
ATLAS实验高颗粒度时间探测器/ CEPC顶点探测器的研发与束流测试

梁志均

中国科学院高能物理研究所

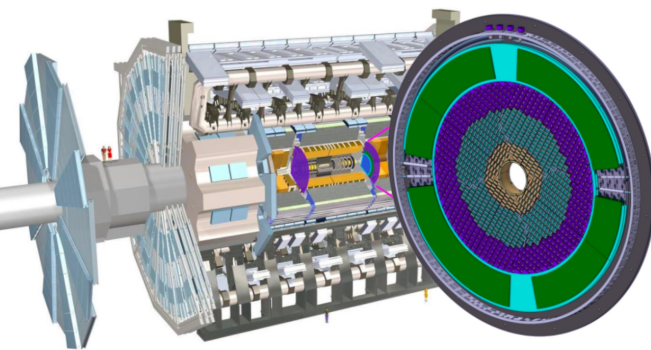
Outline

- 大型强子对撞机ATLAS实验高颗粒度时间探测器
- CEPC顶点探测器

High Granularity Timing Detector (HGTD)

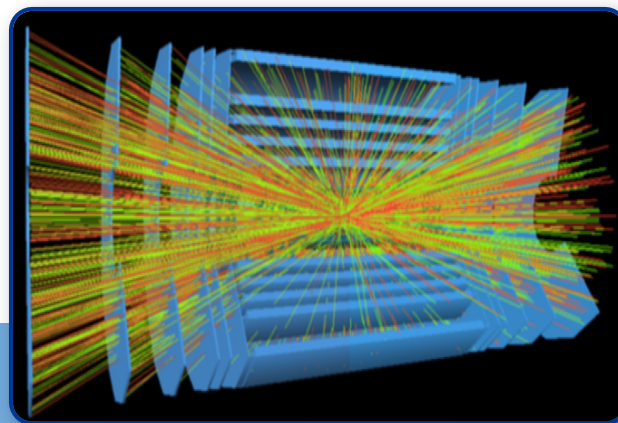
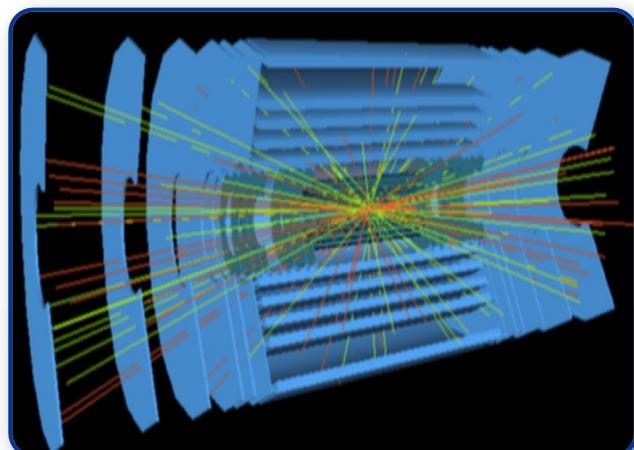
ATLAS实验高颗粒度时间探测器

- 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级（数纳秒→30皮秒）
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题
 - 6.4平方米的硅探测器, 30皮秒的时间分辨
 - 毫米级的颗粒度, 超过三百万个读出通道
 - 能承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 的等效中子通量的辐照



目前的ATLAS探测器

高亮度LHC升级后的ATLAS探测器



ATLAS高时间分辨探测器：重要管理职位

- 中国组在ATLAS高颗粒的时间探测器项目（HGTD）中起主导作用
 - 本人目前担任项目副经理（2025年3月--2027年2月）
 - 2021-2025年2月,高能所Joao曾担任两届的HGTD项目经理
 - 5人曾担任Level-2召集人（梁志均，张杰，赵梅，张照茹，吴雨生）
 - 3人担任Level-3召集人（张杰，樊磊，樊云云）
 - 1人曾担任speaker committee（刘衍文）



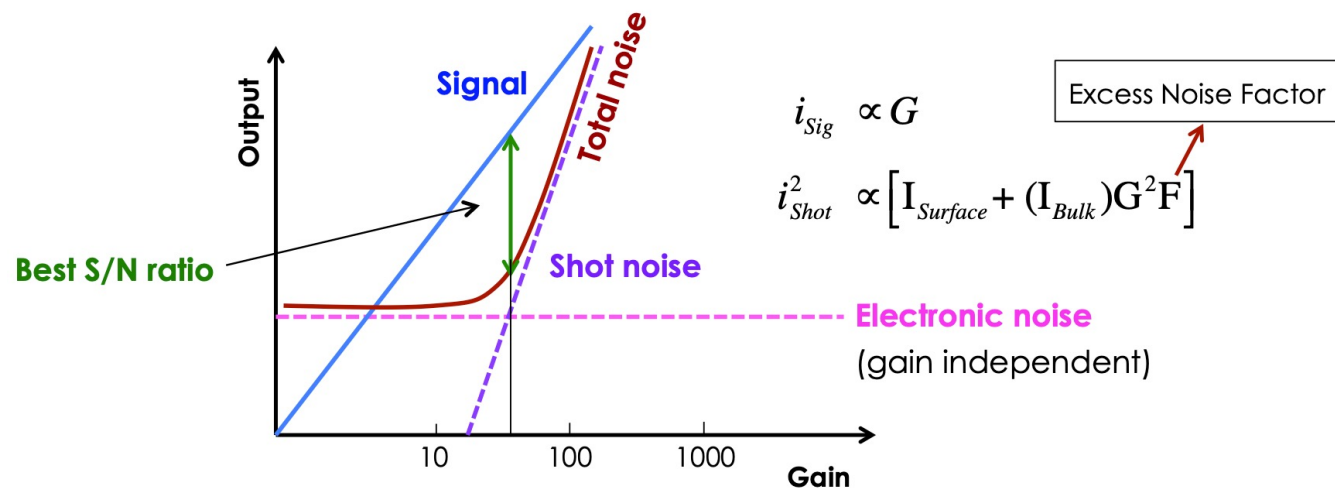
Low Gain Avalanche Detectors (LGAD)

低增益雪崩硅传感器

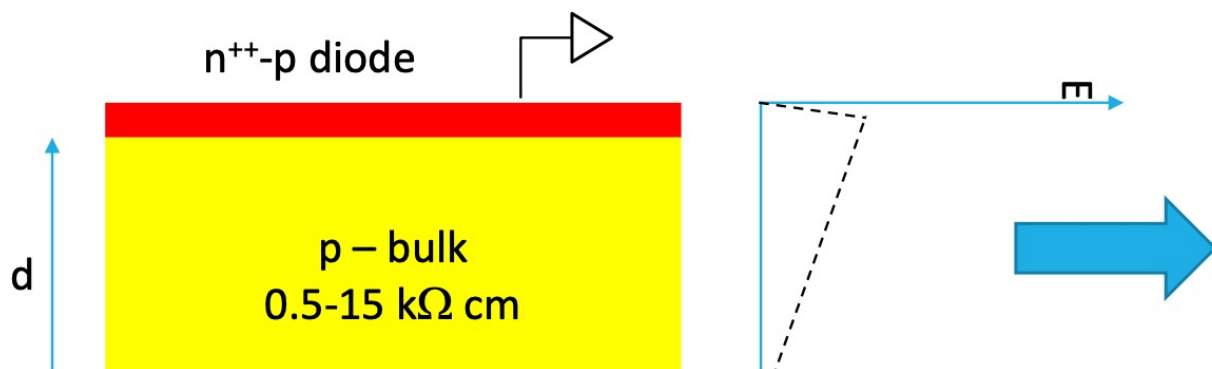
➤ 与APD 和 SiPM比较, LGAD has 适中的增益 (10-50)

- 信噪比高, 无自触发
- 减薄耗尽区 (漂移区)
- 提高电场与电子漂移速度

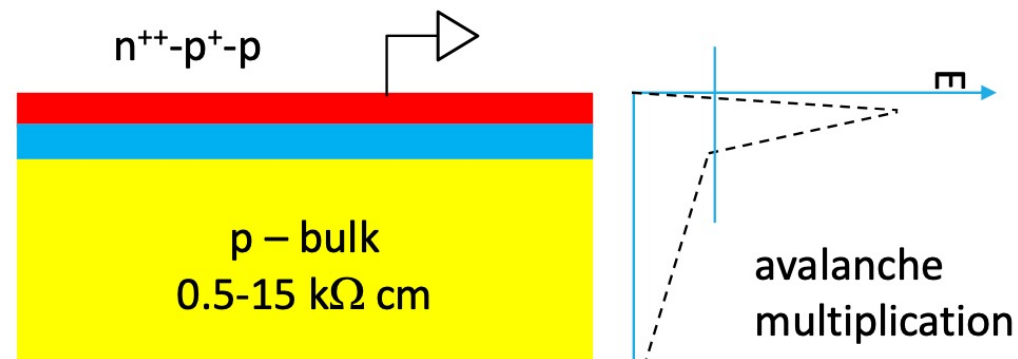
$$\sigma_{jitter}^2 = \left(\frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$



一般的 PiN结传感器

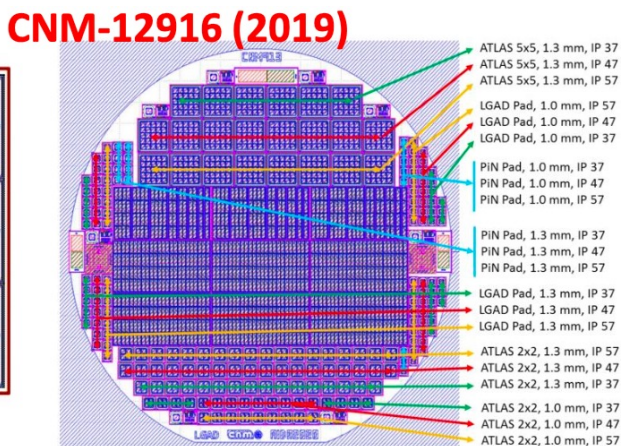
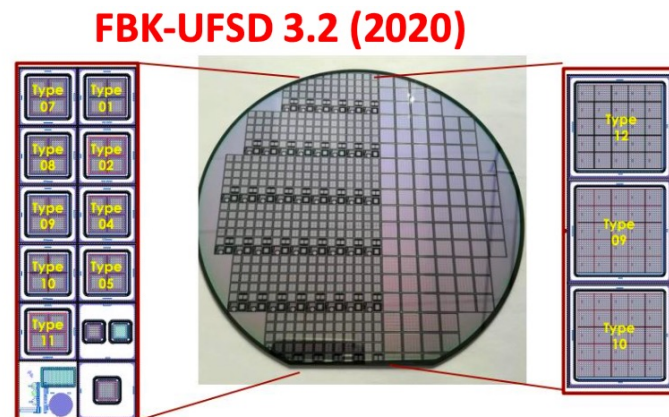
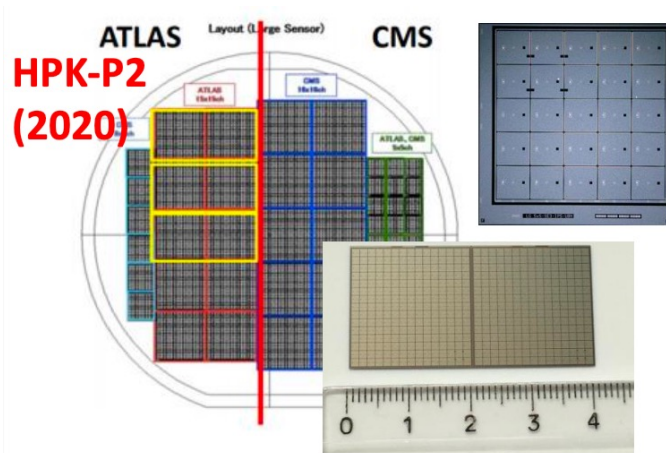


低增益雪崩硅传感器
P+ gain layer on top of PIN diode



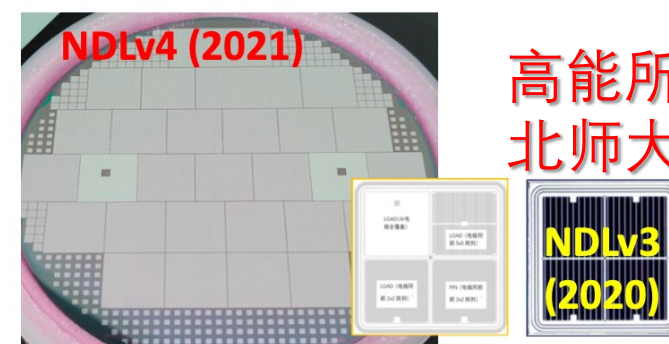
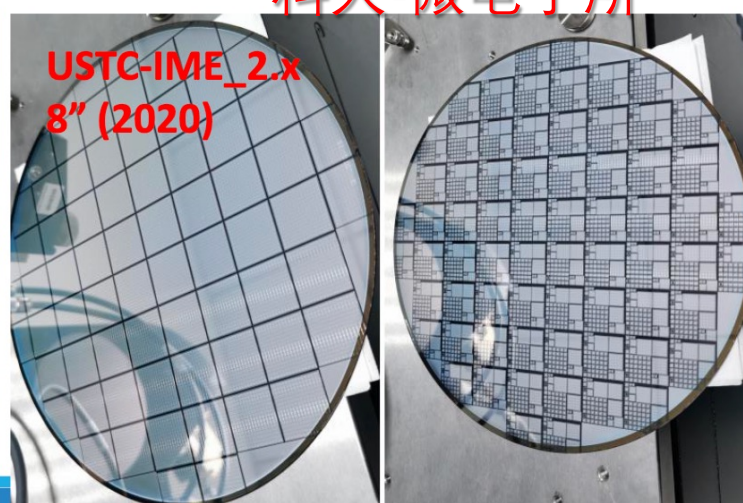
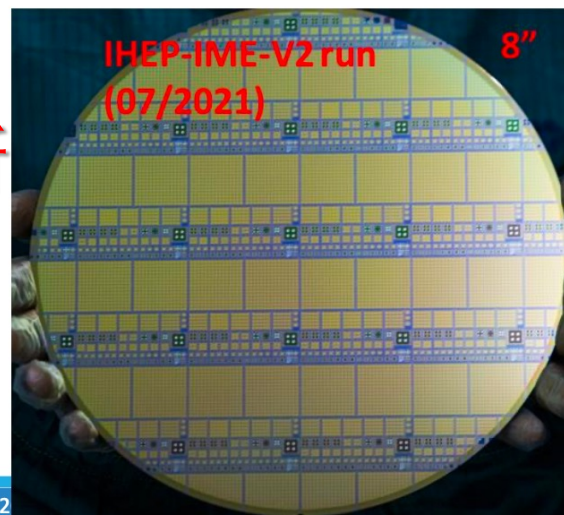
LGAD低增益雪崩硅传感器：国内外形势

- 2015年后，全世界范围涌现出很多研制LGAD硅传感器的单位
 - 国内：IHEP-IME (高能所-微电子所), USTC-IME (科大-微电子所), NDL(高能所-北师大)
 - 国际：滨松HPK (Japan), FBK (意大利), CNM (西班牙) ...



科大-微电子所

高能所-
微电子所



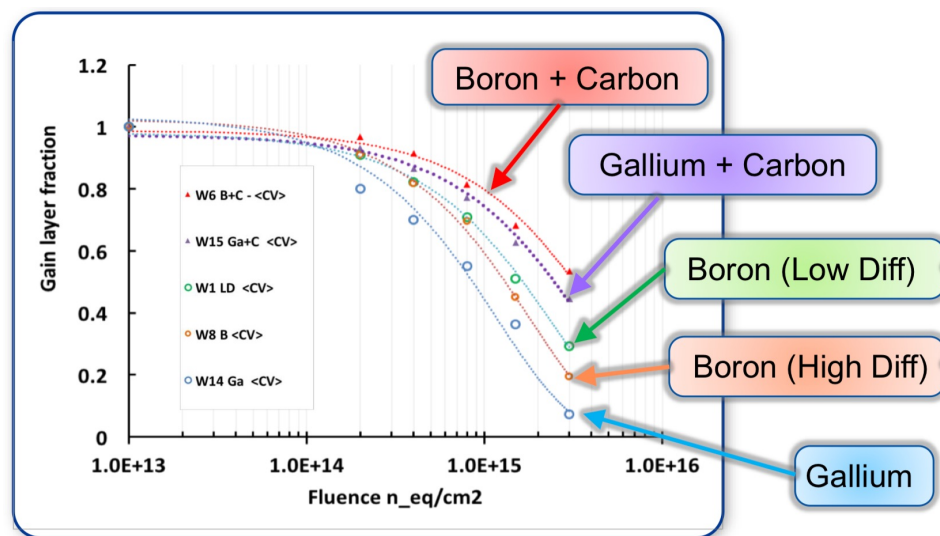
高能所
北师大

PLANAR TECHNOLOGY – more vendors
(e2V, BNL, Micron ...)

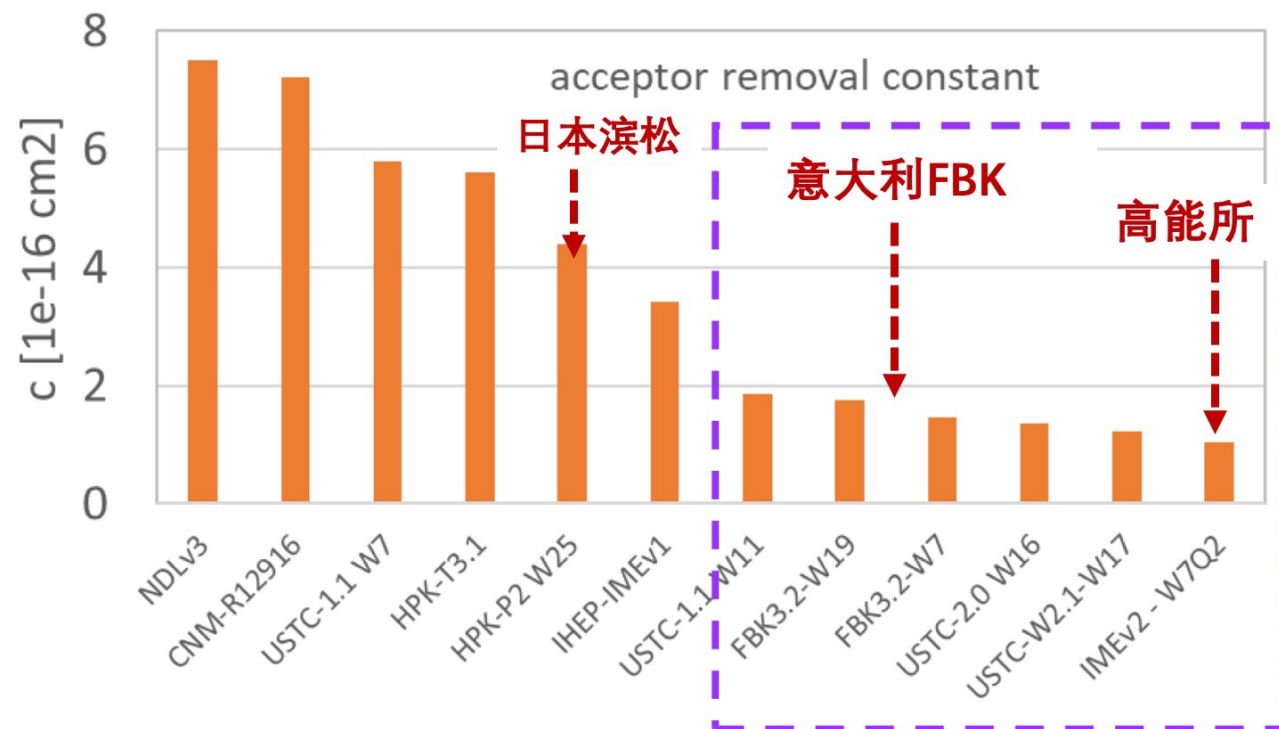
LGAD传感器辐照后硼掺杂移除 (Acceptor removal)

- 辐照后，硼掺杂失去活性，LGAD传感器增益下降(Acceptor removal)
- 高能所等国产LGAD采用掺碳工艺
 - 显著减低辐照后损伤（减低硼移除率）
 - 目前抗辐照性能优于滨松

高能所传感器
目前移除率最低（最佳抗辐照性能）



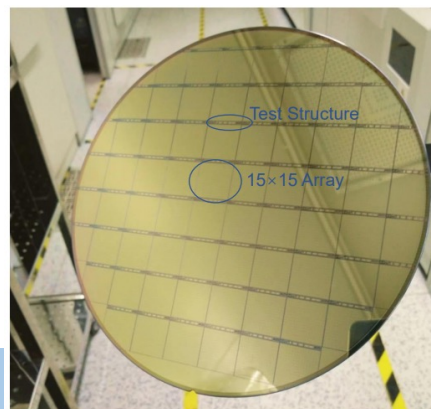
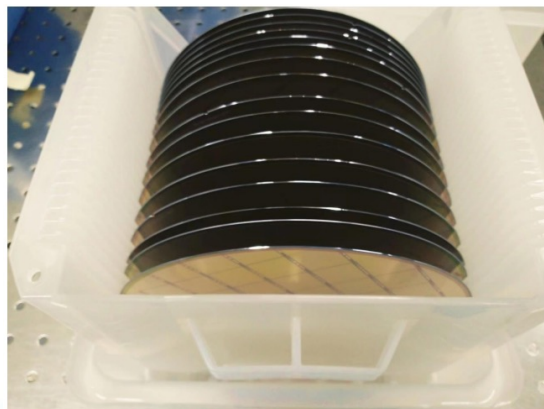
[G.Paternoster, FBK, Trento, Feb.2019]



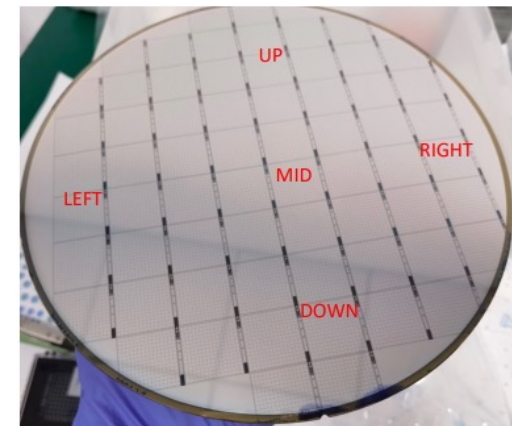
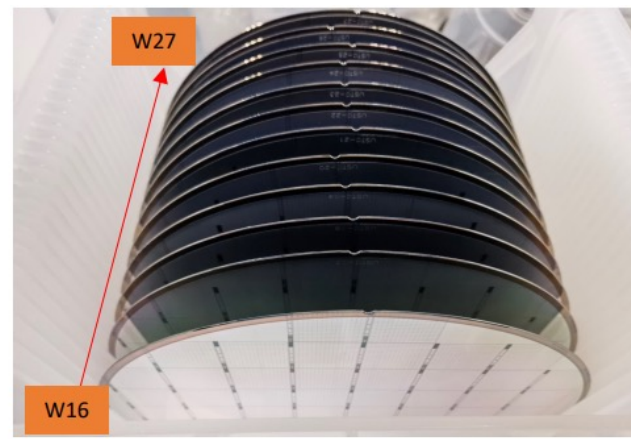
LGAD传感器的量产

- 2023年，**高能所-微电子**所赢得CERN的招标订单。今年初签订正式合同
 - 在日本滨松、意大利FBK等竞争下，高能所-微电子所赢下招标
 - **欧洲核子中心（CERN）首次采购中国产的硅传感器**
- 各单位在该项目LGAD传感器的贡献比重，总共需要2.1万个传感器
 - 高能所-微电子所：**90%**（**66% CERN采购**+ 24%实物贡献）
 - 中科大-微电子所：**10% 实物贡献**

高能所-微电子所LGAD预生产



中科大-微电子所LGAD预生产

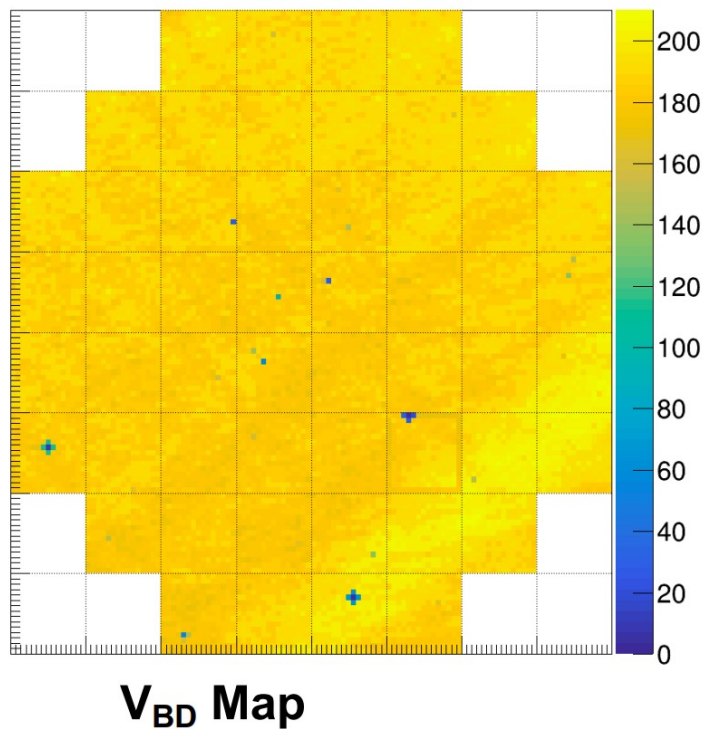
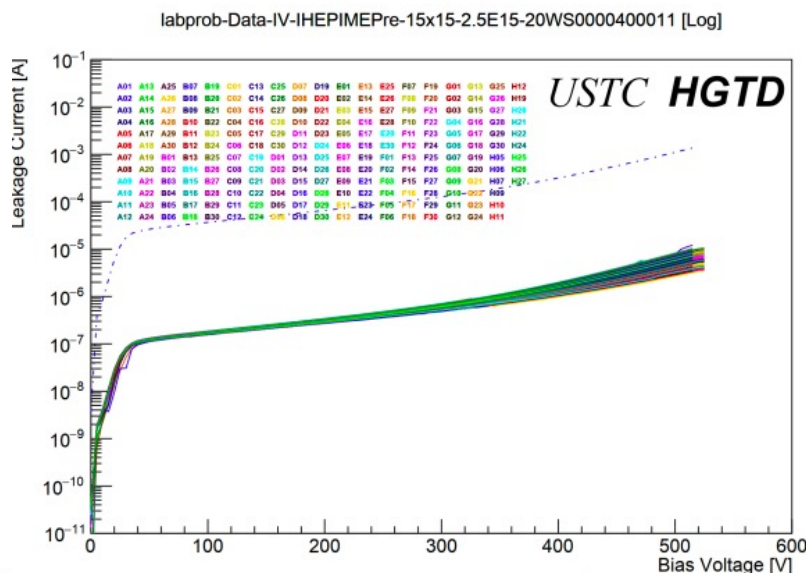


LGAD传感器的预量产

- 高能所与中科大分别已经完成1702个与208个LGAD，接近总量~10%
- LGAD传感器有225个像素，辐照前后的漏电流与击穿电压都非常均匀
- 辐照前后，时间分辨率都可以达到30~40皮秒

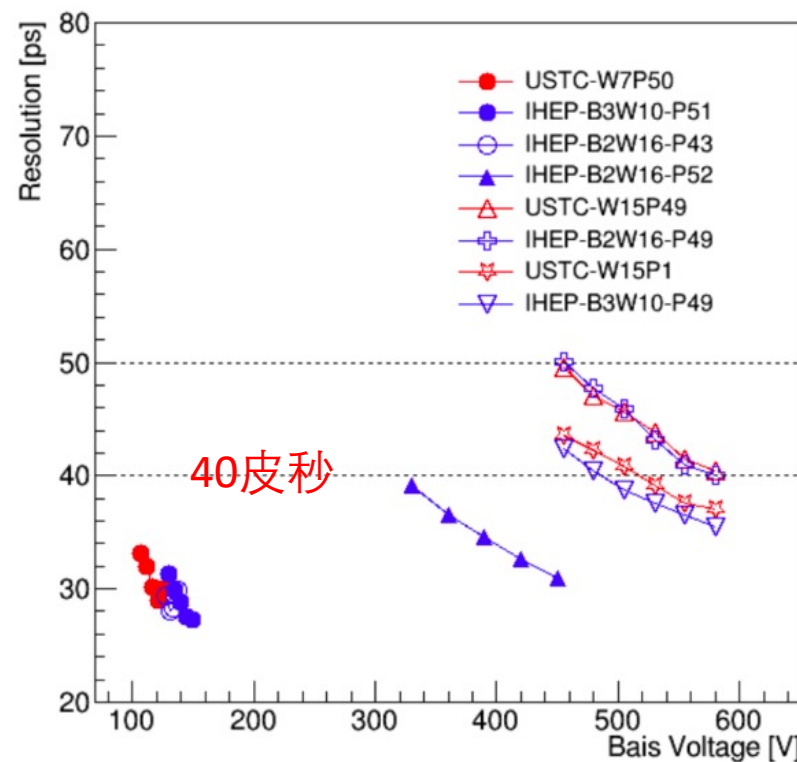
辐照后LGAD的漏电流与击穿电压

20WS0000400011@2.5E15 n_{eq}/cm²



辐照后LGAD的时间分辨率

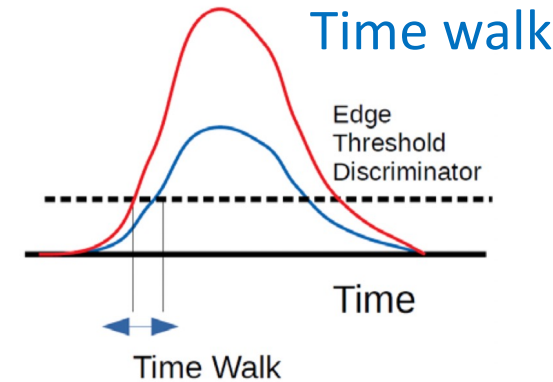
Time Resolution - HGTD TB June 2024



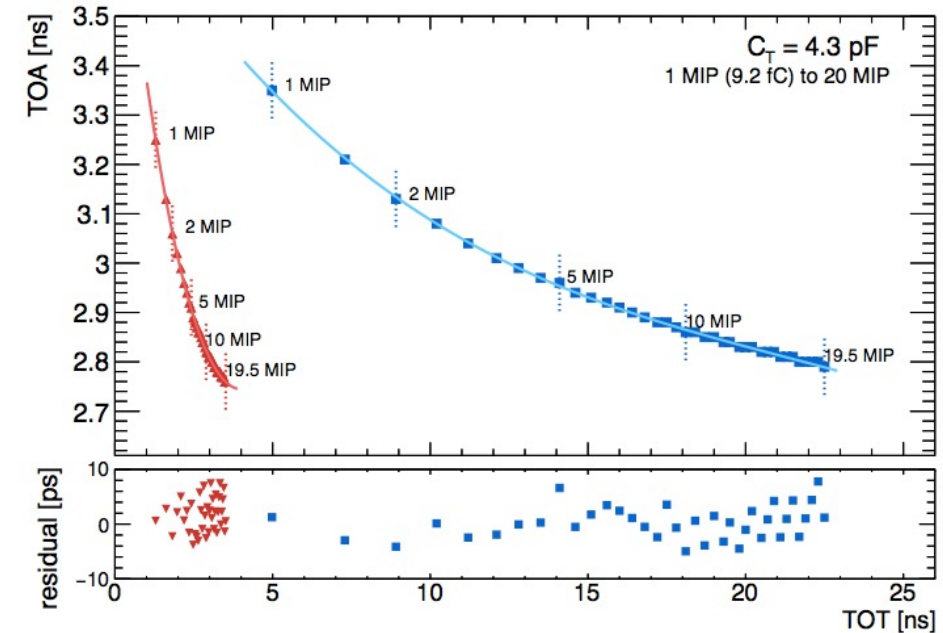
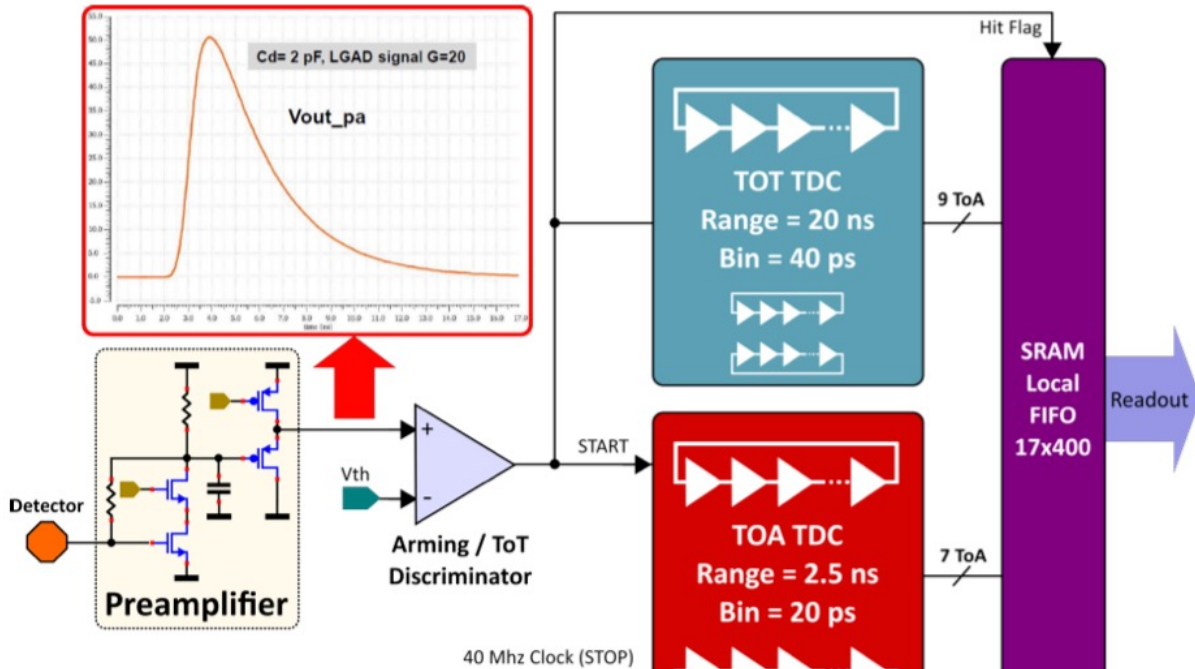
ALTIROC : 超快读出ASIC



- ATLAS时间探测器研发超快读出ASIC芯片，多个单位参与
 - 高能所参与ASIC中数字电路部分的设计，承担50%的晶圆测试
- 225通道，每个通道有一个前端放大器，甄别器，两个TDC:
 - Time of Arrival (TOA) : Range of 2.5 ns and a bin of 20 ps (7 bits)
 - Time Over Threshold (TOT) : range of 20 ns and a bin of 40 ps (9 bits)

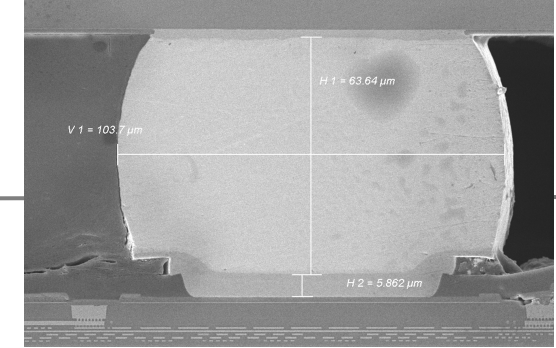


ALTIROC 芯片原理图

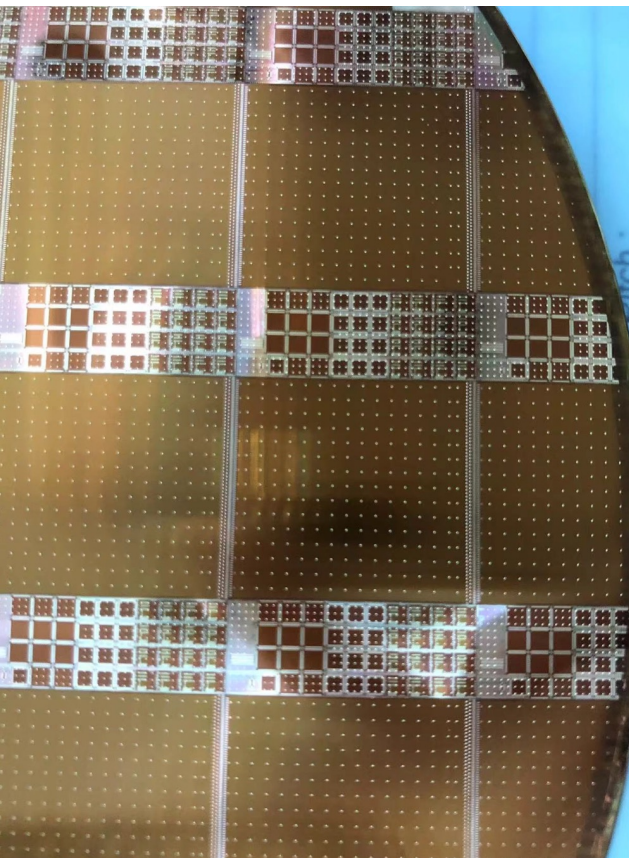


探测器模块：倒装焊封装

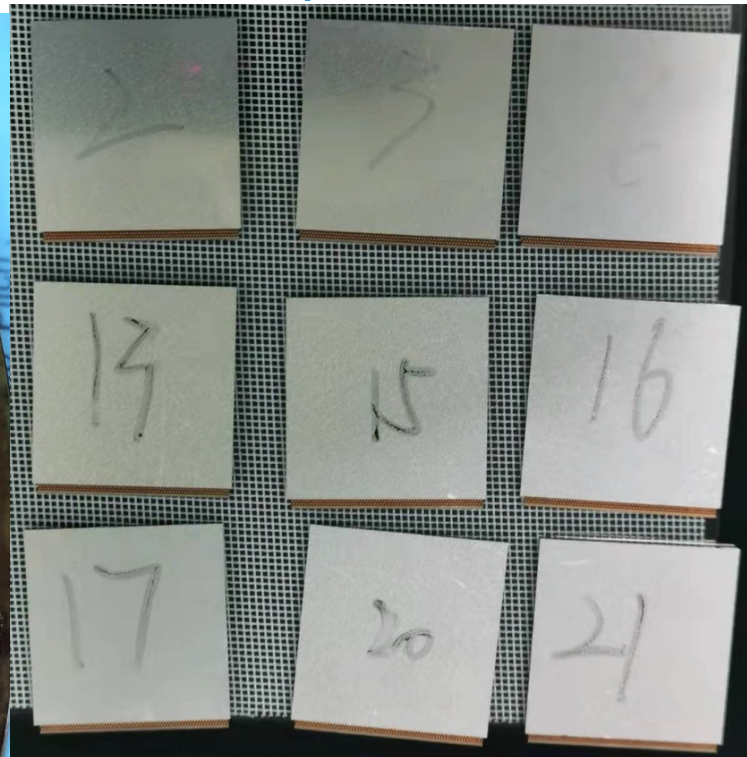
- 高能所承担项目中**50%的**倒装焊封装任务
- 高能所在国内已经研制出100多个倒装焊模块



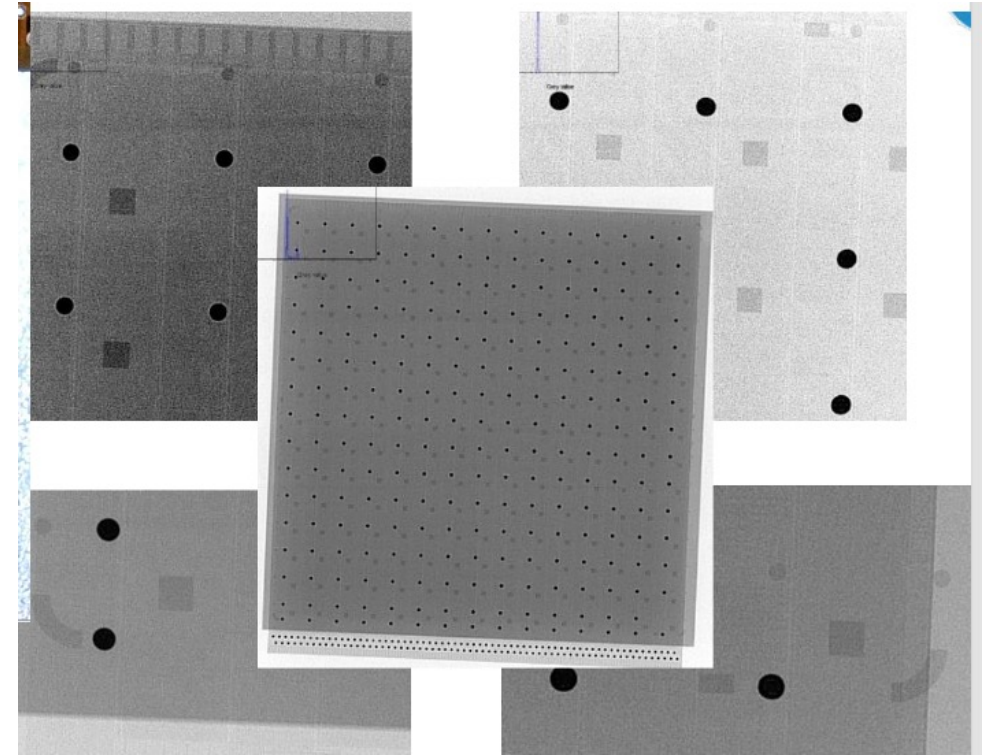
ALTIROC 芯片晶圆植球



倒装焊模块后的模块

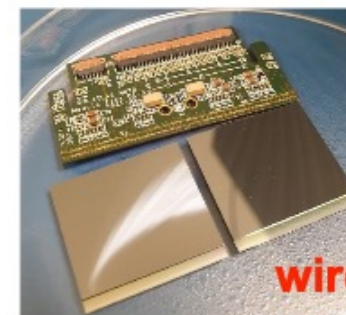
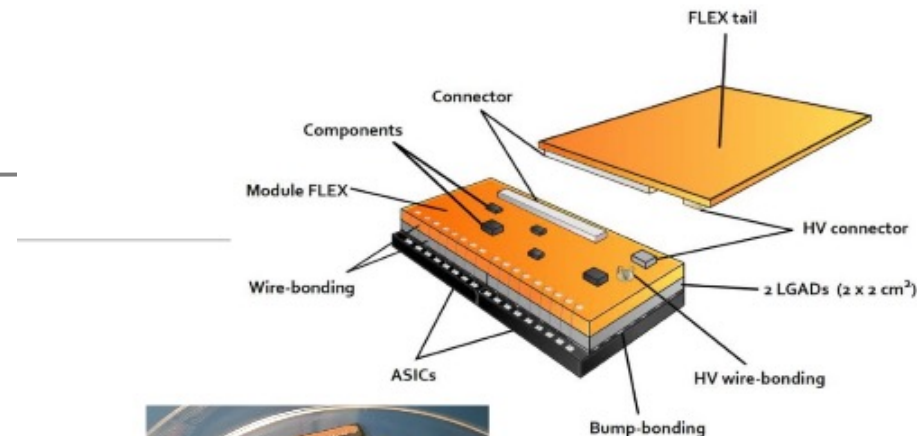


X-ray image of full-size hybrid

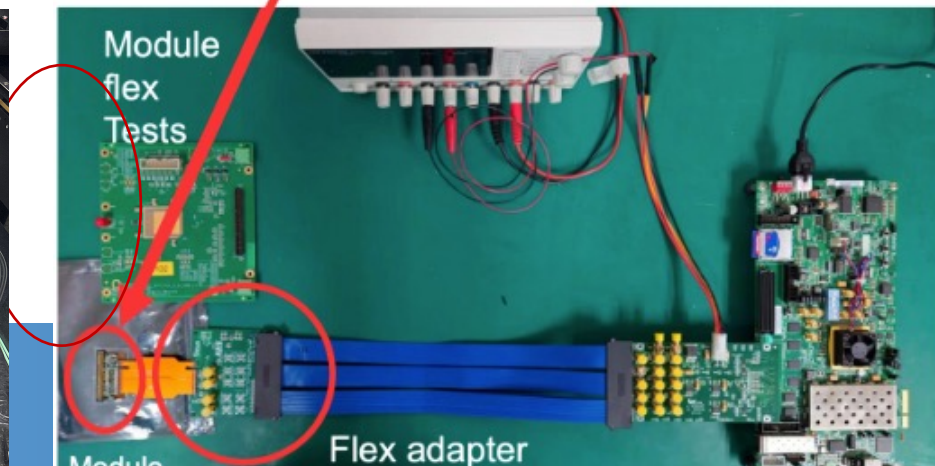
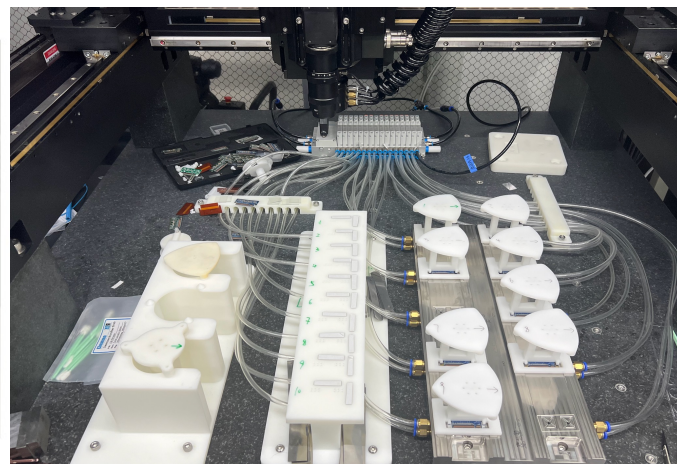
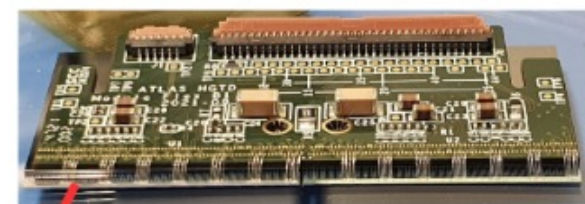


ATLAS时间探测器模块组装

- HGTD项目总共需要8032个探测器模块
- 6个模块组装生产中心
 - 高能所, 中科大, 德国, 法国, 西班牙, 摩洛哥
 - 高能所是最大的生产中心, 组装34%的模块
 - 科大承担10%探测器模块组装
- 高能所、科大研制国产自动组装系统
 - 有高分辨图像系统, 做芯片图像识别
 - 自动芯片组装、点胶

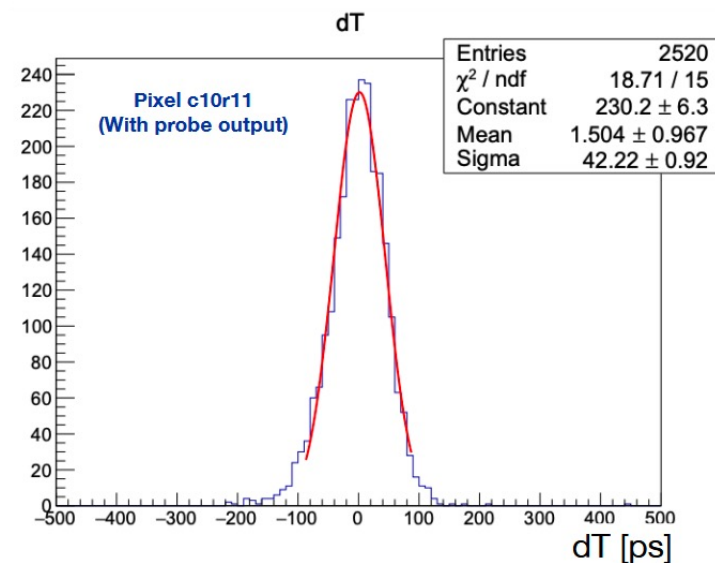
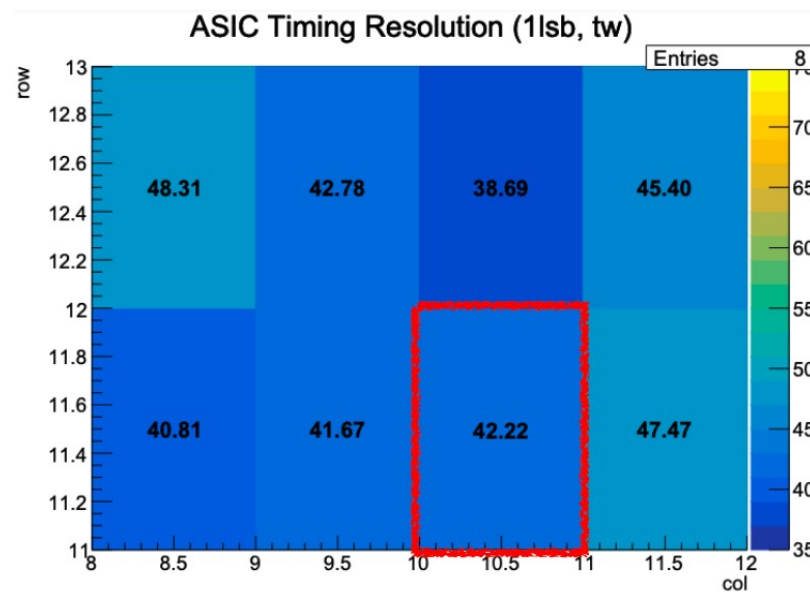


glue+
wire-bonds



探测器模块的束流测试

- HGTD的模块在CERN和DESY束流测试
 - 探测器模块是 15×15 像素阵列，225通道
 - 模块级别，每个像素的时间分辨 ~ 42 皮秒

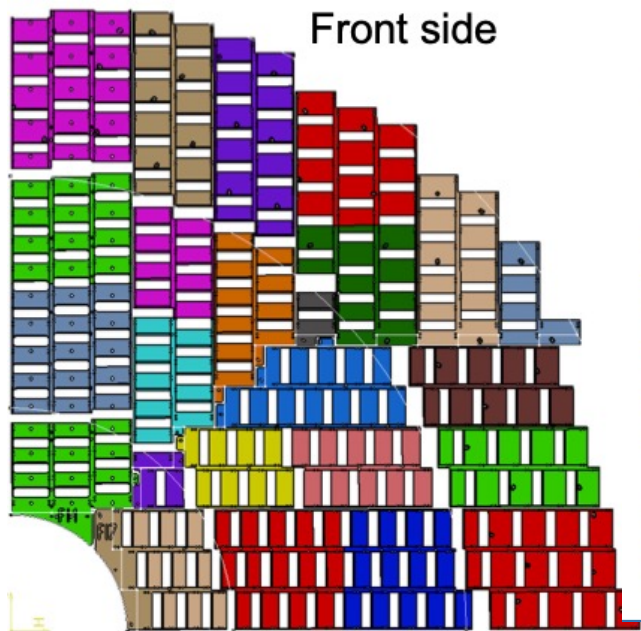


HGTD探测器单元

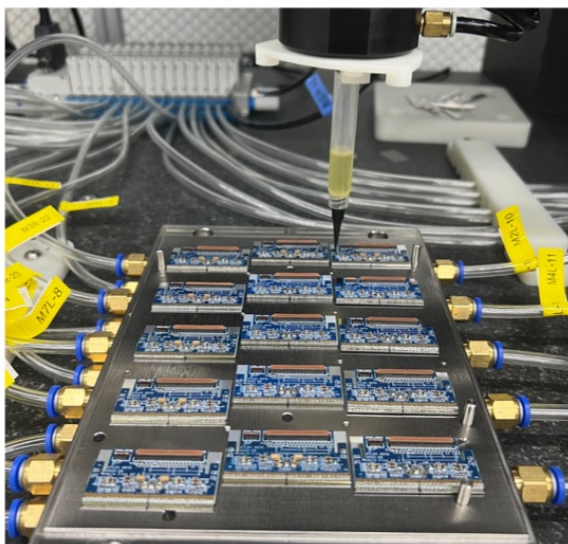
- 高能所研制项目首批两个ALTIROC3大面积探测器单元
 - 每个探测器单元有15个模块，约~500平方厘米面积。
 - 这两个探测器单元是HGTD项目首个大型系统级样机的重要组成部分

自动定位与点胶

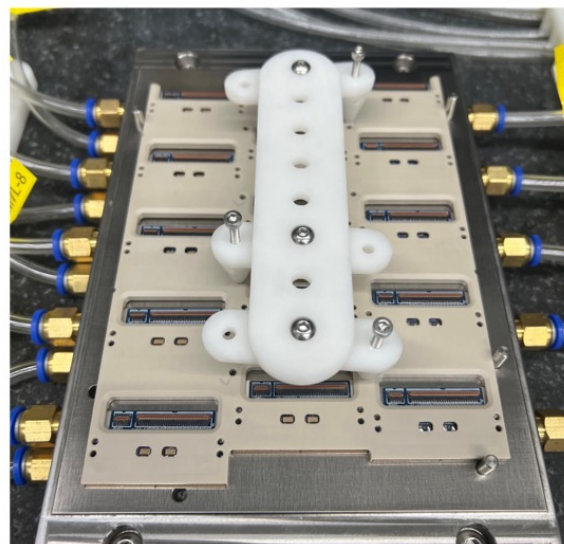
Front side



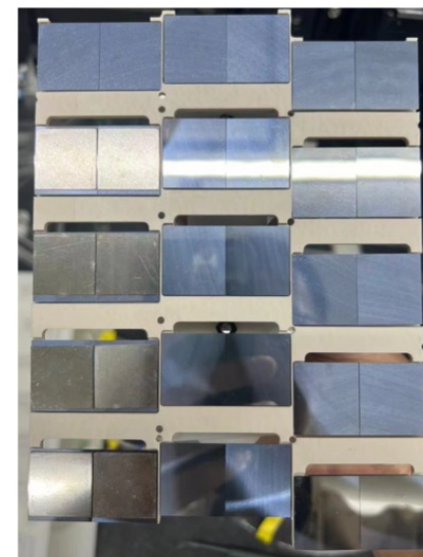
Dispensing with GluingTool



Put the support unit

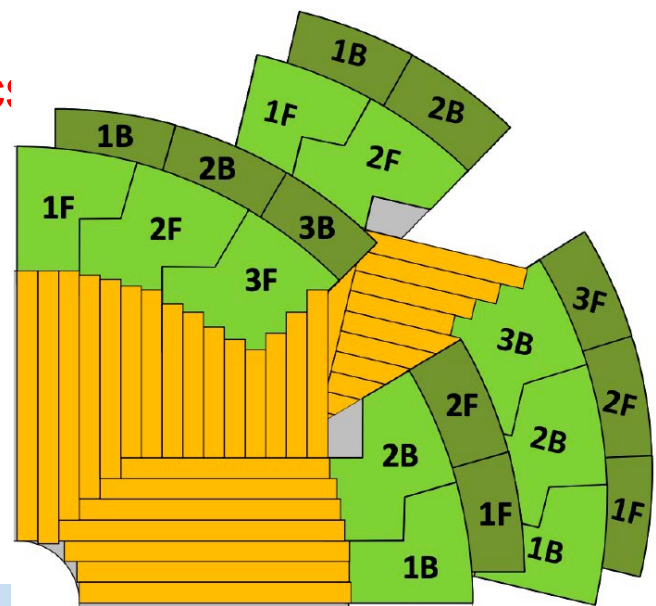
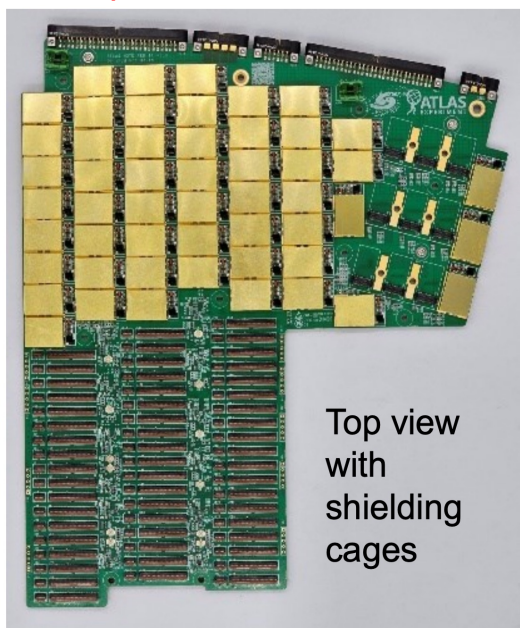


Backside view after removal

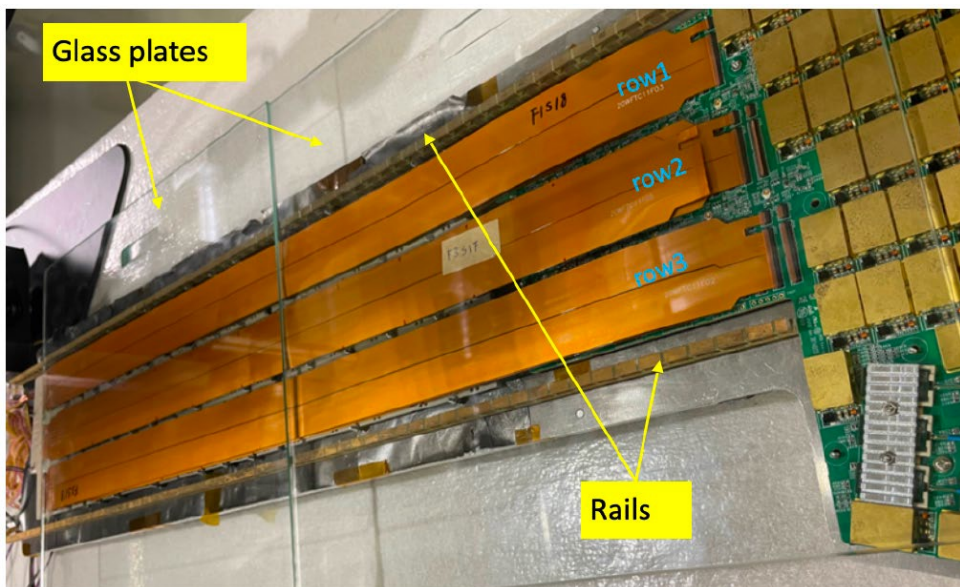


外围电路板

- 高能所与南大合作设计出HGTD项目首个外围电路板
 - 同时与55个模块通讯，二十多层金属层，52个电源，12个IpGBT模块
 - ❑ CERN P2UG 评委认可这个板子的研发难度非常大
 - ❑ It is comparable with the most difficult boards manufactured for HEP project
 - 山大研发柔性电缆，解决阻抗匹配、高速传输等问题，满足实验上厚度要求
- 外围电路板



外围电路板与柔性电缆

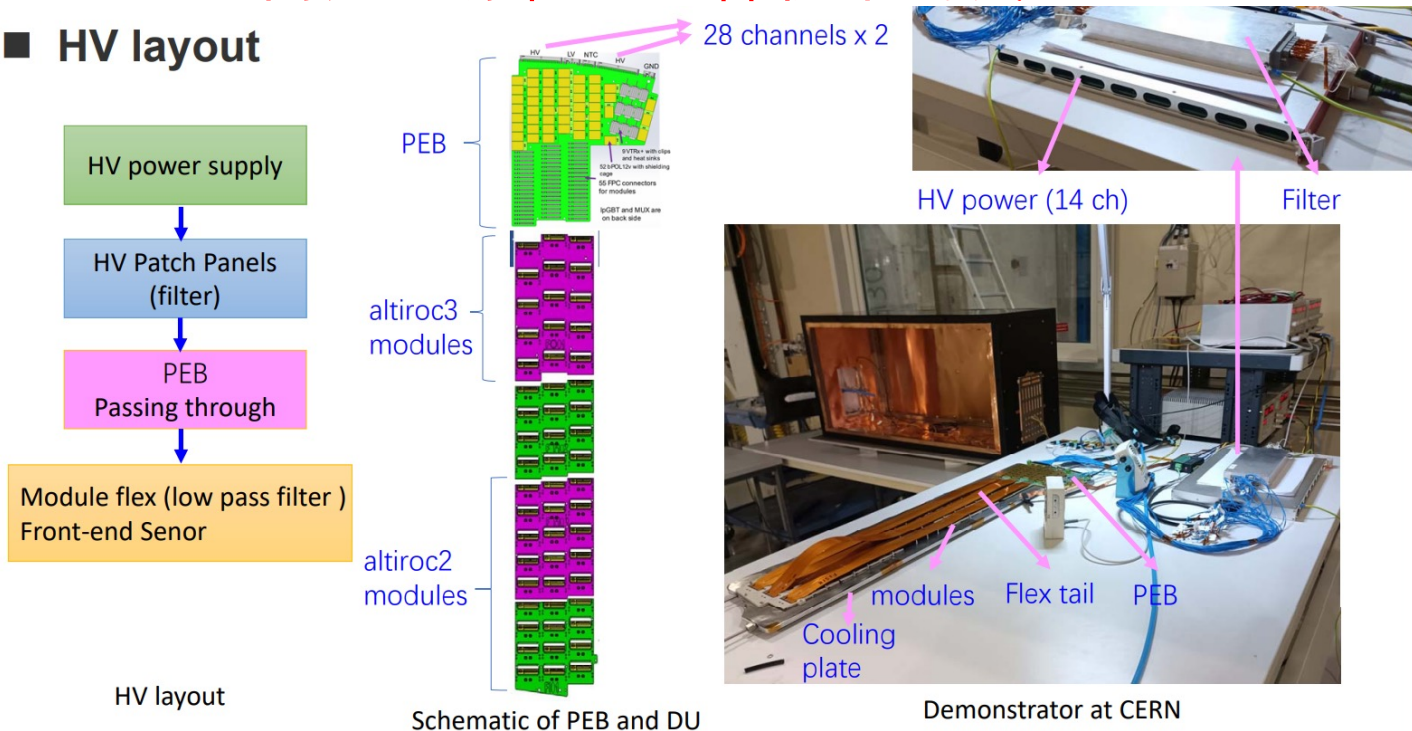


高压电源

- 高能所、山大承担18%的高压电源研制任务
 - 与国内企业研发出高压系统样机
 - 实现高精度100nA级别的漏电流测量
 - 通过CERN的评审，开始预量产

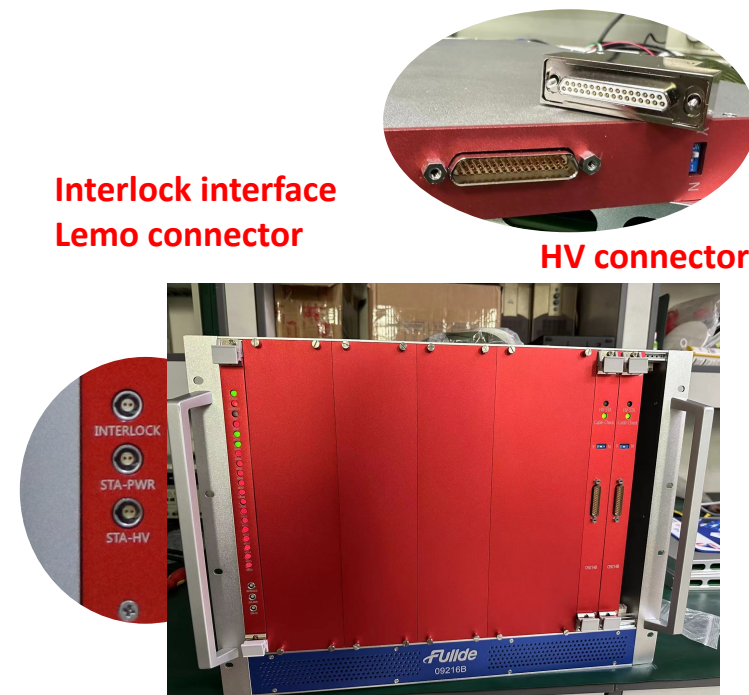
高压电源在工程样机中测试

■ HV layout



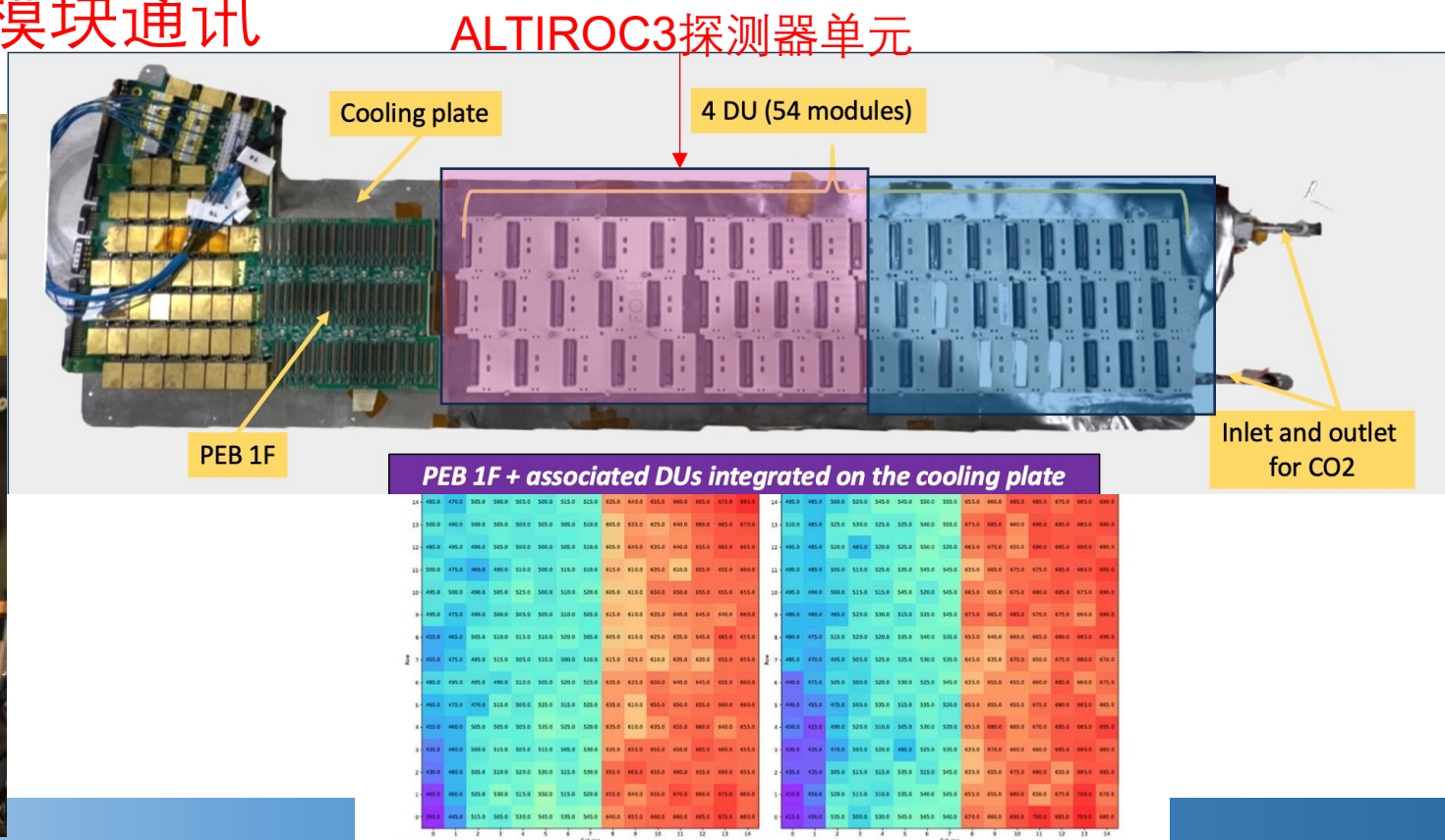
Interlock interface
Lemo connector

HV connector



54模块的大型系统级样机

- 中国组提供该样机大部分的组成部分
 - 探测器模块单元，外围电路板，柔性电缆，高压电源
- 高能所和南大在研制54模块的大型系统级样机与DAQ系统研发起主要作用
 - 首次验证了同时与几十个模块通讯



小结: ATLAS实验高颗粒度时间探测器

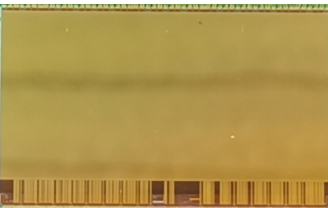
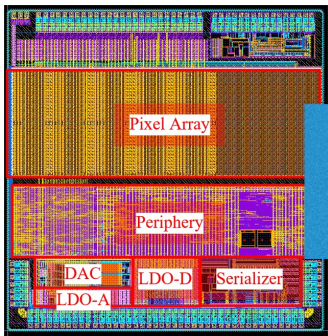
- 中国组在项目中占**主导地位**，担任等**项目经理**等多个领导职务。
- LGAD传感器，共需要2.1万个传感器，目前已经研制约2000个：
 - 高能所-微电子所赢得欧洲核子中心（CERN）国际招标
 - 高能所将提供**90%**的LGAD，科大将提供**10%**的LGAD
- ASIC：高能所完成首个ALTIROC晶圆级测试，将承担**50%**晶圆测试
- 探测器模块：高能所、科大将组装~4000个模块，**占项目45%**
- 外围电路与电源：
 - 高能所、南大研制了首个外围电路板样机，山大研制柔性电缆
 - 高压电源：高能所、山大承担**18%**的高压电源，已经研制出样机
- Demonstrator工程样机（54个模块组成的样机）：
 - 高能所和南大在工程样机DAQ测试中发挥主要作用

Outline

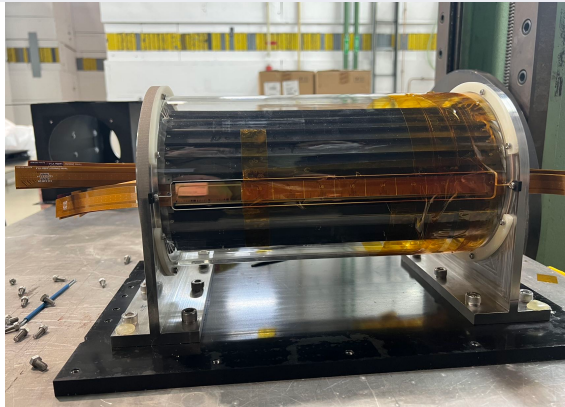
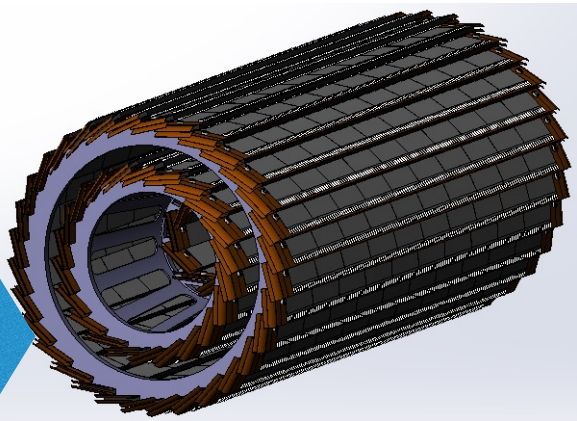
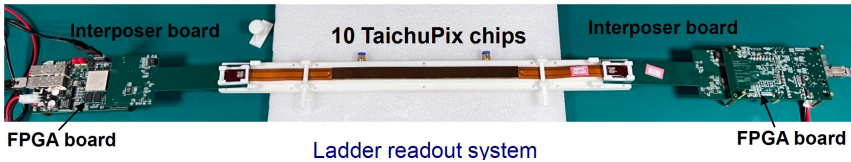
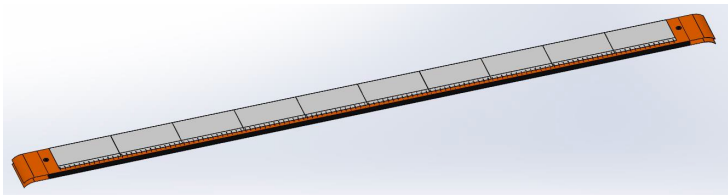
- 大型强子对撞机ATLAS实验高颗粒度时间探测器
- CEPC顶点探测器

顶点探测器样机研发

芯片研发



探测器模块研发



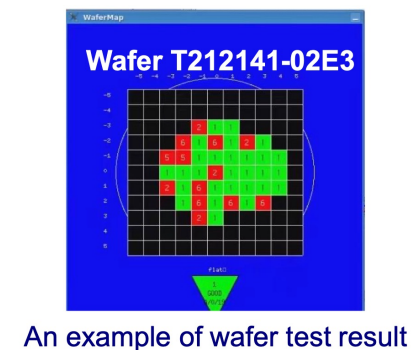
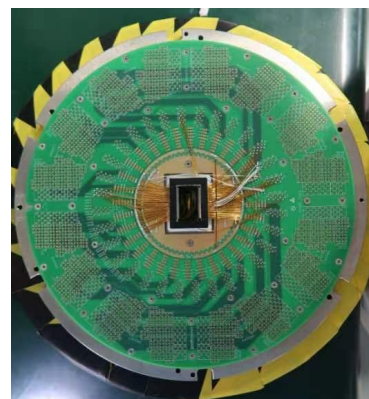
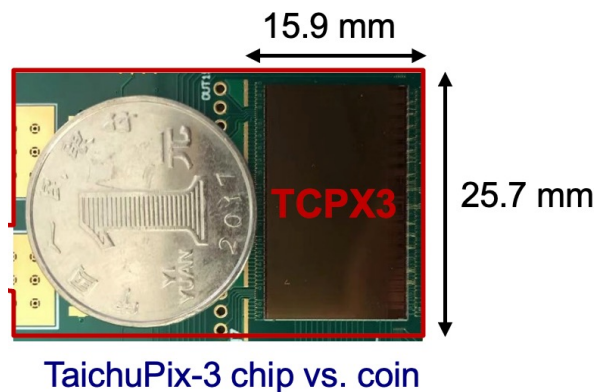
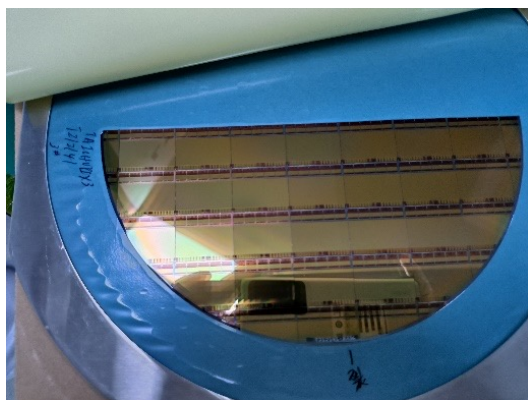
CEPC顶点探测器的研发需求

- 现有的单片集成型CMOS 传感器芯片不能满足CEPC要求
 - 像素尺寸小→ 高空间分辨率(3-5 μm)
 - 抗辐照能力: >1 Mrad (per year)
 - 高计数率-> CEPC Z pole 高亮度运行 (40MHz 的对撞频率)

	ALPIDE	ATLAS-MAPS (MONOPIX / MALTA)	MIMOSA
Pixel size	✓	X	✓
Readout Speed	X	✓	X
TID	X (?)	✓	✓

太初3高空间分辨率芯片

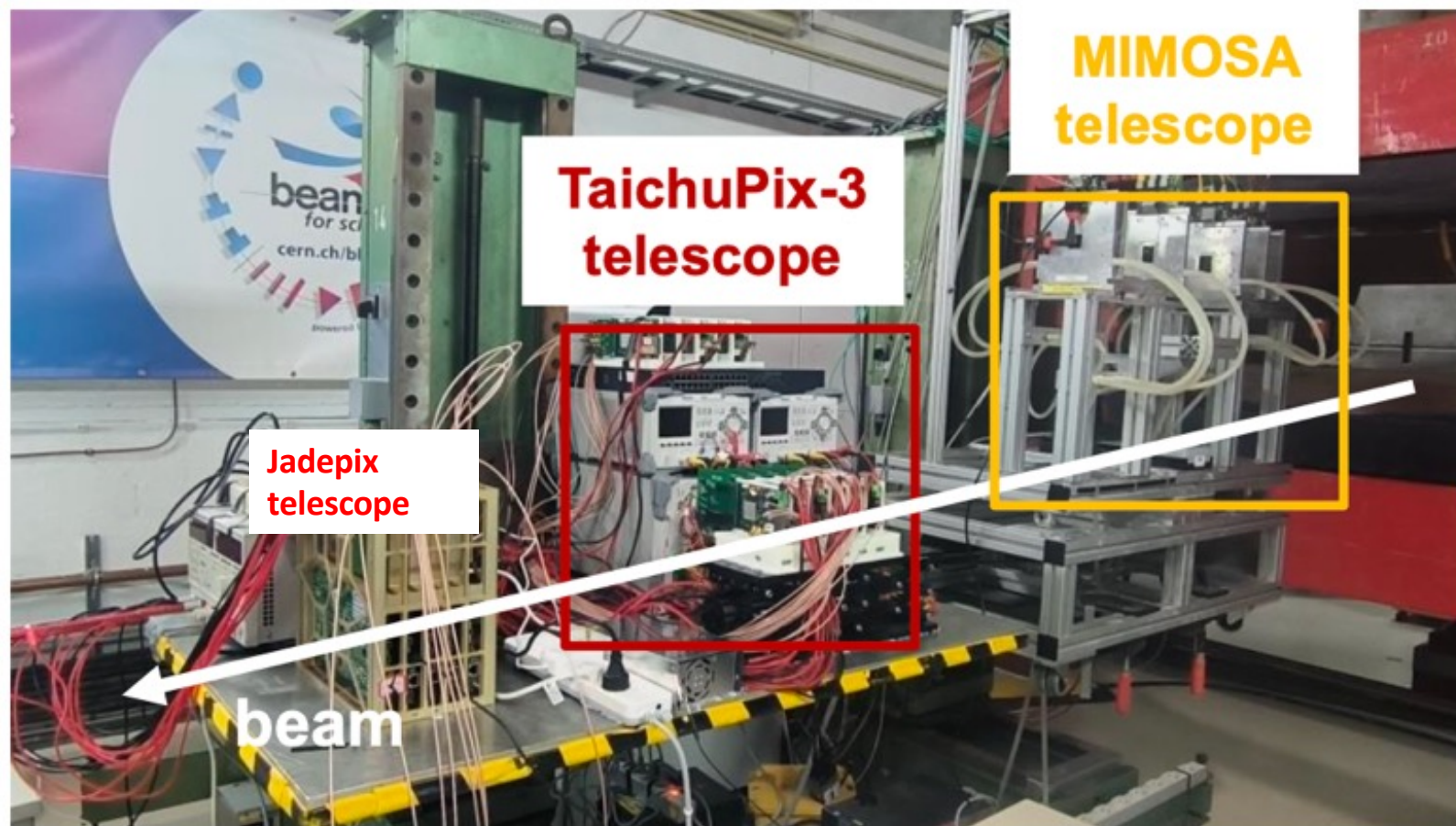
- 全尺寸 CMOS 像素探测器，单片集成型MAPS芯片，工艺: Towerjazz 180nm CIS process
 - 1024×512 像素阵列 芯片尺寸：15.9×25.7mm
 - 25μm×25微米 像素尺寸
 - 快速优先级读出，25ns的time stamp 精度，可以用在Z runs上 (~40MHz clock)



	Status	CEPC Final goal
CMOS chip technology	Full-size chip with TJ 180nm CIS	65nm CIS

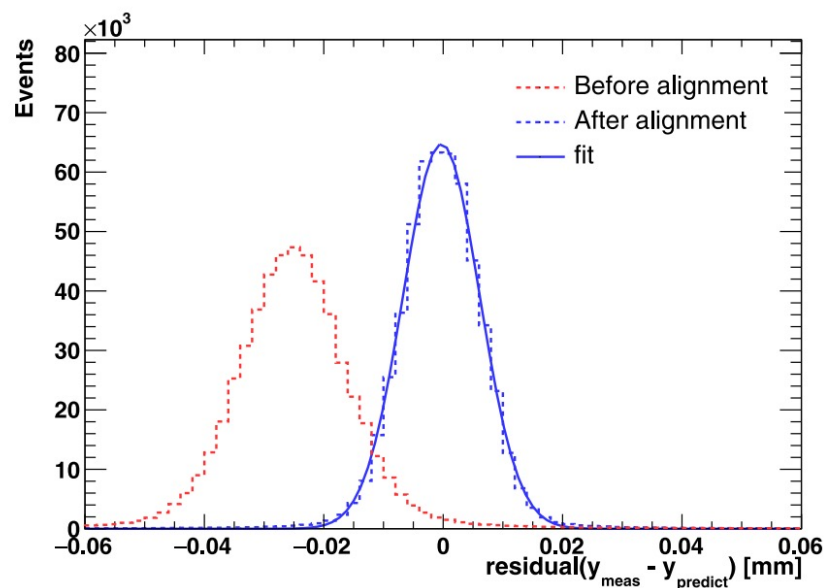
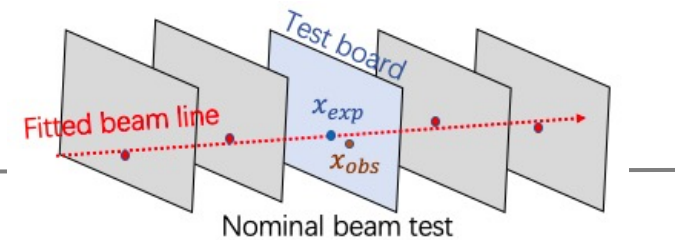
太初束流望远镜在DESY的束流测试

- 2022年底在DESY束流测试情况,测试太初和jdepix束流望远镜

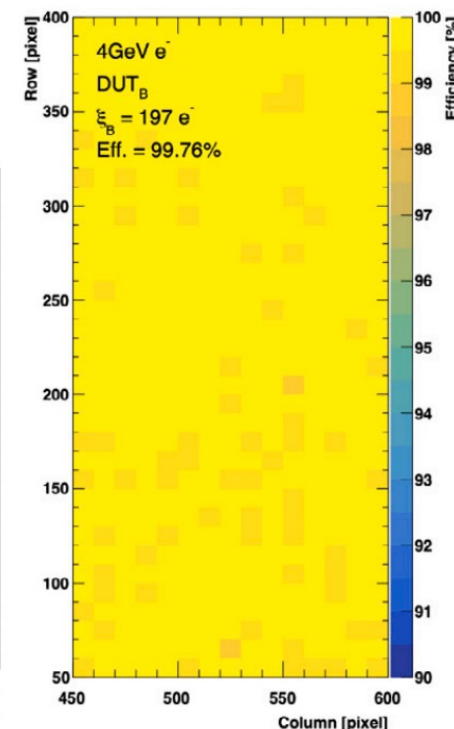
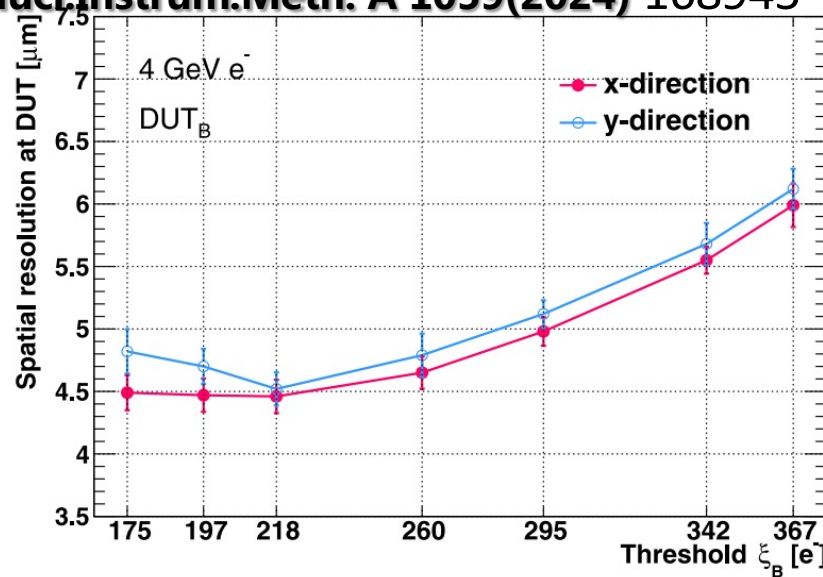


太初束流望远镜：空间分辨率

- 目前太初芯片在DESY束流测试的空间分辨率
 - 空间分辨率达到4.5微米，像素尺寸25*25微米
 - 带电粒子探测效率超过99.7%
 - 时间分辨率：30纳秒（测试时钟20MHz）

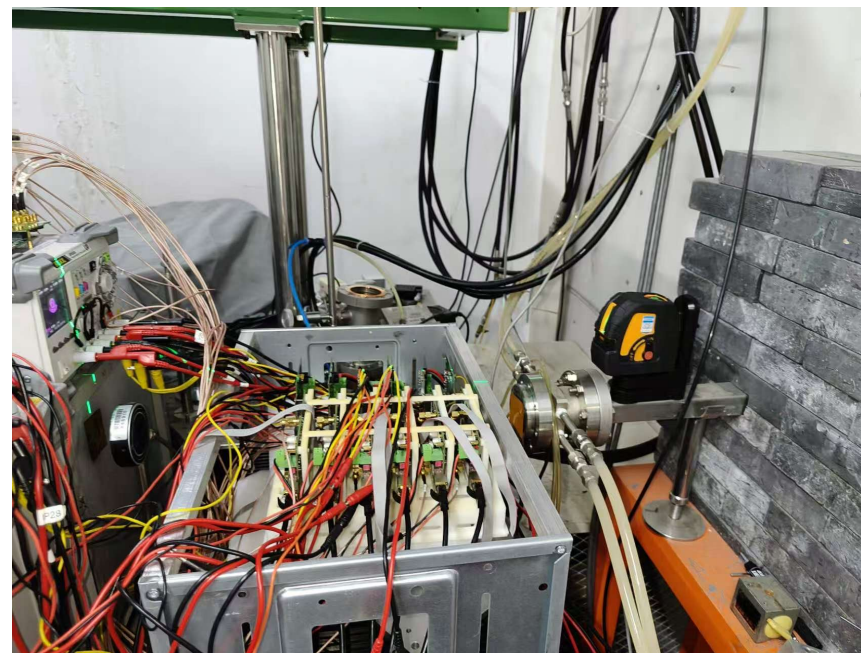
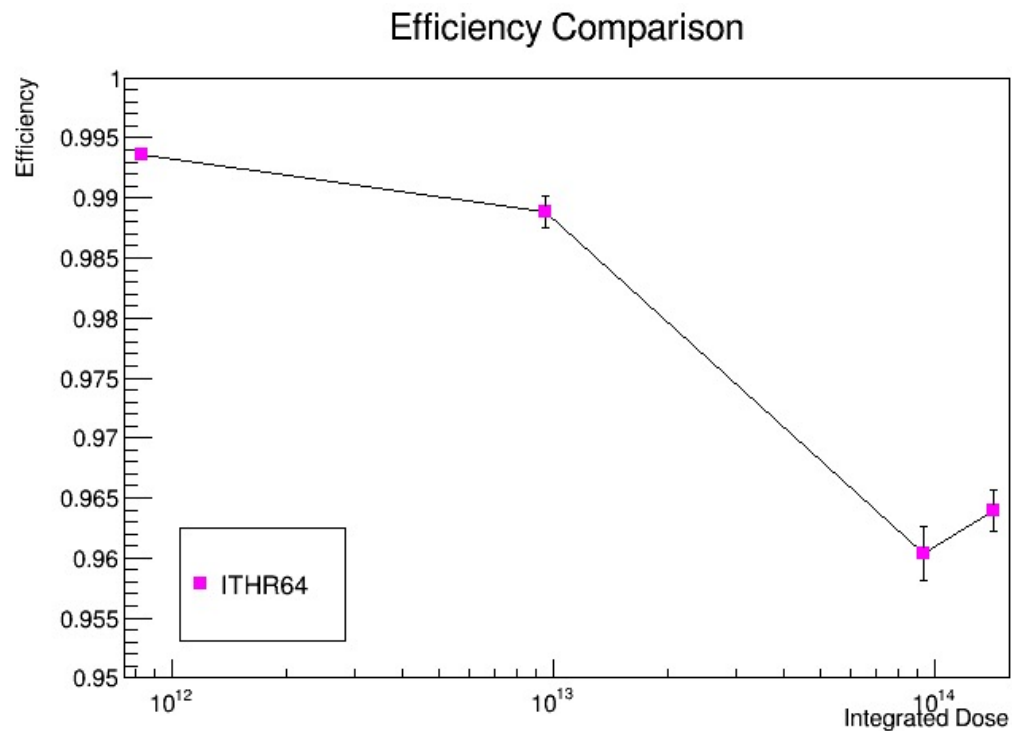


Nucl.Instrum.Meth. A 1059(2024) 168945



太初芯片抗辐照性能

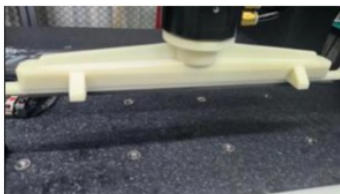
- 在CSNS质子伴生束流辐照，在北京BSRF线站做辐照后束流测试表明
 - 探测效率 $>99\%$ @ $10^{13} n_{eq} \cdot cm^{-2}$,
 - 探测效率 $>95\%$ @ $1.5 \cdot 10^{14} n_{eq} \cdot cm^{-2}$



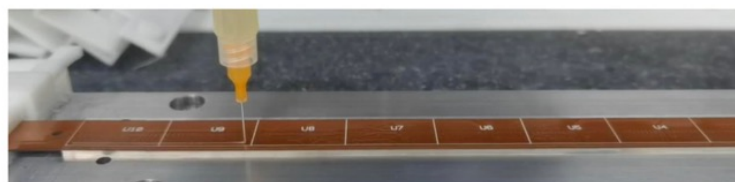
太初顶点探测器原型机的搭建

国内第一个硅顶点探测器原型机

New pickup tools



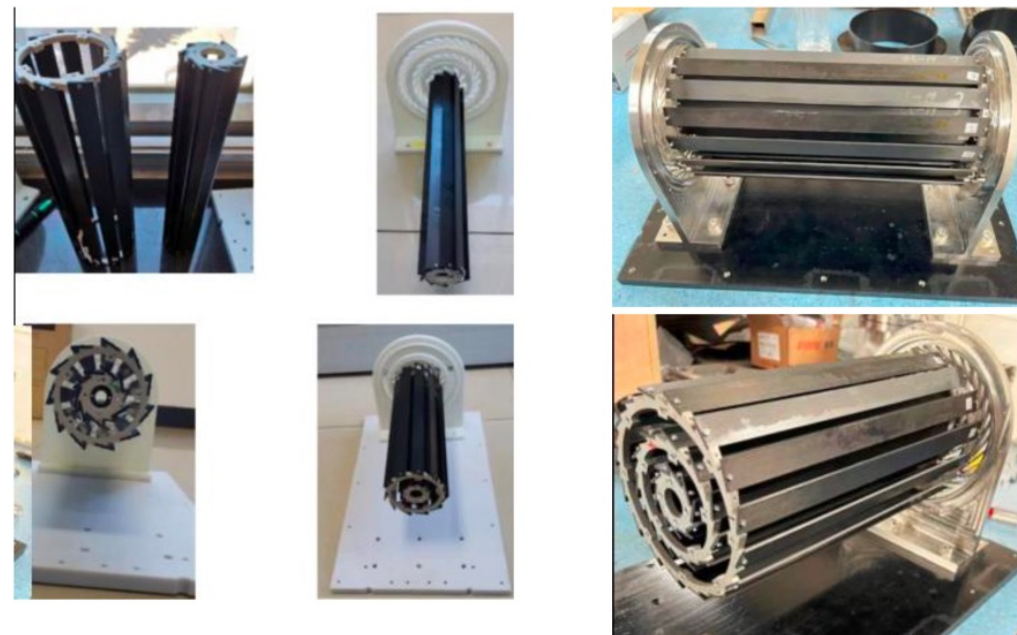
Dummy ladder glue automatic dispensing using gantry



Ladder on wire bonding machine



Dummy Ladder on holder



Ladder support tools



Ladder loaded on vertex detector



Wei Wang

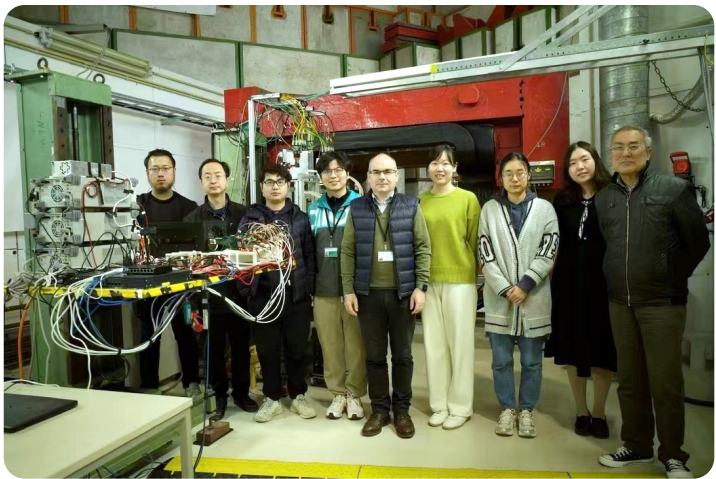
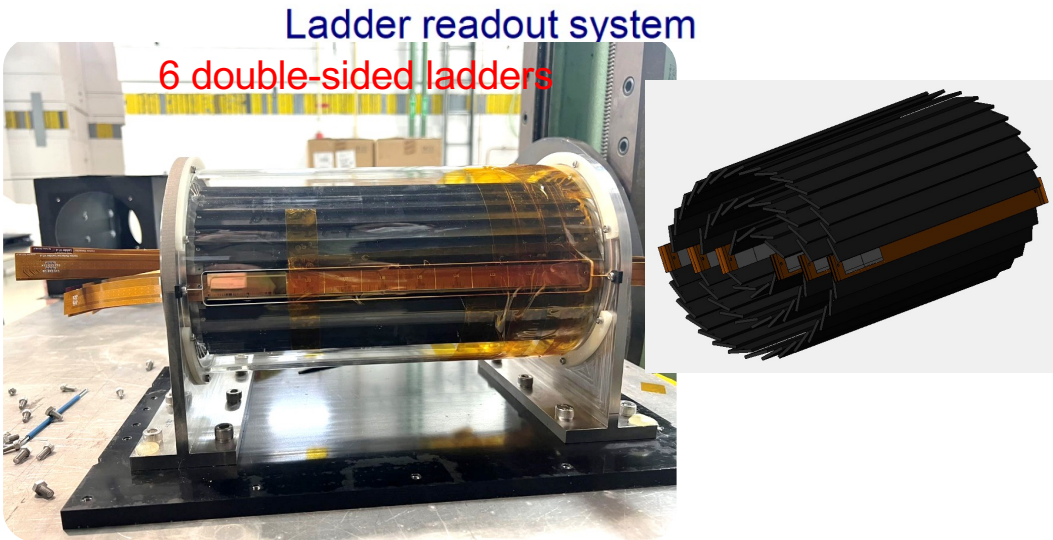
太初顶点探测器原型机与其性能测试

国内第一个硅顶点探测器原型机



TaichuPix-based prototype detector tested at DESY in April 2023

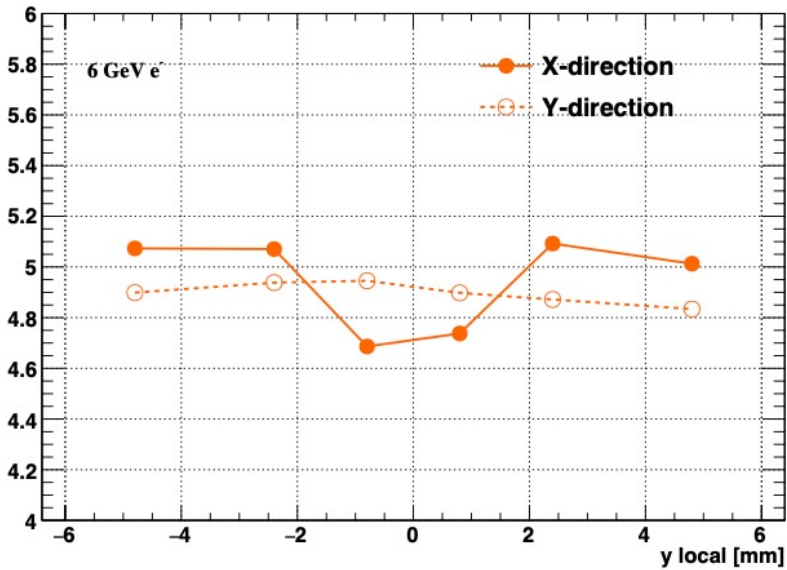
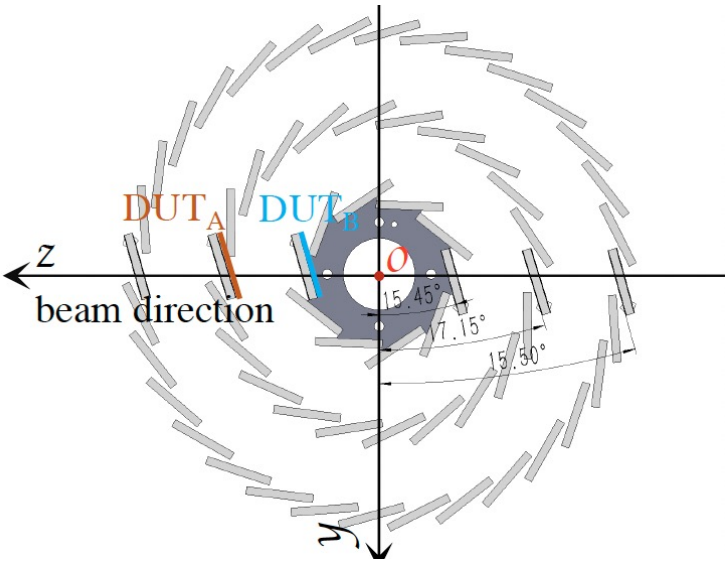
Spatial resolution ~ 4.9 μm



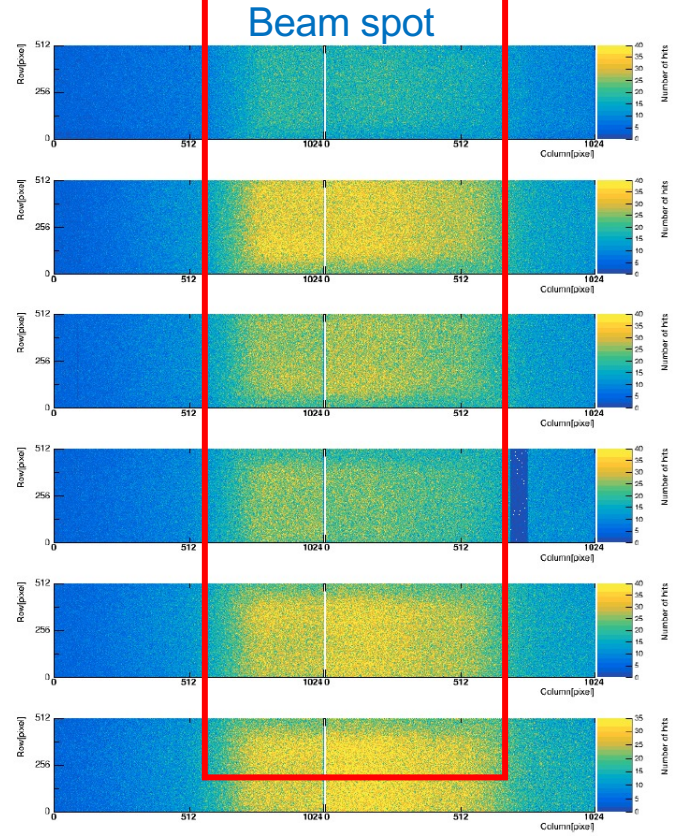
	Status	CEPC Final goal
Detector integration	Detector prototype with ladder design	Detector with bent silicon design

太初顶点探测器原型机的性能

- DESY电子束流测试，6个双面的ladder，可以产生12个hits，空间分辨率达到~ 5 μm



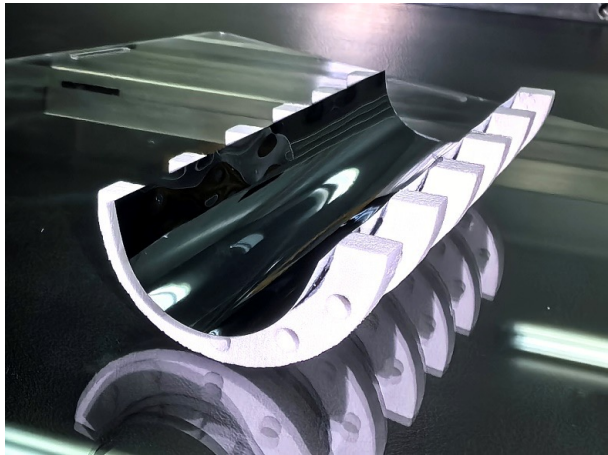
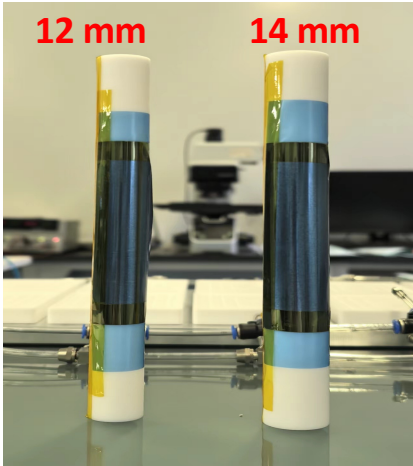
Hit maps of multiple layers



	Status	CEPC Final goal
空间分辨率	4.9 μm	3-5 μm

CEPC ref-TDR中的顶点探测器研发

- CEPC b-layer radius (11mm) smaller compared with ALICE ITS3 (radius=18mm)
- Feasibility : Mechanical prototype with dummy wafer can curved to a radius of 12mm
 - The dummy wafer has been thinned to 30-40μm

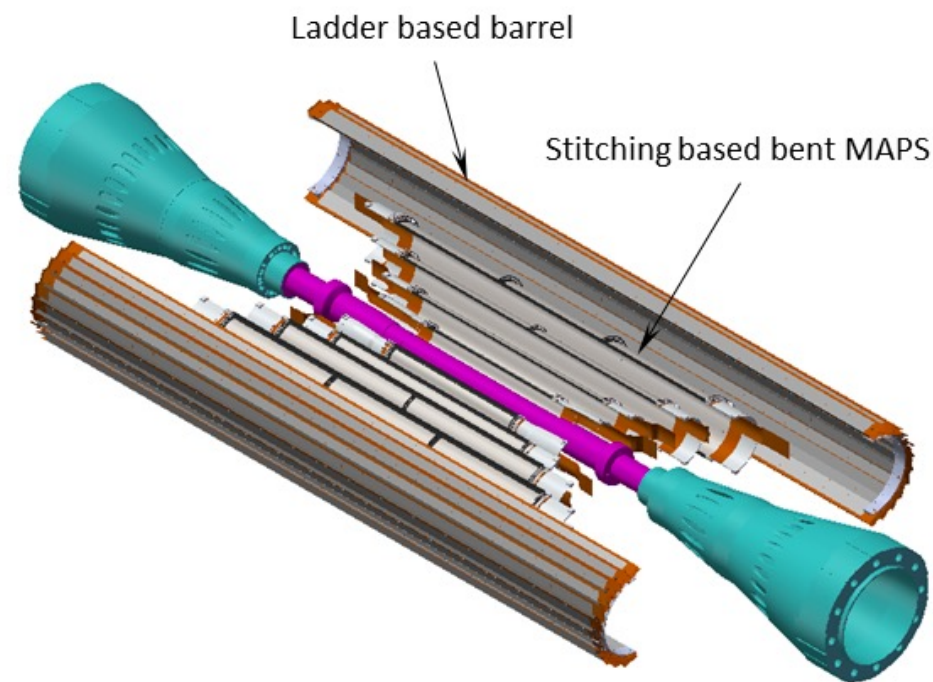


董明义团队

	Status	CEPC Final goal
Bent silicon with radius	Bent Dummy wafer radius ~12mm	Bent final wafer with radius ~11mm

小结

- 基于全尺寸太初芯片初步研制了束流望远镜和探测器原型样机
 - 国内首个硅顶点探测器样机，关键指标达到国际水平
- 未来探索65/55纳米工艺，顶点探测器芯片的验证
- 研制基于stitching技术的顶点探测器原型机



测试结果

空间分辨率

CEPC顶点探测器样机: $4.9\mu\text{m}$

抗辐照性能

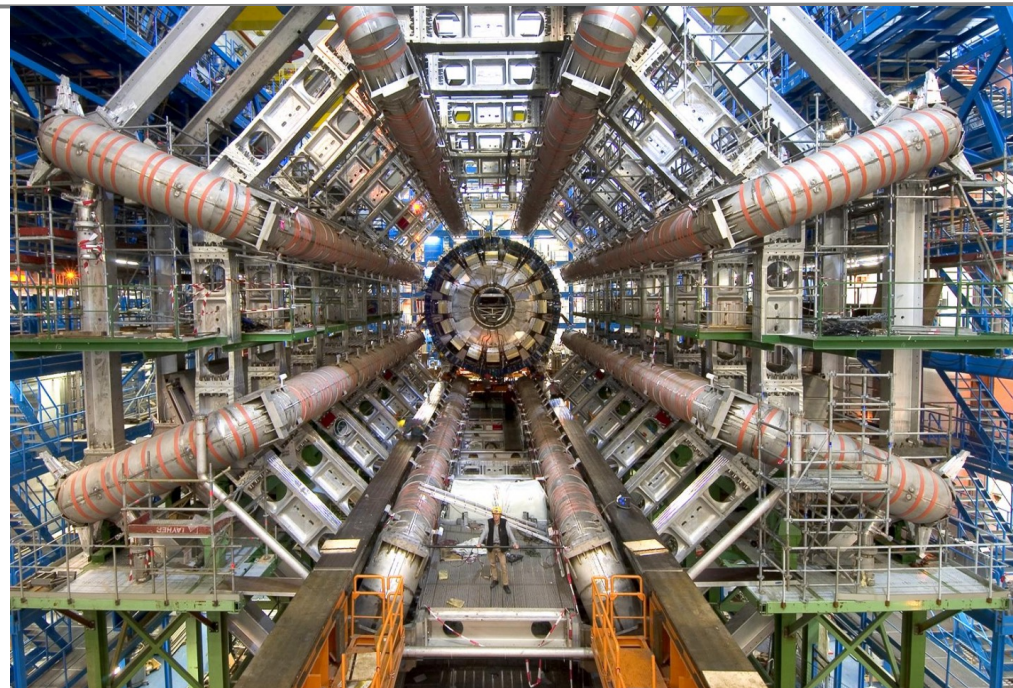
非电离辐照（等效中子通量）
 $> 1.4\text{e}14 \text{ N}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

大型强子对撞机与ATLAS实验



大型强子对撞机

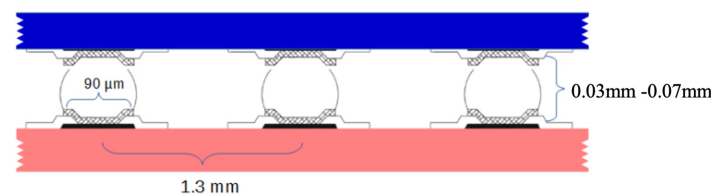
- 周长**27km**，总投资**40亿美元**
- 世界能量**最高**的加速器
- 质心系能**14TeV** (**$14 \times 10^{12} \text{eV}$**)
- 位于瑞士与法国边境



ATLAS探测器

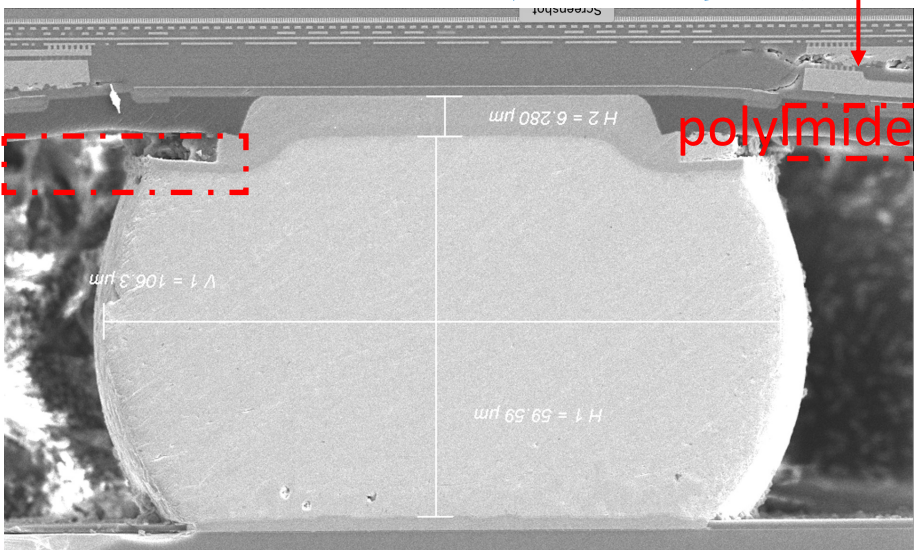
- 大约**3000人**的一个实验组
- **6层楼高** (**25米**) 的大型探测器
- 探测对撞产生粒子能量与动量

传感器与ASIC的倒装焊封装

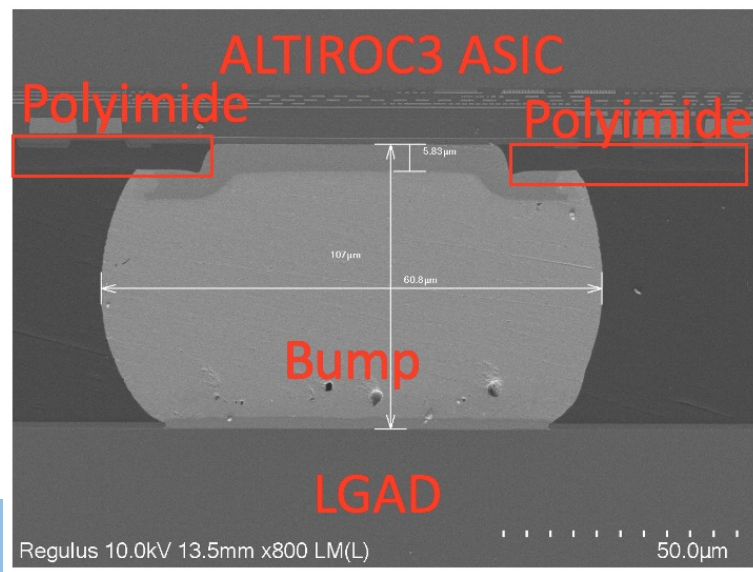


- 2023年末，HGTD项目遇到探测器模块的倒装焊热稳定性问题
 - 45度到40度热循环后，倒装焊脱落，ITK Pixel项目发现该问题，推迟LHC升级项目两年
 - HGTD探测器中，ASIC晶圆中台积电的polyimide保护层有问题（开窗尺寸与材质）
- 2024年，高能所攻关解决了HGTD探测器中的封装问题，通过CERN的评审
 - 用了更软的保护层材料吸收应力，使用更厚的LGAD传感器

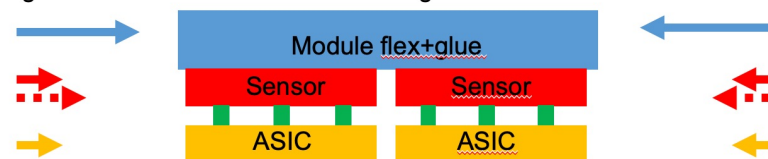
旧倒装焊 热循环后，应力导致芯片的开裂



新倒装焊



Consider low temperature (shrinking) situation
Length of arrow means deformation magnitude



太初束流望远镜的时间分辨率：与CSNS高能质子线适配度

• 目前用太初束流望远镜初步结果

• DESY测试中，单芯片时间分辨率好

• 可分辨CSNS二期质子束束终微脉冲的时间结构

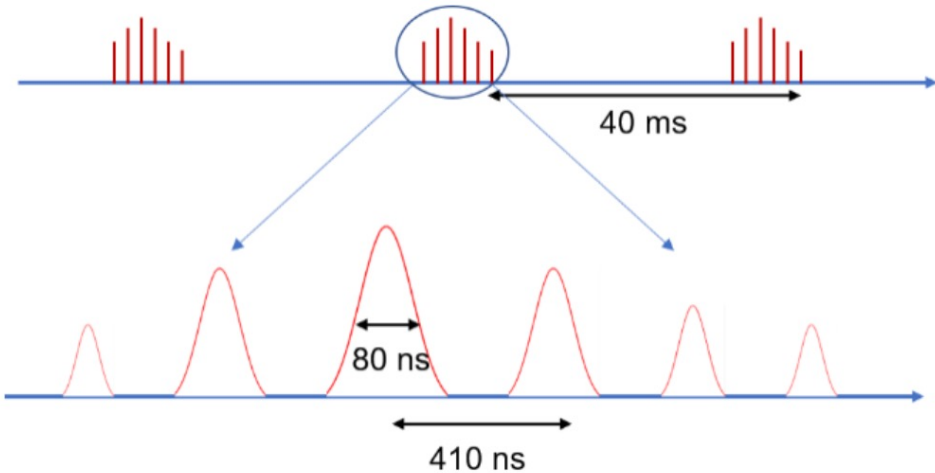
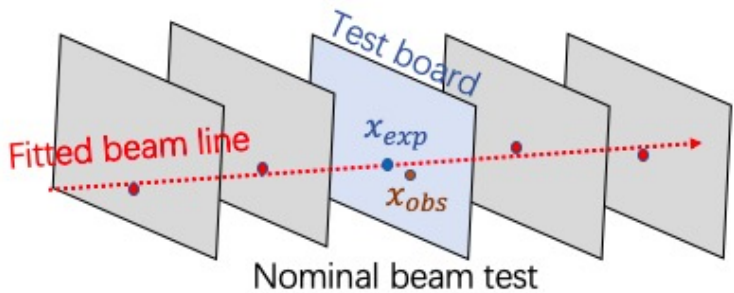
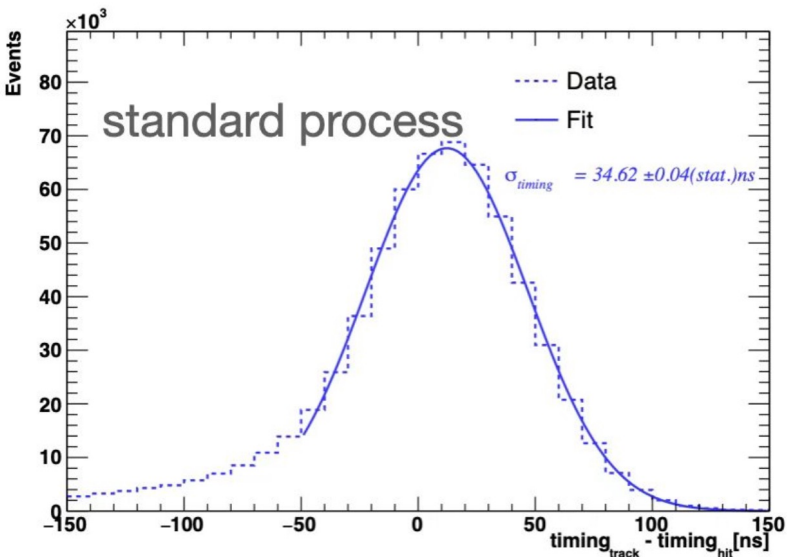


图3.10-50 高能质子束线脉冲（上）和微脉冲（下）时间结构



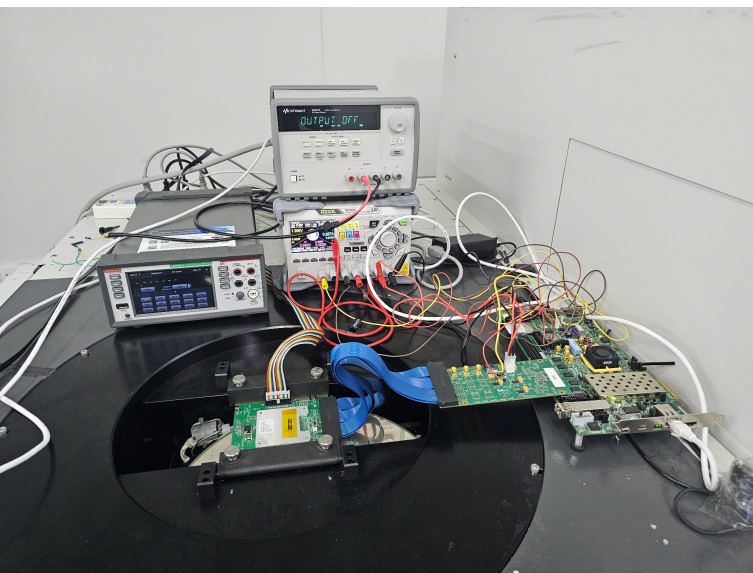
太初芯片的时间分辨率（束流测试结果）



ALTIROC : 超快读出ASIC

- 高能所、法国IJClab/Omega分别承担50%的晶圆测试 (~225个12寸晶圆)
- 高能所完成首个ALTIROC-A的晶圆级探针卡测试
 - 每个芯片完成所有的性能测试, 阈值扫描, Jitter Vs 注入电荷等

高能所ASIC晶圆测试平台



高能所首个晶圆级测试的结果 (yield >70%)

