
ATLAS实验高颗粒度时间探测器 High Granularity Timing Detector (HGTD)

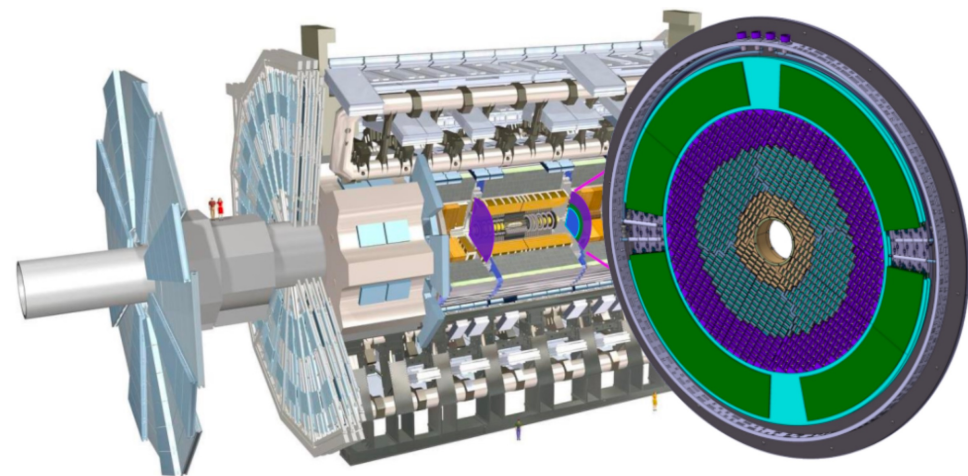
梁志均

中国科学院高能物理研究所

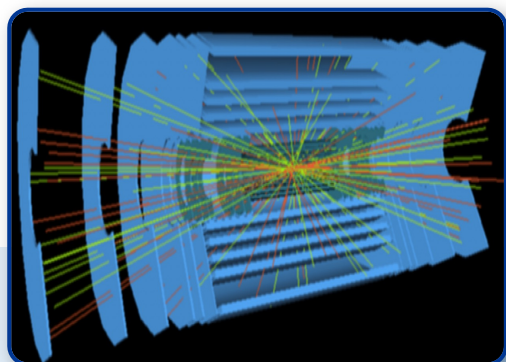
ATLAS实验高颗粒度时间探测器

High Granularity Timing Detector (HGTD)

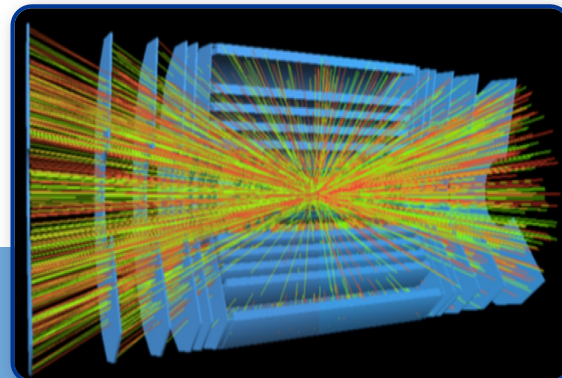
- 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级(数纳秒→30皮秒)
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题
 - 6.4平方米的硅探测器, 30皮秒的时间分辨
 - 毫米级的颗粒度, 超过三百万个读出通道
 - 能承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 的等效中子通量的辐照
- 中国组主导HGTD探测器研制
 - 100%抗辐照高时间分辨传感器(高能所, 科大)
 - 100%前端电子学(高能所, 南大), 50% ASIC测试(高能所, 上交大, 山大)
 - 44%探测器组装(高能所, 科大, 山大, 南开, 上交大)
 - 100%柔性电缆(山大), >18% 高压电子系统(高能所, 山大)



目前的ATLAS探测器

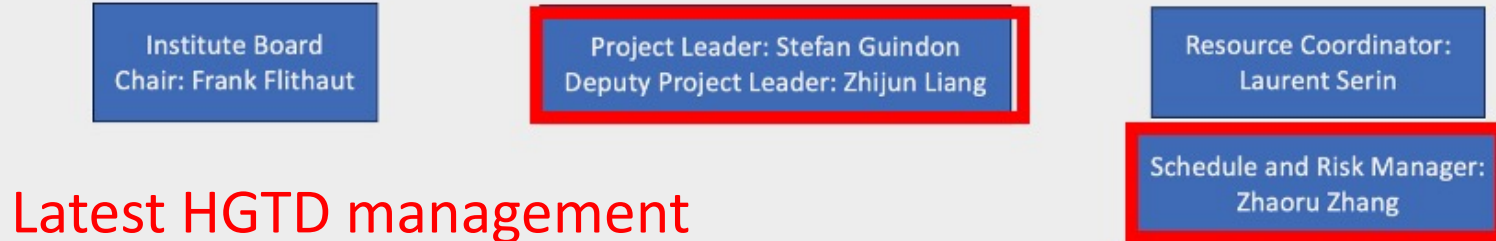


高亮度LHC升级后的ATLAS探测器

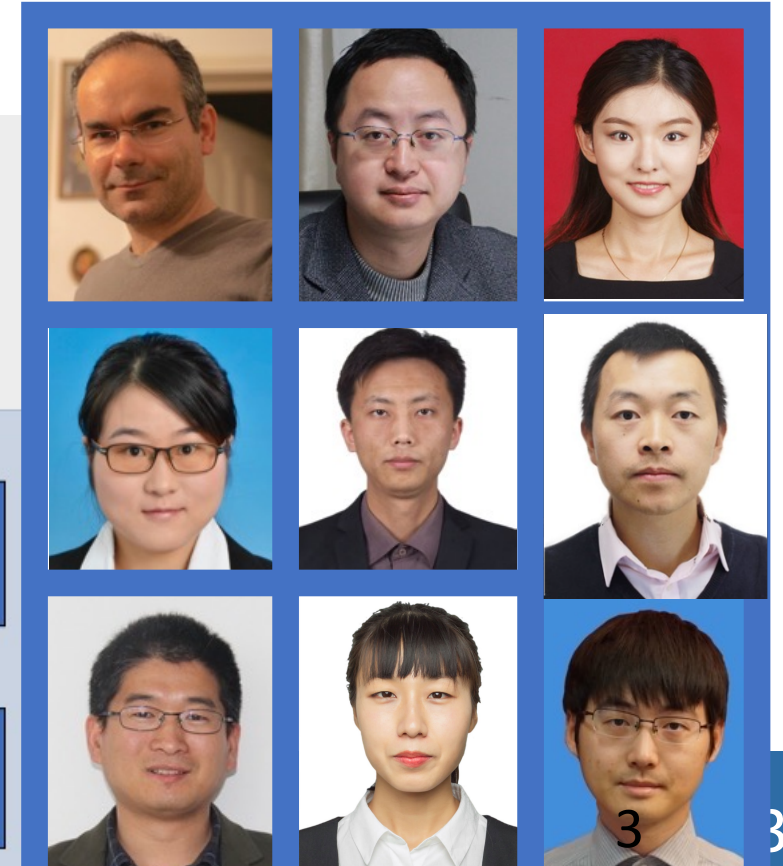


中国团队在ATLAS实验HGTD探测器的管理职位

- 中国团队在HGTD项目中发挥主导作用，有多个重要管理职位
 - 2025年3月到2027年2月，高能所梁志均 担任HGTD探测器的项目副经理
 - 2021年3月到2025年2月，高能所Joao 曾担任HGTD探测器的项目经理
 - 6人现担任或曾担任L2 召集人 (张杰、赵梅、梁志均、张照茹、徐来林、吴雨生)
 - 3人现担任L3 召集人 (樊云云、樊磊、张杰)
 - 2 人曾担任 HGTD speaker committee (徐来林、刘衍文)



L2 Coordinators



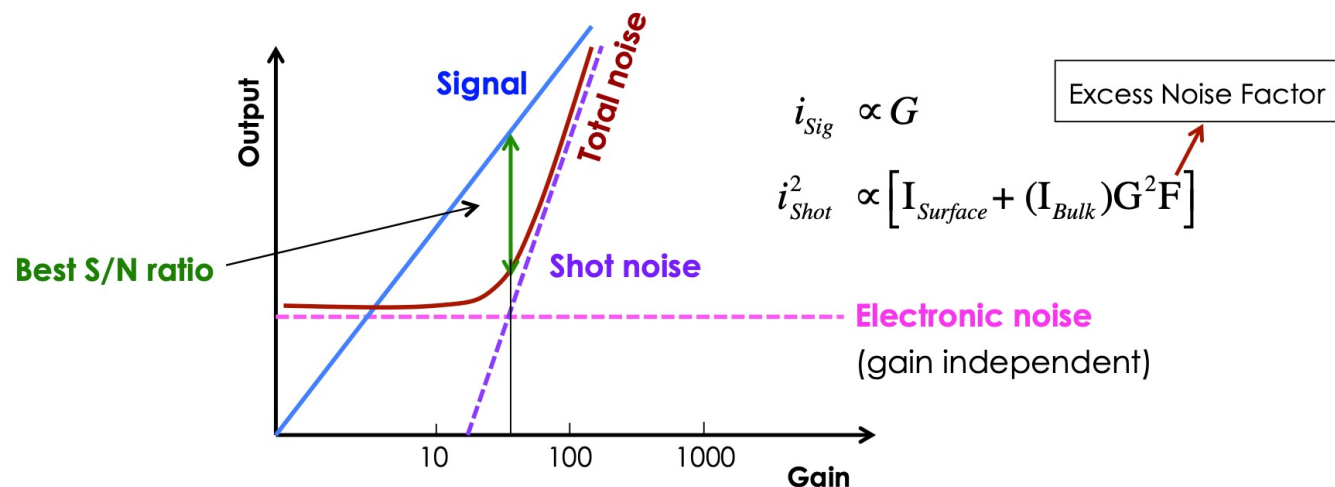
Low Gain Avalanche Detectors (LGAD)

低增益雪崩硅传感器

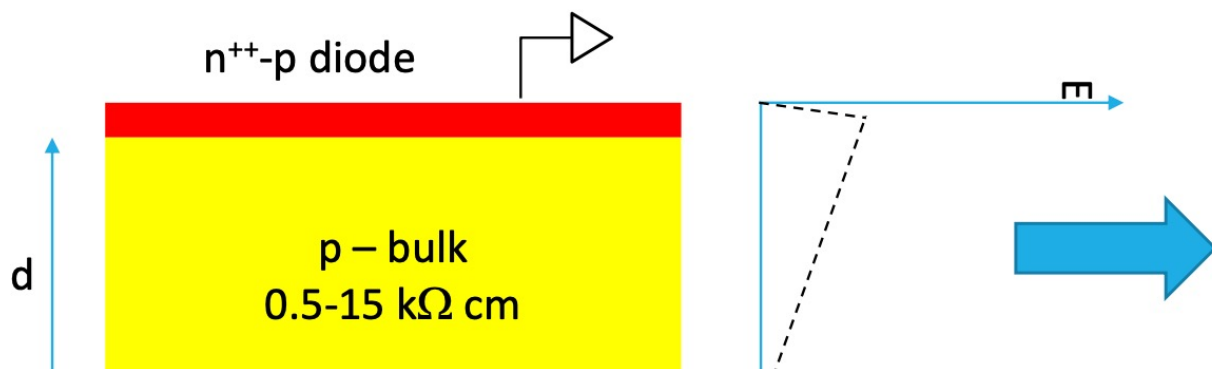
➤ 与APD 和 SiPM比较, LGAD has 适中的增益 (10-50)

- 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

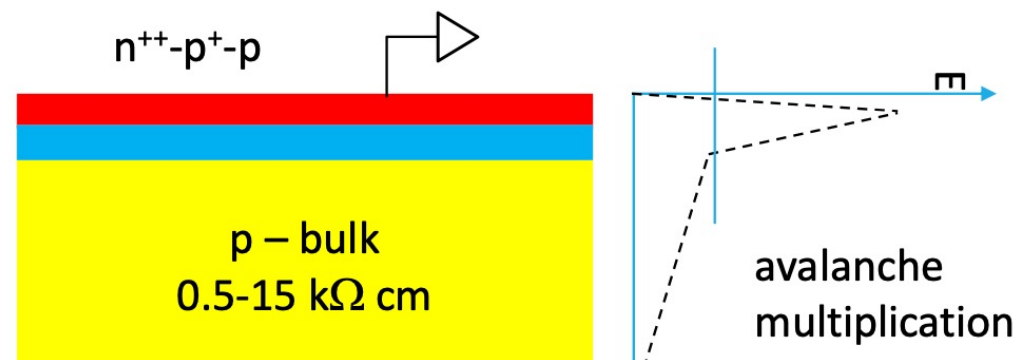
$$\sigma_{jitter}^2 = \left(\frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$



一般的 PIN结传感器



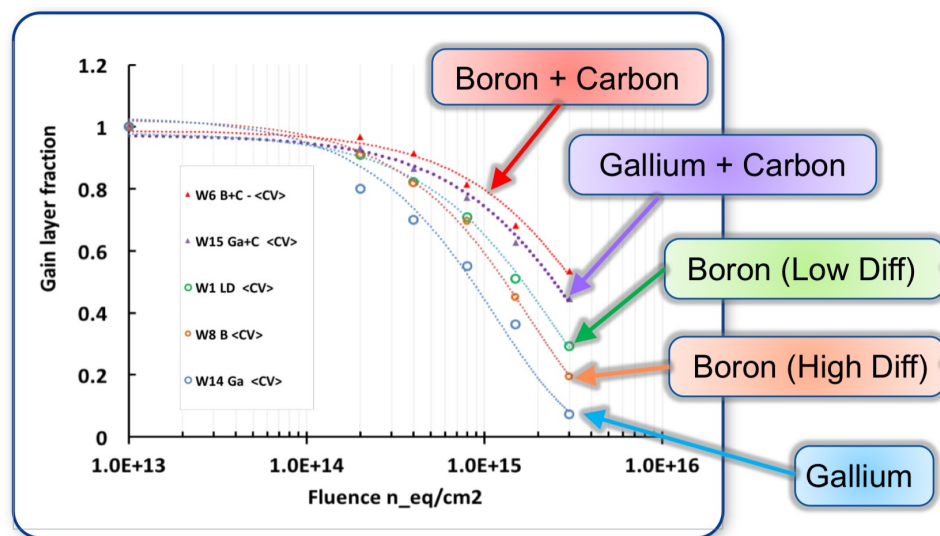
低增益雪崩硅传感器
P+ gain layer on top of PIN diode



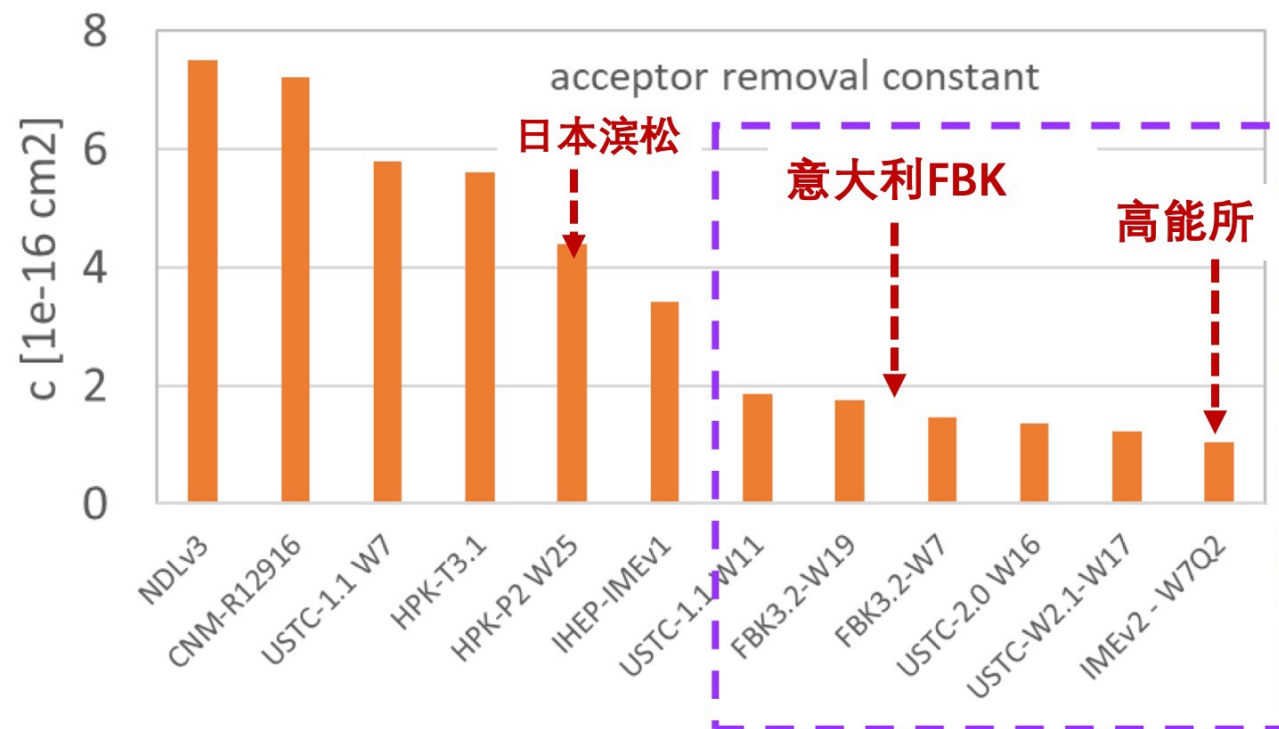
LGAD传感器辐照后硼掺杂移除 (Acceptor removal)

- 辐照后，硼掺杂失去活性，LGAD传感器增益下降(Acceptor removal)
- 高能所、科大等国产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）



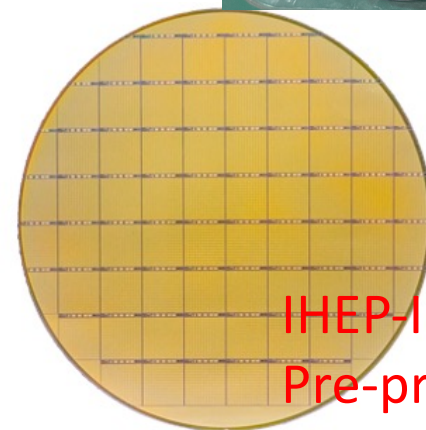
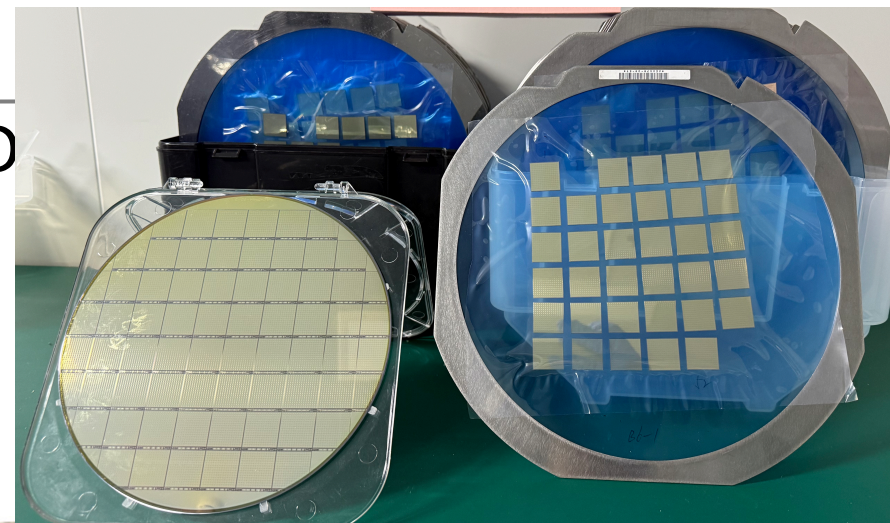
[G.Paternoster, FBK, Trento, Feb.2019]



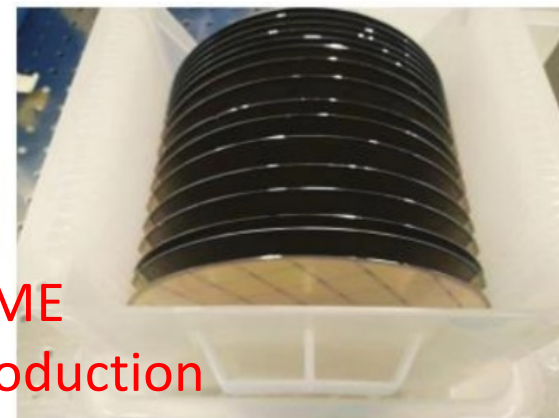
LGAD传感器的研制进展

- CERN在国际招标中选择了高能所-微电子所的LGAD
 - 竞争者包括了意大利的FBK和日本滨松公司
 - 2025年2月正式签订合约
- HGTD探测器的LGAD传感器100%在中国生成
 - 国产传感器首次在CERN的实验使用
 - 高能所-微电子所: 90% : $\sim 8 \text{ m}^2$
 - 科大-微电子所: 10%
- LGAD量产的最新进展 : 详情见赵梅的报告
 - 高能所-微电子所
 - 正式生产了6000个传感器 (占项目30%)
 - 科大-微电子所
 - 完成量产 (占项目10%) , 正在完成测量

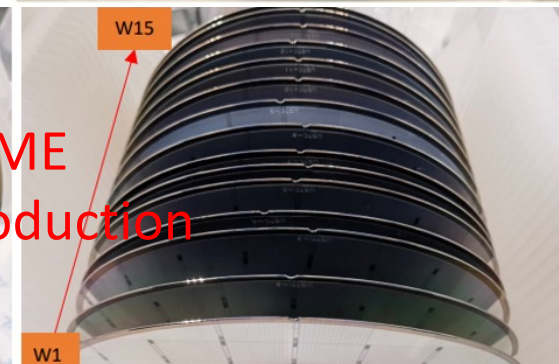
高能所-微电子所量产LGAD



IHEP-IME
Pre-production

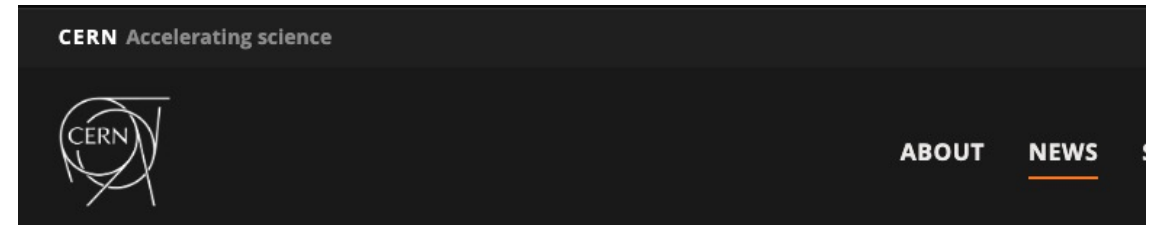


USTC-IME
Pre-production



ATLAS 杰出贡献奖 (Outstanding Achievement Award)

- 4名高能所成员与3名科大成员获得2025年ATLAS实验杰出贡献奖
 - 由于他们在LGAD传感器研发的贡献
 - The list of ATLAS award for HGTD project: Bojan Hiti (Ljubljana), Alissa Howard (Ljubljana), **Xuwei Jia** (Munich MPI), **Mengzhao Li** (Beijing IHEP), **Chihao Li** (Michigan), **Kuo Ma** (Hefei), Theodoros Manoussos (CERN), **Weiwei Sun** (Beijing IHEP), Guilherme Tomio Saito (Sao Paulo), Iskra Velkovska (Ljubljana), **Xiao Yang** (CERN), **Mei Zhao** (Beijing IHEP)



[News](#) › [News](#) › Topic: Experiments

[Voir en français](#)

Celebrating the outstanding achievements of the ATLAS collaboration

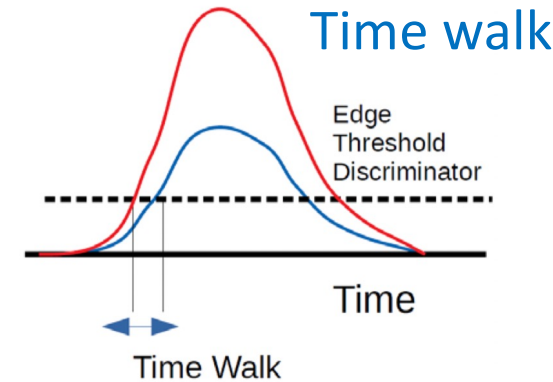
The ATLAS collaboration celebrated the dedication, ingenuity and collaborative spirit of its members at the 8th Outstanding Achievement Awards

8 JULY, 2025 | By [ATLAS collaboration](#)

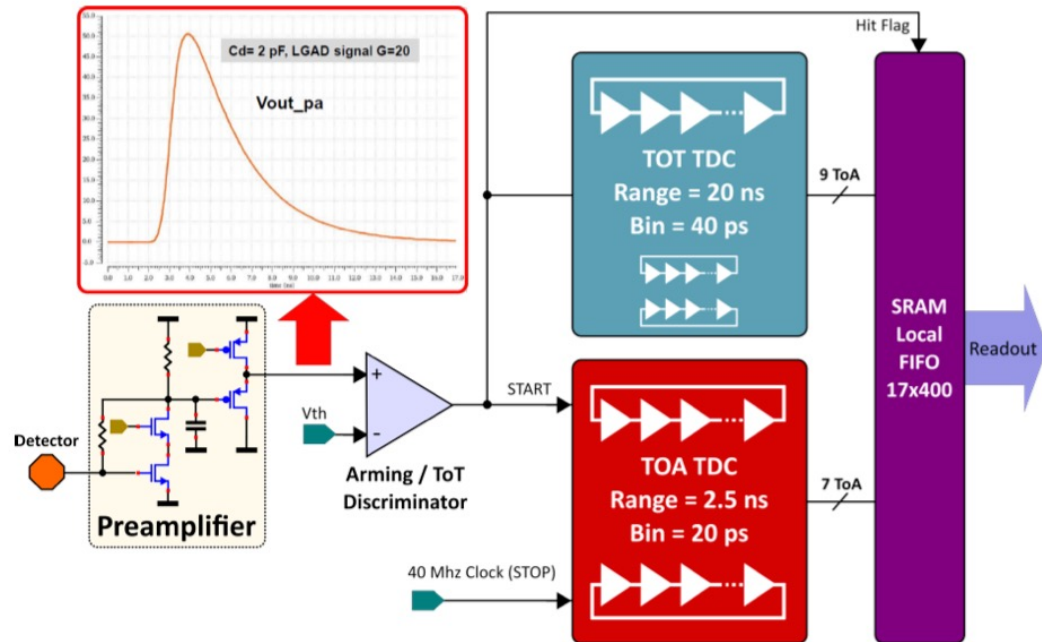
ALTIROC : 超快读出ASIC



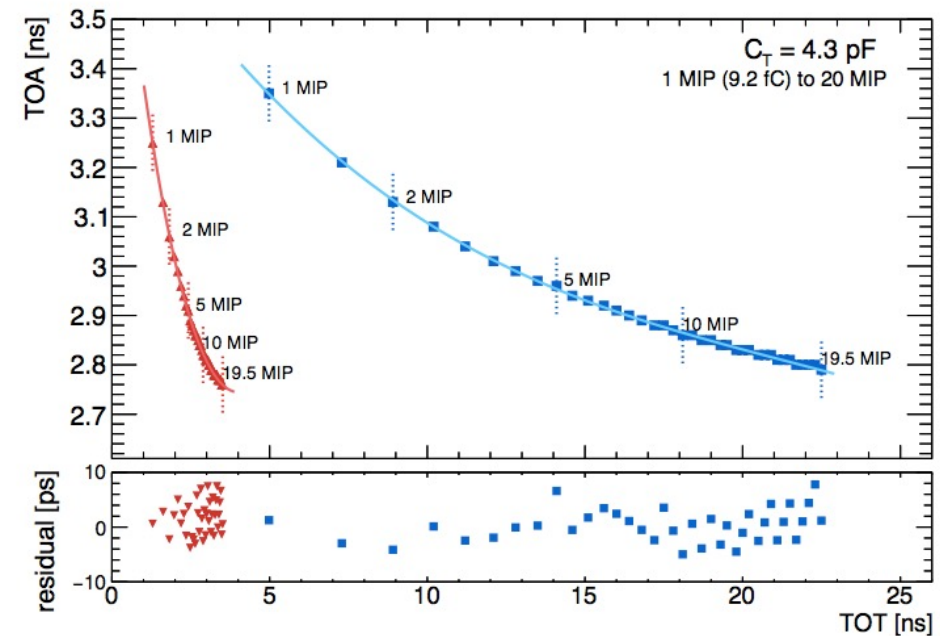
- ATLAS时间探测器研发超快读出ASIC芯片，多个单位参与
 - 高能所参与ASIC中数字电路部分的设计，承担50%的晶圆测试
- 225通道，每个通道有一个前端放大器，甄别器，两个TDC:
 - Time of Arrival (TOA) : Range of 2.5 ns and a bin of 20 ps (7 bits)
 - Time Over Threshold (TOT) : range of 20 ns and a bin of 40 ps (9 bits)



ALTIROC 芯片原理图



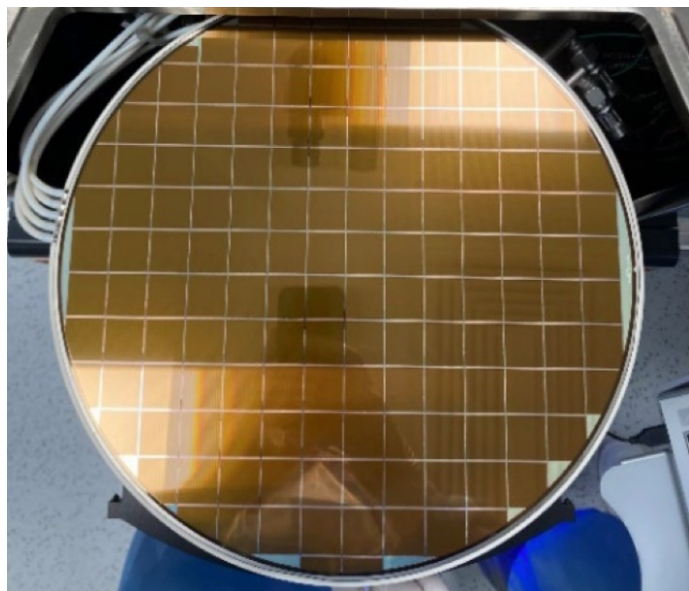
Time walk correction with TOT



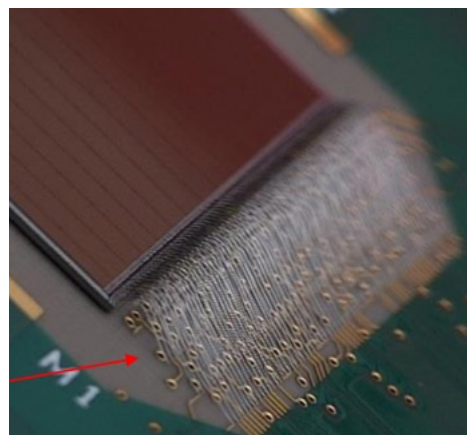
ALTIROC 超快读出芯片的晶圆级测试

- 中国组与法国IJClab各承担50%的超快ASIC晶圆测试任务
- 高能所完成了晶圆级测试的平台，是皮秒级芯片测试任务，有很大挑战
- 高能所，上海、山大已经完成预量产ALTIROC晶圆的晶圆测试任务，并通过CERN的评审
 - 已经测试了超过25个晶圆（超过2500个ASIC芯片）
 - 测试进度大幅度领先于法国单位。ATLAS决定把100%测试任务放到中国。

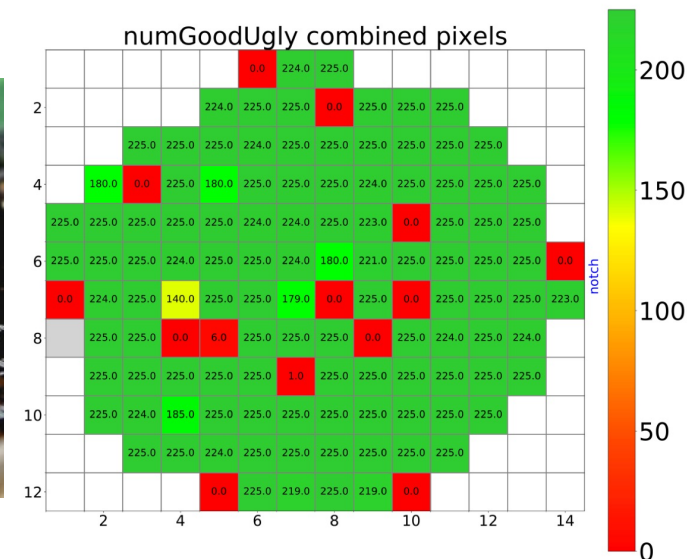
ALTIROC-A wafer



ASIC chip testing in test board

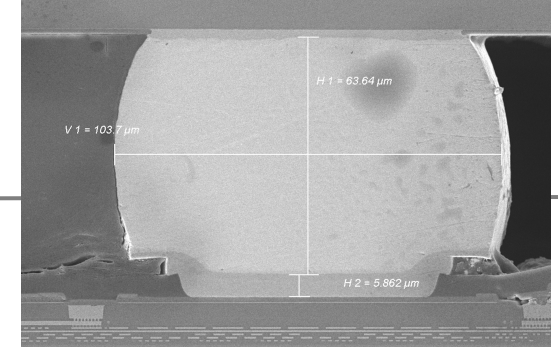


ASIC wafer test result

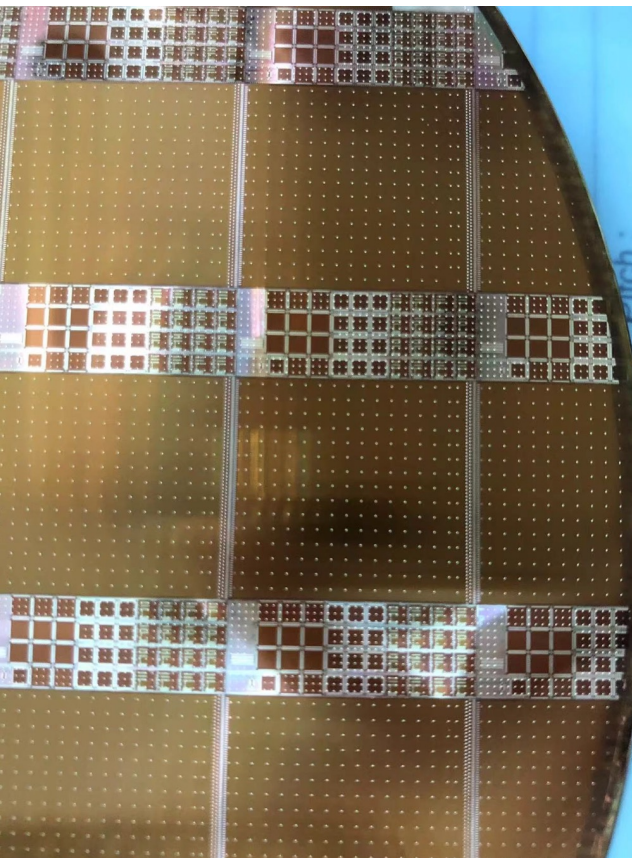


探测器模块：倒装焊封装

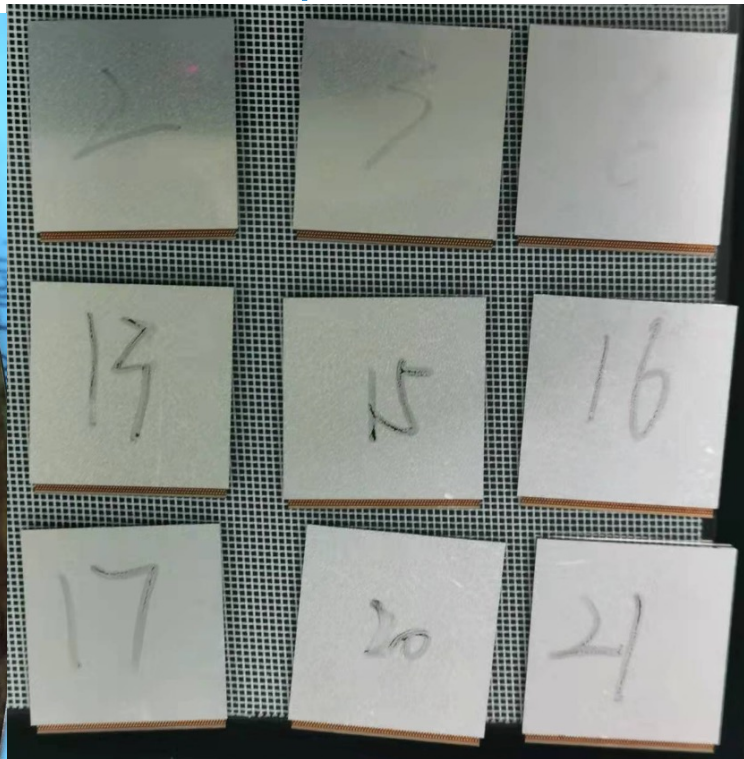
- 高能所承担项目中**50%的**倒装焊封装任务
- 高能所在国内已经研制出500多个倒装焊模块



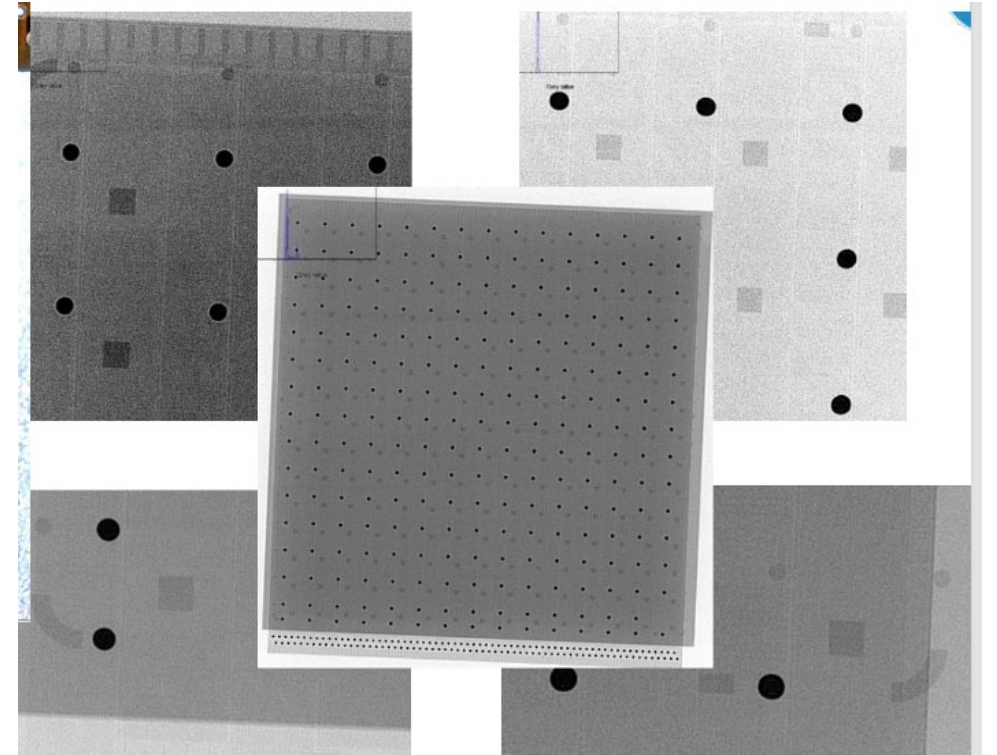
ALTIROC 芯片晶圆植球



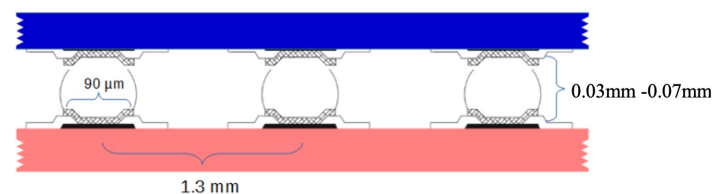
倒装焊模块后的模块



X-ray image of full-size hybrid

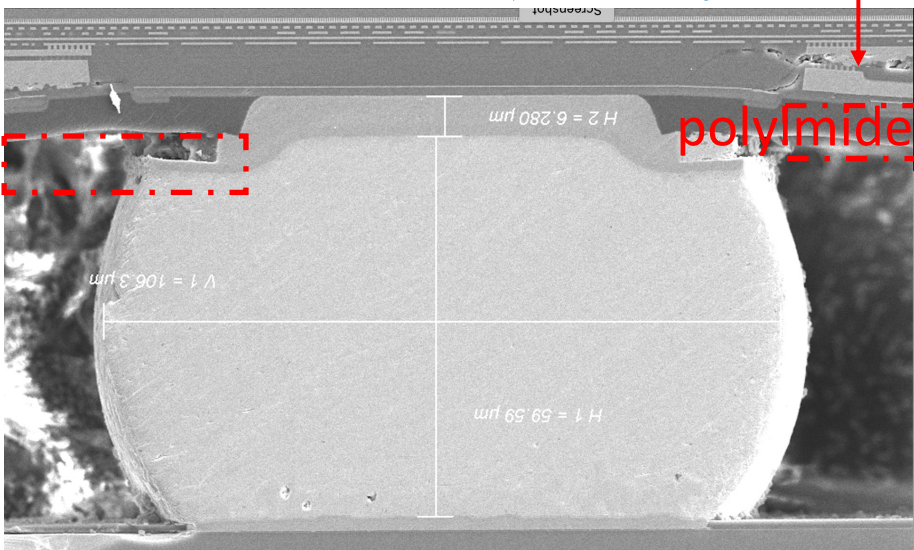


传感器与ASIC的倒装焊封装

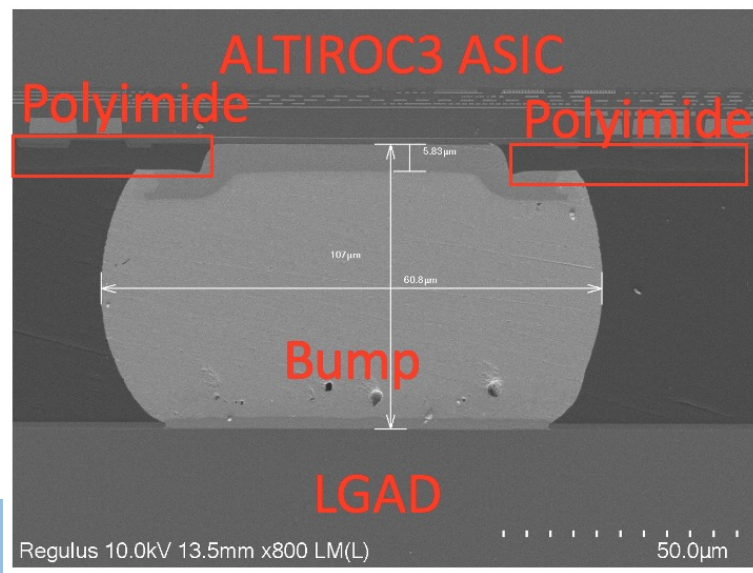


- 2023年末，HGTD项目遇到探测器模块的倒装焊热稳定性问题
 - 45度到40度热循环后，倒装焊脱落，ITK Pixel项目发现该问题，推迟LHC升级项目两年
 - HGTD探测器中，ASIC晶圆中台积电的polyimide保护层有问题（开窗尺寸与材质）
- 高能所攻关解决了HGTD探测器中的封装问题，2026年通过CERN的评审
 - 用了更软的保护层材料吸收应力，使用更厚的LGAD传感器

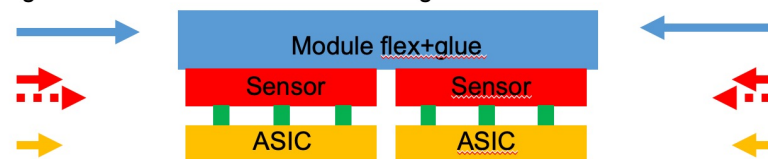
旧倒装焊 热循环后，应力导致芯片的开裂



新倒装焊

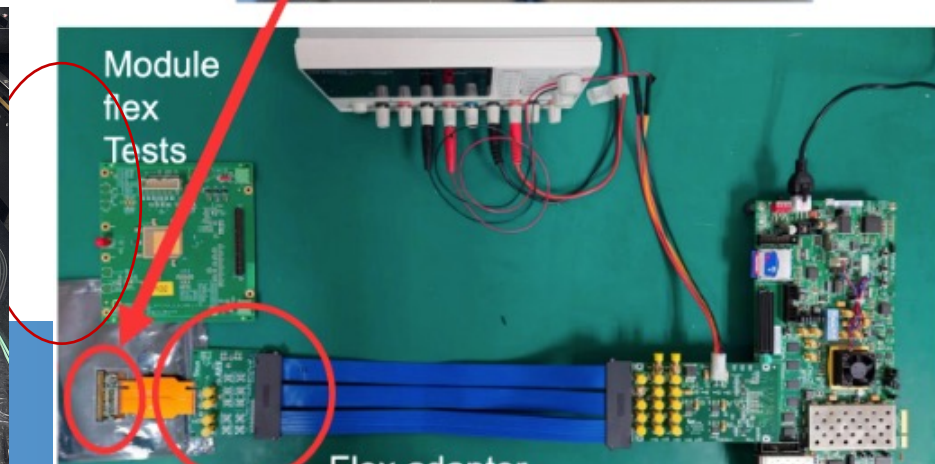
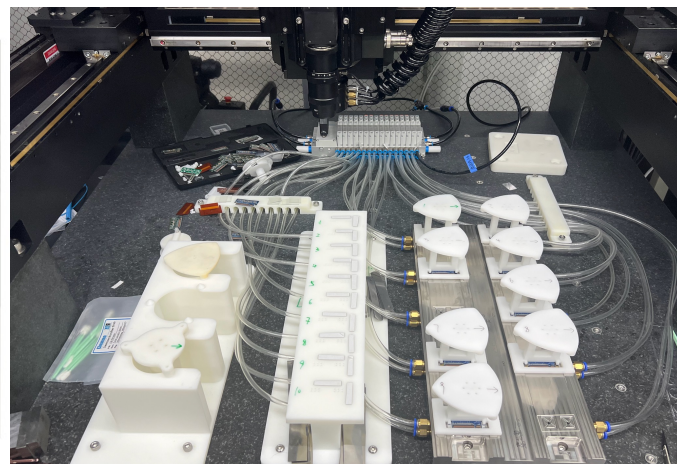
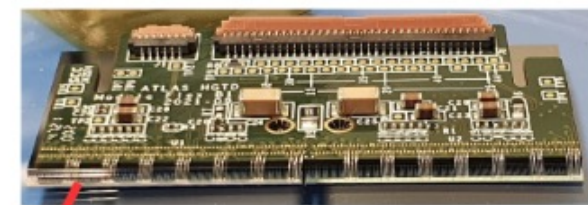
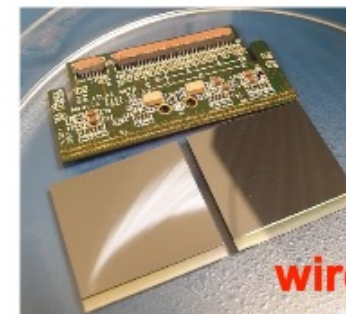
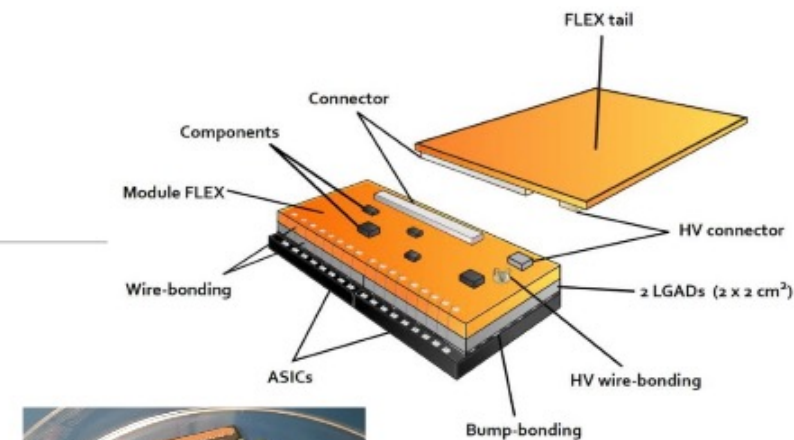


Consider low temperature (shrinking) situation
Length of arrow means deformation magnitude



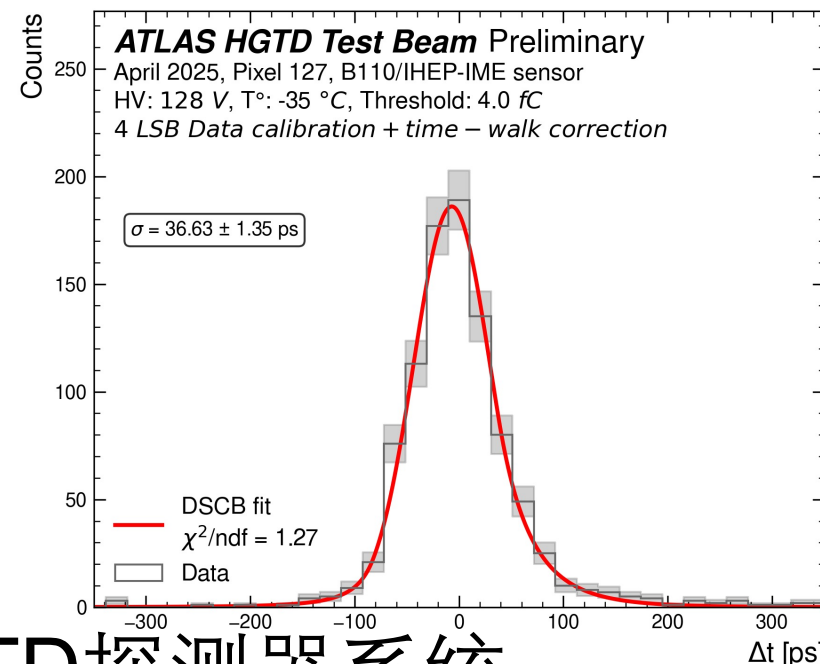
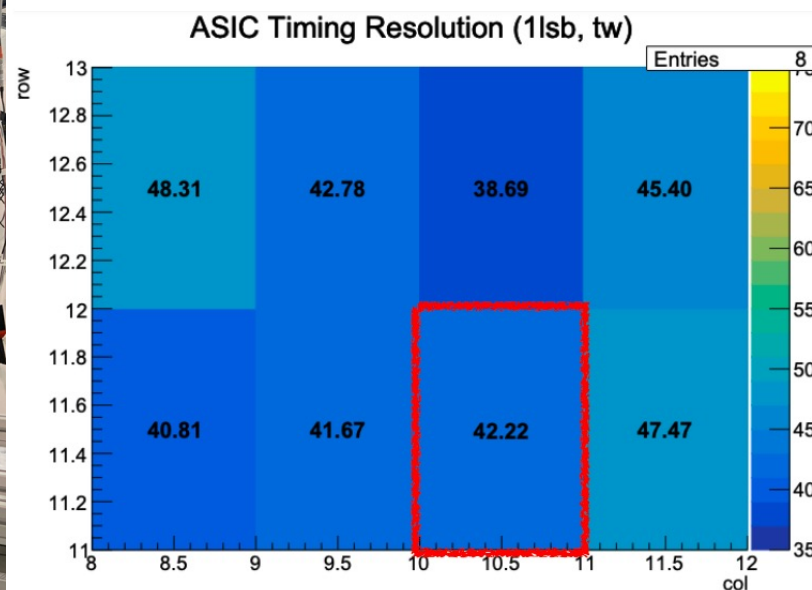
ATLAS时间探测器模块组装

- HGTD项目总共需要8032个模块 (6.4平方米)
- 5个模块组装生产中心
 - 中国, 德国, 法国, 西班牙, 摩洛哥
 - 中国组是最大的生产中心, 组装44%的模块
 - 高能所、科大、山大、南开、上交将合作完成
- 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



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达到~40皮秒



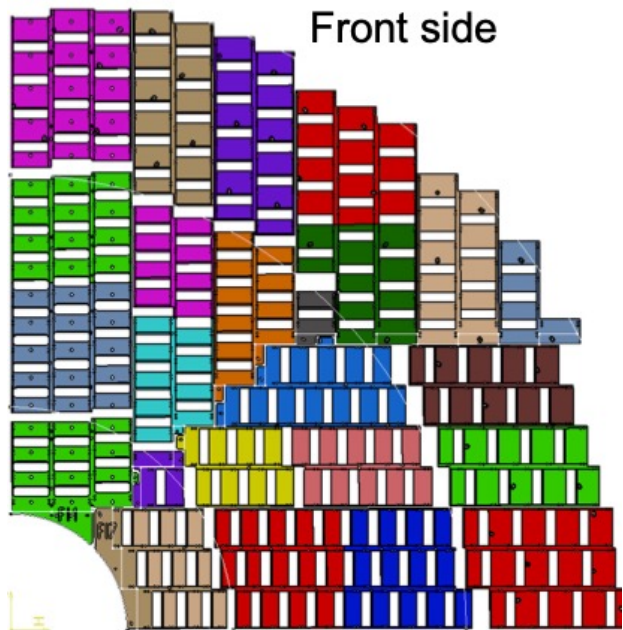
- 未来几年，将会有超过3百万通道的HGTD探测器系统

HGTD探测器单元

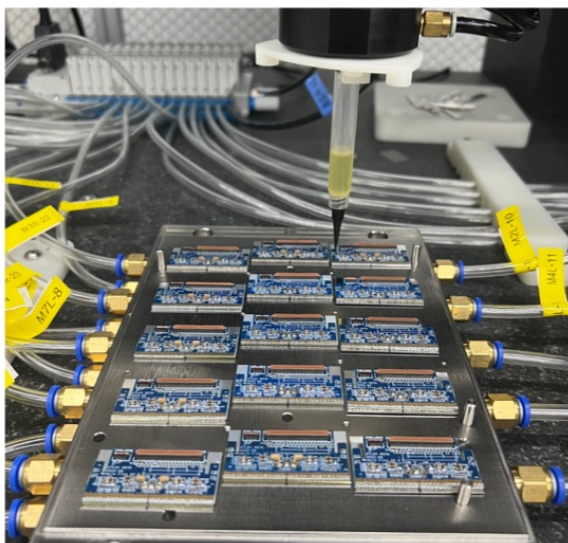
- 高能所研制项目首批两个ALTIROC3大面积探测器单元
 - 每个探测器单元有15个模块，约~500平方厘米面积。
- 高能所与科大合作，在大面积龙门机器人上做探测器单元量产的准备

自动定位与点胶

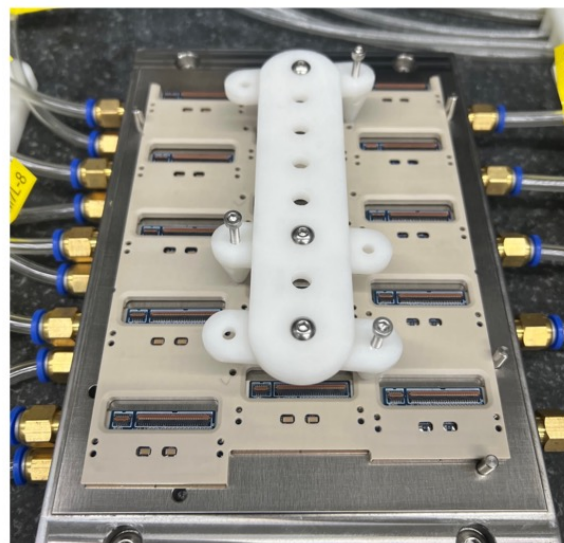
Front side



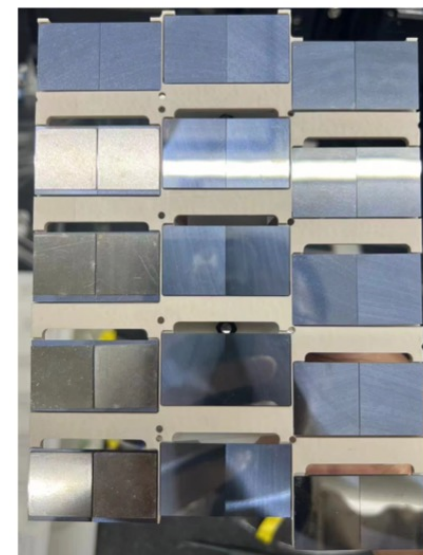
Dispensing with Gluing Tool



Put the support unit

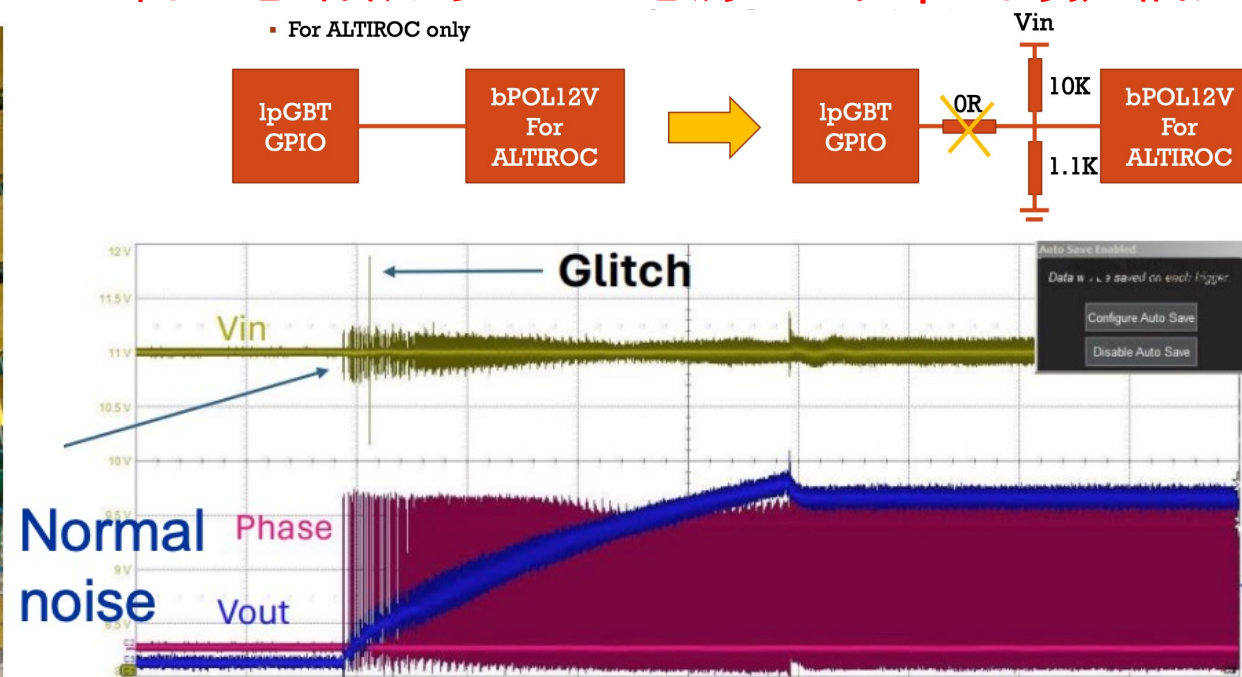
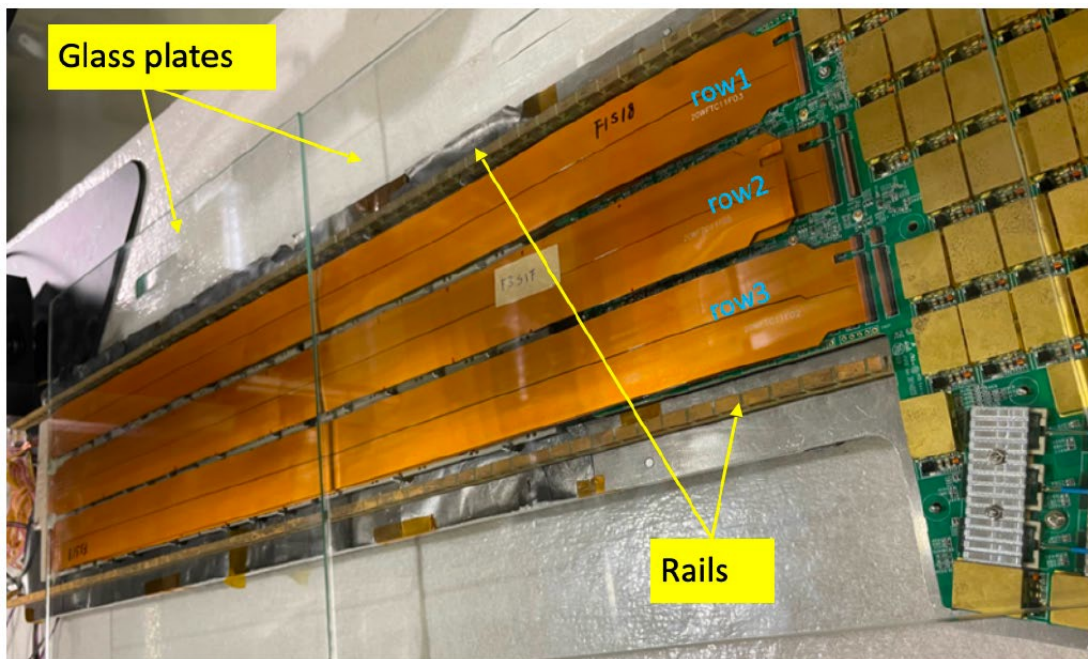


Backside view after removal



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
 - 2025年发现CERN的Bpol电源芯片有抗辐照能力问题，影响所有LHC项目
 - 高能所修改HGTD外围电路板设计，避免CERN电源芯片导致问题
 - 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
- 外围电路板与柔性电缆
- 外围电路板与CERN电源芯片Bpol的抗辐照问题



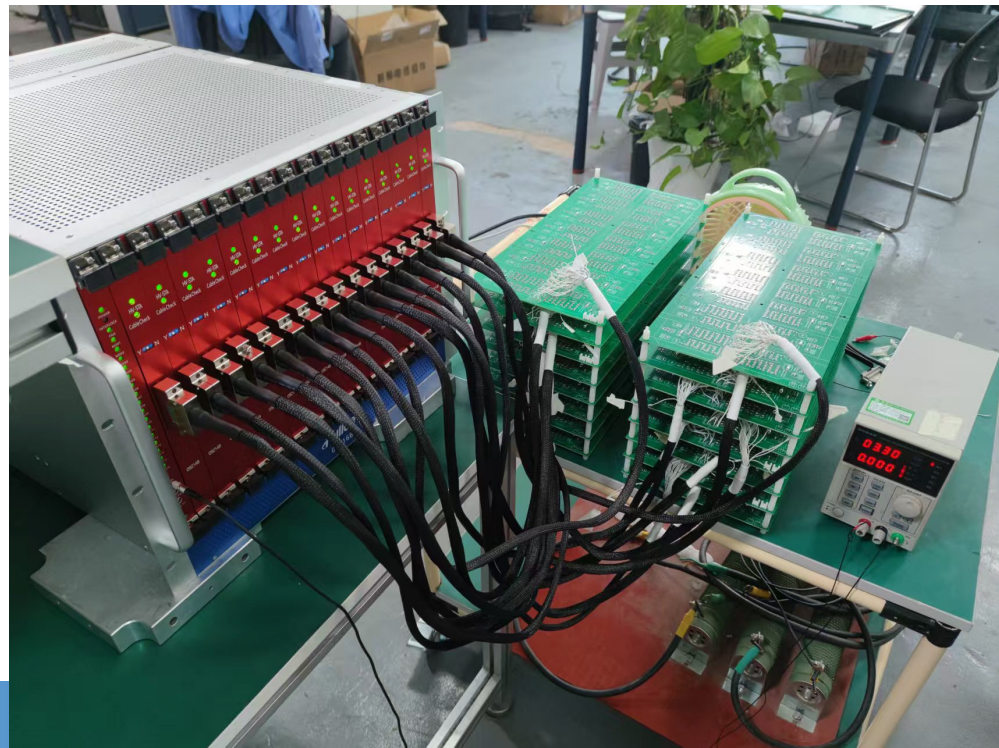
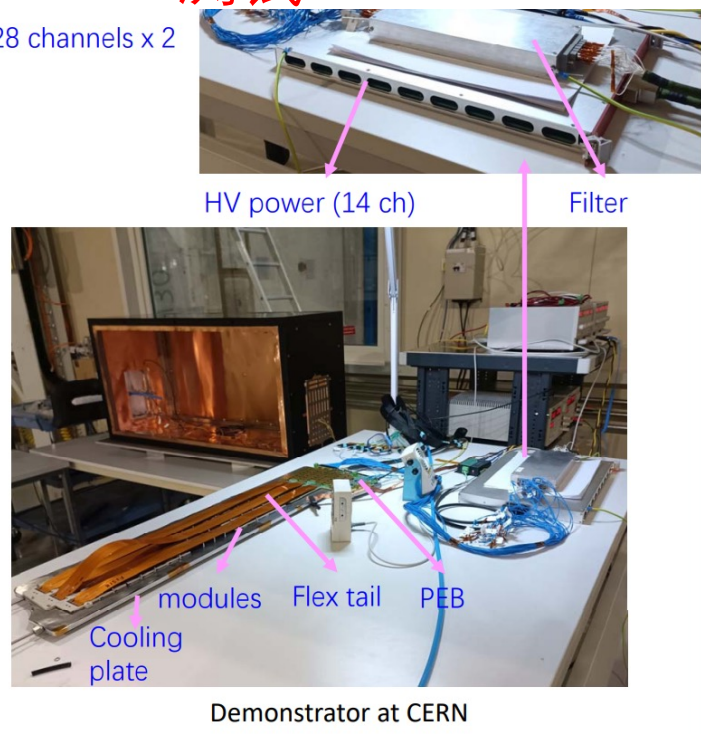
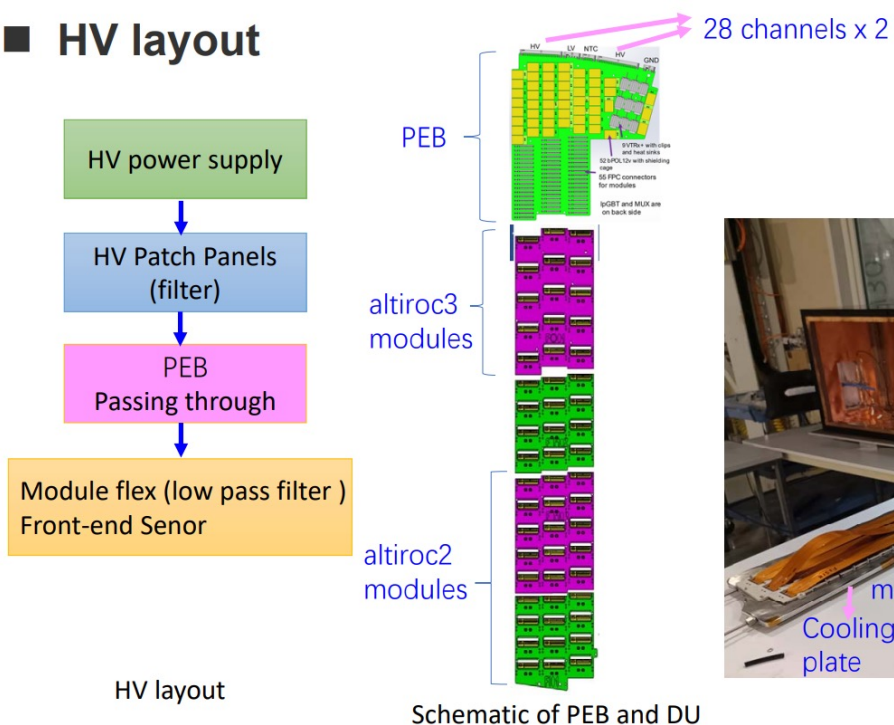
高压电源

- 高能所、山大承担18%的高压电源研制任务
 - 与国内福德公司研发出高压系统样机，实现高精度100nA的漏电流测量
 - 完成预量产（两个机箱），通过CERN的评审，已经做好正式量产的准备
 - 山大承担了在CERN的量产电源测试任务

高压电源样机预量产

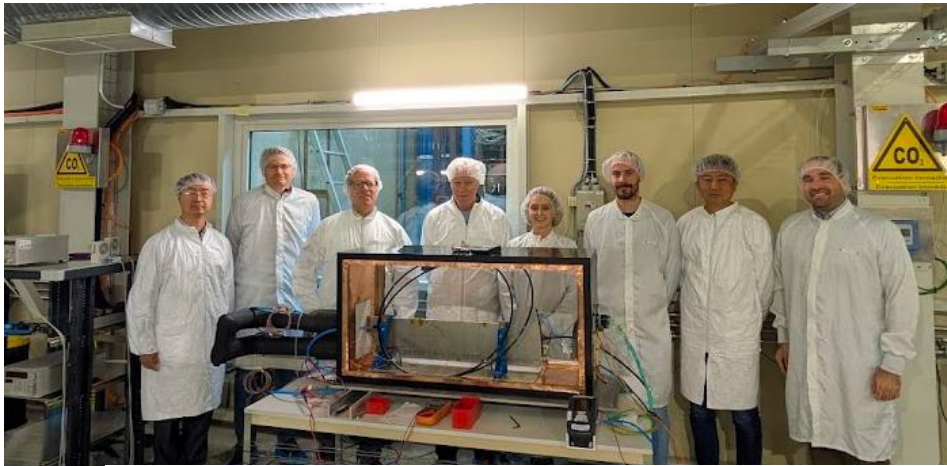
高压电源样机在CERN测试

■ HV layout

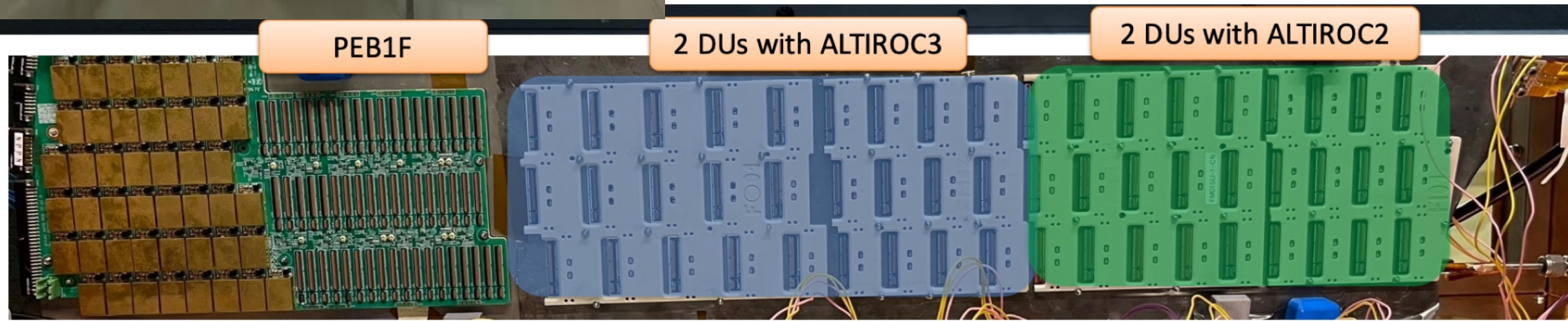
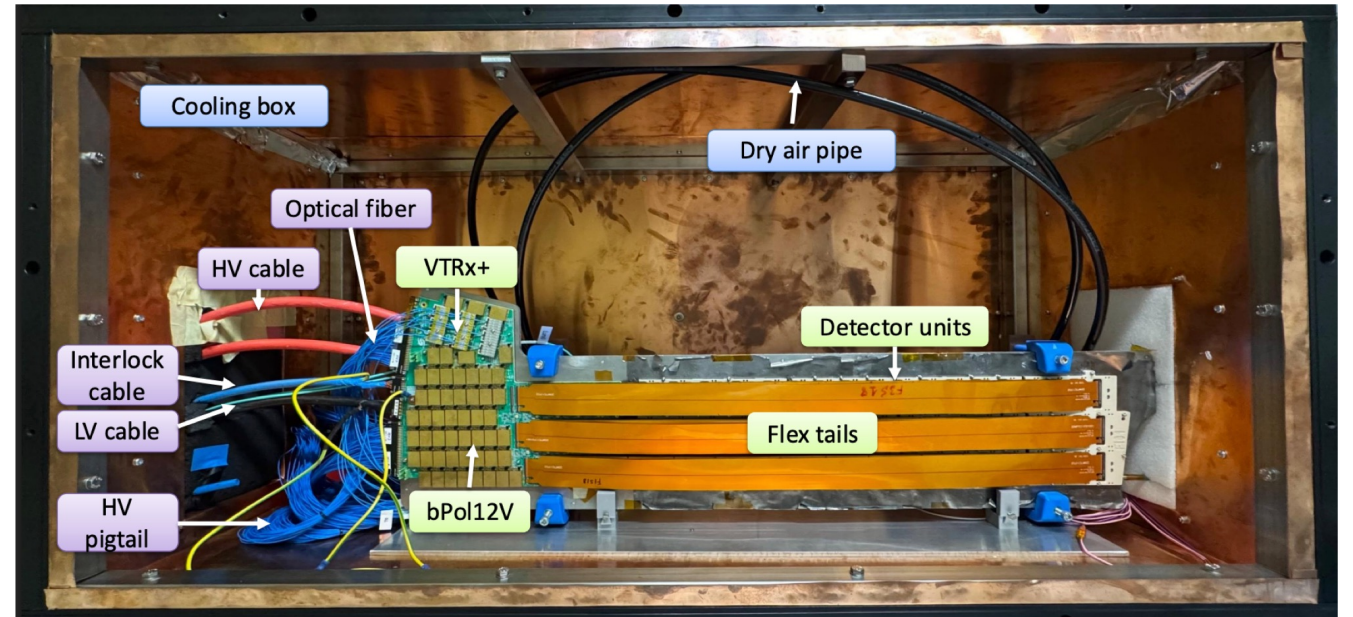


HGTD探测器大型样机

- 中国组在研制54模块的大型样机研发起主要作用
 - 首次验证数十个模块，上万个通道的高时间分辨探测器系统

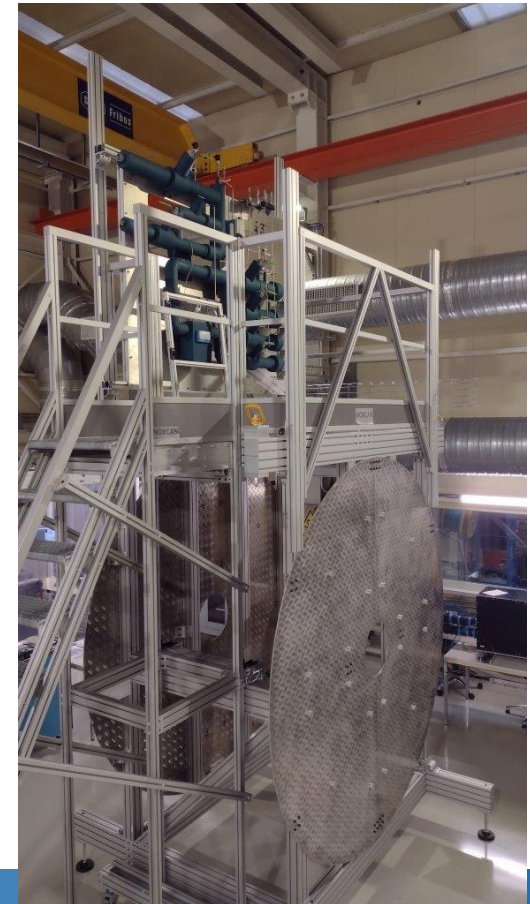
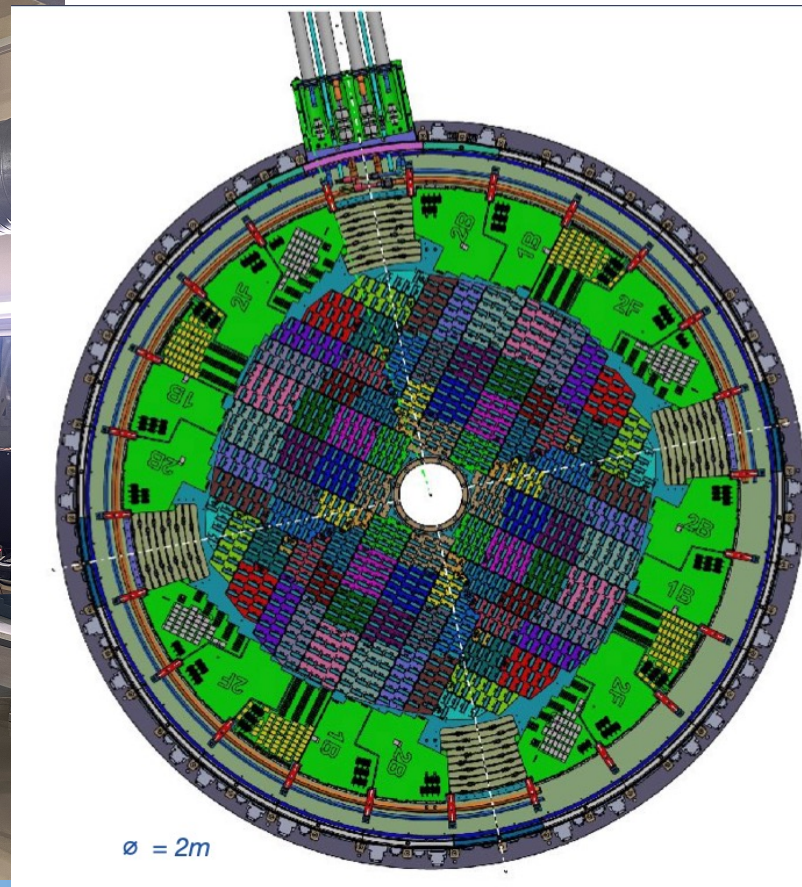
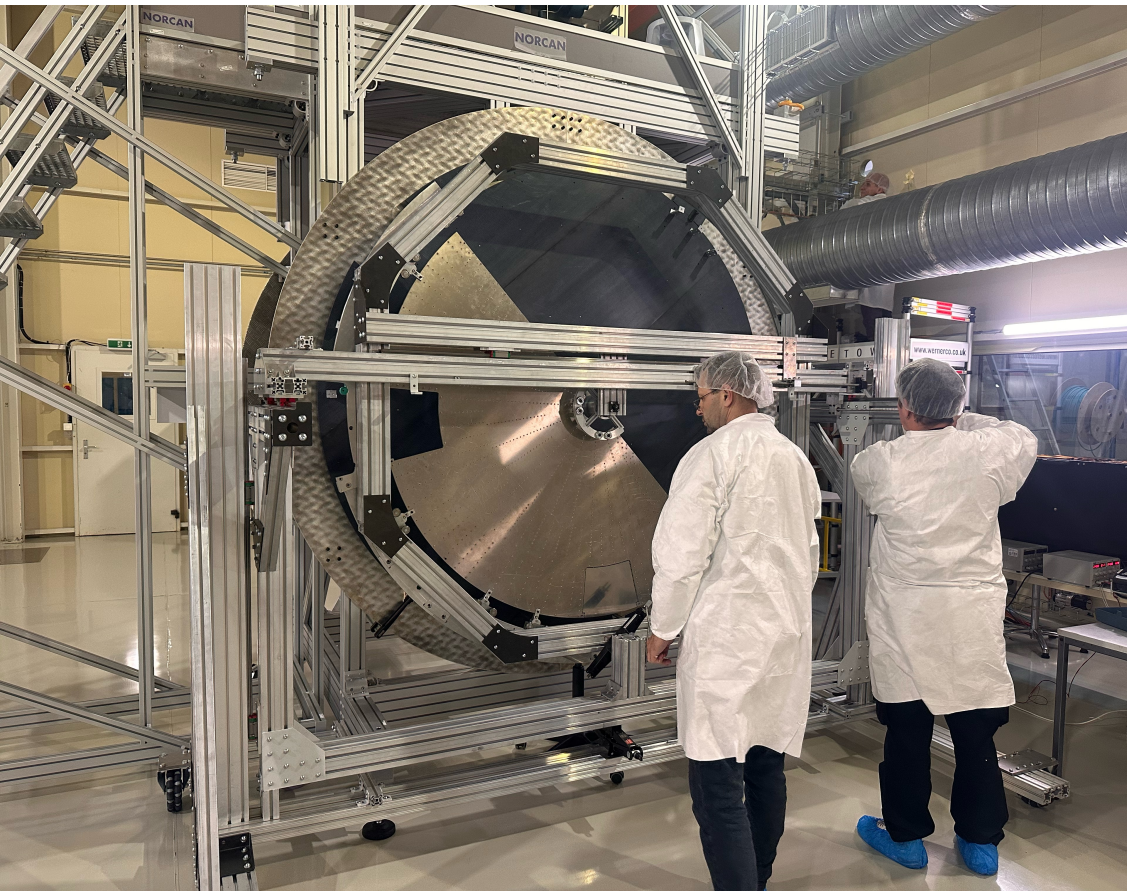


2025 ATLAS探测器升级的评审会
项目组与评委合照



HGTD探测器总体组装

- 2027年-2029年，HGTD探测器将在CERN进行总体组装。
- 中国组将在总体组装与DAQ研发发挥主要作用

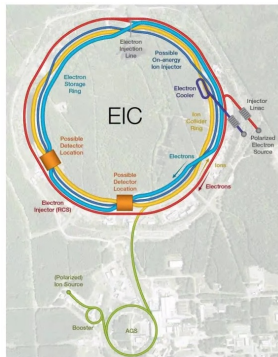


小结: ATLAS实验高颗粒度时间探测器

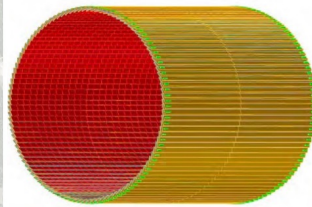
- 中国组在项目中占**主导地位**，担任等**项目经理**等多个领导职务。
 - **LGAD传感器**，2.1万个传感器全部由中国组研制
 - 高能所-微电子所赢得欧洲核子中心（CERN）国际招标
 - 高能所将提供**90%**的LGAD，科大将提供**10%**的LGAD
 - ASIC：高能所、上交大、山大将承担**50%**晶圆测试
 - 探测器模块：中国组将组装~4000个模块，**占项目45%**
 - 外围电路与电源：
 - 高能所、南大研制了首个外围电路板样机，山大研制柔性电缆
 - 高压电源：高能所、山大承担**18%**的高压电源，已经研制出样机
- 预期**2027年**基本完成探测器关键器件的量产
- **2028-2029年**，在CERN完成探测器整体的安装与调试

未来发展：LGAD探测器的未来应用

Electron-Ion Collider (EIC) : Timing-tracker

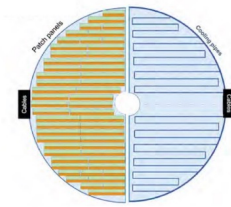


Barrel AC-LGAD detector



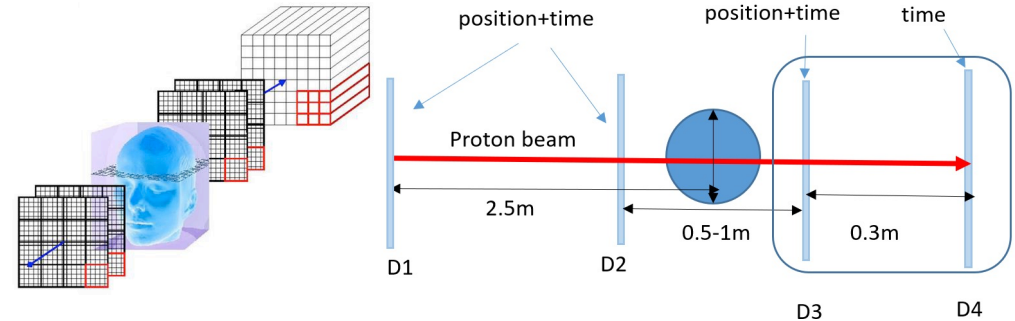
10.9 m²

Hadron endcap AC-LGAD detector

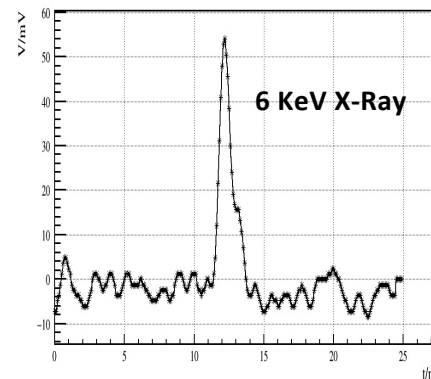
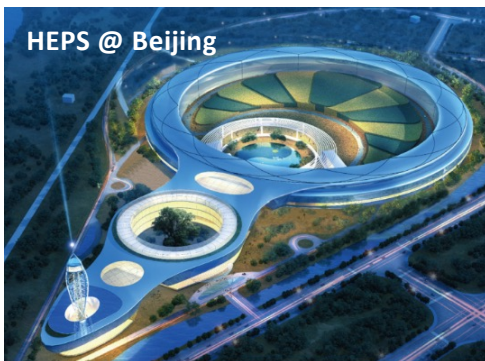


2.22 m²

Nuclear Medicine Instruments : Such as proton therapy and proton CT



X-ray detectors @ advanced light sources

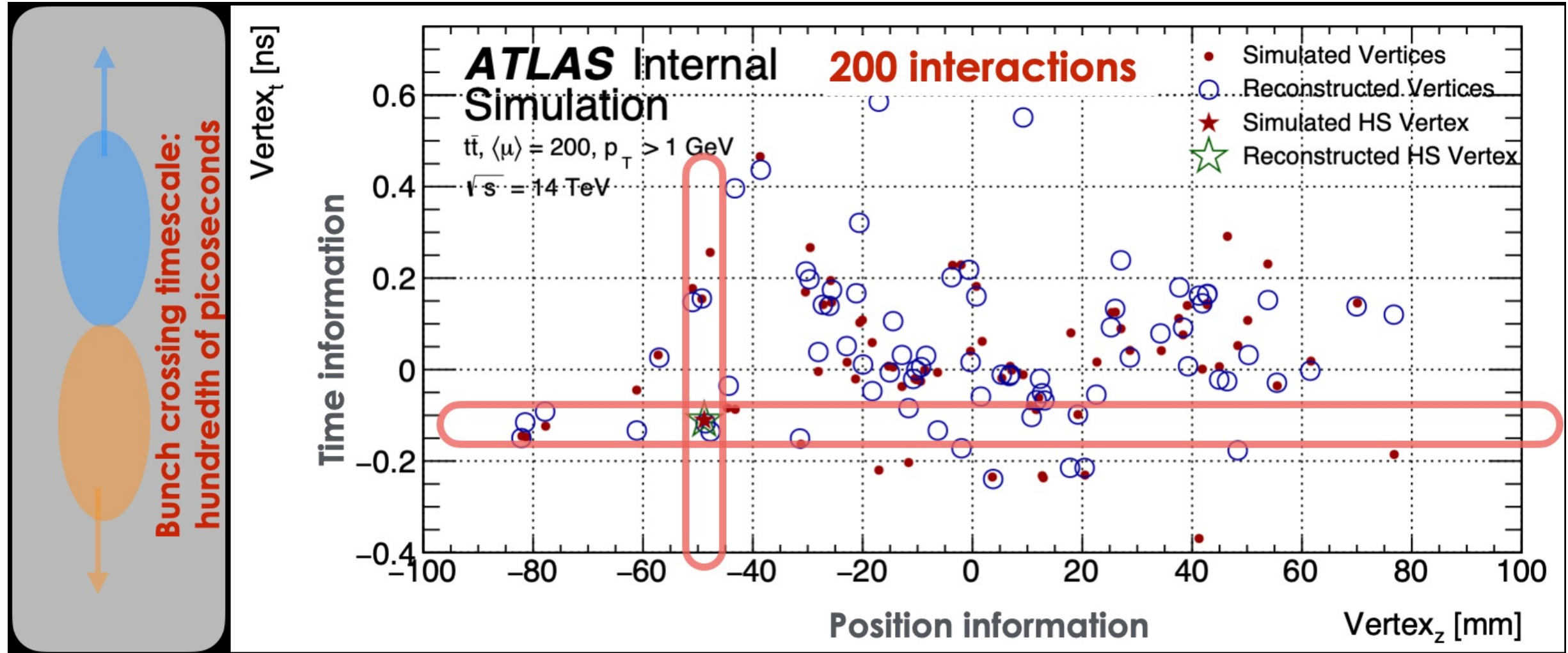


other applications

- Beam Telescope for Beam Test Platform
- LiDAR: Positioning and Navigation
- Track and time detectors in other particle physics and nuclear physics experiments
- ...

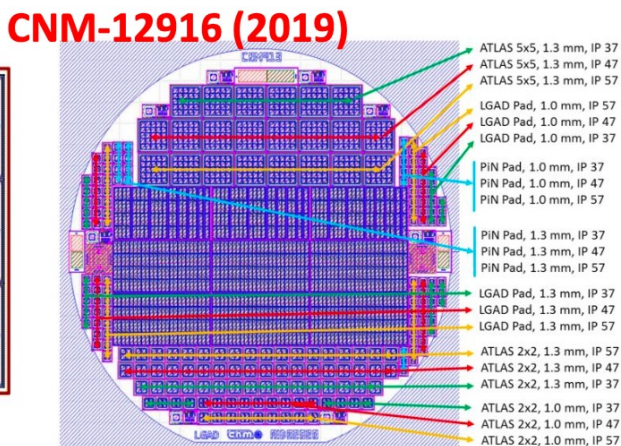
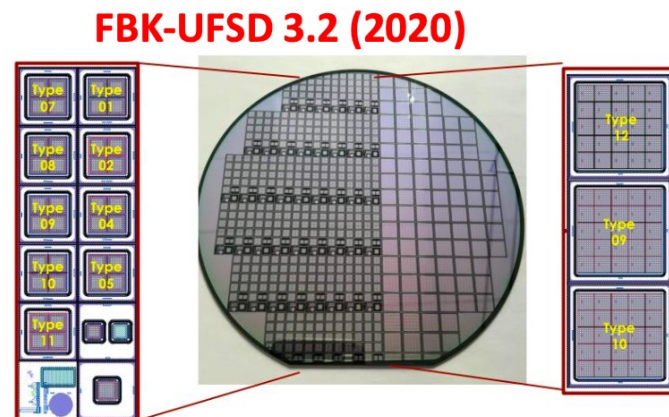
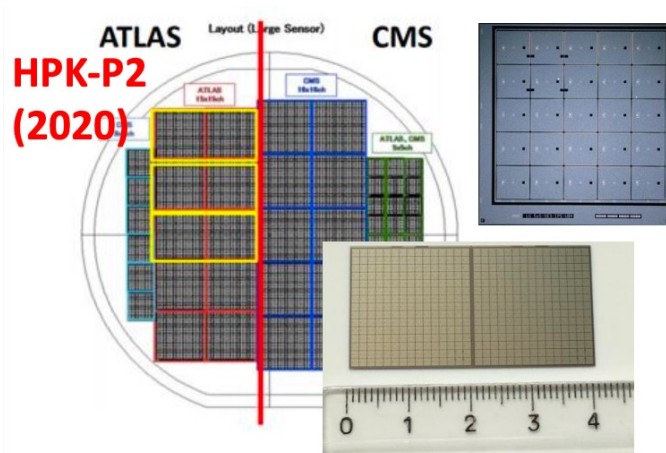
backup

ATLAS实验高颗粒度时间探测器工作原理

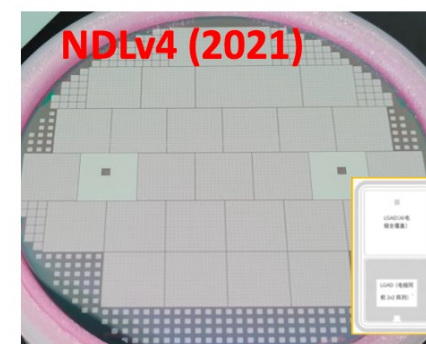
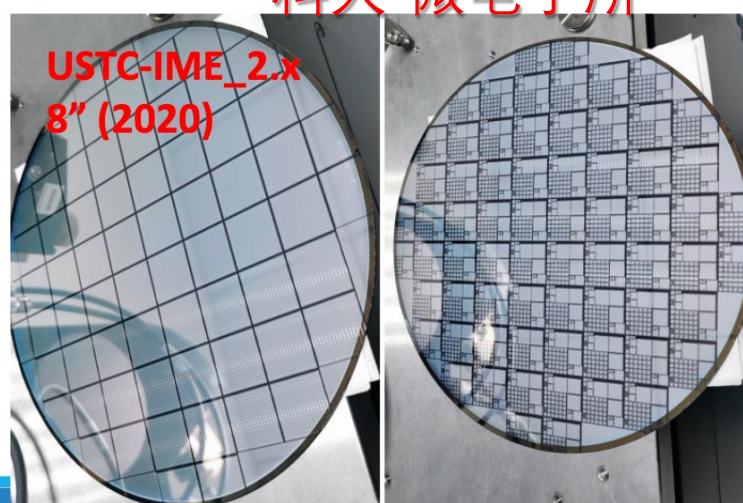
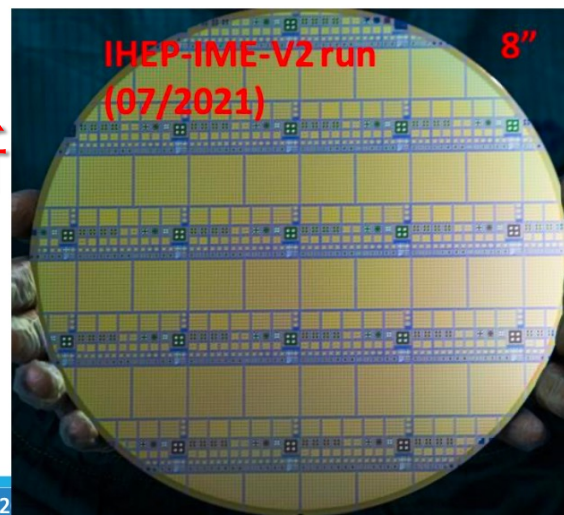


LGAD低增益雪崩硅传感器：国内外形势

- 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
北师大

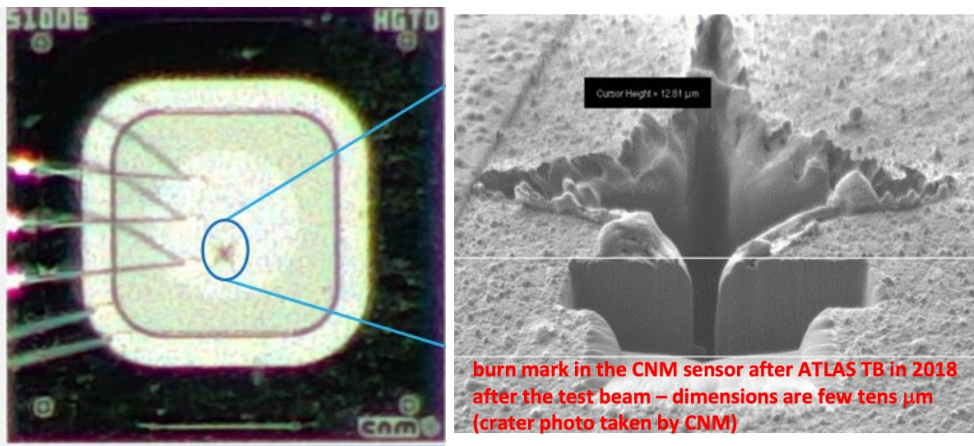


PLANAR TECHNOLOGY – more vendors
(e2V, BNL, Micron ...)

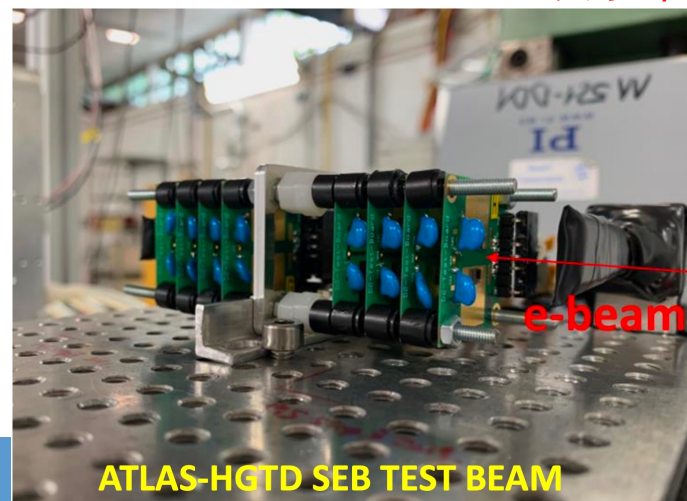
硅传感器的单粒子烧毁风险 Single Event Burnout (SEB)

- RD50, CMS and ATLAS 合作组确认LGAD的单粒子烧毁风险
- 高电压与高电场导致烧毁，工作电压要控制到<550 V (50微米的硅传感器)
- ATLAS合作组开展欧洲核子中心 (CERN) 的高能质子流测试
 - 辐照后，不掺碳的LGAD (滨松, 西班牙CNM) 烧毁率很高
 - 掺碳的LGAD基本能通过测试 (高能所, 中科大, 意大利FBK)
 - 高能所传感器辐照后，数十个样品全部通过测试，无一烧毁

单粒子烧毁后LGAD (滨松/CNM)

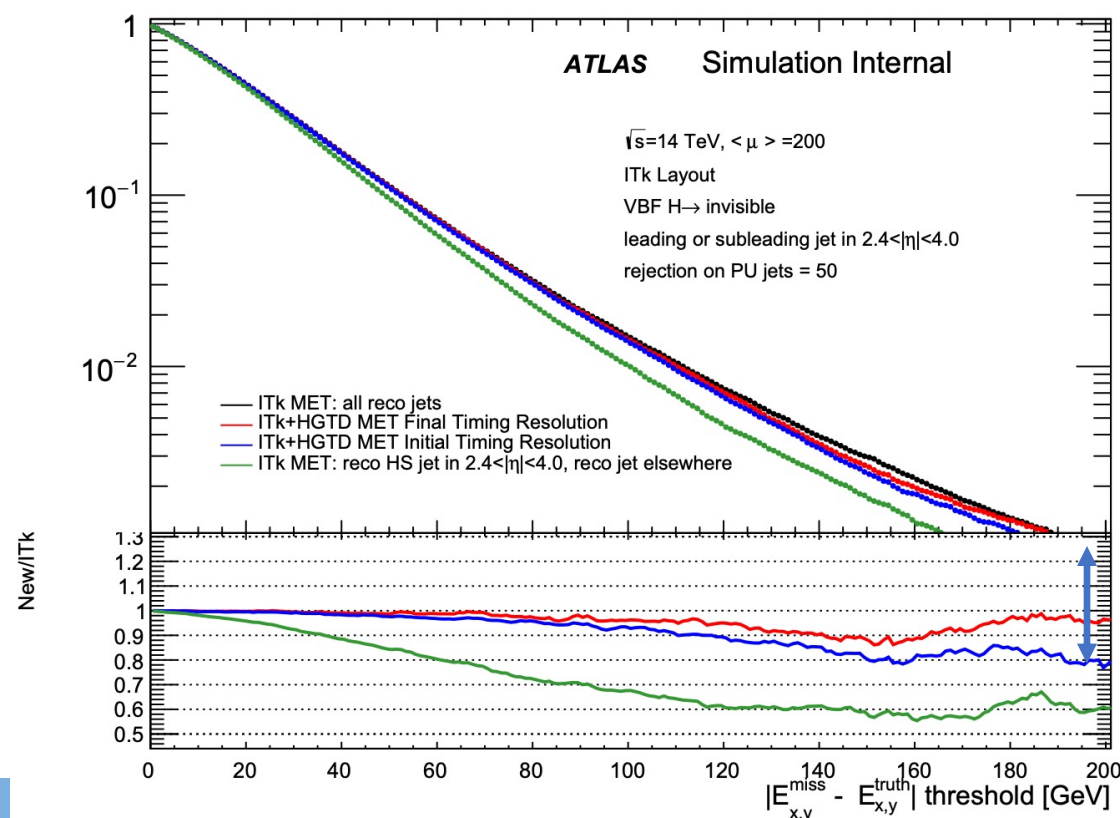
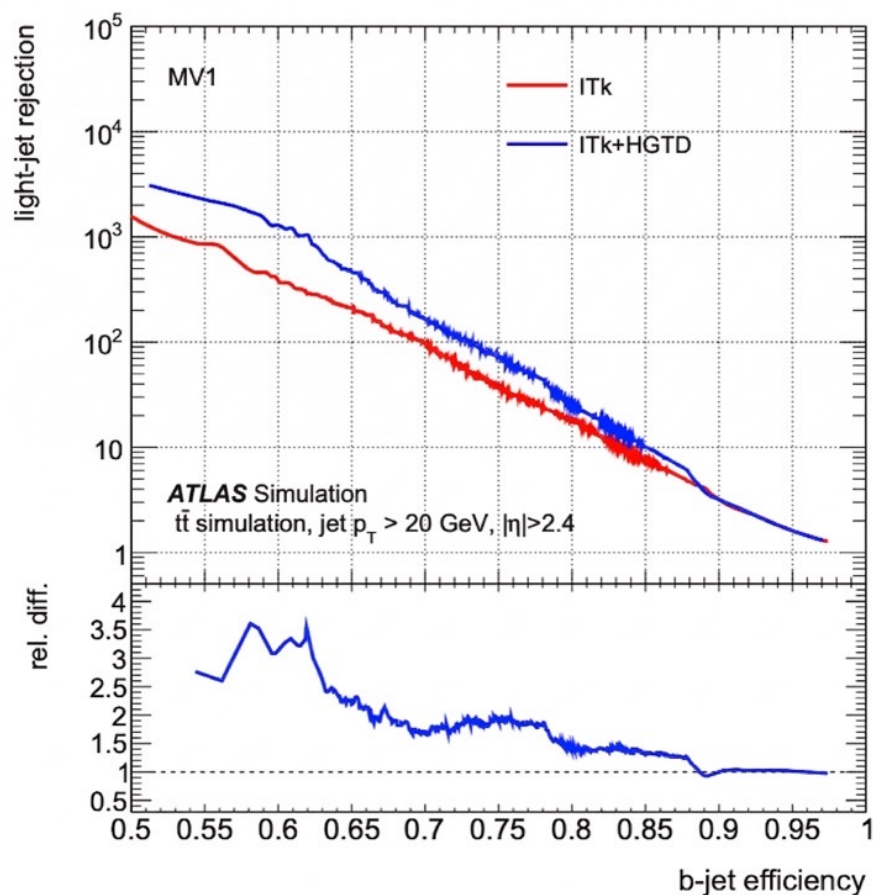


CERN test beam: 120 GeV 质子束流



HGTD探测器预期物理性能

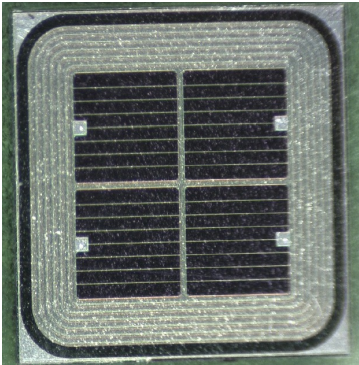
- Significant Pileup suppression in VBF jet
- Improve forward b jet tagging performance, Missing ET performance
- Expect **20-30%** improvement in VBF Higgs analysis



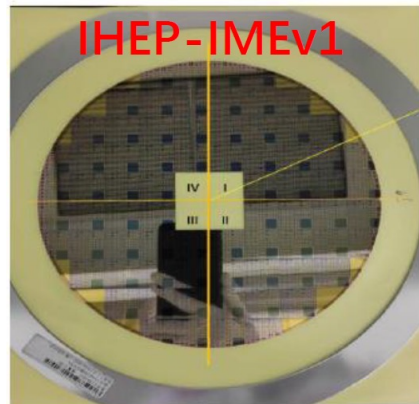
高能所LGAD 传感器的研发历程

- 2019年，高能所开始发展LGAD传感器技术，先后与多家单位合作研发
 - 北京师范大学(NDL), 清华大学微电子学院, 中科院微电子所(IME)
 - 与IME的合作中，高能所负责器件设计与测试，微电子负责流片

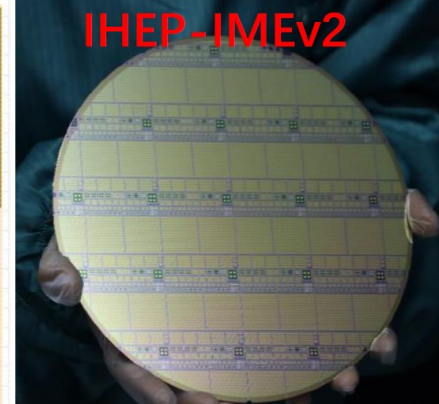
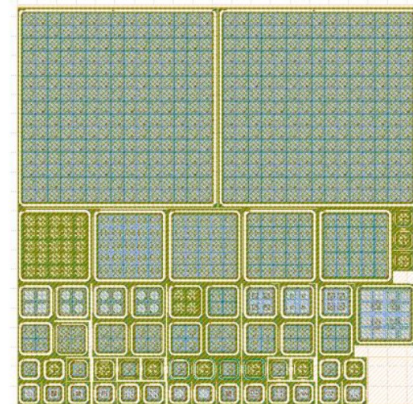
IHEP-NDL(2019)



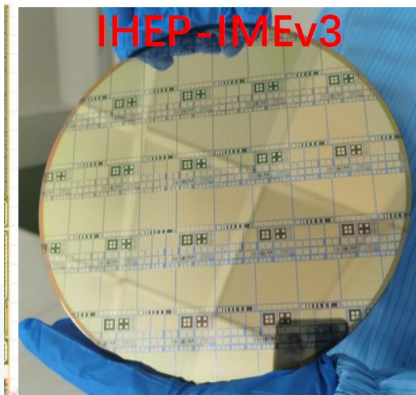
IHEP-IMEv1(2020.9)



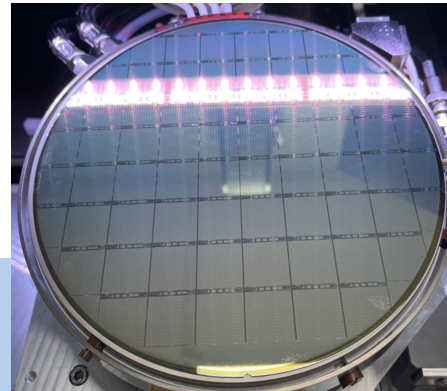
IHEP-IMEv2(2021.6)



IHEP-IMEv3(2022.5)



Pre-production for ATLAS (2023.7)
Pre-production

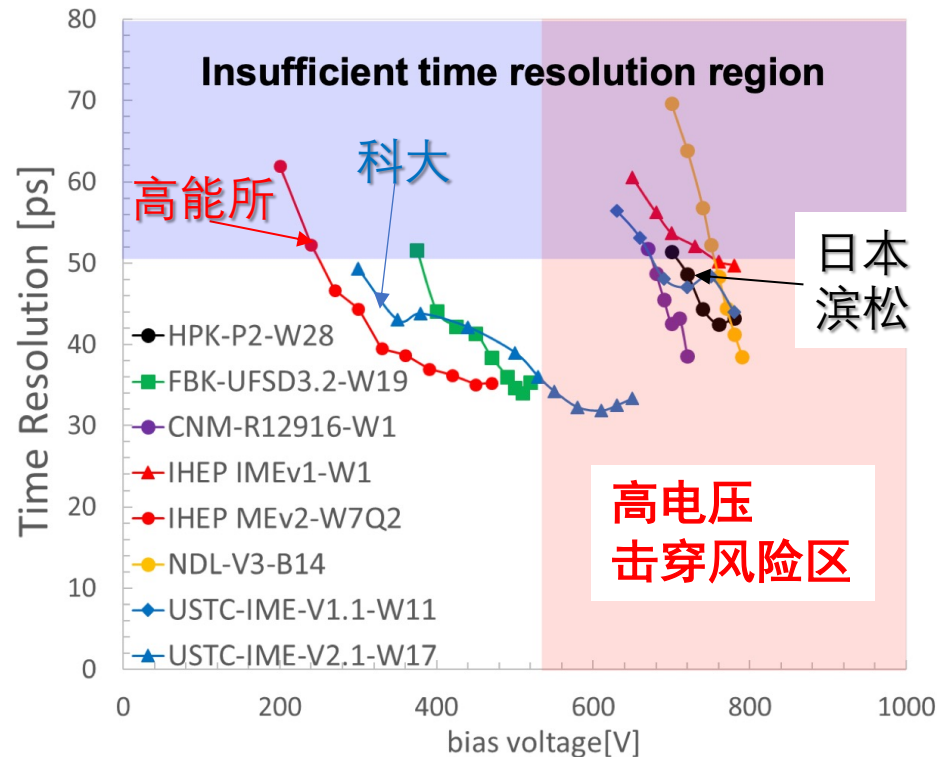


Mass production
for ATLAS (2024.6)

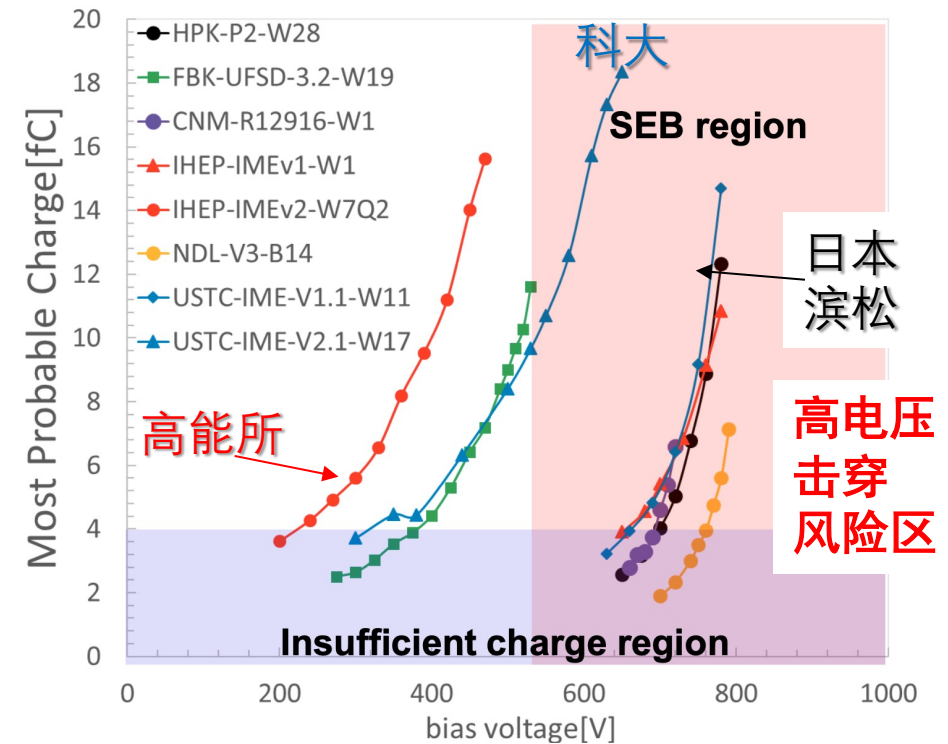
LGAD传感器在辐照后的性能

- 掺碳的LGADs 满足ATLAS实验的 HGTD 要求 (高能所, 科大, 意大利FBK)
 - 30-50皮秒的时间分辨率
 - 4fC以上的电荷收集, 工作电压低于550V (避免烧毁)

时间分辨率 vs 偏置电压



电荷收集 vs 偏置电压

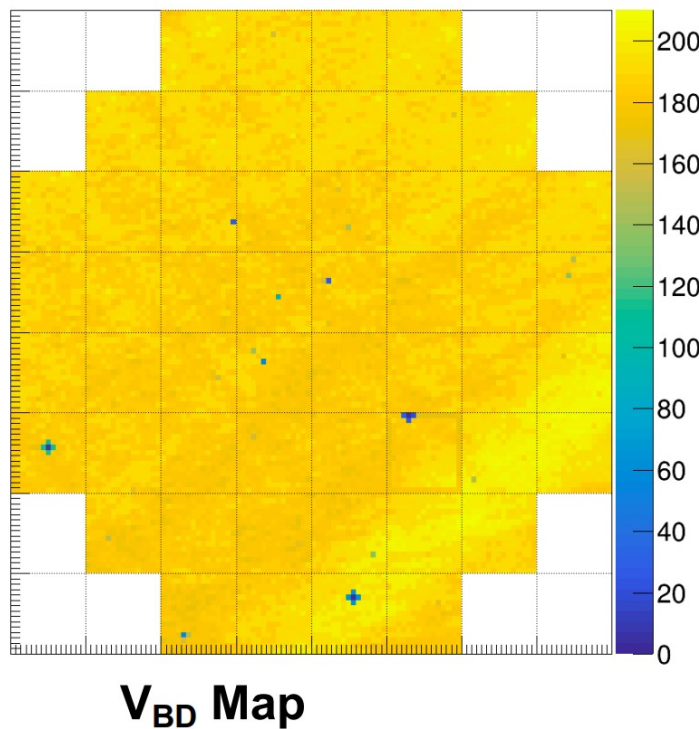
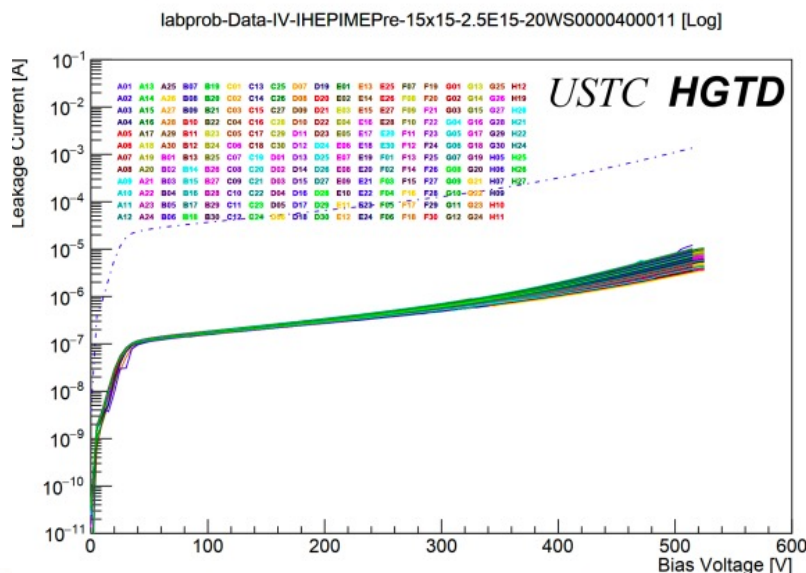


LGAD传感器的预量产测试

- 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

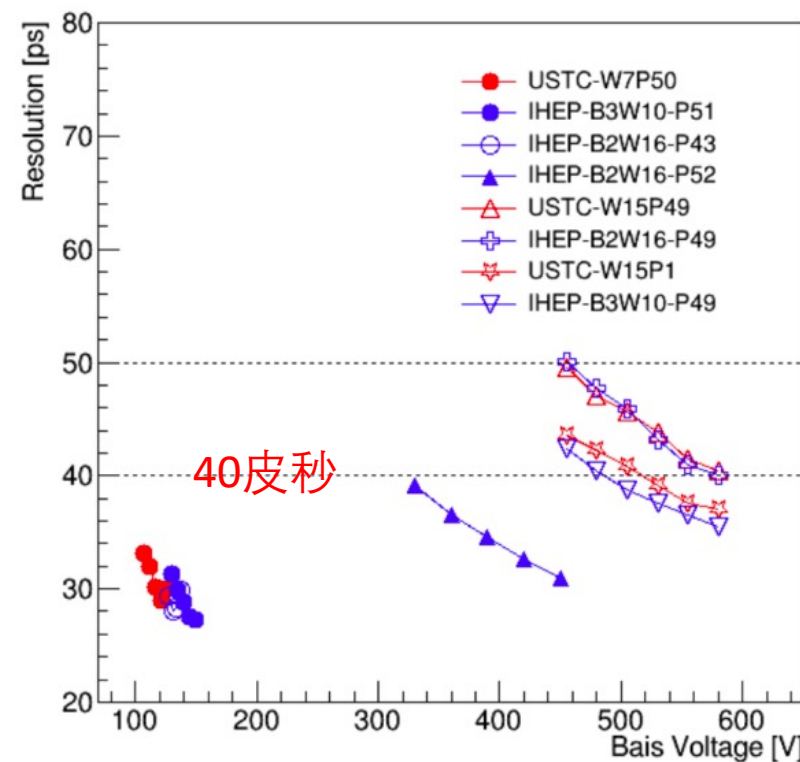
辐照后LGAD的漏电流与击穿电压

20WS0000400011@2.5E15 n_{eq}/cm²



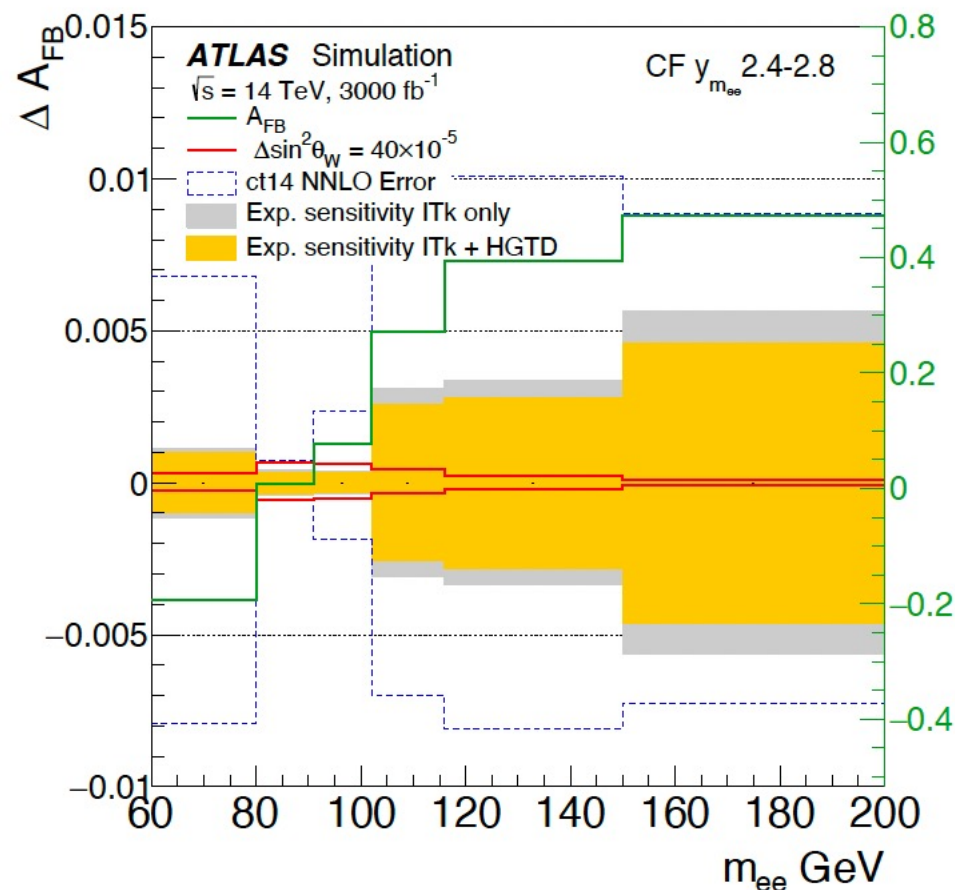
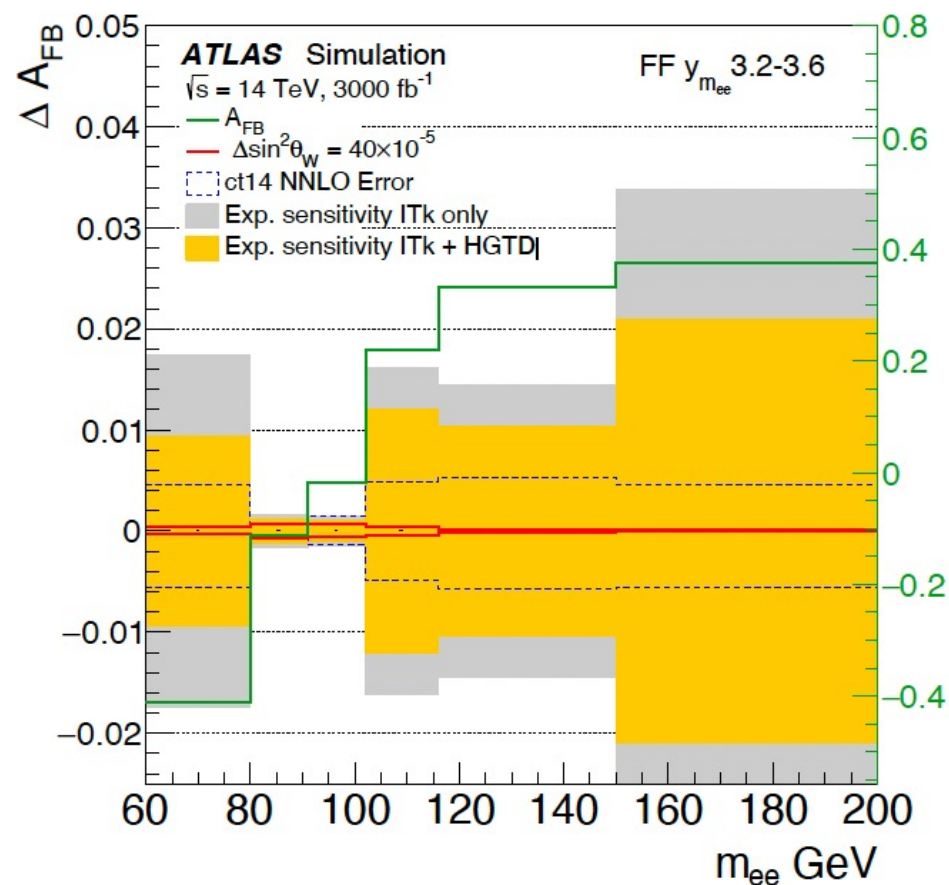
辐照后LGAD的时间分辨率

Time Resolution - HGTD TB June 2024



HGTD探测器预期物理性能

- 在VBF末态的物理和弱混合角的高精度电弱测量中
 - 预期显著提高其测量精度，特别是在前向区



LGAD传感器的预量产性能测试

详情见赵梅的报告

- 辐照前后，时间分辨率都可以达到30~40皮秒，探测效率大于95%

JINST 21 (2026) P03021

