

科技部国家重点研发计划

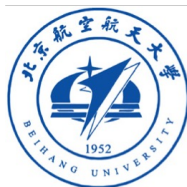
大型强子对撞机上CMS和ALICE探测器升级

课题二：CMS 缪子谱仪 GEM 和时间探测器 MTD 升级

CMS时间探测器设计及建造工艺

北京大学：孙小虎，王锦

2024年年会，07月13日

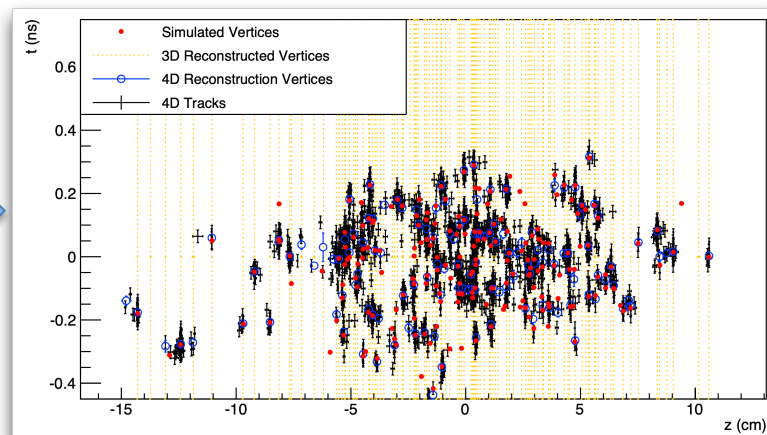
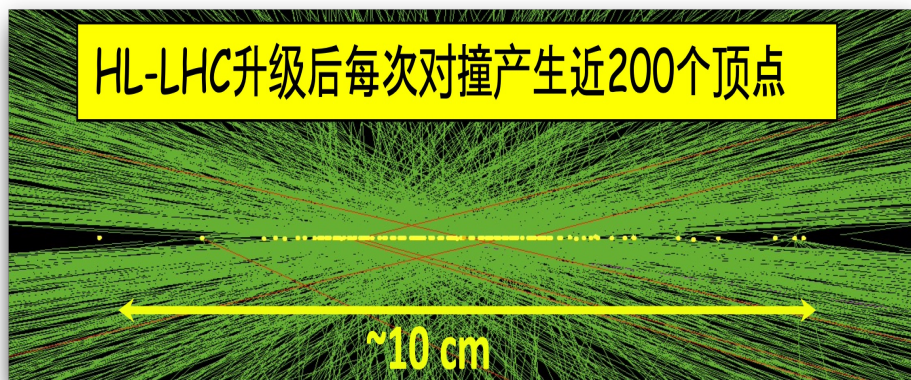


提纲

- 项目背景和物理意义
- **MTD BTL Sensor** 设计优化
- 组装工艺的研制及质控
 - -**Sensor**模块的组装工艺和质控
 - -**Detector**模块的组装工艺和质控
 - -**BTL Tray**组装工艺和质控
- 项目研究计划和进展情况

1. 项目背景与目标： 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



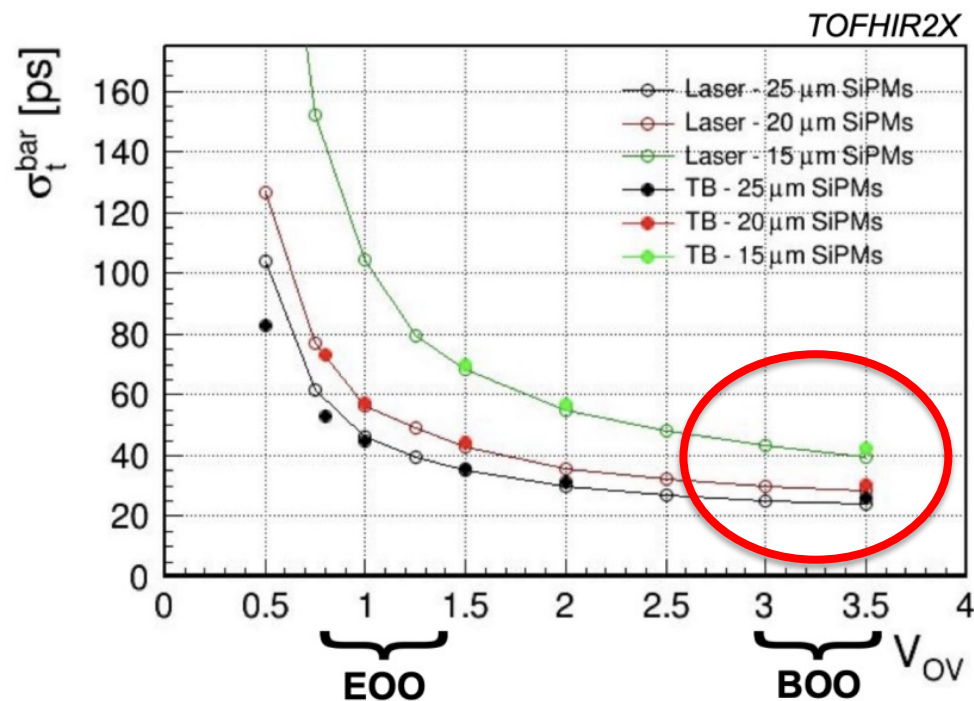
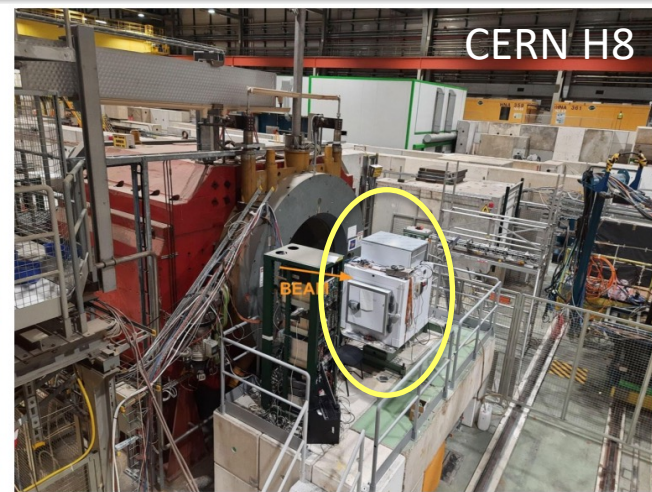
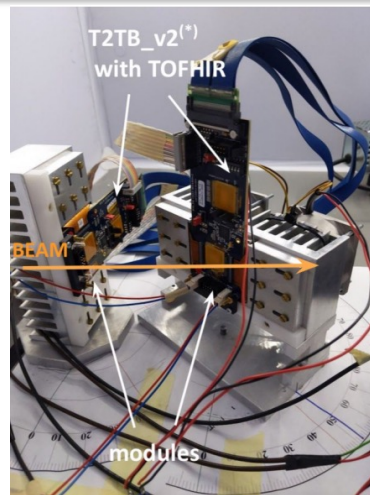
目标:

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

2. Sensor设计优化: SiPM

章立诚
(PKU)

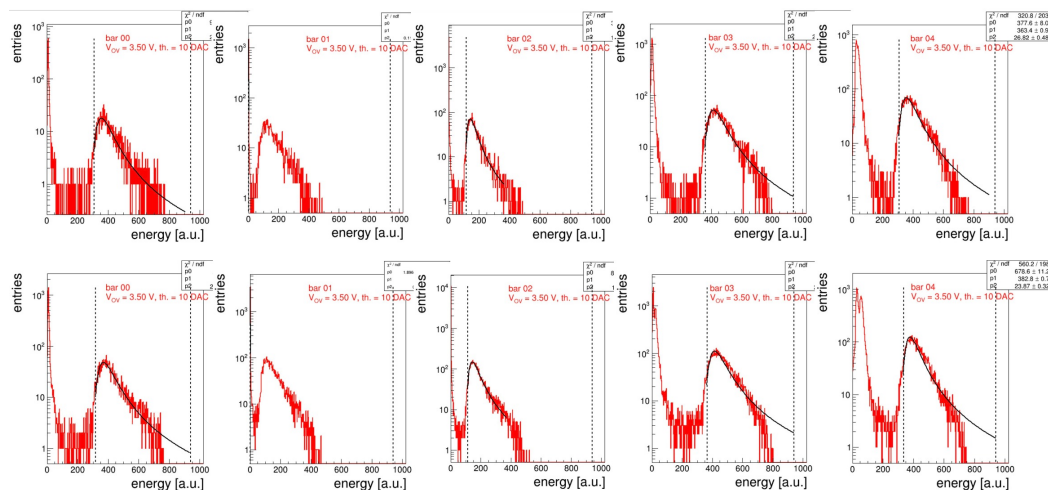
- 主要针对SiPM的cell大小等参数进行调整和优化
- 经过大量参数比对, 选取其中时间性能最优的一组, 最终我们在束流上比较测试了15 μm cell-size的SiPM与新参数20 μm 和25 μm
 - 25 μm SiPM有最佳的时间分辨率
- 束流测试是在CERN (180 GeV pion) 和 FNAL (120 GeV proton) 束流上完成的
- 已完成SiPM参数的优化



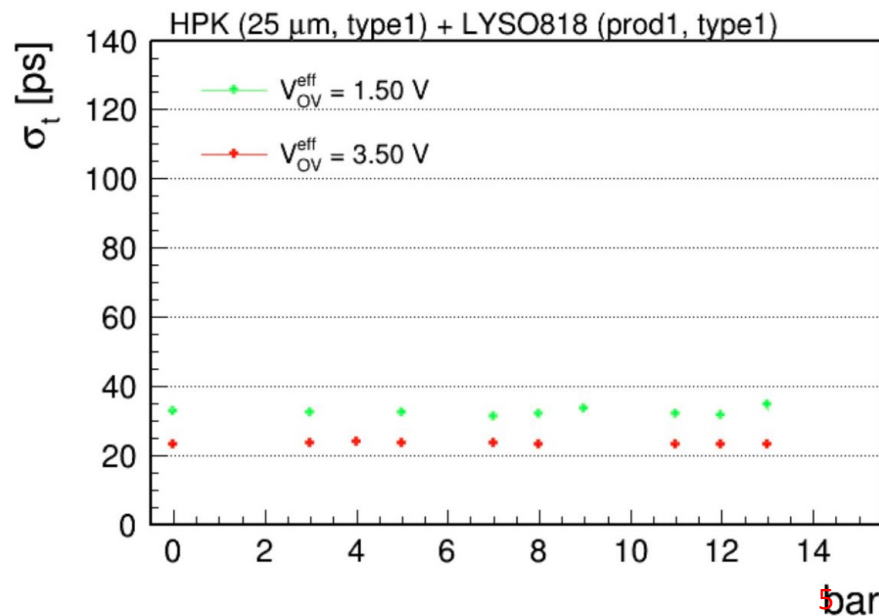
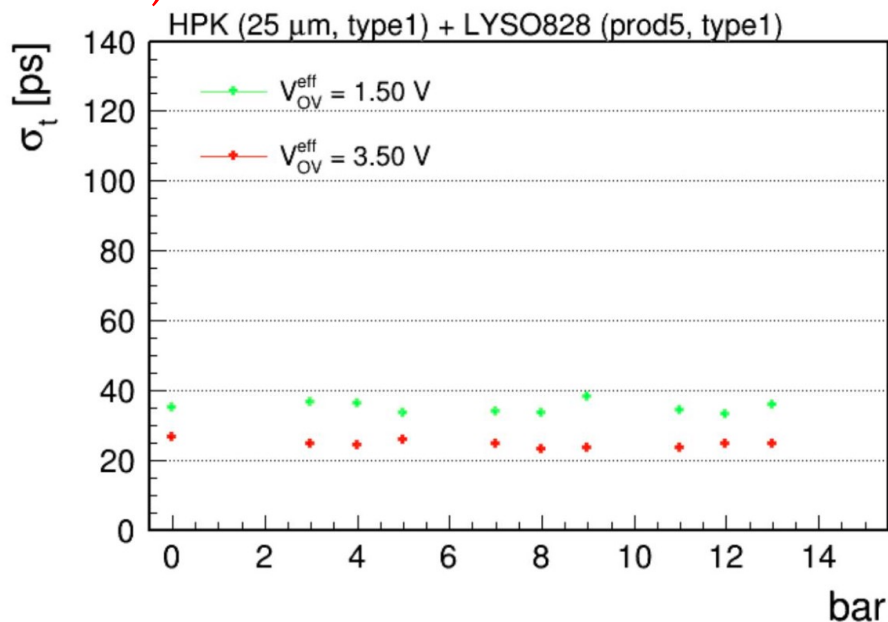
2. Sensor设计优化: LYSO

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



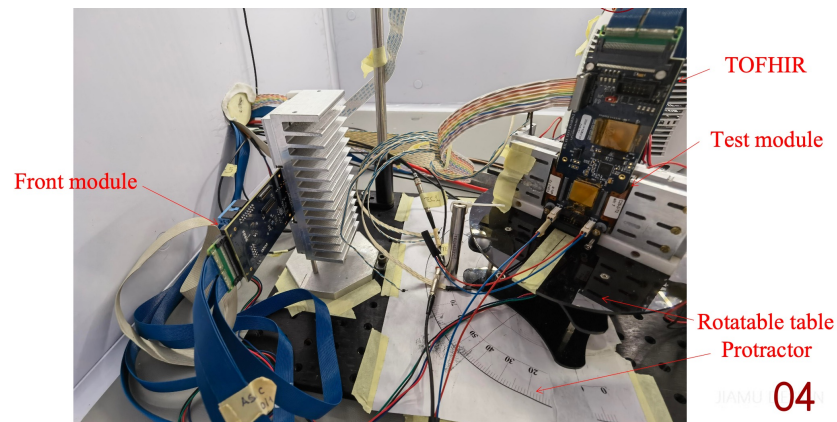
prod1 52deg



2.设计优化：束流测试@CERN 2023

章立诚
张铭滔
(PKU)

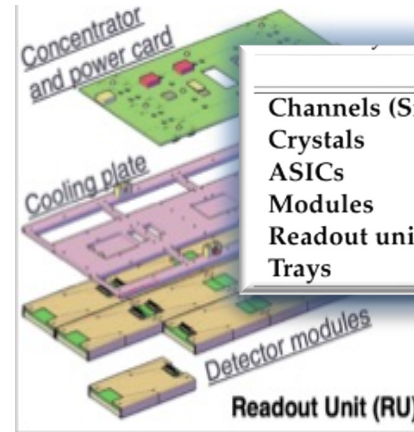
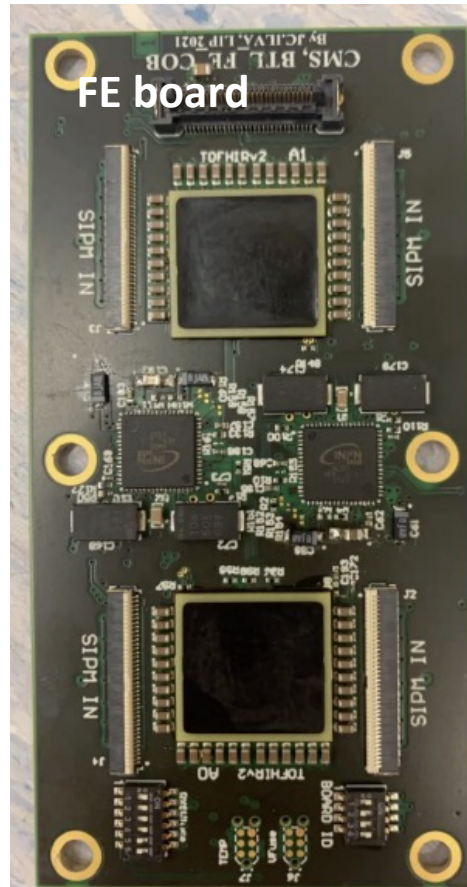
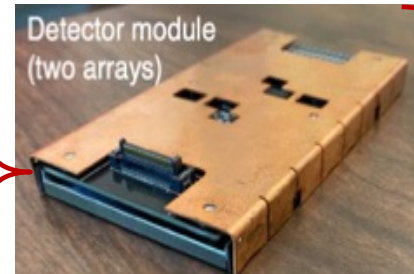
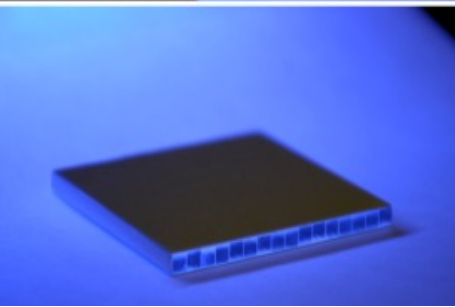
- 参与束流测试、数据采集和测试数据离线分析
- 为MTD桶部sensor设计方案提供依据



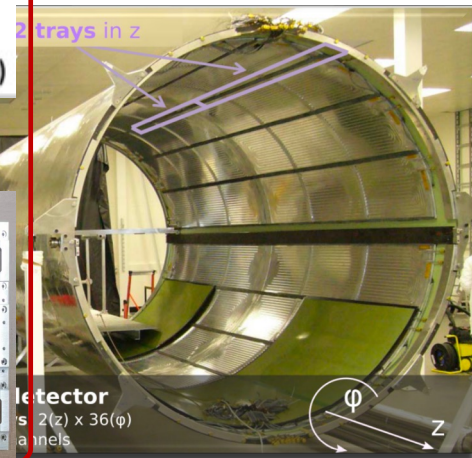
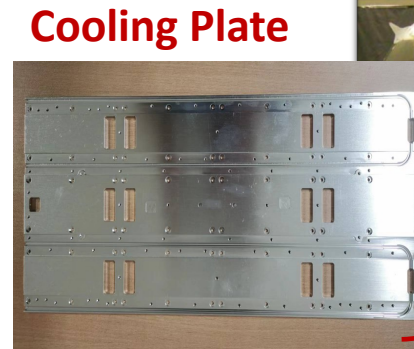
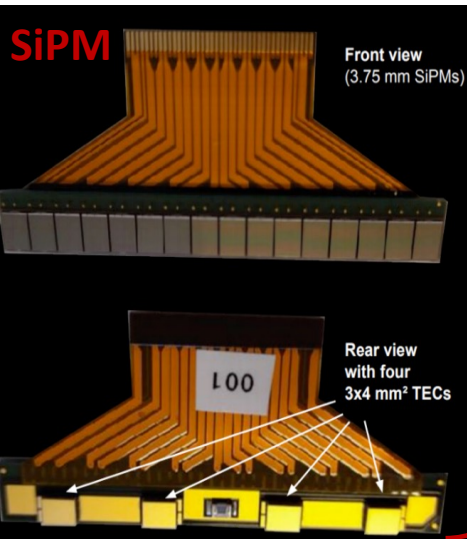
04

3. 组装工艺的研制及质控

王锦
(PKU)



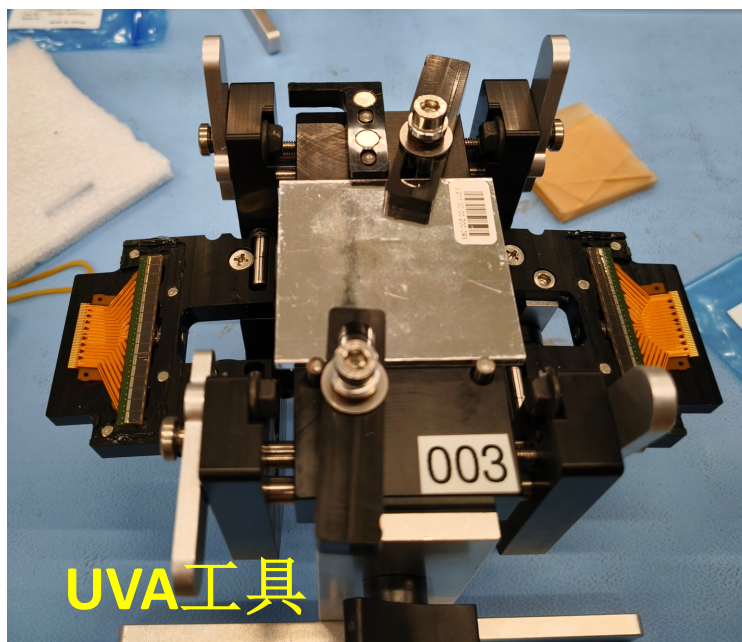
	Module	RU	Tray	Total
Channels (SiPMs)	32	768	4608	331776
Crystals	16	384	2304	165888
ASICs	1	24	144	10368
Modules	-	24	144	10368
Readout units (RU)	-	-	6	432
Trays	-	-	-	72



3.1. Sensor模块的组装工艺

王锦
(PKU)

- 正在进行的BTL workshop将会重点研究MTD时间探测器全部层次模块的组装工艺和质控。
- 经过各个合作组整合，在以往版本进行迭代升级交叉检验后，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

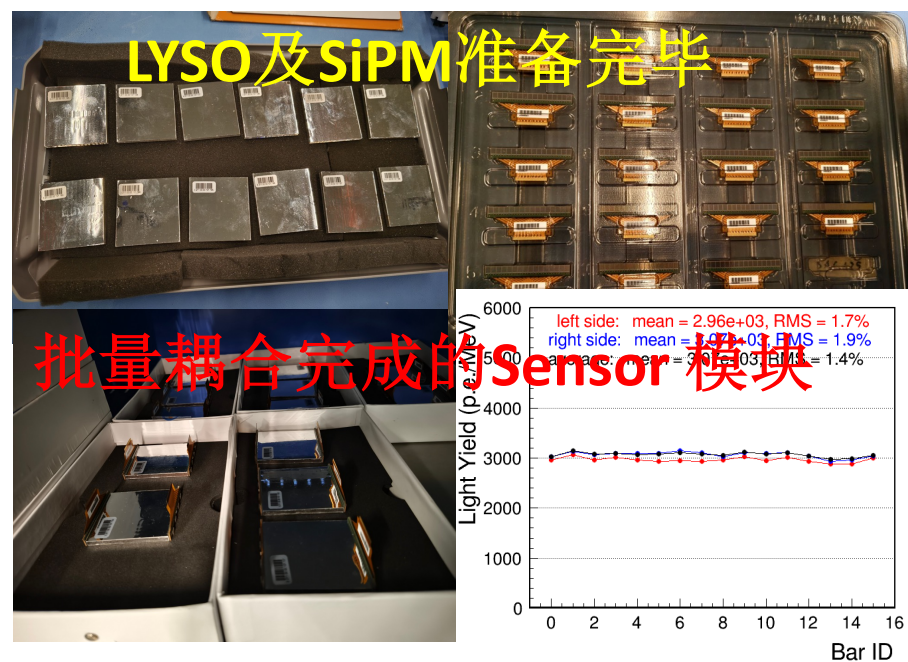
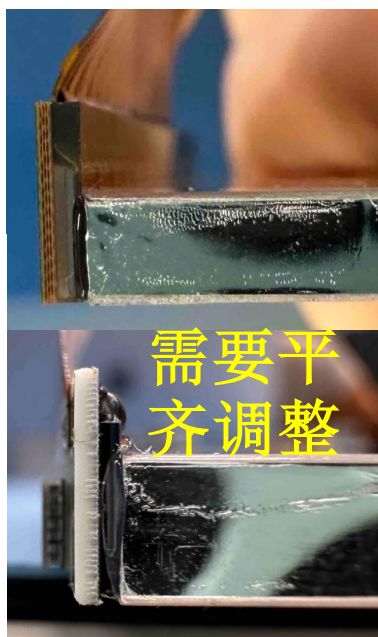
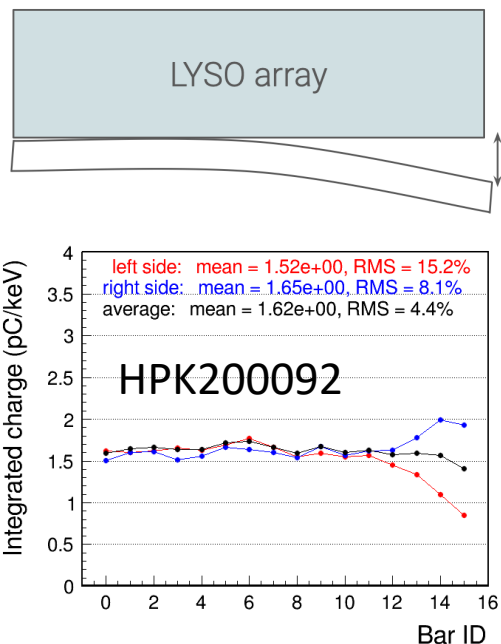


3.1. Sensor模块的组装工艺

王锦
(PKU)

• 耦合工件性能测试

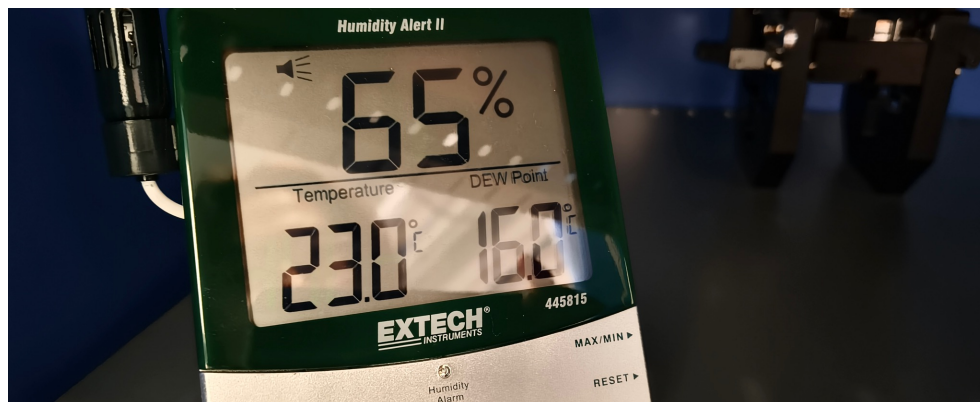
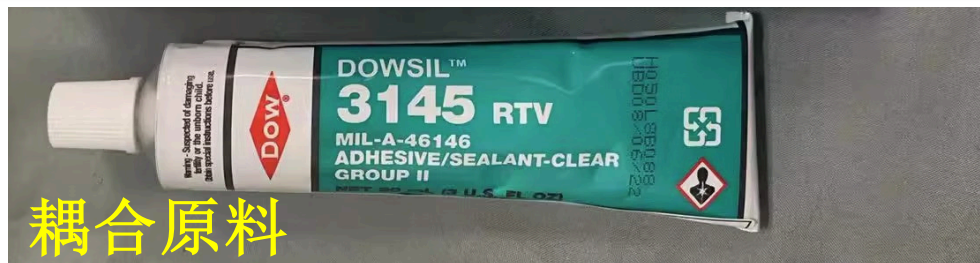
- 在pre-production的SiPM和LYSO耦合结果中，呈现出调整耦合工件平台的高度约200微米，SiPM本身PCB背板弯曲导致胶水厚度不均匀等问题和建议
- 本次workshop期间，production批次的SiPM和LYSO的耦合工艺研究正在开展
- 通过放射源，测量收集电荷和光产额，以量化耦合对齐和胶水厚度、均匀度等
- 目前测试还在进行中，对工艺过程中参数和设计的比照实验，将给出进一步的工艺调整方案



3.1. Sensor模块的组装工艺

王锦
(PKU)

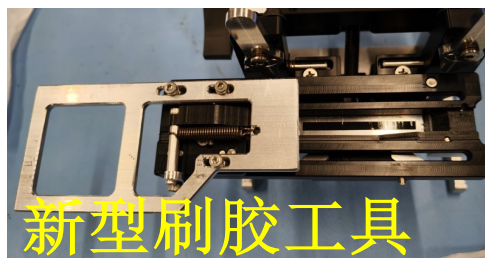
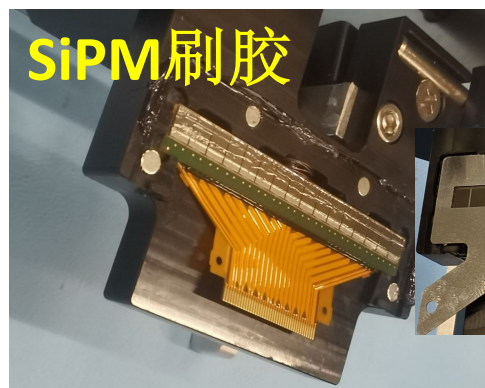
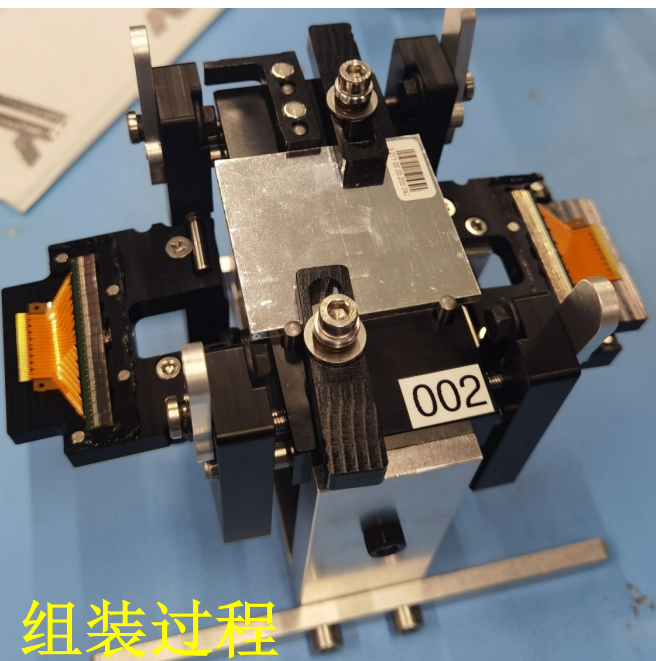
- 模块组装原料：
 - 采用高强度折射率与晶体接近的有机硅胶，
 - 保证涂胶过程中的均匀施胶，以及固化后的高强度不塌陷
 - 确保SiPM和LYSO稳定连接的同时，给予尽可能大的光产率
- 为了工艺的一致性和标准化流程参考最有利于胶水均匀平整硬化的条件，量化了模块组装后放置时的湿度范围



3.1. Sensor模块的组装工艺

王锦
(PKU)

- 模块组装工具GAMBIT:
 - 采用加载磁铁的可活动限位器，配合平台立柱和底面多层可调胶布，对LYSO晶体位置进行校准
 - 在SiPM托盘上采用硬弹簧的设计，既保证SiPM在耦合过程中的稳定，又能够防止SiPM托盘批量生产带来的尺寸误差导致的无法匹配。
 - 采用新版刷胶工具，有效避免了组装过程中人为的误差因素，诸如刷胶速度，力度等，便于批量化生产；
- LYSO+SiPM耦合工件研制收尾，开始量产



3.1. Sensor模块质控QAQC系统研制王锦(PKU)

LYSO晶体的固有放射性

- 不稳定同位素 ^{176}Lu 将发生 β 衰变至 ^{176}Hf 核的激发态
- Hf核将发生 γ 级联衰变，包括88 keV，202 keV和307 keV三种能量
- 这种固有的放射性带来的固有放射能谱能够确定接受光子总能量

$P(E)$

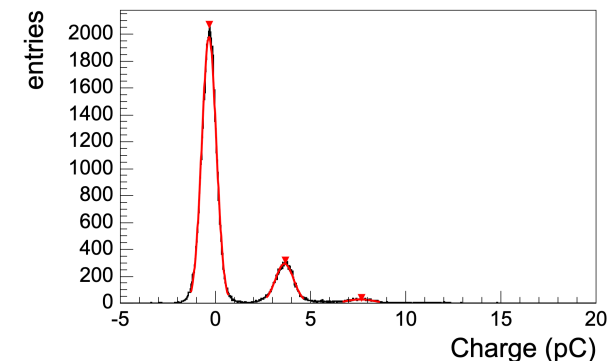
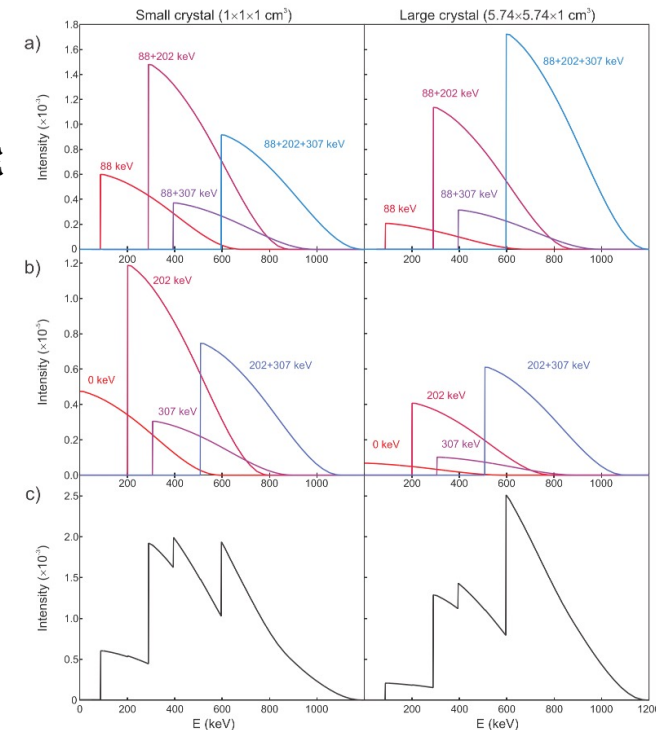
$$\begin{aligned} &= \alpha_{88}\beta(E - 88) + \alpha_{202}\delta(E - 202) + \alpha_{290}\beta(E - 290) \\ &+ \alpha_{307}\delta(E - 307) \\ &+ \alpha_{395}\beta(E - 395) + \alpha_{509}\delta(E - 509) + \alpha_{597}\beta(E - 597) \end{aligned}$$

单光子能谱

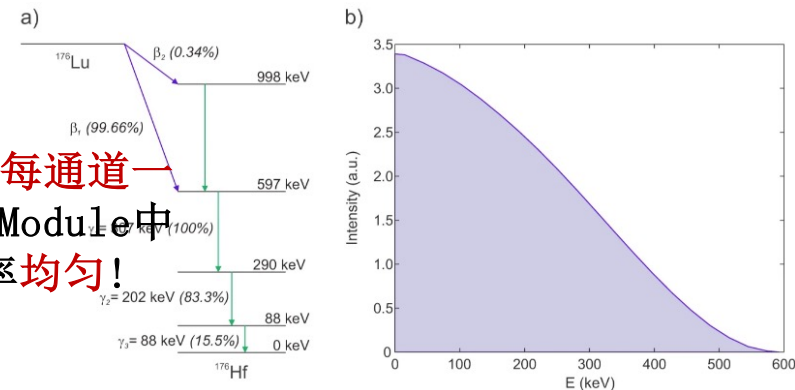
- 单光子能谱表征了单个光子带有的电荷量

以上两者的比值正比于单位能量沉积的光产额

- $\text{Light yield} \propto V_{\text{Lysofit}}/D_{\text{SPE}}$



- 如果light yield对每通道一致，就证明Sensor Module中LYSO阵列各道光产率均匀！



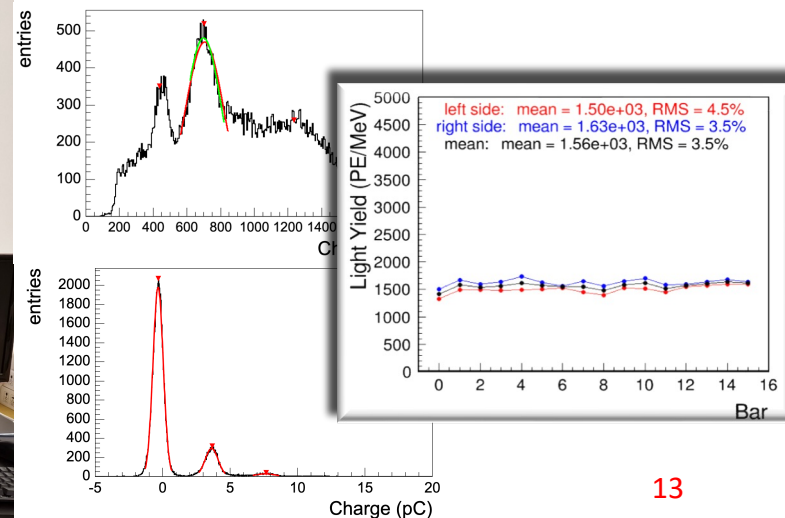
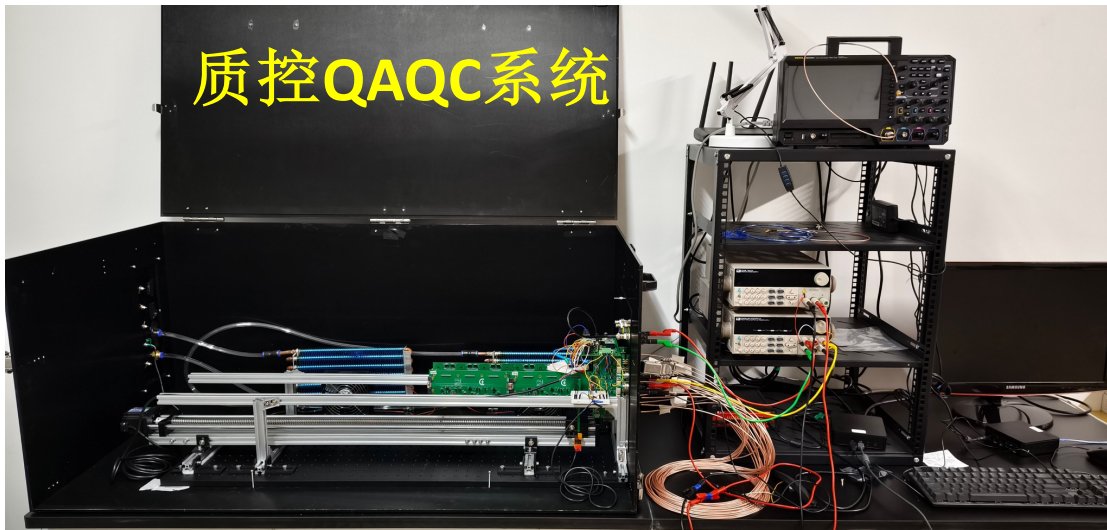
3.1. Sensor模块质控QAQC系统研制^{王锦(PKU)}

- Sensor模块需进行质控，以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
- 质控系统实现批量测试，实现自动化数据采集和放射源的自动化移动

质控QAQC系统（取数中）



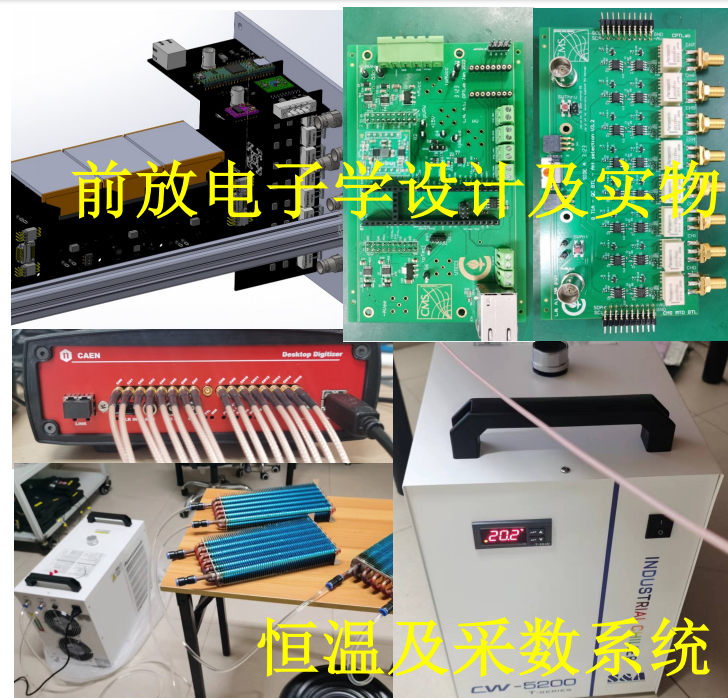
质控QAQC系统



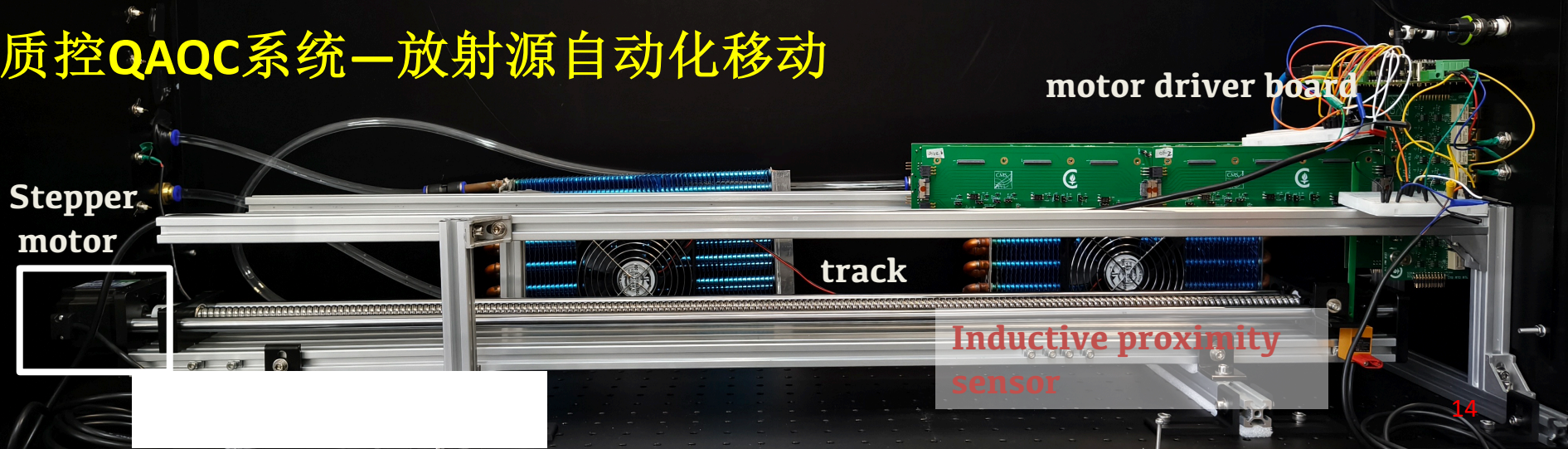
3.1. Sensor模块质控QAQC系统研制^{王锦 (PKU)}

• 质控系统主要包括

- **前放电子学模块**：包括与Sensor模块批量连接的Module板，用于信号批量放大的TIA板，以及用于和上位计算机通讯及总控的控制板
- **恒温暗箱及温度控制系统**：采用水冷循环系统，配合温度传感器实现温度控制和反馈；暗箱设计，使其打开的便捷同时，确保箱体闭合状态下实现良好暗环境；
- **放射源的自动化移动**：采用步进电机实现放射源的自动化移动，完成批量测试时数据采集所需要的放射源位置同步
- **采数系统及其他支撑结构**已搭建完毕，保证系统的稳定和正常运行。

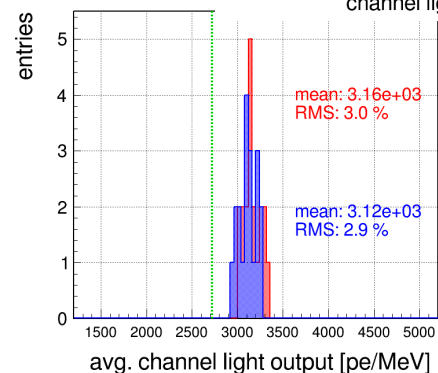
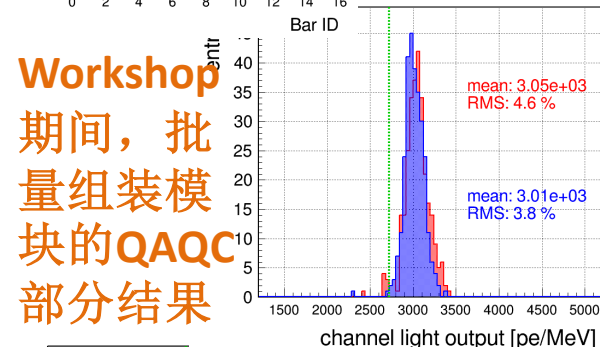
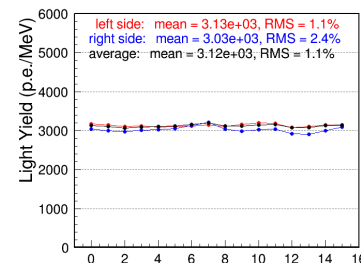
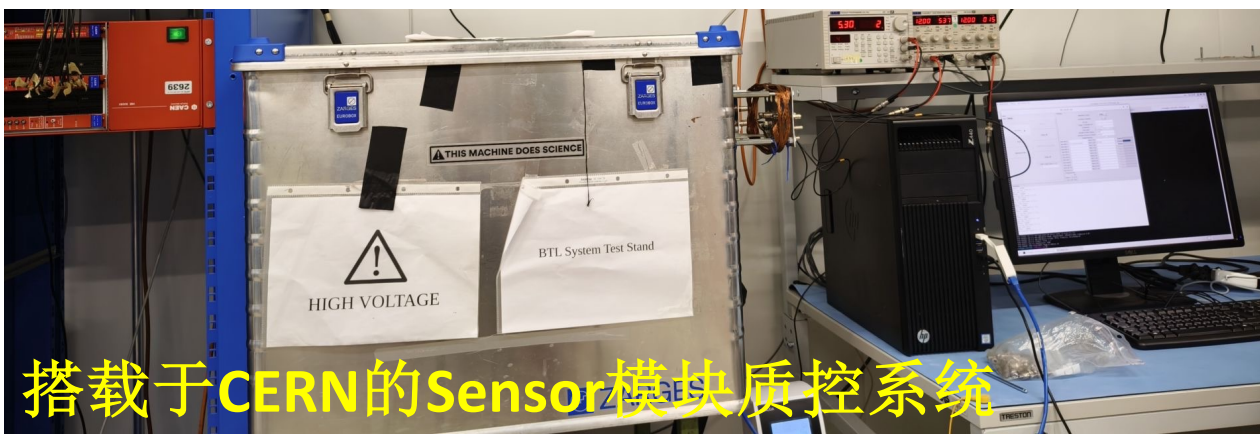


质控QAQC系统—放射源自动化移动



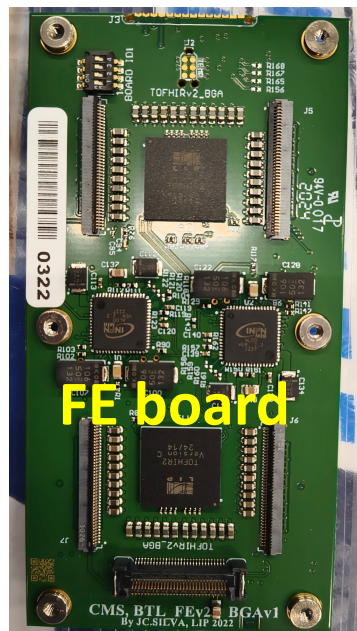
3.1. Sensor模块质控QAQC系统研制^{王锦(PKU)}

- 目前，质控系统设计收尾，已完成量产电路板，并提供给其它组装中心；
- 本次workshop期间，也重点讨论和迭代质控系统的软件更新和QAQC流程规范化，进一步提升系统稳定性和自动化。



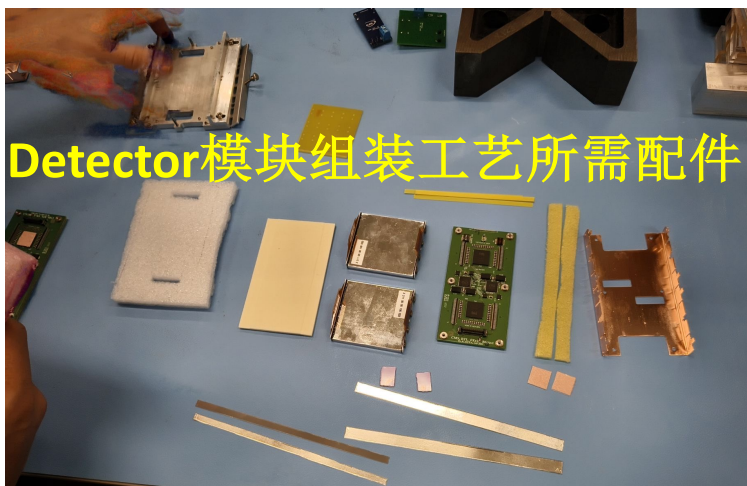
3.2. Detector模块制造工艺及质控 王锦 (PKU)

- Detector模块是将Sensor模块，FE前端电子学板及用以热交换的铜壳集成后的探测器模块层次
- FE前端电子学板搭载TOFHIR2读出芯片，该芯片将获取SiPM处信号的到达时间等信息（进一步得到飞行时间及时间分辨等）。
- TOFHIR2读出芯片已经经过研究，证明其在整个HL-LHC期间，都能够保证优于60ps量级的时间分辨

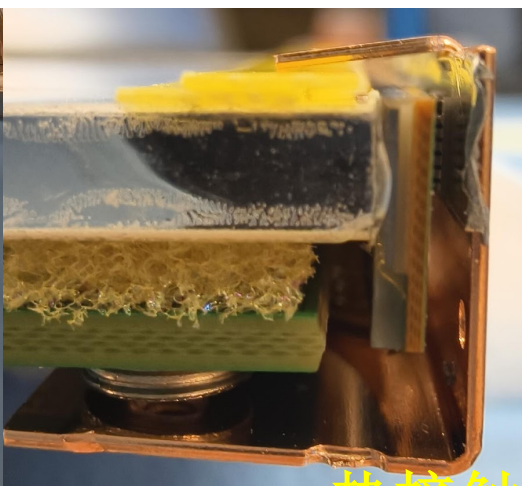


3.2. Detector模块制造工艺及质控 王锦 (PKU)

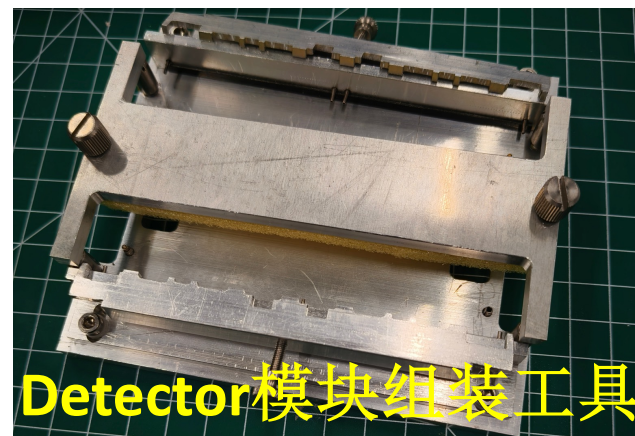
- Detector模块的组装工艺：
 - **热接触**是Detector模块组装的重点关注对象。SiPM上TEC外端与铜壳的良接触，FE前端板上重要芯片表面导热胶垫的覆盖，以及避免LYSO晶体与其他组件的接触是组装中的重要步骤。
 - 因此，Detector模块内部的空间布局 and 填充就显得尤其重要。用以Detector模块的组装工具也经过了数次迭代升级，目前最新版本进行了模块组装测试并基本确定了工艺流程，热接触实现效果良好。



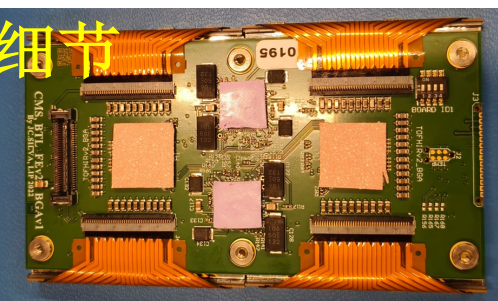
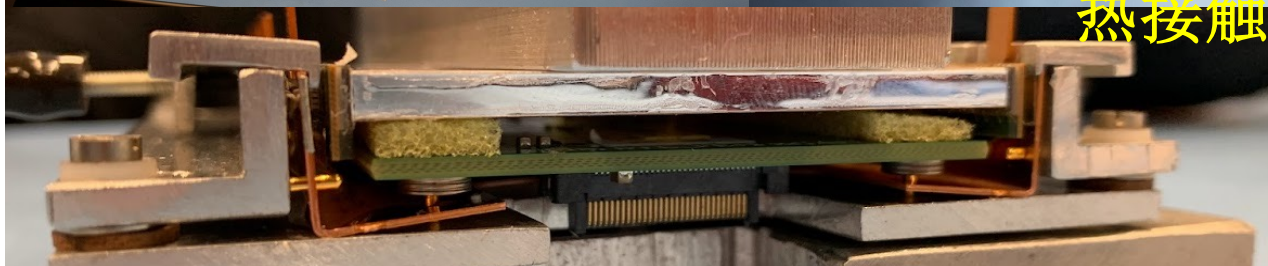
Detector模块组装工艺所需配件



热接触细节

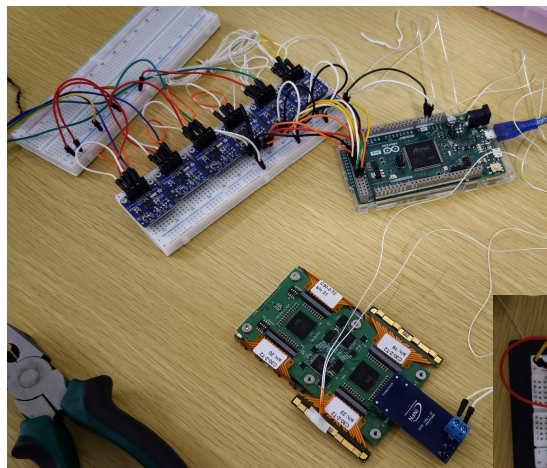


Detector模块组装工具

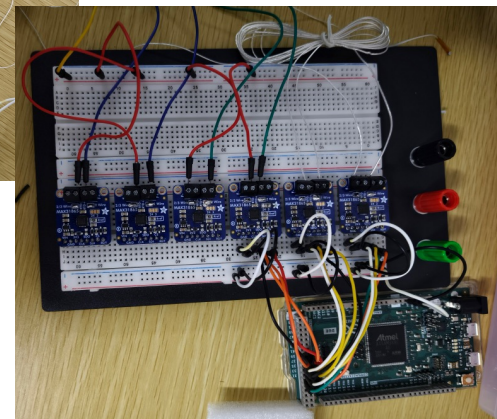


3.2. Detector模块制造工艺及质控 王锦 (PKU)

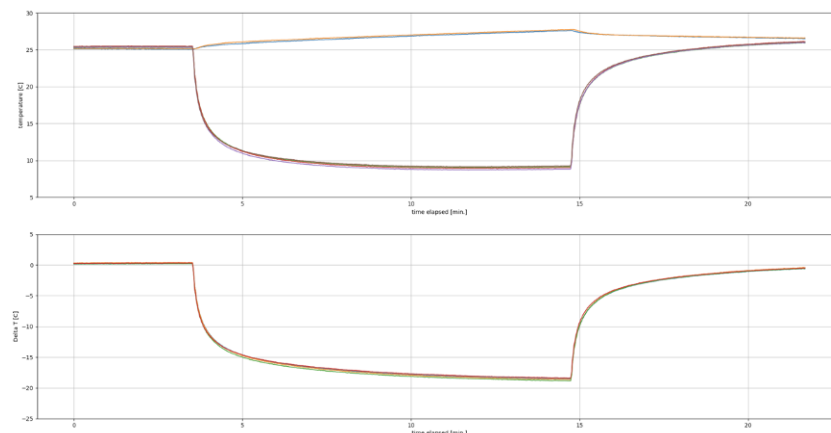
- 基于前文所述, Detector module的质控QAQC主要涉及热耦合检查
 - 需检测电子冷却贴片TEC与导热外壳接触是否良好
 - 上电后TEC是否正常工作, 提供预期的电压梯度
- 初步设计
 - Arduino板与31685 RTD数字转换板连接
 - 温度测量点主要为SiPM一侧 (通过FE板传出), 以及导热外壳copper housing (通过连接PT1000至铜壳外侧实现)
- 目前, 北大已建立单模块6通道热传导质控系统, 下一步将进一步着手于该质控系统的自动化实现, 提高质控系统的工作效率



Detector模块质控搭建c



预期效果



3.3.探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

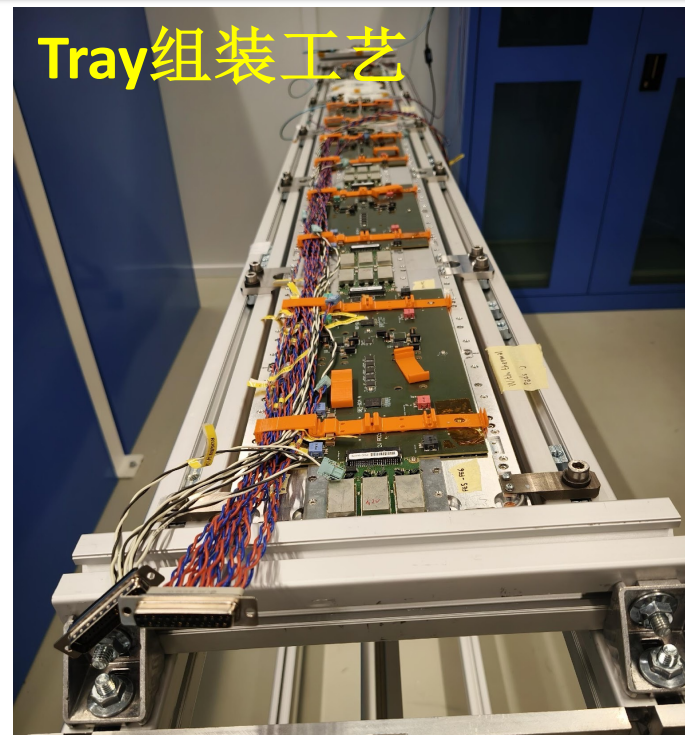
王锦、钱思天 (PKU)
张顺亮 (THU), 李乐言

MTD BTL Tray:

- 单个Tray将会覆盖横向10度，纵向2.5米的探测器范围，总共72条Tray覆盖整个MTD时间探测器的桶部

Tray组装工艺的研制

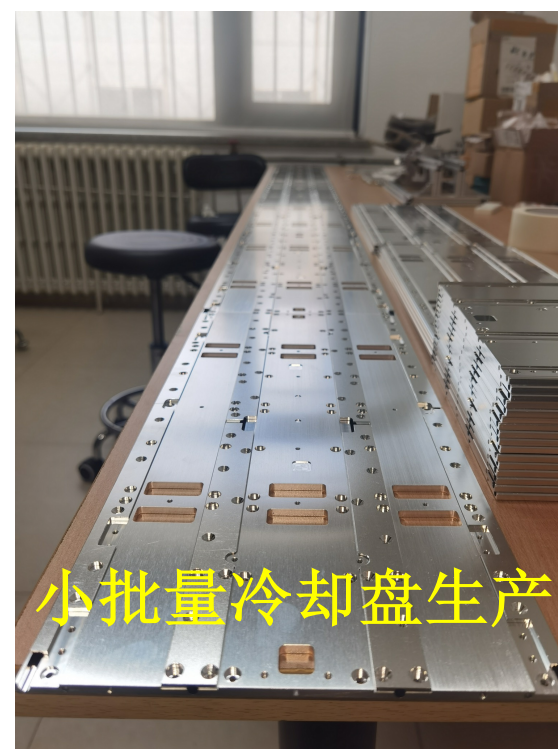
- 2024年3月，在CERN进行了一系列tray组装工艺的研制，**建立了第一个Readout Unit（首次完成detector module单RU的全部组装）**
- 单个RU的全部组装涉及冷却板cooling plate，电子学系统CC board、PCC board及Detector模块的组装。组装后的RU搭载了12个Detector模块，实现了时间、温度等的获取，冷却板及上搭载的温控循环确保了模块及芯片的正常工作。



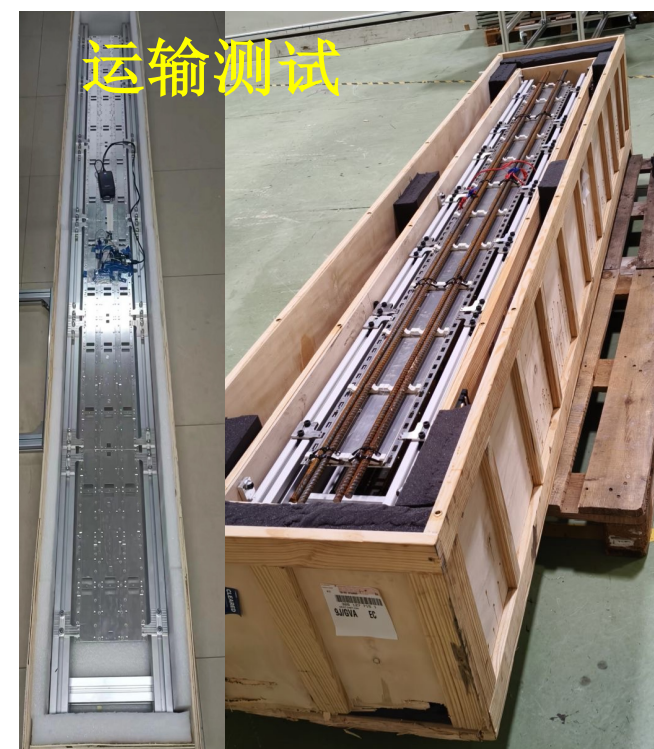
3.3.探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

王锦、钱思天 (PKU)
张顺亮 (THU), 李乐言

- 北大已经生产用以测试的**首批小批量5套冷却盘**，并发往CERN、米兰、弗吉尼亚和加州理工，进行组装研究、冷却测试，以及模拟性质的运输测试（搭载定位系统、冲击力传感器等组件进行运输过程分析，以确认正式批量生产时，运输包装的设计）
- 组装过程中的离线测试需要额外的供电系统，为此需要的供电switch board和供电线缆的测试已经完成



小批量冷却盘生产



运输测试



供电系统测试

Init status		Success	
ALL PS&RU	ON OFF	ON OFF	

bPOL12V PS control (PS0)			
ALL RU	ON	OFF	Status
RU1	ON	OFF	On
RU2	ON	OFF	On
RU3	ON	OFF	On
RU4	ON	OFF	On
RU5	ON	OFF	On
RU6	ON	OFF	On

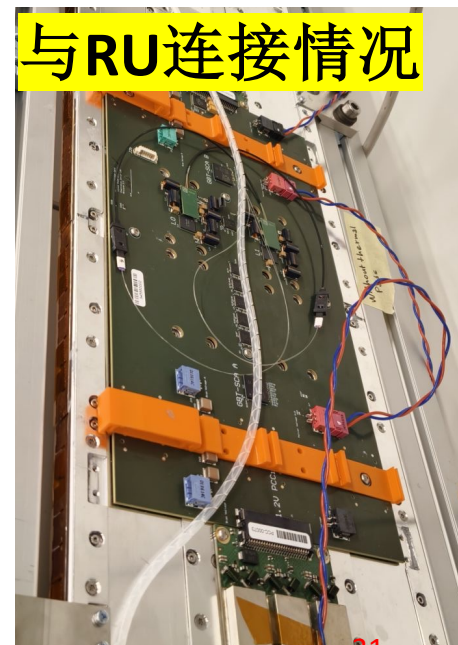
TEC PS control (PS1)			
ALL RU	ON	OFF	Status
RU1	ON	OFF	On
RU2	ON	OFF	On
RU3	ON	OFF	On
RU4	ON	OFF	Off
RU5	ON	OFF	Off
RU6	ON	OFF	Off

ALDO PS control (PS2)			
ALL RU	ON	OFF	Status
RU1	ON	OFF	On
RU2	ON	OFF	On
RU3	ON	OFF	On
RU4	ON	OFF	Off
RU5	ON	OFF	Off
RU6	ON	OFF	Off

#	Timestamp	Direction	Address	Message	Mode	Status
78	2024-02-01 16:58:35	Read	0x21	0xd8	Start&stop	32
79	2024-02-01 16:58:35	Write	0x21	0x1	Start	64
80	2024-02-01 16:58:35	Read	0x21	0xe7	Start&stop	32
81	2024-02-01 16:58:35	Write	0x21	0x2	Start	64
82	2024-02-01 16:58:35	Read	0x21	0xd8	Start&stop	32
83	2024-02-01 16:58:35	Write	0x21	0x2 0xf8	Start&stop	64
84	2024-02-01 16:58:35	Write	0x21	0x2	Start	64
85	2024-02-01 16:58:35	Read	0x21	0xf8	Start&stop	32
86	2024-02-01 16:58:35	Write	0x21	0x1	Start	64
87	2024-02-01 16:58:35	Read	0x21	0xc7	Start&stop	32

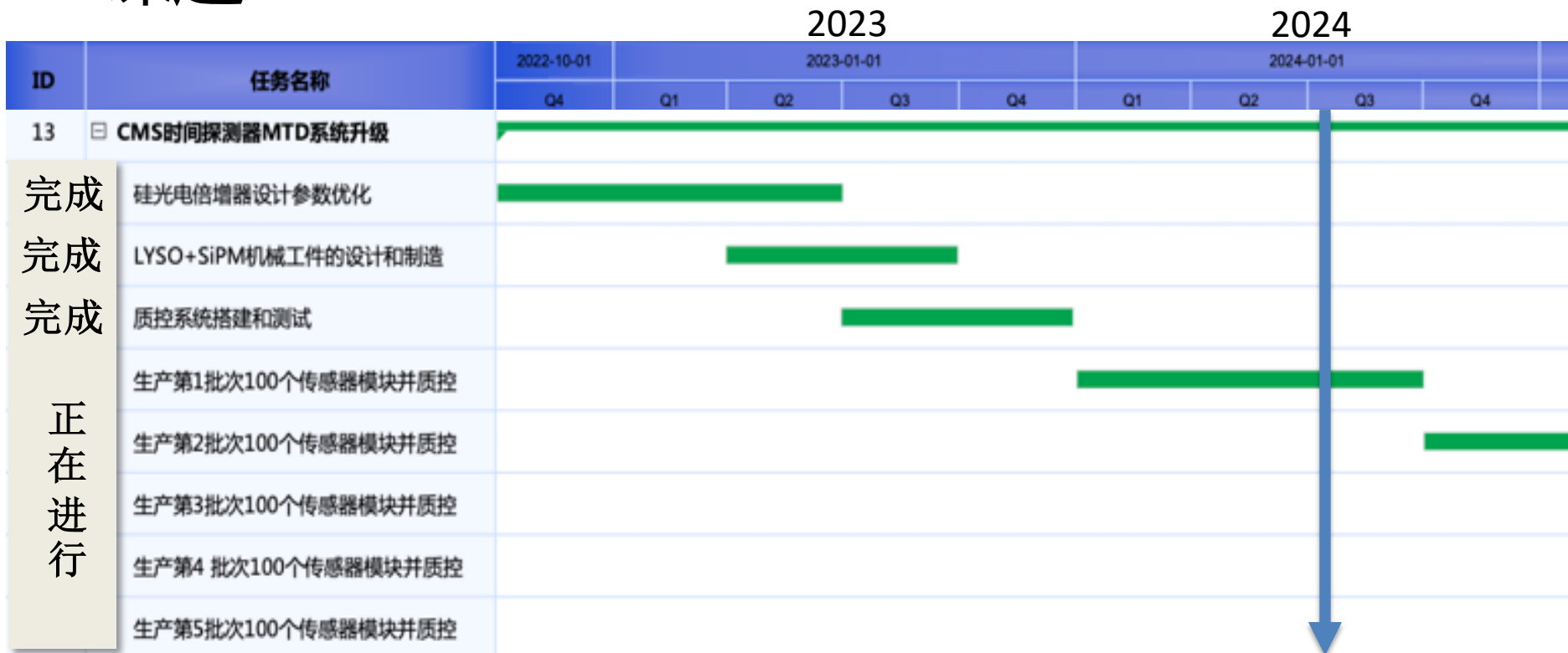
3.3.探测器整机Tray组装工艺的研制及质控

- 目前正在CERN进行1号tray的建造，在现有工艺的基础上，将结合先前测试结果和实时反馈，敲定最终tray工艺。
- 基于Serenity板的tray质控系统正在建立中。
 - 该系统将与tray连接，完成离线质控以及安装至CMS探测器后运行期间，温度获取、偏压控制、数据采集等功能。
 - 对于1号tray，也将在近期组装完毕后，进行相应的质控研究，同时进一步优化tray质控系统



4. 项目研究计划和进展情况

• 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

4. 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



4.Gluing & Assembly Workshop

王锦



2024年3月在CERN,
首次完成detector module单RU的全部组装

4.MTD BTL Tray Workshop

王锦
秦俊凯 (THU)



2024年7月，CERN，将首次完成整个Tray的全部组装，并进行质控，确定组装全部工艺

4.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

Backup

1. 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

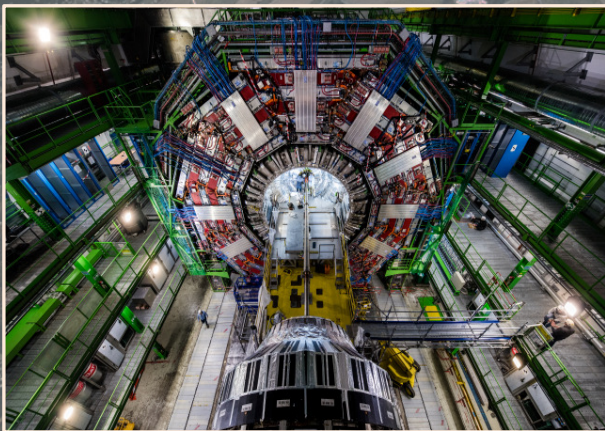
CMS国际合作组：

~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

1. 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

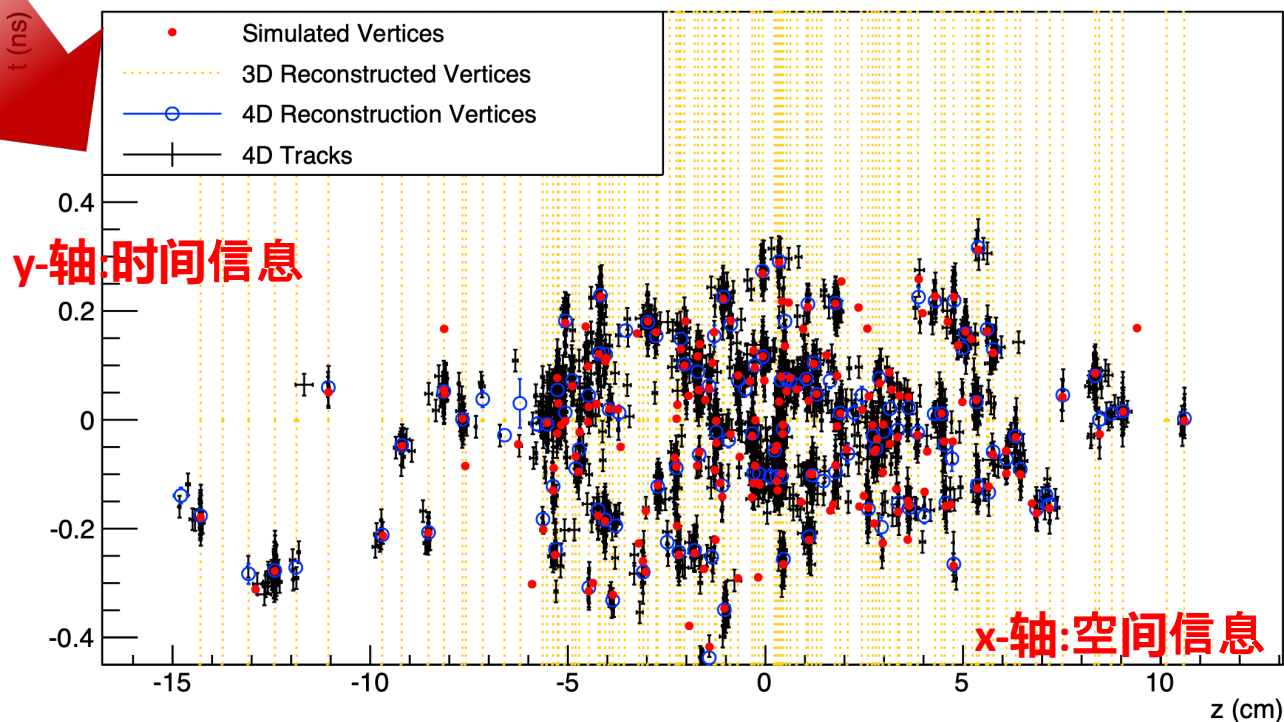
1. MTD引入时间轴

HL-LHC升级后每次对撞产生近200个顶点

~10 cm

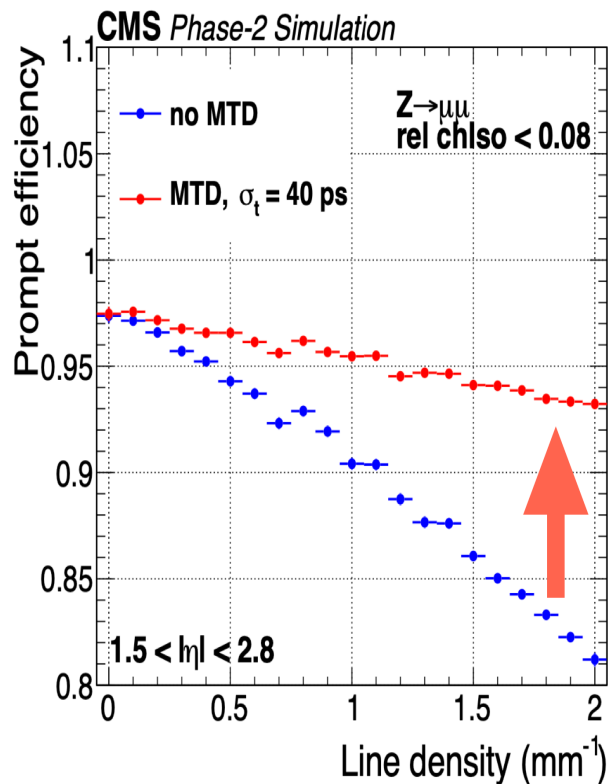
- 传统方案：进一步提高径迹室空间分辨率

- 新方案：测量顶点的发生时间

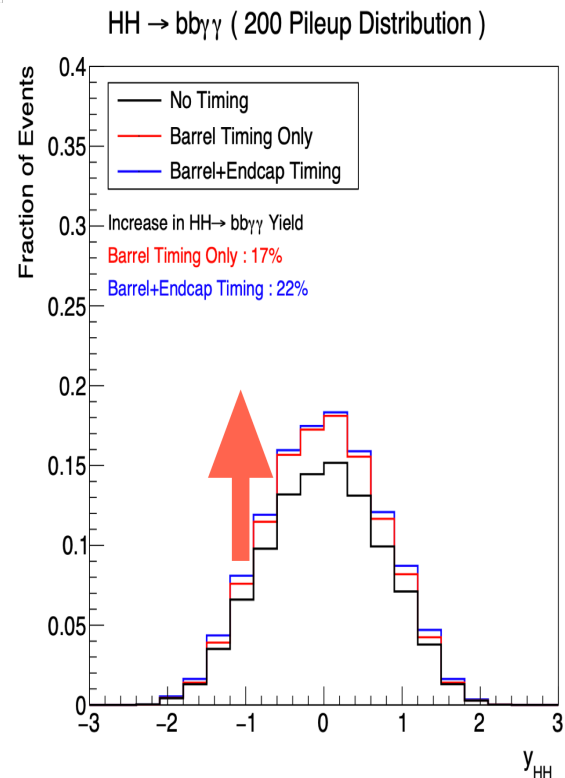


物理意义

- 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%



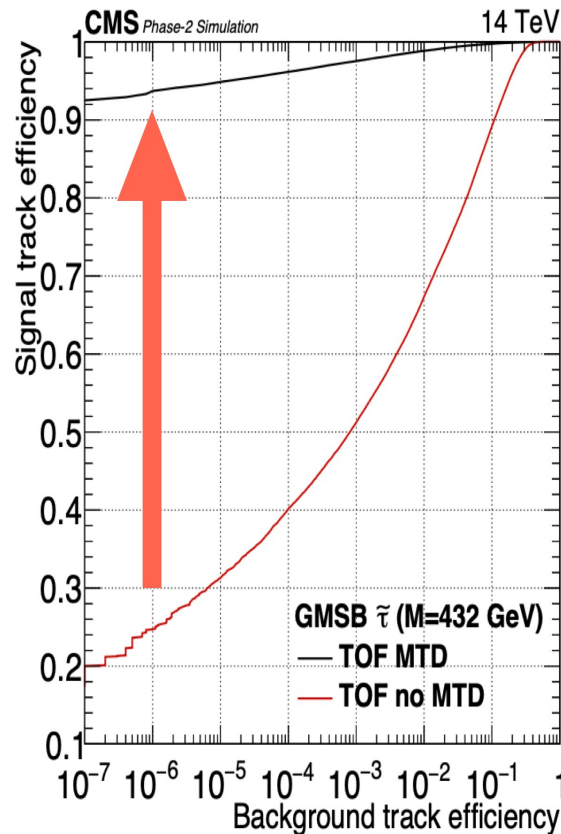
轻子孤立度



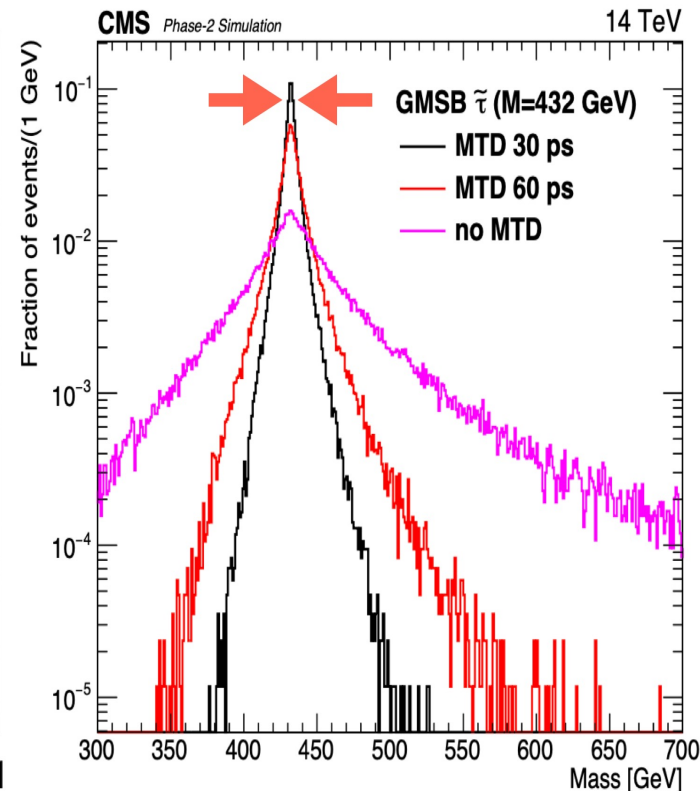
信号接受度

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

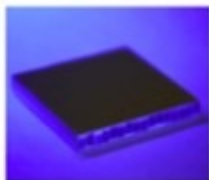
研究内容、路线与创新点

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

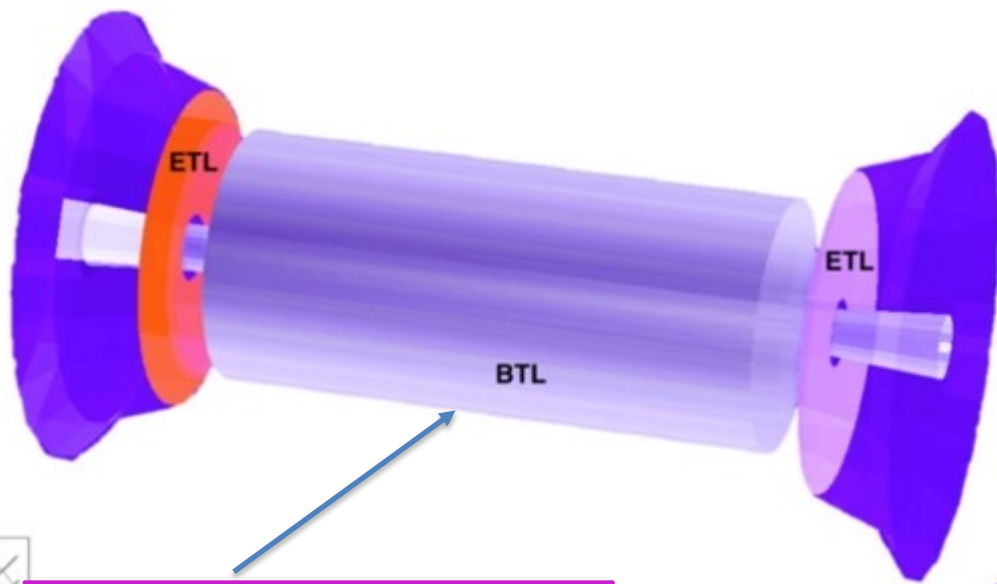
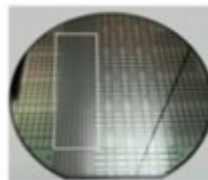
BTL: LYSO bars + SiPM readout:

- 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

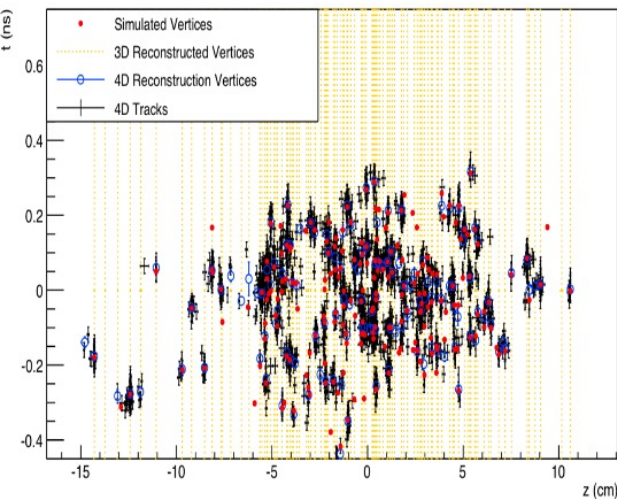
亮点:

- 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

原理与优势

MTD时间探测器的原理与优势

Experiment	r (m)	σ_T (ps)	$r/\sigma_T (\times 100)$ ($m \times ps^{-1}$)
STAR-TOF	2.2	80	2.75
ALICE-TOF	3.7	56	6.6
CMS-MTD	1.16	30	3.87



- LYSO晶体接收到pp对撞产生的次级粒子时将作为通道传输光信号;
- SiPM接收信号转换为电信号, 快速响应电信号记录飞行时间。
 - SiPM体积小, 时间响应快, 对磁场不敏感, 抗辐照, 增益 $1.5 - 4 \times 10^5$
 - 光子探测效率: 20-40%
 - 时间分辨率的计算

➤ 30ps 时间分辨率意味着:

- 大部分顶点发生在前后200ps内;
- 30ps可以把这400ps的顶点分割成10多个bin而primary vertex来自其中一个bin, 剩下的bin可直接判为Pileup

