

科技部国家重点研发计划

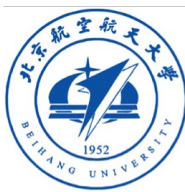
大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级

课题二：CMS 缪子谱仪 GEM 和时间探测器 MTD 升级

时间探测器MTD

北京大学：班勇，孙小虎

双月会，北京，2024年07月13日



提纲

- 项目背景
- 物理意义
- MTD桶部设计
- 研究进展
- 总结

项目背景：CMS实验

LHC大型强子对撞机
国际粒子对撞能量前沿
全长27公里
质心对撞能量14TeV

CMS实验物理目标：

希格斯粒子性质研究，精确检验标准模型，寻找新物理等

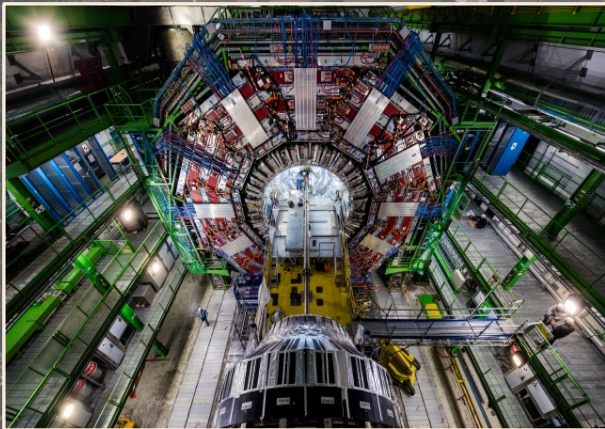
CMS国际合作组：

~40个国家，~200个大学和研究机构，
~4000名科学家和工程技术人员

探测器建造费用： 550M 瑞郎

二期升级总经费： 283 M 瑞郎

→ 中国组预期贡献：~1%



ALICE

3

项目背景：MTD探测器

- 为提高测量精度和拓展新物理前沿，LHC对撞机的**瞬时亮度将提升约4倍**
- 导致pileup效应显著，每次对撞产生达200个对撞顶点（10 cm空间内），严重影响粒子重建和鉴别
- **CMS的高性能时间探测器MTD**（MIP timing detector）是为HL-LHC专门设计的新探测器，拟提供优于60 ps量级的时间测量，在高pileup中区分对撞顶点，并提供精确TOF信息

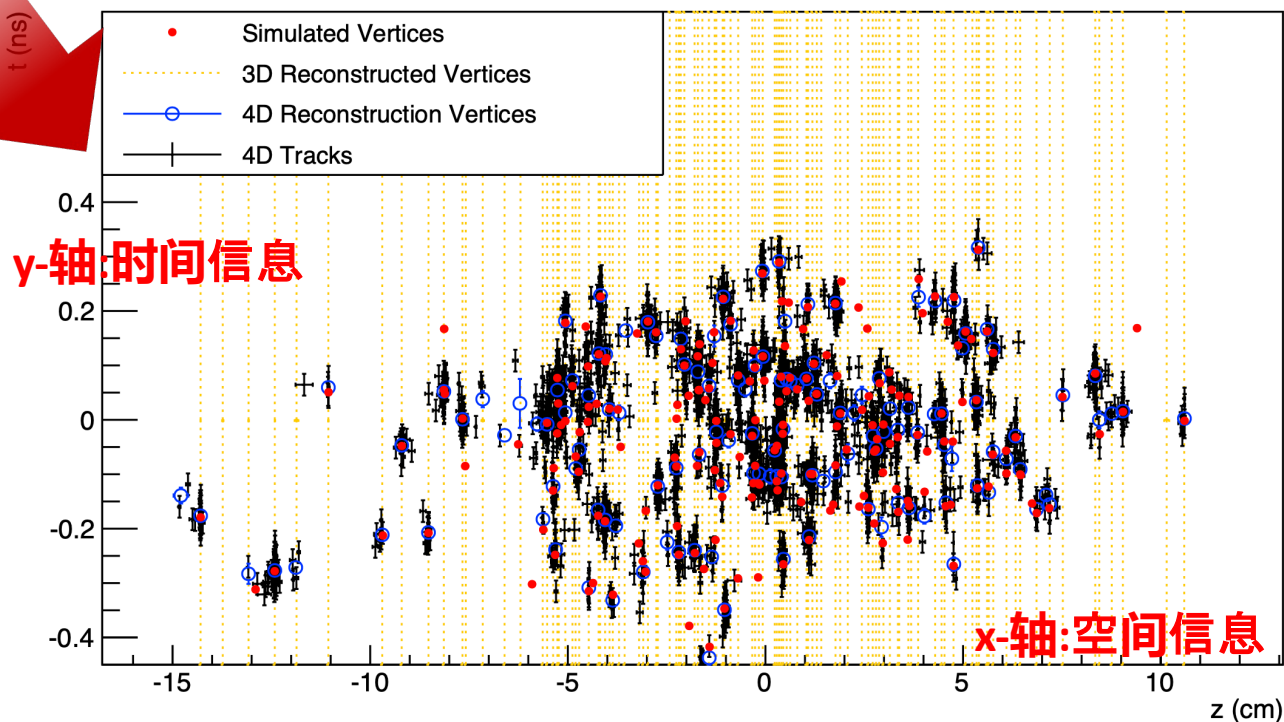
MTD引入时间轴

HL-LHC升级后每次对撞产生近200个顶点

~10 cm

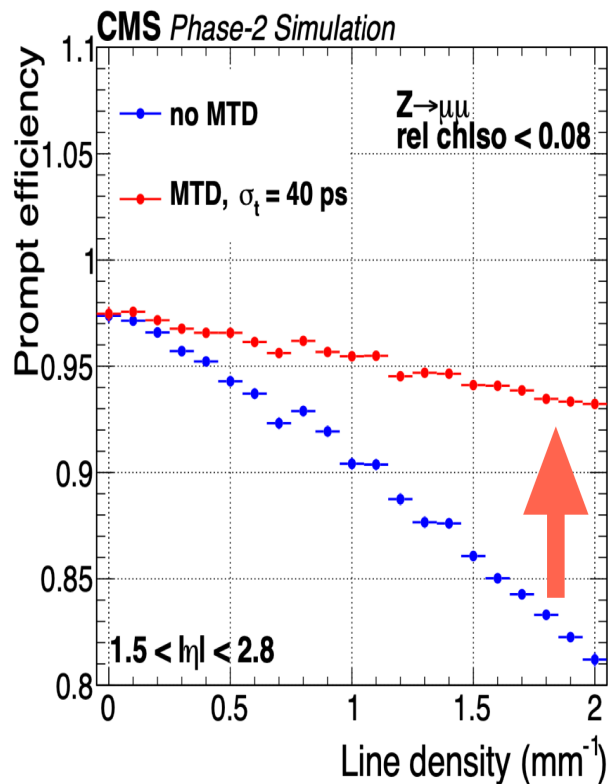
- 传统方案：进一步提高径迹室空间分辨率

- 新方案：测量顶点的发生时间

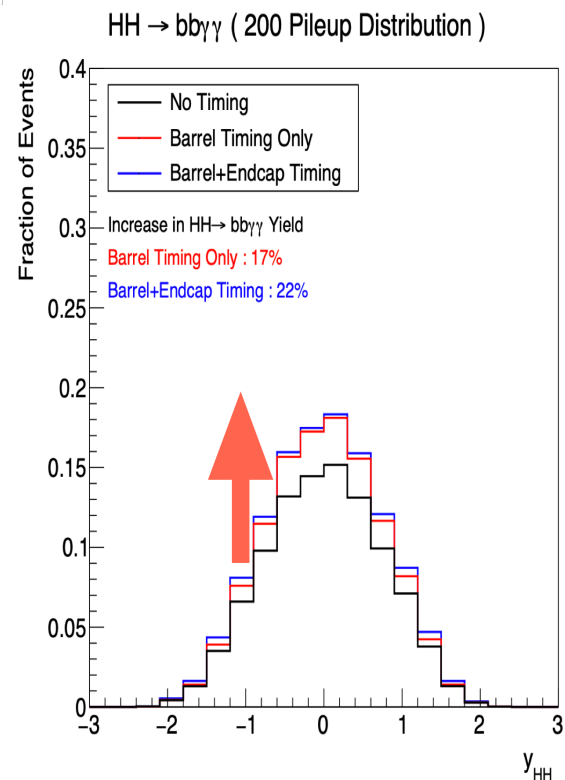


物理意义

- MTD可有效压低pileup，整体提高物理测量的精度
- 提高单希格斯粒子测量精度20-30%
- 提高双希格斯粒子信号接受度20%



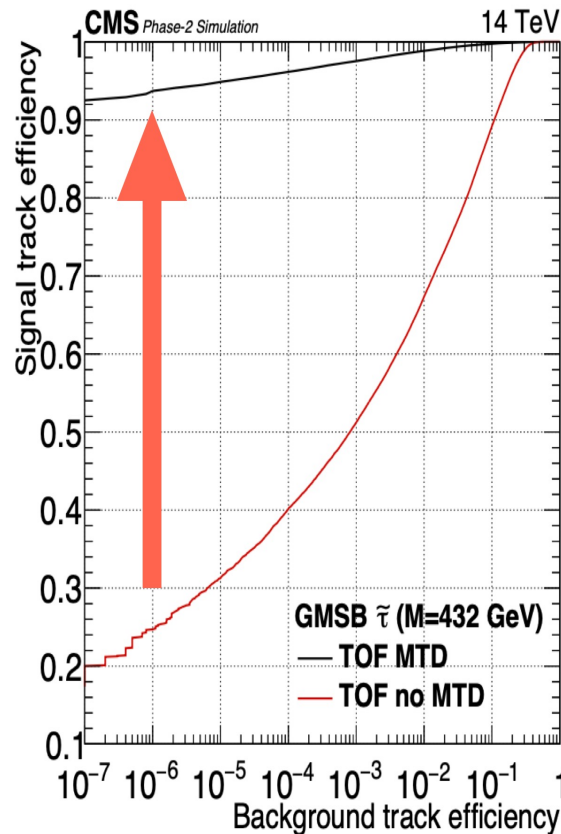
轻子孤立度



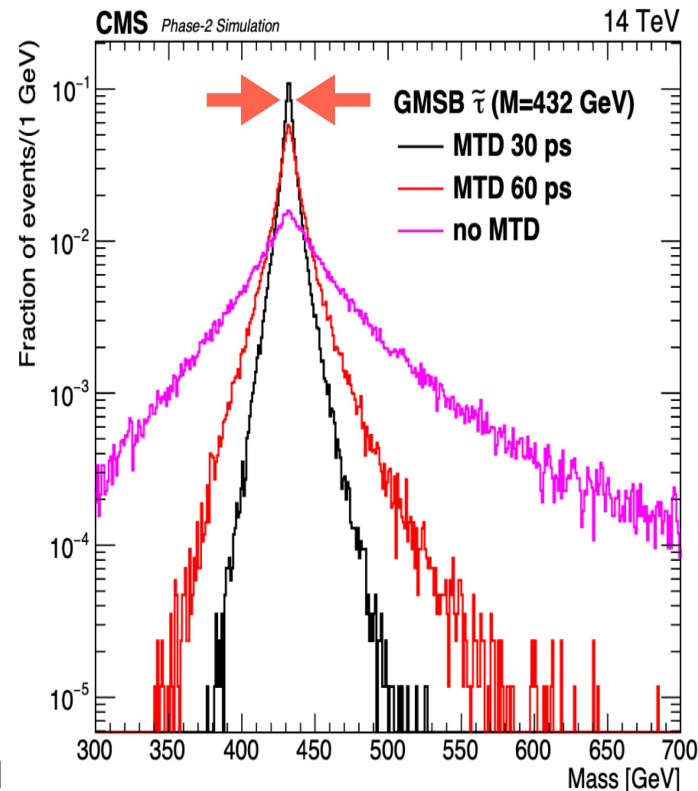
信号接受度

物理意义

- MTD提供TOF信息，拓展新物理探索的前沿
- 降低超对称粒子寻找中40%的可约本底
- 大幅提高长寿命粒子的灵敏度



信号本底区分度



质量分辨率

研究内容：指标

序号	指标	指南要求	本项目	考核方式	说明
1	指标1.1：高速数据传输速率	好于 16Gb/s	单通道 $\geq$ 16Gbps	实验测试	满足指南要求
2	指标1.2：高粒度量能器硅模块	无	160	CMS合作组检验合格	额外指标
3	指标1.3：高粒度量能器硅模块精度控制	无	X-Y方向精度好于100微米	实验测试	额外指标
4	指标2.1 GEM探测器有效增益	无	>10000（量产大面积GEM探测器）	X射线测试	额外指标
5	指标2.2 GEM探测器模块	无	40	CMS合作组检验合格	额外指标
6	指标2.3 MTD时间分辨	好于 60ps	优于60皮秒（大面积传感器模块成品）	通过放射源或束流测试其时间分辨	满足指南要求
7	指标2.4桶部传感器模块	无	500	通过质控系统测试其信号品质（信号幅度一致性等）	额外指标
8	指标3.1：芯片面积和功耗	芯片面积90mm $\times$ 140mm，像素大小约 15 μ m $\times$ 15 μ m，功耗低至 20mW/cm ²	芯片面积 达 90 mm $\times$ 140 mm，像素大小约15 μ m $\times$ 15 μ m，功耗低至20 mW/cm ²	合作组安排测试，提供测试结果	满足指南要求
9	指标3.2：FoCal双光子位置分辨	优于5 mm	优于5 mm	合作组安排测试，提供测试结果	满足指南要求

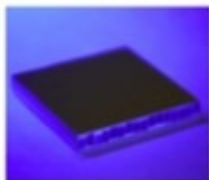
研究内容、路线与创新点

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

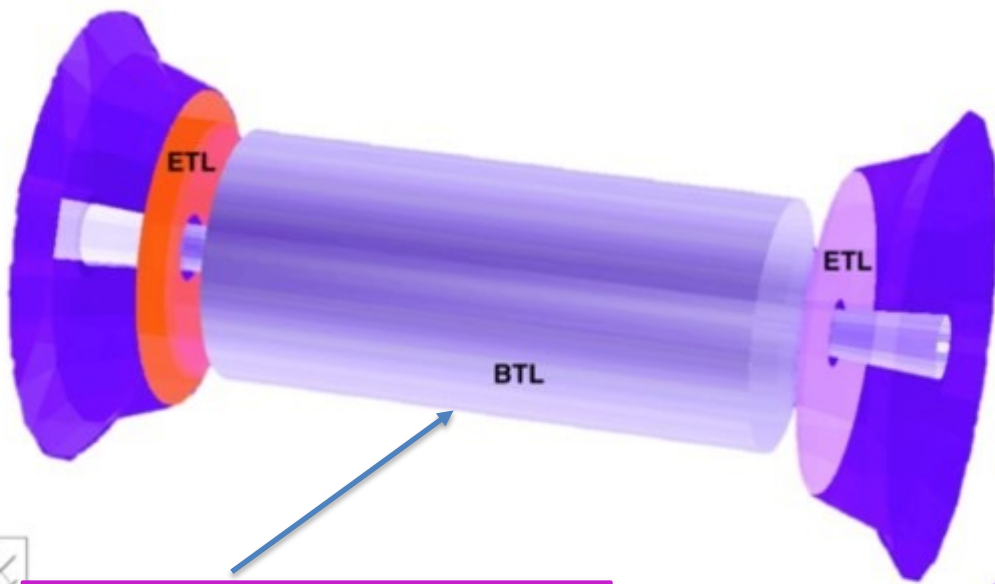
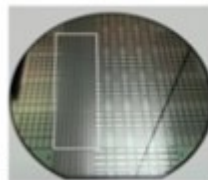
BTL: LYSO bars + SiPM readout:

- TK / ECAL interface: $|n| < 1.45$
- Inner radius: 1148 mm (40 mm thick)
- Length: ± 2.6 m along z
- Surface ~ 38 m²; 332k channels
- Fluence at 4 ab⁻¹: 2×10^{14} n_{eq}/cm²



ETL: Si with internal gain (LGAD):

- On the CE nose: $1.6 < |n| < 3.0$
- Radius: $315 < R < 1200$ mm
- Position in z: ± 3.0 m (45 mm thick)
- Surface ~ 14 m²; ~ 8.5 M channels
- Fluence at 4 ab⁻¹: up to 2×10^{15} n_{eq}/cm²



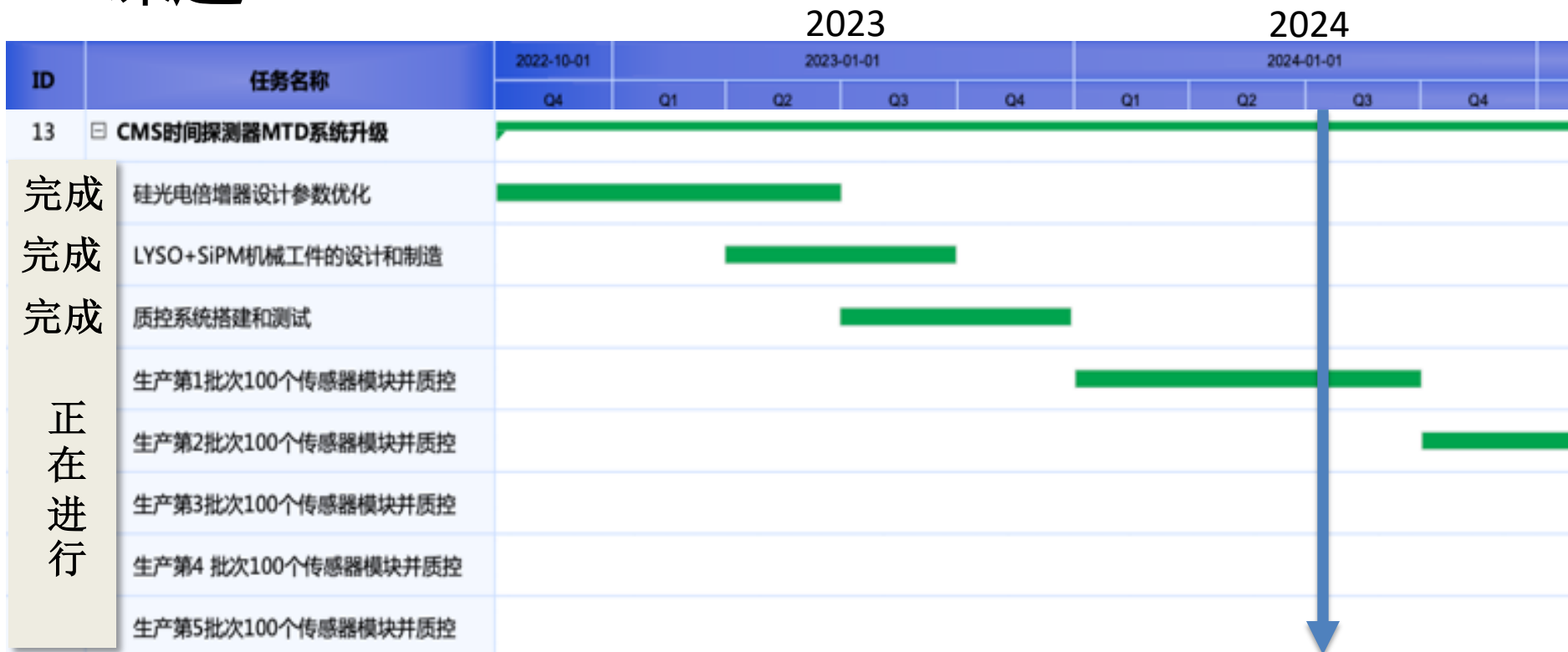
桶部MTD设计: LYSO晶体+SiPM读出

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

计划与进展

• 课题二:



2024年7月

1. 质控系统搭建完毕
2. 批量组装工艺研制完毕
3. 组装中心认证正在收尾

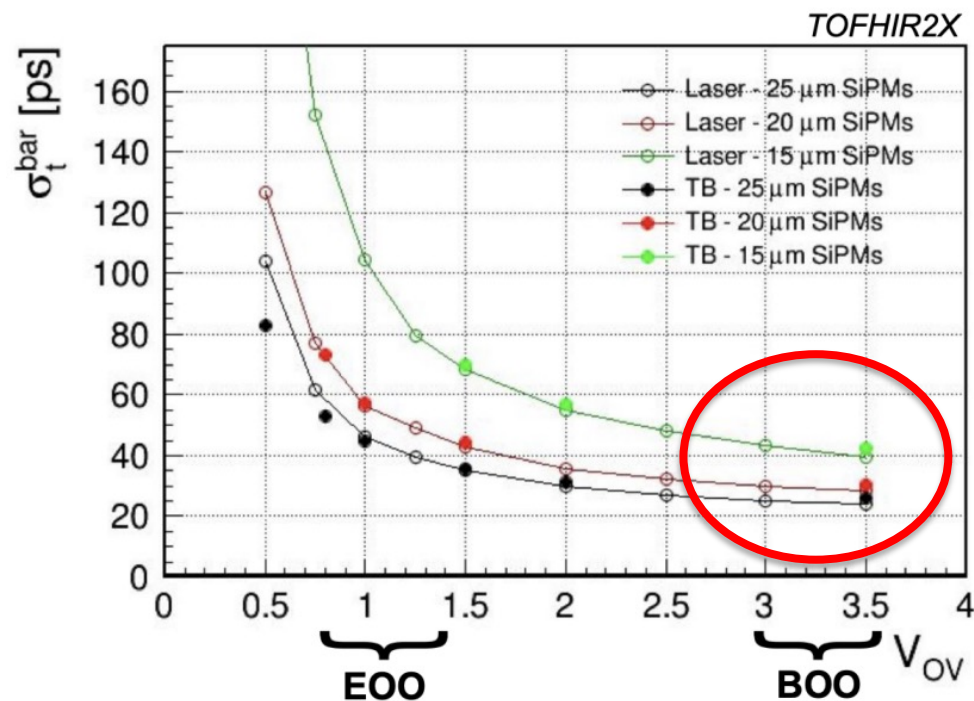
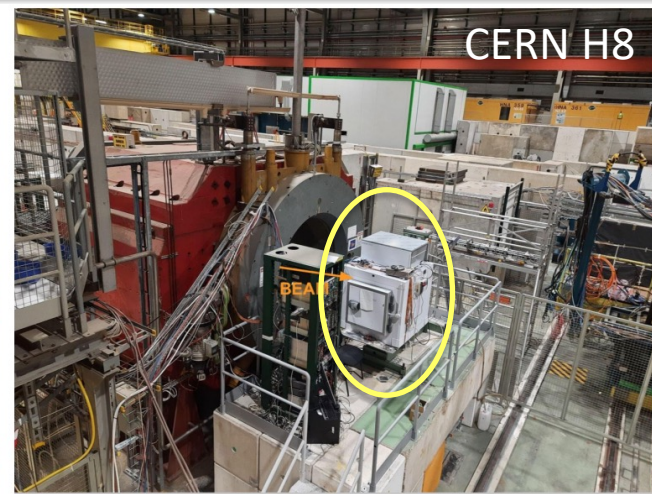
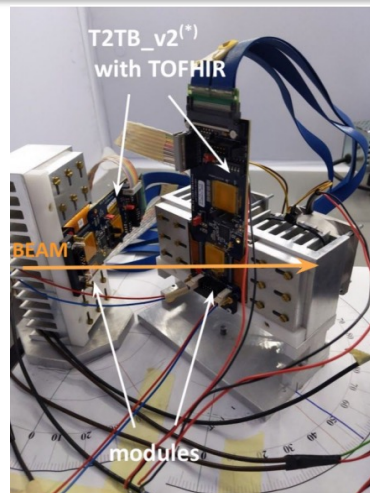
年度主要进展

1. Sensor设计优化
2. Sensor模块的制造工艺设计
3. Sensor模块质控QAQC系统研制
4. Detector模块制造工艺及质控
5. 探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

1. Sensor设计优化: SiPM

章立诚
(PKU)

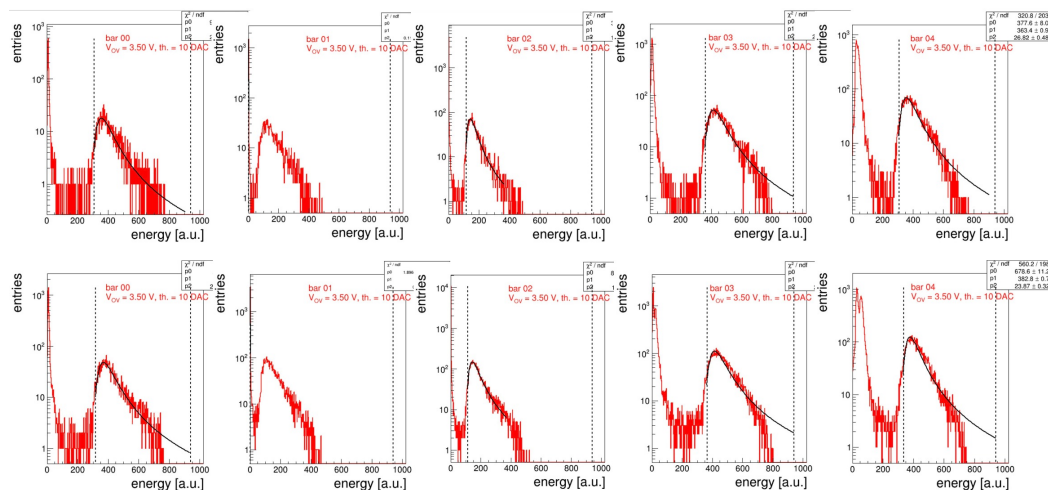
- 主要针对SiPM的cell大小等参数进行调整和优化
- 经过大量参数比对, 选取其中时间性能最优的一组, 最终我们在束流上比较测试了15 μm cell-size的SiPM与新参数20 μm 和25 μm
 - 25 μm SiPM有最佳的时间分辨率
- 束流测试是在CERN (180 GeV pion) 和 FNAL (120 GeV proton) 束流上完成的
- 已完成SiPM参数的优化



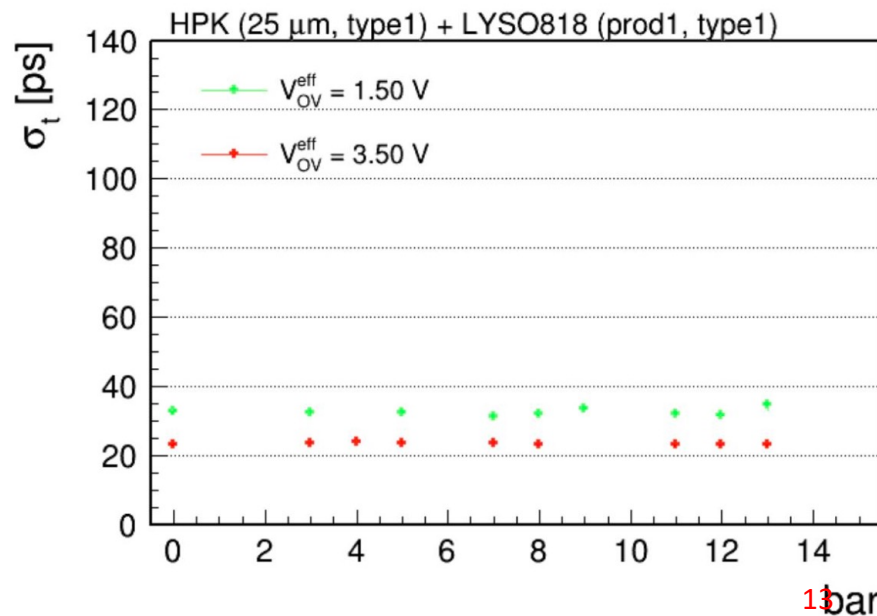
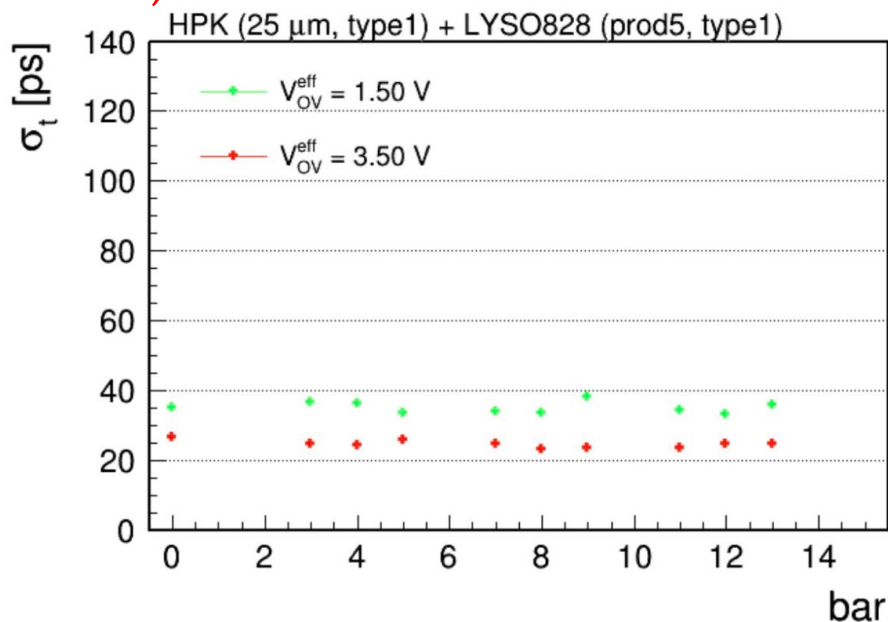
1. Sensor设计优化: LYSO

张铭滔
(PKU)

- 测试各个厂商的LYSO晶体质量（尺寸、光产额等），最终对性能优异的厂商使用束流做时间分辨率测试
- 如下比较了厂商Prod1和Prod5的时间分辨率
- 已完成LYSO优化，开始量产
prod5 52deg



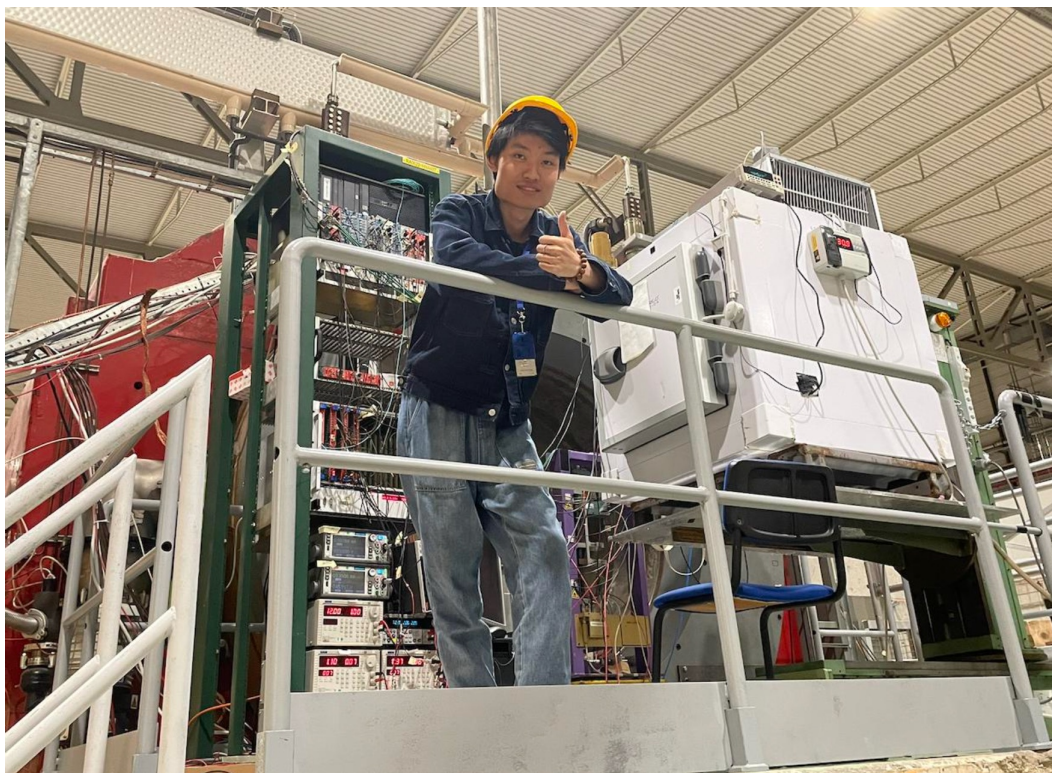
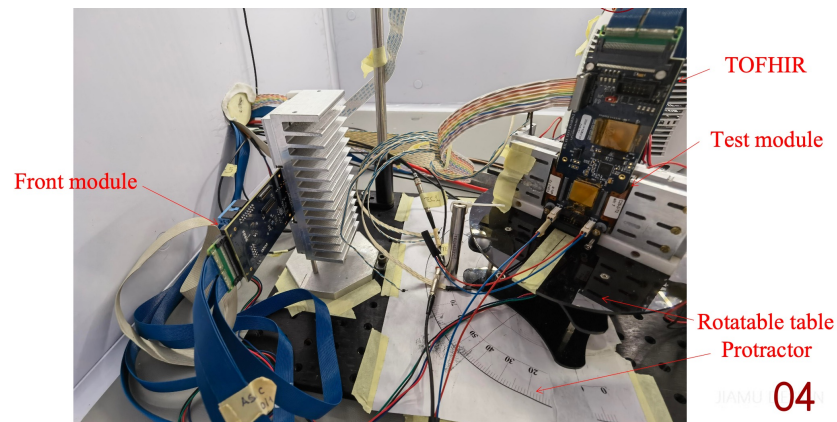
prod1 52deg



束流测试@CERN 2023

章立诚
张铭滔
(PKU)

- 参与束流测试、数据采集和测试数据离线分析
- 为MTD桶部sensor设计方案提供依据



MTD桶部sensor设计方案定稿

- MTD pre-EDR and SiPMs PRR会议于**2023年6月8**日举行，CMS合作组对MTD桶部sensor设计进行审核
- 这次会议是**MTD项目**的里程碑之一，通过了**桶部sensor**的工程设计方案，定下SiPM的参数，同意从厂商批量订购
- 中国MTD BTL团队（北大、清华、北航）是sensor研究的主要贡献者之一

SiPM technical choices and specifications,
and overall performance results

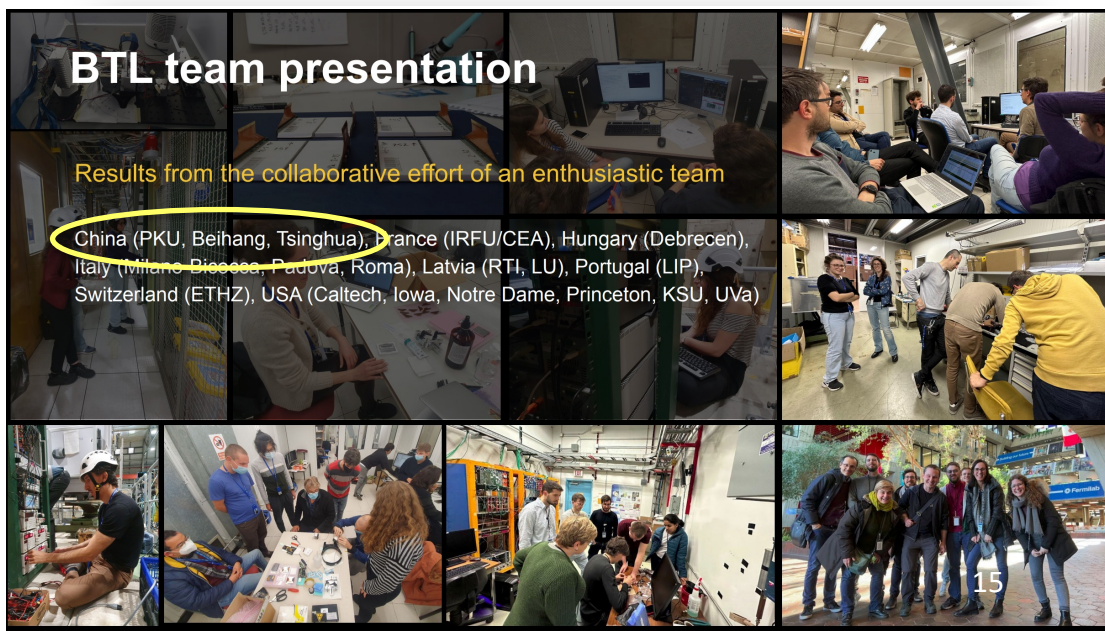
<https://indico.cern.ch/event/1286930/>

SiPM Procurement Readiness Review

8 June 2023

Marco Lucchini

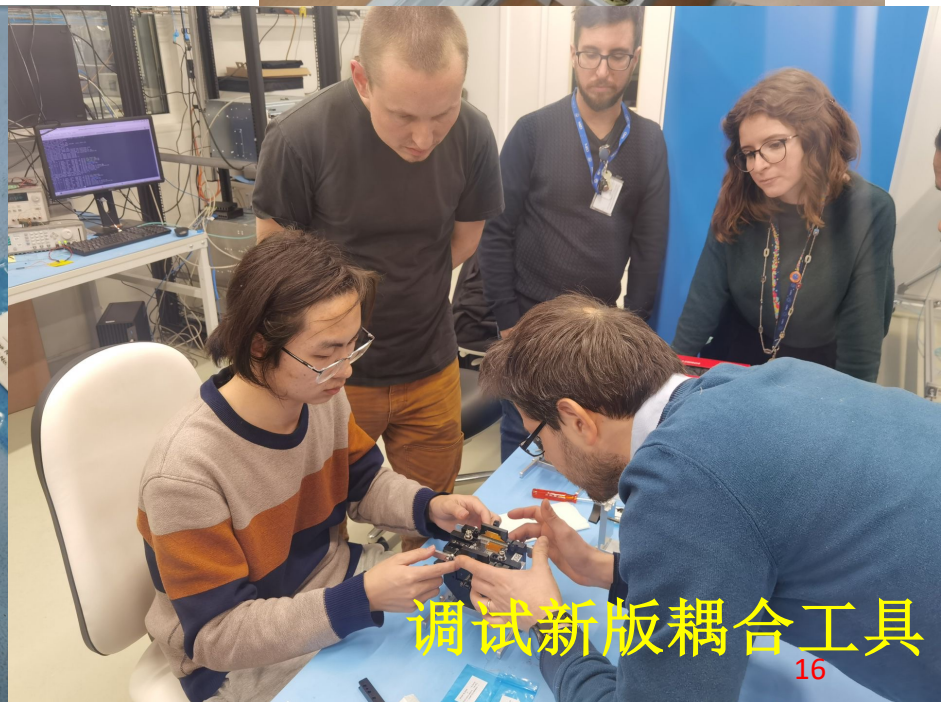
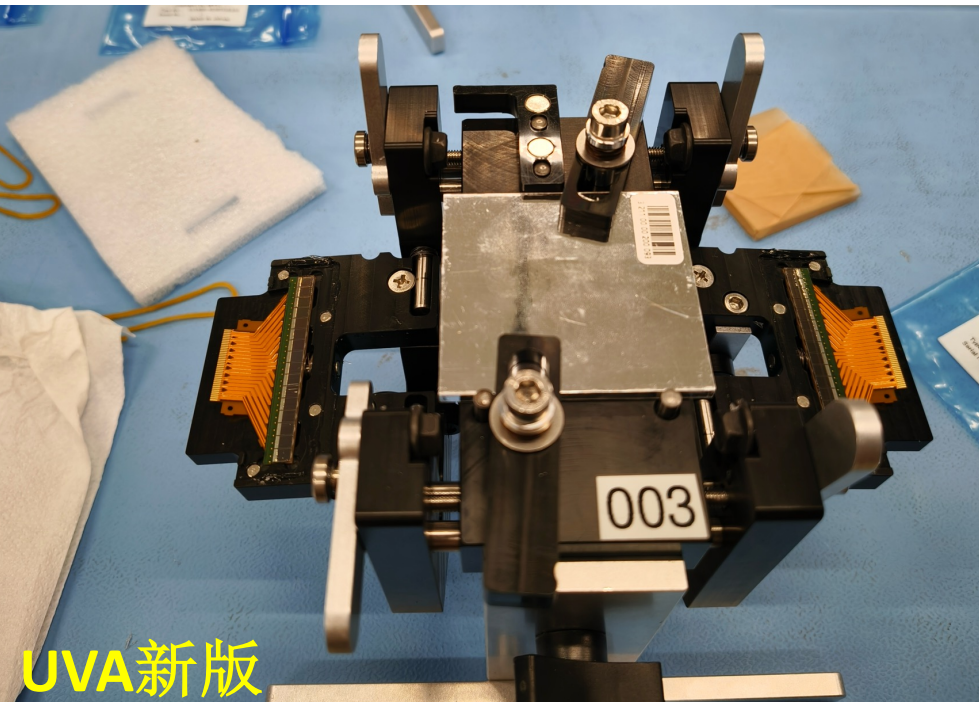
on behalf of the MTD team



2. Sensor模块的制造工艺

王锦
(PKU)

- 基于UVA设计的LYSO+SiPM耦合工件，改善工艺和可靠性：
 - 集成耦合步骤（刷胶+粘胶并一步），有效减少胶水暴露在空气中的时间和降低带胶水的SiPM从工件上脱落的概率
- 与UVA新版耦合工件交叉检验
- LYSO+SiPM耦合工件研制收尾，开始量产

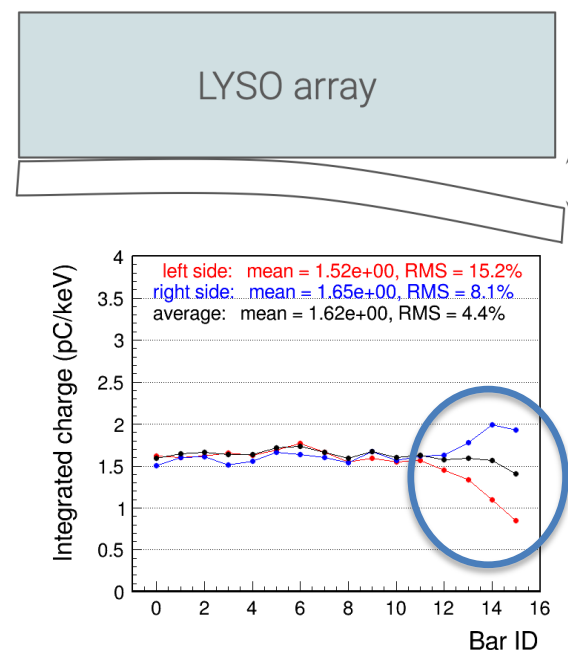
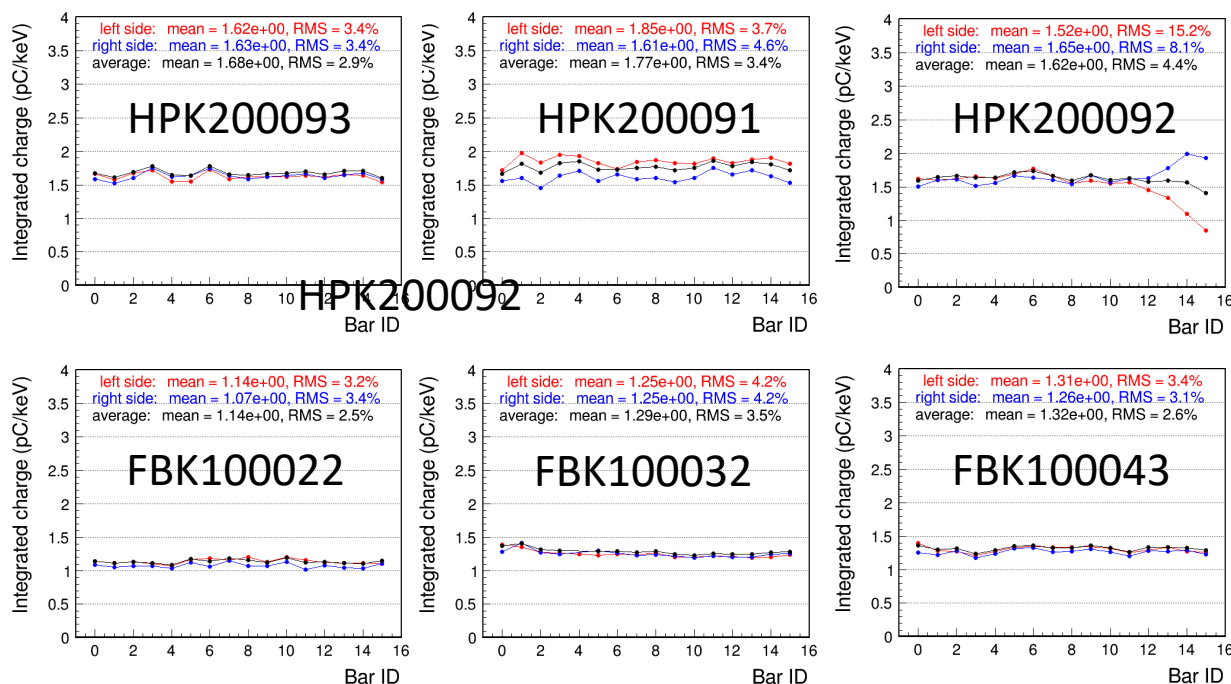
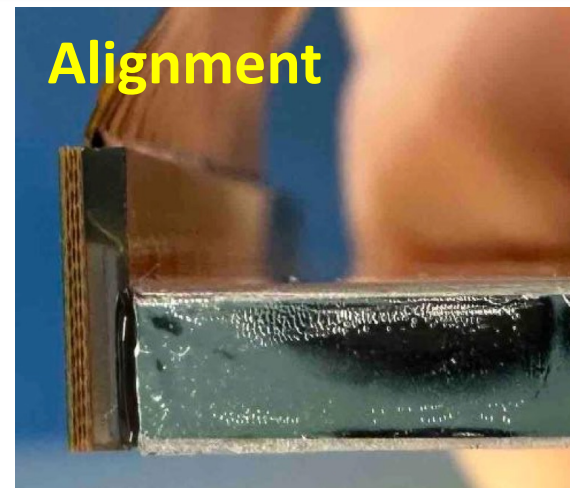


2. Sensor模块的制造工艺

王锦
(PKU)

• 耦合工件性能测试

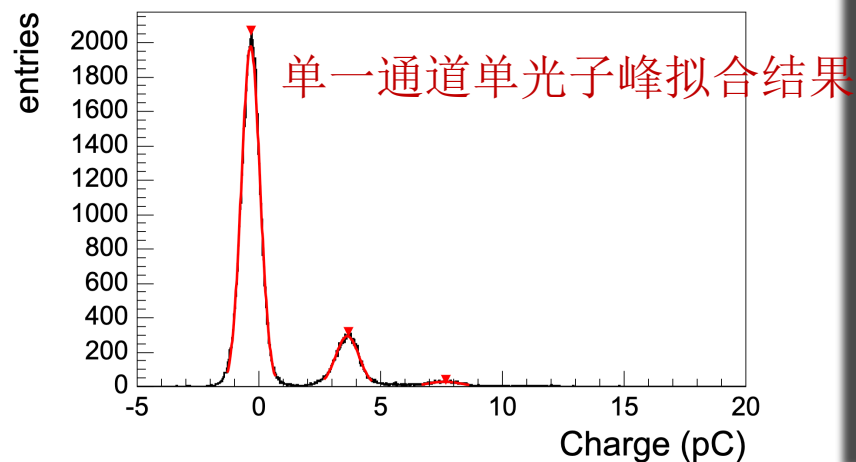
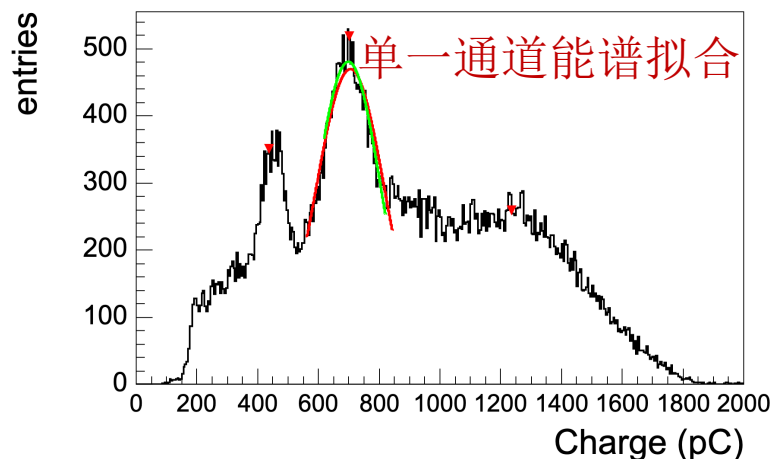
- 使用pre-production的SiPM和LYSO进行耦合
- 通过放射源，测量收集电荷和光产额，以量化耦合对齐和胶水厚度、均匀度等
- 从测试结果中得到，需调整耦合工件平台的高度约200微米等
- 少量SiPM本身PCB背板弯曲导致胶水厚度不均



2. Sensor模块的小批量生产

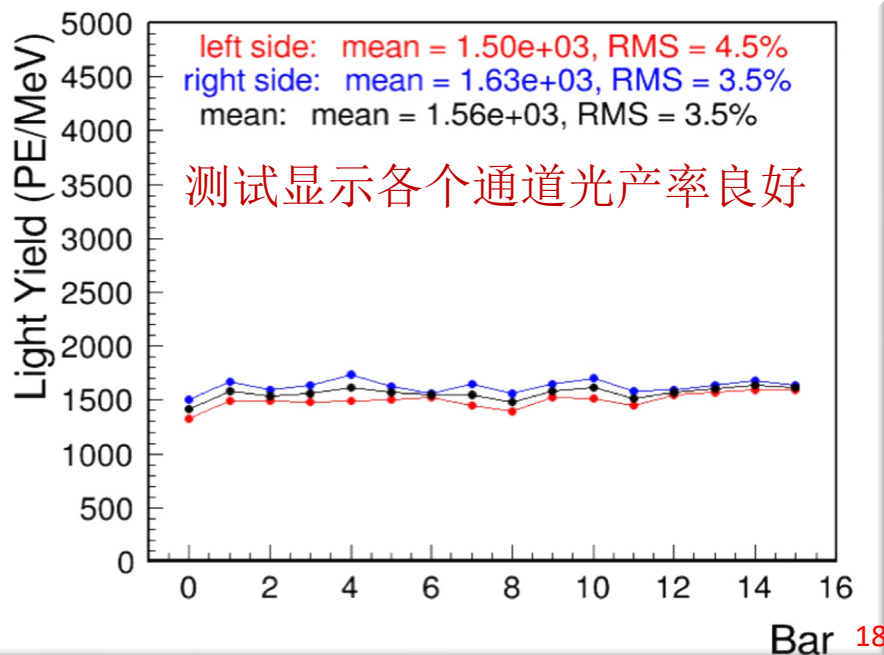
王锦
(PKU)

- 已开始小批量生产，23年底前完成0(10) sensor module生产测试，发往CERN进行交叉测试



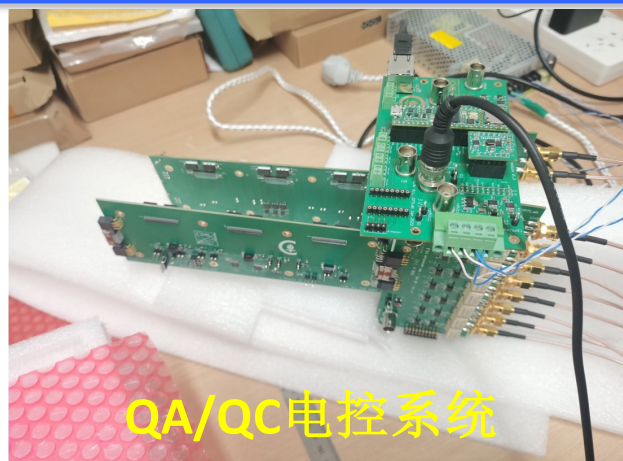
第一批小批量模块生产

第一批生产~11 modules (2023年底)



3. Sensor模块质控QAQC系统研制 王锦 (PKU)

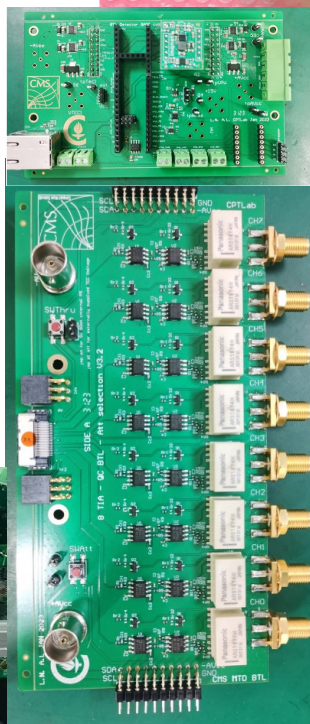
- Sensor module需进行质控，测试其信号幅度及其均匀性
 - 通过放射源辐照，测量包括幅度、时间分辨率、谱型、串扰，以及SiPM在不同温度下的表现和TEC测试
- 需实现批量测试，实现自动化数据采集和放射源的自动化移动
- 前放电子学模块，恒温暗箱搭建，采数系统及其他支撑结构，目前已搭建完毕
- 质控系统设计收尾，已完成量产电路板，提供给其它组装中心



QA/QC电控系统



温控系统



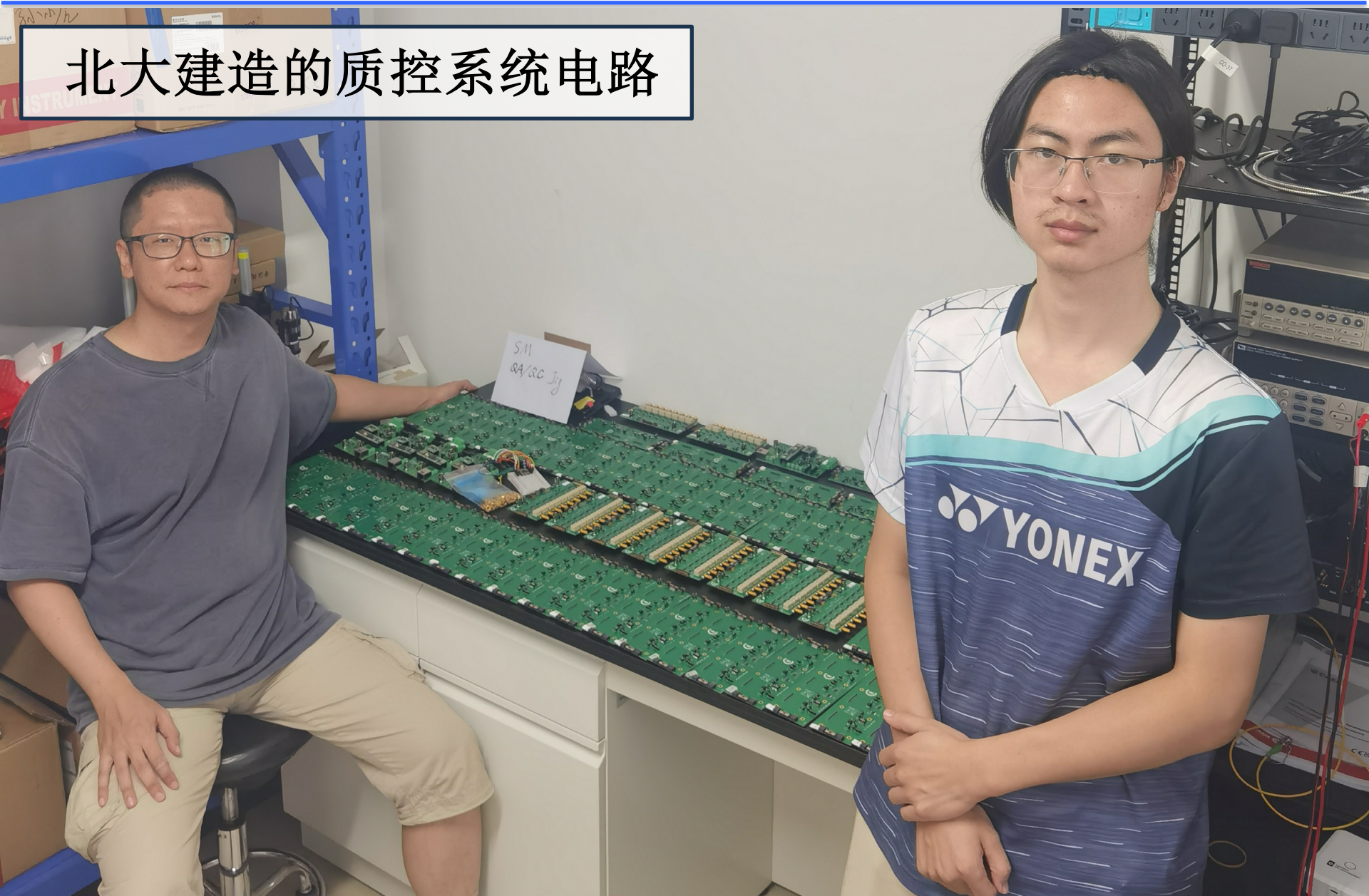
QA/QC系统



批量测试系统

3. Sensor模块质控QAQC系统研制 王锦 (PKU)

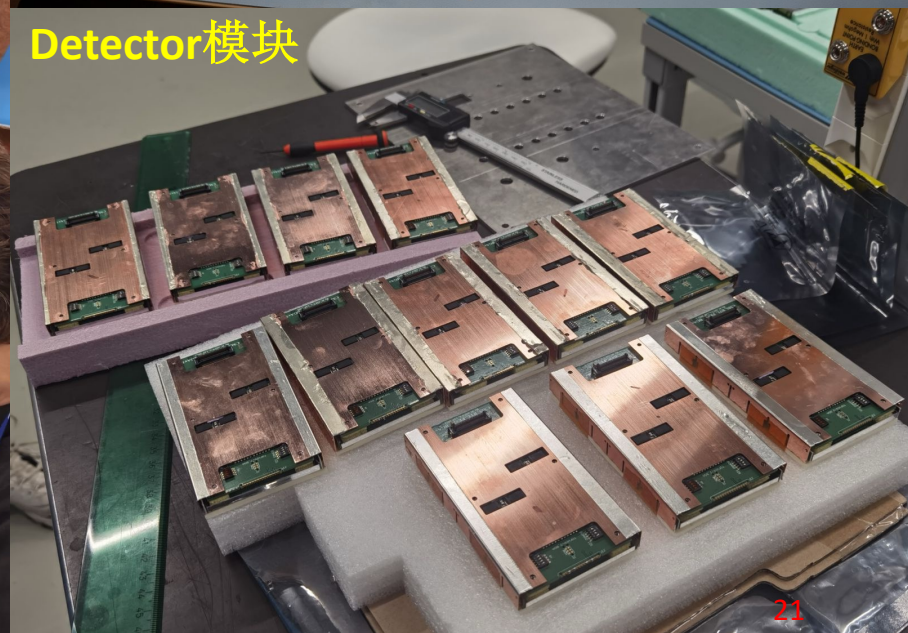
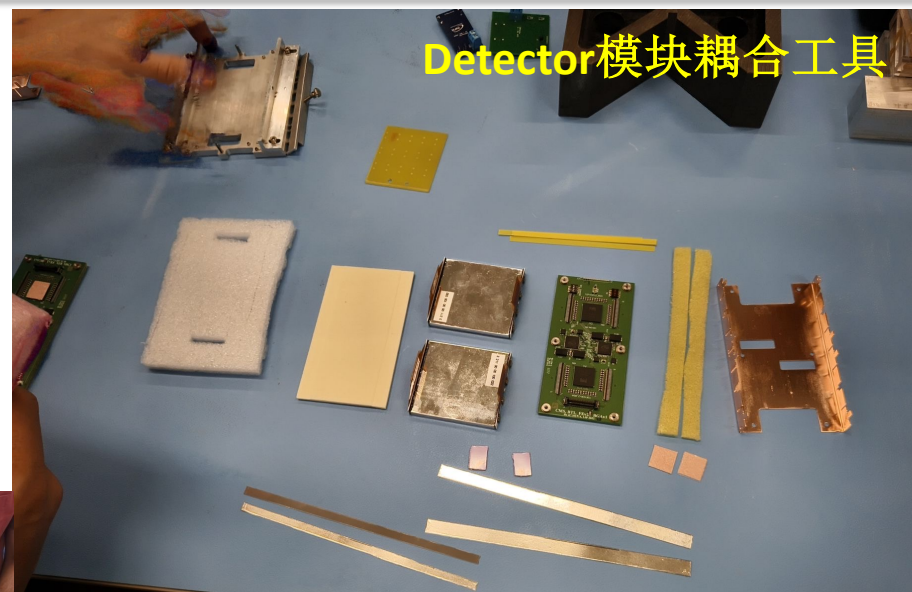
北大建造的质控系统电路



4. Detector模块制造工艺及质控

王锦
(PKU)

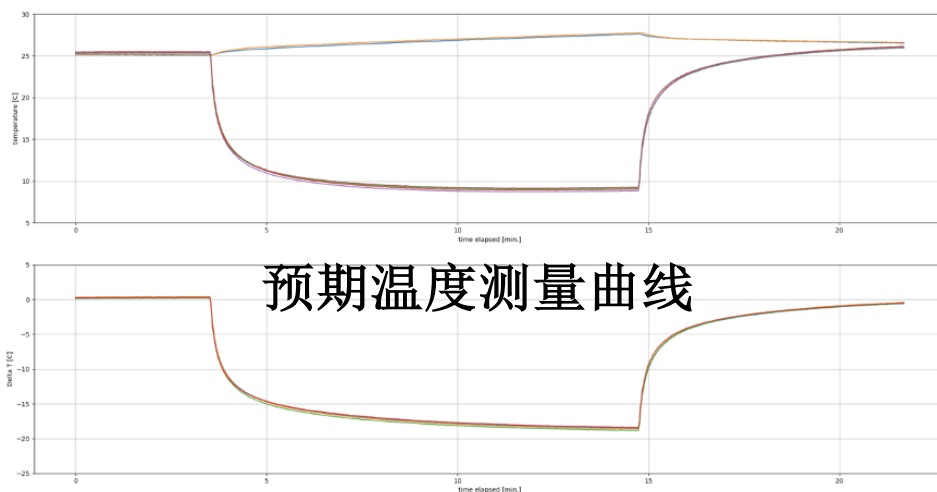
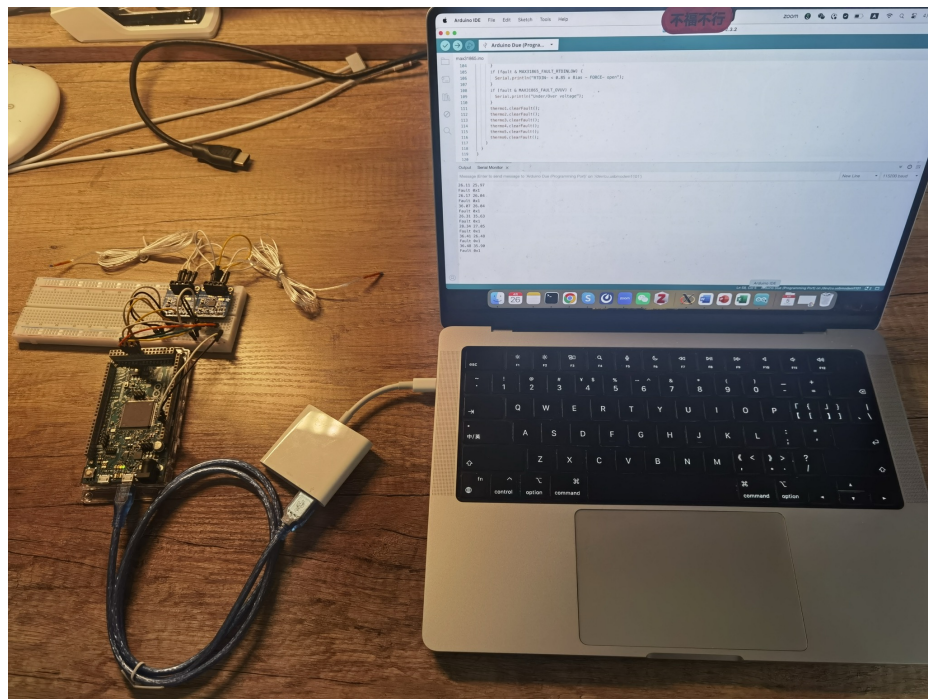
- Detector Module耦合工件研制
 - 耦合测试完成的Sensor Module将与铜壳结构及电子学读出系统进行进一步耦合
- 已初步建立工艺流程



4. Detector模块制造工艺及质控

王锦
(PKU)

- Detector module的质控QAQC主要涉及热耦合
 - 需检测电子冷却贴片TEC与导热外壳接触是否良好
 - 上电后TEC是否正常工作，提供预期的 ΔT
- 初步设计，通过Arduino板与31685 RTD数字转换板，获取温度
 - 温度测量点主要位于SiPM一侧和导热外壳 (copper housing)
- 已初步搭建6通道测量系统，可供单个Detector module的温度测量
- 已建立质控单模块系统 (热传导)



Detector module workshop

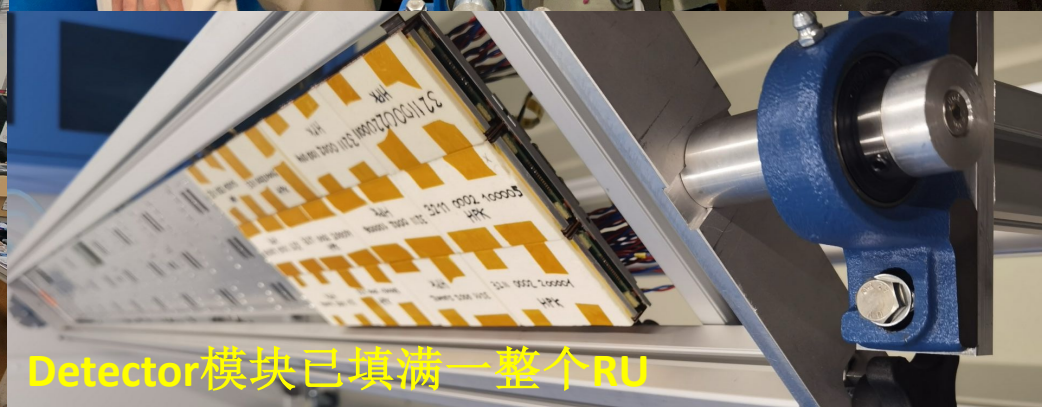
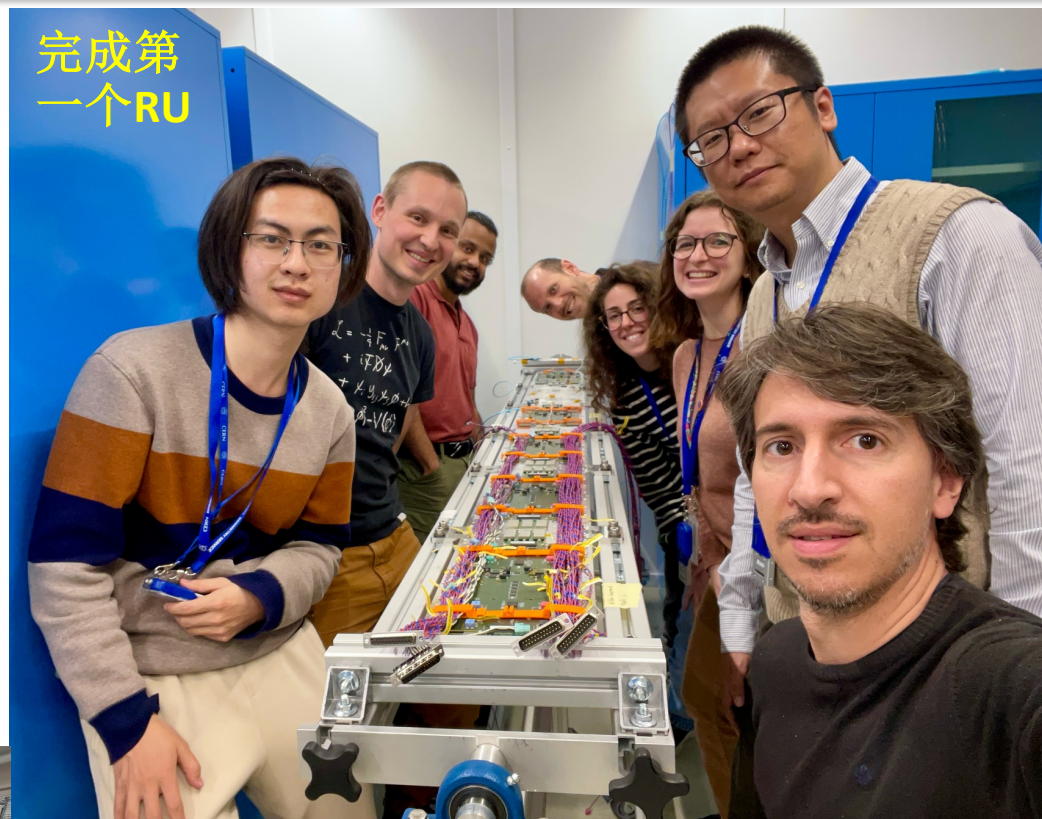
胡震(THU)
钱思天(PKU)

2023年底在CERN制作了第一块完整的探测器模块
奠定了探测器模块制造工艺的基础



5.探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

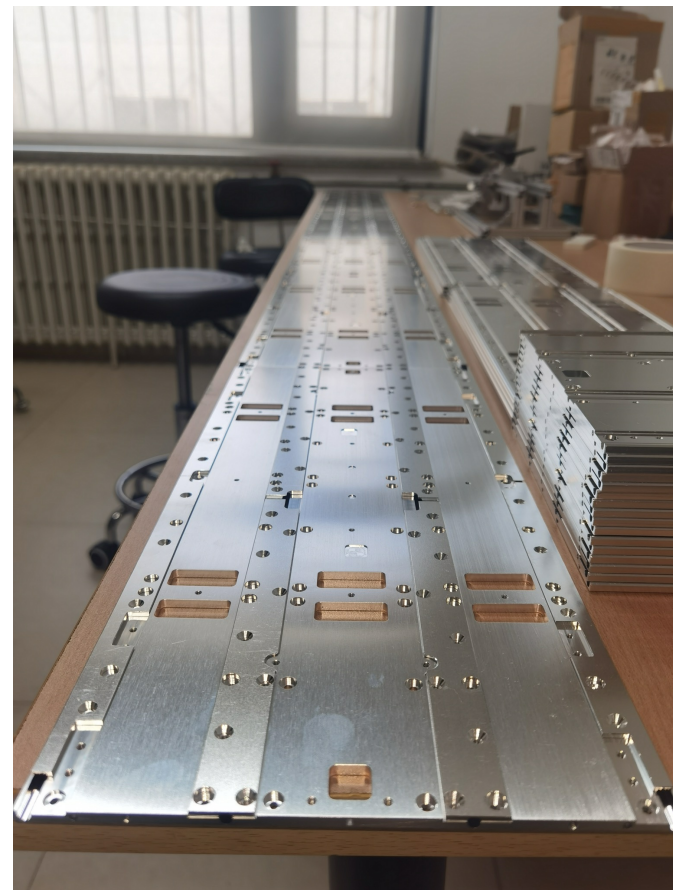
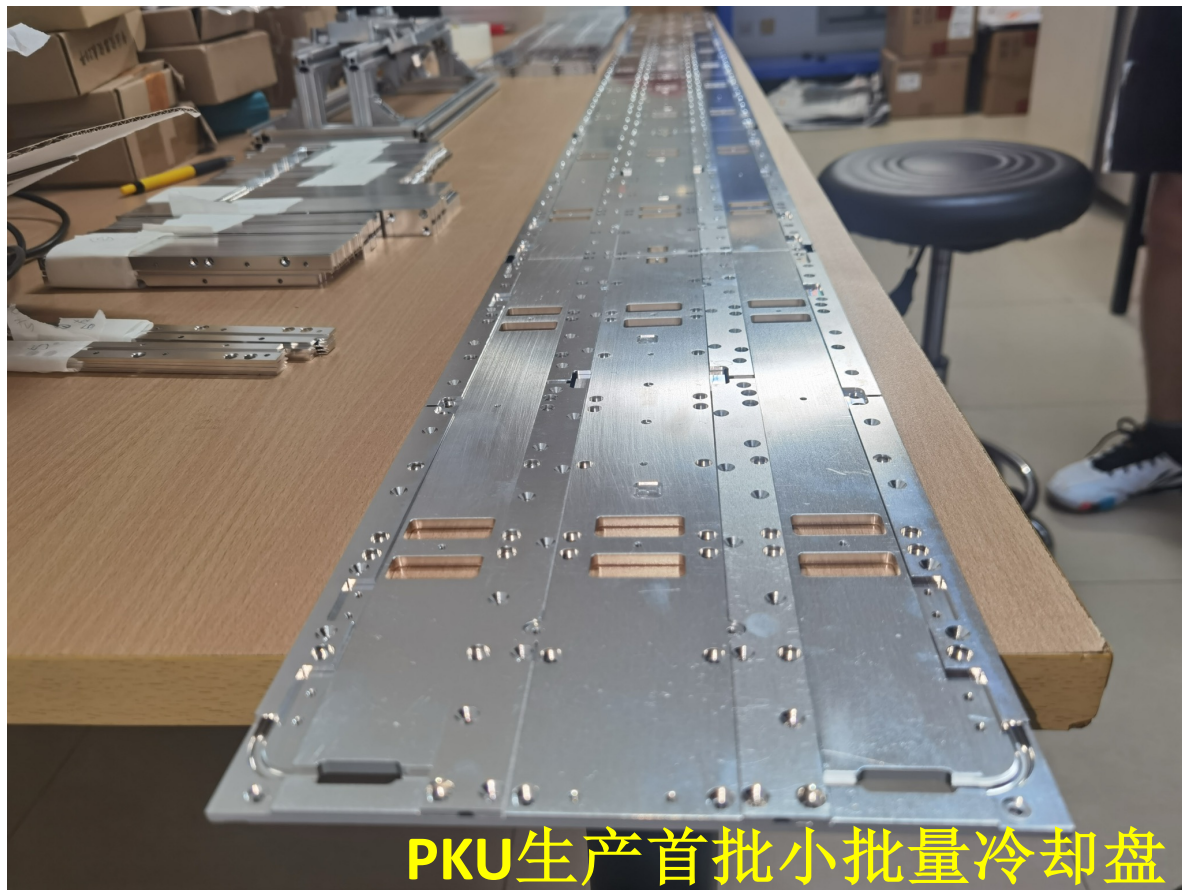
- Tray组装工艺的研制
- 在CERN进行了一些列tray组装工艺的研制，**建立了第一个Readout Unit（首次完成detector module单RU的全部组装）**
- 测试了供电线缆，供电switch board
- **正在CERN进行1号tray的建造，将最终敲定tray工艺**



5.探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

王锦
(PKU)

- **PKU已完成首批小批量5套冷却盘的生产**
- 发往CERN、米兰、弗吉尼亚和加州理工，进行组装研究和冷却测试



年度主要进展

1. Sensor设计优化

1. 完成硅光电倍增器SiPM设计参数优化
2. 完成晶体LYSO参数优化

通过CMS审核
MTD里程碑

2. Sensor模块的制造工艺设计

1. 完成LYSO+SiPM耦合所需专用机械工件的设计和制造
2. 完成首批小批量生产（~10个）

3. Sensor模块质控QAQC系统研制

1. 完成质控系统设计搭建
2. 完成质控系统生产，并提供给合作组其它组装中心

工艺定型
具备量产及
质控能力

4. Detector模块制造工艺及质控

1. 初步搭建热学质控系统

5. 探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

1. 正在打磨Tray组装工艺
2. 正在建立基于Serenity板的质控系统

总结

- 该项目进度正常，目前与计划书中的预期符合
- P2UG (Phase 2 Upgrade Cost Group, 每年两到三次评审ATLAS、CMS的升级项目进度、资源), [2024年5月14日](#), 对MTD桶部项目给予非常肯定的评价
- Comments/Concerns
 - **Whole program is on track to start production**
 - Module/tray production to start during summer; Integration at TIF is well organized and coordinated with tracker
 - **Current DPC is 3 months (+ 10 RM)**
- Recommendations
 - **None**

MTD BTL是唯一P2UG建议为空的项目
其它项目皆收到了P2UG的些许建议和督促

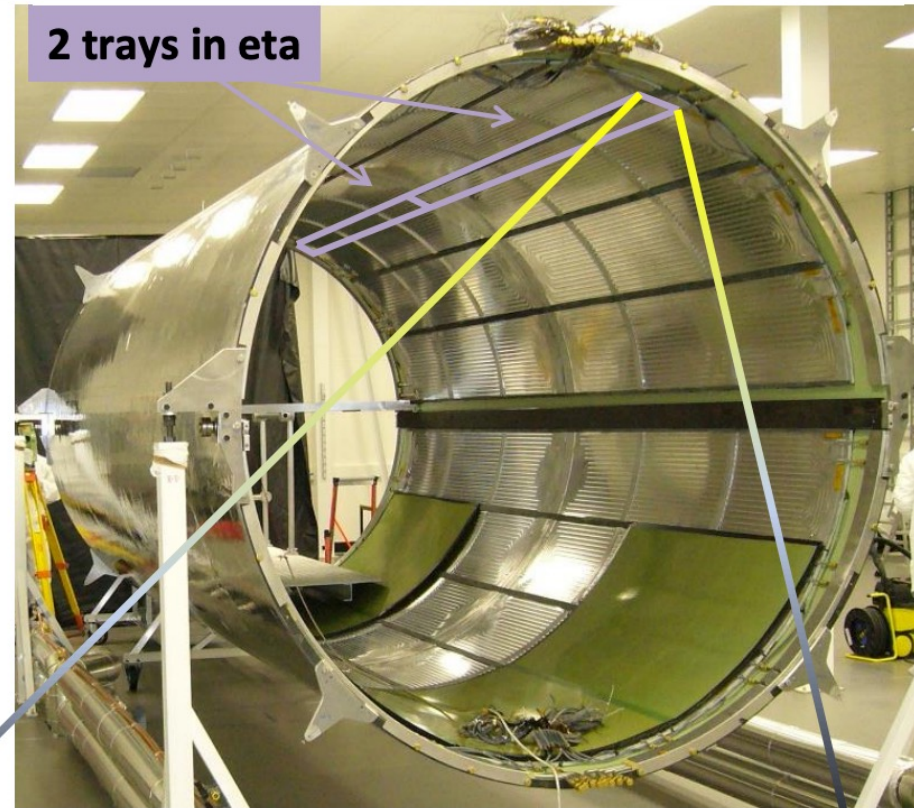
Backup

桶部MTD BTL结构

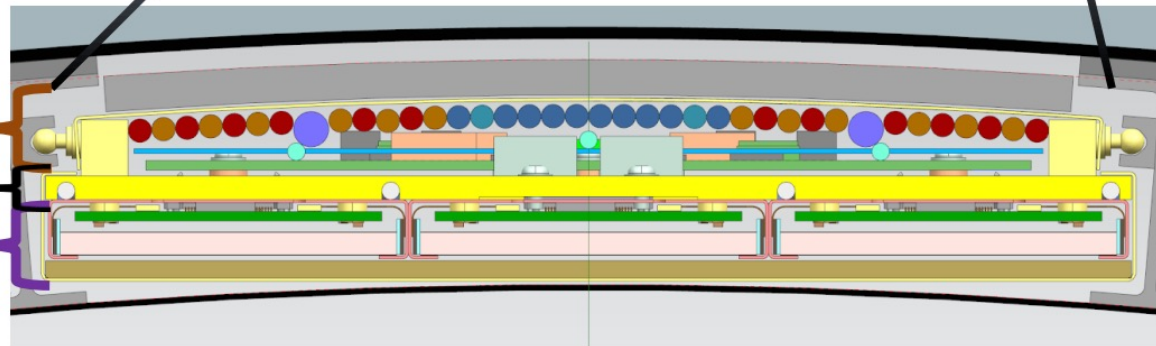
- BTL will be attached to the inner wall of the BTL Tracker Support Tube (BTST).
- BTST dedicated design to accommodate BTL
- Cold volume shared with Tracker (TRK).

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.



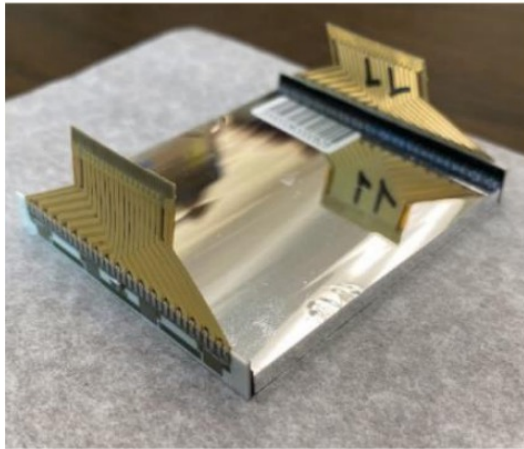
- 1) Front End electronics, segmented into six Readout Units (RU)
- 2) Cooling tray, providing mechanical support, CO₂ cooling pipes.
- 3) Sensor layer, segmented into modules (12 modules per RU with 2 sensor modules each)



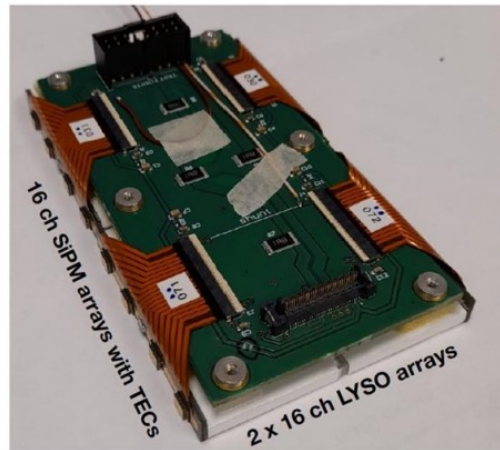
BTL modules

- 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



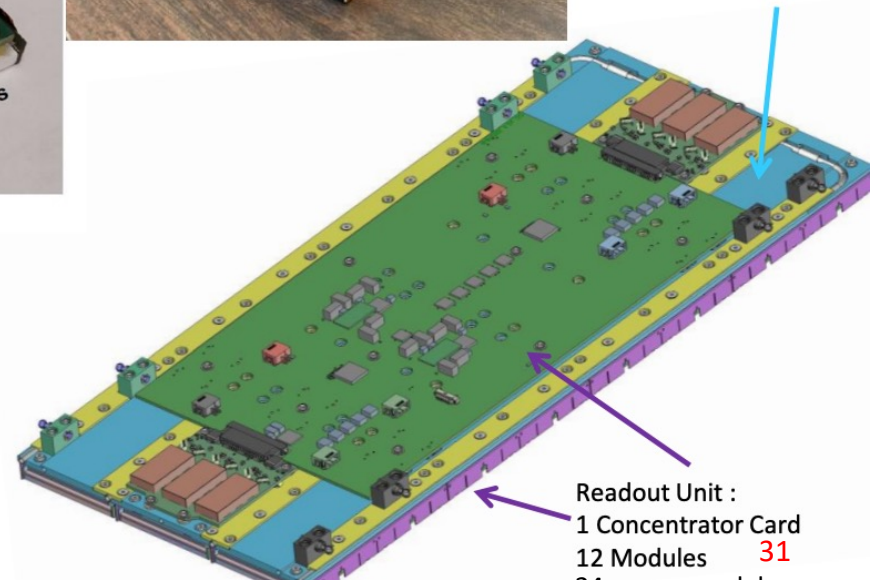
BTL module



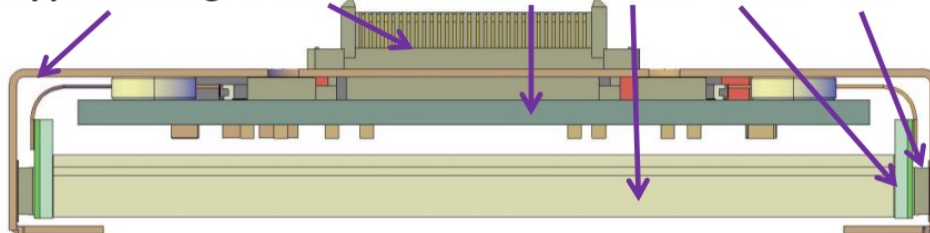
BTL detector module



Cooling plate



Copper housing FE connector FE board LYSO SiPM TEC



BTL冷却系统测试

张铭滔
(PKU)

- 对BTL整机原型（包括部分模块使用mockup）进行冷却测试
- 使用CO₂，流率为6 g/s，压强差0.7bar，在接近最终工作温度下测试（-36度）
- 测试得到SiPM上温度变化pattern、cooling plate温度梯度（~2度）、压强差pattern等，**实验数据与模拟数据基本相符**

