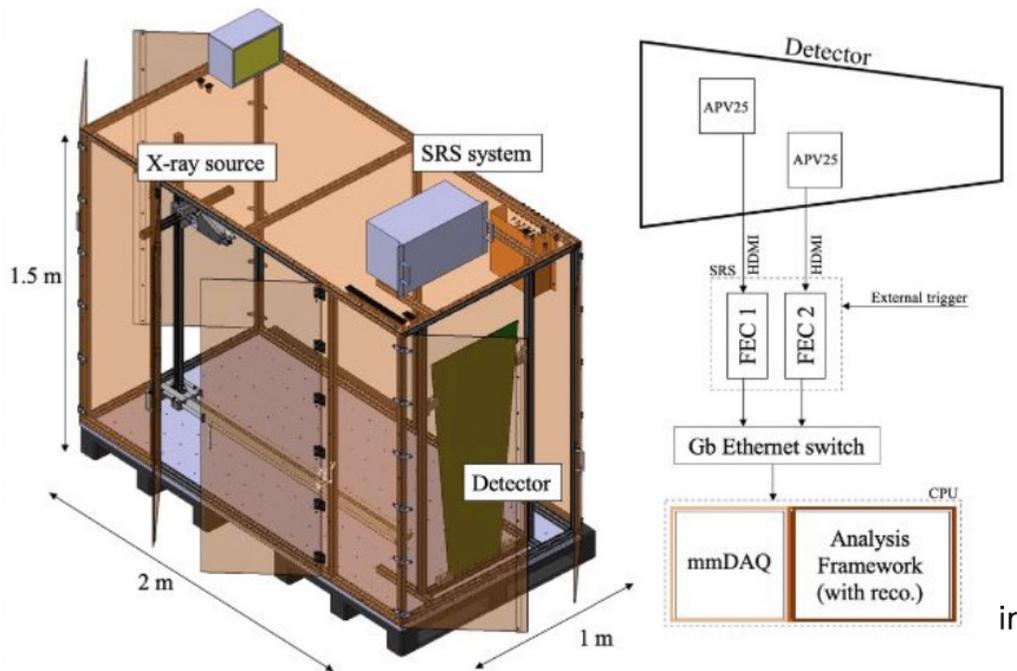


QC5 (阶段二) : 增益均匀性检测(欧洲核子中心)

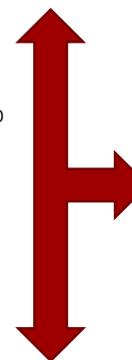


信号->APV25->ADC->FEC->DAQ

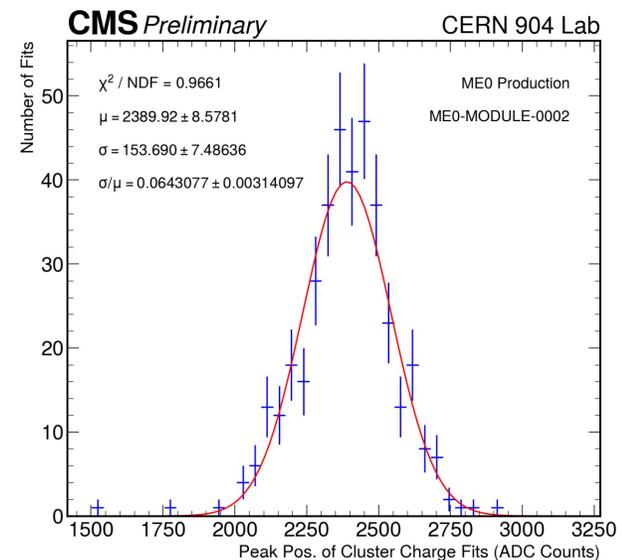
- APV: Analog Pipeline Voltage mode
- ADC: Analog-to-Digital Converter
- FEC: Front-end concentrator cards
- DAQ: Data Acquisition



不同位置处得到的增益

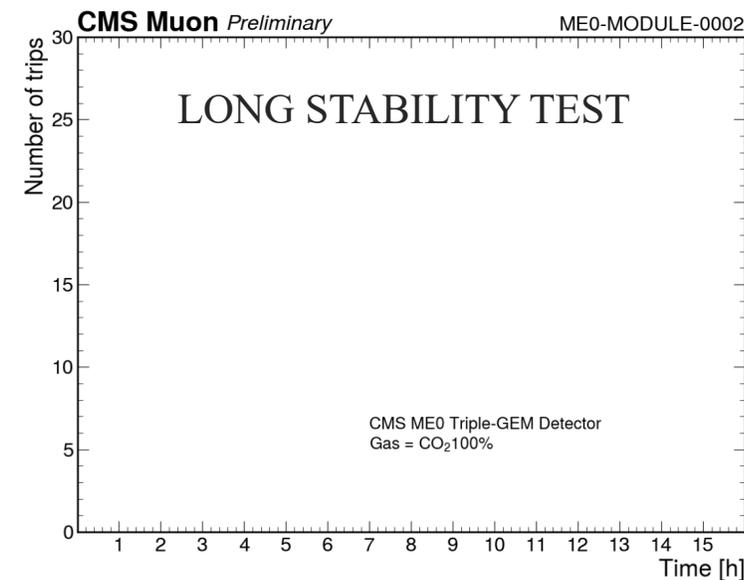
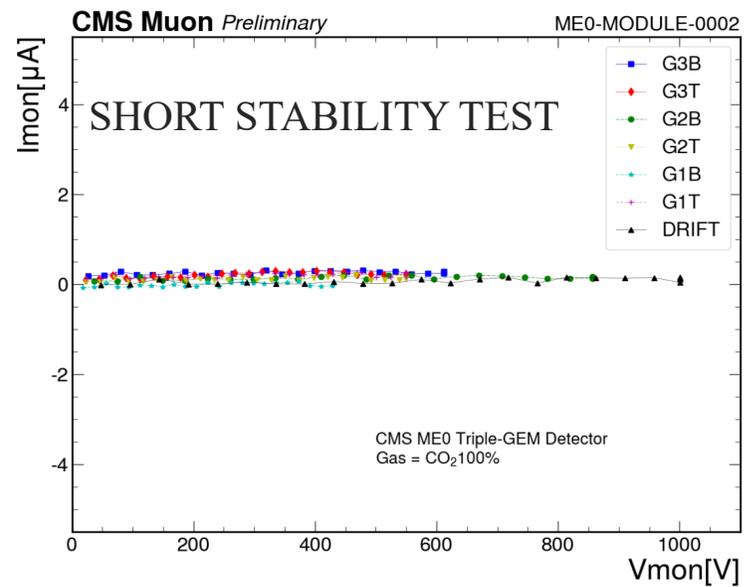
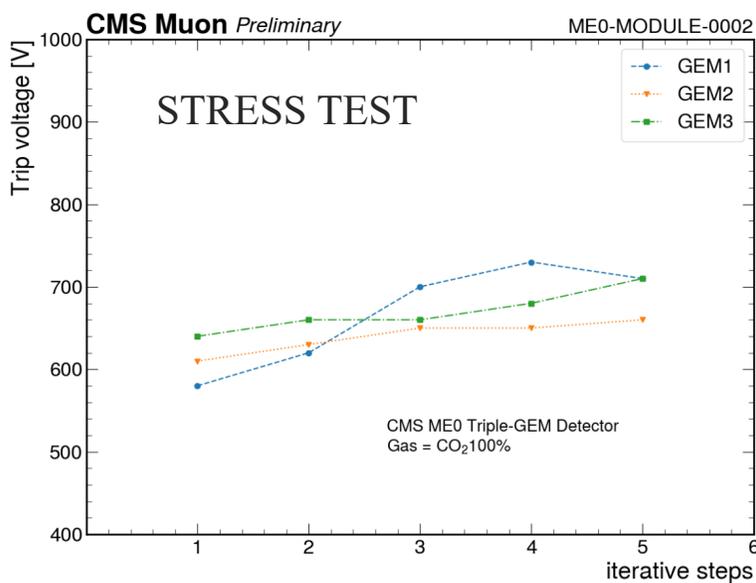


增益均匀性 = $100 * \sigma/\mu$
% < 15%

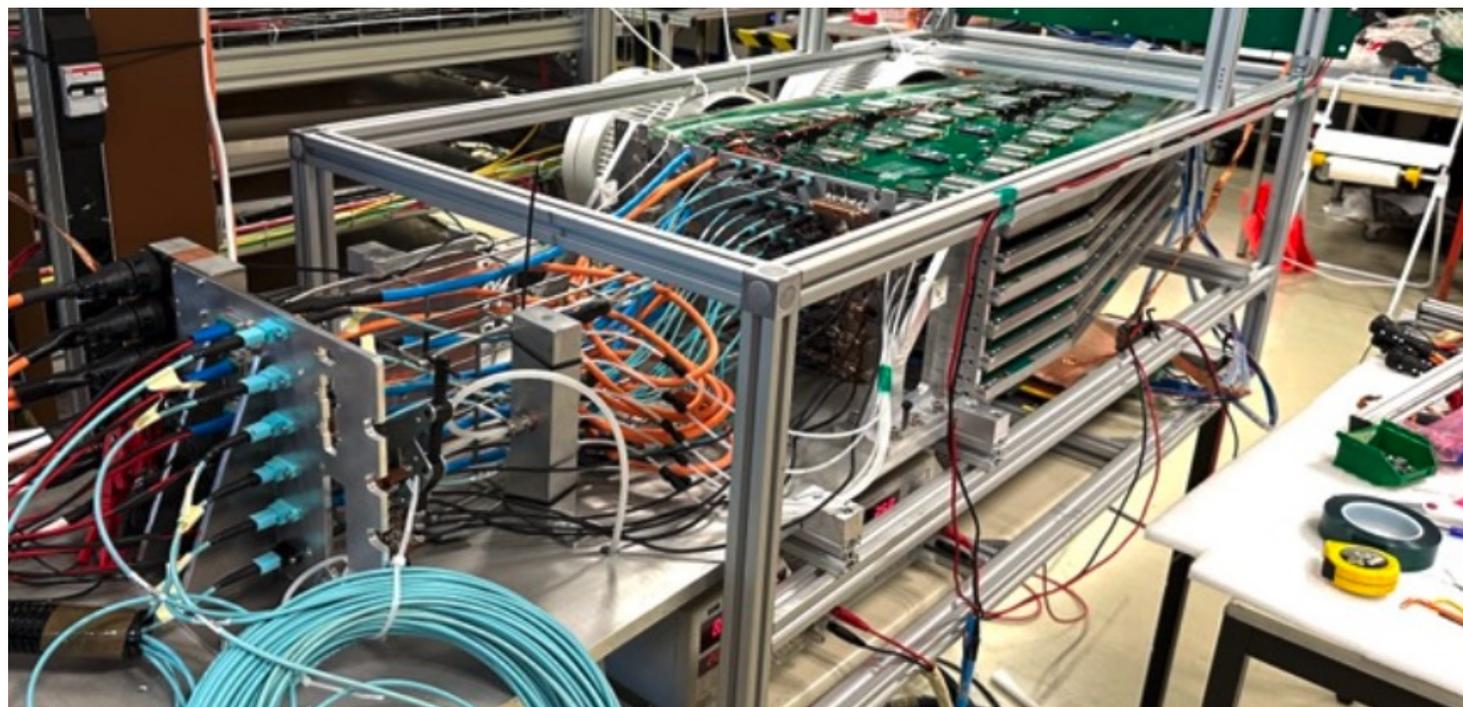


使用上图中的数据点拟合得到的曲线

- 为了确保高压的稳定性, 对GEM膜进行清洁, 并获取其高压特性
 - STRESS TEST:** 记录每个GEM膜上的最大电压
 - SHORT STABILITY TEST:** 计算每个GEM膜的面及漂移板的电压-电流曲线
 - LONG STABILITY TEST:** 在所有的GEM膜上施加580V的高压并保持15小时以上来检查GEM膜的稳定性, 记录电源跳闸次数



将6个ME0 GEM探测器组装成stack，并连接电子学系统进行测试





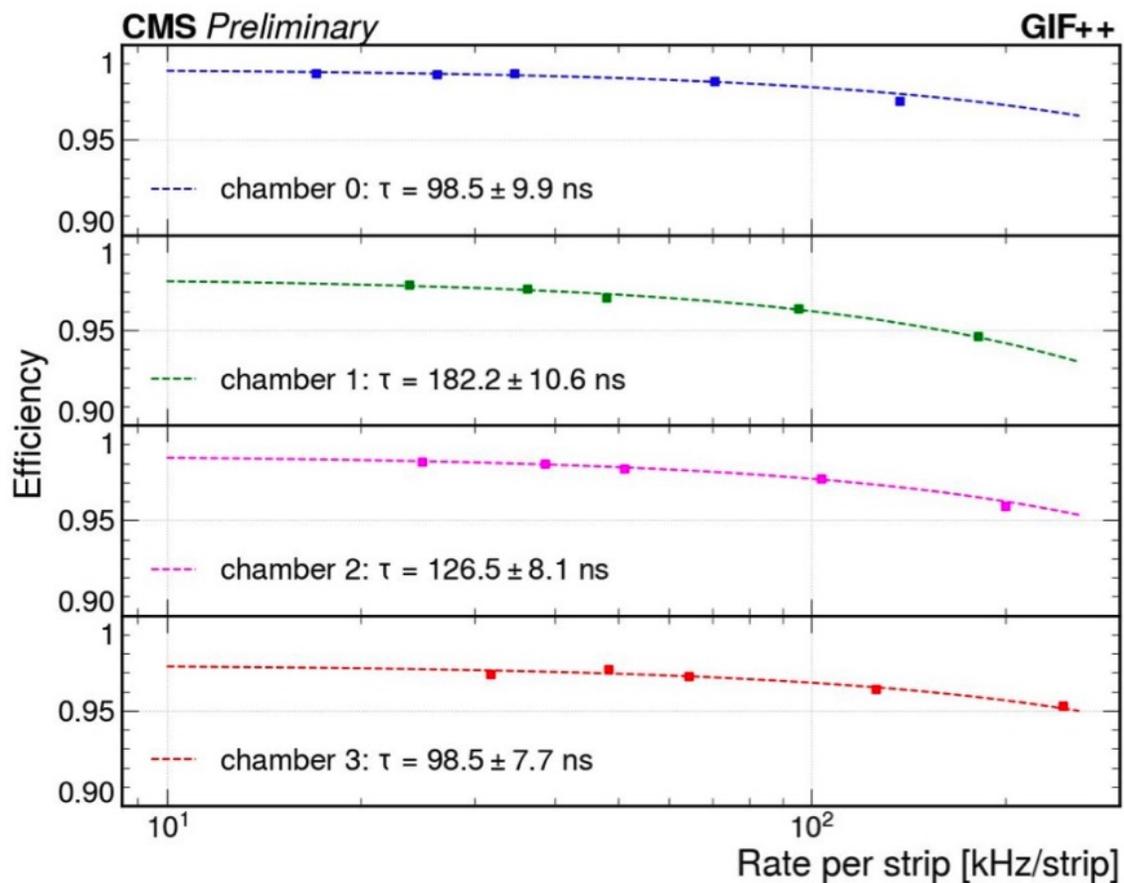
通过宇宙线平台，测试stack的时间分辨率及信号探测效率





在每个sector上施加2MHz的测试束流

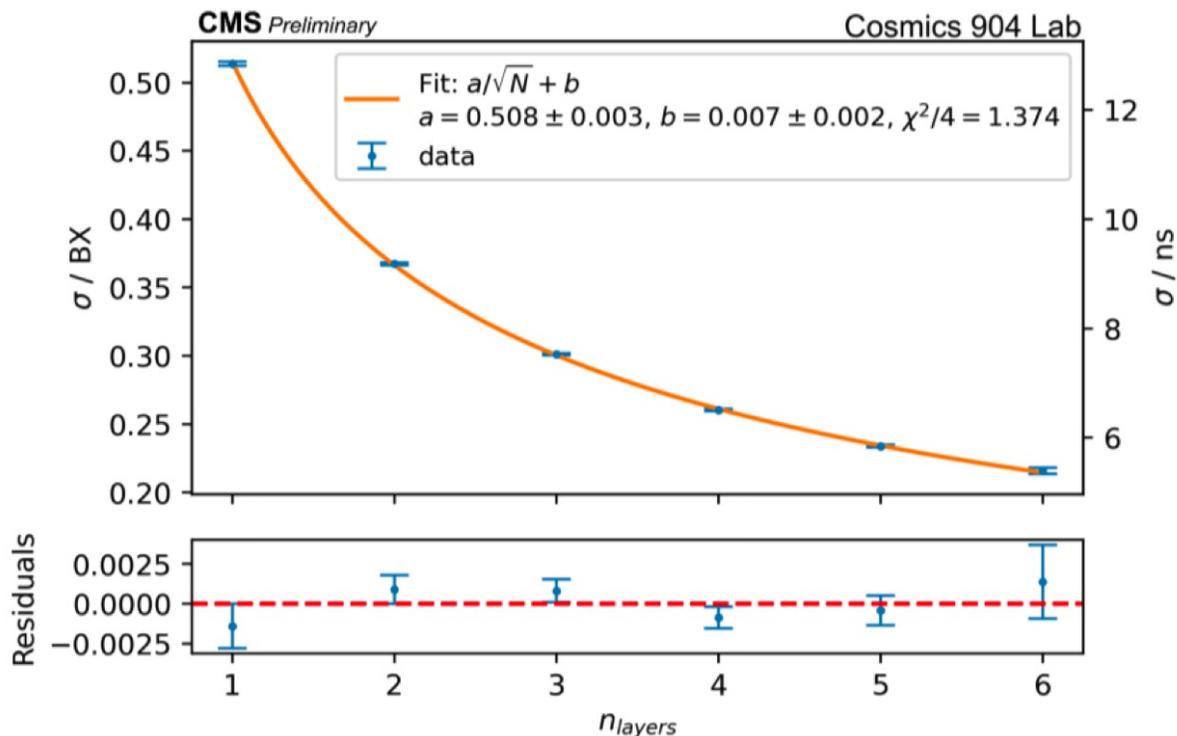
- 80 GeV的缪子作为信号
- 用 ^{137}Cs 放出的低能光子来模拟本底



- 每个探测器的探测效率约为97.5%
- 因为每个stack由6块探测器组成，每个stack的探测效率约为99%

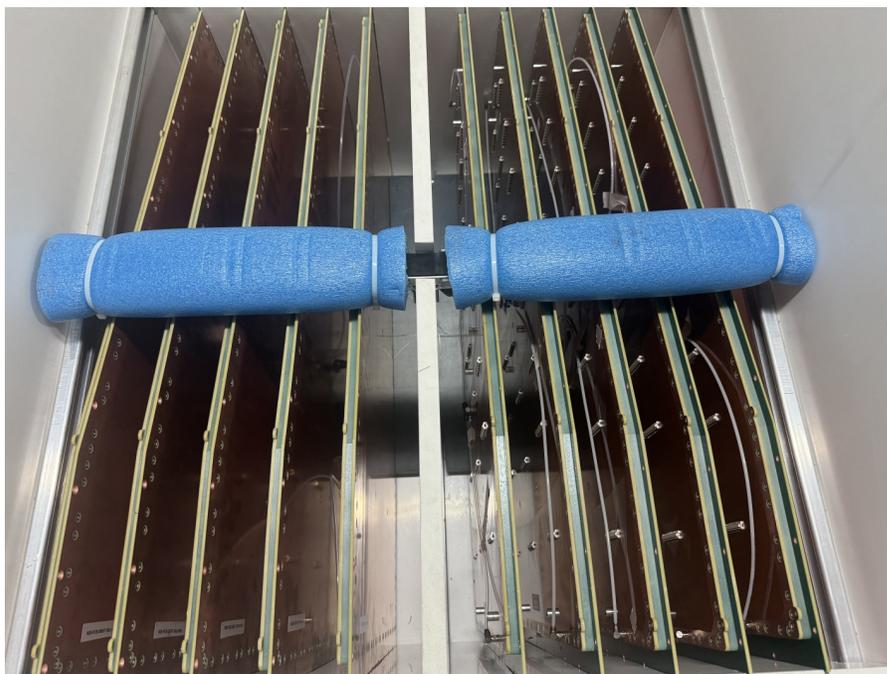


- 完整stack的时间分辨率是通过宇宙线测量获得的，其定义为粒子平均到达时间的不确定度。



- 平均时间分辨率与ME0 GEM探测器的层数有关系
- 对于6层探测器构成的stack，其时间分辨率约为0.21BX，对应于5.4ns

- 北京大学完成了前三批ME0 GEM探测器的组装和测试工作。
- 所有的ME0 GEM探测器被运往了欧洲核子研究中心进行进一步的组装和测试。
- 正在进行下一批次组装测试工作的准备。
- 目前北京大学有学生在欧洲核子研究中心参与更多的测试工作。





— 感谢观看 —



Back up