

课题3 《CMS实验端盖缪子探测器升级》

结题报告

班 勇

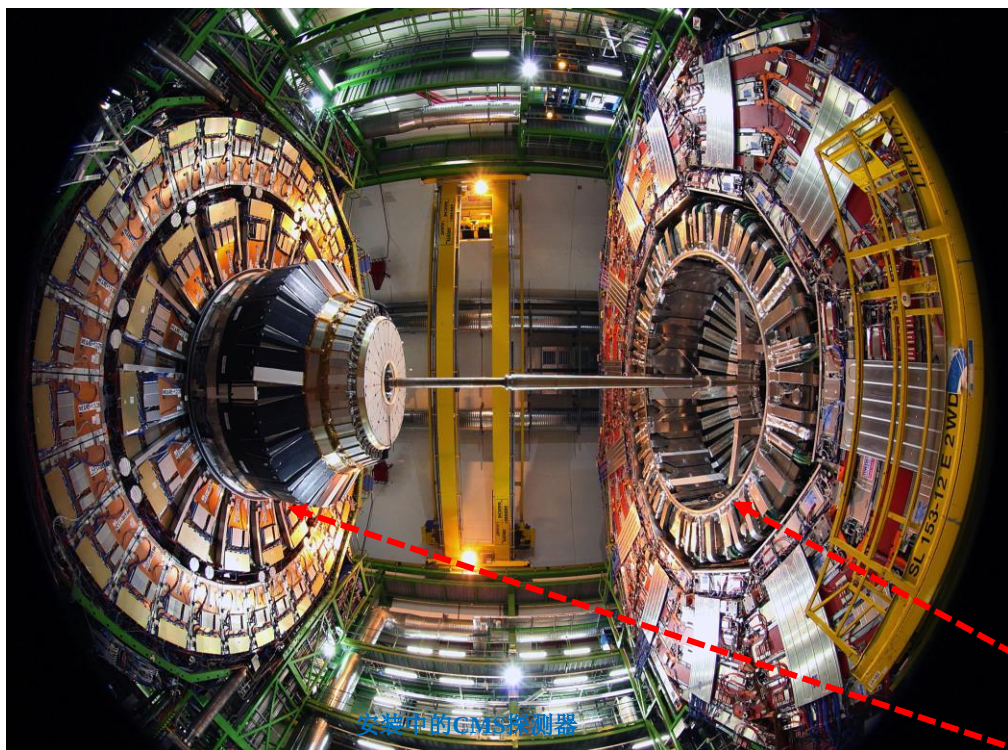
2021年8月27日

参加单位：北京大学，清华大学

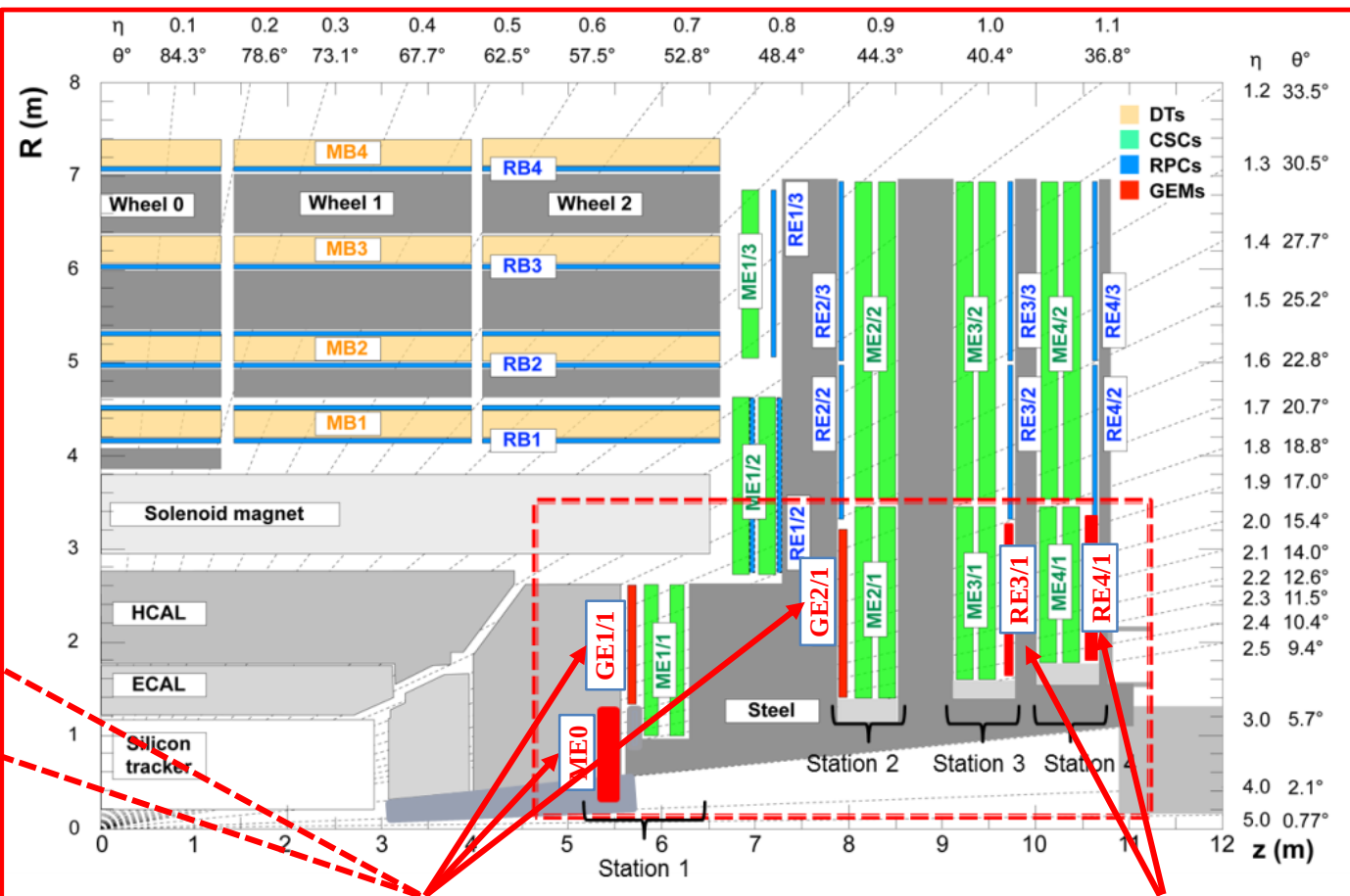
报告内容:

- 课题背景
- 任务、目标和考核指标
- 研究内容、主要技术创新
- 完成情况和主要成果
- 经费使用情况
- 总结

课题背景:



- CMS合作组由~50多个国家、~200多个研究机构和~4000多名科学家和工程技术人员组成
- 中国组(高能所、北京大学) 1999年成为CMS正式成员, 受基金委和科技部资助参加了端部CSC+RPC探测器建造(2000-2008)和一期升级(2008-2017)



GEM(Gas Electron multipliers)

升级 北京大学

MRPC(Multiple Resistive

Plate Chamber)升级 清华大学

端盖缪子探测器二期升级中国组任务

课题背景:

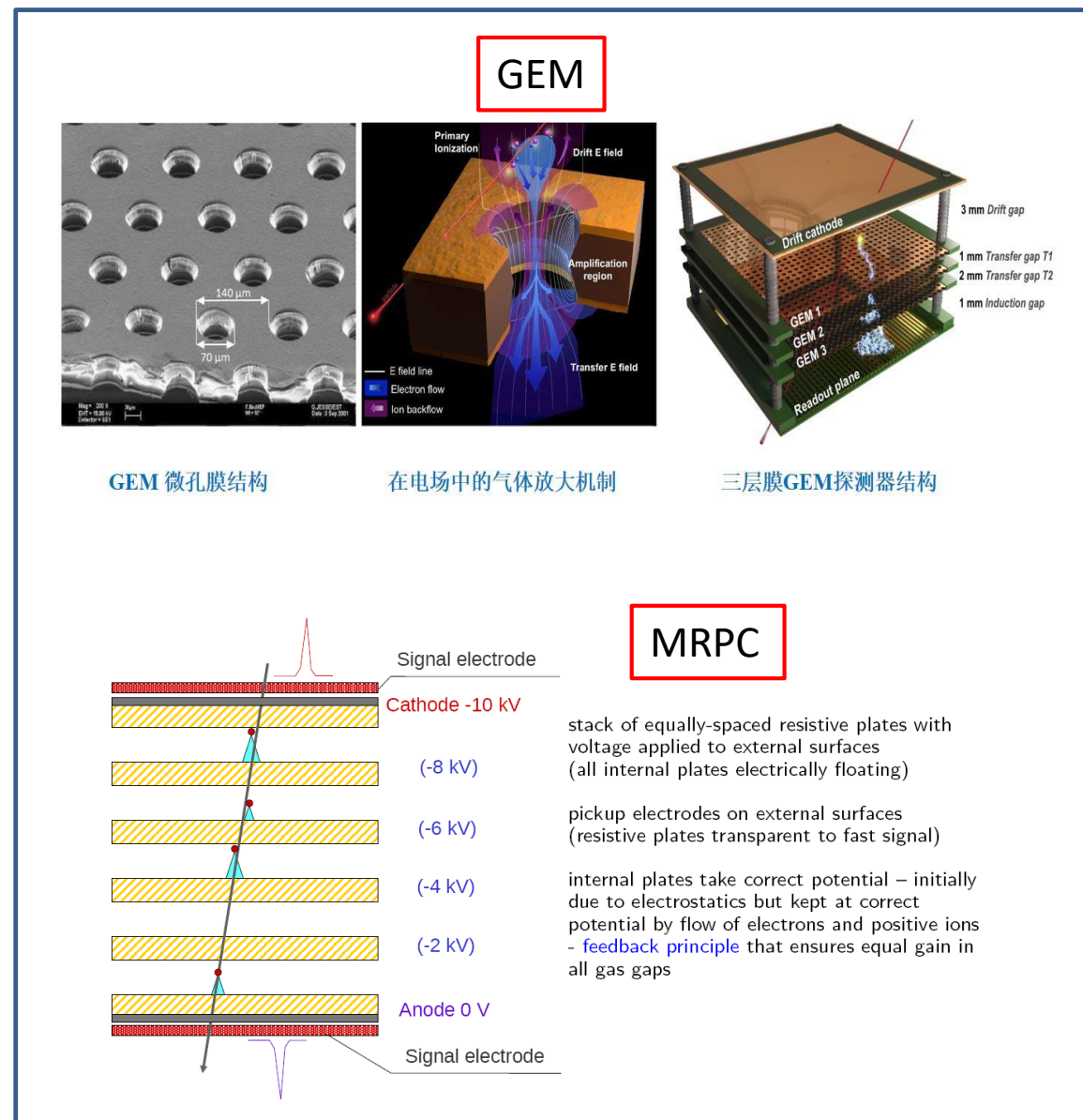
CMS内圈辐射极强，需要高性能探测器技术：

GE1/1, GE2/1, ME0将采用GEM技术（北京大学）：

- 可工作在**极强辐射环境**中，结构简单，时间、空间、计数率性能优异；
→大面积GEM技术在高能物理实验中的首次大规模应用。
- 升级后CMS-GEM不仅提供**触发**，且高空间分辨能力可提供**缪子径迹重建**，将提高低横动量缪子的触发效率，保证高亮度运行时缪子触发效率，且大大提高新物理发现潜能。

RE3/1, RE4/1进行玻璃MRPC预研（清华大学）：

- 可工作在**极强辐射环境**中，具有极好的时间分辨（<100 ps）、空间分辨和效率等性能；
- 清华大学在玻璃MRPC研制中具有技术领先优势。



课题背景:

本课题包含三个子课题:

CMS-GEM 项目: 北京大学

实际参与 (不在课题正式名单上): 中山大学尤郑昀组 (GEB电子学测试)、清华大学胡震组 (GEB电子学生产和测试)、北京航空航天大学袁丽组 (GEM探测器安装调试)

CMS-MRPC 项目: 清华大学

LHCb-SciFi 项目 (闪烁光纤探测器, Scintillating Fibre, SciFi): 清华大学

经费分配情况:

CMS-GEM项目 (北京大学): 570万

CMS-MRPC项目 (清华大学): 285万

LHCb-SciFi项目 (清华大学): 205万

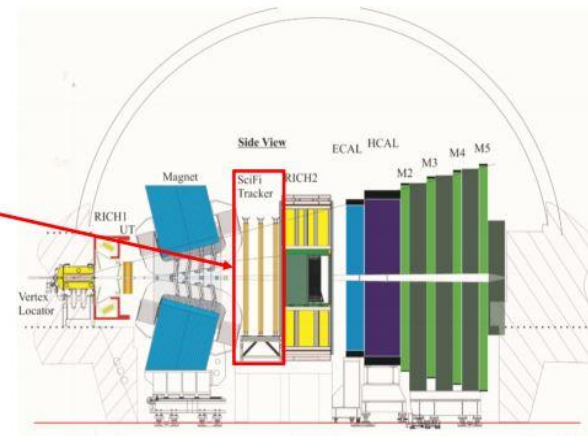
LHCb Upgrade

❖ Goal: increase statistics by more than $\times 10$

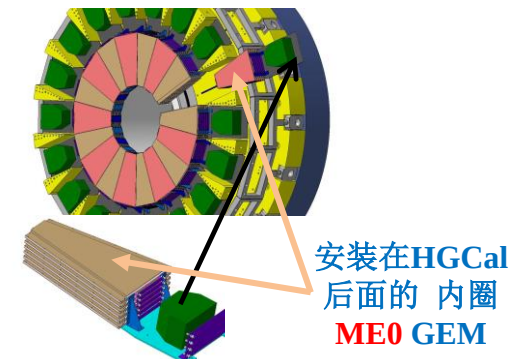
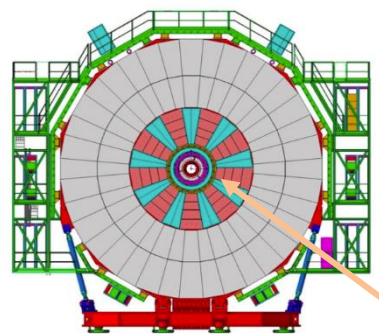
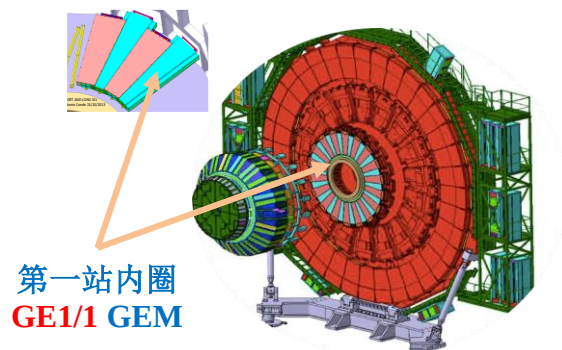
- ✓ Operate at $2 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1} \rightarrow 50 \text{fb}^{-1}$
- ✓ Triggerless 40MHz readout

❖ Scintillating Fibre (Sci-Fi) Tracker

- ✓ Fast, high efficiency ($\sim 99\%$)
- ✓ High granularity ($250\mu\text{m}$)
- ✓ High resolution ($< 100\mu\text{m}$)
- ✓ Low mass ($< 1\% X_0/\text{layer}$)
- ✓ Radiation hardness (up to 35kGy)



任务、目标和考核指标：



升级探测器		GE1/1	GE2/1	ME0
探测器个数*		288 ($=2 \times 36 \times 4$)	288 ($=2 \times 18 \times 8$)	216 ($=2 \times 18 \times 6$)
计划	预研	2013-2017	2014-2020	2014-2021
	批量生产	2017-2019	2020-2022	2022-2024
	安装调试	2018-2021	2022-2024	2024-2026
中国组任务		全部前端电子板GEB的生产测试，在CERN的探测器组装测试、安装调试	负责设计研发及生产测试全部GEB，在北大生产1/8 GEM探测器，在CERN进行组装测试、安装调试	负责设计研发及生产测试全部GEB，在北大生产~1/5 GEM探测器，在CERN进行组装测试、安装调试

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

CMS-MRPC项目任务: 预研第3站、第4站内圈缪子探测器，为CMS升级提供技术选择。

LHCb-SciFi 项目: 预研、批量生产和测试LHCb-SciFi 探测器电子学。

CMS-GEM项目涵盖的任务

任务、目标和考核指标：

目标：研发生产高性能CMS端盖内圈升级缪子探测器，要求在极强辐射环境下具有极高计数率、高效率和好的时间和空间分辨能力。

CMS-GEM项目：掌握大面积GEM探测器研制与批量生产技术，升级北京大学高能物理实验室，使之成为CMS官方GEM探测器组装测试基地。承担设计、研发GEM探测器前端电子学板任务，完成部分前端电子学板的批量生产和测试，承担部分CMS-GEM项目探测器生产任务。

CMS-MRPC项目：结合CMS端部内圈缪子系统升级需求，研制出大面积拼接型高计数率玻璃MRPC探测器，其性能满足高计数率、高时间分辨等要求，为CMS升级提供技术选择方案。研究高计数环境的气体污染问题，优化探测器设计。

LHCb-SciFi项目：为LHCb闪烁光纤（SciFi）径迹探测器关键部件性能和质量检测研发检测系统、改进寻迹和准直算法，完成电子学板的批量生产，为在线触发系统和离线物理分析提供更为精确的信息。

任务、目标和考核指标:

课题3任务书考核指标

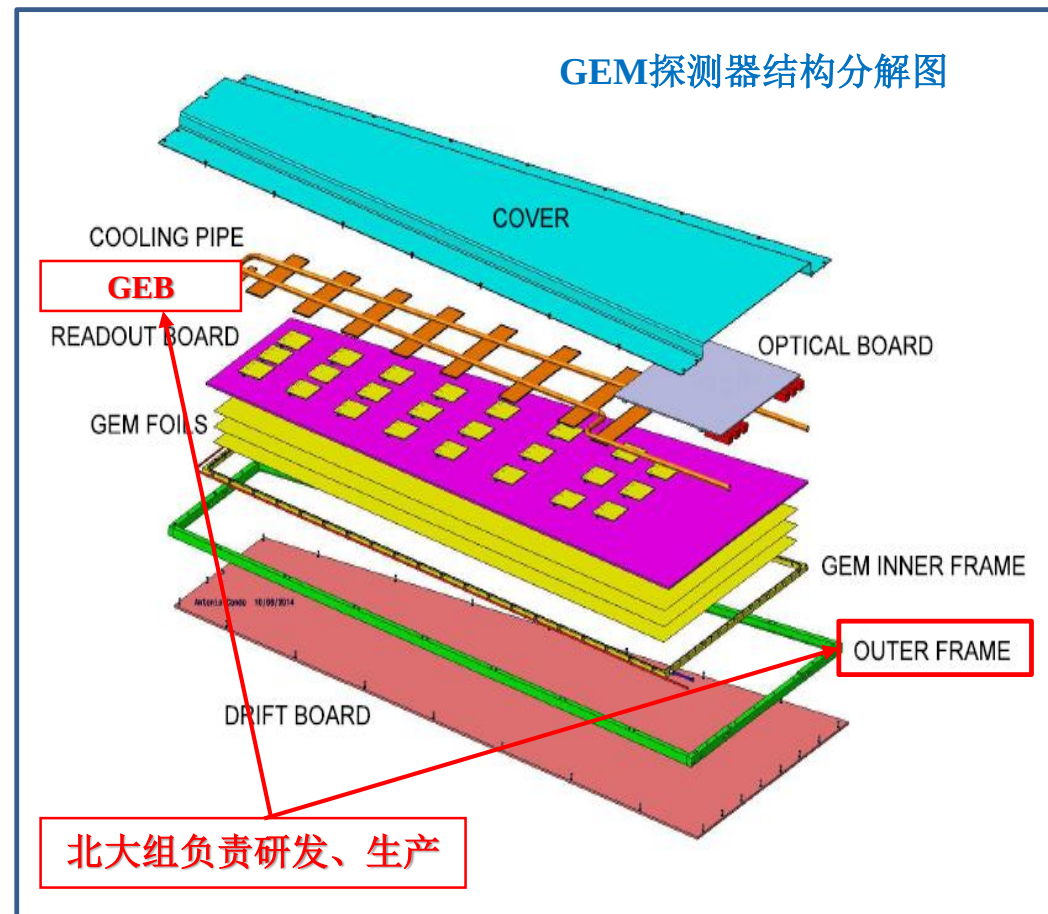
课题目标	成果名称	成果类型	考核指标				考核方式 (方法) 及 评价手段 ⁴
			指标名称	立项时已有指标值/状态	中期指标值/状态 ³	完成时指标值/状态	
(限500字以内。) 升级后的CMS端盖内圈 探测器要求在极强辐射环境下具有极高计数率、高效率 and 好的时间和空间分辨能力。前两层采用GEM (CMS-GEM), 同时最内圈还增加一层快时间ME0探测器, 也将采用微结构气体探测器。内圈后两层采用玻璃RPC(CMS-MRPC)。通过CMS-GEM项目掌握大面积GEM及其他微结构探测器研制与批量生产技术, 设立基于MacroTCA框架的多通道、快时间前端电子学和数据获取系统; 在国内开发大面积微结构膜批量生产能力, 承担并完成部分CMS-GEM项目探测器生产任务。拟采用具有自主知识产权, 国际领先的高计数率、高时间分辨MRPC技术研制建造CMS端部内圈后两层子探测器, 研发大面积多层玻璃MRPC的生产技术; 承担并完成部分CMS端部子探测器的升级。LHCb探测器将为闪烁光纤 (SciFi) 径迹探测器关键部件性能和质量检测研发检测系统、改进寻迹和准直算法, 为在线触发系统和离线物理分析提供更为精确的信息。	1: GEM 探测器	☐ 新理论 ☐ 新原理 ☐ 新产品 ☒ 新技术 ☐ 新方法 ☐ 关键部件 ☐ 数据库 ☐ 软件 ☐ 应用解决方案 ☒ 实验装置/系统 ☐ 临床指南/规范 ☐ 工程工艺 ☐ 标准 ☐ 论文 ☐ 发明专利 ☐ 其他	指标1.1单室效率	无	无	>97%	性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由CMS合作组安排束流测试。
			指标1.2时间分辨			<10ns	
			指标1.3计数率			>10kHz/cm ²	
			指标1.4 ϕ 方向角分辨			<300 μ rad	
			指标1.5 寿命			累积辐射达到 200 mC/cm ² 时没有增益损失	
	2: MRPC探测器	☐ 新理论 ☐ 新原理 ☐ 新产品 ☒ 新技术 ☐ 新方法 ☐ 关键部件 ☐ 数据库 ☐ 软件 ☐ 应用解决方案 ☒ 实验装置/系统 ☐ 临床指南/规范 ☐ 工程工艺 ☐ 标准 ☐ 论文 ☐ 发明专利 ☐ 其他	指标2.1 计数率	小面积MRPC计数率 >10 kHz /cm ² , 时间分辨 <100 ps, 位置分辨 <5mm, 效率 >95%。	无	>10kHz/cm ²	性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由CMS合作组安排束流测试。
			指标2.2 时间分辨			<100ps	
			指标2.3 位置分辨			<2mm	
			指标2.3 效率			>95%	
	3: SciFi 探测器关键部件检测系统	☐ 新理论 ☐ 新原理 ☐ 新产品 ☒ 新技术 ☐ 新方法 ☐ 关键部件 ☐ 数据库 ☐ 软件 ☐ 应用解决方案 ☒ 实验装置/系统 ☐ 临床指南/规范 ☐ 工程工艺 ☐ 标准 ☐ 论文 ☐ 发明专利 ☐ 其他	PACIFIC芯片全功能检测效率; 前端板测试效率。寻迹和准直效率, 相对分辨率。	无	无	PACIFIC芯片全功能检测效率达80片/天; 前端板测试效率达20片/天。寻迹和准直效率95%, 相对分辨率达到0.5-1%	性能指标通过放射源、宇宙线测试, 由CMS合作组安排束流测试。
科技报告考核指标	序号	报告类型	数量	提交时间		公开类别及时限	
	1	中期技术进展报告	1	2018年6月		延期公开	
	2	年度技术进展报告	1	2018年11月		延期公开	

研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

- CMS-GEM探测器系统包括**气体室、读出板、前端电子学板、读出芯片、光电转换（OH）板、冷却系统、信号及控制传输系统及后端电子学、触发系统**等。

CMS-GEM升级计划安排：

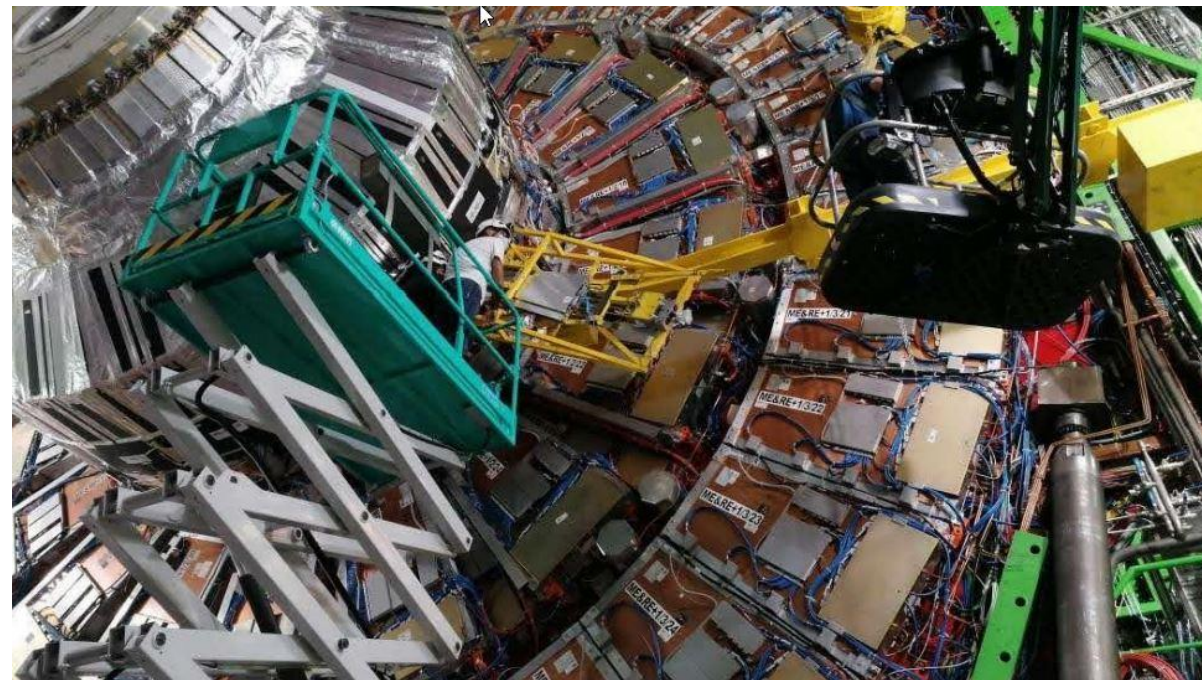
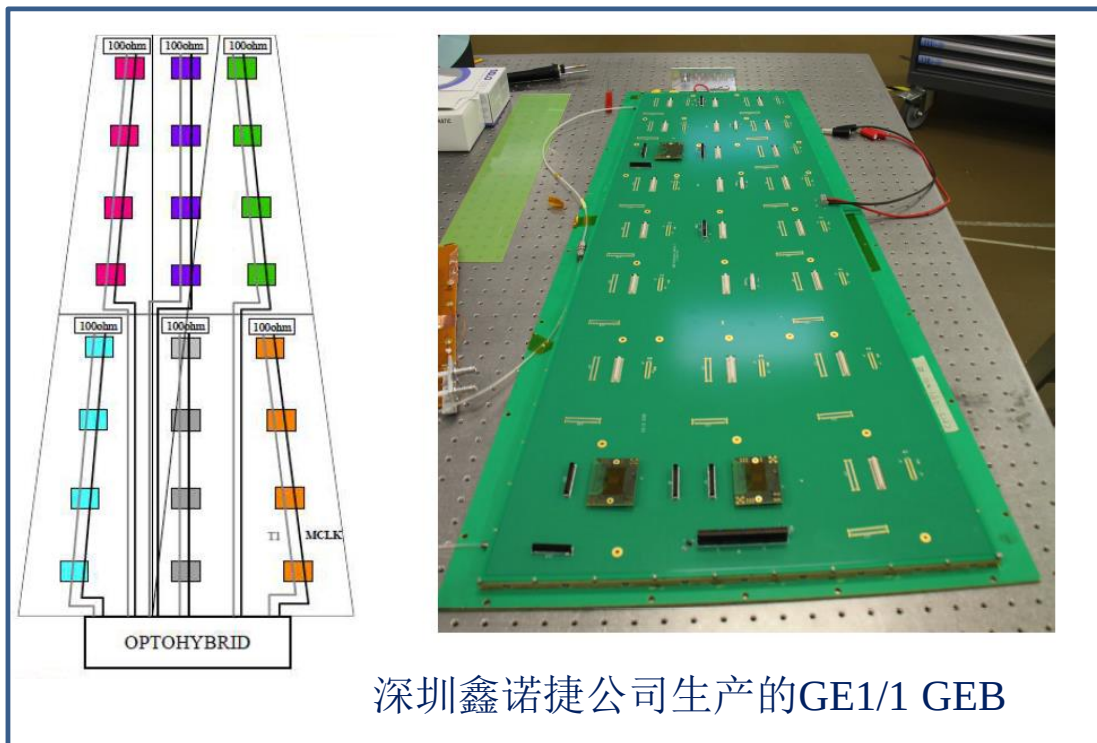
- 2013年CMS-GEM升级合作组成立，并开始探测器预研。
- 完成预研后，探测器部件生产任务由各单位分担。如GEM膜将在CERN和韩国生产，读出芯片和数据获取系统将在CERN和比利时生产，读出板和冷却系统将在印度生产调度。中国将生产**前端电子学板GEB**和**GEM-FR4外框架**。
- 各部件将运到CERN、比利时、美国、德国、印度、**中国（北京大学）等GEM生产基地进行组装测试**，完成后运往CERN。
- 在CERN进行GEM探测器模块组装测试，最后安装到CMS进行联机调试。



研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

GE1/1 GEB (GEM Electronics Board):

- 参与了设计研发阶段的样机生产、工艺改进，开发了基于FPGA板和LED灯的电子板连通性测试系统；
- 负责GE1/1 GEB在深圳鑫诺捷公司的批量生产和测试，2018年按期完成了全部288（+10%备用）块GEB的批量生产和测试；
- 已运到CERN组装到GE1/1 GEM探测器安装在CMS上，目前调试运行正常。



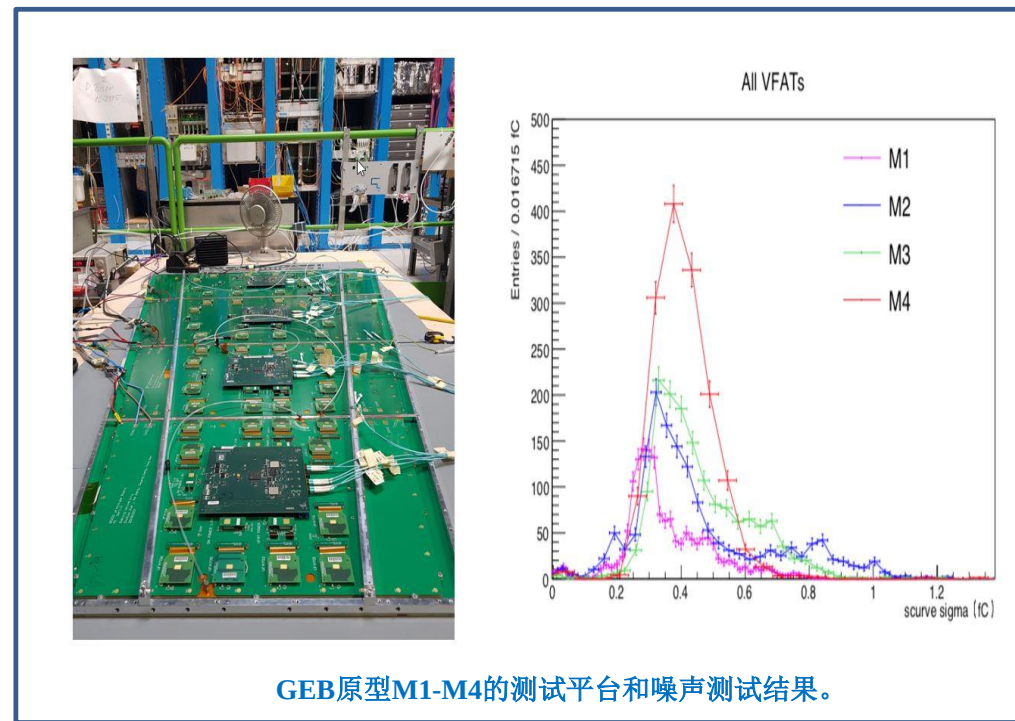
组装测试完成的GE1/1 GEM探测器正在被安装到CMS上

研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

GE2/1 GEB: 北大组负责独立设计、研发和批量生产全部8种型号GEB:

技术难点和改进: 大面积、薄型8层GE2/1电子学板设计多方面考虑了高速信号传输过程中的串扰、电源干扰、阻抗匹配等因素以保证信号的完整性,优化了高速信号在电子学板上的传输设计及屏蔽设计,提高了前端电子学系统的信噪比。采用叠层对称式设计方法提高大面积电子学板的平整度,增强前端电子学在探测系统中的运行稳定性。

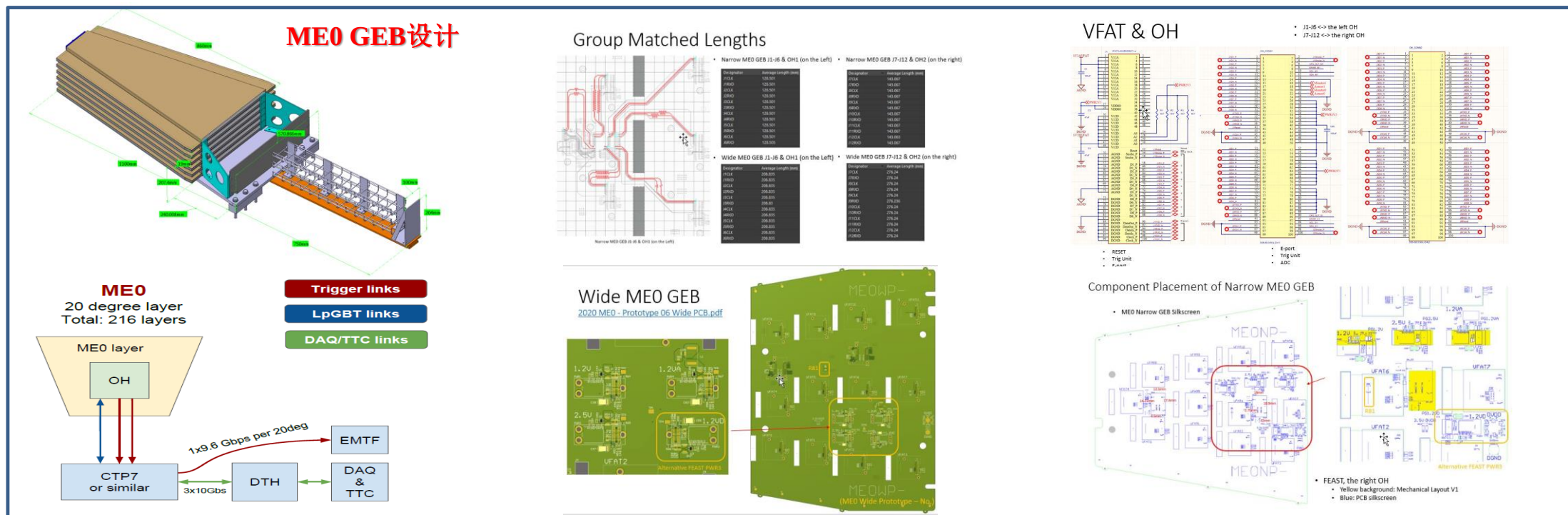
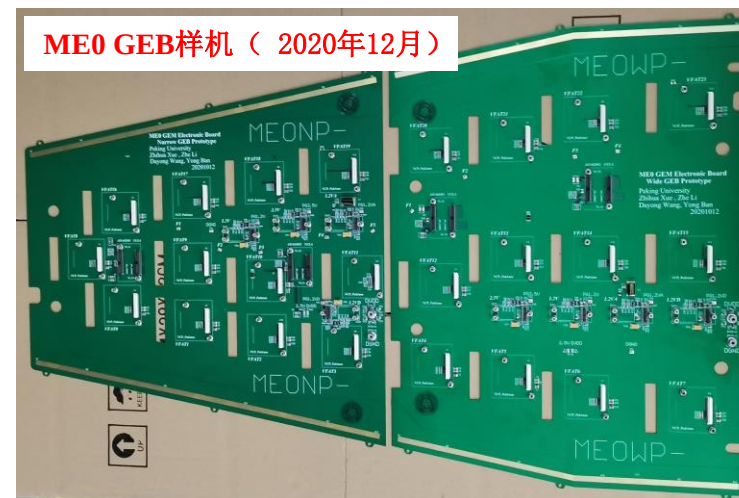
- 2020-2021年,与深圳鑫诺捷公司合作共生产八种型号共三版~20块GE2/1 GEB样机,经过CERN及美国FIT、UCLA等大学的测试**达到要求**;性能比GE1/1 GEB(比利时ULB组负责设计)有**较大改进**;
- 2021年1月20日召开了GEM GE2/1 ESR会议,北大组作的GEB设计、测试和生产报告顺利通过。主要评论意见:**批量生产时所有电子板及安装部件必须采用无卤(Halogen free)材料**。
- 2021年6-7月:完成首批6块无卤材料GE2/1 M1 GEB生产并运往CERN,测试结果表明性能良好。批量生产于2021年9月开始。



研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

ME0 GEB:

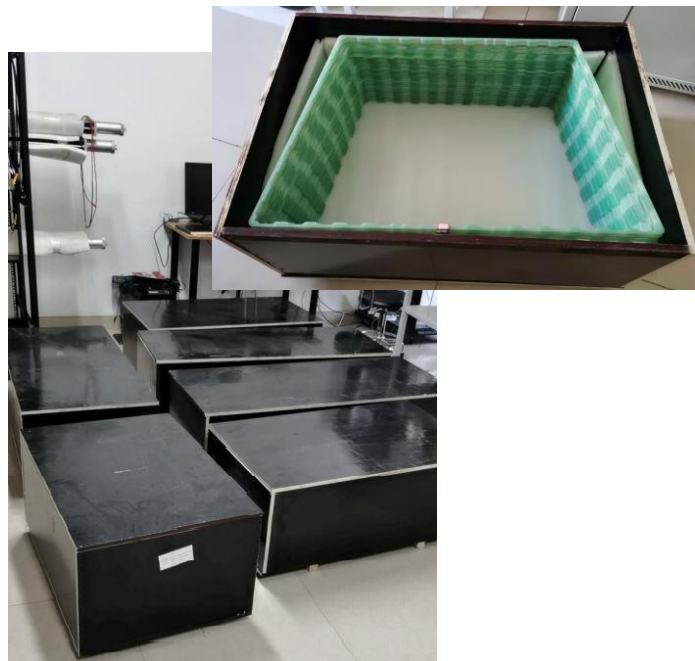
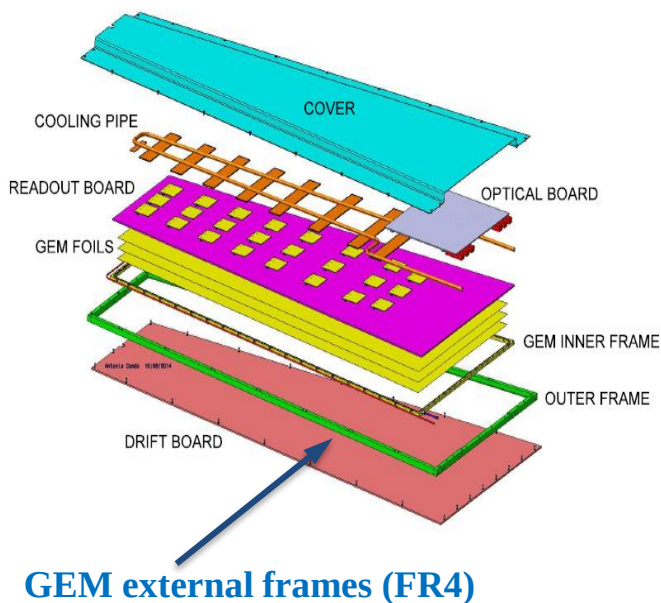
- ME0前端电子学板GEB于2019年10月开始由北大组负责开始设计；经过多轮讨论，第一版设计于2020年7月完成并通过合作组Review；
- 由于疫情影响，2020年12月完成第一版7块样机生产，2021年2月在国内测试后运往CERN和美国完成了联机测试，测试结果表明性能良好。



研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

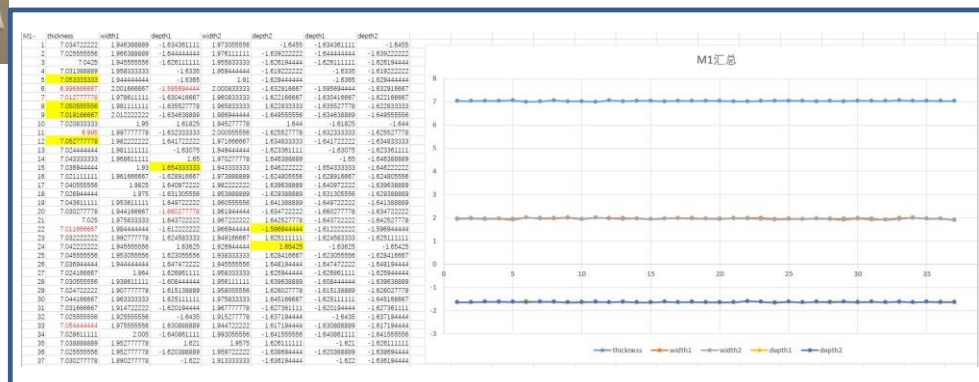
GEM探测器 FR4外框架: 厚度公差小于0.03 mm, 精度要求极高。

- 2019年开始与国内数家厂家合作研发生产，改进生产工艺，采用真空吸压加工、表面附层等技术生产出符合要求的样品；2019年9月中国生产的全尺寸外框架样品运往CERN，2020年2月经两轮测试，北京Axicom公司生产的样品各项指标符合CMS-GEM要求，公差控制比欧洲厂家生产的更好。对第一站GEM框架的改进：外表面进行聚氨酯漆喷涂处理；
- 2020年6月2日召开了GE2/1 GEM探测器外框架研发生产Review会议，审核确定了北京大学负责在中国生产共320套外框架。
- 2021年5月，全部M1-M8 八种型号FR4外框架共320套生产完成，在北大完成测试后发往CERN。5月初运达CERN，通过了CERN质量测试，目前已开始组装进GE2/1 M1探测器。



完成批量生产的GE2/1 M1-M8八种型号FR4 外框架

GE2/1 M1 GEM FR4 外框架测试结果汇总

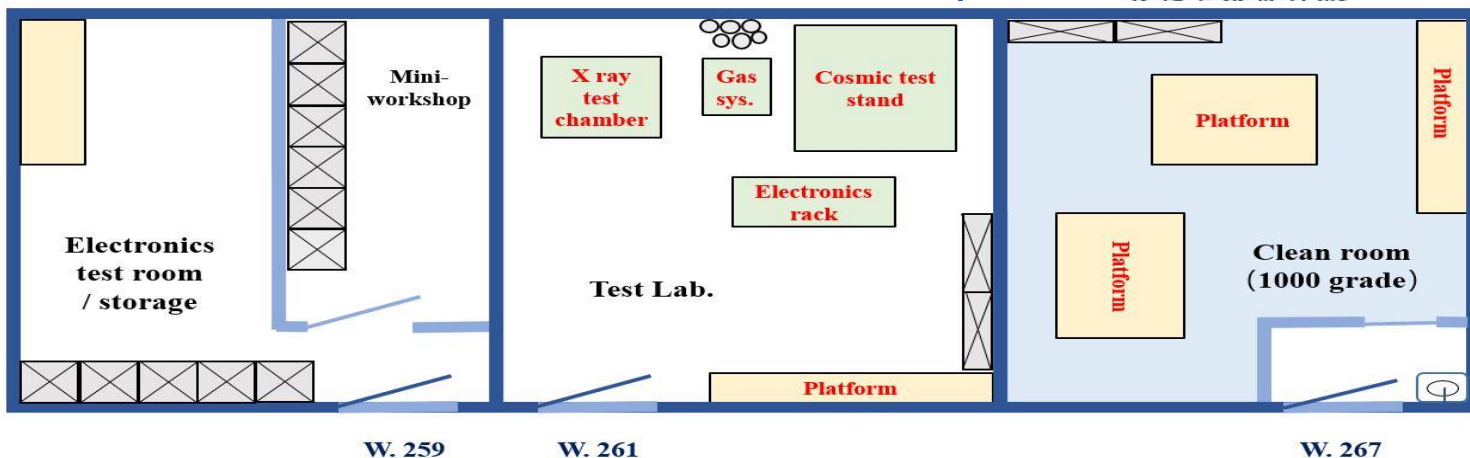


研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

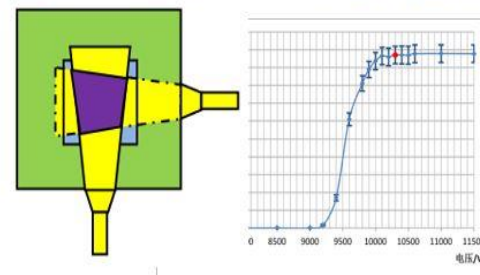
GEM组装测试基地建设：

搭建了新的GEM探测器组装测试实验室，改建了千级GEM组装洁净间，设立了GEM组装各QC步骤软硬件平台。

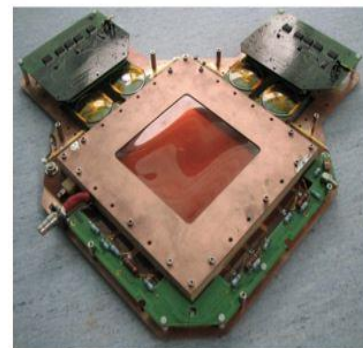
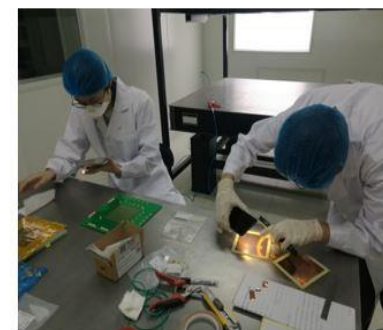
实验室平面图



实验室设备升级



用闪烁探测器、玻璃RPC搭建的宇宙线测试系统



在洁净室组装GEM样机

- 已完成GEM探测器组装测试步骤QC2（GEM膜耐压性测试）、QC3（气密性测试）、QC4（高压、电流测试）、QC5（X射线增益测试）软硬件平台的设立。
- 对研制的小尺寸GEM探测器（ $10 \times 10 \text{cm}^2$ ）及原尺寸GE1/1 CMS-GEM探测器的测试结果表明，各测试步骤及结果达到CMS-GEM合作组要求。

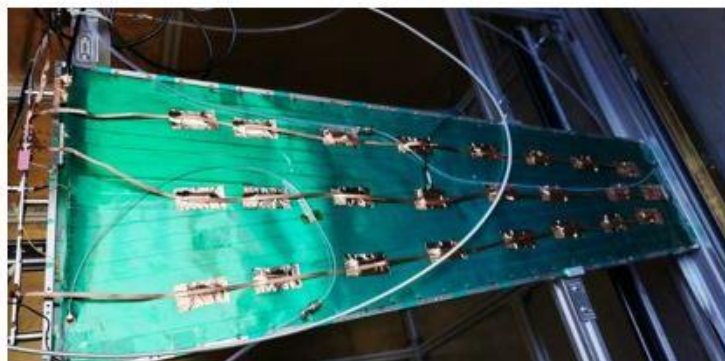
研究内容、主要技术创新：CMS-GEM项目

GEM组装测试基地建设：

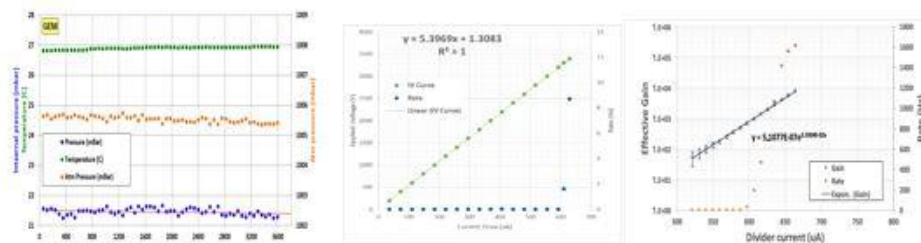
- Completed gas-tightness, HV performance and gain test etc. with **full-size GE1/1 GEM**, QC procedure setup done.



GEM X ray gain test at PKU



Full-size GE1/1 GEM detector



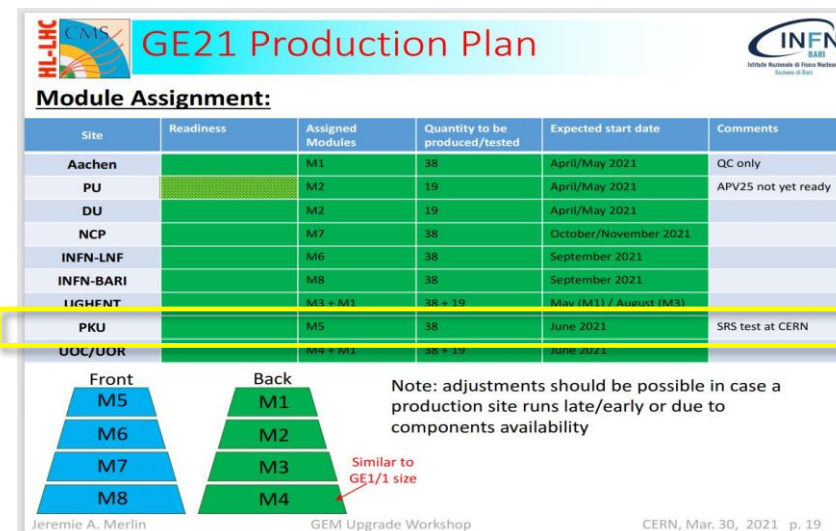
Test results of GEM gas-tightness, HV performance and gain

→ GEM Production site in PKU is ready

全尺寸GE1/1 GEM探测器测试情况

→ 经过两三年时间实验室建设和通过CMS-GEM合作组各审核步骤，北大实验室2021年3月通过了合作组评审，成为CMS-GEM探测器官方生产基地之一。

CMS-GEM 合作组探测器生产负责人Jeremie Merlin在2021年3月GEM Workshop上的报告中，明确了北大基地的探测器生产任务。



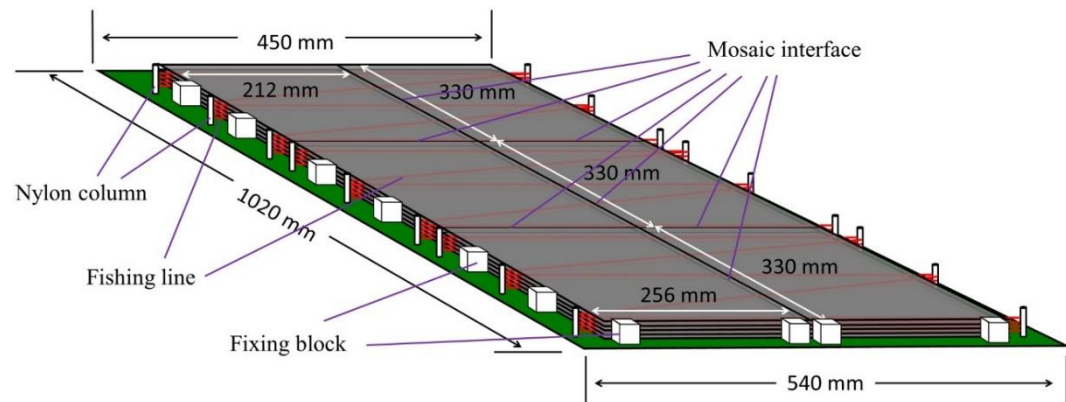
研究内容、主要技术创新：CMS-MRPC项目

大面积拼接型高计数率玻璃MRPC的研制：

关键技术问题：

- 根据CMS-RE3/1、RE4/1空间的限制进行梯形MRPC探测器总结设计，解决气体流向问题。
- 由于低电阻玻璃尺寸的限制，整个探测器将由6个小梯形MRPC拼接而成，每个MRPC包含5个宽度为250微米的气隙，采用条形读出，读出条平均宽度为10mm。
 - 优点：保证高的时间分辨，满足位置分辨要求，同时也能保证探测器的厚度在限定的范围内。
- 需要解决玻璃拼接、阻抗匹配、信号串扰及传输、探测器宇宙射线及粒子束流测试等关键技术问题；以及高亮度实验中的气体污染问题，以保证探测器的长期稳定工作。

拼接型CMS-MRPC结构



MRPC structure:

Dimension: $100\text{cm} \times (54\text{cm}-45\text{cm}) \times 6\text{cm}$

Number of strip: 44

Strip width: trapezoidal (6mm/8mm)

Gas gap number: 5

Gas gap width: $250\text{ }\mu\text{m}$

Glass thickness: 0.7 mm

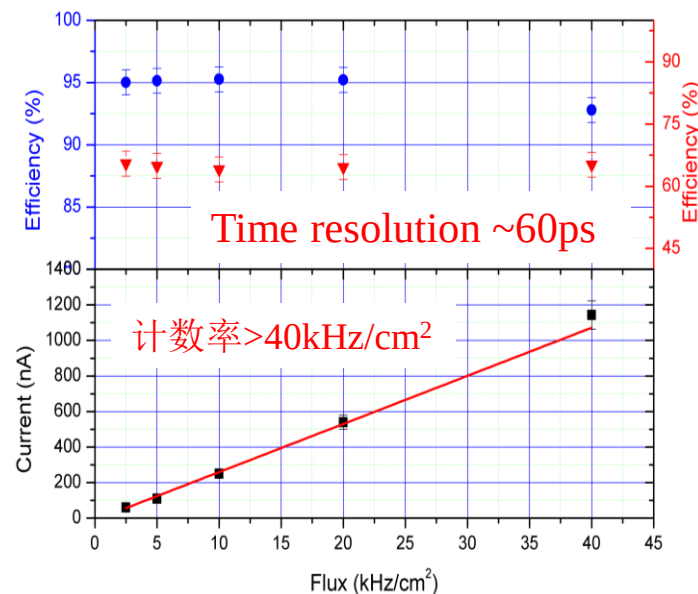
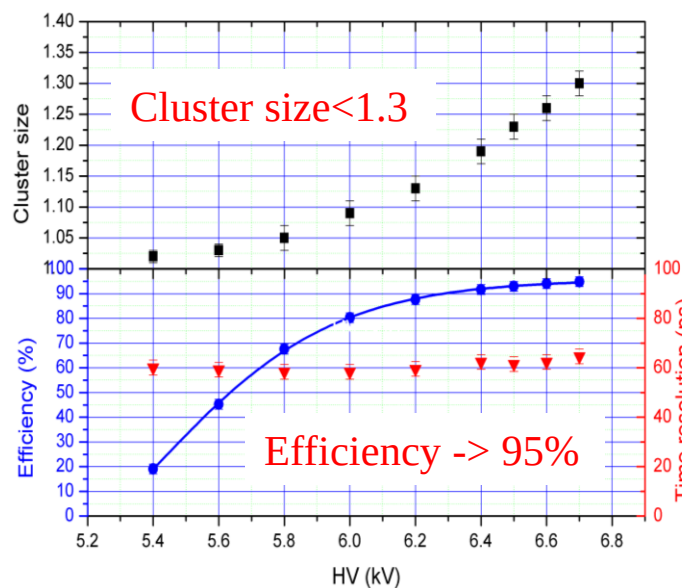
Glass bulk resistivity: $\sim 10^{10}\text{ }\Omega\text{cm}$

Mosaic interface: glass directly
mosaic together

研究内容、主要技术创新：CMS-MRPC项目

大面积拼接型高计数率玻璃MRPC的测试：

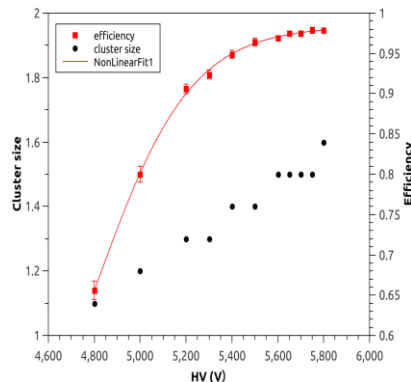
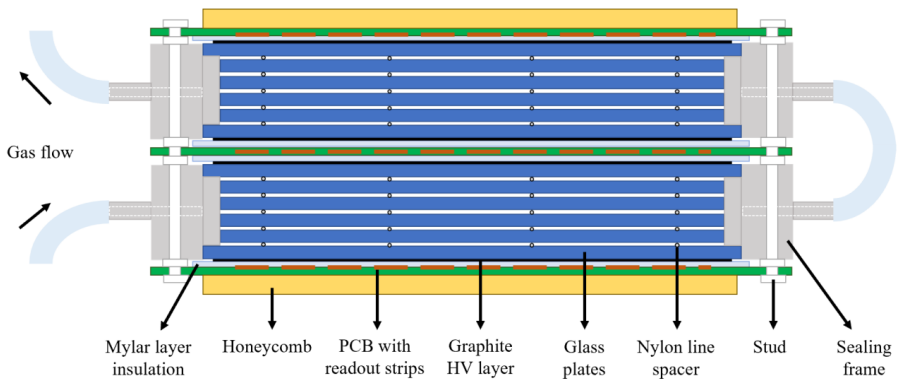
- 2018年2月赴CERN对研制的MRPC进行了宇宙射线测试，得到探测器在标准工作气体下（90% Freon+5% Iso-butane+5% SF6）的电流，效率和cluster size等性能，全部满足要求。
- 2018年3-4月赴德国Rossendorf实验室HZDR高强度电子束流上进行了束流实验，结果表明探测器计数率能力超过10kHz/cm²，时间分辨达60ps，效率达到95%，达到了立项指标要求。
- 2018年9-10月再次赴CERN进行了束流实验。采用CMS RPC标准干气体（95.2% C₂H₂F₄ + 4.5% i-C₄H₁₀ + 0.3% SF₆），测试得到了探测器计数率能力超过10 kHz/cm²，效率高于95%，探测器在CMS气体条件下，工作高压比标准气体下低近800V。



研究内容、主要技术创新：CMS-MRPC项目

玻璃MRPC工作条件和性能的研究：

研制出自密封型MRPC



Parameter	Value
N of gas gap	2×5
Detector volume	约350×350×50mm ³
Width of gas gap	0.25mm
Readout channel	24 channels, 10mm strip width + 3mm gap, 32 cm length
Signal readout	Differential, double-ended
Gas volume	~170 ml
Strip impedance	~42 Ω

气体流量：< 1SCCM

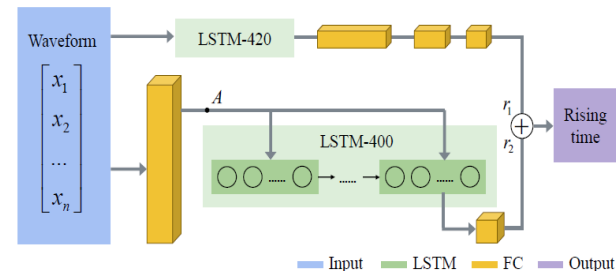
➤ 效率：>95%

➤ 时间分辨：~60ps

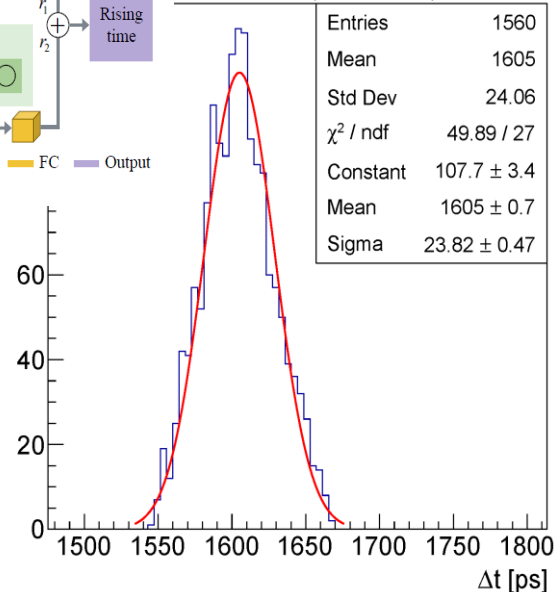
➤ 用于建造兰州外靶实验 CEE的端部飞行时间谱仪

→ 解决了高计数率环境下 MRPC探测器中的气体污染问题。

应用深度学习进行MRPC时间重建



四室8气隙, 0.104mm, 156kV/cm



- ComLSTM (Combined LSTM): FC combined with LSTM,
- Network training: 60k simulated data, Input is 10 points of leading edge,

$$\sigma_{MRPC} = \frac{\sigma(\Delta t)}{\sqrt{2}} = 16.8\text{ps}$$

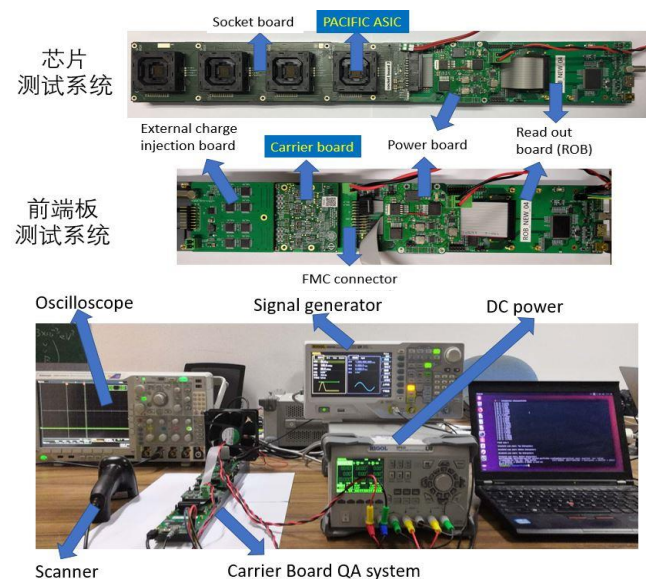
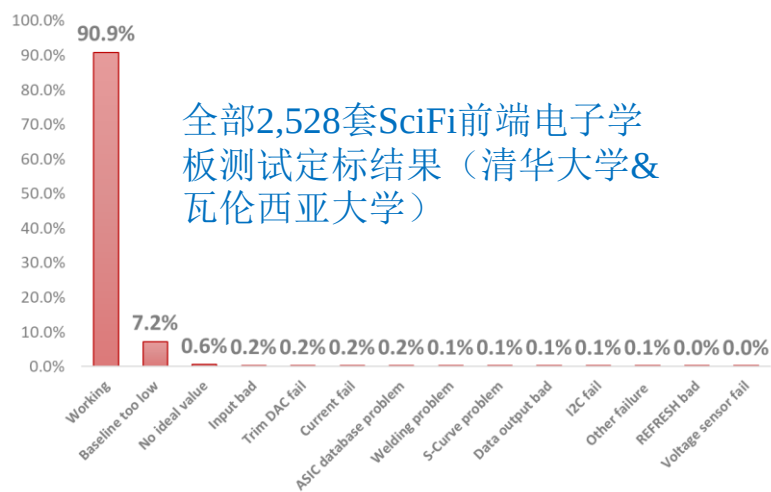
→ 应用深度学习方法重建 MRPC的时间，时间分辨提高了20%

研究内容、主要技术创新：LHCb-SciFi项目

- 研制成功高精度读出电子学，用于LHCb-SciFi探测器的性能评估和在CERN的束流实验；累计为SciFi合作组提供了20余套系统，用于探测器位置分辨、光产额、一致性和温度系数等方面的性能研究；
- 改进了PACIFIC时钟线、 SYNC线、数据线等布线，完成了SciFi探测器前端电子学板（Carrier Board）的优化设计以达到更高的良率和更大的采样窗口。完成了全部2528块电子学板的生产，2019年9月顺利交付CERN用于SciFi探测器组装；
- 研制并完成了SciFi探测器前端电子学的质量保障（Quality Assurance）系统，分别实现PACIFIC ASIC芯片、前端电子学板的电学测试和参数标定。 QA系统已经交付德国海德堡大学、西班牙瓦伦西亚大学和巴塞罗那大学等单位用于芯片和前端电子学板的检测。



SciFi前端电子学板（Carrier Board）



完成情况和主要成果：CMS-GEM项目

- 完成了全部**GE1/1 GEB**批量生产和测试，运达CERN并已经全部安装到CMS探测器上，目前调试运行情况良好。完成了**GE2/1 GEB**最终设计、样机生产和测试，通过了CMS-GEM合作组审核并得到高度评价(“**excellent performances**”)。预计到2021年底完成全部304套批量生产；
 - 完成了**ME0 GEB**的第1版设计并通过了合作组审核，样机在国内及CERN及美国UCLA、FIT的测试表明其性能良好，满足设计指标；
 - 完成了**FR4 GEM探测器外框架**的预研、审核和全部320套批量生产，质量优良；已全部运达CERN并通过检测；
- 通过本项目，北大组独立研发成功低噪声大面积GEM探测器前端电子学板，并为CMS实验提供全部升级GEM电子学板；掌握了探测器组装测试技术，升级了北大实验室成为**CMS-GEM探测器官方批量生产测试中心**之一。



European Organisation for Nuclear Research
Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Letter about Peking University Group's Contribution in CMS-GEM Upgrade Project

Peking University group is actively engaged in CMS-GEM Phase II upgrade project in last five years. They have made the following main contributions:

- PKU group engaged in prototyping the GE1/1 GEB (GEM Electronics Board) and was responsible for the mass production and the Quality Control (QC) of all GE1/1 GEBs (totally 288 + spare boards) in China. The GEBs were all produced and tested in China then shipped to CERN where they have been assembled on GE1/1 GEM detectors. GE1/1 has been installed in CMS in 2020.
- PKU group is responsible for the design, the prototyping, the mass-production and the QC of 8 types of GE2/1 GEBs (called M1-M8). The test of the GE2/1 GEB prototypes showed excellent performances meeting all the CMS requirements. The mass-production of GE2/1 GEBs (totally 288 + spare boards) is expected to start in Sept. 2021.
- PKU group is responsible for the prototyping, the mass-production and the QC of GE2/1 GEM external frames (M1-M8). The mass-production of all GEM FR4 external frames (totally 288 + spare frames) was completed, the frames were shipped to CERN. All meet the CMS requirements and were qualified to be used for the upcoming assembly of the CMS GE2/1 detectors.
- Peking University's GEM laboratory has also established all necessary hardware and software platforms which are obligatory for GEM assembly and test according to CMS-GEM standards. The PKU group has tested and validated all QC processes with a small size GEM prototype and a full size GE1/1 GEM detector. Peking University is now one of the official CMS-GEM production sites. PKU group is expected to produce GE2/1 M5 GEMs (totally 36 + spare chambers) starting from Sept. 2021.

It should be noted that, due to the Covid-19 situation, the CMS-GEM chamber mass production plan is delayed by approximately one year, thus it is not feasible to provide test results of PKU-produced GEM chamber at the moment. We confirm that the GEM chambers assembled and QC qualified following CMS-GEM standard procedure will be acknowledged as satisfying criteria specified in CMS-GEM TDR document.

All the contributions from the PKU group to the CMS-GEM Phase II project have been crucial. The PKU members have always demonstrated the highest level of commitment to the CMS-GEM project, always taking care of challenging duties (complex designs, mass production, quality control, working group convenorship, etc.). The Peking University has always been a very strong partner of the CMS-GEM project and is very much appreciated by the whole CMS Collaboration. In conclusion, the CMS-GEM project management strongly recommend the continuation of the support from Ministry of Science and Technology of China to Peking University for the CMS-GEM upgrade project.

Project Manager of CMS-GEM upgrade project
Archana Sharma, Prof. (signed)

Tel. +41 754 114875
Email: Archana.Sharma@cern.ch
Date: 18 Aug. 2021

完成情况和主要成果：CMS-MRPC项目

CMS-MRPC项目完成了预定科研任务，达到了任务书考核指标

- 研究出稳定有效的低电阻玻璃拼接技术，研制成功全尺寸高计数率梯形CMS-MRPC样机，束流实验测试结果表明其计数率能力超过10kHz/cm²，时间分辨达50ps，效率达到95%，性能满足CMS端部缪子探测器升级的要求。
(发表于Pengfei Lyu,Dong Han, Yi Wang, et al. Performance study of a real-size mosaic high-rate MRPC. 2018 JInst. 13 P06016)
- 针对不同物理实验的需求，对高计数率MRPC的工作气体配比、环保气体等对探测器性能和工作条件的影响进行了研究，为探测器的环保运行奠定了基础。
(发表于QiunanZhang, Dong Han, Yi Wang . Performance of high rate MRPC with different gas mixtures. 2019_JINST_14_P01003)
- 首次提出并研制出自密封型高计数率MRPC探测器，既解决了高计数率条件下探测器工作气体污染问题，也达到了系统运行的节能环保。
(发表于Botan Wang, Yi Wang, et al. The High-Rate Sealed MRPC to Promote Pollutant Exchange in Gas Gaps: Status on the Development and Observations. Appl. Sci. 2021, 11, 4722. <https://doi.org/10.3390/app11114722>)
- 首次将深度学习方法应用于MRPC的时间重建，与传统的过阈甄别方法相比，时间测量精度提高了20%。
(发表于Wang Fuyue, Han Dong, Wang Yi. Improving the time resolution of the MRPC detector using deep-learning algorithms. 2020 JINST 15 C09033)

完成情况和主要成果：LHCb-SciFi项目

LHCb-SciFi项目全面完成了预定任务，达到了任务书指标

- 设计了SciFi径迹探测器关键部件（前端电子学读出板和PACIFIC ASIC芯片）的检测系统，用于测试PACIFIC芯片和前端板的各项功能；
- 与合作组一起完成了芯片和前端板的检测筛选工作，其中PACIFIC芯片检测速度超过100片/天，前端板检测速度超过30块/天。在此过程中，还联合设计并生产了2500多块前端板，参与了径迹探测器的寻迹和准直工作，效率达到95%，动量相对分辨率好于1%。

LHCb合作组在2019年10月正式发表的LHCb升级进展报告及在LHCb SciFi Institutional Board会议上，对清华大学升级工作完成情况的评价

Electronics		
Production:		
PACIFIC Chip	100% produced and tested	Congratulations to • Tsinghua, Valencia, HD • Clermont-Ferrand
PACIFIC Board	100% produced and tested	
Cluster Board	100% produced and tested	
Master Board	Preseries 50 MBs: ok Main production (570 boards): Batch 1: 96 MBs in July Batch 2: 104 MBs in Aug Batch 3: 100 MBs in Sep Next batches: 08 Nov, 06 Jan	
Mechanical Parts	100% produced	
Front-end boxes	Preseries (23) ready → frame1 Batch 1: 30 boards at CERN Batch 2: expected this week Next batches: 30 FEBs/3 weeks	FEB finishing determined by MB schedule: Significant delays, however in shadow of delays of C-frames
Very detailed test of FEBs at CERN, progressing very well (Massa + students).		

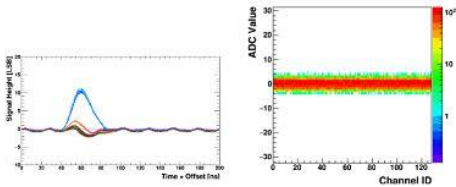


Figure 12: Electronics response measured on 4-SALT hybrid wire-bonded to type A sensor in the UT slice test: (left) the response to a minimum ionizing particle measured scanning the ADC sampling time, (right) the noise versus channel number, the red band shows the intrinsic noise and the green band shows the total noise.

and afterwards mounted on flex cables by two different companies. About 5050 assembled detectors have been tested successfully and are usable for the SciFi readout. The detectors have been grouped according to their breakdown voltage and their thickness and have been shipped to Nikhef for the mounting in the cold-boxes.

4.3.3 ASIC and read-out box

The readout ASIC (PACIFIC) has been produced, packaged and tested. The chips were sent to Tsinghua in Beijing for the production of the PACIFIC Carrier Boards. All 2528 Carrier Boards have meanwhile been produced and tested. The quality is high, more than 96% of the boards are usable. The subsequent digital readout chain consists of a Cluster Board to group the hits, and the Master Board, comprising the slow and fast control interfaces as well as the optical links. The production of the Cluster Boards is finished, 2500 boards have been produced and tested. The Master Board production is in full swing. Beside a pre-series of 50 boards, the first two production batches (200 boards) have been received and are being tested now. The remaining 370 board will be produced in several batches until January 2020.

The front-end boards will be mounted on cooling frames and form the so called readout-box (ROB). The first 24 ROB assemblies have been produced in-house (at Clermont-Ferrand), tested and installed on the first detector frame (see below). The remaining ROB assembly will be performed by an industrial producer, and a first batch of 30 ROB has already arrived and is currently being tested.

The ROB is mounted on water-cooled aluminium blocks to ensure the cooling of the electronics. The aluminium-blocks and also the water-pipes are integrated into the C-frame structure. All water-cooling components, blocks and pipes, for the full detector have already been produced.

论文、专利、会议报告：

发表论文：

1. Lyu Pengfei, Wang Yi. Development and performance of self-sealed MRPC. JINST 2017,12, C03055.
2. S. He, Q. Huang, H. Qiao, D. Wang, Y. Ban, Simulation Study of the Performance of New Micro Pattern Gaseous Detectors, Radiation Detection Technology and Methods (2018) 2: 21
3. Pengfei Lyu, Dong Han, Yi Wang, et al. Performance study of a real-size mosaic high-rate MRPC. 2018 JInst. 13 P06016
4. Fuyue Wang, Ultimate position resolution of pixel clusters with binary readout for particle tracking, NIMA 899(2018) 10-15
5. M. Tytgat et al. (CMS Collaboration), Quality control for the first large areas of triple-GEM chambers for the CMS endcaps,. EPJ Web Conf. 174 (2018) 03003
6. Qiunan Zhang, Dong Han, Yi Wang . Performance of high rate MRPC with different gas mixtures. 2019_JINST_14_P01003
7. 王义，张秋楠等. 多气隙电阻板室飞行时间谱仪技术. 物理学报 Acta Phys. Sin. Vol. 68, No. 10 (2019) 1029
8. X.L. Chen Yi Wang et al . The performance study of MRPCs used for muon tomography. 2019 JINST 14 C06012
9. Y. Wang et al. Status of technology of MRPC time of flight system. 2019 JINST 14 C06015
10. Pengfei Lyu, Dong Han, Yi Wang. Study on cosmic test and QC method of high-rate MRPC for CBM-TOF. 2019_JINST_14_C09032
11. Yancheng Yu, Dong Han, Yi Wang. R&D of a real-size mosaic MRPC within the framework of the CMS muon upgrade. 2019_JINST_14_C10042
12. D. Abbaneo et.al., (CMS Muon group), Layout and Assembly Technique of the GEM Chambers for the Upgrade of the CMS First Muon Endcap Station, CMS Muon Collaboration, Nucl.Instrum.Meth. A918 (2019) 67-75
13. 王珂，薛志华，王大勇，班勇，应用于气体电子倍增器的电子学板的研制，《原子能科学技术》第54卷第6期，2020年6月
14. Fuyue Wang, Dong Han, Yi Wang, et al. The study of a new time reconstruction method for MRPC read out by waveform digitizer, NIMA 954 (2020) 161224
15. Botan Wang, Han dong, Yi Wang, [The CEE-eTOF wall constructed with new sealed MRPC](#). 2020 J. Inst. 15 C08022
16. Wang Fuyue, Han Dong, Wang Yi. Improving the time resolution of the MRPC detector using deep-learning algorithms. 2020 JINST 15 C09033
17. Yancheng Yu, Dong Han, Yi Wang. Study of high time resolution MRPC with the waveform digitizer system. 2020 JINST 15 C01049
18. Yancheng Yu, Xiaolong Chen, Yi Wang. A neural network based algorithm for MRPC position Reconstruction. 2020 JINST 15 C10022
19. Xiaolong Chen, Yi Wang. Development of Sealed MRPC with extremely low gas flow for muon tomography. 2020 JINST 15 C03012
20. Botan Wang, Dong Han, Yi Wang. Study on the coupled readout MRPC and eco working gas by a cosmic test system. 2020 JINST 15 C04013
21. M.Abbas et.al., (CMS Muon group), Performance of prototype GE1 / 1 chambers for the CMS muon spectrometer upgrade, Nucl.Instrum.Meth. A972(2020)164104
22. M.Abbas et.al., (CMS Muon group), Triple-GEM discharge probability studies at CHARM: simulations and experimental results, JINST 15(2020)10, P10013

论文、专利、会议报告：

会议报告：

1. 何少坤，微结构气体探测器（GEM、FTM）性能模拟研究，第七届全国先进气体探测器研讨会，2017年11月10-13日，广西南宁。
2. Andrew Levin, Calibration and Quality Control of the CMS Triple-GEM Detectors, 4th China LHC Physics Workshop, Dec. 18-22, 2018, Wuhan,Hubei.
3. Ming Zeng, Design of the LHCb Sci-Fi tracker read-out electronics and the QA system, 4th China LHC Physics Workshop, Dec. 18-22, 2018, Wuhan,Hubei.
4. Li Xu, The test of the SciFi Tracker electronics for LHCb upgrade, 4th China LHC Physics Workshop, Dec. 18-22, 2018, Wuhan,Hubei.
5. 梁子寒，CMS-GEM探测器的批量生产和质量控制，第八届全国先进气体探测器研讨会，2018年10月12-14日，湖南衡阳。
6. Ke Wang, Design and prototyping of CMS-GEM electronics boards for 2nd endcap station, 5th China LHC Physics Workshop, October 24-27, 2019, Dalian, Liaoning.
7. Ming Zeng, Scintillator fibre trackers of the LHCb Upgrade I, 5th China LHC Physics Workshop, October 24-27, 2019, Dalian, Liaoning.
8. 王珂，The design and prototyping of CMS GE21 GEM Electronic Board, 第九届全国先进气体探测器研讨会，2019年10月17-19日，广东东莞。
9. A. Levin, Test of first endcap CMS-GEM super-chambers at CERN, 6th China LHC Physics Workshop, November 6-9, 2020, Tsinghua University (Online meeting)
10. Zhe Li, Development of the front-end electronic board for CMS-GEM detector, 6th China LHC Physics Workshop, November 6-9, 2020, Tsinghua University (Online meeting)
11. Yue Wang, Simulation Study of quadruple-foils GEM detector, 6th China LHC Physics Workshop, November 6-9, 2020, Tsinghua University (Online meeting)

获得专利：

1. 一种用于气体组性板探测器的流气盒，
申请日：2017.11.20，授权日：2018.7.3，专利号：ZL201721553050.8
2. 一种高计数率多气隙阻性板探测器，
申请日：2017.11.20，授权日：2018.7.3，专利号：ZL201721598761.7
3. 多气隙电阻板室探测器。
申请日：2015.7.8，授权日：2018.8.28，发明专利号：ZL201510399044.0



人才培养:

本课题实行期间，北京大学、清华大学先后共有~20-30名研究生全部时间或部分时间参与了科研工作，很多同学公派长期或短期赴CERN、美国、德国、比利时等先进高能物理实验室进行合作科研，在国际合作前沿实验中得到了培养和锻炼。

课题运行期间共培养博士4人、硕士3人；目前有在站博士后2人。

姓名	导师	论文题目	毕业时间	出国经历
何少坤 (硕士)	班勇 (北京大学)	新型微结构气体探测器性能模拟研究及GE1/1探测器生产QC工艺	2018.6	赴CERN三个月
陈耿 (博士)	班勇 (北京大学)	CMS 实验上 $B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-$ 稀有衰变角分析与GE1/1 探测器升级	2018.6	赴CERN两年
吕鹏飞 (博士)	李元景 (清华大学)	CBM实验高计数率MRPC探测器的研制与应用研究	2019.6	赴CERN三个月
王珂 (硕士)	王大勇 (北京大学)	CMS 实验GEM 电子学板的设计与测试	2020.6	赴CERN三个月
王扶月 (博士)	王义 (清华大学)	SoLID高时间分辨率MRPC探测器关键技术研究	2020.6	赴LBL一年
俞彦成 (博士)	王义 (清华大学)	高计数率20ps时间分辨MRPC探测器原型机的研究	2021.6	赴CERN三个月
王玥 (硕士)	班勇 (北京大学)	微结构气体探测器 Quadruple-GEM 性能的模拟研究	2021.6	(疫情)

经费使用情况：

目前本课题经费审计仍在进行中，下表是初步统计结果；最终以审计结果为准：

序号	课题编号	课题承担单位	预算批复数				账面支出数				账面结余数				是否为预算内单位
			中央财政专项资金		其他来源资金	合计	中央财政专项资金		其他来源资金	合计	中央财政专项资金		其他来源资金	合计	
			直接费用	间接费用			直接费用	间接费用			直接费用	间接费用			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)
		北京大学	494.7	75.3	0	570	487.2	75.3	0	562.5	7.5	0	0	7.5	
		清华大学	423.8	66.2	0	490	396.4	66.2	0	462.6	27.4	0	0	27.4	
累计			918.5	141.5	0	1060	883.6	141.5	0	1025.1	34.9	0	0	34.9	/

使用率：96.7%

总结:

- 北京大学组在**CMS-GEM项目**中独立研发成功低噪声大面积GEM探测器前端电子学板，并为CMS实验提供全部(288 GE1/1 + 288 GE2/1 + spare)前端电子学板，以及全部（320块）GE2/1 FR4 GEM探测器内框架。北京大学组掌握了GEM探测器组装测试技术，设立了符合CMS标准的各步骤质量控制流程软硬件平台，升级了北大实验室成为大面积CMS-GEM探测器生产测试中心之一。GEM探测器批量生产和测试将于2021年9月展开。

由于疫情原因造成CMS总体计划推迟一年，目前无法在CERN用束流测试方法获取了结题考核指标数据。课题组提出了GEM探测器QC指标及GEM前端电子学板指标测试作为替代检测方案。专家组针对此方案在北京大学高能实验室进行了现场测试。替代测试方案理由及现场测试结果见附件。

- 清华大学组在**CMS-MRPC项目**中利用低电阻玻璃拼接技术，研制成功全尺寸高计数率梯形CMS-MRPC样机，束流测试结果表明其计数率能力超过10kHz/cm²，时间分辨达50ps，效率达到95%，性能满足CMS端部缪子探测器升级的要求，达到了结题考核指标。

清华大学组首次研制出自密封型高计数率MRPC以解决工作气体污染问题；针对不同物理需求优化工作气体配比；采用环保气体研究其对探测器性能和工作条件的影响；并首次将深度学习方法应用于MRPC的时间重建，提高了时间测量精度。

- 清华大学组在**LHCb-SciFi项目**中研发了前端电子学读出板和PACIFIC ASIC芯片的检测系统；与合作组一起完成了芯片和前端板的检测筛选工作；完成了2500多块前端电子学板的联合设计和批量生产，目前全部电子学板已经运到CERN并安装到探测器中，达到了预定的科研目标和考核指标。

感谢科技部大力支持！感谢专家莅临指导！

Back up

关于CMS-GEM项目结题指标和替代检测方案的说明:

- 任务书中**CMS-GEM项目**结题指标如下:

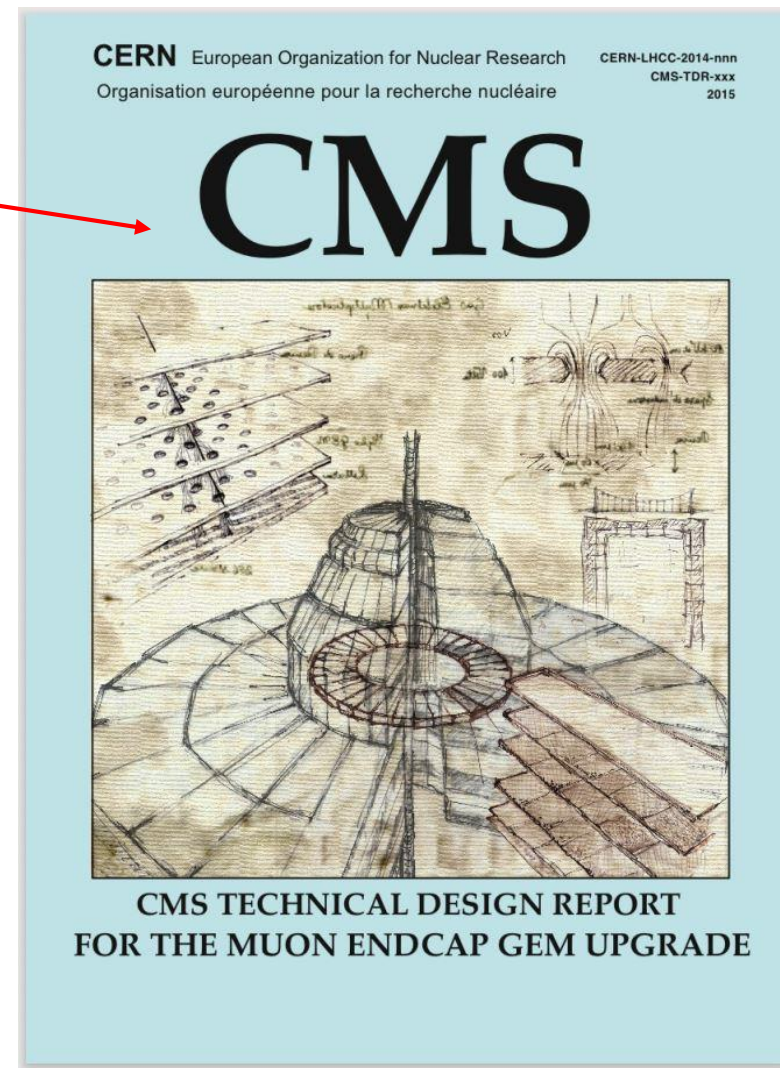
指标1.1	单室效率	>97%
指标1.2	时间分辨	<10ns
指标1.3	计数率	>10kHz/cm ²
指标1.4	φ方向角分辨	<300μrad
指标1.5	寿命	累积辐射达到200mC/cm ² 时没有增益损失

该指标来自CMS国际合作组2015年发布的“**CMS-GEM Technical Design Report**”，由合作组经过多年GEM样机研制、宇宙线测试、束流测试、辐照测试等所确定。北京大学组自2013年CMS-GEM合作组成立迄今是其正式成员，参加了GEM探测器研制和测试工作。

- 该测试数据需要对按CMS标准组装的GEM进行束流测试来获得；对探测器能否完成指标，CMS-GEM合作组管理层在关于北大组工作的文件中给出如下说明:

It should be noted that, due to the Covid-19 situation, the CMS-GEM chamber mass production plan is delayed by approximately one year, thus it is not feasible to provide test results of PKU-produced GEM chamber at the moment. We confirm that the GEM chambers assembled and QC qualified following CMS-GEM standard procedure will be acknowledged as satisfying criteria specified in CMS-GEM TDR document.

“...必须指出，由于Covid-19疫情，CMS-GEM探测器批量生产被推迟了约一年，因此目前无法提供北京大学组组装的探测器的测试指标。我们确认，按照CMS-GEM标准流程组装并通过质控指标检测的探测器被认为符合CMS-GEM TDR中确定的指标。...”



CMS-GEM Technical Design Report, 2015年发布