

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，北京，2026年06月28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：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

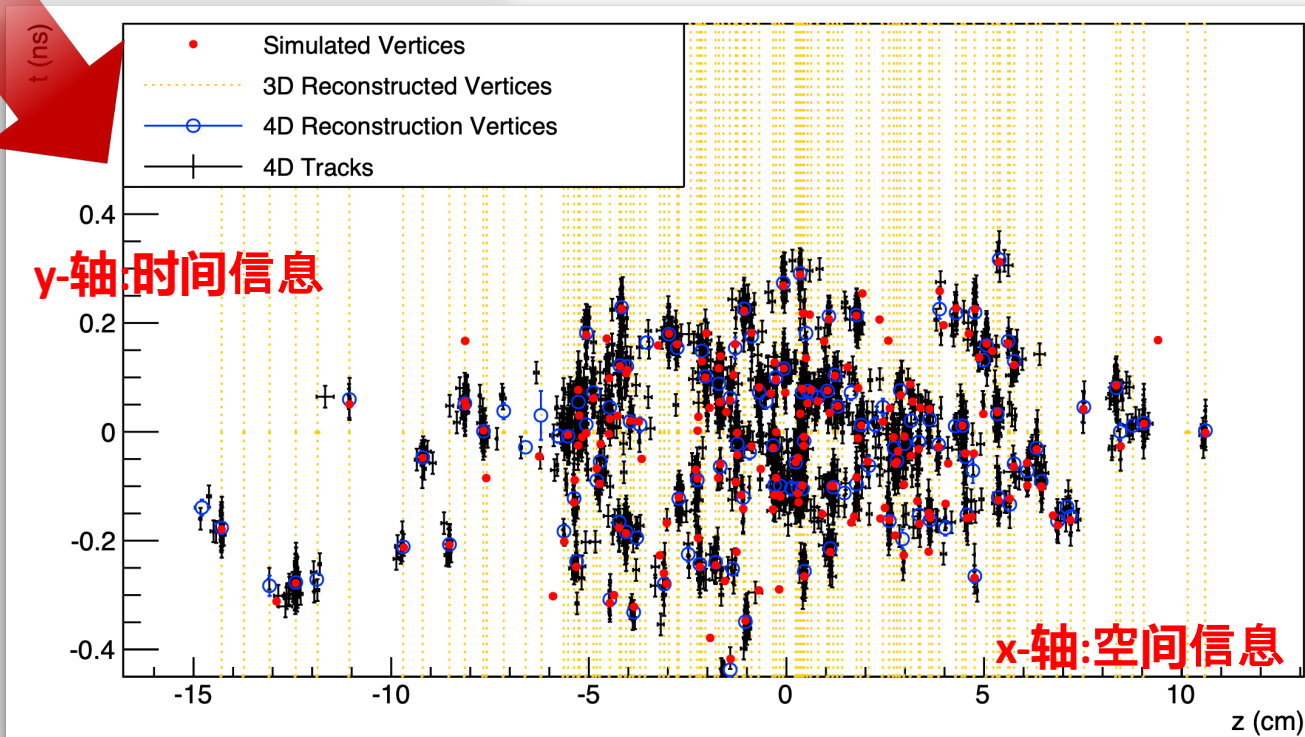
MTD引入时间轴

HL-LHC升级后每次对撞产生近200个顶点

~10 cm

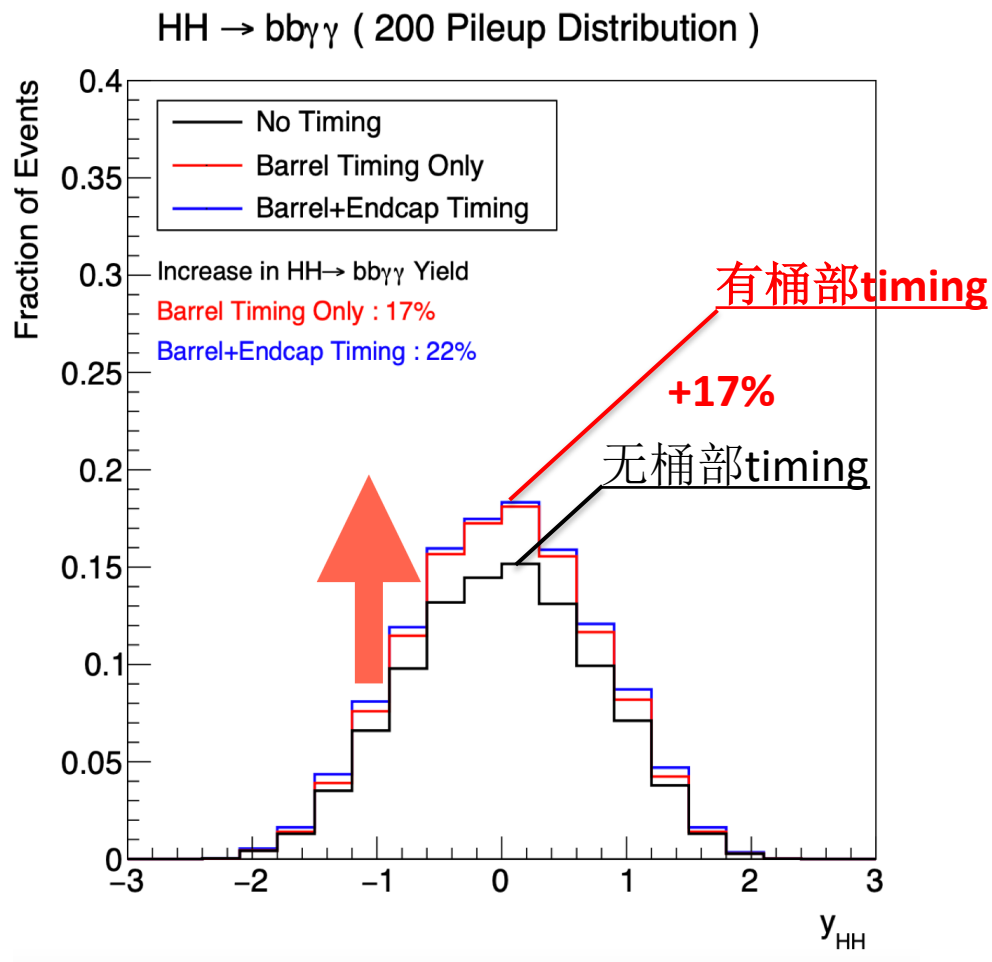
- 传统方案：进一步提高径迹室空间分辨率

- 新方案：测量顶点的发生时间



物理意义

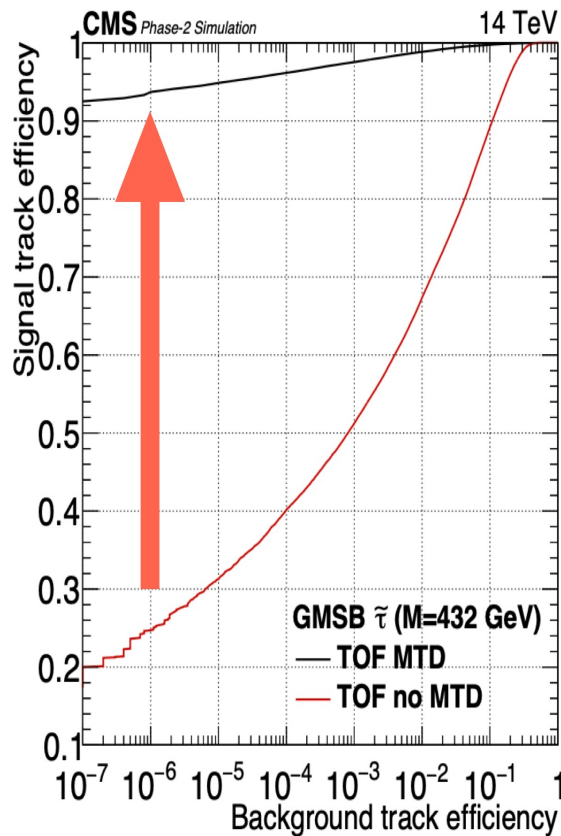
- MTD可有效压低 pileup，整体提高物理测量的精度
- 提高单希格斯粒子测量精度20-30%
- 提高双希格斯粒子信号接受度20%



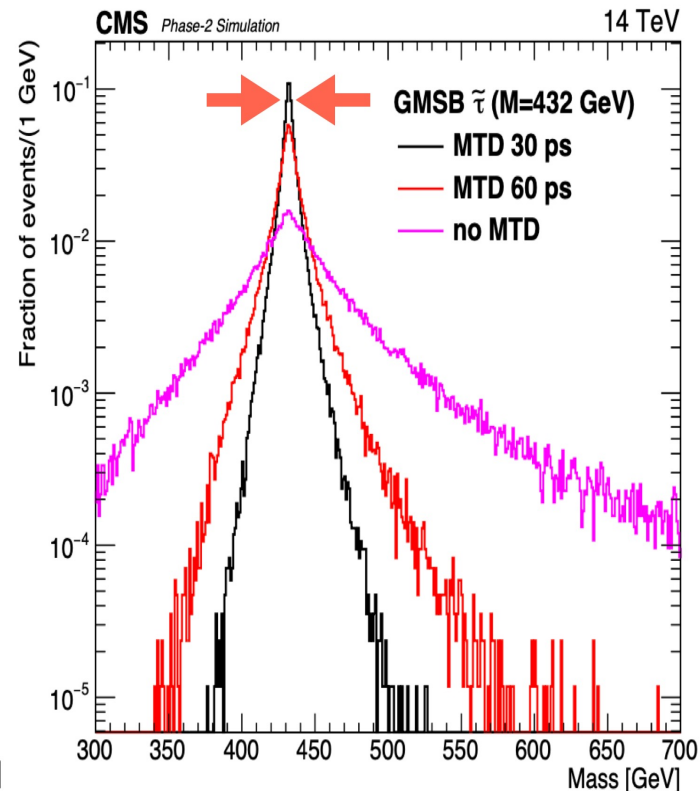
信号接受度

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 90mm \times 140mm, 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

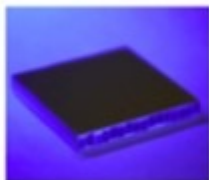
研究内容、路线与创新点

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

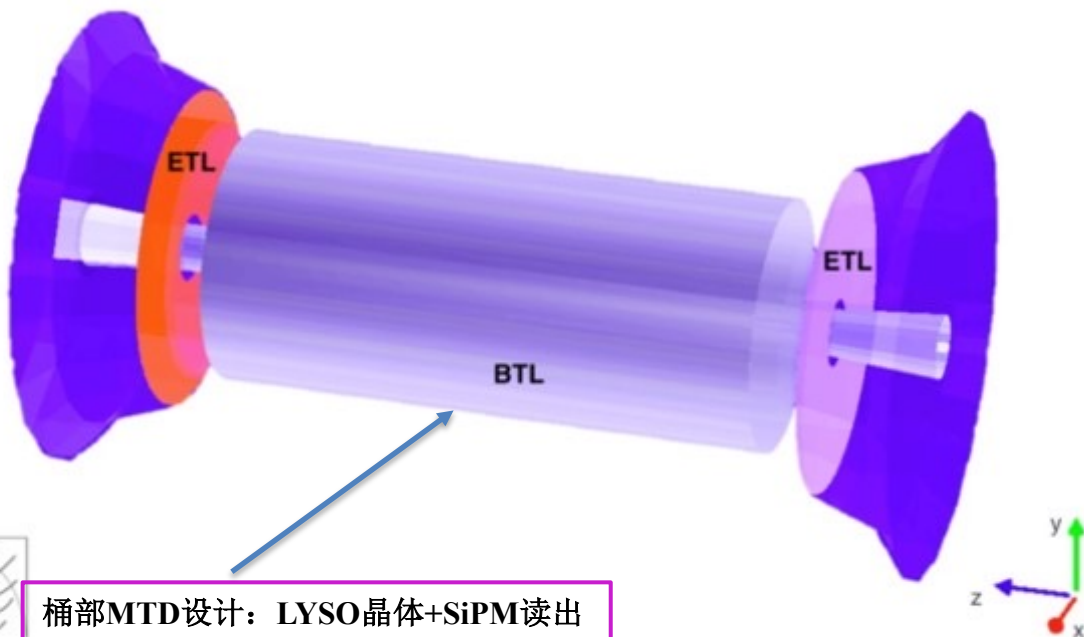
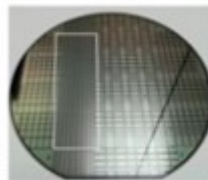
BTL: LYSO bars + SiPM readout:

- TK / ECAL interface: $|\eta| < 1.45$
- 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: $1.6 < |\eta| < 3.0$
- 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



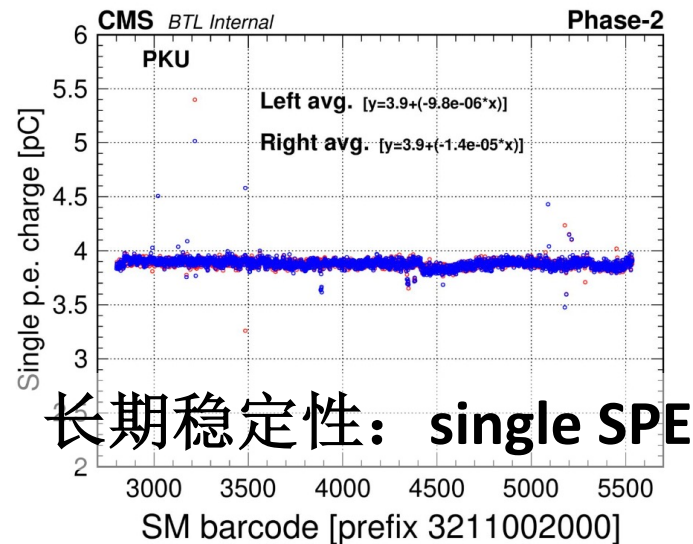
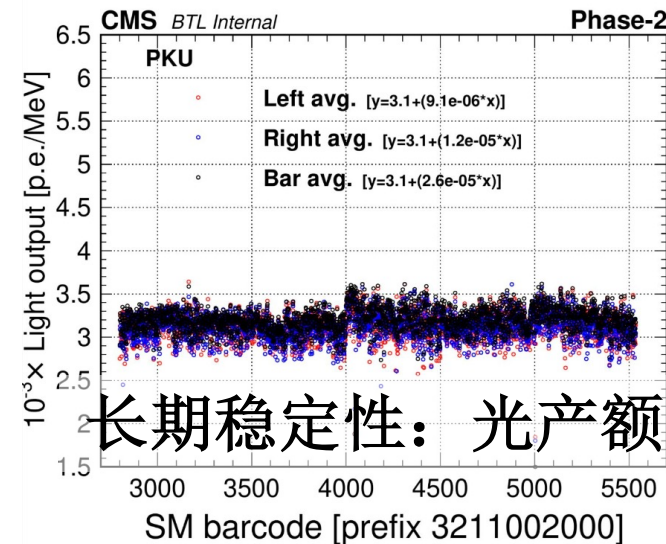
主要进展

1. 完成**Sensor**模块的批量生产与质控，测量时间分辨率
2. 完成**Detector**模块的批量生产与质控
3. 完成探测器整机**Tray**质控系统的设计，并完成批量生产

本次报告主要包括2026年上半年进展

1. Sensor模块的批量生产与质控

- Sensor模块研发、批量生产已全部结束，良品率~95.5%
 - 共生产并质控超过2700块模块
 - 是首个完成Sensor模块批量生产的组装中心，并完成全部质控
- 质控对每一个模块测量其light yield，但无法在实验室对每一个模块测量时间分辨率
 - 解决方案：通过高能束流对light yield较低的模块，验证其时间分辨率是否达标
 - Light yield是时间分辨率的主要因素之一

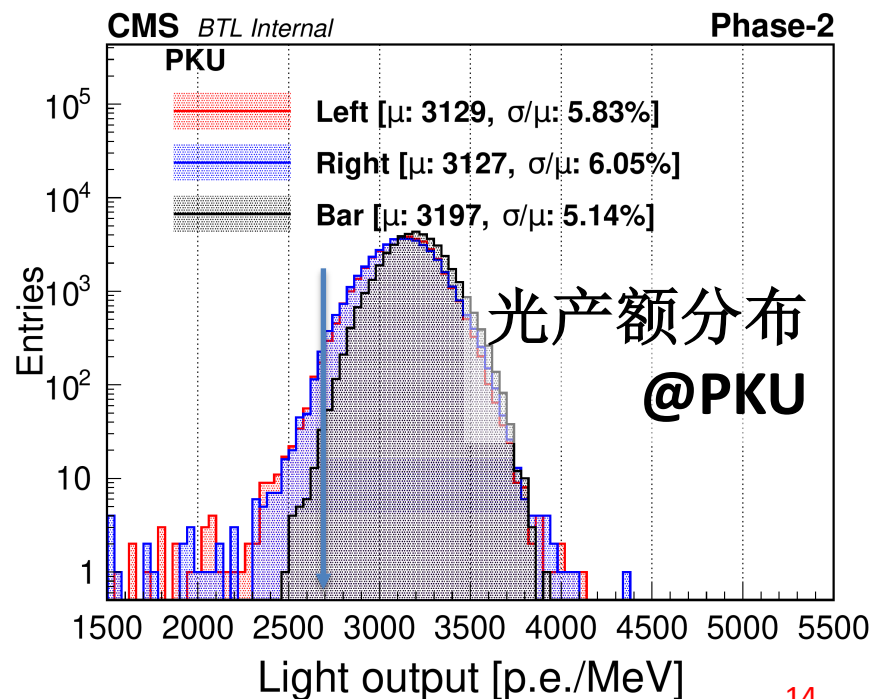
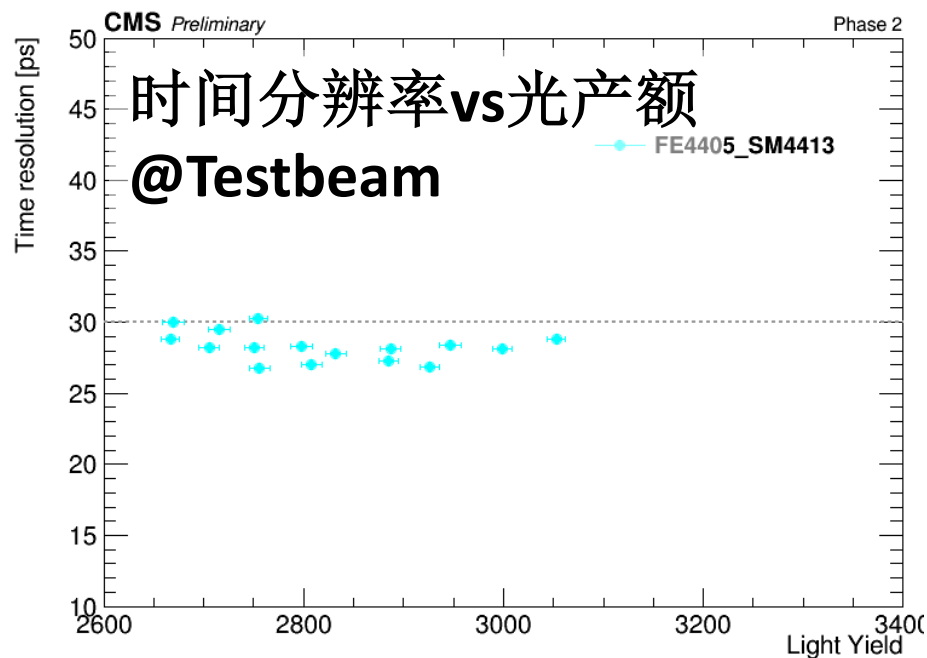


N_{pe} 正比于 light yield

$$\sigma_{ph} \propto \sqrt{\frac{\tau_r \cdot \tau_d}{N_{pe}}}$$

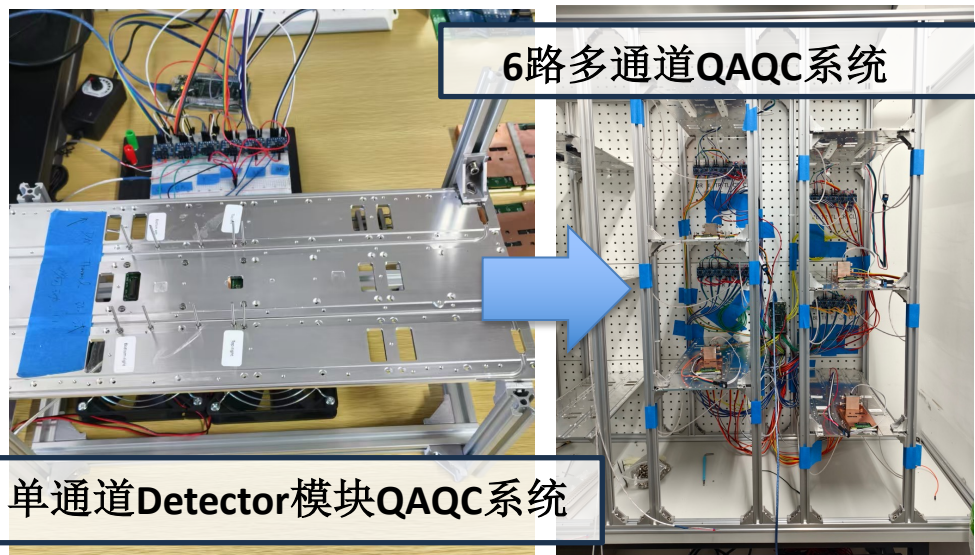
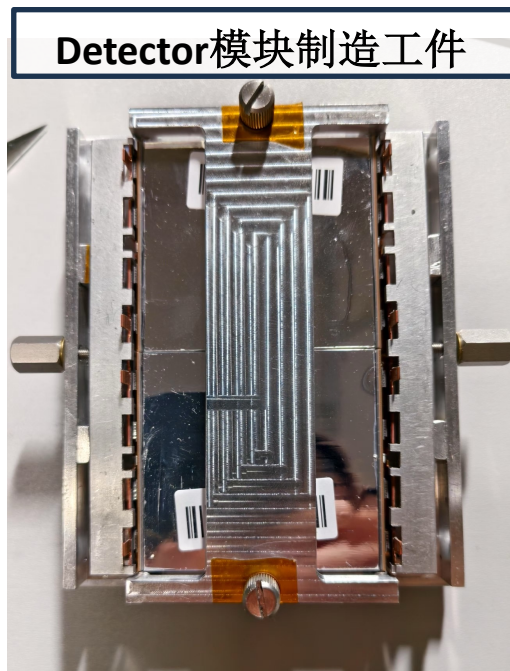
Sensor模块的时间分辨率

- 在CERN H8束流180 GeV pion，做束流测试，测量模块的MIP时间分辨率
- Light yield为~2700 p.e./MeV的模块时间分辨率高可以达到30 ps，**满足指标60 ps要求**
 - 绝大多数模块light yield高于2700，时间分辨率皆达标



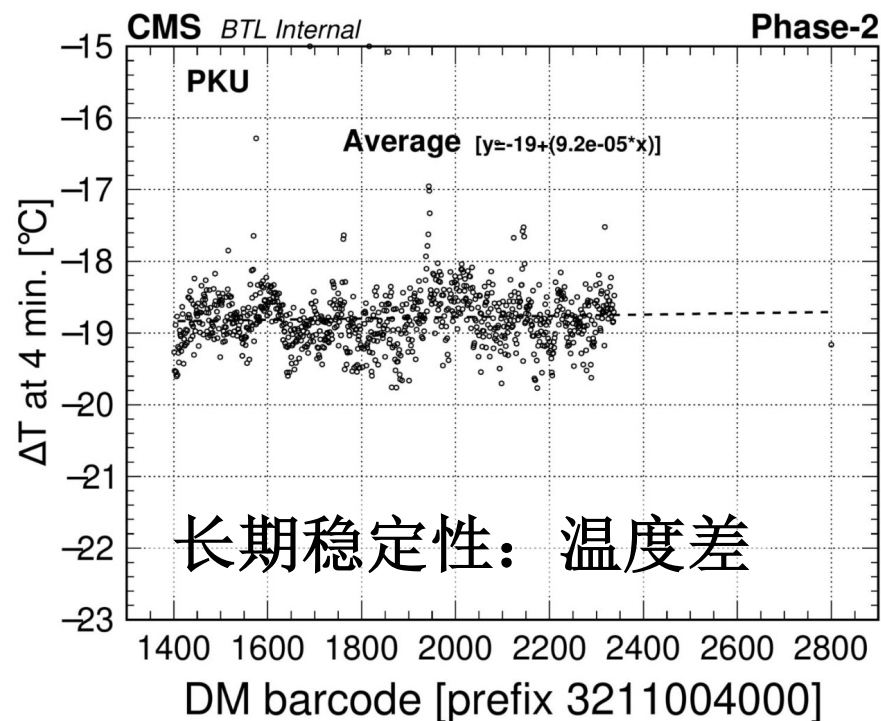
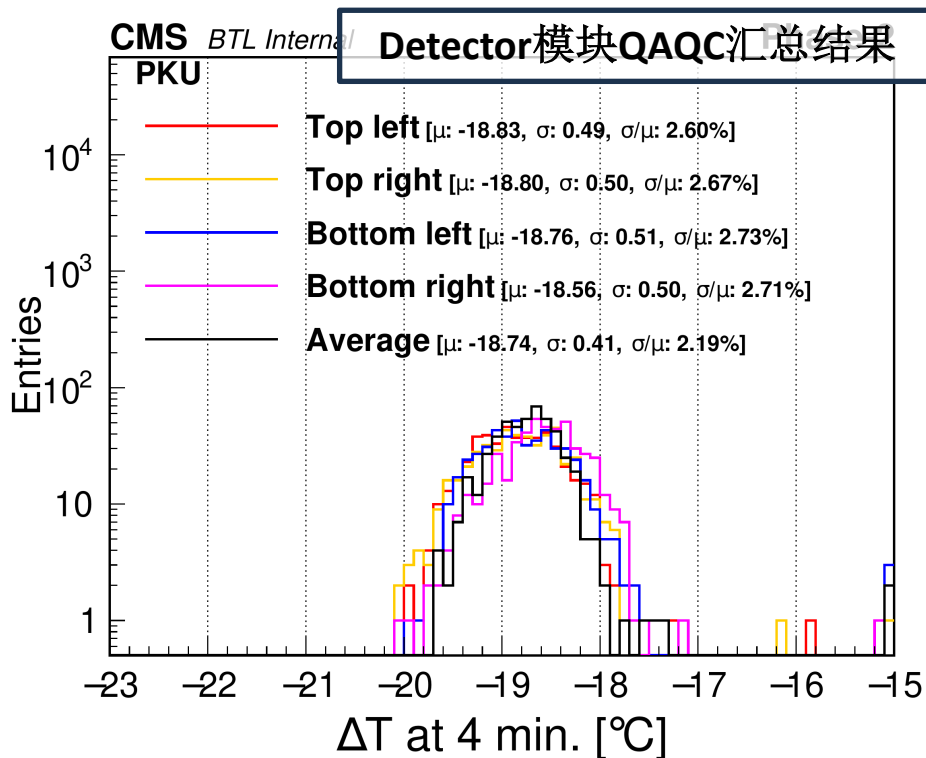
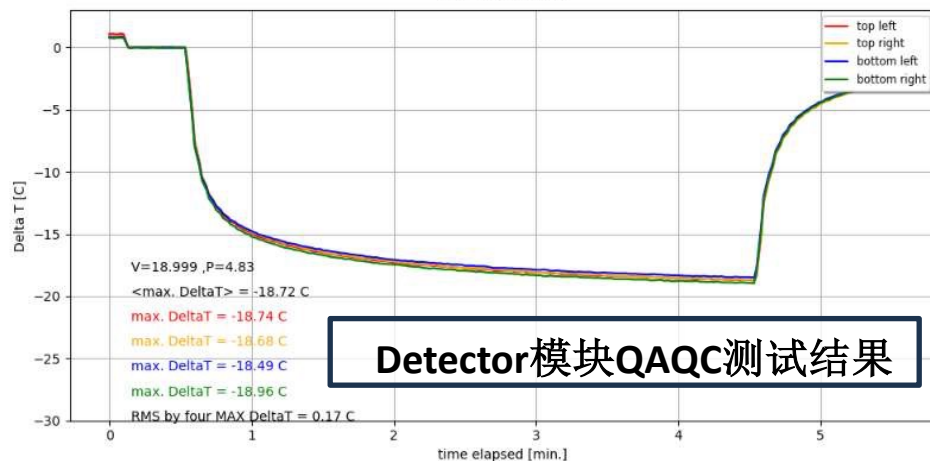
2. Detector模块的批量生产与质控

- Detector Module 组装工艺确定
 - 完成所有模块的批量建造，超过1200块
- 质控集中在热接触的测量
 - 自主研发6路多通道Detector模块QA/QC系统，用于批量质控，该系统借助了北京大学生产的小批量测试冷却板
 - 使得Detector模块QA/QC时间大大降低，将总时间从300小时降低到约60小时



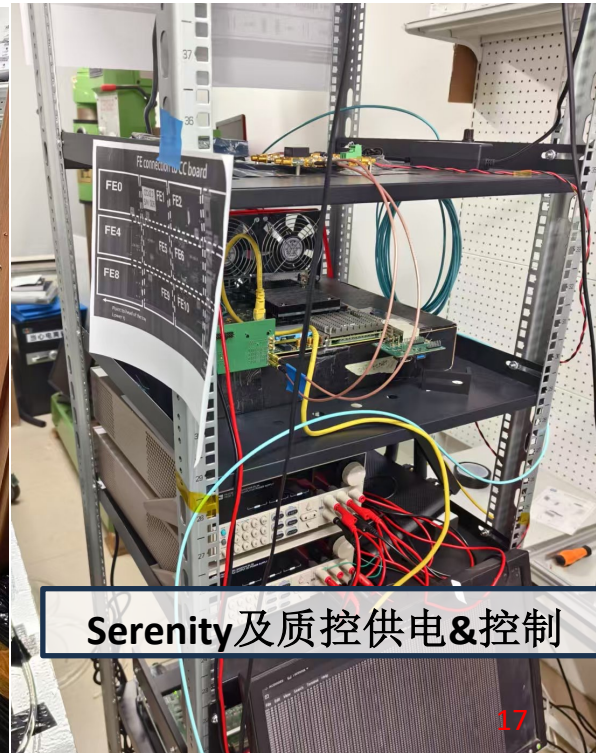
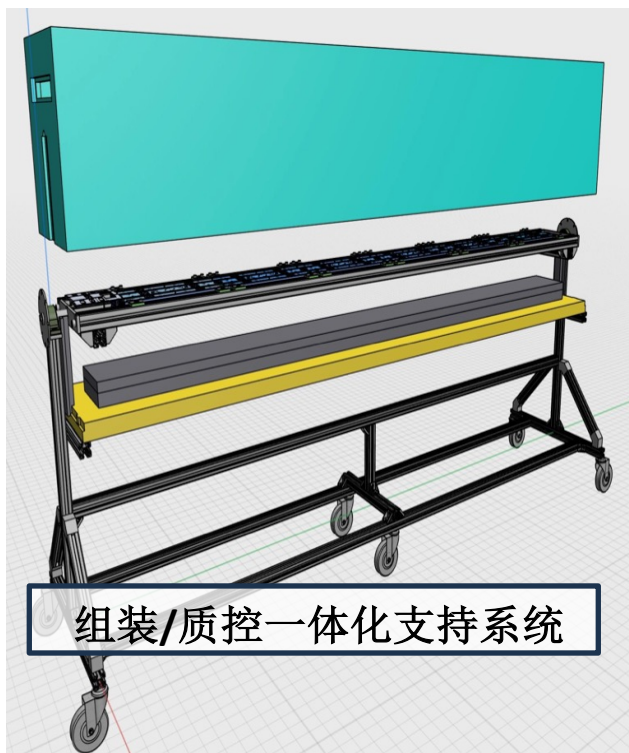
Detector模块质控

- 质控确保Detector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**
- 组装良品率正常



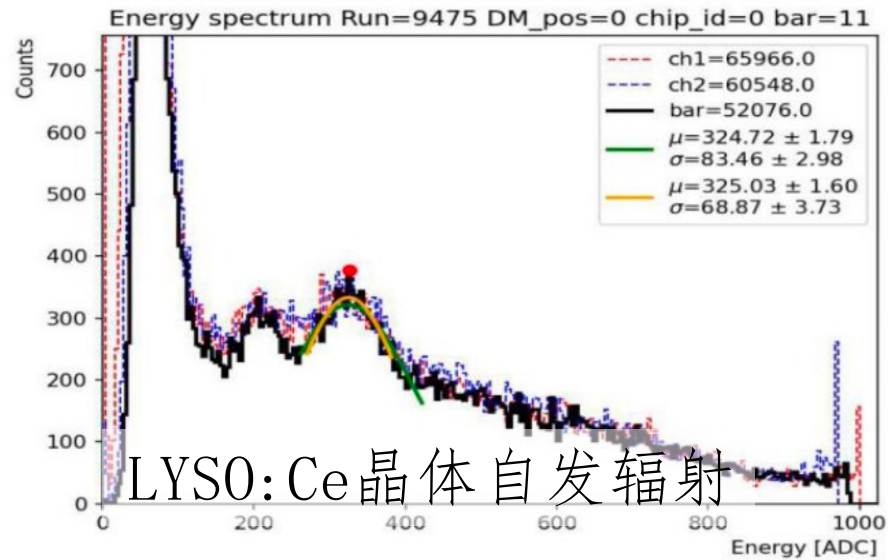
3. 整机Tray质控系统

- 设计并搭建了一套集成化装配与测试平台质控系统，配备可移动平面结构，可在同一框架上完成 Tray 的装配与测试
 - 测试平台主体为**恒温暗箱**，以保证完全遮光和稳定的温度环境
 - 水冷循环系统和**温度监测**系统，用于维持稳定的测试环境
 - 基于**Serenity**板和定制供电板的探测器整机Tray QAQC调试和升级已完成，并集成了电源与控制系统，实现Tray质控的自动化



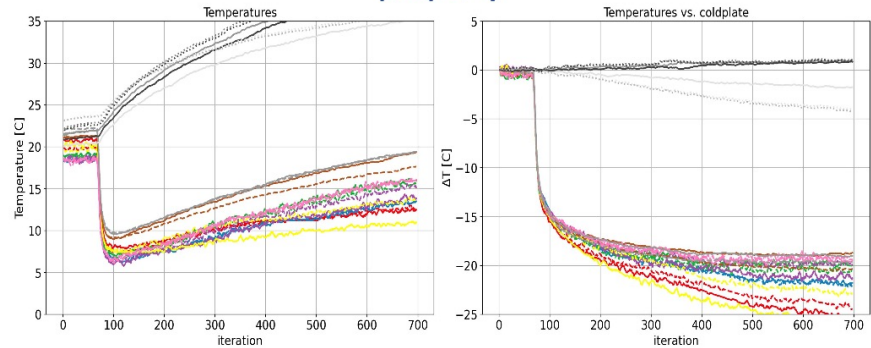
整机Tray批量质控

- 对整机 Tray 的电子学完整性与热性能进行验证，主要包括：
- **电子学链路**检查
检查读出板、光纤链路与 CC 板之间的连接连续性，确保数据采集链路正常。
- 前端电子学**响应**测试
利用 LYSO:Ce晶体自发辐射的 307 keV 能峰，验证 TOFHIR2C 前端电子学的能量响应
- **温度循环**测试
评估 TEC 的冷却能力、温度稳定性及反馈控制性能，验证整机热特性，为长期运行中 SiPM 暗计数率控制提供保障。
- QA/QC结果表明，全部建造的18个 Tray 电子学链路与温控系统均运行正常，**整机性能满足设计要求**



TEC Functionality Check

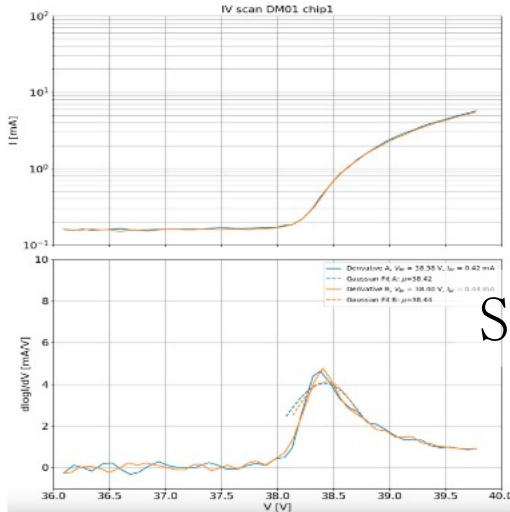
- Monitor temperature to ensure the TEC is operating properly



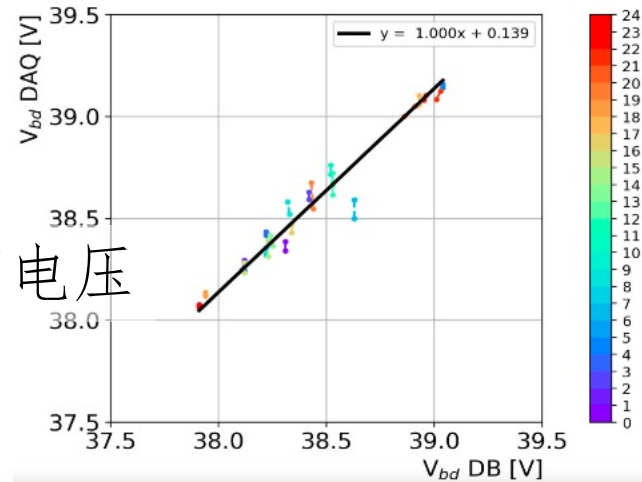
温度循环测试 ΔT

IV scan for every SiPM array

- Compare with database to make sure no damage and ALDOs work well

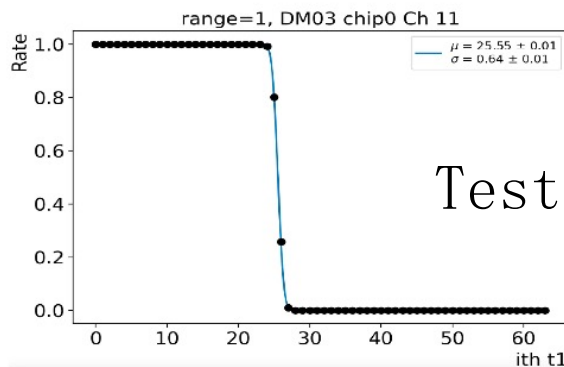


SiPM击穿电压

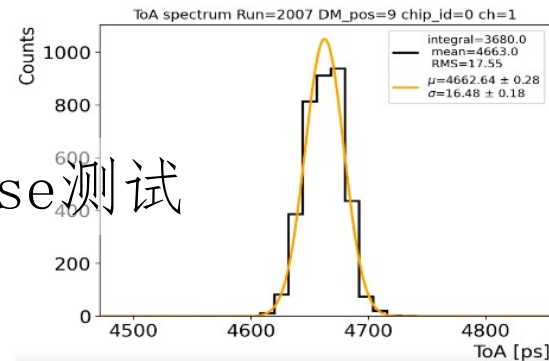


Trigger on digital test pulses and measure the time of arrival using in situ calibs

- Ensure continuity and confirm that all channels are alive
 - Measure TDC resolution



Test Pulse测试



Tray整机交付

2025年9月，北大完成第一条探测器整机Tray的交付



北大生产的最后一个tray
2026.6.15



- 在四个组装中心中，我们最早交付至CERN第一个tray，也是最早交付最后一个tray
- Tray整机的本地测试皆已通过了严格的质控

Tray

	CIT	MIB	PKU	UVA	Total	Fraction
Assembled at BAC	15	17	18	17	67	93.06%
QA/QC passed @ BAC	14	17	18	16	65	90.28%
Shipped	2	12	18	0	32	44.44%
Arrived @ CERN	2	12	18	0	32	44.44%
Tested @ CERN	0	3	5	0	8	11.11%
QA/QC passed @ CERN	0	2	1	0	3	4.17%

主要进展和阶段性成果总结

1. Sensor模块的批量生产与质控

1. Sensor模块的批量生产从2024年9月起开展
2. 截至目前我们已经生产2731块Sensor模块，完成全部模块的生产与质控
3. 我们是首个完成Sensor模块的批量生产的组装中心，成品率超过95%

2. Detector模块的批量生产与质控

1. 我们已经生产1207块Detector模块，完成全部模块的生产与质控
2. 自主研发多通道Detector模块质控系统，大幅提升质控效率

3. 探测器整机Tray组装与质控

1. Tray组装工艺完全确定，基于Serenity板的质控系统建造完成
2. 目前已完成所有18tray整机的生产与质控

- 高质量完成中国建造份额，已交付CERN全部整机成品
 - 在全球四个组装中心中，率先完成建造任务
- 并收到Physics Reports邀请，撰写长篇时间探测器综述文章
- 【 Physics Reports 1156 (2026) 1–39 】
- 感谢北大、清华和北航的老师同学共同努力使得桶部项目按期进展
- 感谢CERN电子学组和北京海关，已办理芯片禁运临时许可和进口免税并批量进口原材料
- 北大组近期MTD convener情况：

MTD DPG L3: Claudio Quaranta ;MTD BTL DAQ L3: Mingxuan Zhang & Licheng Zhang(graduated from PKU)²¹

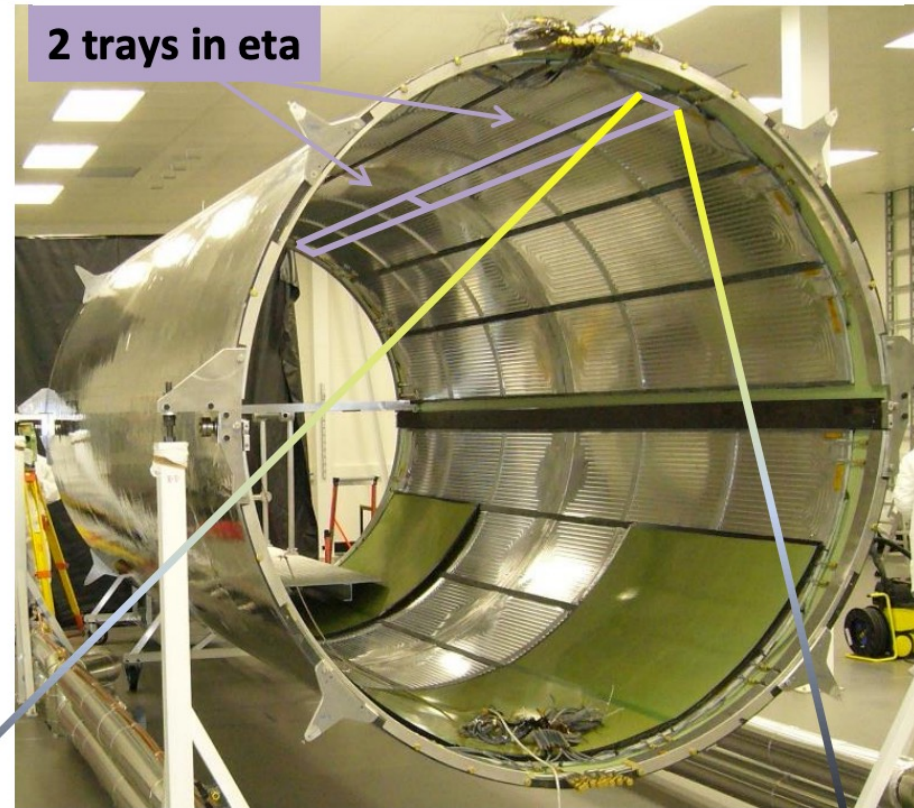
Backup

桶部MTD BTL结构

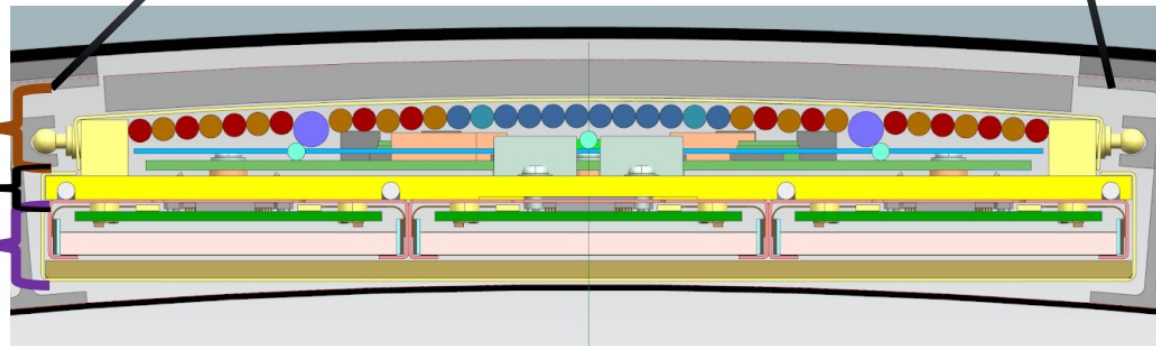
- BTL will be attached to the inner wall of the BTL Tracker Support Tube (BTST).
- BTST dedicated design to accommodate BTL
- Cold volume shared with Tracker (TRK).

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.



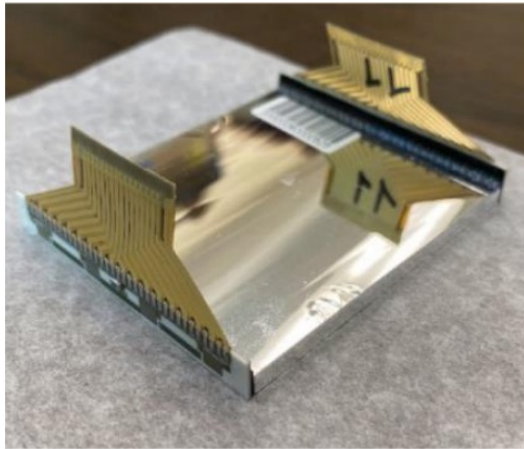
- 1) Front End electronics, segmented into six Readout Units (RU)
- 2) Cooling tray, providing mechanical support, CO₂ cooling pipes.
- 3) Sensor layer, segmented into modules (12 modules per RU with 2 sensor modules each)



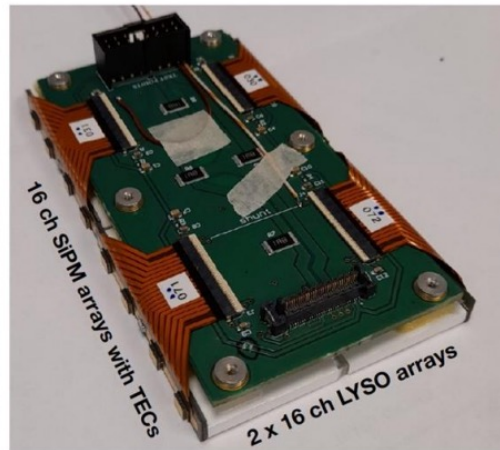
BTL modules

- 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



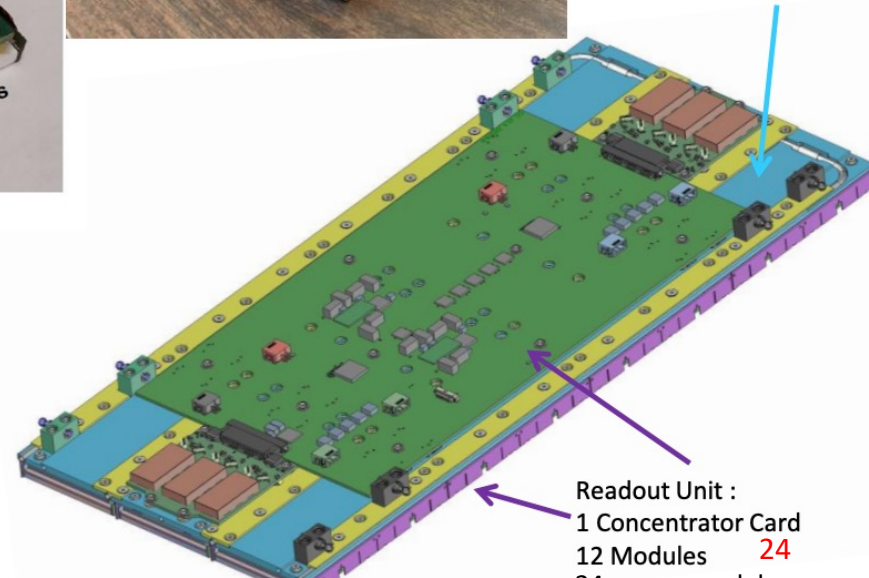
BTL module



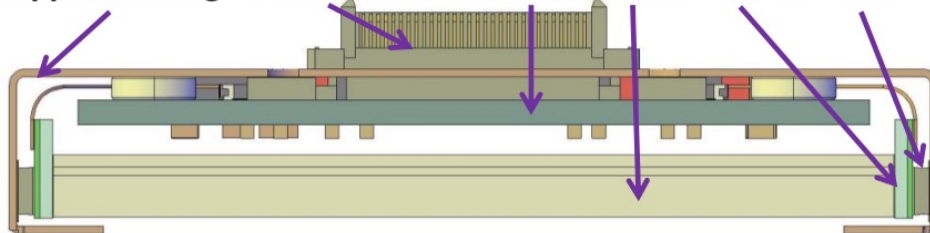
BTL detector module



Cooling plate



Copper housing FE connector FE board LYSO SiPM TEC



Readout Unit :
1 Concentrator Card
12 Modules
24 sensor modules