



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics
Chinese Academy of Sciences

面向AMS-02等实验的 硅微条探测器研发和进展

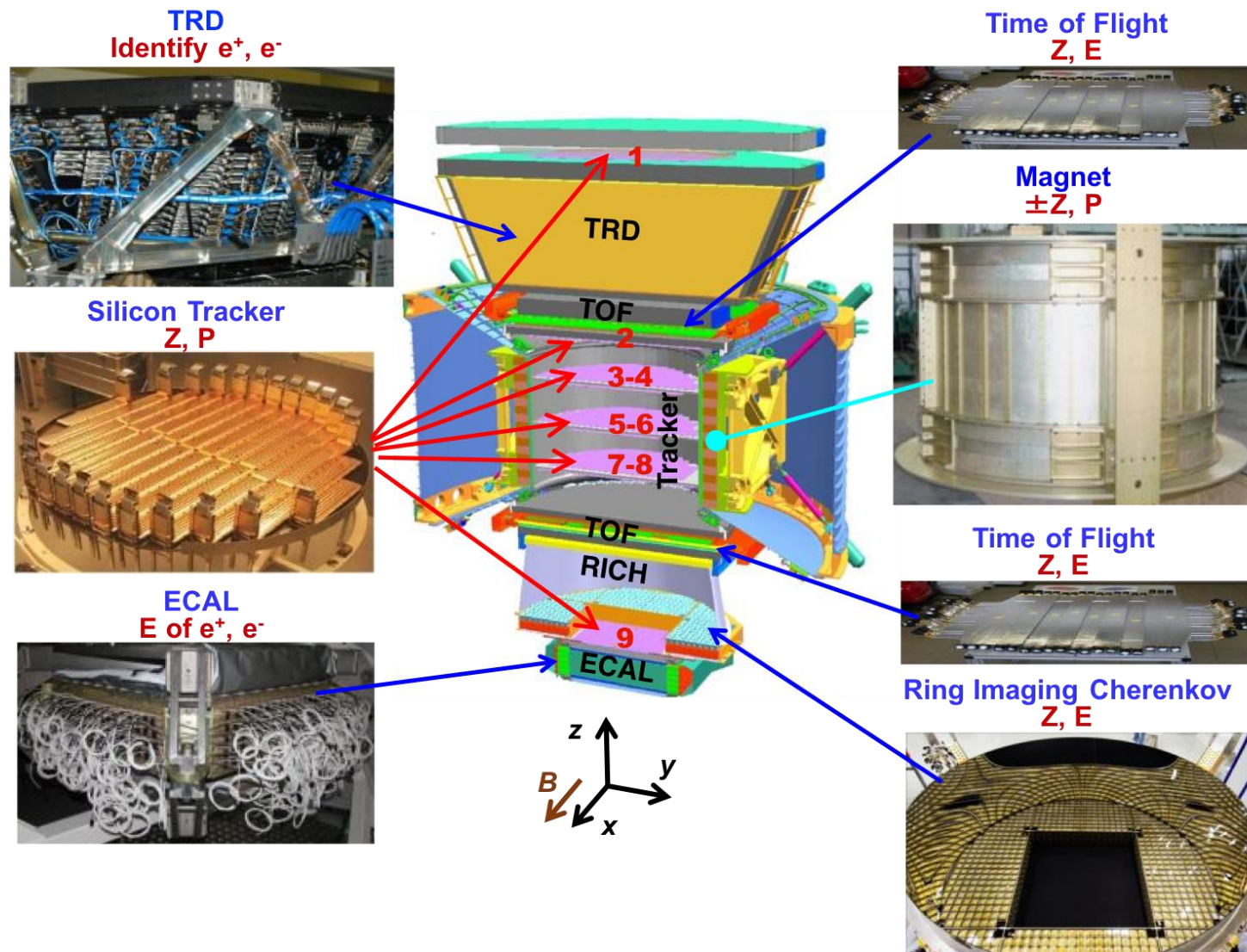
徐子骏 (xuzj@ihep.ac.cn, 中科院高能物理研究所)

上海, 2026年4月

第六届半导体辐射探测器研讨会

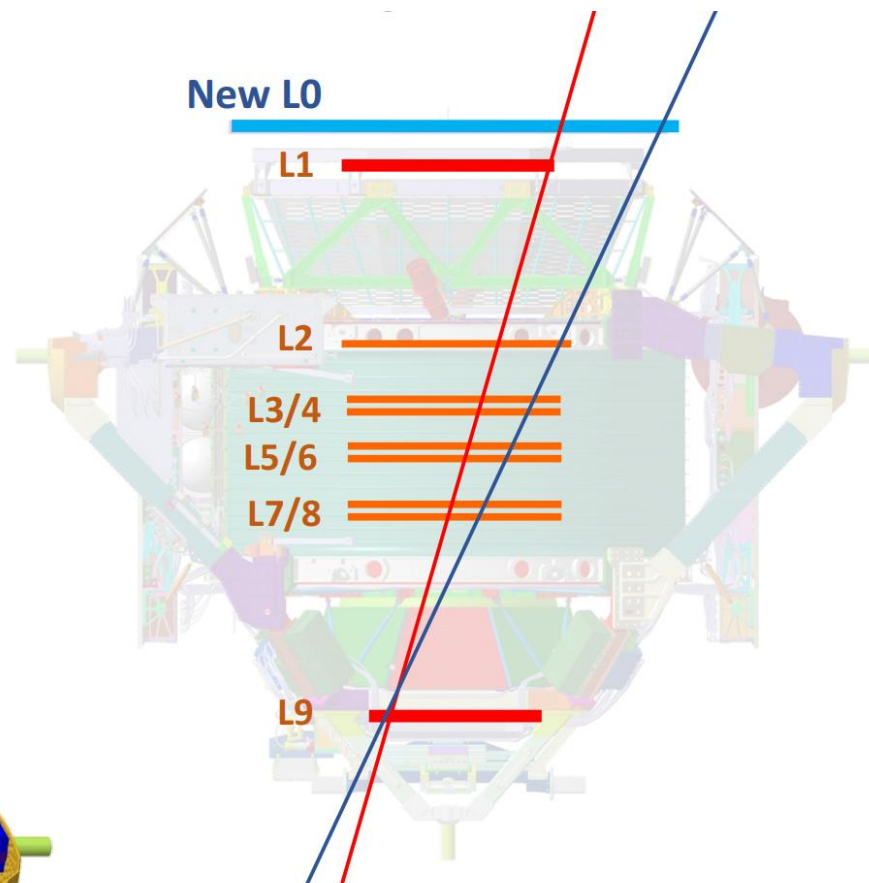
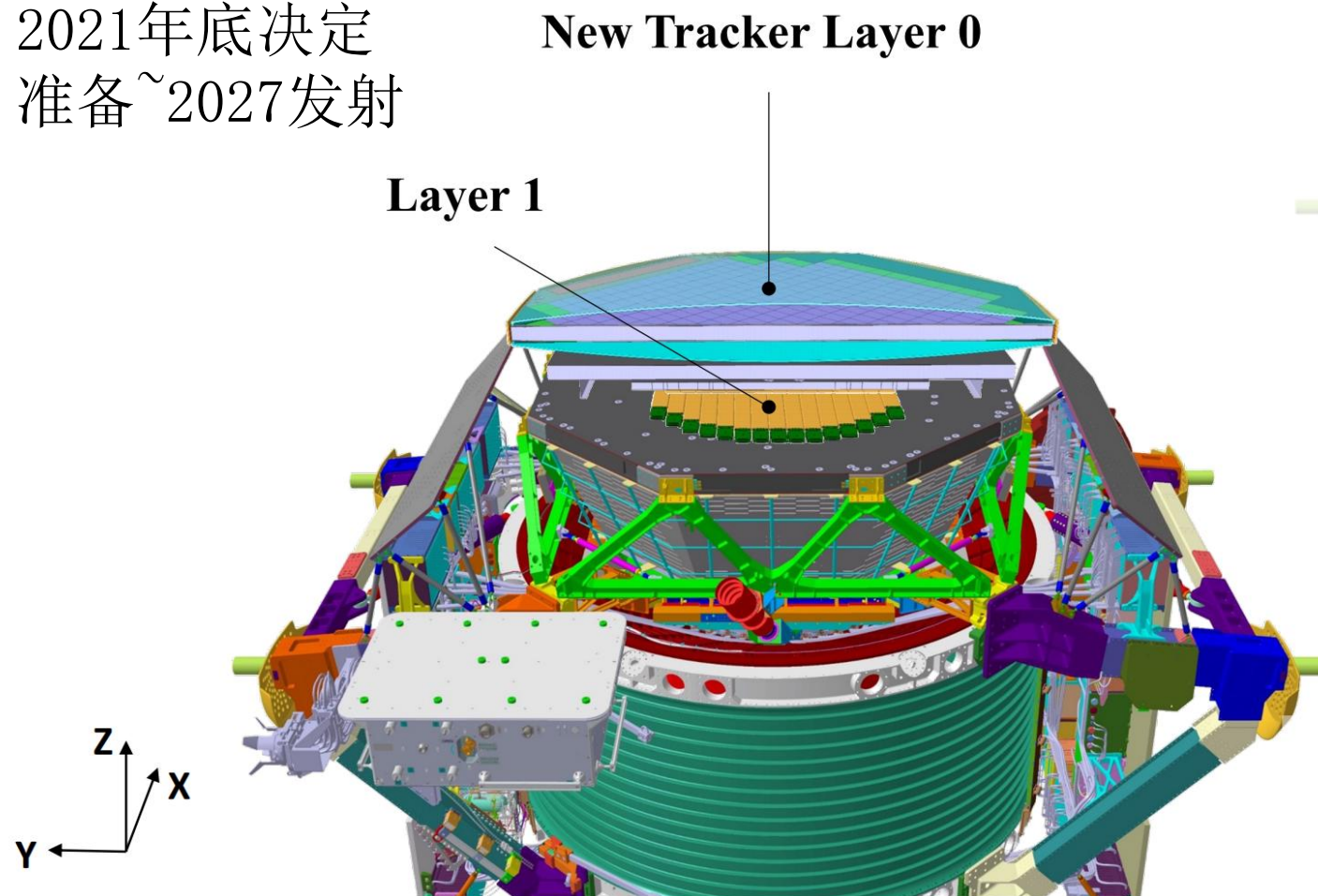
阿尔法磁谱仪AMS-02实验

- 2021年5月安装到国际空间站
- 将持续运行至国际空间站退役
- 正在运行的唯一具备磁场的空间谱仪
 - 永磁体为中国贡献
 - 区分电荷的正负
- 主要物理目标:
 - search for Primordial Antimatter by direct detection of antinuclei
 - search for indirect Dark Matter signals
 - study of production, acceleration and propagation of Cosmic-Rays
 - study of Solar Modulation
 - ...



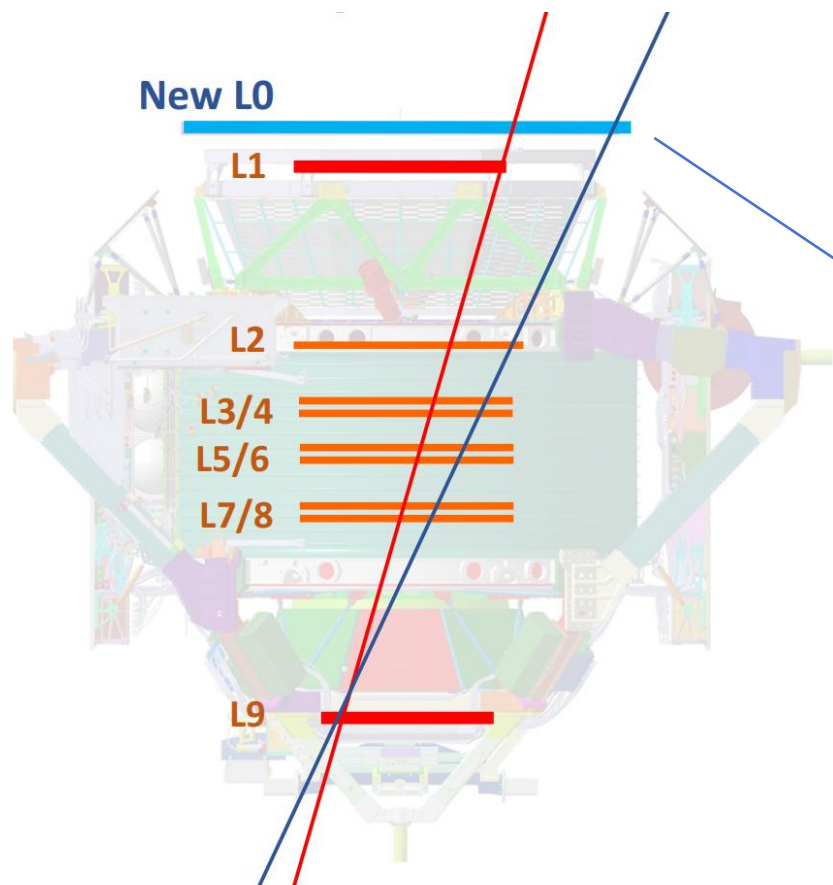
径迹探测器增加第0层

- 2021年底决定
- 准备~2027发射



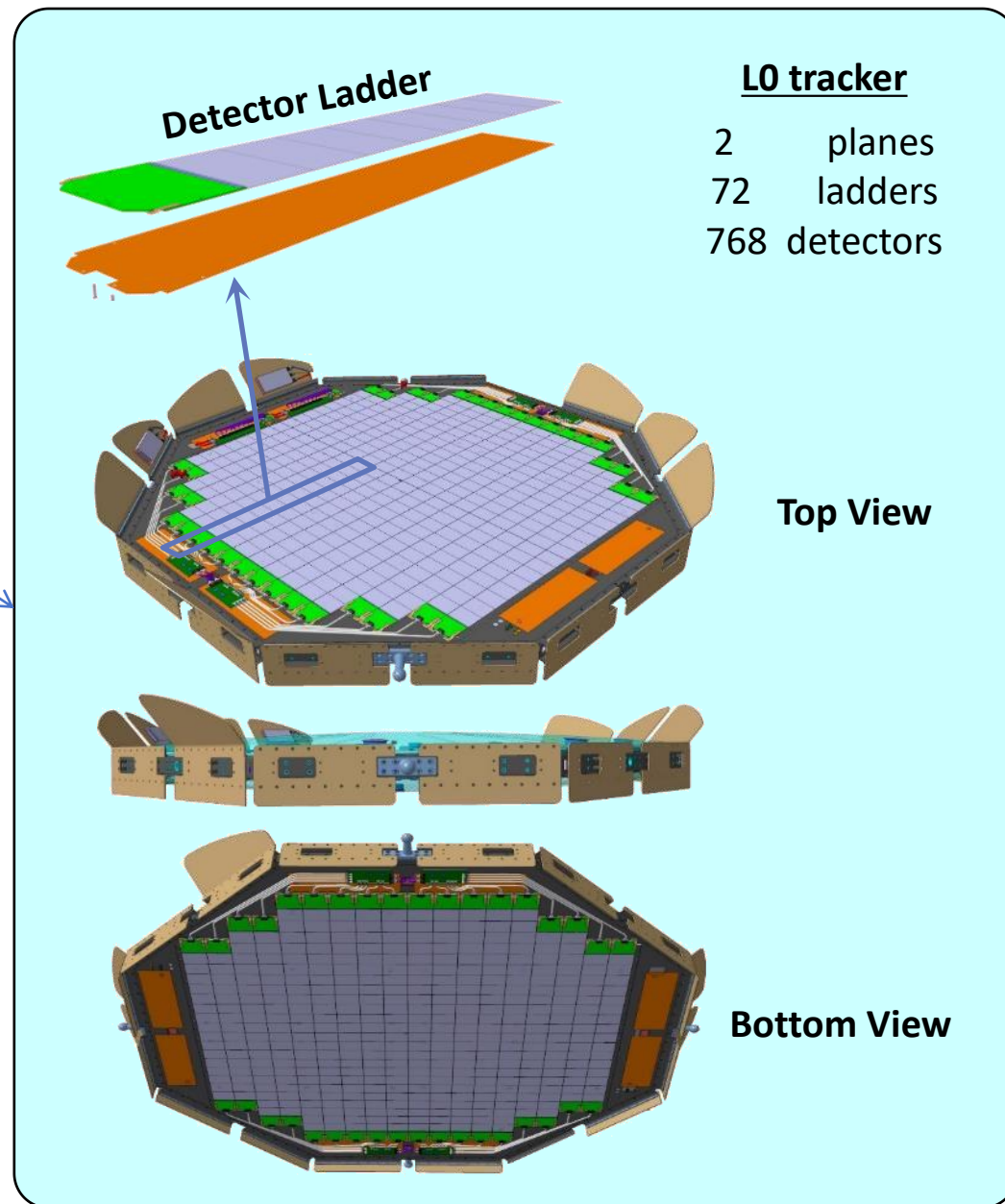
Increase of the detector acceptance by 300%

径迹探测器L0层



L0: $\sim 8 \text{ m}^2$ 硅微条探测器

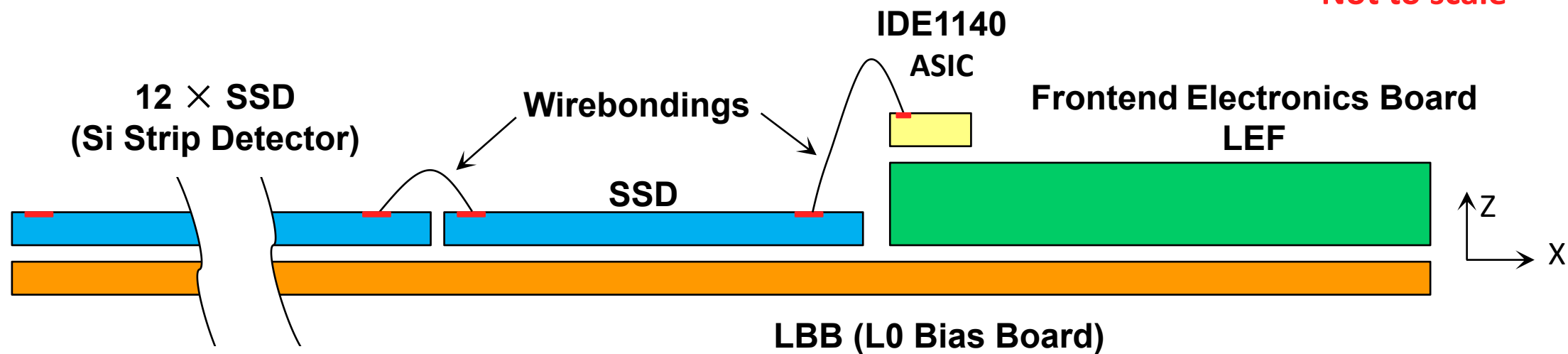
L1+L2+...+L9: $\sim 6 \text{ m}^2$ 硅微条探测器



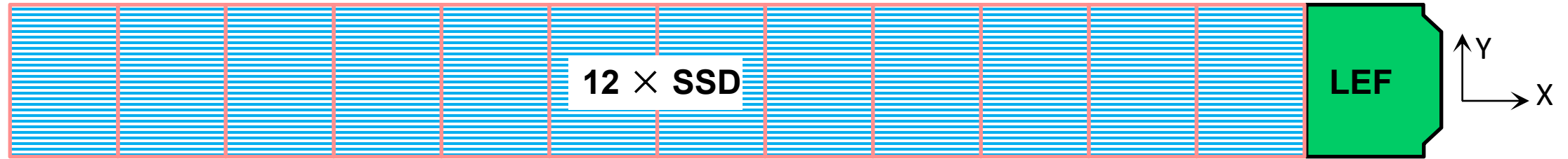
AMS-L0 硅微条探测器模块示意图



Not to scale



AMS-L0 硅微条探测器模块示意图



- **中国科学院高能物理研究所+山东高等技术研究院**

- 主导研发：传感器、探测器模块、束流望远镜等
- 首个完成交付的国际合作粒子物理实验上的半导体探测器项目

- **核心技术难点：**

- 最多12片硅微条传感器串联实现世界最长硅微条传感器模块
- 硅微条传感器总覆盖面积 6 平方米
- 位置精度

**高精度空间半导体径迹探测器研制经验积累，
为未来由中国主导的深空探测实验做技术支持**

中科院高能所 + 山东高研院

IHEP-EPD (10)

Jianchun Wang	王建春	Professor
Gang Chen	陈刚	Professor
Mingyi Dong	董明义	Professor
Jing Dong	董静	Senior engineer (R)
Shanzhen Chen	陈缮真	Associate professor
Zijun Xu	徐子骏	Associate professor
Xuhao Yuan	袁煦昊	Associate professor
Feng Wang	王峰	Research scientist
Xiyuan Zhang	张希媛	Engineer (R)
Congcong Wang	王聪聪	Engineer (R)

SDIAT (6)

Weiwei Xu	许伟伟	Professor
Huiling Li	李慧玲	Principal scientist
Suyu Xiao	肖素玉	Research scientist
Pingcheng Liu	刘平成	Research scientist
Cong Liu	刘聪	Engineer (M)
Hongbo Wang	王泓博	Engineer (E)

IHEP-PAD (10)

Zuhao Li	李祖豪	Professor
Wenxi Peng	彭文溪	Professor
Zhicheng Tang	唐志成	Associate professor
Cheng Zhang	张诚	Associate professor
Rui Qiao	乔锐	Associate professor
Xingzhu Cui	崔兴柱	Associate professor
Yaqing Liu	刘雅清	Associate professor
Sheng Yang	杨生	Senior engineer (M)
Ke Gong	龚轲	Senior engineer (E)
Dongya Guo	郭东亚	Research scientist

Postdocs (6)

Baaska Batsukh	Baaska	IHEP-EPD
Daojin Hong	洪道金	SDIAT
Zetong Sun	孙泽同	IHEP-PAD
Fengze Zhang	张丰泽	IHEP-PAD
Zhiyu Xiang	项治宇	IHEP-EPD
Mengke Cai	蔡孟珂	IHEP-EPD

Graduate Students (18)

Dexing Miao	缪德星
Tiange Li	李天歌
Chenglong JinLiang	金梁程龙
Shengjie Jin	金胜杰
Yuhang You	尤宇航
Haotian Yang	杨昊天
Qinze Li	李沁泽
Ji Peng	彭吉
Shuqi Sheng	盛书琪
Xiaojie Jiang	姜啸捷
Mingjie Feng	冯铭婕
Hao Chen	陈昊
Hengyi Cai	蔡恒逸
Zixuan Yan	闫子轩
Yuan Yuan	袁源
Yisheng Fu	傅逸昇
Shuaiyi Liu	刘帅毅
Zibing Wu	吴子兵

College Students (14)

Shengbo Cao	曹胜博
Changcheng Liu	刘长城
Hanbing Liu	刘涵兵
Lusen Zhang	张鲁森
Yuman Cai	蔡雨漫
Tianyu Shi	史天宇
Zhijie Wang	王智颀
Yaohui Yang	杨耀晖
Yutong Li	李雨彤
Ming Dai	代铭
Yang Liu	刘洋
Danyan Huang	黄丹艳
Jiaru Wang	王佳如
Jingbo Liu	刘京博

The IHEP+SDIAT team

26 staff members
6 postdocs
18 graduate students
14 college students

The professional title represents the date the member joined the team

项目进展主要节点



- 2022.07.09 前端电子学读出芯片IDE1140于CIAE完成辐照研究
- 2022.07.22 首条硅模块由佩鲁贾大学、高能所和山东高研院共同完成
- **2022.11.04** **10条测试用模块由中方寄往意大利**
- **2023.05.16** **首条全尺寸硅模块样板机在高能所完成组装**
- 2023.05.18-19 AMS TIM会议在高能所召开
- 2023.06.18 7条测试模块寄往意大利
- 2023.07.11-27 于高能所完成电子束流测试
- 2023.08.17-23 于CERN完成质子和缪子束流测试
- 2023.08.31 7条电装硅模块寄出
- 2023.10.24-30 与CERN完成离子束流测试
- 2023.12.07 最后一批测试模块寄出
- 2024.01.11-25 于高能所完成低能电子束流测试
- 2024.01.17 L0模块正式生产启动
- 2024.01.22 AMS TIM在高能所召开
- 2024.05.08-29 于CERN完成缪子束流测试
- 2024.05.14 首批正式生产模块寄出
- 2024.09.06 生产结束

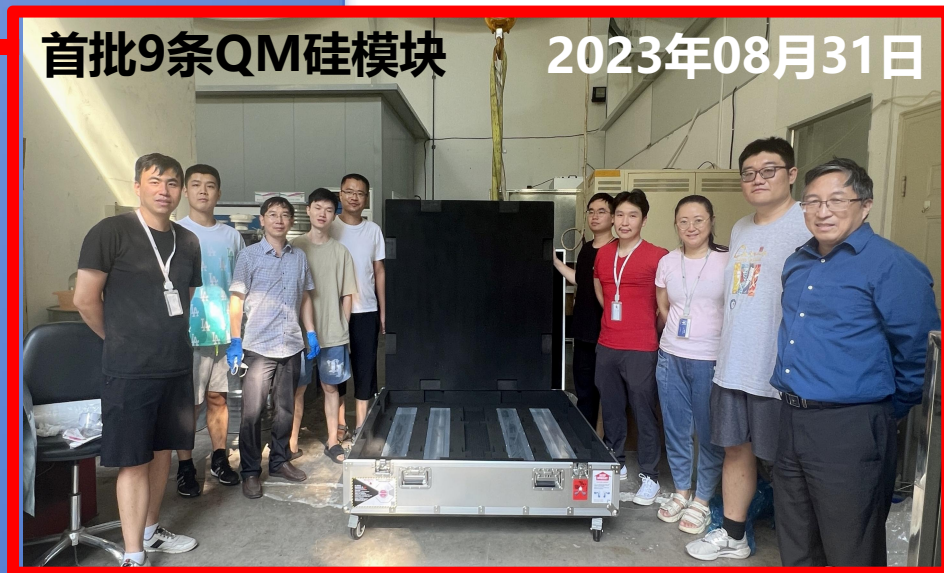


2023年05月16日首条样板机生产完成

项目进展主要节点



- 2022.07.09 前端电子学读出芯片IDE1140于CIAE完成辐照研究
- 2022.07.22 首条硅模块由佩鲁贾大学、高能所和山东高研院共同5
- 2022.11.04 10条测试用模块由中方寄往意大利
- 2023.05.16 首条全尺寸硅模块样板机在高能所完成组装
- 2023.05.18-19 AMS TIM会议在高能所召开
- **2023.06.18** **7条测试模块寄往意大利** ←
- 2023.07.11-27 于高能所完成电子束流测试
- 2023.08.17-23 于CERN完成质子和缪子束流测试
- **2023.08.31** **7条电装硅模块寄出** ←
- 2023.10.24-30 与CERN完成离子束流测试
- **2023.12.07** **最后一批测试模块寄出**
- 2024.01.11-25 于高能所完成低能电子束流测试
- 2024.01.17 L0模块正式生产启动
- 2024.01.22 AMS TIM在高能所召开
- 2024.05.08-29 于CERN完成缪子束流测试
- 2024.05.14 首批正式生产模块寄出
- 2024.09.06 生产结束



项目进展主要节点



- 2022.07.09
- 2022.07.22
- 2022.11.04
- 2023.05.16
- 2023.05.18-19
- 2023.06.18
- 2023.07.11-27
- 2023.08.17-23
- 2023.08.31
- 2023.10.24-30
- 2023.12.07
- 2024.01.11-25
- **2024.01.17**
- 2024.01.22
- 2024.05.08-29
- **2024.05.14**
- **2024.09.06**



2024年5月首批正式生产模块完成装配并寄出

与CERN完成离子束流测试
最后一批测试模块寄出
于高能所完成低能电子束流测试
L0模块正式生产启动
AMS TIM在高能所召开
于CERN完成缪子束流测试
首批正式生产模块寄出
生产结束



项目进展主要节点



- 2022.07.09 前端电子学读出芯片IDE1140于CIAE完成辐照研究
- 2022.07.22 首条硅模块由佩鲁贾大学、高能所和山东高研院完成
- 2022.11.04 10条测试用模块由中方寄往意大利
- 2023.05.16 首条全尺寸硅模块样板机在高能所完成组装
- 2023.05.18-19 AMS TIM会议在高能所召开
- 2023.06.18 7条测试模块寄往意大利
- 2023.07.11-27 于高能所完成电子束流测试
- 2023.08.17-23 于CERN完成质子和缪子束流测试
- 2023.08.31 7条电装硅模块寄出
- 2023.10.24-30 与CERN完成离子束流测试
- 2023.12.07 最后一批测试模块寄出
- 2024.01.11-25 于高能所完成低能电子束流测试
- 2024.01.17 L0模块正式生产启动
- 2024.01.22 AMS TIM在高能所召开
- 2024.05.08-29 于CERN完成缪子束流测试
- 2024.05.14 首批正式生产模块寄出
- 2024.09.06 生产结束
- 2024.11.04-18 于CERN完成离子束流测试



2023年11月测试用1/4扇面



2025年3月首个完成L0 1/4面

高能所： 半导体研发万级洁净间

光学3D测量仪
(被遮挡, 图片中不可见)

打线机



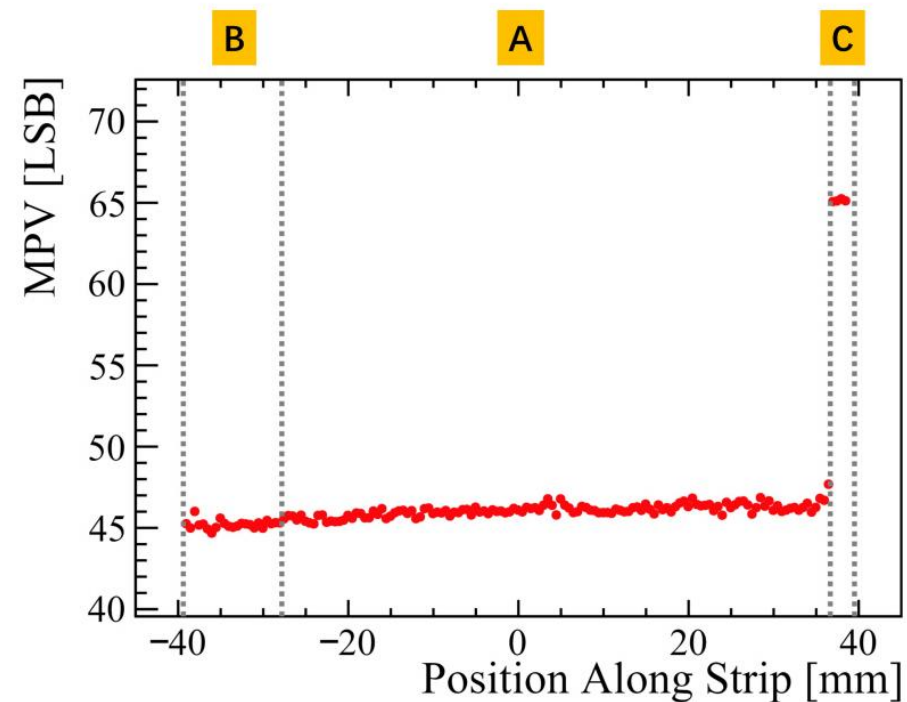
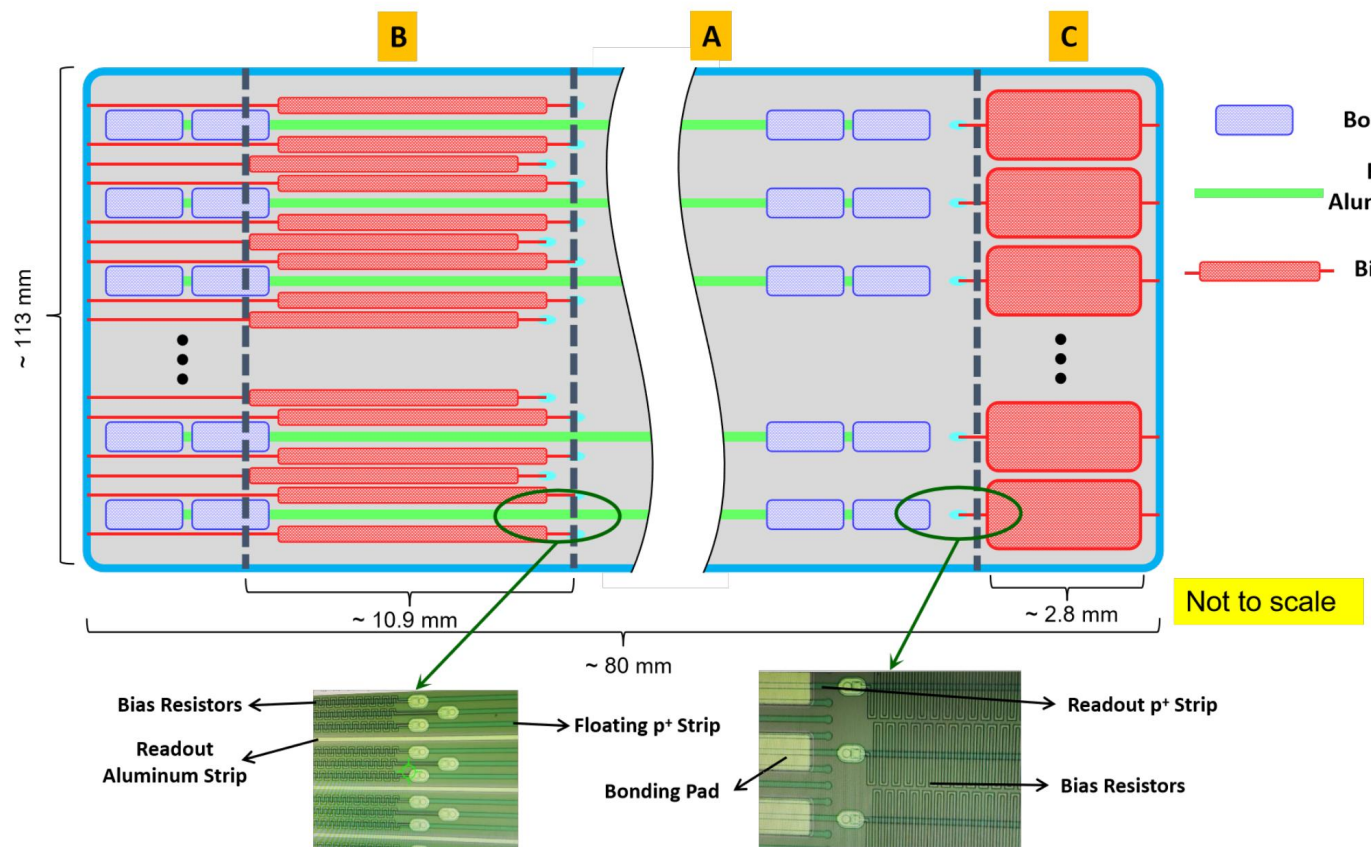
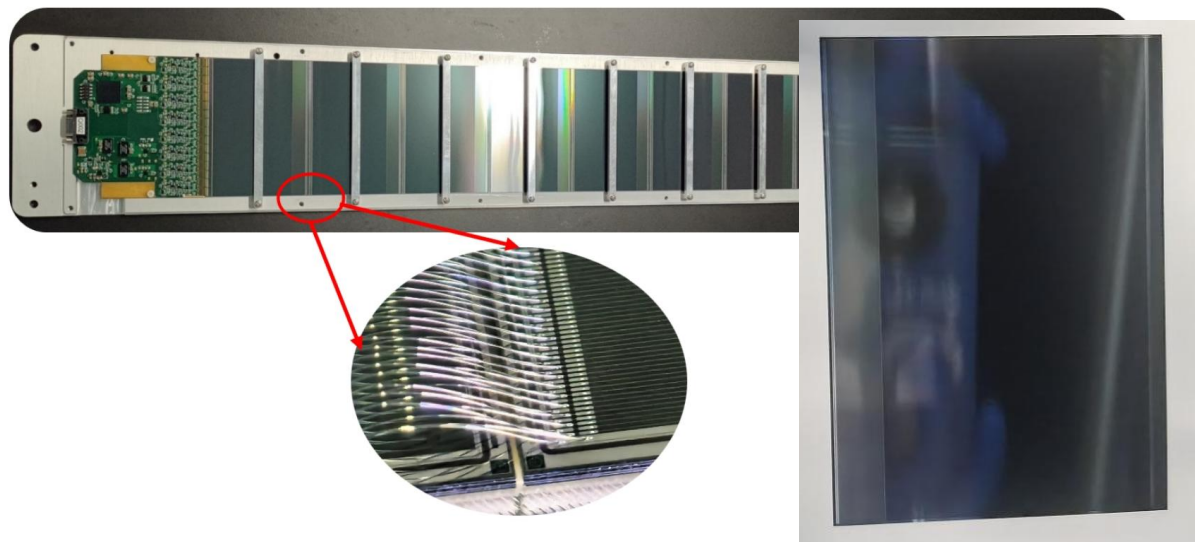
拉力机
打线质检

龙门 (Gantry)
探测器模块组装

探针台
硅SSD质检

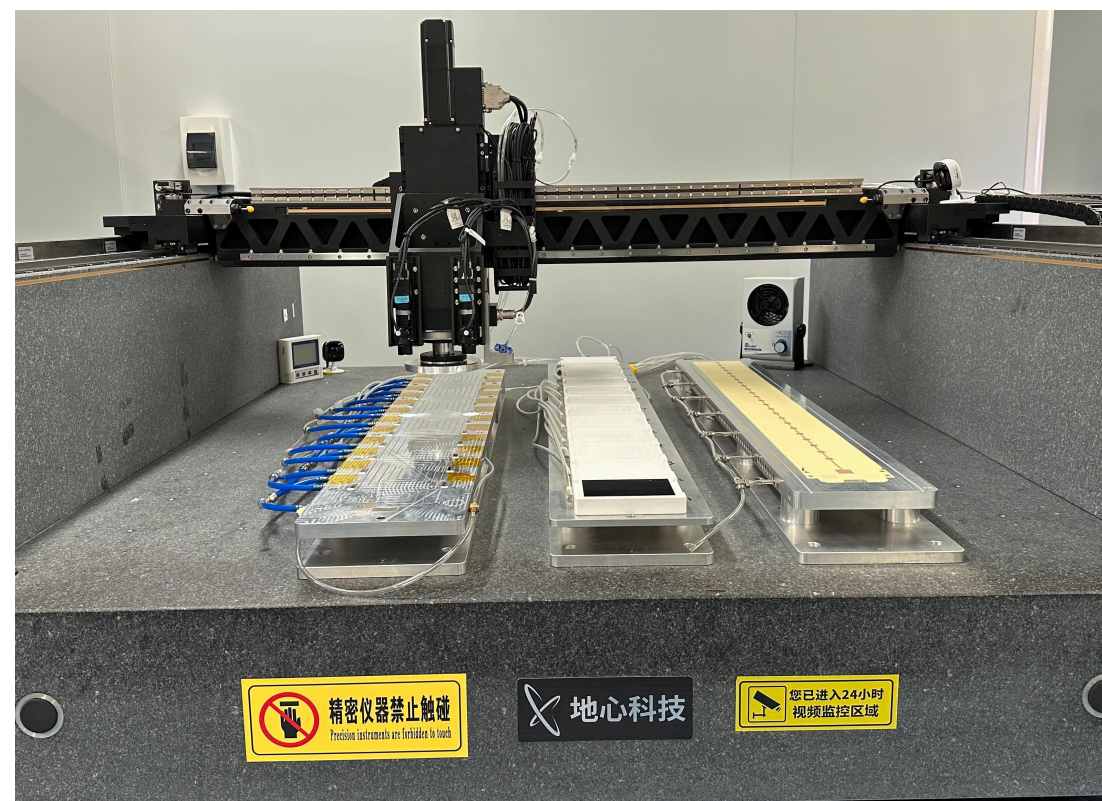
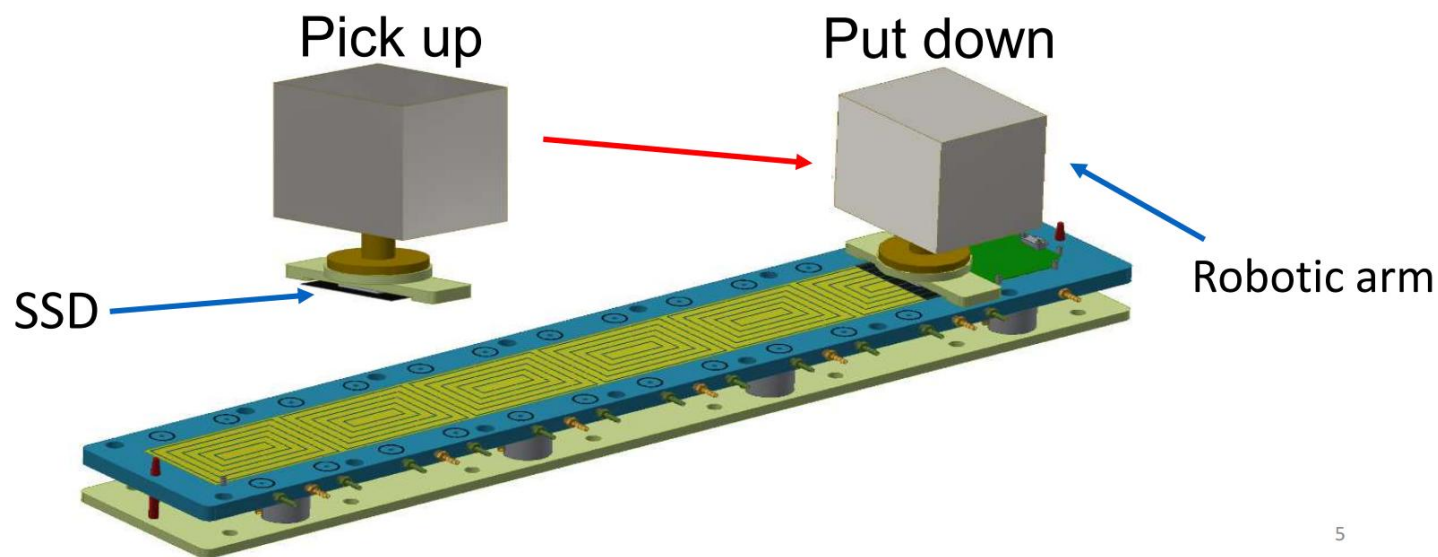
硅微条传感器设计

- [arXiv 2505.23050](https://arxiv.org/abs/2505.23050)



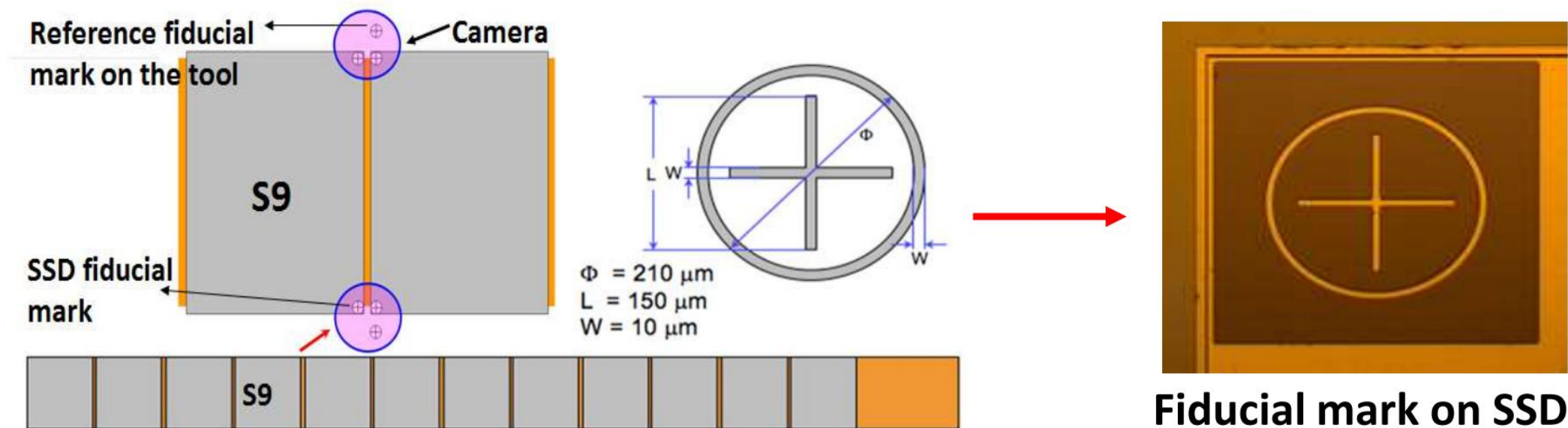
探测器模块生产

- 高精度 (<2微米) 龙门gantry系统用于组装
 - 光学显微镜：SSD上的靶标识别、定位
 - 计算机控制抓取和移动



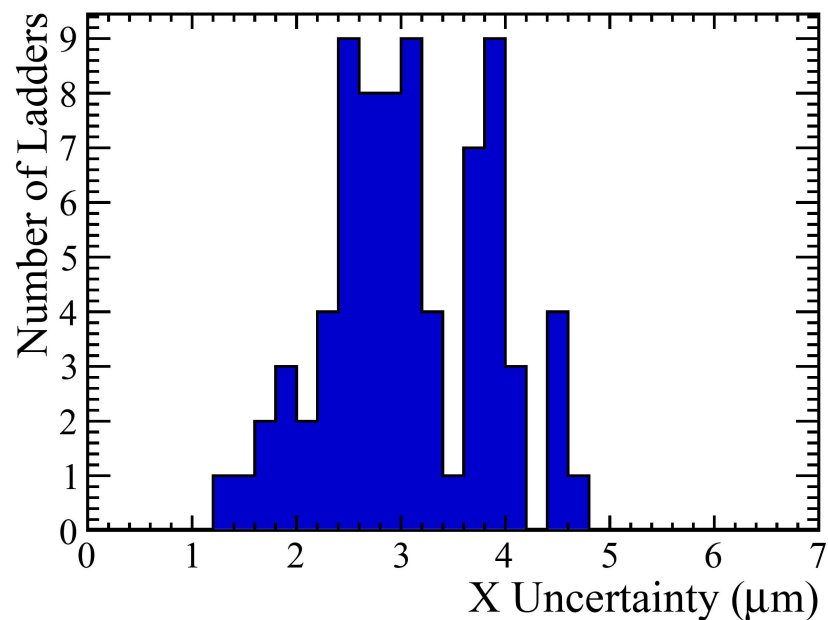
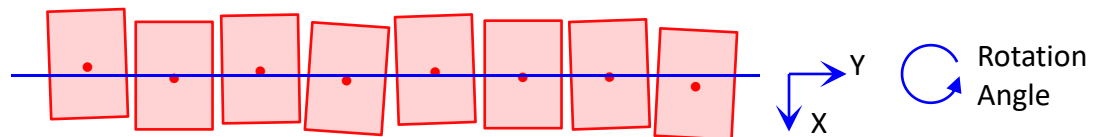
探测器模块生产

- 组装过程中，SSD四角的靶标提供实时坐标，修正组装偏移，满足高精度要求（定位销方法精度~20微米）



高精度(<1微米) 光学仪测量组装精度

Relative positions of all SSDs are precisely measured



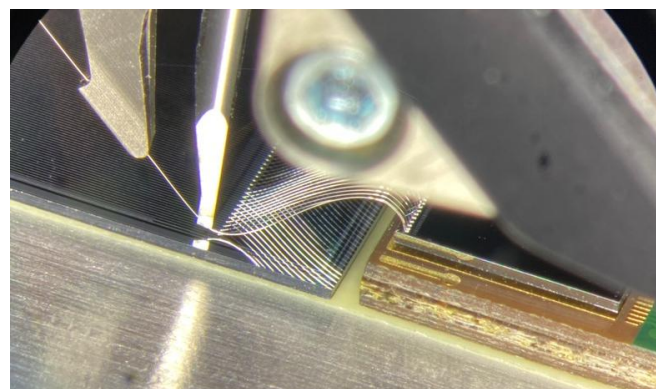
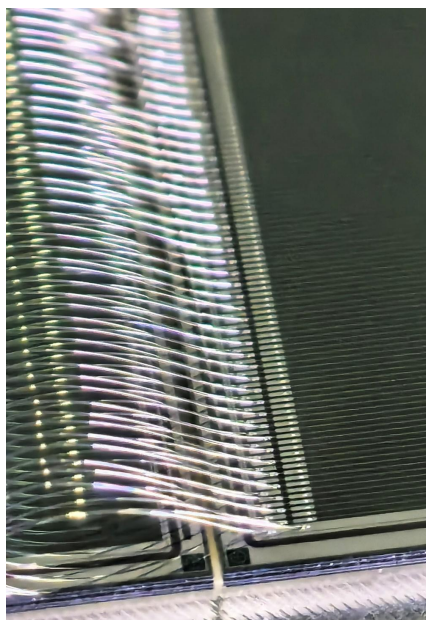
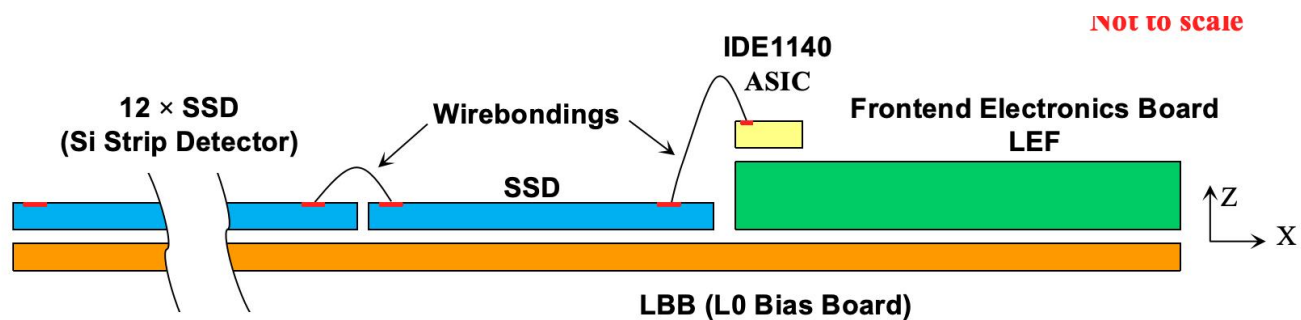
$$\sigma_x = 3.4 \mu\text{m}$$

远超此前国际同类探测器10-20微米的精度



SSD微条之间的打线

可靠性和速度要求：每个模块约一万两千根线

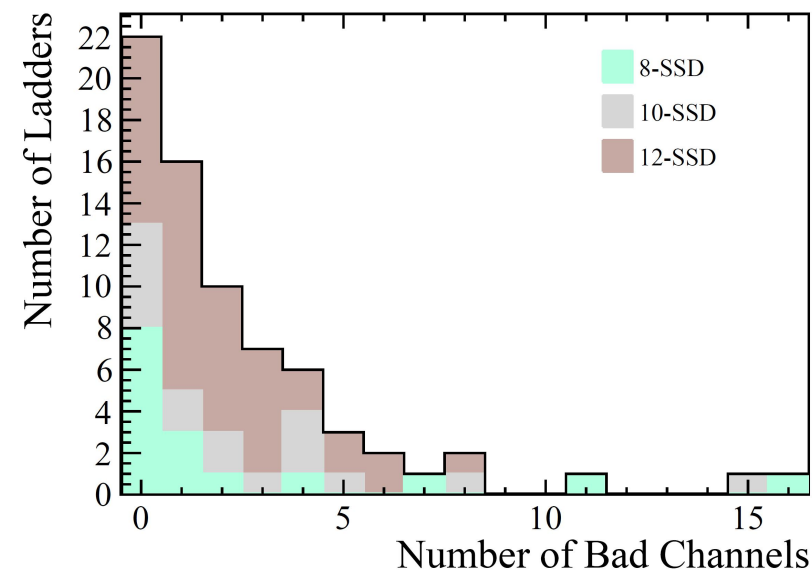


SSD微条之间的打线

可靠性和速度要求：每个模块约一万两千根线

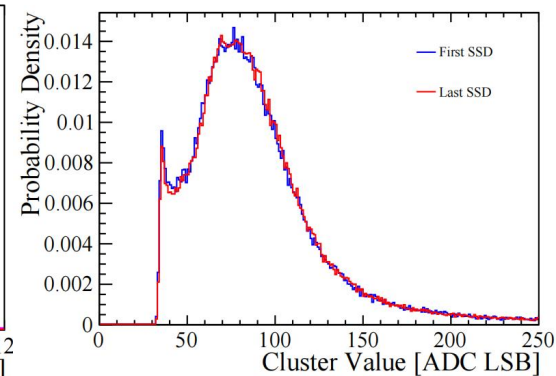
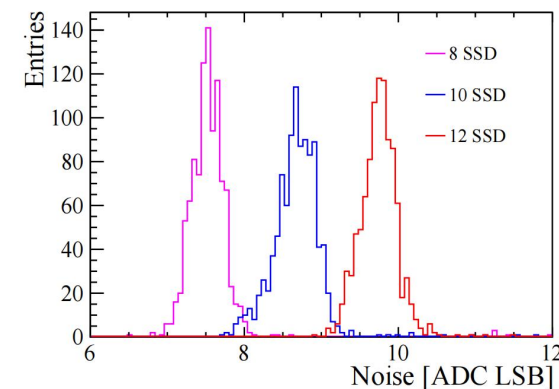
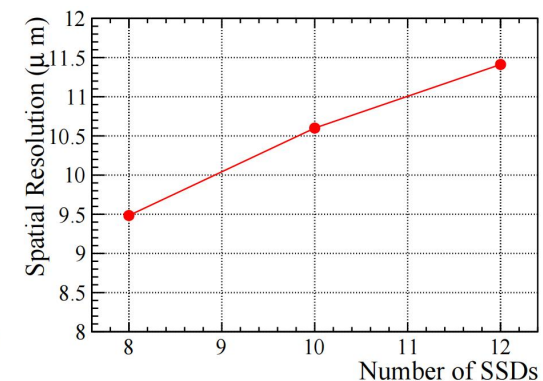
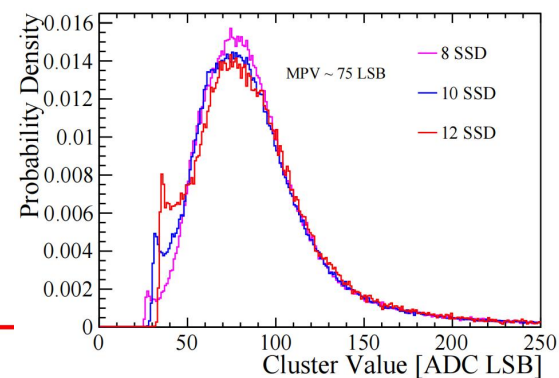
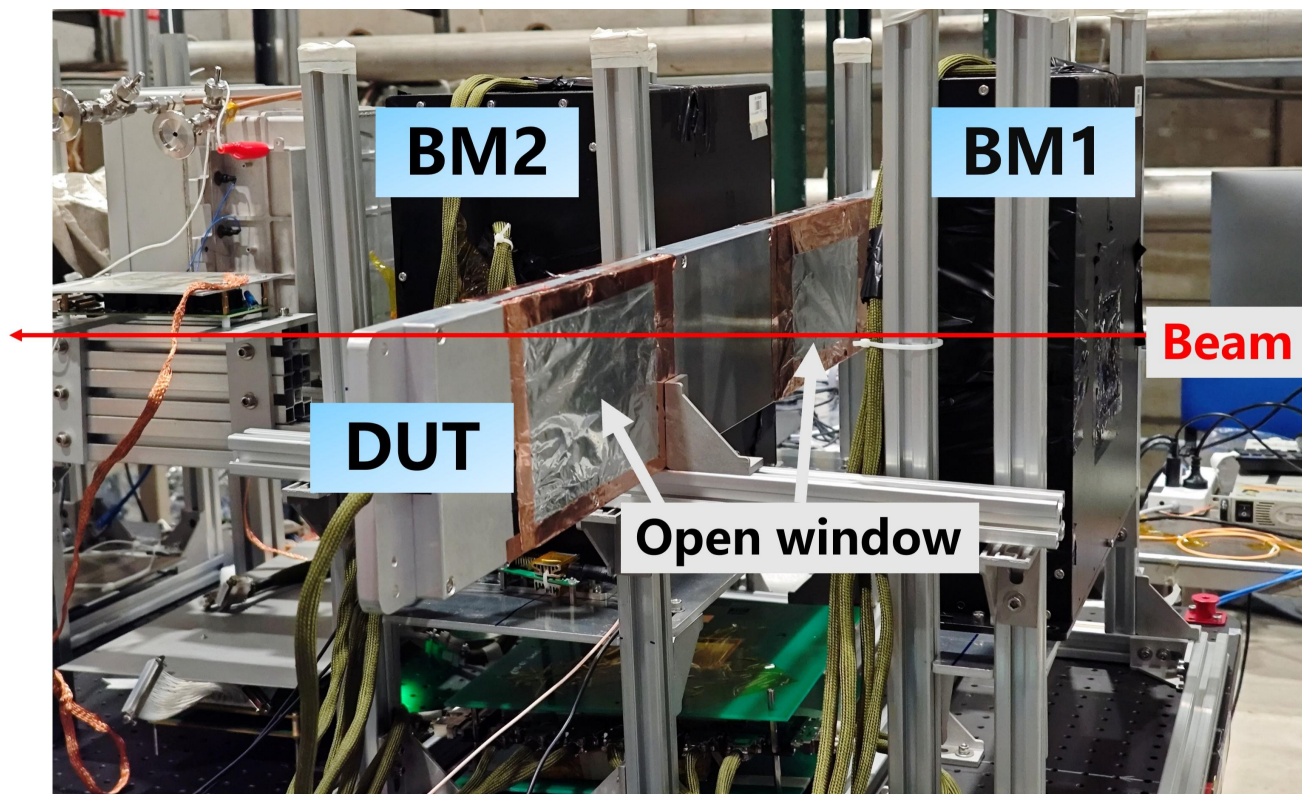


L0 探测器模块生产



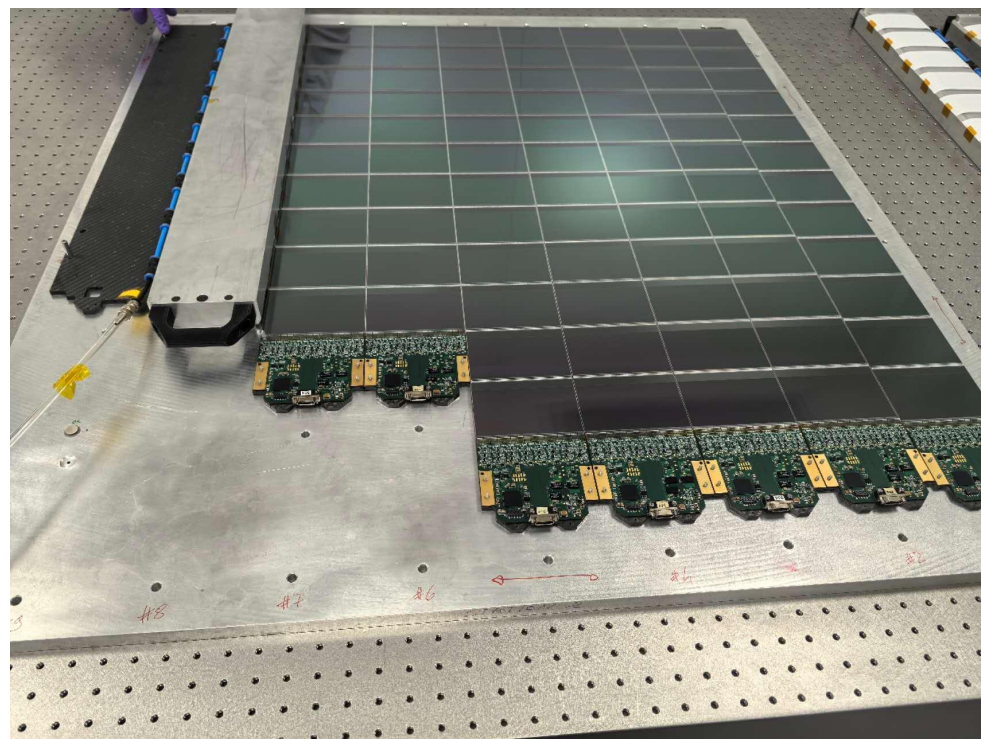
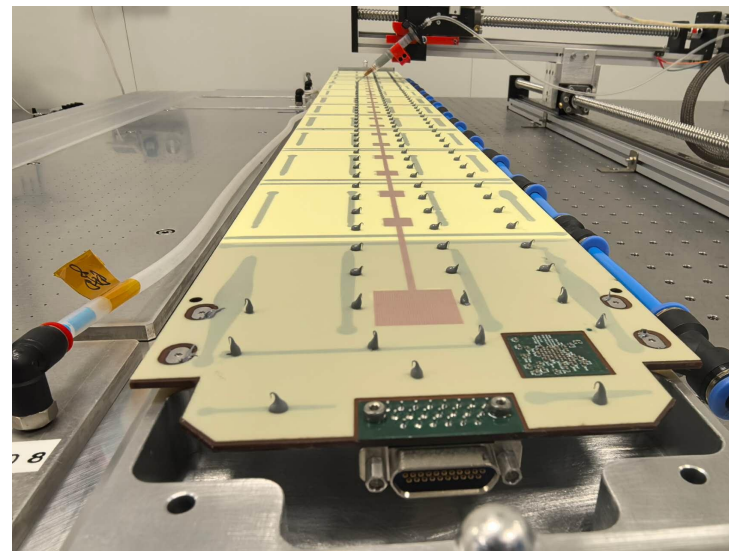
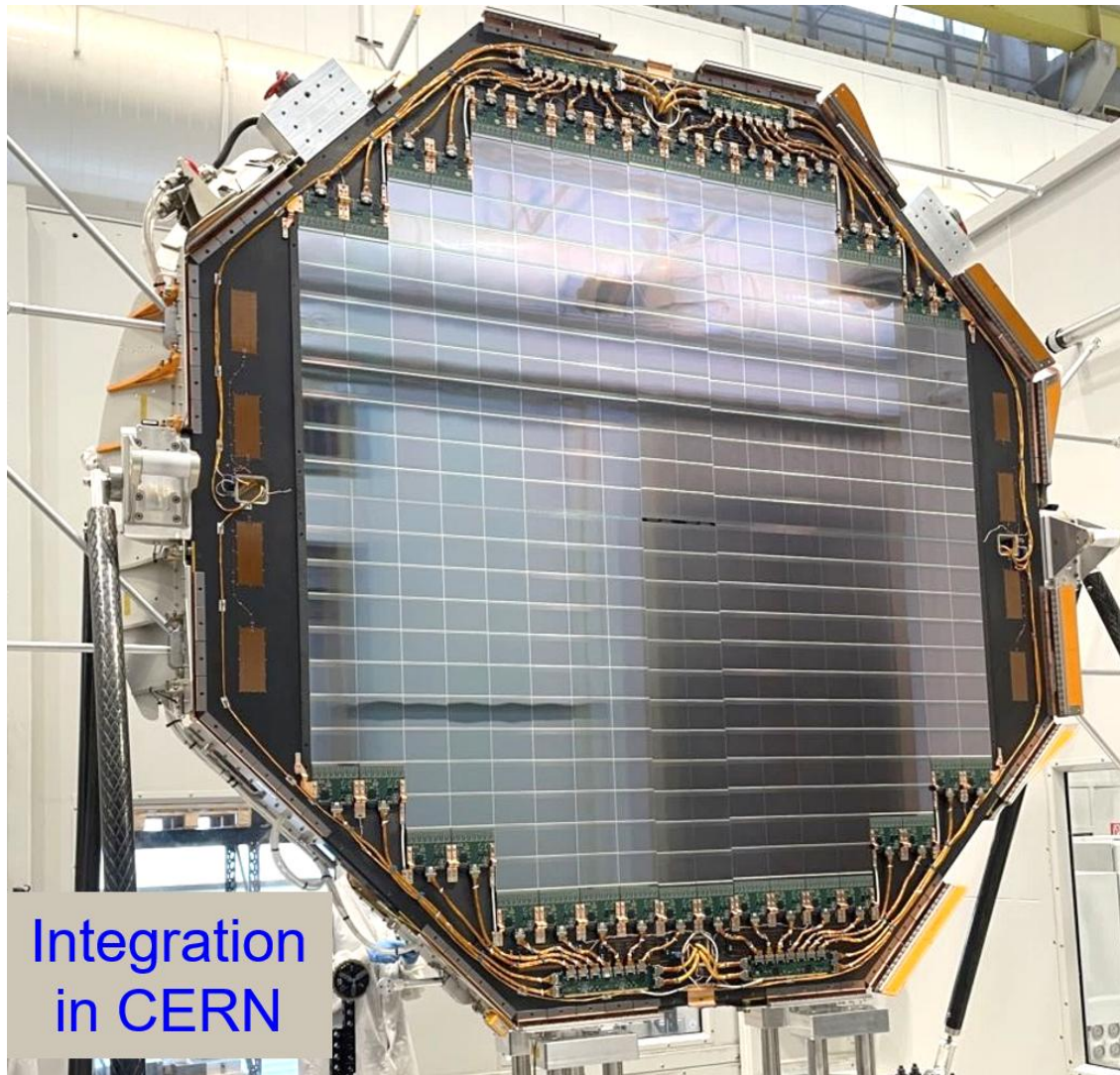
- 坏道总数为173，占探测器全部通道数 0.23 %
- [Qinze Li et al 2026 JINST 21 C01003](#)

L0 探测器模块性能

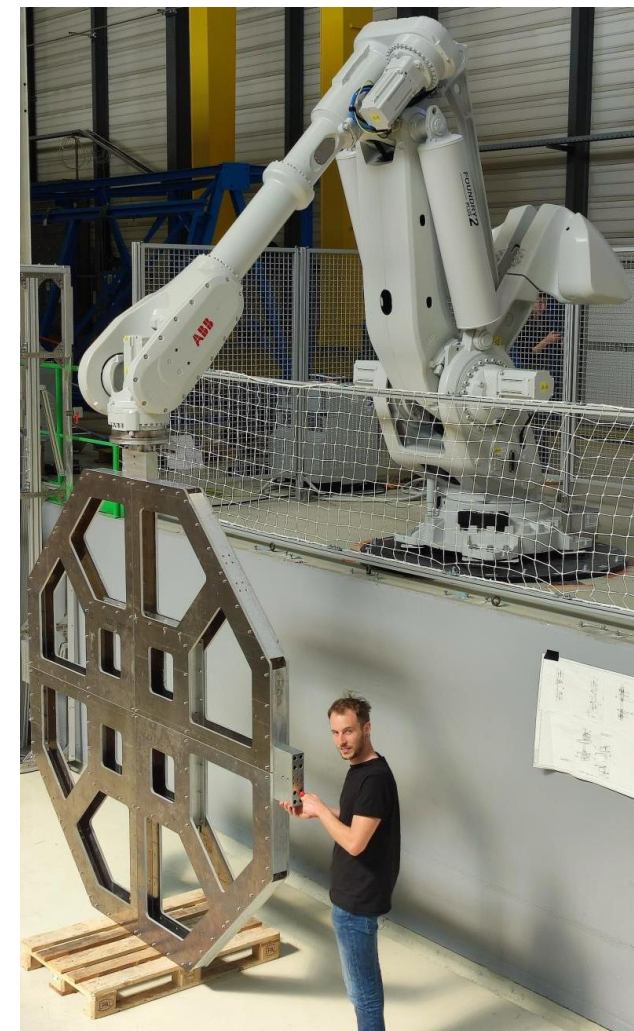
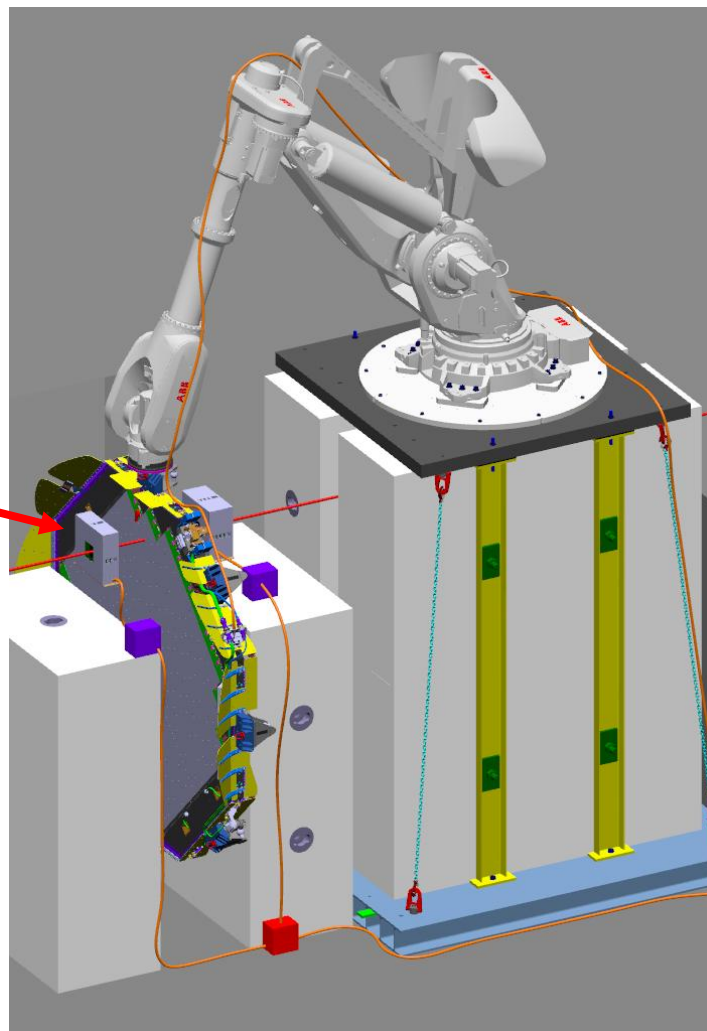
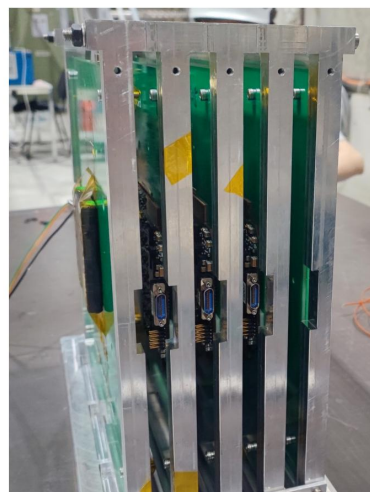
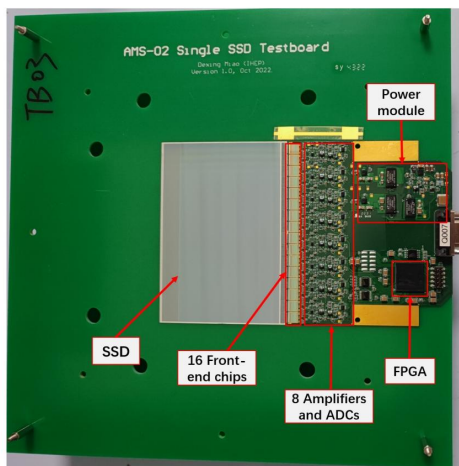
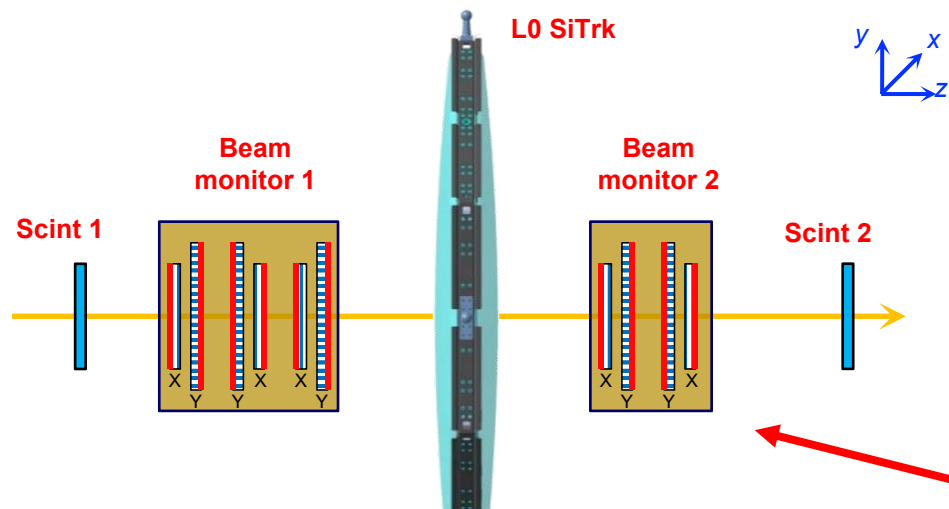


- [arXiv 2603.25085](https://arxiv.org/abs/2603.25085)

在欧洲完成探测器平面组装



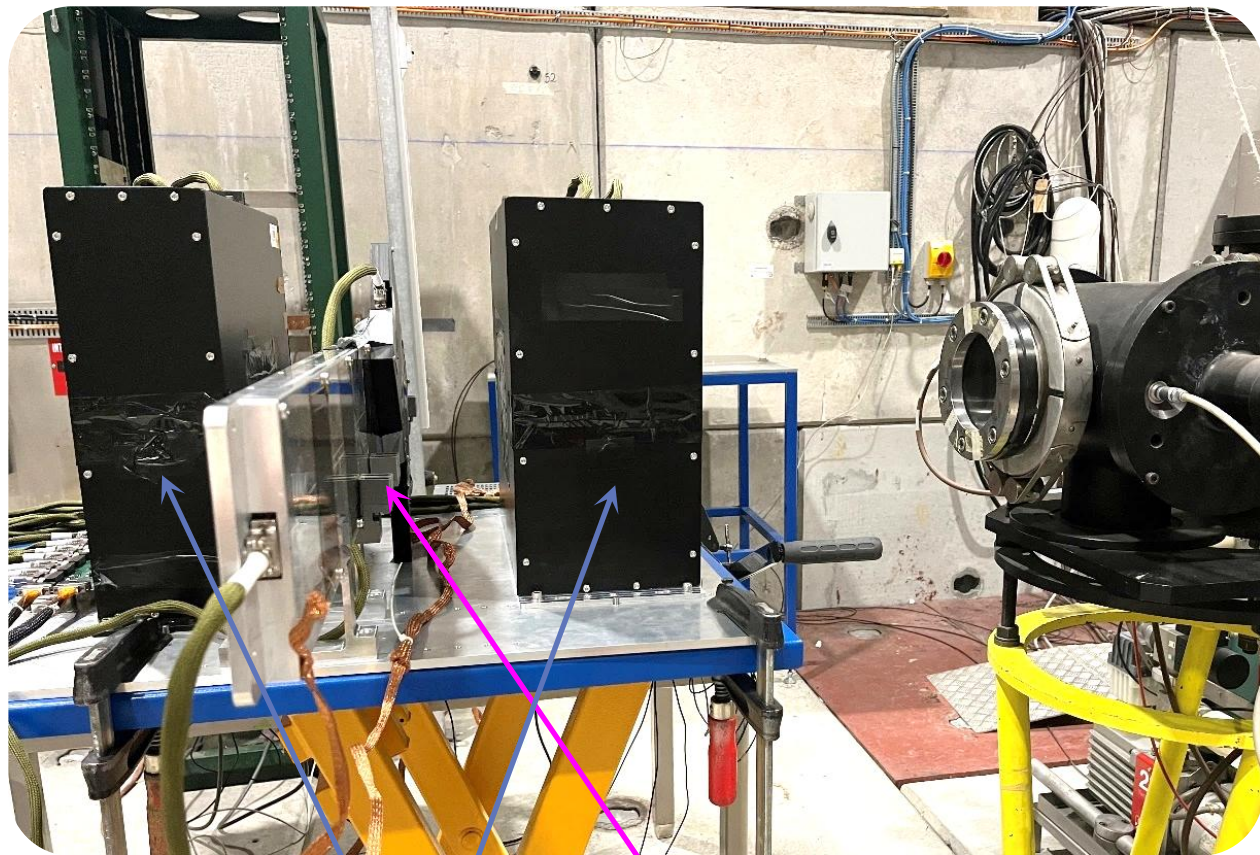
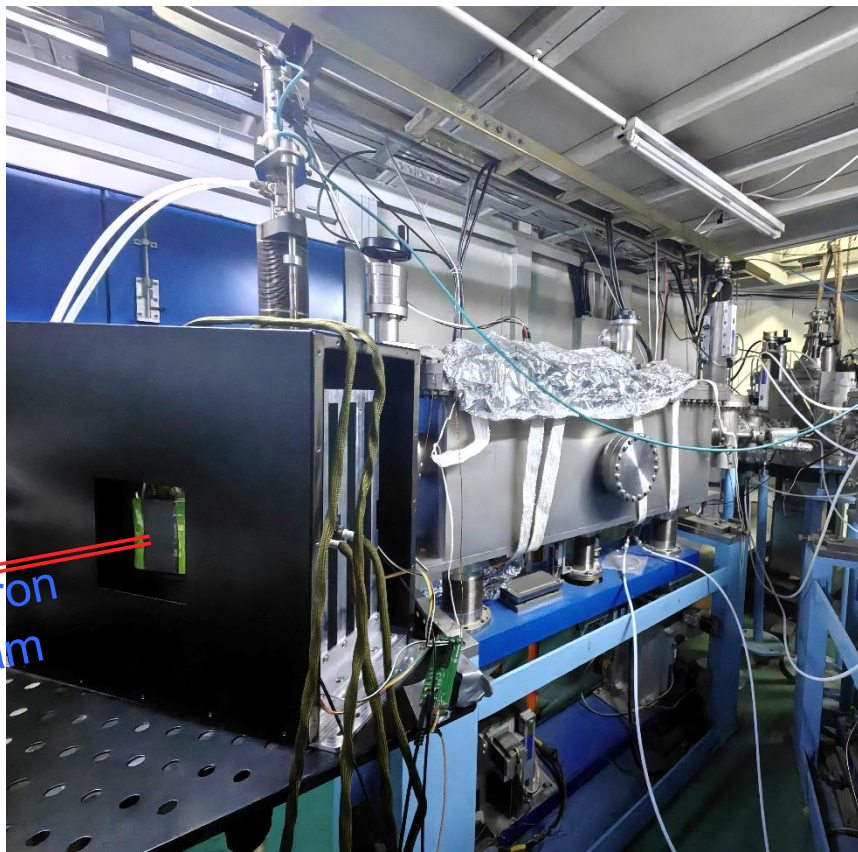
探测器平面束流实验和束流望远镜



2026年7月

高能所和CERN多次束流测试

高能所~GeV电子束，主要测试电子学系统可靠性



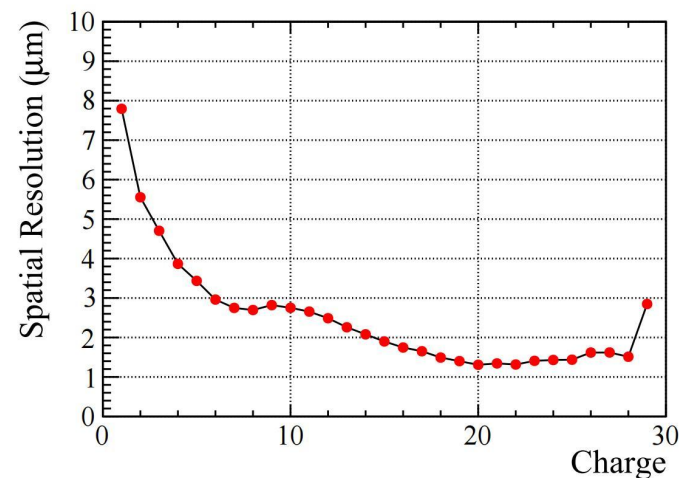
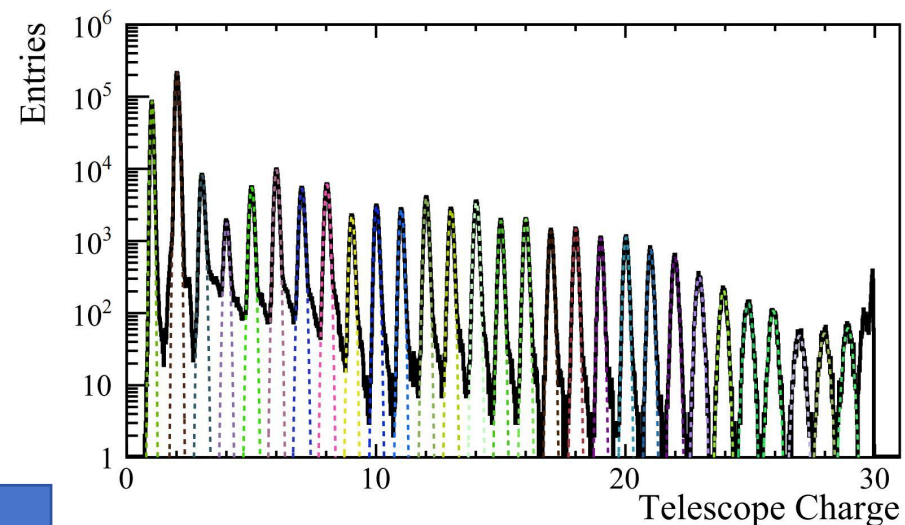
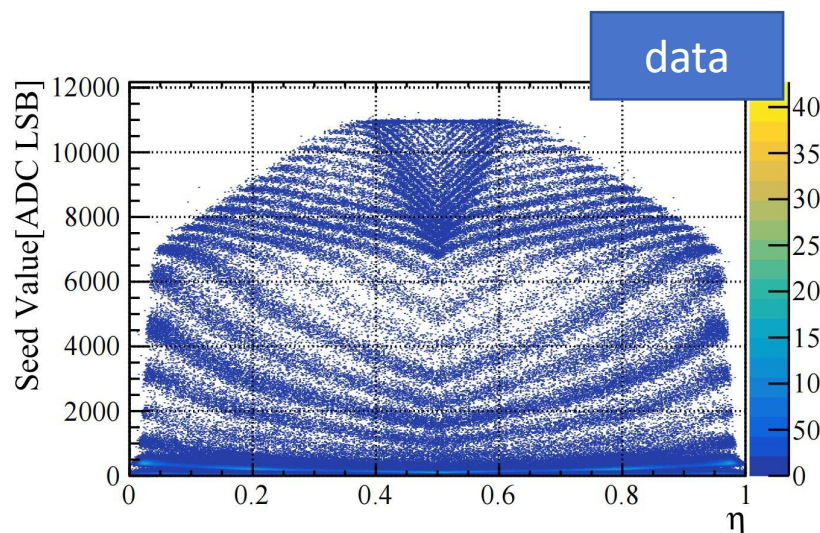
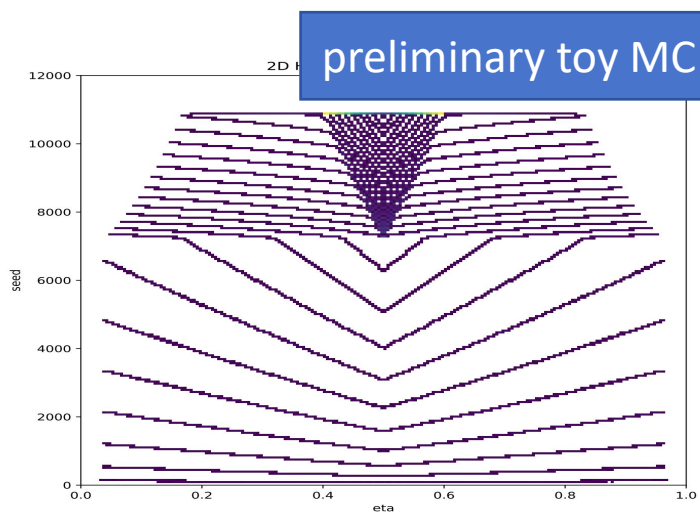
探测器模块

束流望远镜

CERN提供高能质子、缪子、重核束流：探测器性能标定

基于硅微条的束流望远镜

- 硅微条SSD接受面积 $8 \times 8 \text{ cm}^2$
- 可为高能重离子束流同时提供径迹位置和核素种类信息
- [arXiv 2603.25080](https://arxiv.org/abs/2603.25080)



AMS-L0 硅微条探测器模块示意图



- **中国科学院高能物理研究所+山东高等技术研究院**

- 主导研发：传感器、探测器模块、束流望远镜等
- 首个完成交付的国际合作粒子物理实验上的半导体探测器项目

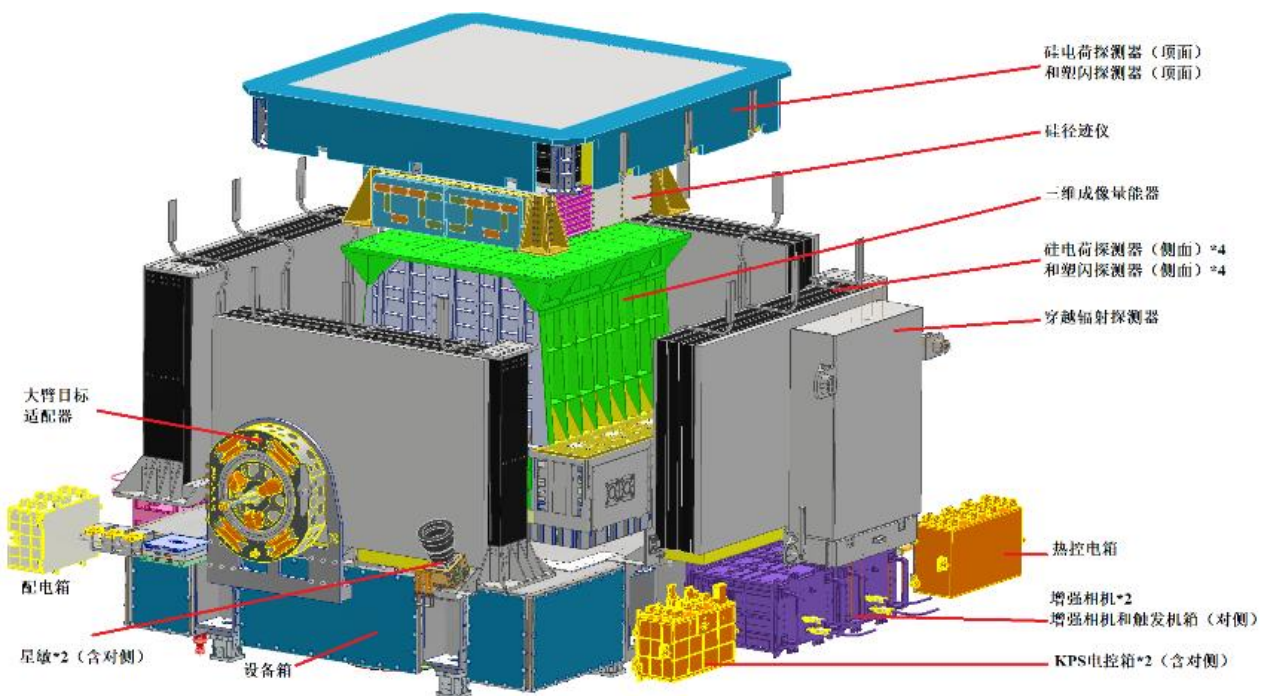
- **核心技术难点：**

- 最多**12**片硅微条传感器串联实现世界最长硅微条传感器模块
- 硅微条传感器总覆盖面积 **6** 平方米
- 位置精度

**高精度空间半导体径迹探测器研制经验积累，
为未来由中国主导的深空探测实验做技术支持**

中国空间站HERD实验的硅微条探测器研发

- 硅电荷探测器和硅径迹仪



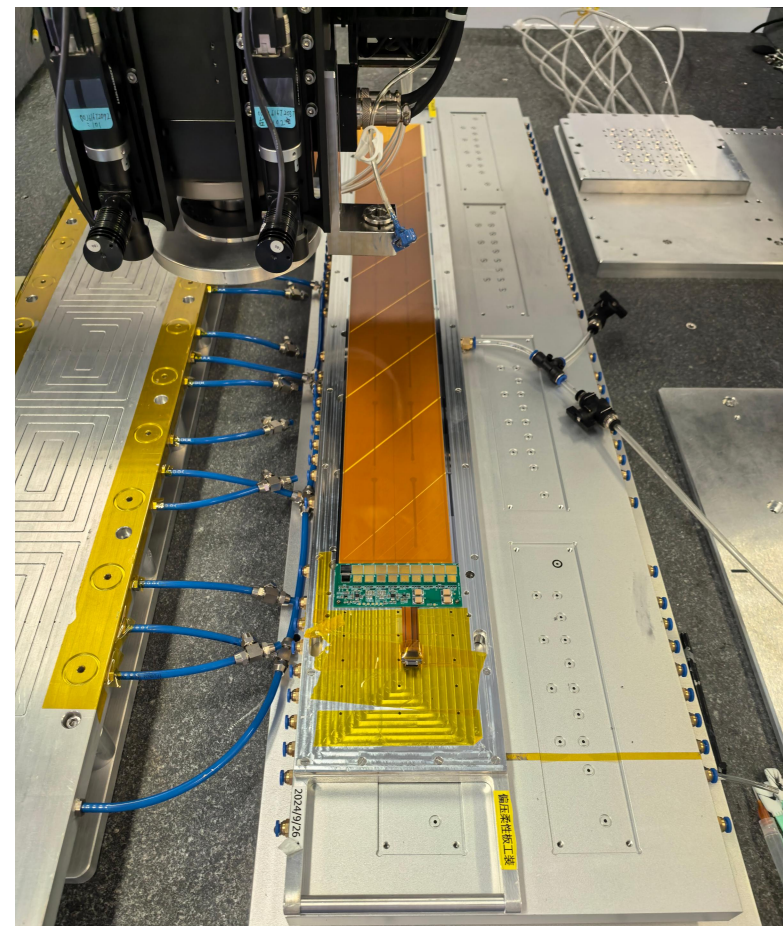
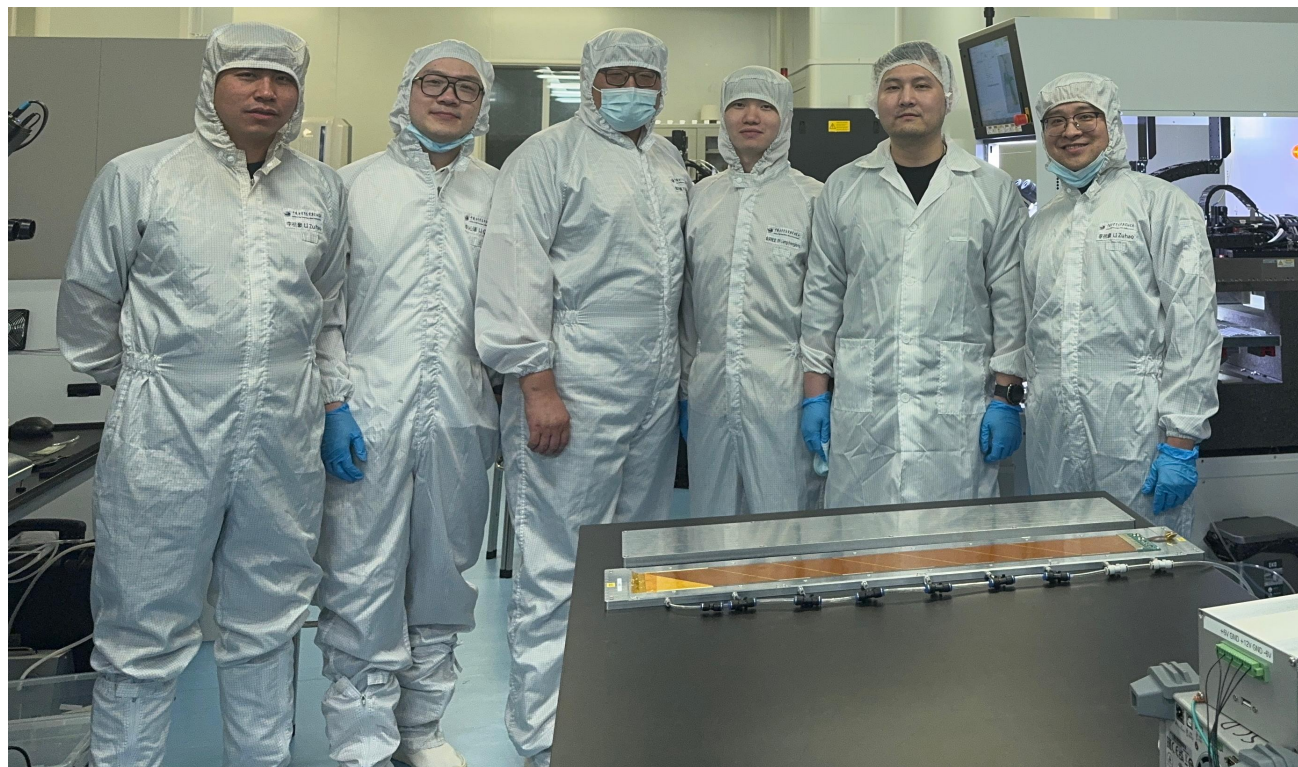
5:24 PM

空间站高能宇宙辐射探测设施 (HERD) 的硅电荷探测器

Speaker: 乔锐 (中国科学院高能物理研究所)

中国空间站HERD实验的硅微条探测器研发

- 26年2月11日完成首个SCD Z型模块电学件



T1-17-XS-149

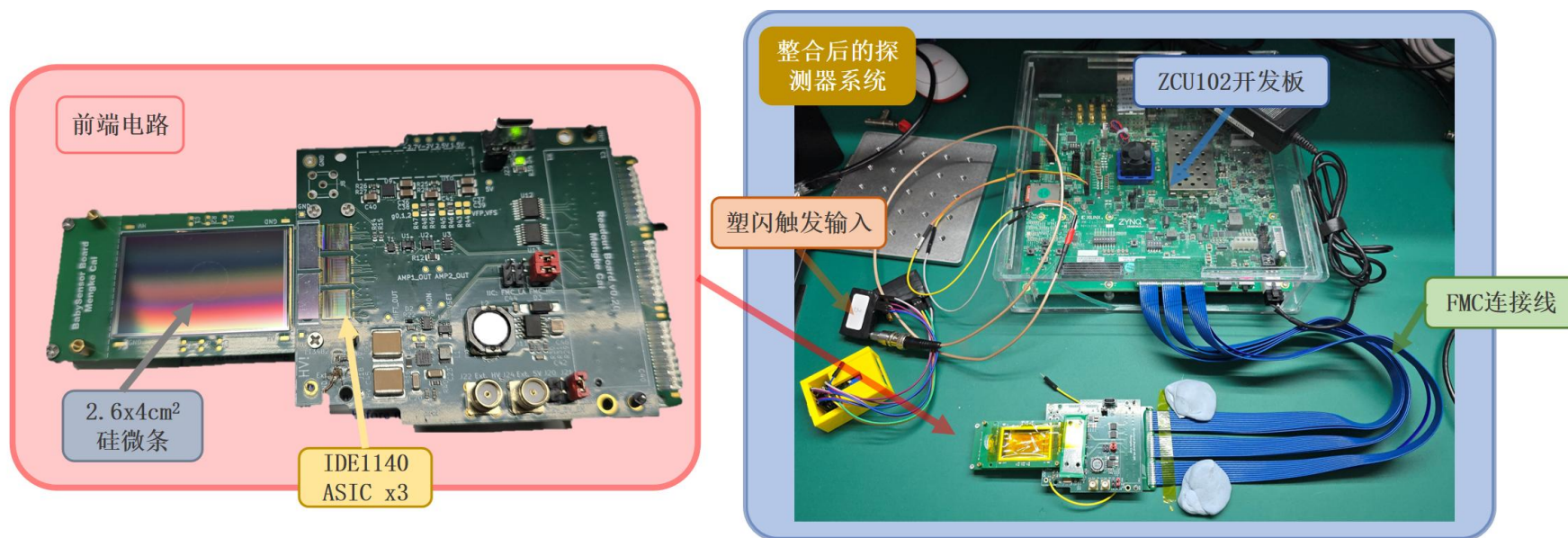
HERD Z 字走线型硅微条探测器模块的研制和数据处理

唐远平

中国科学院高能物理研究所

mini-硅微条系统

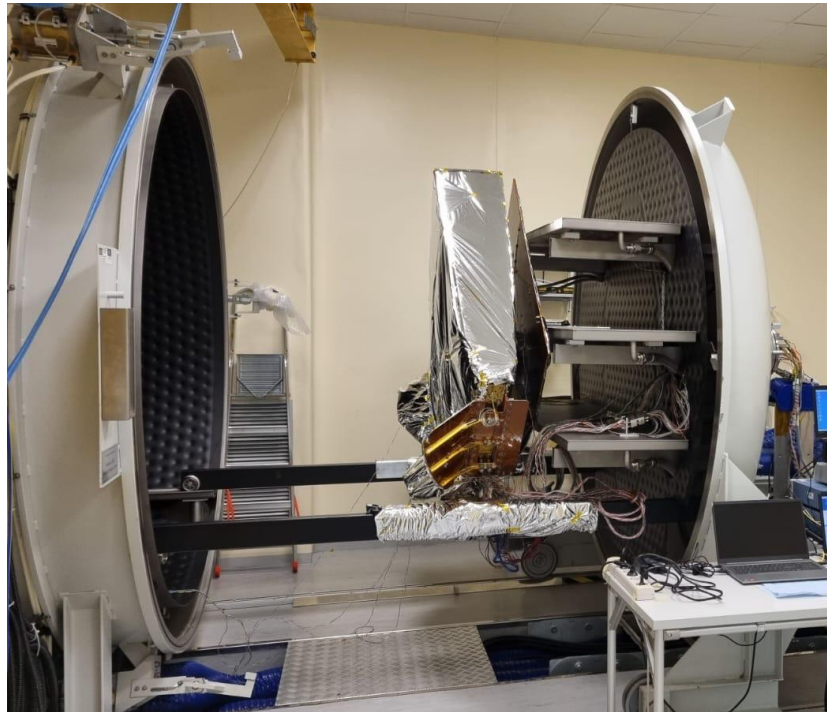
- 面向束流实验、宇宙线测试、半导体探测器教学的小型系统
 - 后端 ZCU102 SoC 开发板：自研DAQ（固件+软件）
 - 前端 FMC卡：放大、采样、读出、供电一体；动态范围可调以适用于不同应用场景
 - 未来发展：国产硅微条读出芯片、国产FPGA/SoC平台



感谢各位专家！

Backup

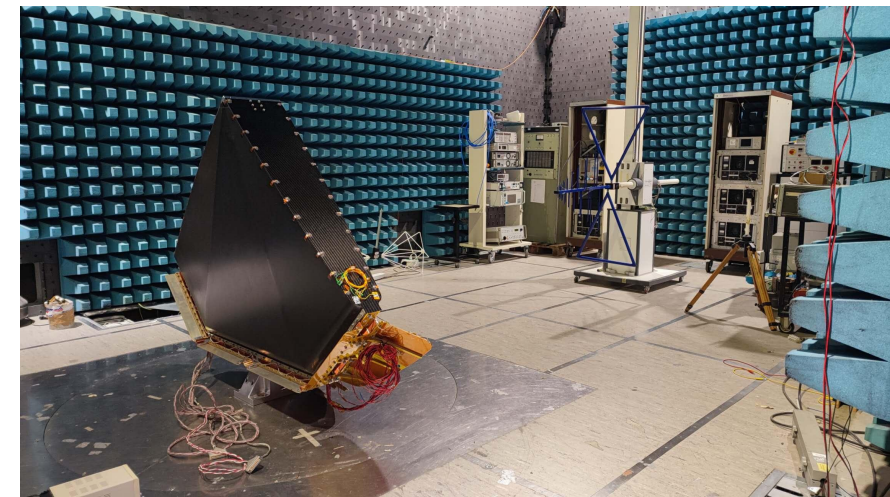
1/4 QM平面的测试：热学、震动、电磁



Thermal Vacuum test



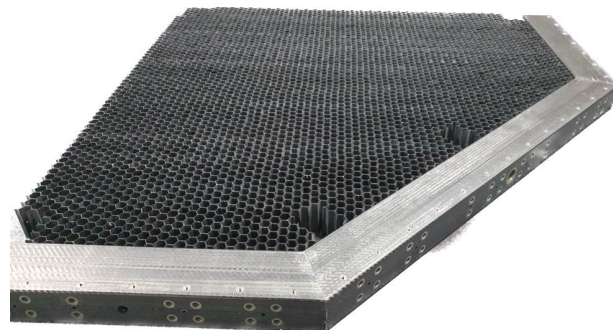
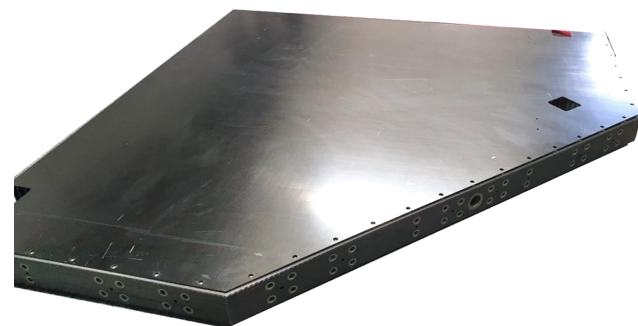
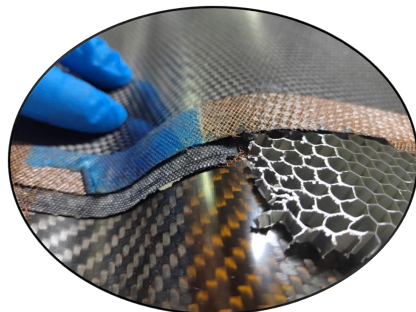
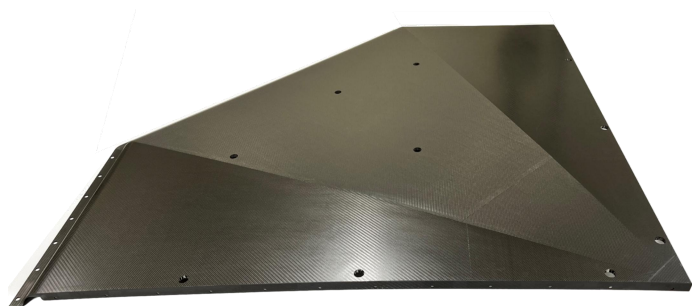
vibration test: no bonding-wire failure



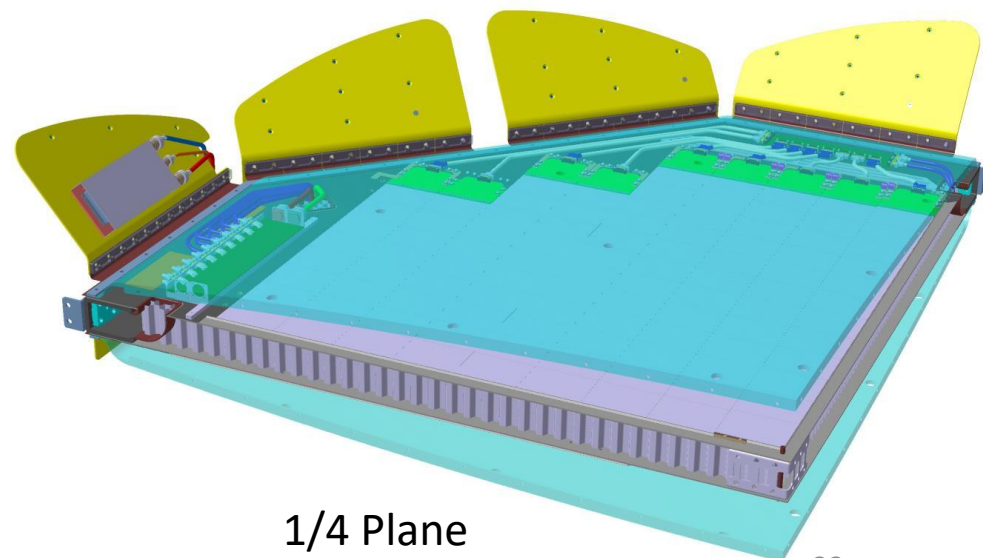
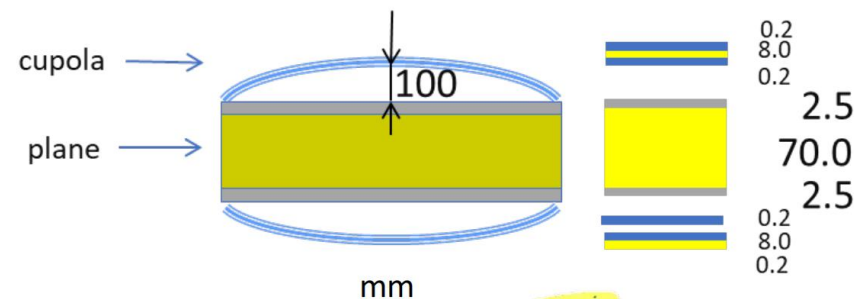
EMI test

L0 探测器机械支撑

- 碳纤维 + 铝蜂窝
 - 电磁屏蔽、散热、避光

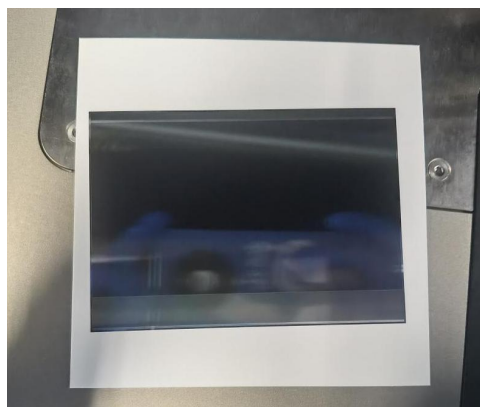


Dimensions
~2.6m diameter
~ 30 cm thick
~ 250 kg

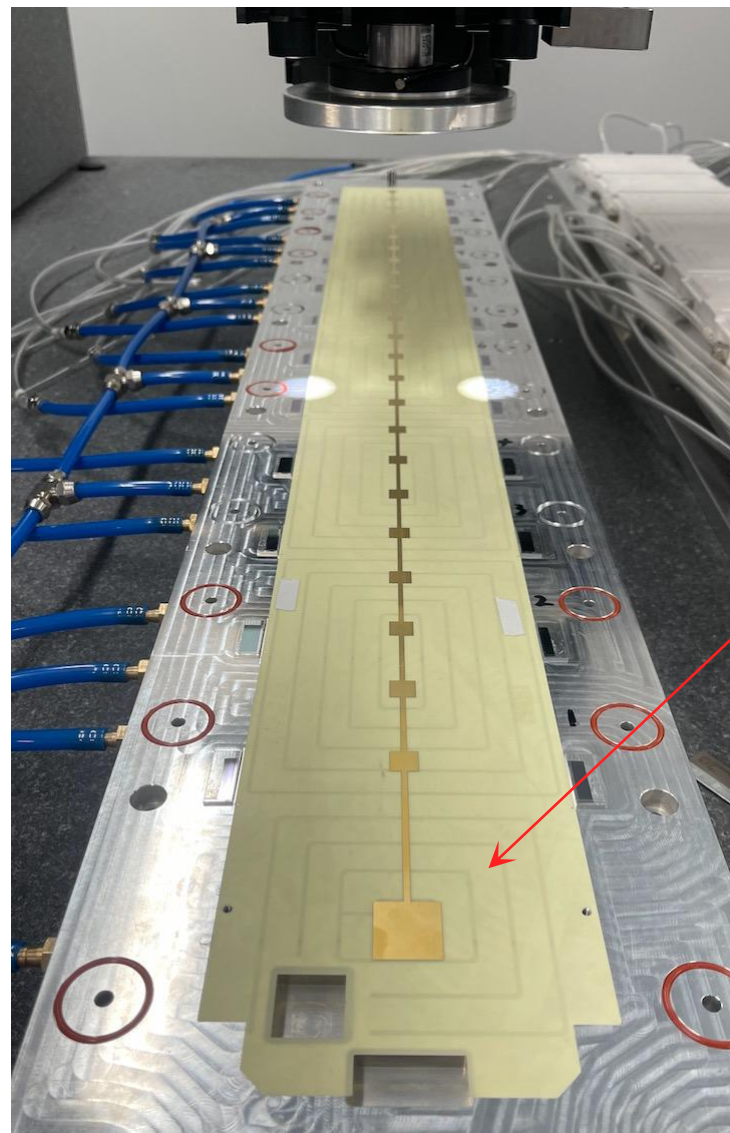
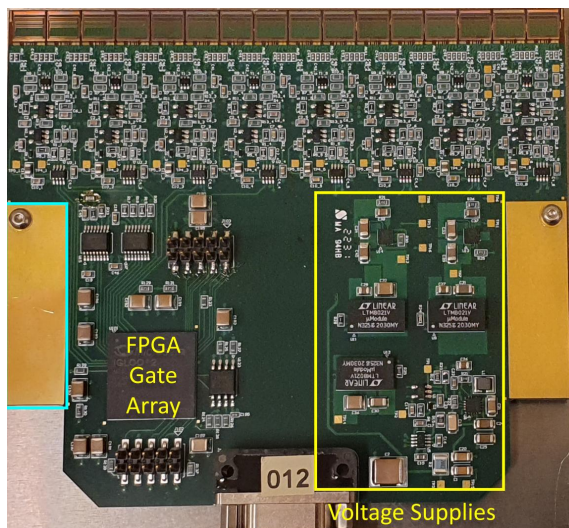


探测器模块所需原件

SSD



LEF



LBB

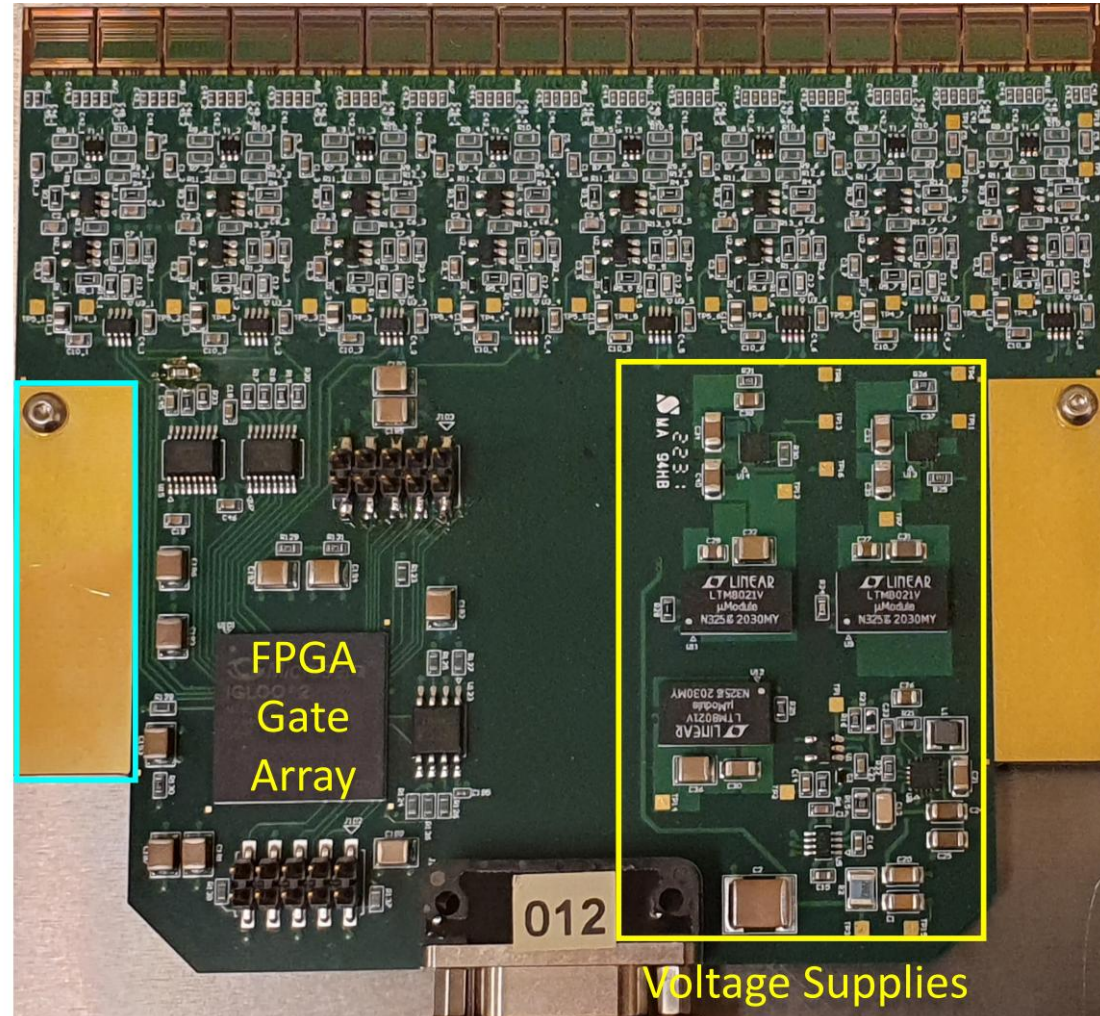
L0 Electronic Front End (LEF)

8 Amplifiers

8 14-Bit, 2.5Msps, Serial Sampling ADCs, 4096mV

Thermal Strips

1. Heat path to radiators.
2. Ground path to chassis

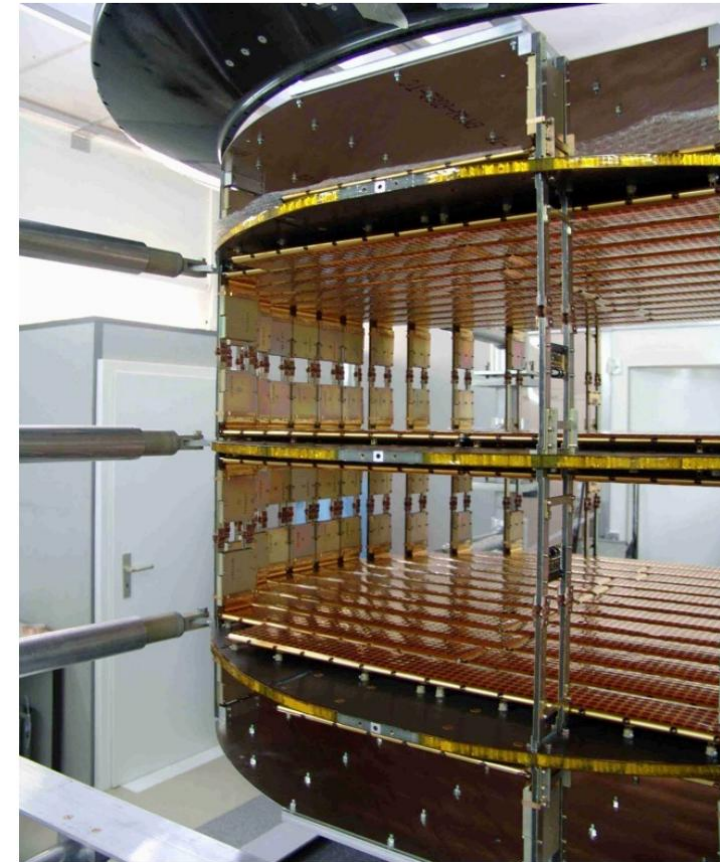
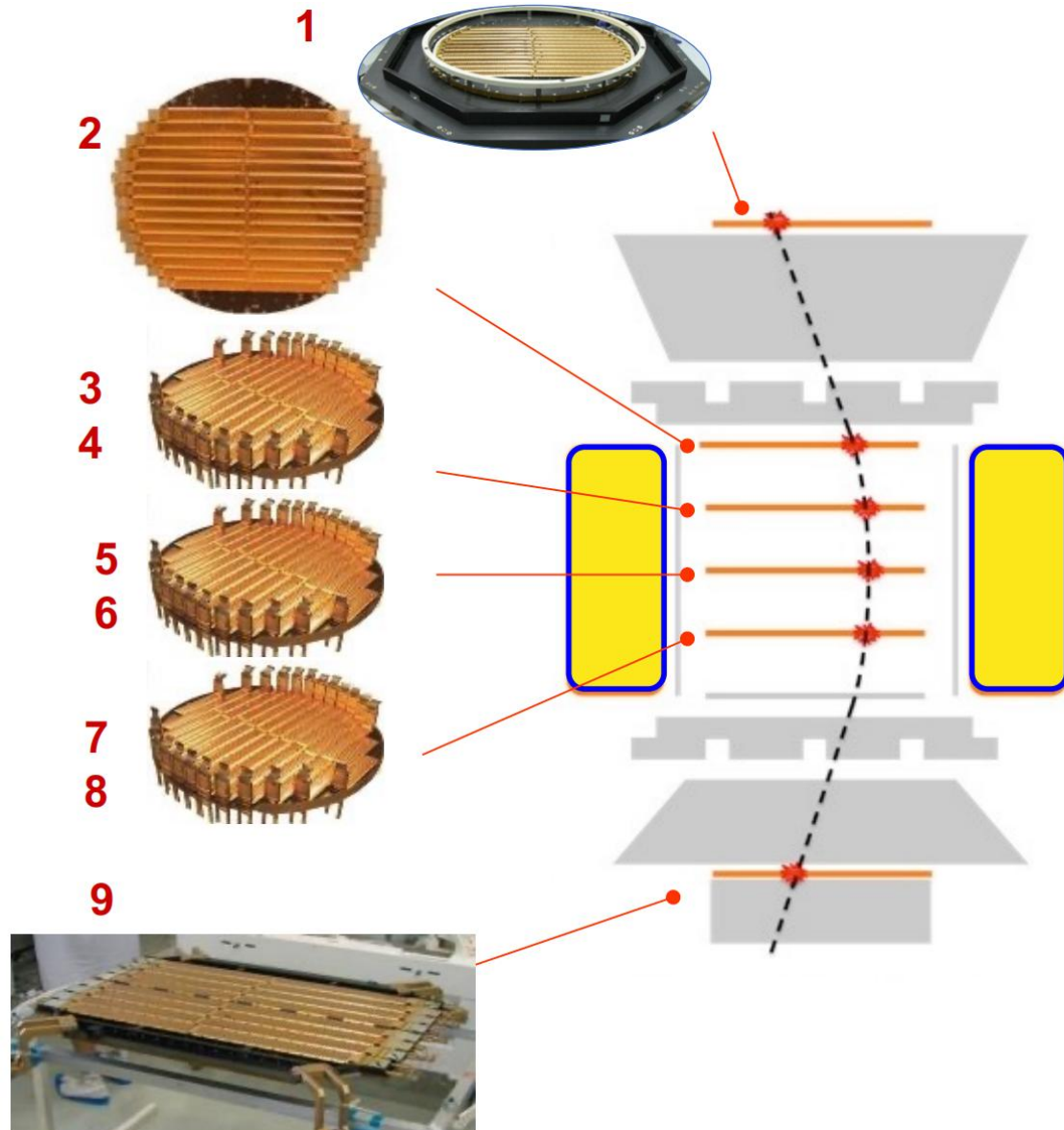


16 IDE1140, 1024 strips

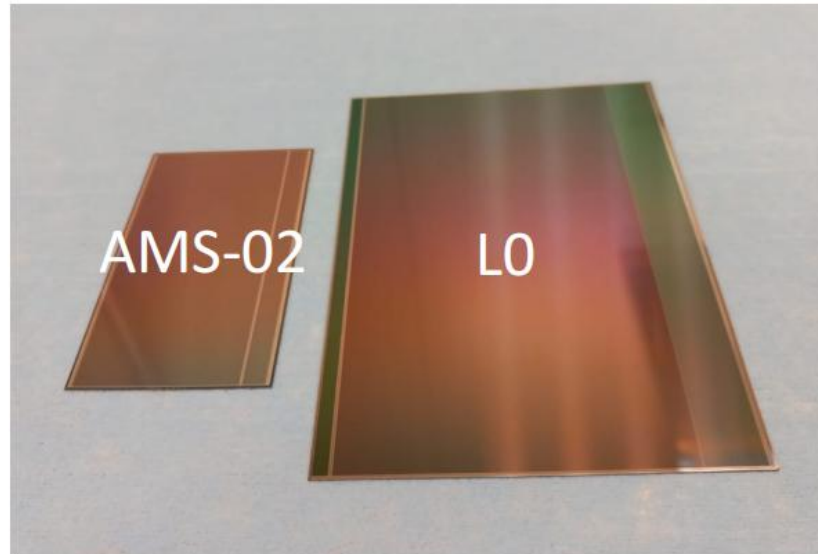
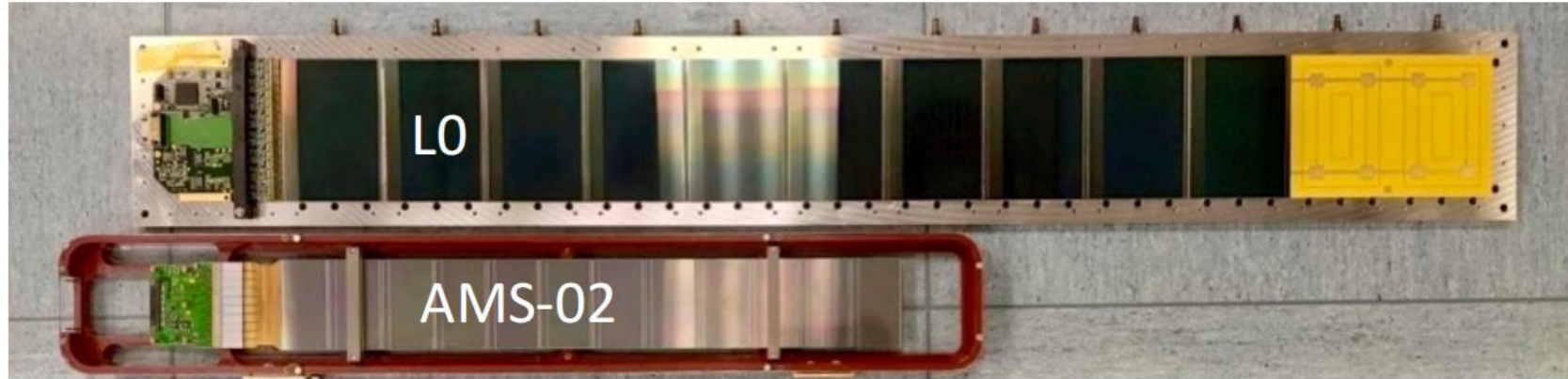
Each IDE1140 (“VA”)

- 64 channels charge amplifier/ shaper.
- Sample and hold.
- 64 channels analog multiplexor.
- 2.6 uA per 1 fC differential current output

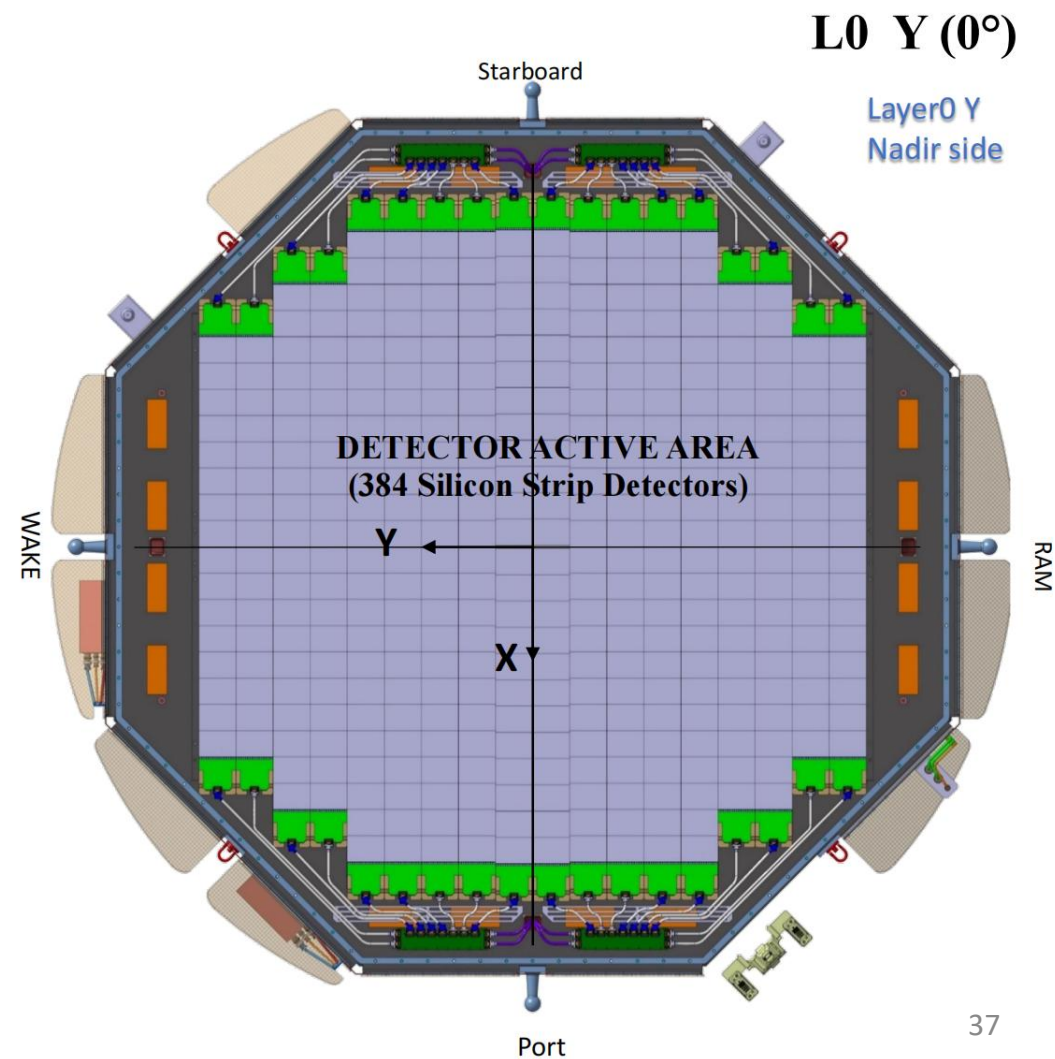
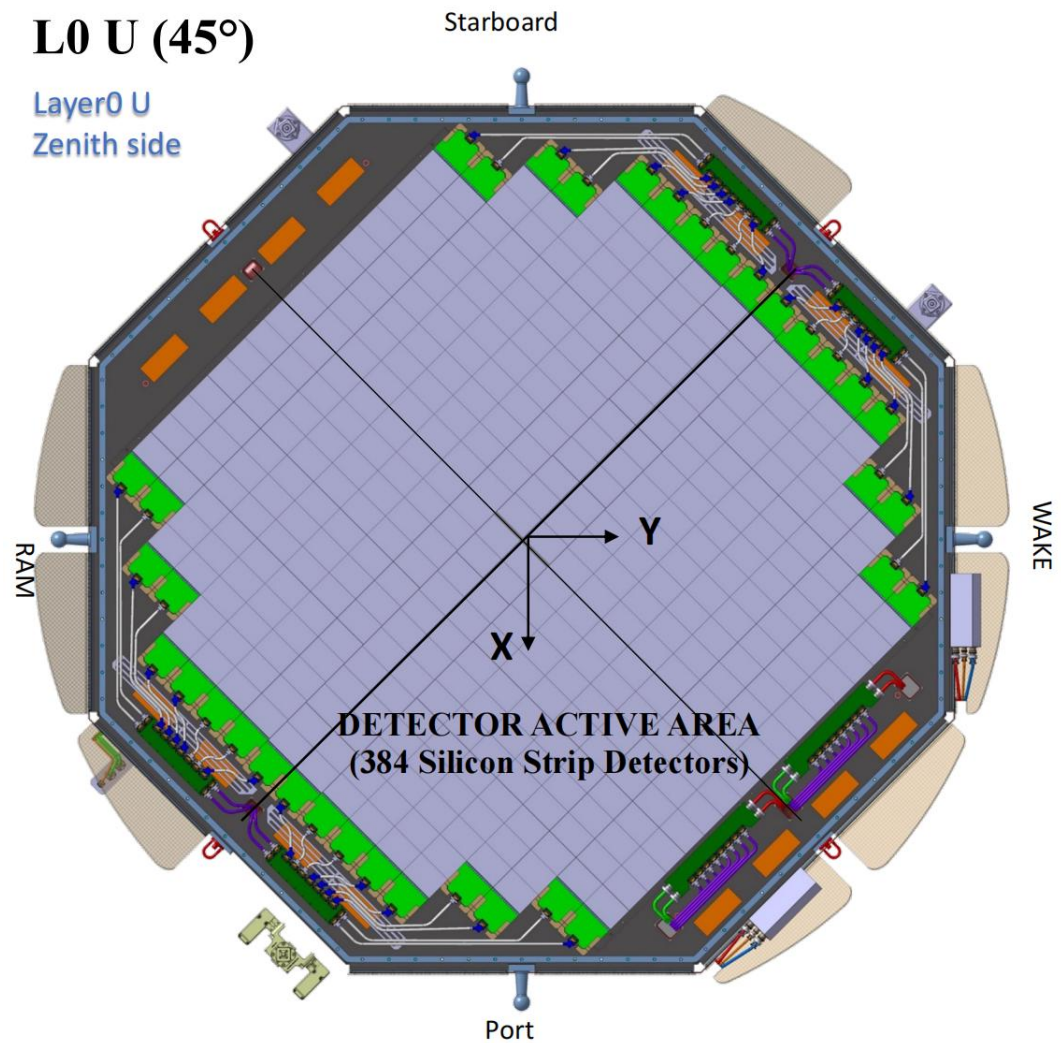
The layout of the AMS-02 Tracker



AMS-02 vs L0 ladders



Plane layout



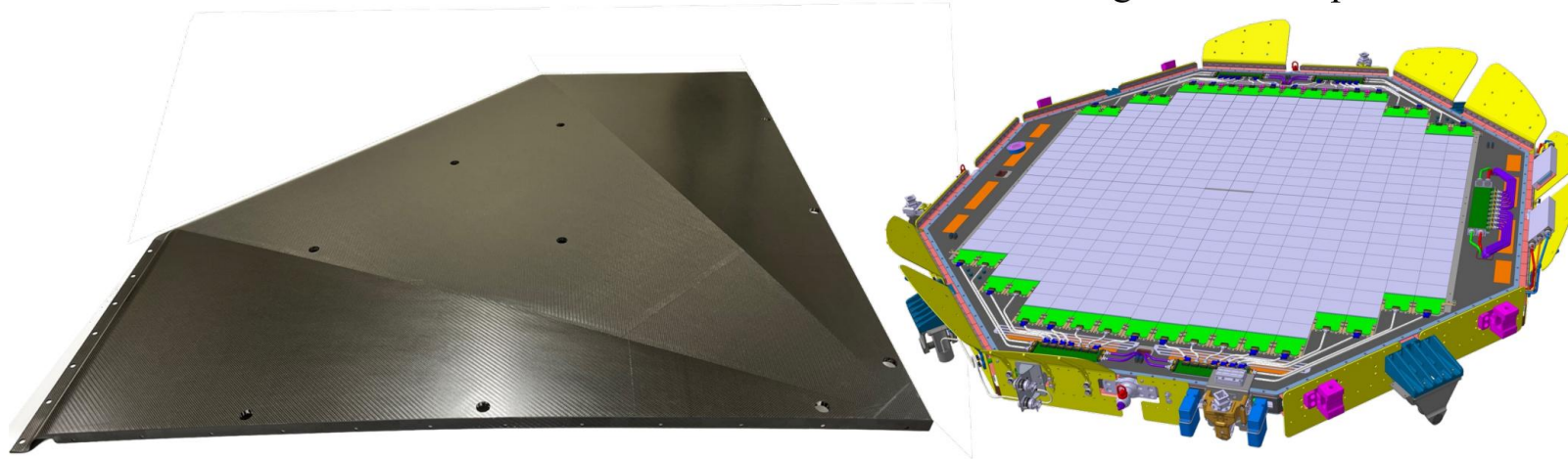
ASAPP 2023

AMS-L0: upgrade status and prospects

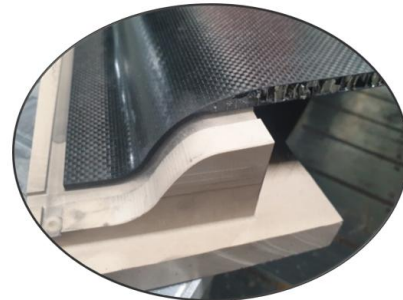
<https://indico.cern.ch/event/1208314/contributions/5283387/>

Mechanics

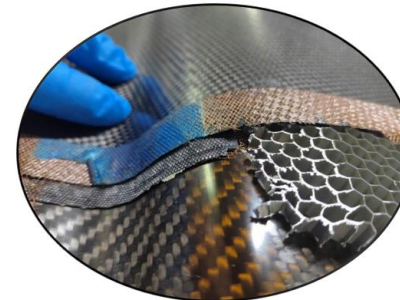
Light carbon cupola



Transition from sandwich to bolted interface



C. Gargiulo



Aluminum honeycomb
Carbon skin
Copper net for EMI

ASAPP 2023

AMS-L0: upgrade status and prospects

<https://indico.cern.ch/event/1208314/contributions/5283387/>

Mechanics

Carbon-plane and carbon-frame realize a thick stiff plane

