
科技部国家重点研发计划
大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级

课题二：CMS 缪子谱仪 GEM 和时间探测器 MTD 升级
(北京大学, 清华大学, 北京航空航天大学)

班勇 (北京大学)

中期总结会 - 2025年6月26日

提 纲

➤ 课题2概况

➤ CMS-GEM项目

- CMS GEM探测器组装和测试
- CMS ME0 GEM前端电子学板设计、研发和生产测试
- CMS GEM探测器结构材料研发和生产

➤ CMS-MTD项目

- MTD桶部传感器设计优化、模块组装工艺和批量生产
- MTD桶部探测器模块组装工艺改进和质控系统搭建
- MTD桶部桶部探测器tray整机建造工艺研究

➤ 中期总结

- 中期考核指标完成情况
- 人员和经费使用情况
- 培养研究生、发表论文、会议报告情况

课题二：CMS-GEM / MTD升级任务

两个子课题：

**CMS时间探测器
MTD升级
(2016-2027)**

北京大学-清华
大学-北京航空
航天大学

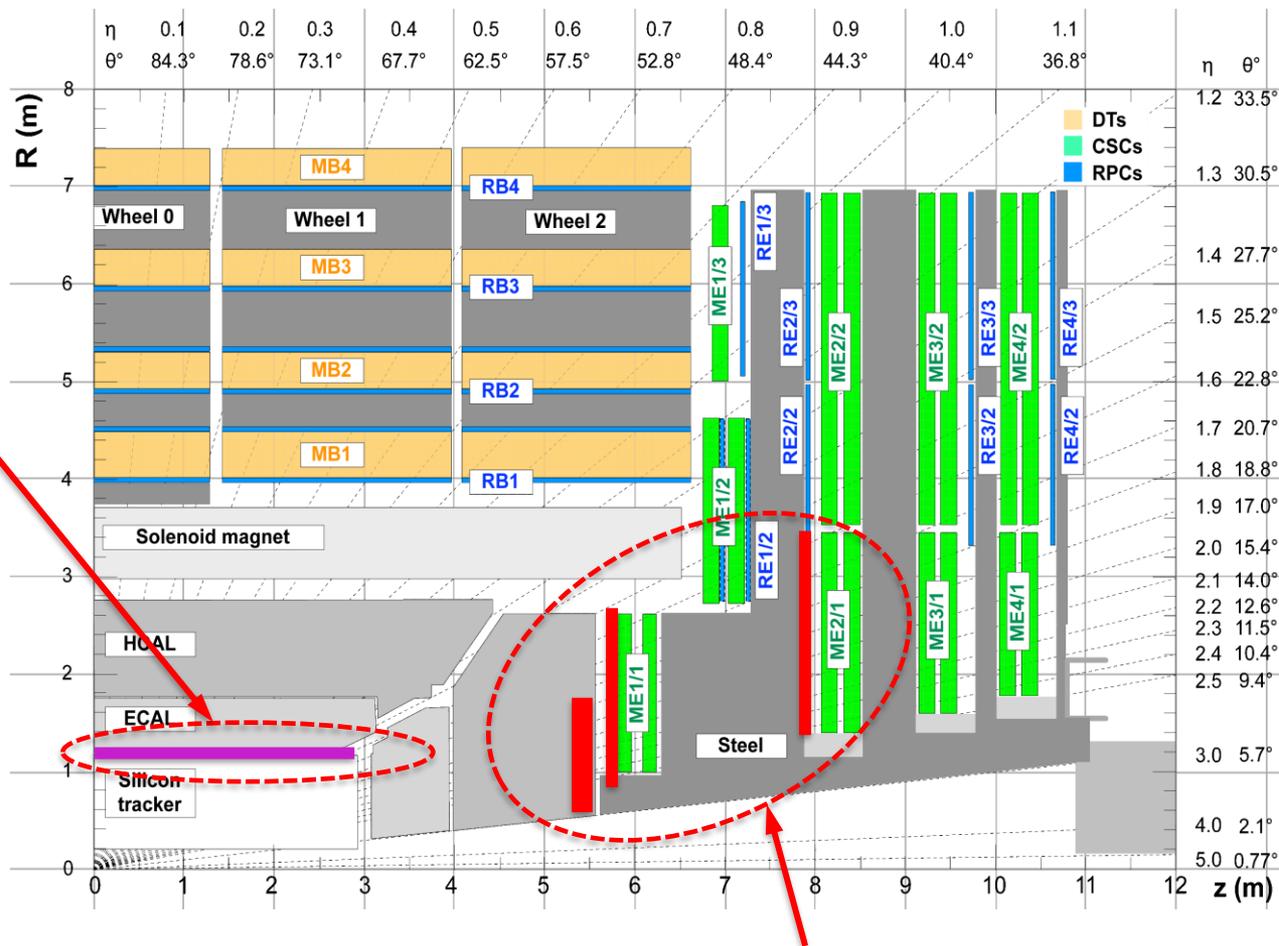
人员

高级职称：5人

中级职称：1人

研究生：13人

(+博士后...)

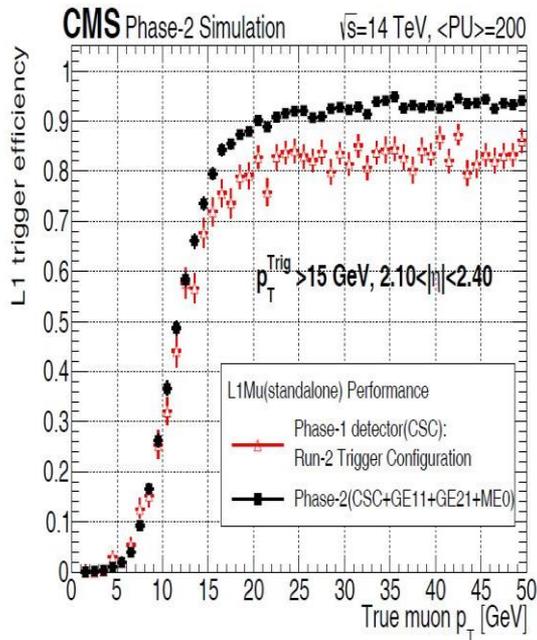


CMS端盖缪子探测器 GEM升级 (2016-2027)

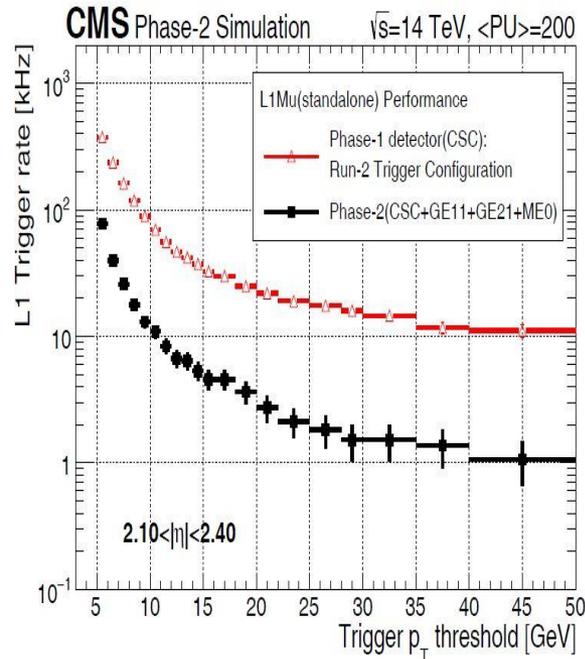
北京大学-清华大学- (中山大学、北京航空航天大学)

课题二： 升级物理意义 (GEM)

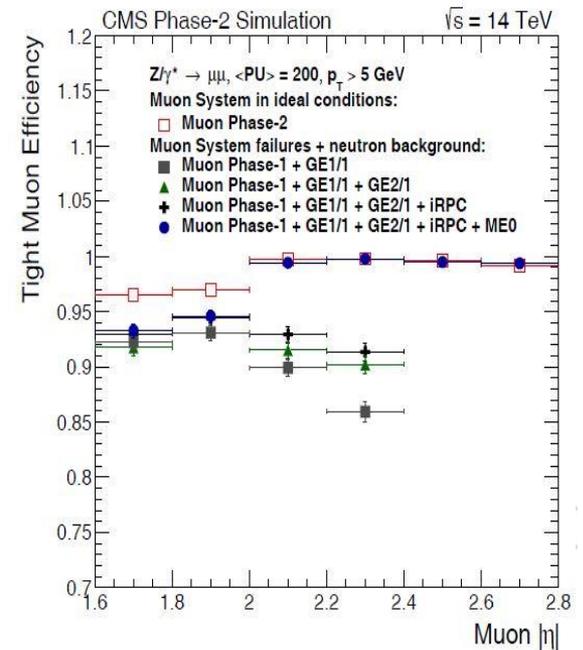
- CMS-GEM升级后，提高低横动量缪子触发效率，降低触发率，适应高亮度对撞运行；
- 提供缪子径迹重建功能，大大增加物理发现潜能。



L1触发效率- $P_t(\mu)$
(升级前 .vs. GEM升级后)

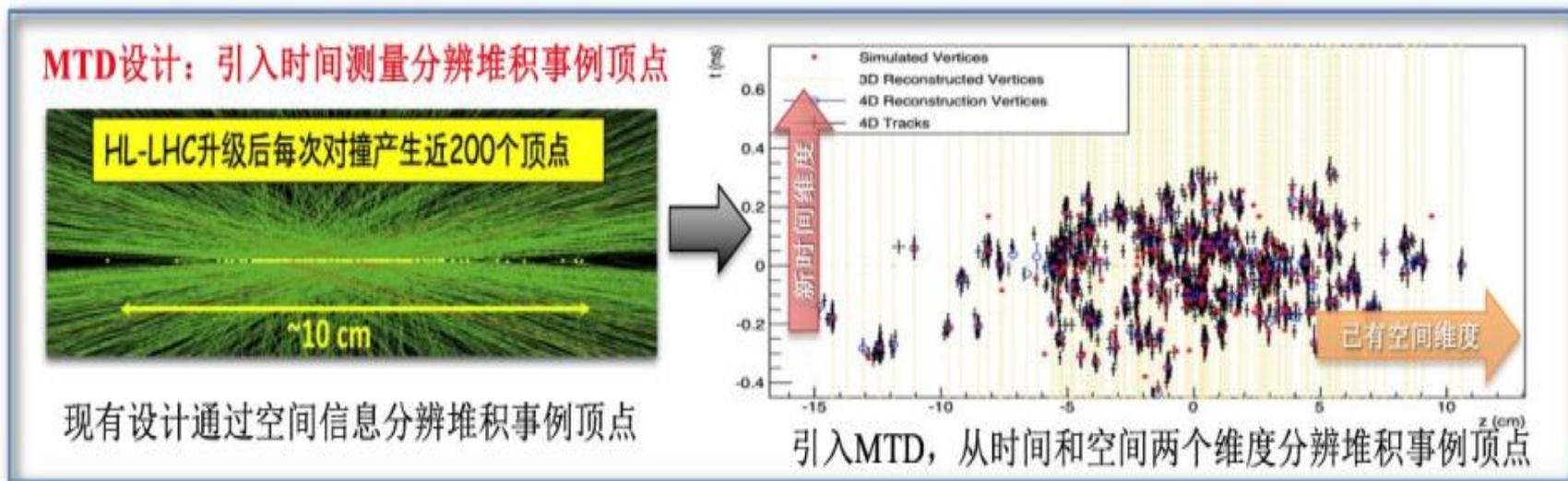


L1触发率- $P_t(\mu)$ 阈
(升级前 .vs. GEM升级后)



物理分析(例):
DY Events μ trigger
efficiency

课题二：升级物理意义 (MTD)

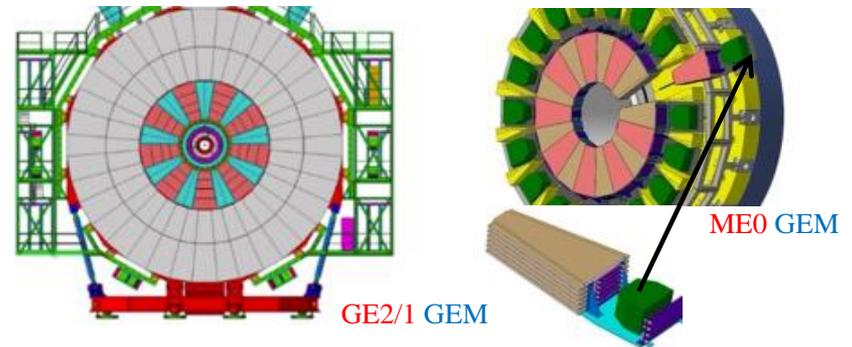
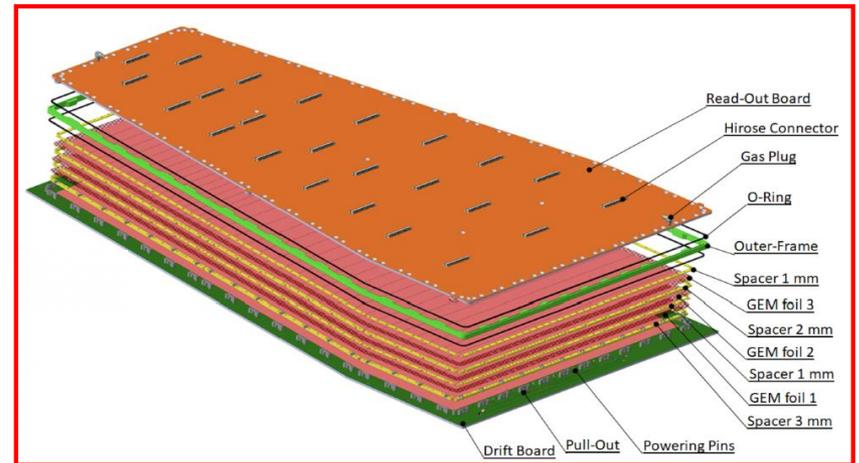


- HL-LHC 上每次对撞产生多至 200 个堆积事例，只靠顶点位置分辨会导致事例重建困难，物理敏感度下降；
- 首次引入带电粒子时间信息，能够区分两次对撞之间 25 纳秒内的时间细分信息，实现堆积事例的分时段处理，使 CMS 在高亮度运行时保持优越的重建性能和物理敏感度。

CMS-GEM项目： 研究内容、路线与创新点

研究内容：

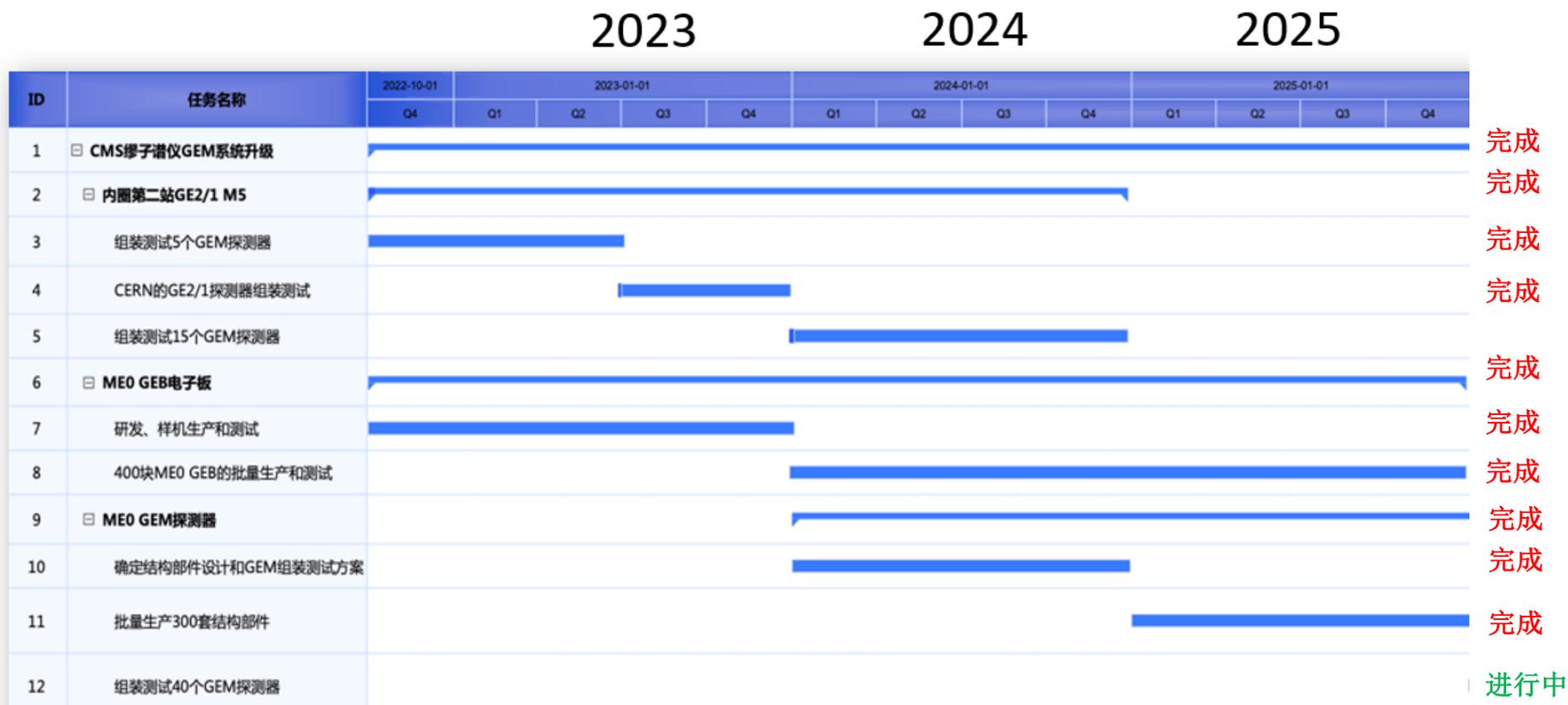
- 内圈第二站GEM (**GE2/1**)：应对大面积探测器结构设计、生产和质控挑战，研发、生产符合触发和径迹重建要求且面积更大的GEM，提供更精确的缪子径迹元。
- 最内圈GEM (**ME0**)：研发狭小空间、多电子学道、快时间GEM多层探测器，设计研发、生产相应的前端电子学板。



创新点：

- 大面积高性能微结构GEM探测器的首次大规模应用，解决了高亮度运行时极强辐射本底下的缪子触发问题。
- 高性能大面积、薄型、多层前端电子学板批量生产和质控技术。

CMS-GEM项目：计划与进展

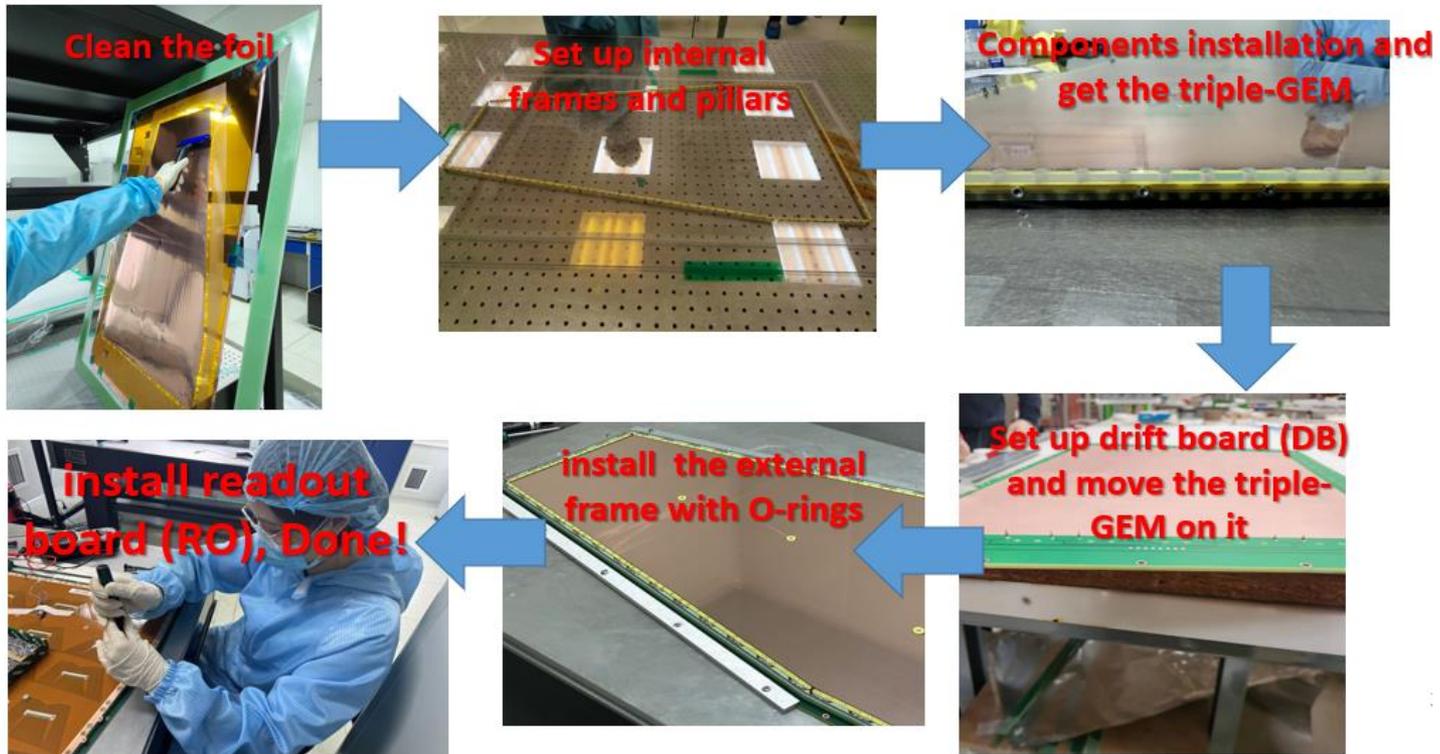


CMS-GEM项目：中期进展

- 在北大GEM基地完成了25块GEM探测器模块的生产测试，运往CERN进行后续总装测试。
- 完成了ME0-GEB前端电子学板设计研发，在深圳鑫诺捷公司完成了全部540块的批量生产，测试合格后已运达CERN。
- 研制成功了ME0 GEM FR4外框架并完成，全部约230套外框架的批量生产并运往CERN。
- 优化了GEM探测器模块组装及质控测试程序，发展了相关探测器电子学及结构部件的大批量生产能力。

CMS-GEM项目：GEM探测器组装

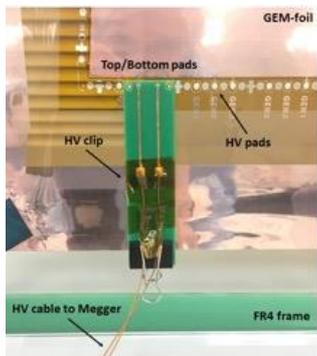
- 至2023年12月，在北京大学基地完成了两批共15块GE2/1 GEM探测器的组装测试
- 至2024年11月，完成了第一批共10块ME0 GEM探测器的组装测试
- 至2025年6月，第二批共10块ME0 GEM探测器的组装测试正在进行



GEM探测器组装流程

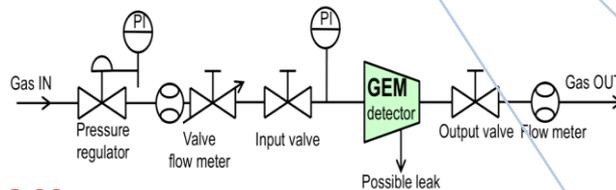
CMS-GEM项目：GEM探测器质控测试

- **QC2**: GEM膜高压及电阻率测试
- **QC3**: GEM探测器气密性测试
- **QC4**: GEM探测器电流-电压曲线测试
- **QC5**: GEM探测器X射线增益测试

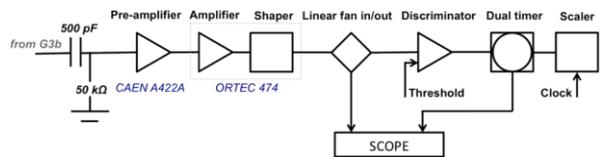


QC2

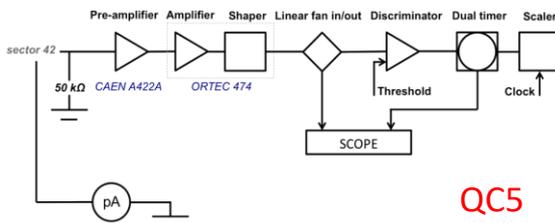
GEM探测器质控
测试平台



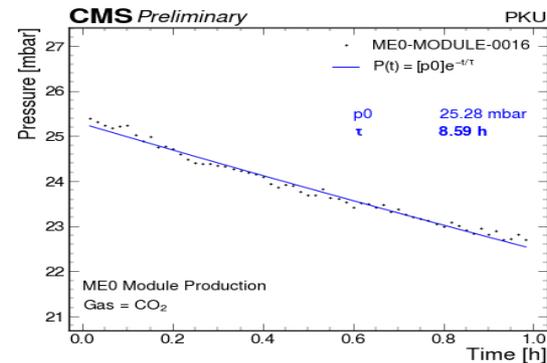
QC3



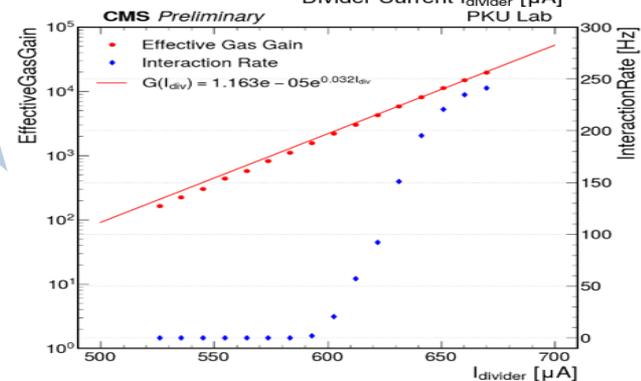
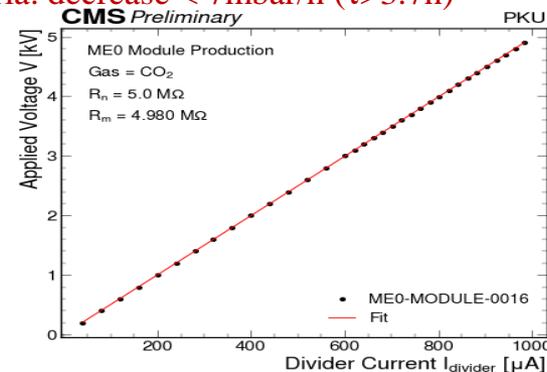
QC4



QC5



criteria: decrease < 7mbar/h ($\tau > 3.7h$)



典型的GEM探测器QC测试结果

CMS-GEM项目：GEM探测器组装测试

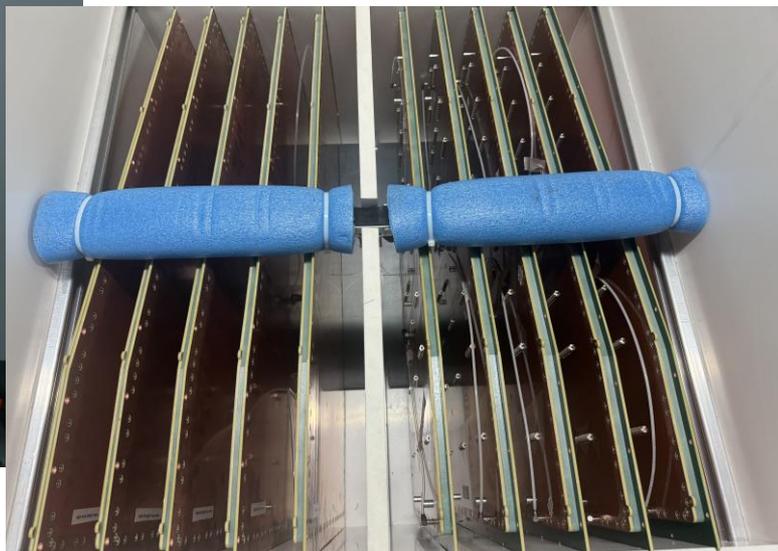


2024年10月，北大基地组装的第一块MEO GEM探测器

Performance expectation:

GEM探测器性能指标

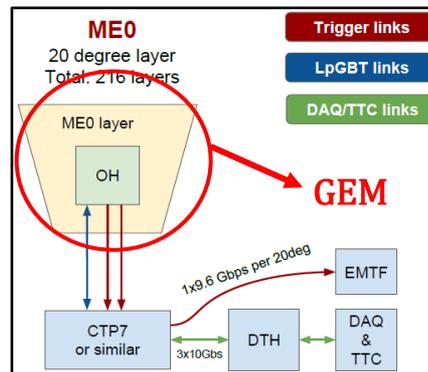
- 97% module efficiency
- $< 500\mu\text{rad}$ space resolution
- 8-10 ns time resolution
- $\leq 15\%$ gain uniformity
- Work in high rate environment: $50\text{kHz}/\text{cm}^2$
- Survive harsh radiation environment: $7.9\text{C}/\text{cm}^2$
- Discharge rate not impede performance or operation



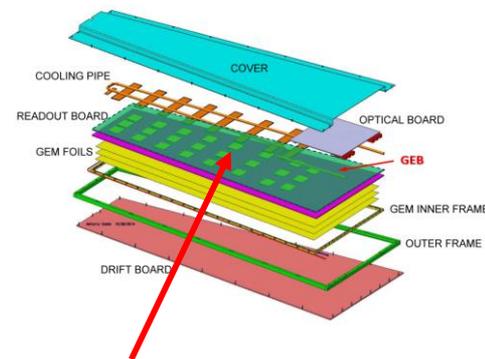
装箱发运CERN的GEM探测器

CMS-GEM项目：ME0 GEM电子学板研发

- 设计：解决强辐射区域、多信号道、高频信号的高质量传输。
- 保证电源设计提供检测功能、提供高效屏蔽层设计



CMS-GEM数据获取系统



GEB: CMS-GEM前端电子学板 (GE1/1, GE2/1, ME0)

A set of GEB connects to:

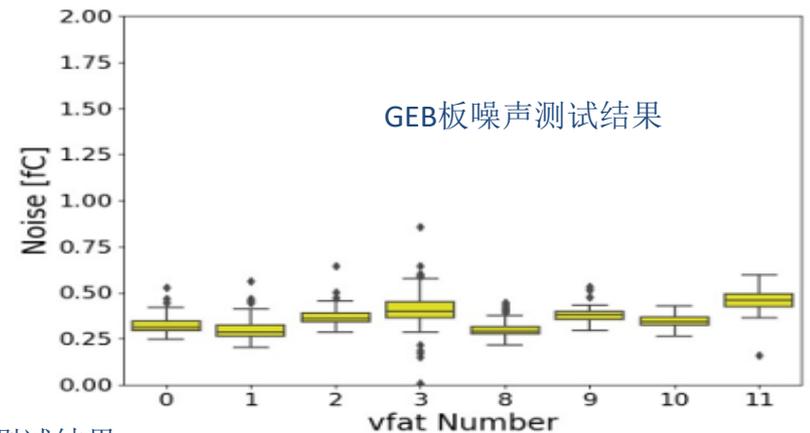
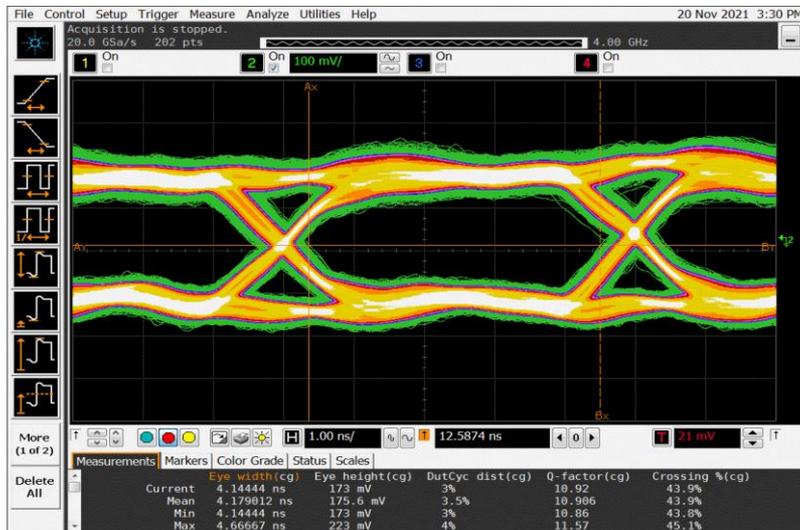
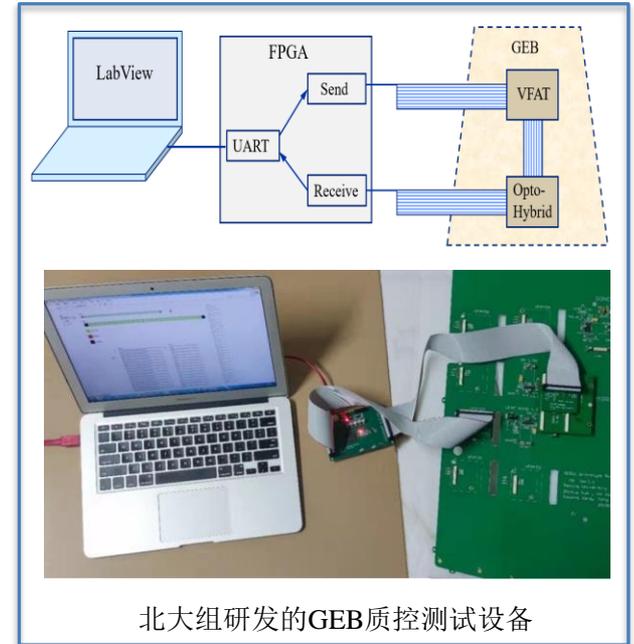
- 24 VFATs**: The **VFAT chip** converts the signal on the readout strips into **digital signal**
- 4 ASIAGO boards (2 OH-CONN on each)**: Electrical components on **OH board** convert the signal from GEB into an **optical signal** on the optical fiber
- 6 FEAST (1.2VA, 1.2VD and 2.5V)**: **FEASTs** provide voltage to chips on VFAT and OH board

GEB信号、电源、屏蔽层设计

- 2023年完成了ME0 GEM探测器前端电子学板GEB的设计研发，
- 根据样机在CERN的联合组装测试结果，2024年初通过了合作组评审，确定了最终生产方案。

CMS-GEM项目：ME0 GEM电子学板生产测试

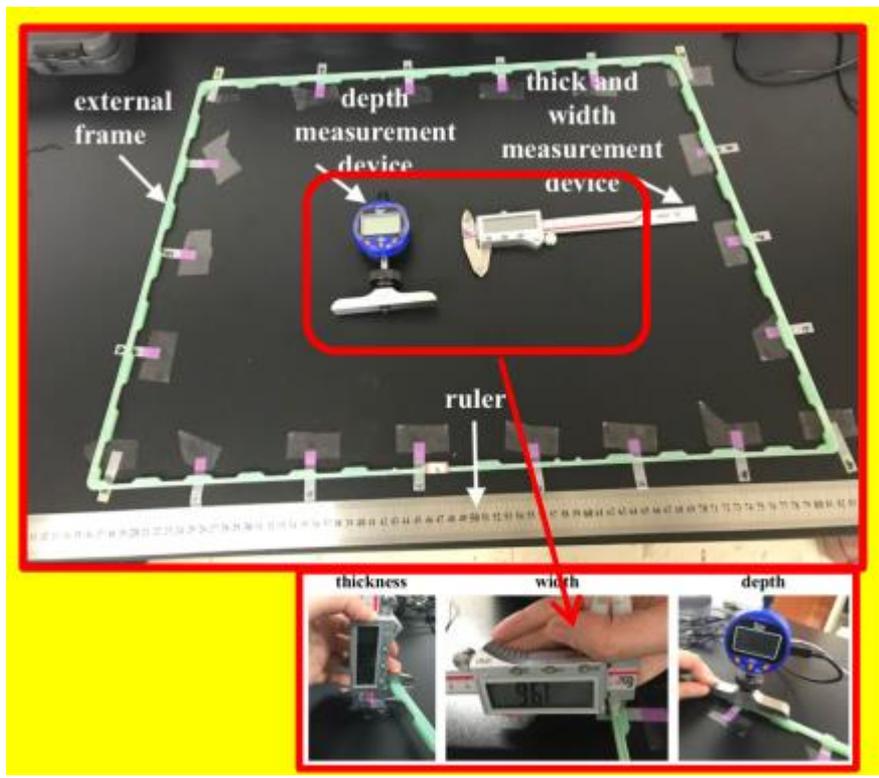
- 2023年初开始ME0 GEB批量生产。1月在深圳鑫诺捷公司完成了第一批15套30块ME0 GEB的生产并检验合格，4月在CERN完成了最终接收测试。
- 2024年2月完成了第二批240套共480块ME0 GEB批量生产；其中95套于4月完成了测试并发运CERN，145套于11月完成测试并发运CERN。
- 预计2025年底在CERN完成全部电子板的接收测试。



GEB板眼图测试结果

CMS-GEM项目：GEM探测器结构材料研发和生产

- 承担了ME0 GEM 探测器 FR4 外框架的研发生产。GEM-FR4 外框架对加工精度要求极高，厚度公差要求 $\leq \pm 10$ 微米。与北京厂家合作研制了真空吸附平台来改进加工工艺，根据前期GE2/1 GEM探测器组装测试中反馈的问题改进了生产工艺，对外表面进行了两次覆胶处理，
- 2023年6月生产了两个ME0外框架样机，并运往CERN通过了检测和评审，8月合作组批准在中国进行批量生产。



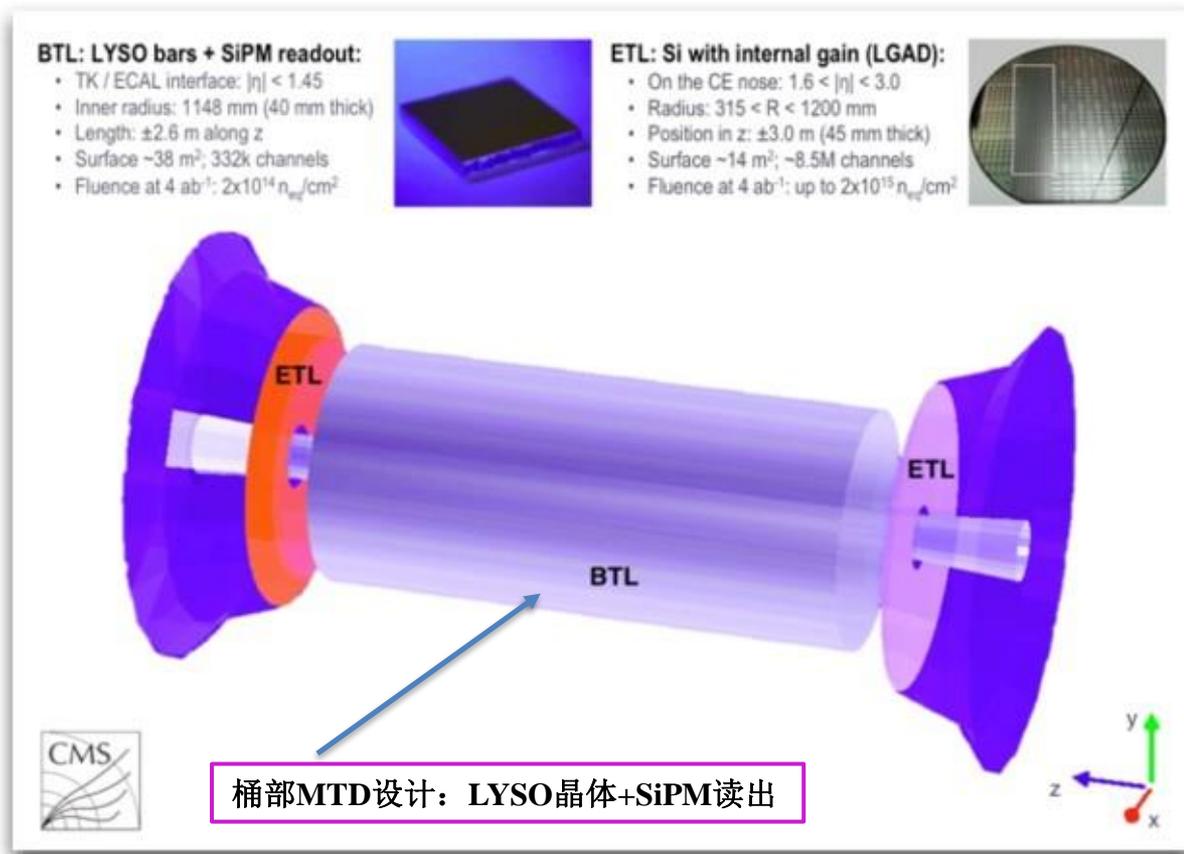
GEM-FR4 外框架样机及测试情况

- 2023年底完成了全部 360 个 ME0 FR4 外框架的批量生产，检验合格后运往 CERN，目前正用于ME0探测器模块的组装。

CMS-MTD项目： 研究内容、路线与创新点

目标：

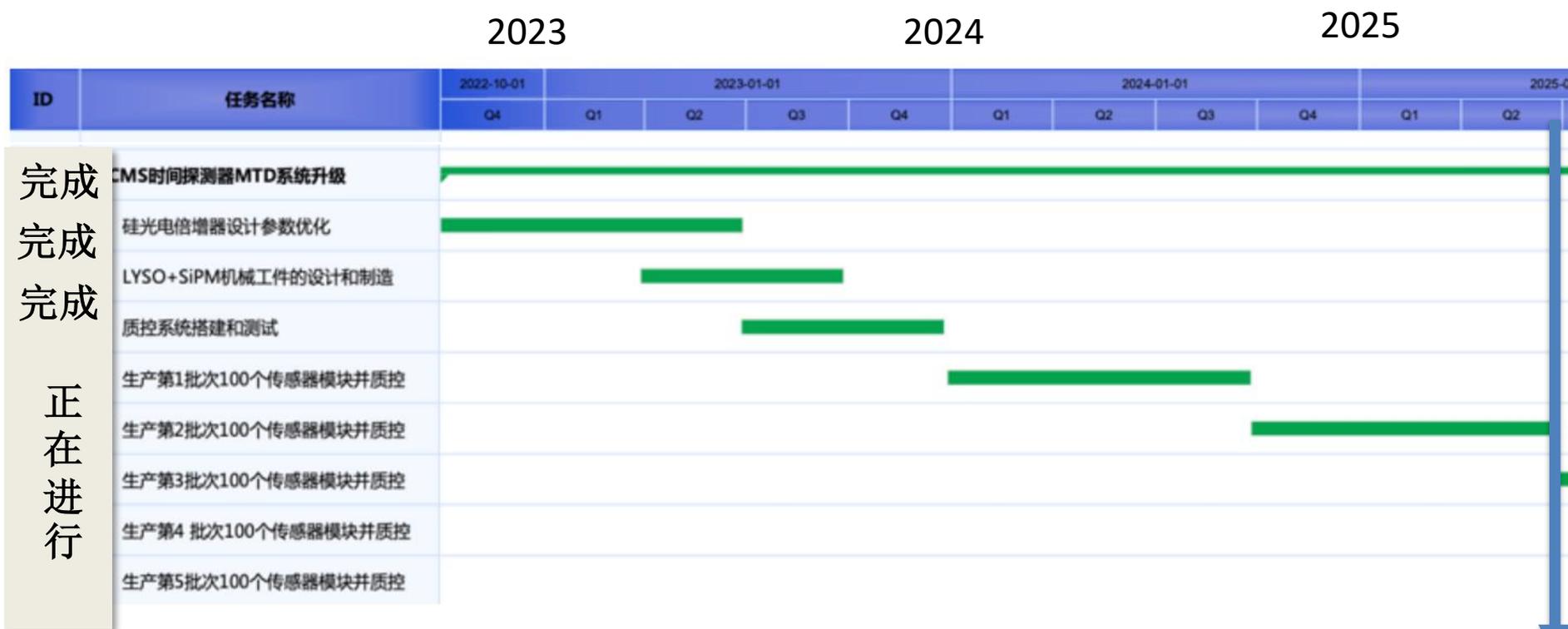
研制时间分辨优于60皮秒的**桶部MTD**，建立MTD探测器组装中心，建造超过500个桶部传感器模块，并建立完善批量生产探测器所需的质控系统



亮点：

- 桶部MTD是CMS桶部首次达到数十皮秒时间分辨的时间探测器
- CMS将是LHC上大型通用探测器中唯一在桶部有数十皮秒级时间测量的探测器

CMS-MTD项目：计划与进展



- 2025年6月
1. 批量组装传感器模块
 2. 稳步进行批量质控

CMS-MTD项目：中期进展

- MTD桶部传感器设计优化工作已全部完成
- MTD桶部传感器模块组装工艺已定型
- MTD桶部传感器模块批量生产已超过200块传感器模块
- MTD桶部探测器模块组装工艺继续改进，质控系统搭建完成
- MTD桶部桶部探测器tray整机建造工艺研究接近尾声

CMS-MTD项目：桶部传感器设计优化

- MTD桶部传感器设计优化工作已全部完成
- 通过束流测试，主要对SiPM的参数设计进行优化，涉及SiPM cell size等对增益、光子探测效率、时间分辨率等影响的研究
- 在辐照后研究其时间分辨率等关键性能
- 在总体功耗允许范围内，25微米cell为最佳选择

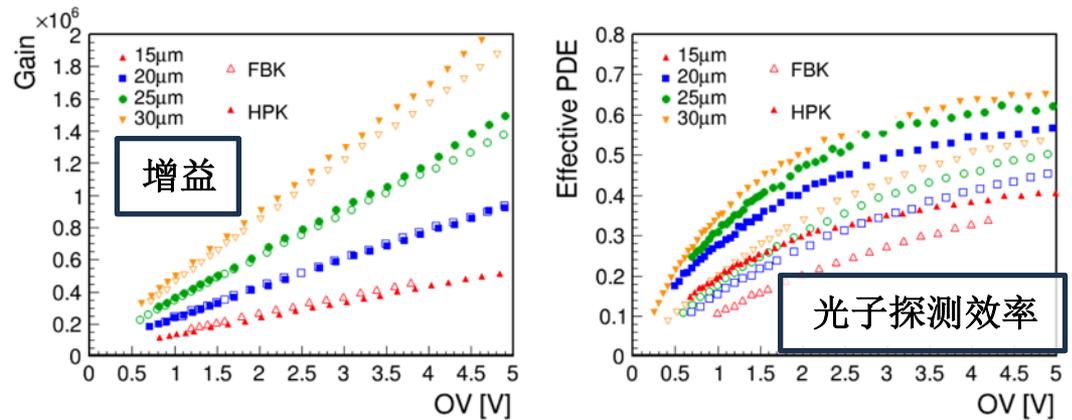


Figure 1. Gain (left) and effective PDE (right) as a function of over-voltage for SiPMs with different cell size and from different manufacturers. The effective PDE corresponds to the measured $PDE(\lambda)$ convoluted with the emission spectrum of LYSO:Ce crystals, which peaks around 420 nm.

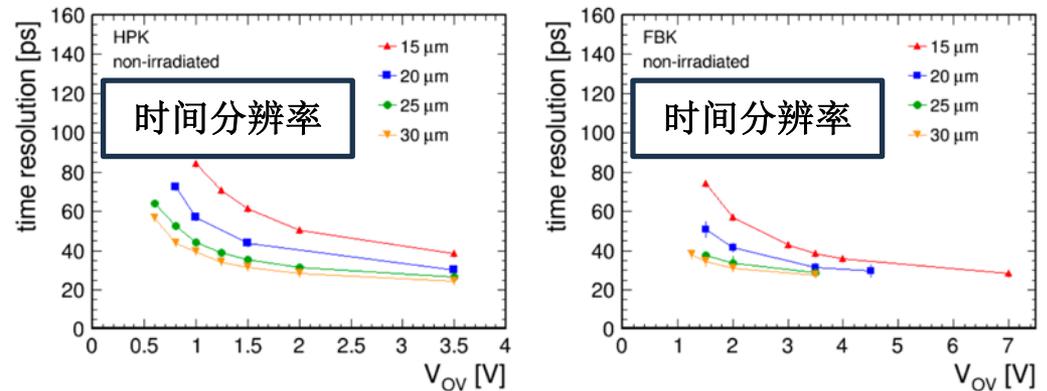


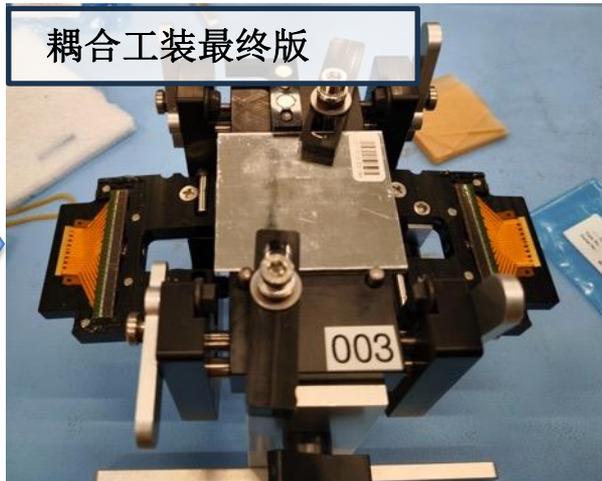
Figure 7. Time resolution as a function of the SiPM over-voltage for T2 modules with SiPMs of different cell-size. Left: modules with SiPMs from HPK. Right: modules with SiPMs from FBK.

CMS-MTD项目：桶部传感器模块组装工艺

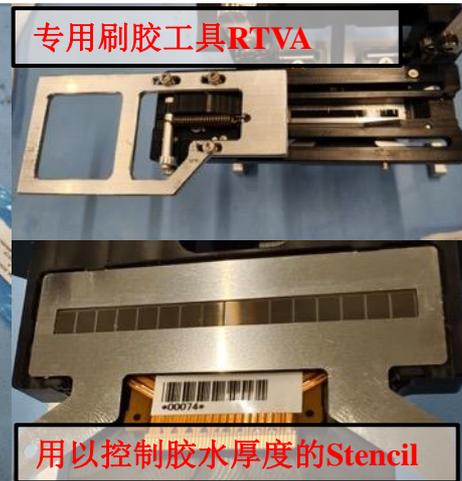
北大设计的耦合工装原型



耦合工装最终版



专用刷胶工具RTVA



用以控制胶水厚度的Stencil

Sensor模块



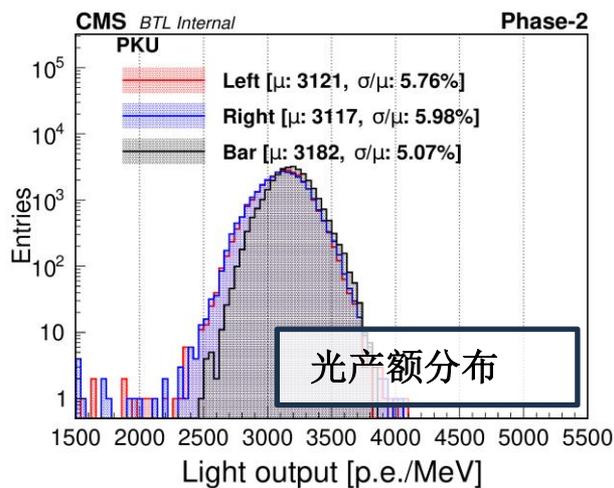
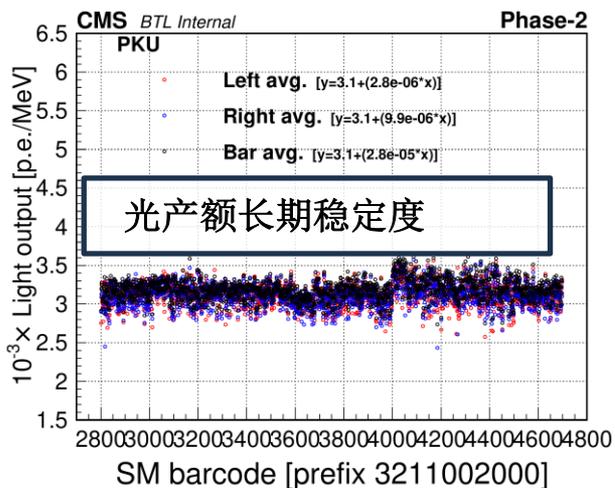
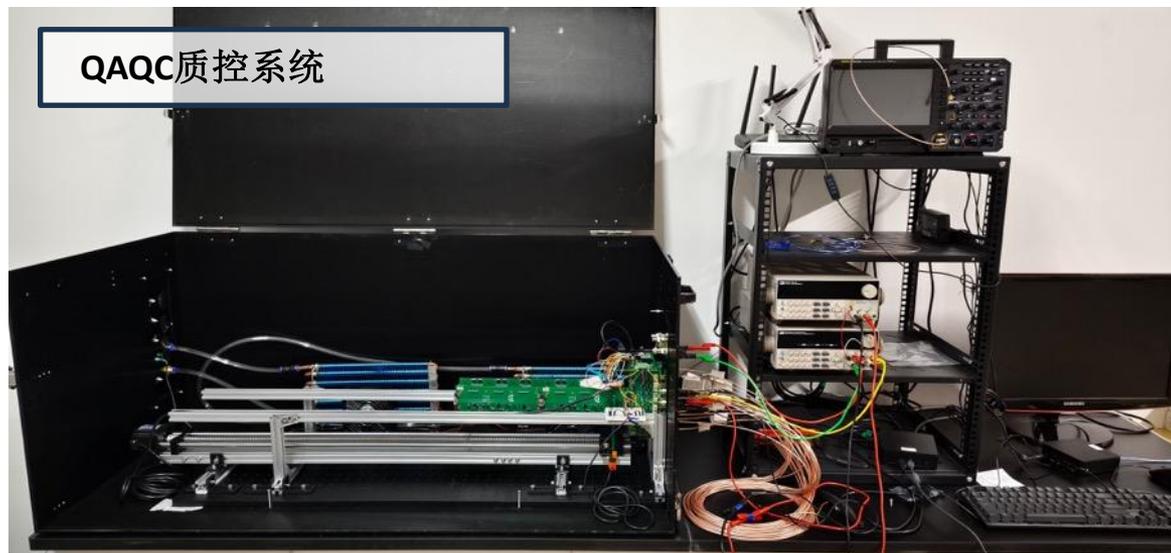
整套组装工具



- MTD传感器模块组装工艺已定型。耦合工件设计多次迭代，形成最终稳定版

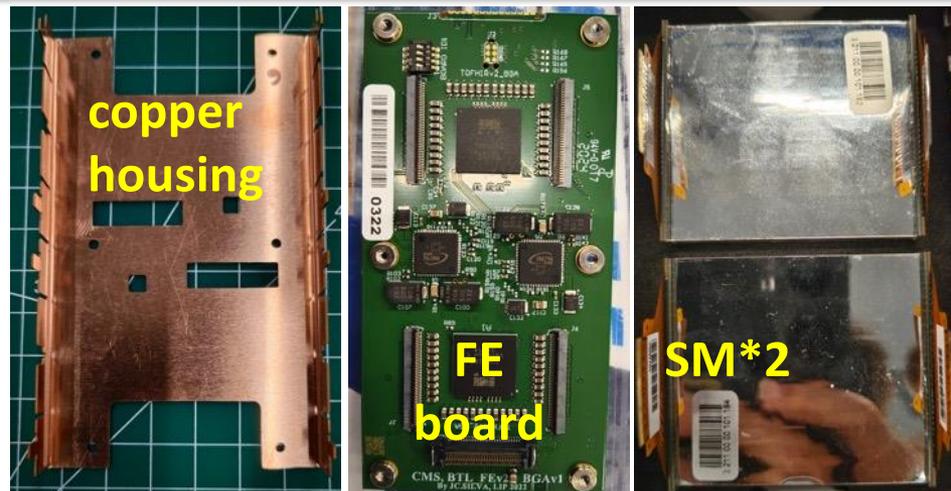
CMS-MTD项目：桶部传感器模块组装工艺、批量生产与质控

- 北大与清华、北航合作，已批量生产已超过200块传感器模块
- 通过本地搭建的质控系统完成测试，信号幅度一致性高，良品率高，满足CMS合作组官方组装中心的要求

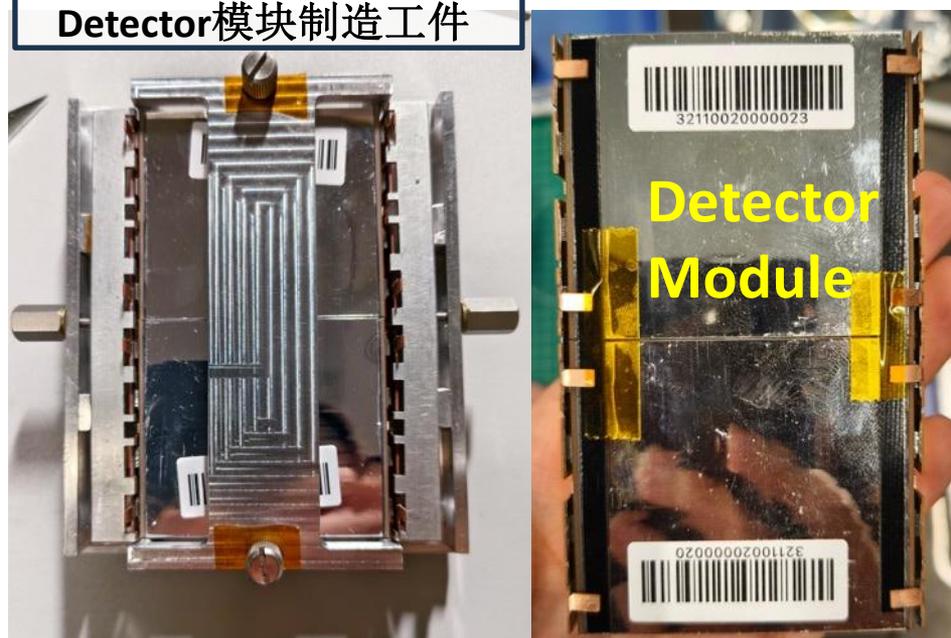


CMS-MTD项目：桶部探测器模块组装工艺

- 探测器模块组装工艺确定
 - ✓ 使用Detector制造工件，将Sensor Module与铜壳结构及电子学读出系统进行组装
- 探测器模块的组装制造密切关注热接触：
 - ✓ 工装确保SiPM上TEC外端与铜之间有良好的接触
 - ✓ 在FE板上重要芯片表面覆盖热垫
 - ✓ 避免LYSO晶体与其他组件接触
- 探测器模块制造工艺已确定，批量组装已经开始
- 质控系统搭建完毕，良好运行

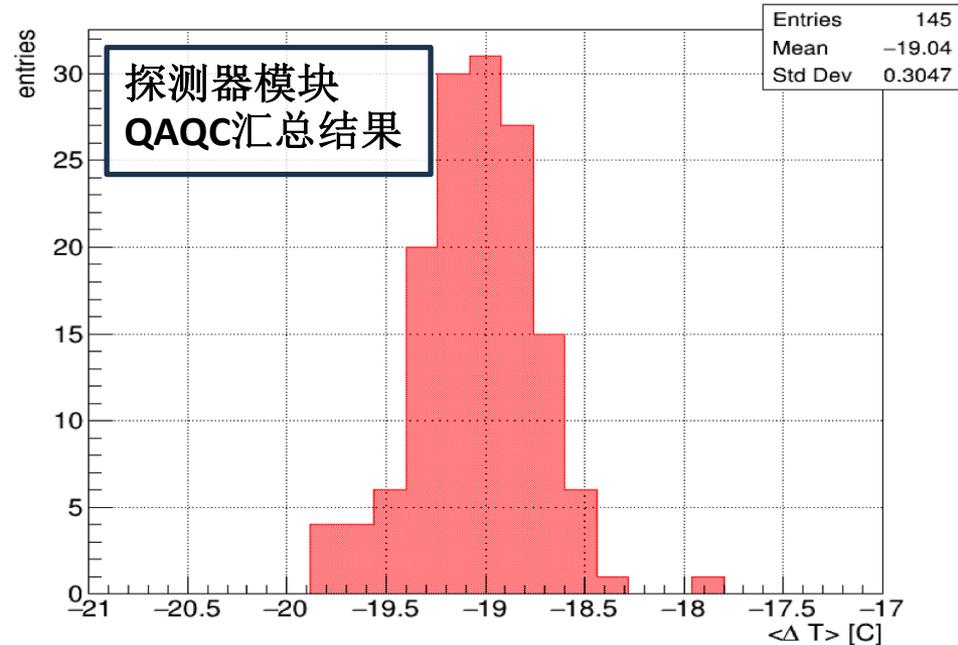
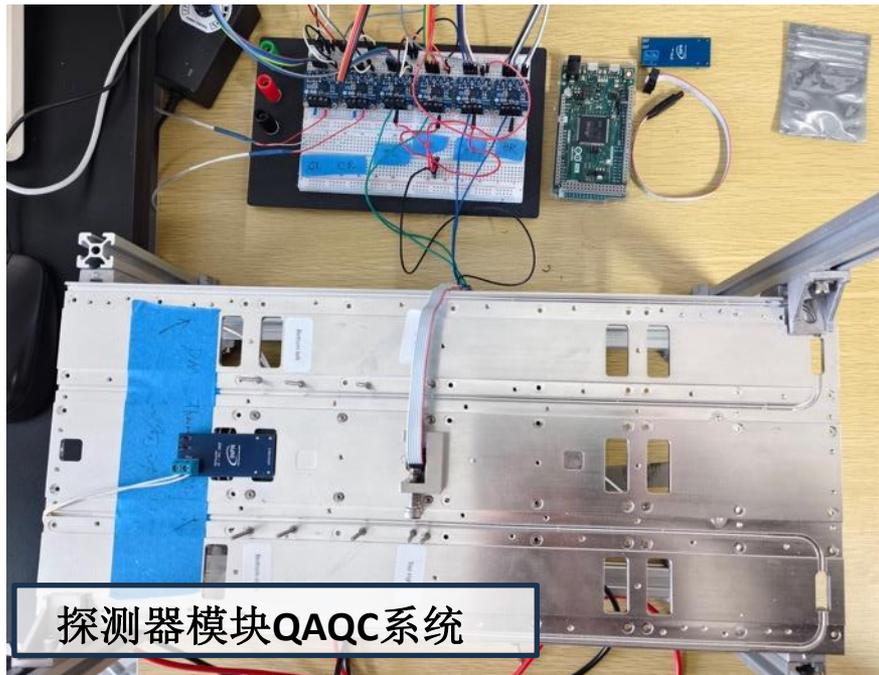
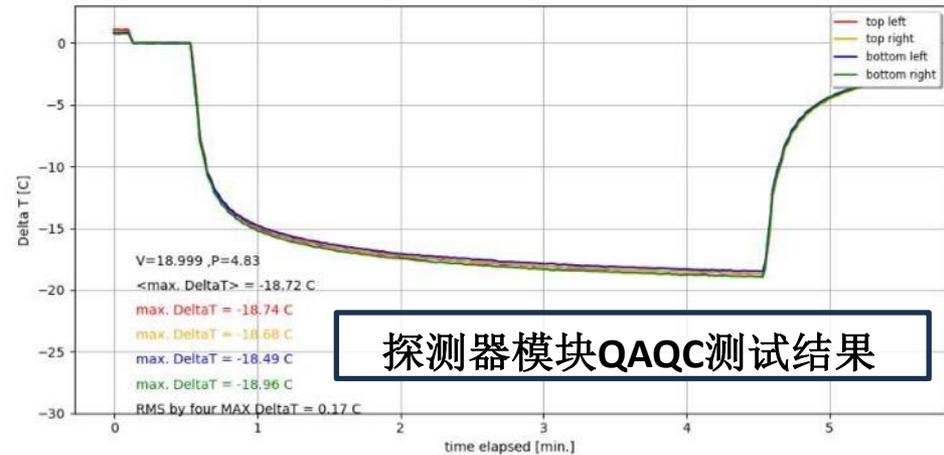


Detector模块制造工件



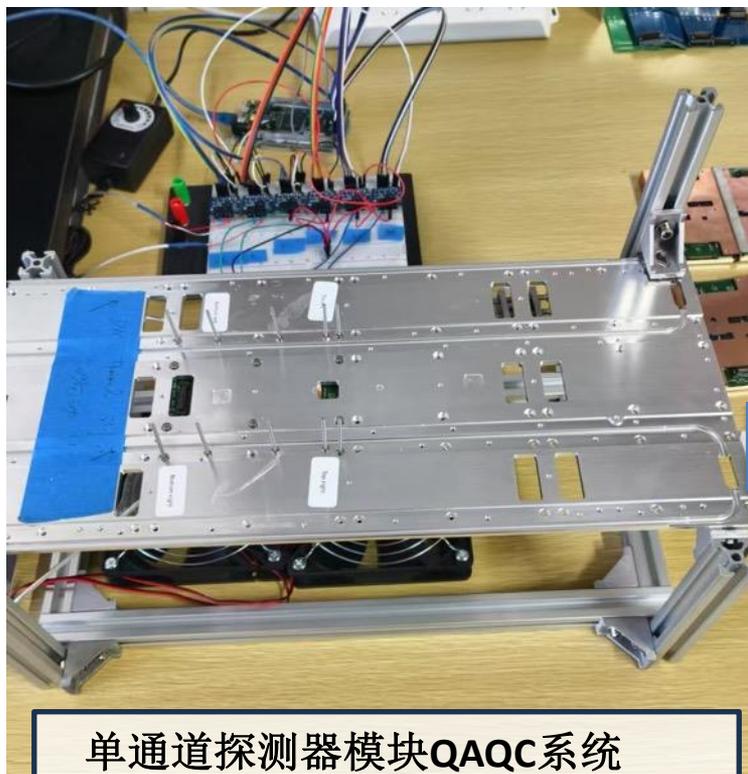
CMS-MTD项目：桶部探测器模块质控

- 探测器模块热耦合质控结果显示，探测器模块热耦合充分，SiPM一侧和导热外壳具有满足要求的温度差，且批量生产具有较高的均匀度



CMS-MTD项目：多通道质控系统

- 借助北大生产的小批量测试冷却板，12路多通道探测器模块QA/QC系统正在研发，并经过初步测试，电路连接和温度读取功能正常，系统组装即将完成并投入使用
- 该系统可以使得探测器模块QA/QC时间大大降低，将总时间降低一个量级



单通道探测器模块QAQC系统

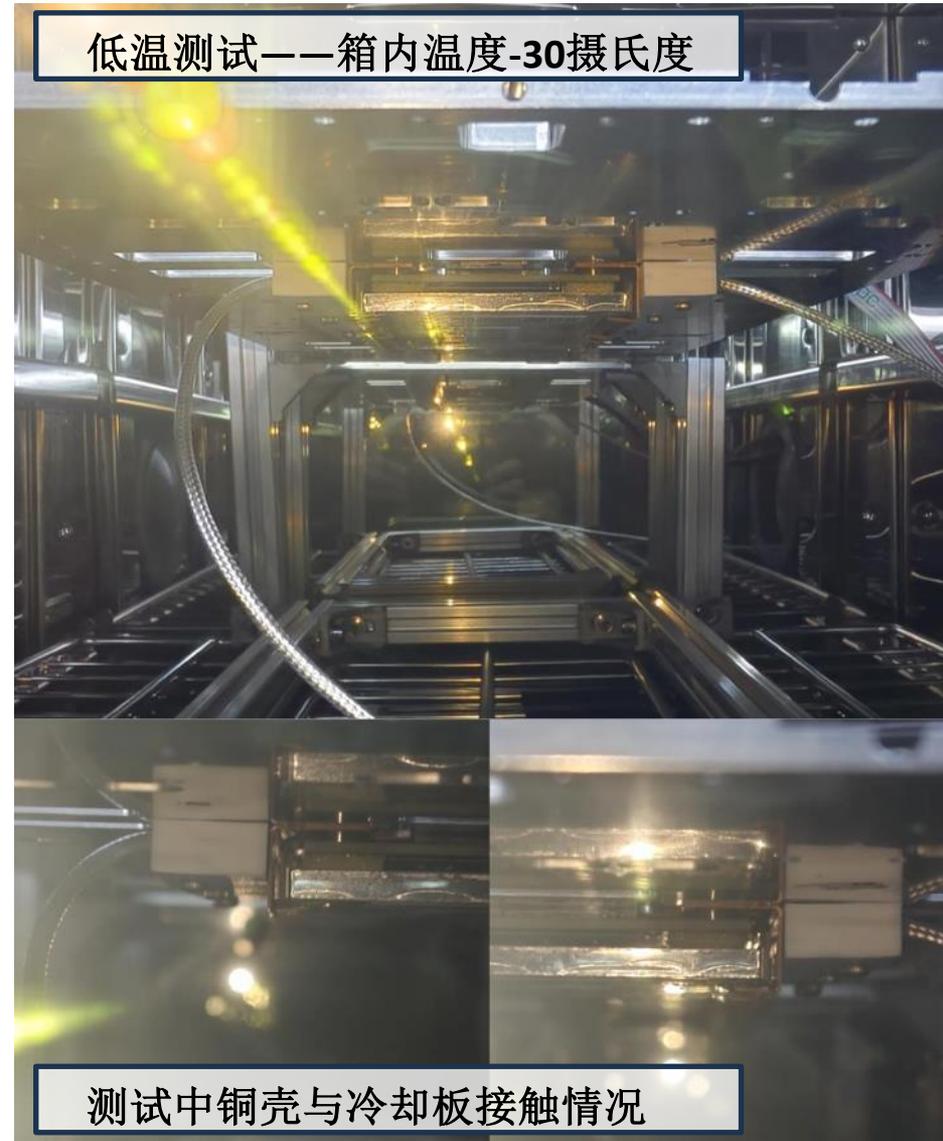
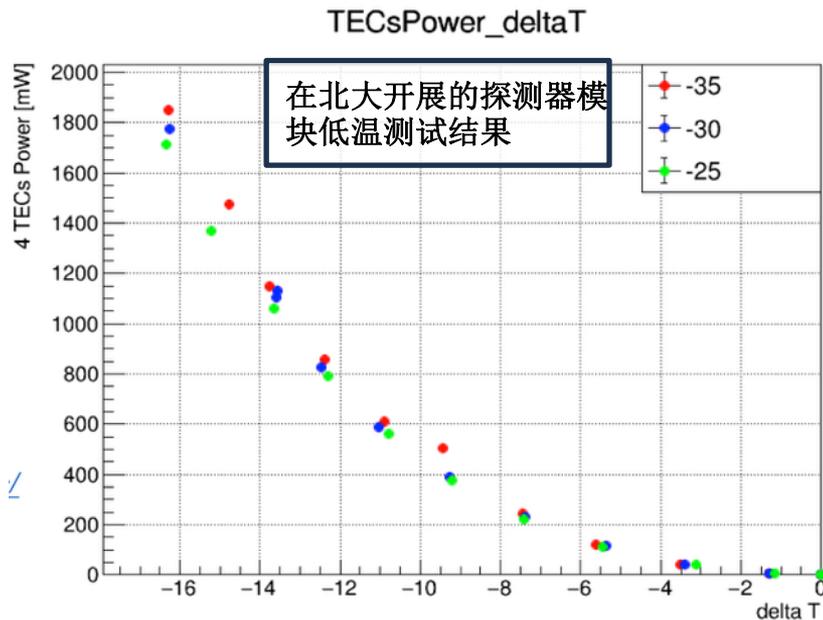


12路多通道QAQC系统



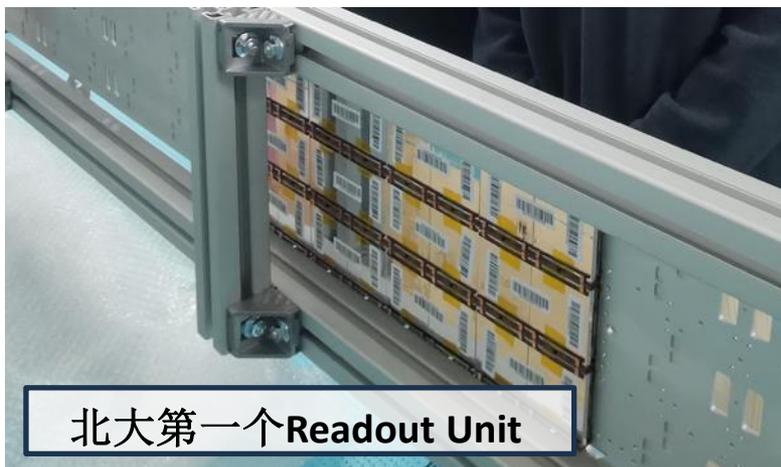
CMS-MTD项目：低温测试

- 使用恒温箱进行低温测试
- 选取三个与MTD探测器实际运行温度接近的温度点（-25， -30， -35）进行测试
- 为实现相同的温度差，更低的温度需要更高的能耗，具体的能耗结果与在CERN开展的低温测试一致
- 进一步研究结果显示，热胀冷缩效应并未使探测器模块性能改变和发生形变



CMS-MTD项目：桶部桶部探测器Tray整机建造

- 2024年3月在CERN首次完成单Readout Unit的全部组装
- 2024年7月在CERN完成了1号Tray的建造，基本敲定了Tray组装工艺
- 2025年3月在CERN完成了2号Tray的建造并初步进行质控，完全确定了Tray的组装工艺，并基本完成了质控系统的调试
- 2025年4月，在北大完成第一个Readout Unit建造
- 2025年5月，在北大完成第一个Tray整机建造



北大第一个Readout Unit



北大第一个Tray整机

CMS-MTD项目：Tray整机测试系统

- 探测器整机Tray组装和质控所需的特制电子学控制和采数系统，已初步搭建
- 北大组装中心对建造的第一个Tray整机进行了测试，进一步完善测试链条

Serenity板

北京大学整机Tray的组装和质控

定制供电板

RU1组装完成

多路电源组

磁盘阵列

课题2 中期总结：考核指标完成情况（GEM）

课题目标	考核指标		考核方式（方法） 及评价手段	中期实际完成 指标状态
	指标名称	中期指标值/状态		
生产 40 个端部内圈GEM探测器，设计、研发生产相应的前端电子学板，完善实验室并掌握大面积 GEM探测器的关键组装测试工艺和质量控制技术。	指标1.1 GEM探测器有效增益	>10000（量产(>20 块) 大面积（~ 40×50cm ² ） GEM 探测器）	X 射线测试	25块GEM模块增益测试结果>10000
	指标 1.2 GEM探测器模块	20	CMS合作组检验合格	完成25块GEM探测器模块

课题2 中期总结：考核指标完成情况（MTD）

课题目标	考核指标		考核方式（方法）及评价手段	中期实际完成指标状态
	指标名称	中期指标值/状态		
研制时间分辨率优于60皮秒的MTD时间探测器的桶部部分，建立MTD探测器组装中心，建造超过500个桶部传感器模块，并建立完善批量生产探测器所需的质控系统。	指标2.1 时间分辨	60皮秒（小批量16条晶体构成的传感器模块）	通过放射源或束流测试其时间分辨	束流测试得到由16条晶体构成的传感器模块时间分辨率小于60皮秒
	指标2.2 桶部传感器模块	200	通过质控系统测试其信号品质（信号幅度一致性等）	完成超过200块由16条晶体构成的传感器模块，测试得到信号幅度一致性达到中期指标要求

课题2 中期总结：人员和经费

经费：

- 预算总经费**650万元**(其中北京大学478万元，清华大学105万元，北京航空航天大学67万元)。
- 累计到位经费**525万元**，累计拨付课题参与单位经费140万元，累计支出**420.67万元**，经费使用率**80%**。
- 经过课题团队、合作厂家与北京海关充分沟通并获得大力支持，完成了以“**来料加工**”方式的免税手续，对本项目所使用的进口材料进行免税处理，避免了由关税造成的经费危机。

人员（北京大学，清华大学，北京航空航天大学）：

- 高级职称：班勇、王大勇、孙小虎、胡震、成瞳光
- 工程师：马宏骥、薛志华
- 博士后：Andrew. M. Levin, Aera Jung
- 研究生：李哲、蒋楚翘、章立诚、何宗晟、耿新月、蒋若冰、郭波涛、潘程扬、何杰汉、陈嘉华、胡天骁等。

课题2 中期总结：培养研究生、发表论文、会议报告

培养研究生：

- 蒋楚翘：“CMS 实验 $B^+ \rightarrow K+\mu+\mu^-$ 过程研究和GE2/1探测器升级”，2024年6月，导师：班勇，王大勇2024年6月博士毕业
- 章力诚：“CMS实验寻找双希格斯粒子与GEM/MTD探测器升级”，2024年6月，导师：班勇，孙小虎2024年6月博士毕业
- 李哲：“CMS实验 $H \rightarrow \tau\tau$ 分析与GEM升级探测器电子学板的研发”，2024年6月，导师：班勇，孙小虎2025年6月博士毕业

发表论文：

- 梁子寒，薛志华等，CMS-GEM探测器电子学板测试工具的研制，《核电子学与探测技术》2023年01期 v.43; No.296
- Yue Wang; Licheng Zhang; Aera Jung; Dayong Wang; Yong Ban; Simulation study of the performance of quadruple-GEM detectors, Radiation Detection Technology and Methods, 2022, 2022(10)
- F. Addesa et.al., Optimization of LYSO crystals and SiPM parameters for the CMS MIP timing detector, 2024 JINST 19 P12020
- Zhe, Li., Yong, Ban., et. al, The design and production of the front-end electronics board for large area GEM detector, Journal of Instrumentation 2025

会议报告：

- Dayong Wang, Large Area GEM Production at Peking University, The 2024 international workshop on the high energy Circular Electron Positron Collider, Hangzhou, October 22-27, 2024
- Jin Wang, MTD based LYSO and SiPM at CMS experiment, The 2024 international workshop on the high energy Circular Electron Positron Collider, Hangzhou, October 22-27, 2024
- Jin Wang, CMS MTD BTL Sensor R&D and Assembly in Phase2 Upgrade, 10th China LHC Physics Workshop, November 14-17, 2024, Qingdao
- Leyan Li, MTD BTL Thermal Test Setup, 10th China LHC Physics Workshop, November 14-17, 2024, Qingdao
- Zhe Li, The design, production and QC of GEM electronics board for CMS ME0 project, 10th China LHC Physics Workshop, Nov. 14-17, 2024, Qingdao
- Zongsheng He, GEM chamber assembly and test for CMS ME0 project, 10th China LHC Physics Workshop, November 14-17, 2024, Qingdao
- 蒋楚翘, CMS 实验升级大面积 GEM 探测器的组装和质控, 第十一届全国先进气体探测器研讨会, 2023.10, 北京
- Chuqiao Jiang, CMS-GEM upgrade progress and GEM assembly at PKU, The 9th China LHC Physics Workshop, 2023.11, Shanghai
- Zhe Li, CMS-GEM ME0 electronics board design, prototyping and production plan, The 9th China LHC Physics Workshop, 2023.11, Shanghai
- 孙小虎, MTD项目进展, 2023年度CMS中国组会议, 2023.7 上海
- 王锦, MTD sensor module assembly, 2023年度CMS中国组会议, 2023.7 上海
- Wang Jin, MTD sensor and assembly, The 9th China LHC Physics Workshop (CLHCP2023), 2023.11, Shanghai

课题2 中期总结：存在问题

- 大型国际合作的探测器建造涉及很多国家、科研单位和厂家，各单位技术水平、经费和人员支持等不一，整体探测器升级计划会受到个别单位进展状况的影响
- 本课题**GE2/1 GEM**项目由于读出电子学板的生产质量控制问题，不得不推迟计划**2-3**年，**ME0**计划提前进行
- 目前该调整没有影响到本课题的开展

课题2 中期总结

CMS-GEM探测器升级:

- 完成了25块GEM探测器模块的生产测试并运往CERN进行后续总装测试。
- 完成了ME0-GEB前端电子学板设计研发及全部540块的批量生产，测试合格后已运达CERN。
- 研制成功了ME0 GEM FR4外框架并完成了全部约230套外框架的批量生产并运往CERN。

CMS-MTD探测器升级:

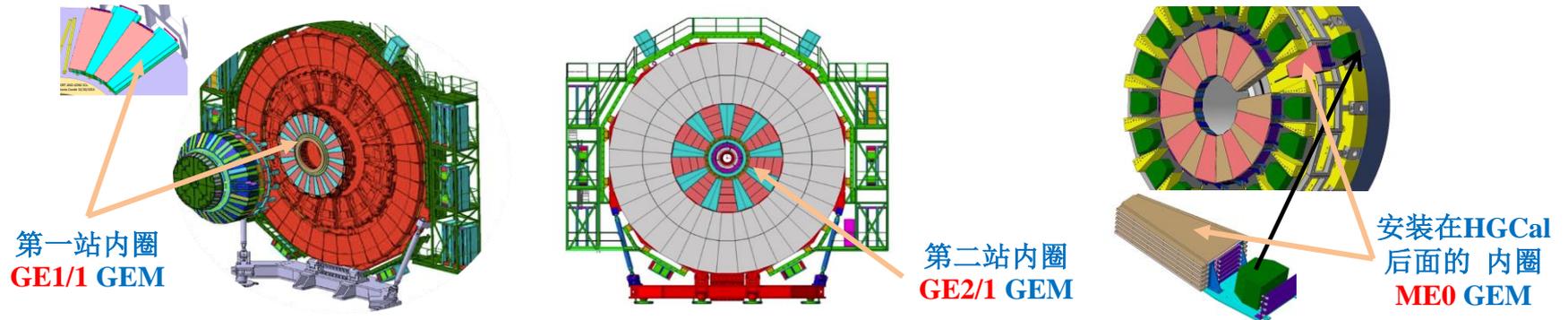
- MTD桶部传感器模块设计优化工作已全部完成，组装工艺已定型；
- 已批量生产超过200块MTD桶部传感器模块；
- MTD桶部探测器模块组装工艺继续改进，质控系统搭建完成；tray整机建造工艺研究接近完成。

本课题完成了中期目标，完成的GEM模块数、MTD传感器模块数超过了中期指标。

谢谢各位专家！

Backup

CMS-GEM项目：升级计划



		GE1/1	GE2/1	ME0
Numbers*		288 (=2×36×4)	288 (=2×18×8)	216 (=2×18×6)
plan	prototyping	2013-2017	2014-2022	2014-2023
	batch production	2017-2019	2022-2028	2024-2026
	Install&commission	2018-2020	2028-(?)	2027-2029
CMS-China Contributions		Production and test of all electronic boards(GEB) Participate assembly, test and commissioning at CERN	Design, production and test of all electronic boards(GEB) Assembly and QC of ~1/8 GEM detectors at PKU, Participate assembly, test and commissioning at CERN Production of FR4 frames, mechanical structures, etc	Design, production and test of all electronic boards(GEB), Assembly and QC of ~1/5 GEM detectors at PKU, Participate assembly, test and commissioning at CERN Production of FR4 frames, mechanical structures, etc

* (总探测器个数=端部数×每个端部module数×每个module探测器个数)

CMS-GEM项目：技术路线

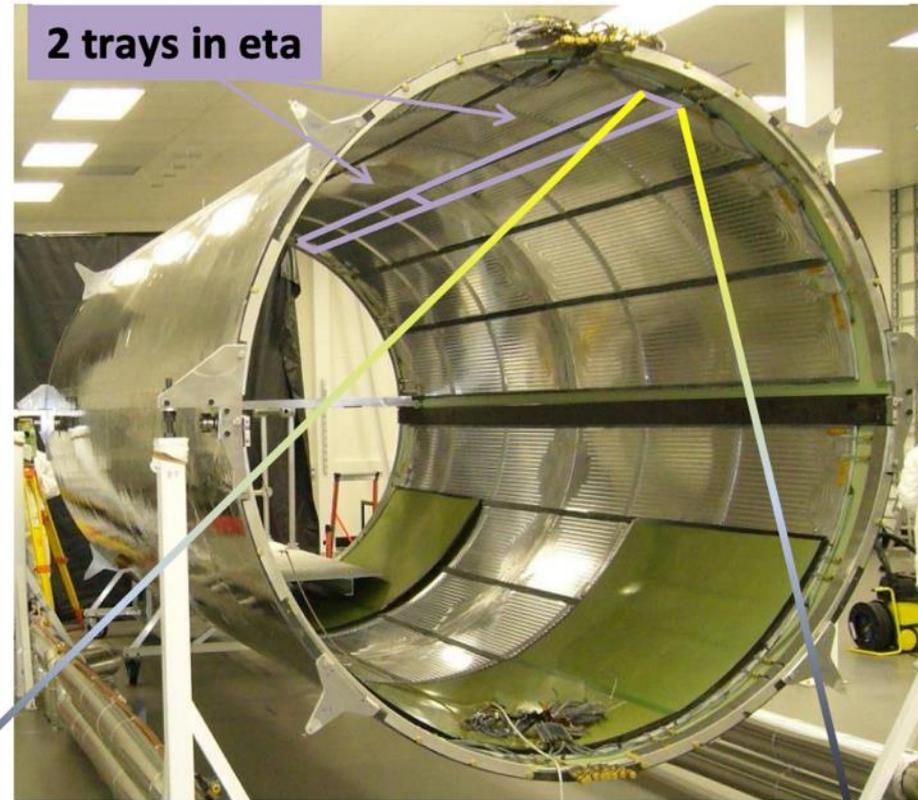
- CMS端部内圈第二站GEM升级需解决探测器组装中保持大面积平整度、气隙均匀性及各层GEM膜阻抗稳定性问题；将通过改进、优化组装工具、设计保持GEM膜间气隙间距配件、优化电极焊接材料等技术手段来解决。
- 在ME0 GEM前端电子学板研发中要解决高密度信号线走线设计、高速信号传输稳定性及电源和屏蔽设计、电子学板与信号读出系统、冷却系统等机械匹配性等关键问题，将通过与CERN、美国FIT等密切交流，研发样机并合作测试、优化。
- 在探测器结构部件生产中，将与国内厂家如深圳鑫诺捷公司、北京奥星雅博公司等进行深度合作，改进工艺和工装设备，提高产品良率。同时继续进行GEM模拟研究、电子学设计仿真等，为设计方案优化提供参考。

桶部MTD BTL结构

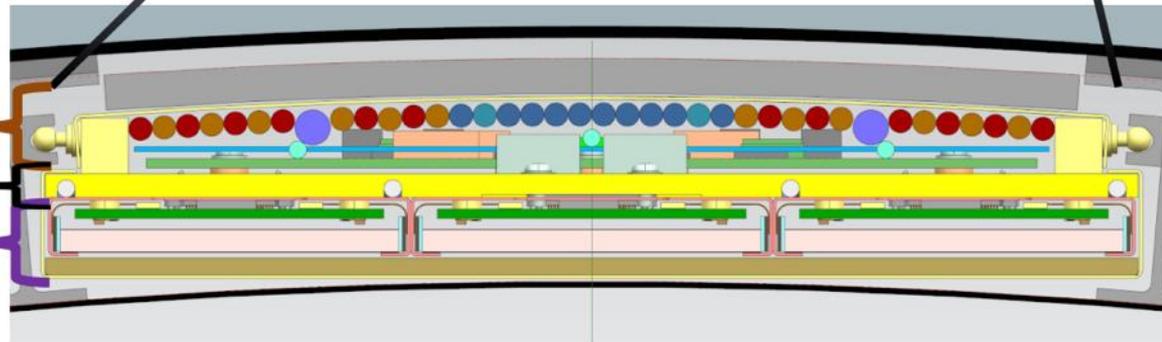
- BTL will be attached to the inner wall of the BTL Tracker Support Tube (BTST).
- BTST dedicated design to accommodate BTL
- Cold volume shared with Tracker (TRK).

BTL Segmentation :

- 72 trays (36 in $\varphi \times 2$ in η)
- 331k readout channels, 165k LYSO bars, organized in 6 Readout Units per tray.
- Tray dimensions : 250 x 18 x 2.5 cm
- Trays supported by rails mounted on I-beams on the inner wall of the BTST.
- BTL volume separated by cover plates from Tracker.



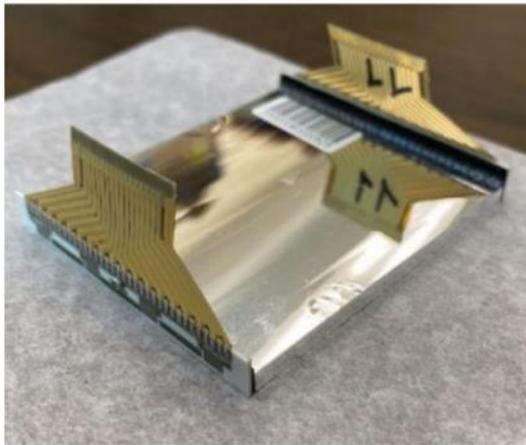
- 1) Front End electronics, segmented into six Readout Units (RU)
- 2) Cooling tray, providing mechanical support, CO₂ cooling pipes.
- 3) Sensor layer, segmented into modules (12 modules per RU with 2 sensor modules each)



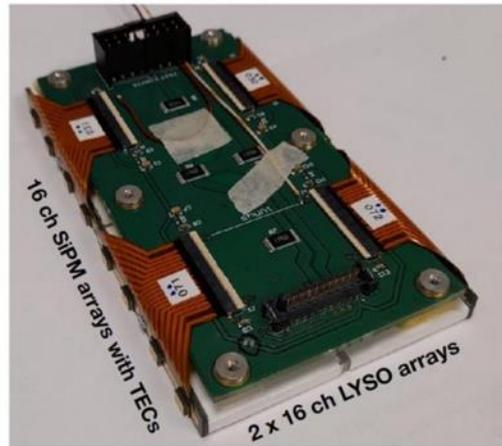
BTL modules

- Mechanical design details defined and unchanged since last AR :
 - Tray segmented matching RU, mechanical fixture of cooling pipes.
 - Copper housing provide mechanical and thermal interface of modules to cooling.
 - Modules consist of LYSO + SiPM (sensor module), connect with flex to FE board.
- Thermo-electric coolers (TECs) on SiPM package for enhanced thermal management.

BTL sensor module



BTL module



BTL detector module



Cooling plate

