
大型强子对撞机ATLAS实验 高颗粒度时间探测器

梁志均

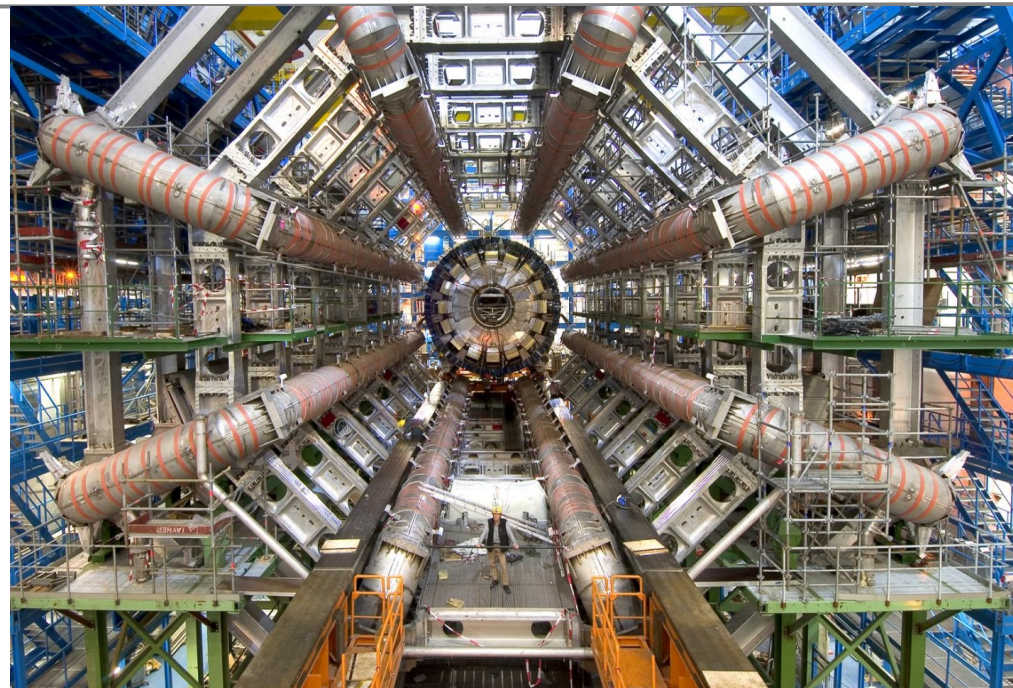
中国科学院高能物理研究所

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

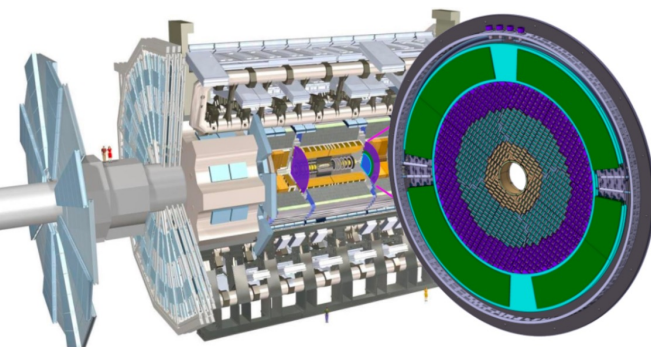
- 大约**3000人**的一个实验组
- **6层楼高** (**25米**) 的大型探测器
- 探测对撞产生粒子能量与动量

High Granularity Timing Detector (HGTD)

ATLAS实验高颗粒度时间探测器

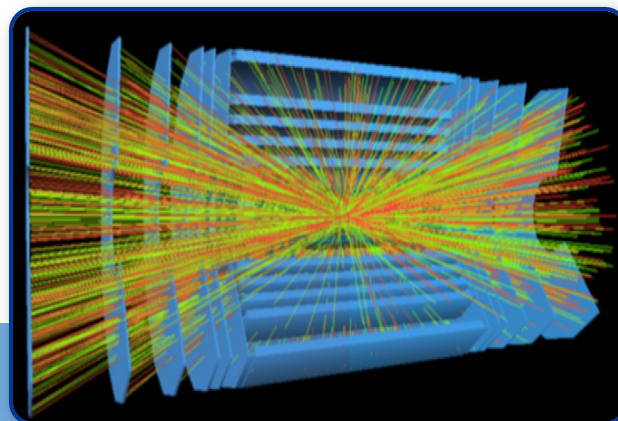
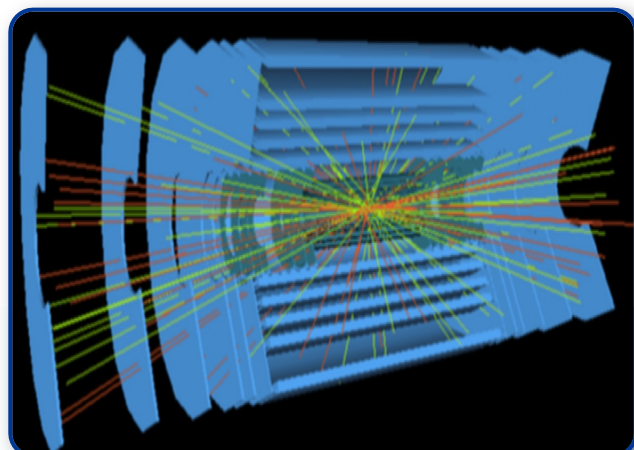
- 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级（数纳秒→30皮秒）
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题

- 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）



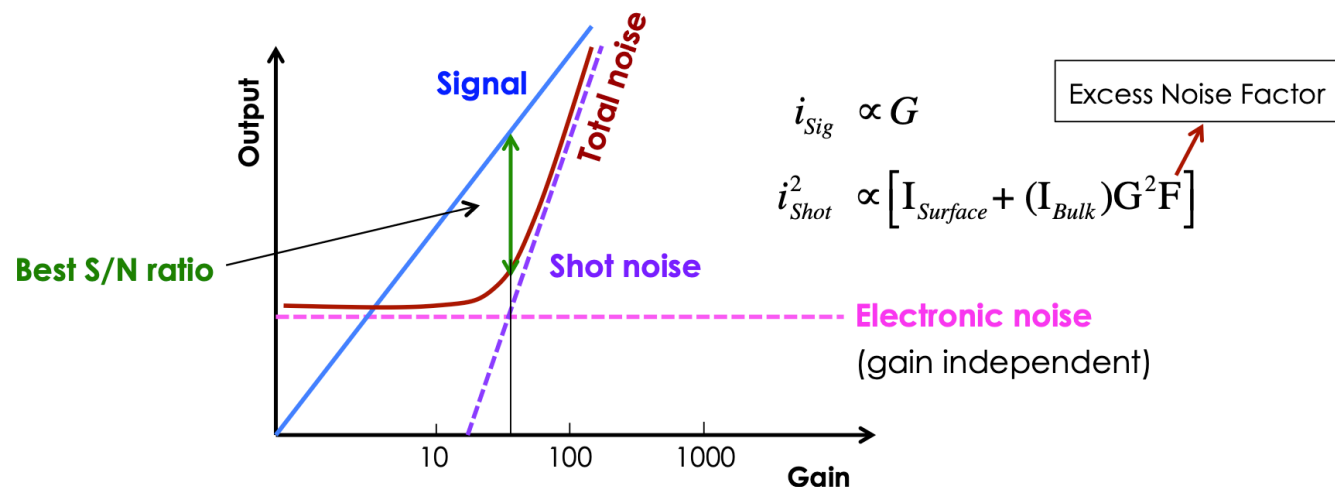
Low Gain Avalanche Detectors (LGAD)

低增益雪崩硅传感器

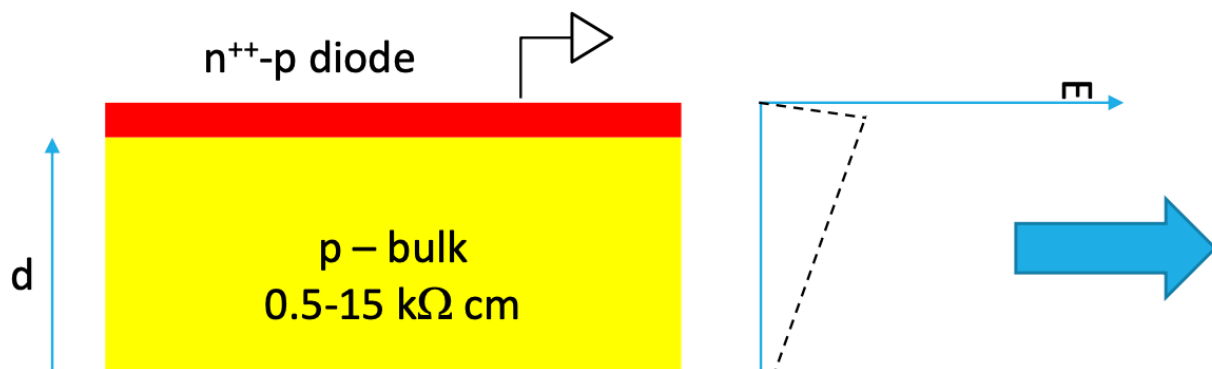
➤ 与APD 和 SiPM比较, LGAD has 适中的增益 (10-50)

- 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

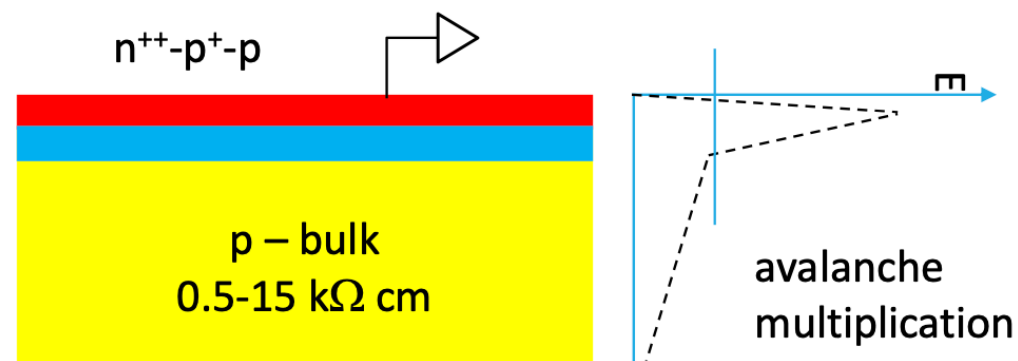
$$\sigma_{jitter}^2 = \left(\frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$



一般的 PIN 结传感器

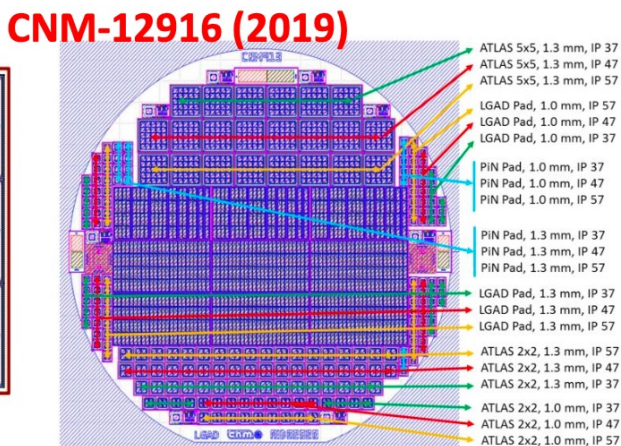
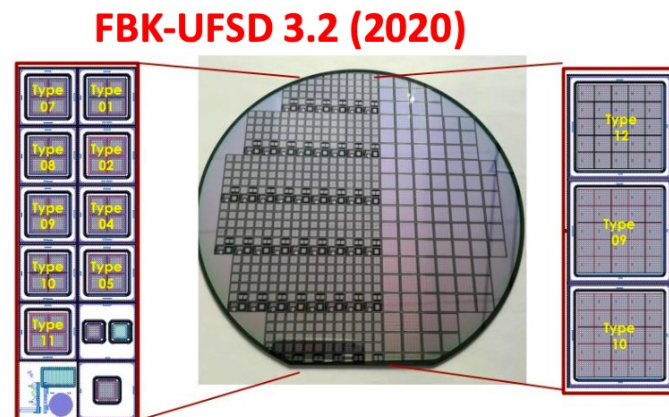
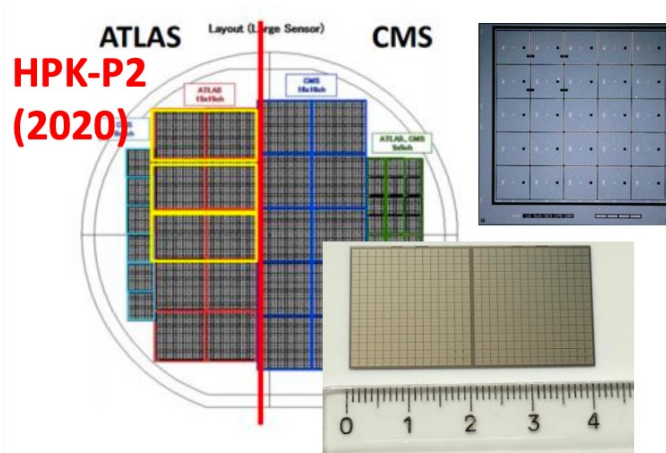


低增益雪崩硅传感器
P+ gain layer on top of PIN diode



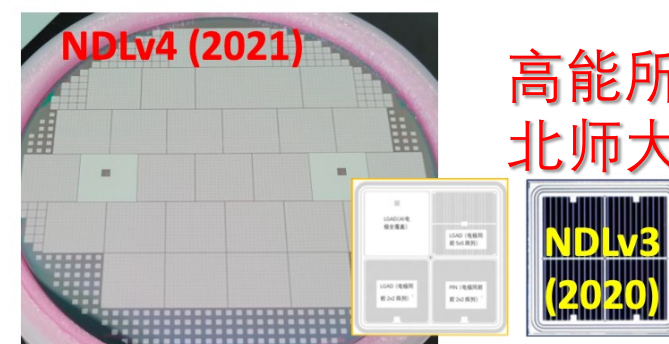
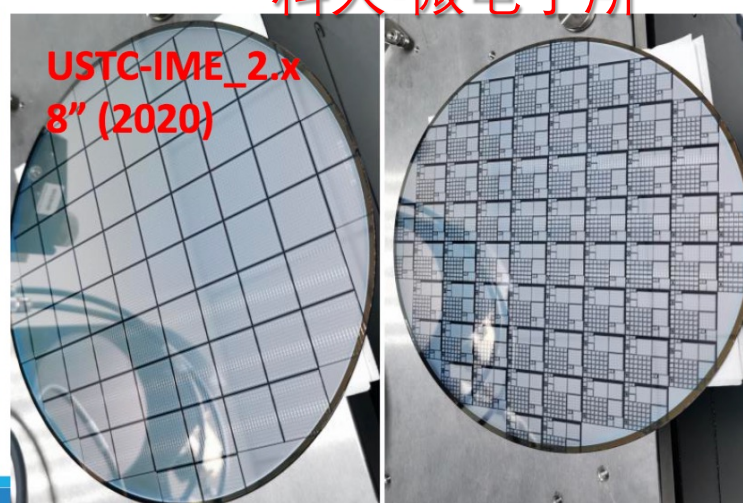
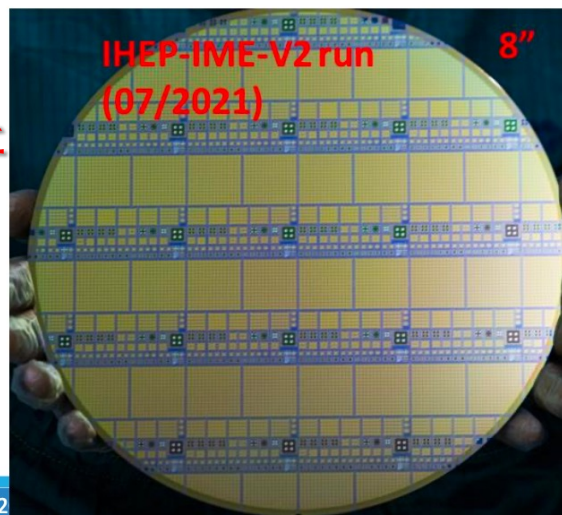
LGAD低增益雪崩硅传感器：国内外形势

- 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



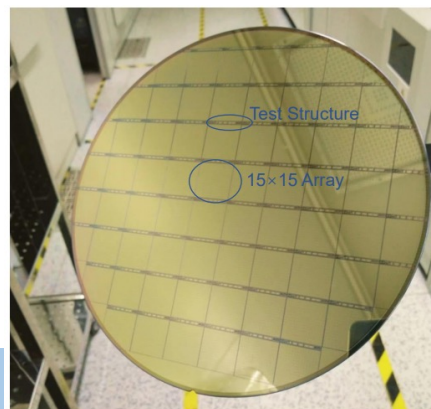
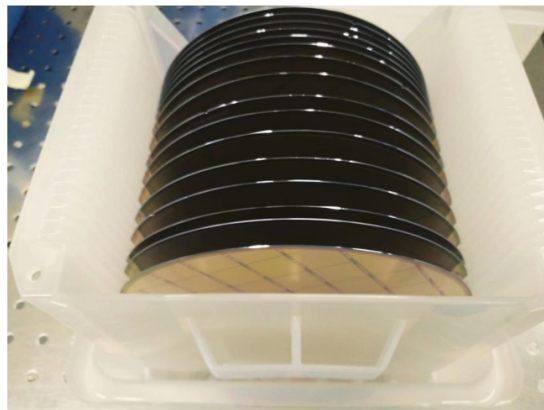
高能所
北师大

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

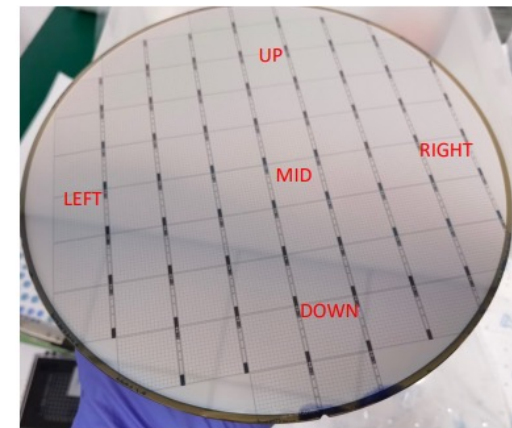
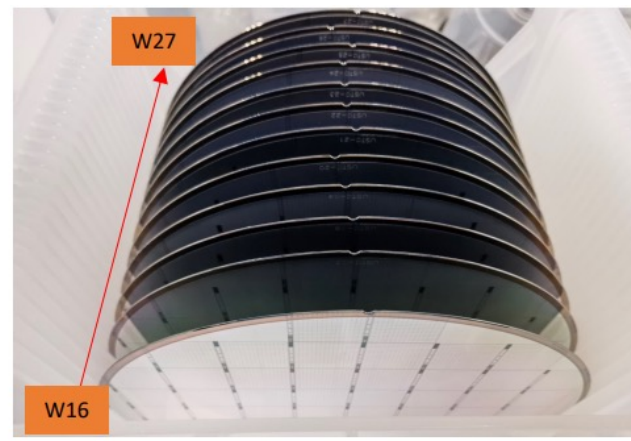
LGAD传感器的量产

- 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

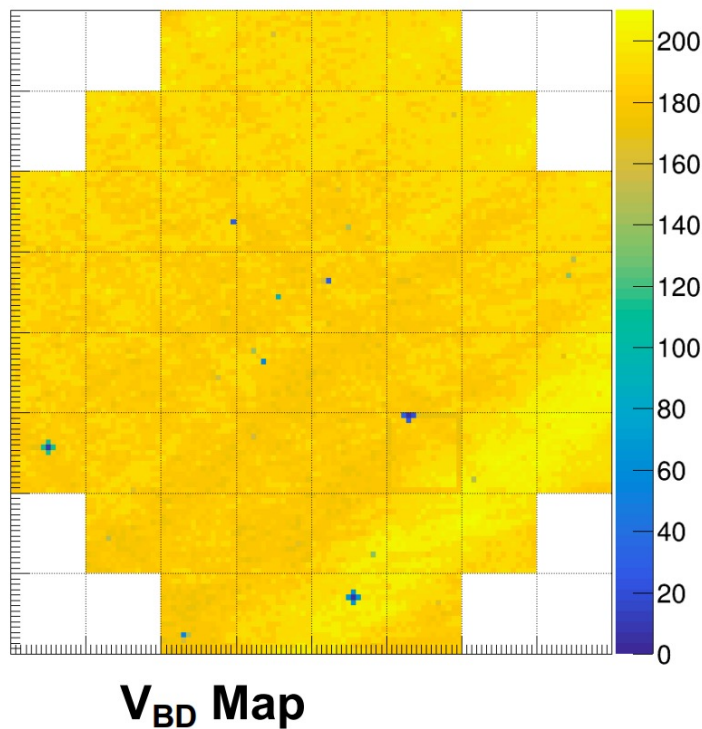
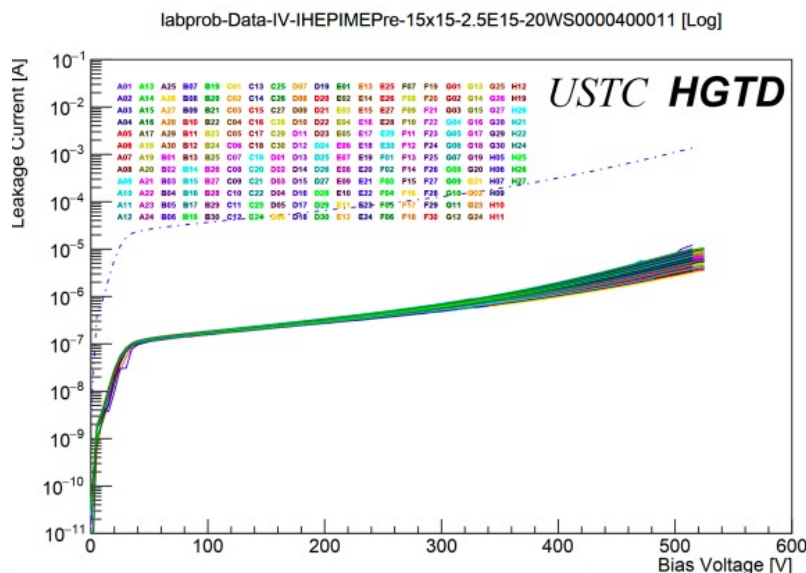


LGAD传感器的预量产

- 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

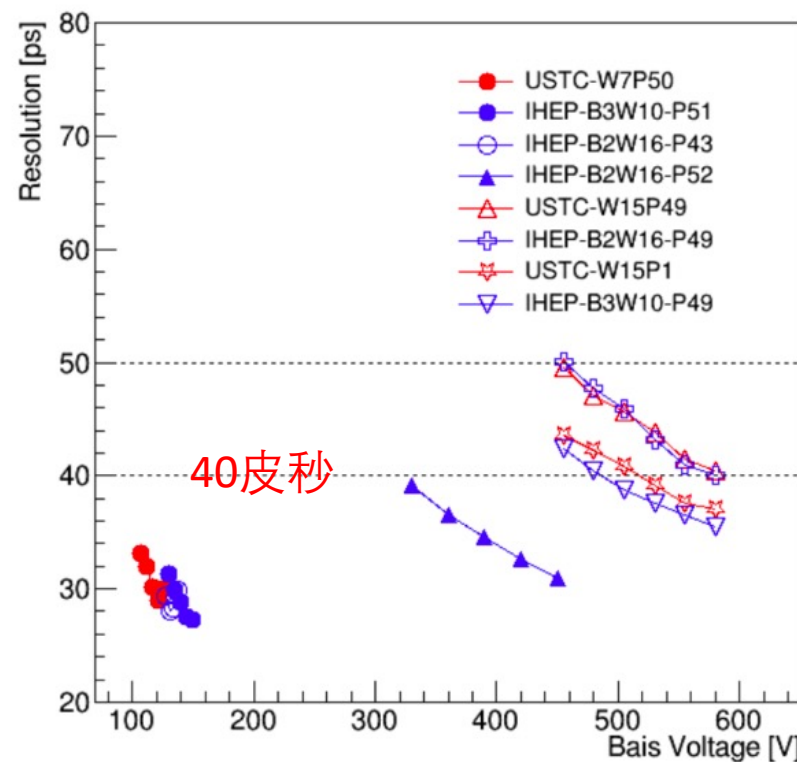
辐照后LGAD的漏电流与击穿电压

20WS0000400011@2.5E15 n_{eq}/cm²



辐照后LGAD的时间分辨率

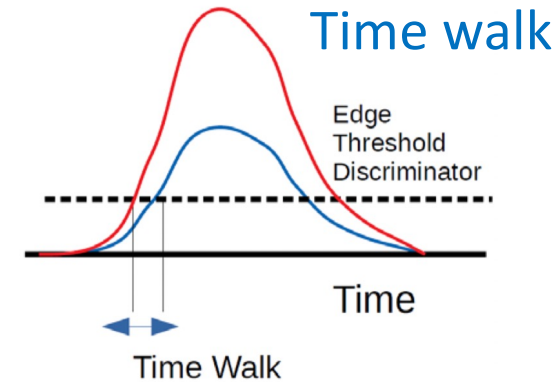
Time Resolution - HGTD TB June 2024



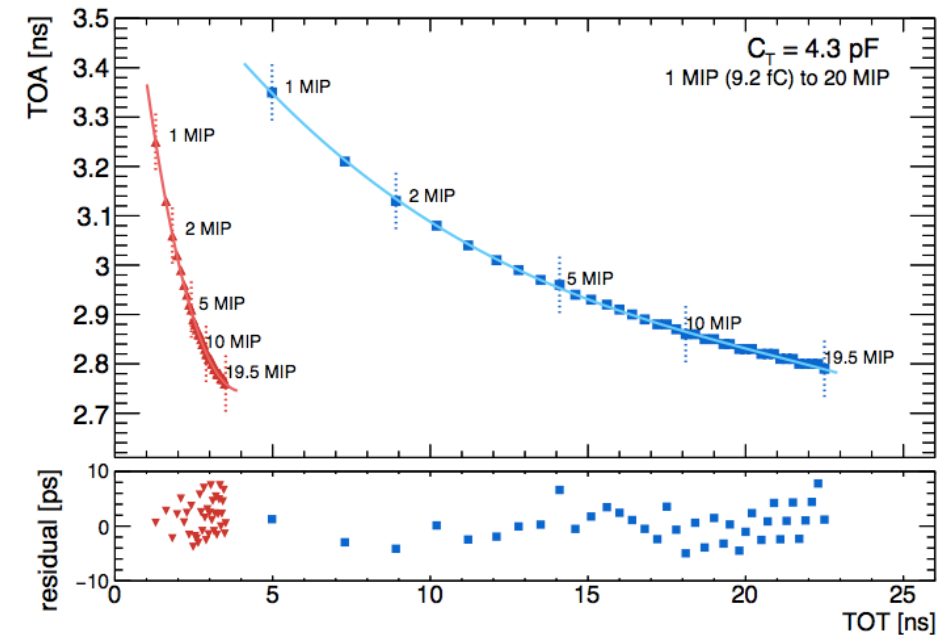
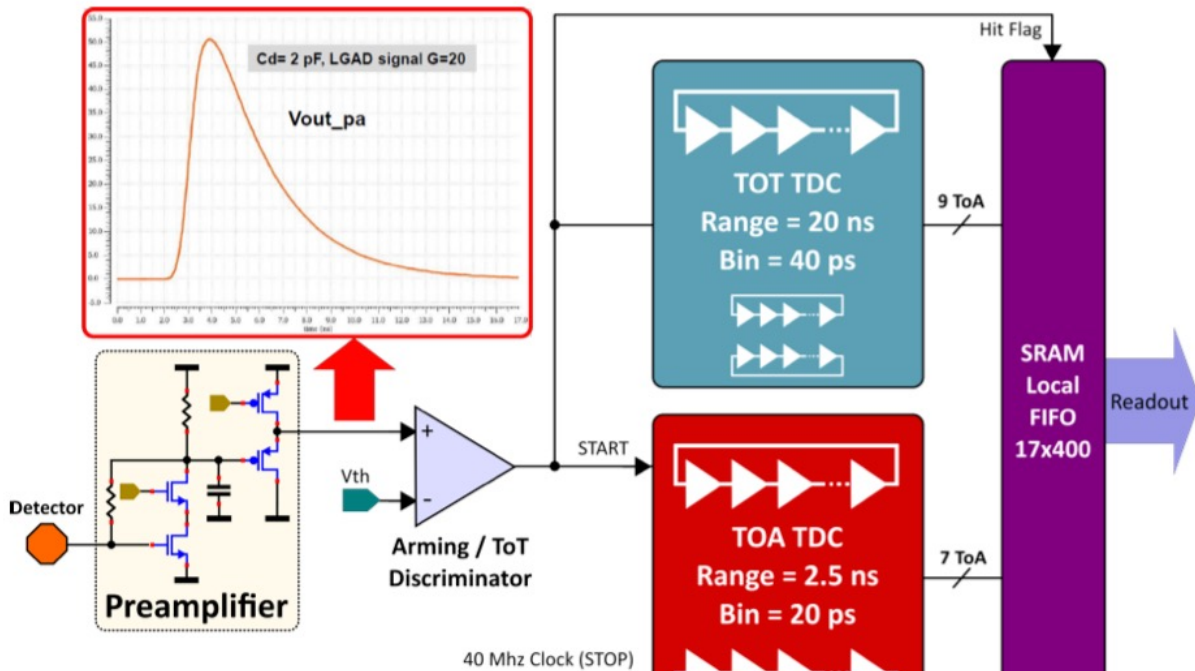
ALTIROC : 超快读出ASIC



- 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)



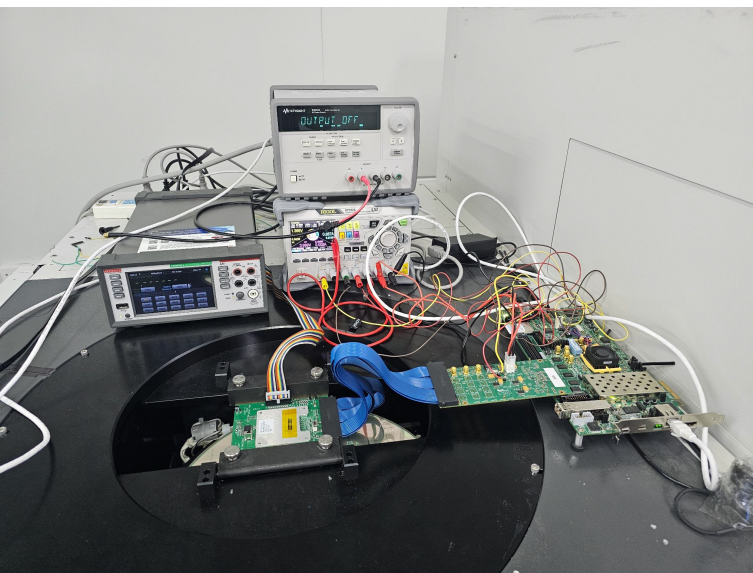
ALTIROC 芯片原理图



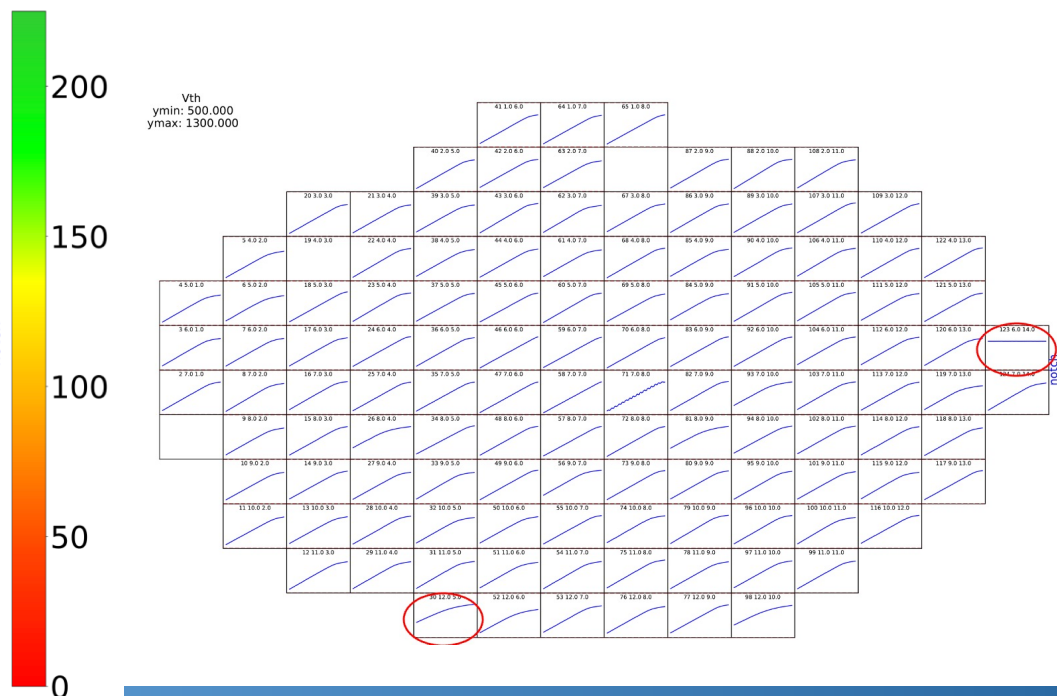
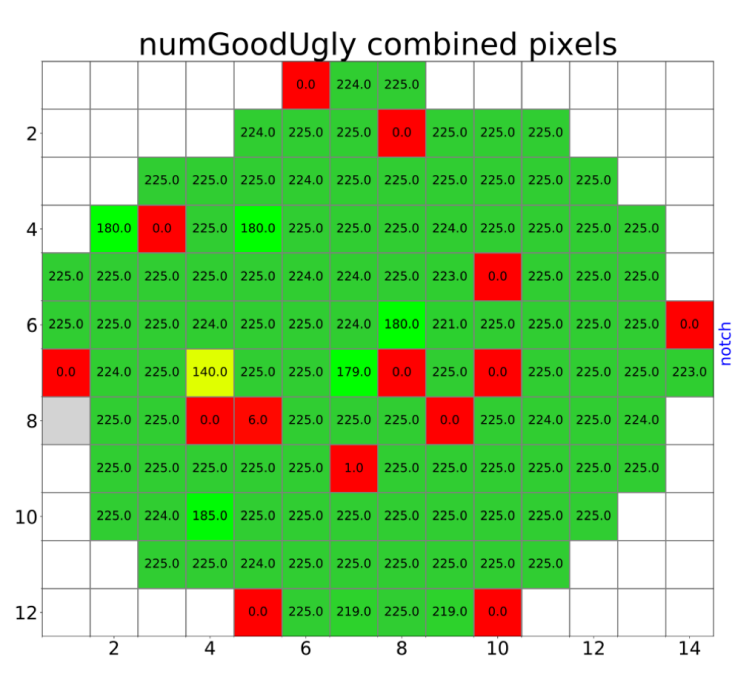
ALTIROC : 超快读出ASIC

- 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

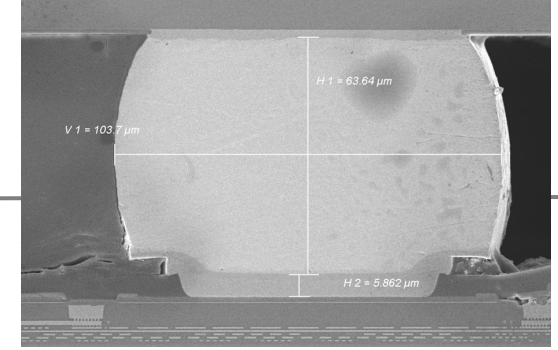


高能所首个晶圆级测试的结果 (yield >70%)

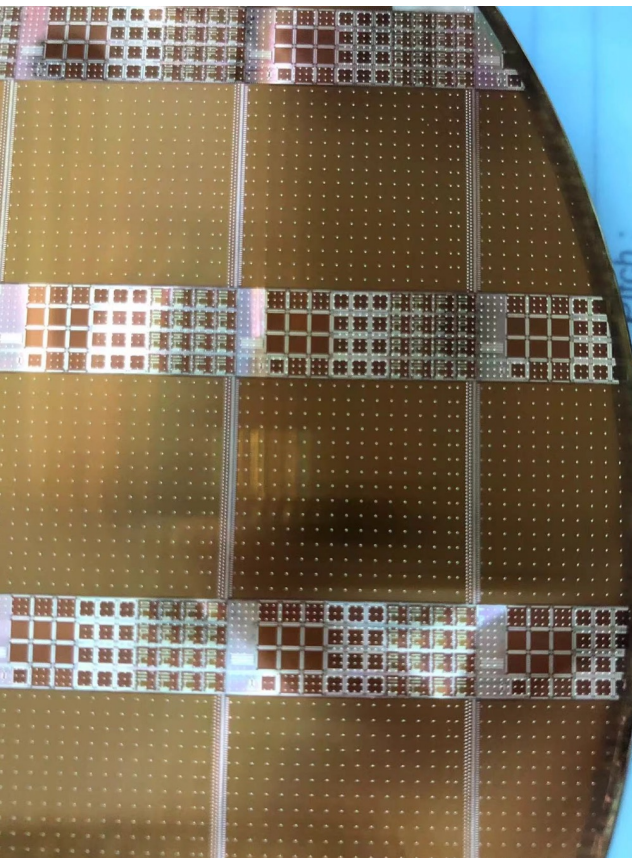


探测器模块：倒装焊封装

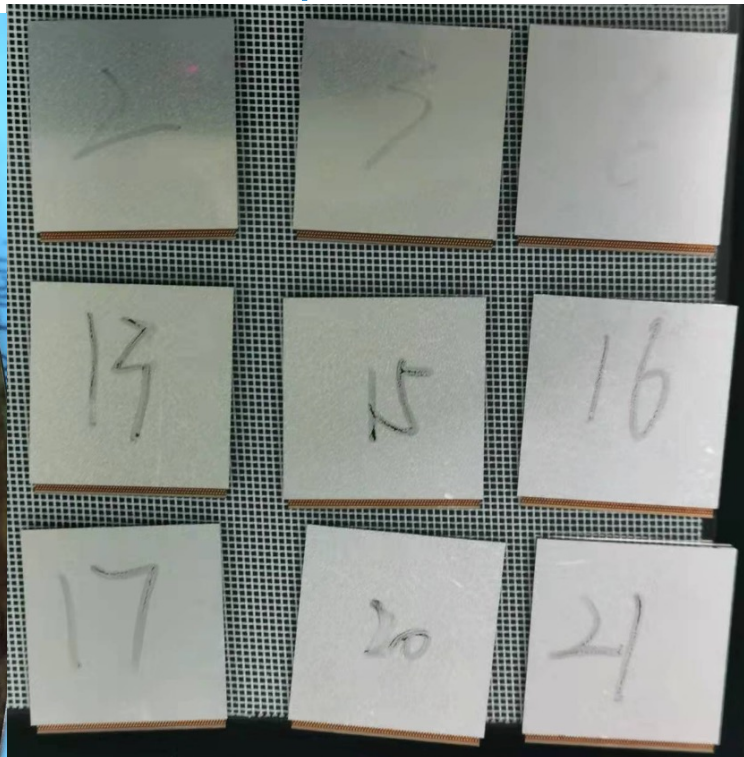
- 高能所承担项目中**50%的**倒装焊封装任务
- 高能所在国内已经研制出100多个倒装焊模块



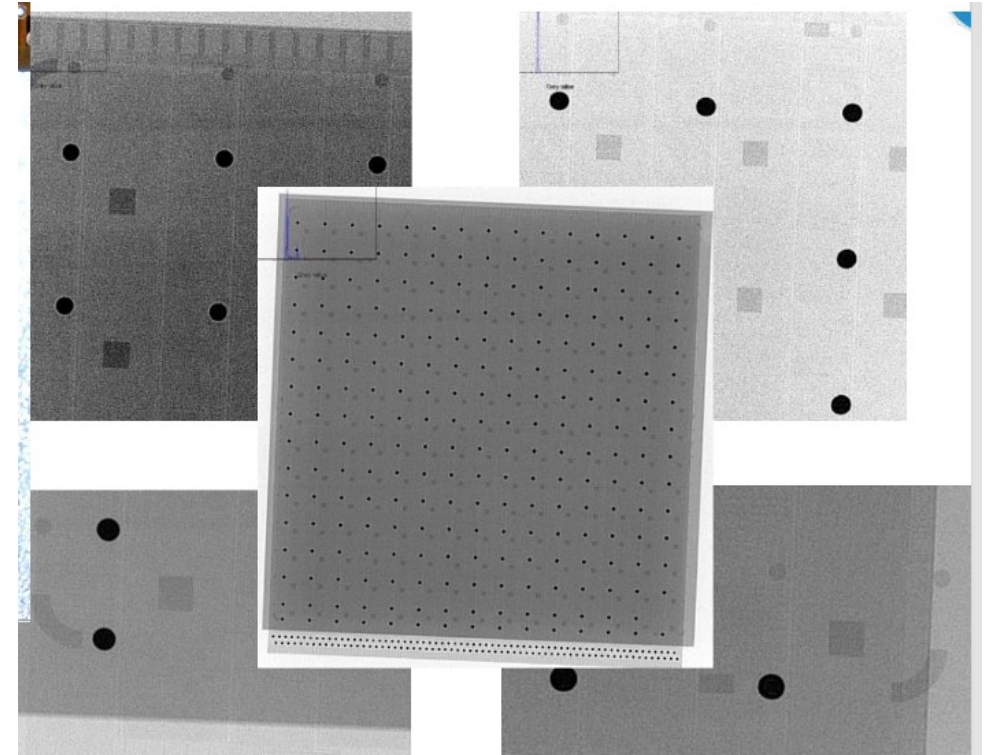
ALTIROC 芯片晶圆植球



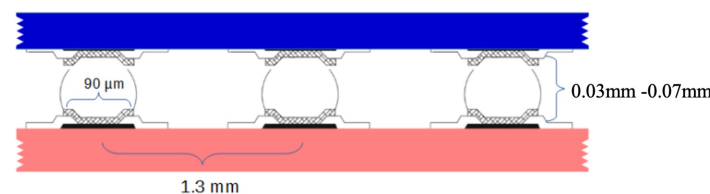
倒装焊模块后的模块



X-ray image of full-size hybrid

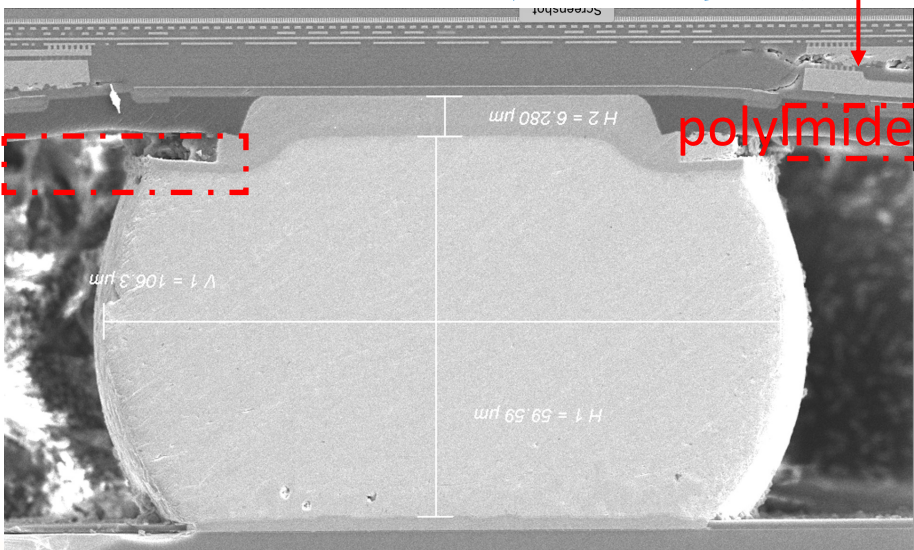


传感器与ASIC的倒装焊封装

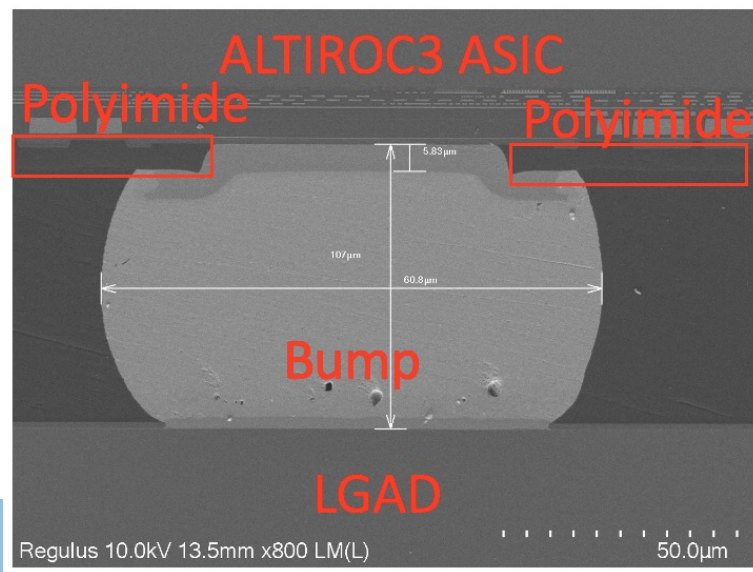


- 2023年末，HGTD项目遇到探测器模块的倒装焊热稳定性问题
 - -45度到40度热循环后，倒装焊脱落，ITK Pixel项目发现该问题，推迟LHC升级项目两年
 - HGTD探测器中，ASIC晶圆中台积电的polyimide保护层有问题（开窗尺寸与材质）
- 2024年，高能所攻关解决了HGTD探测器中的封装问题，通过CERN的评审
 - 用了更软的保护层材料吸收应力，使用更厚的LGAD传感器

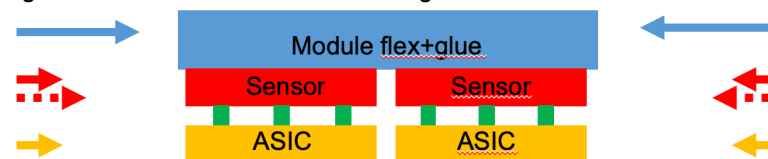
旧倒装焊 热循环后，应力导致芯片的开裂



新倒装焊

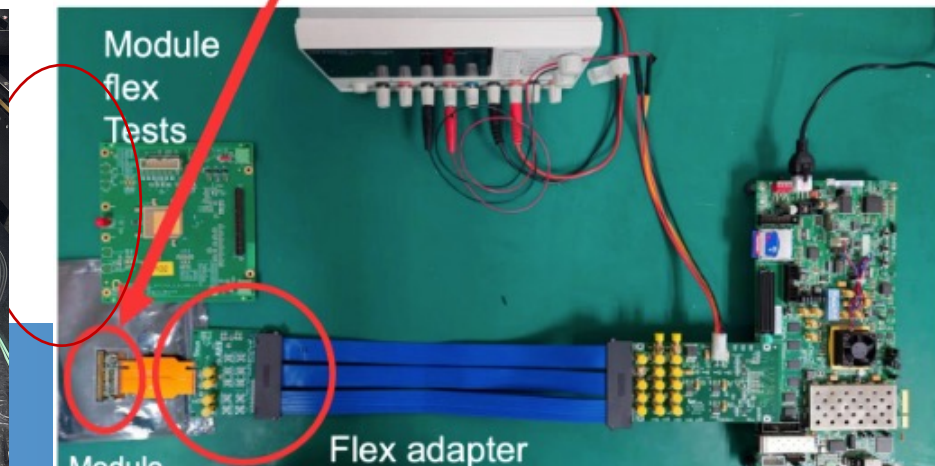
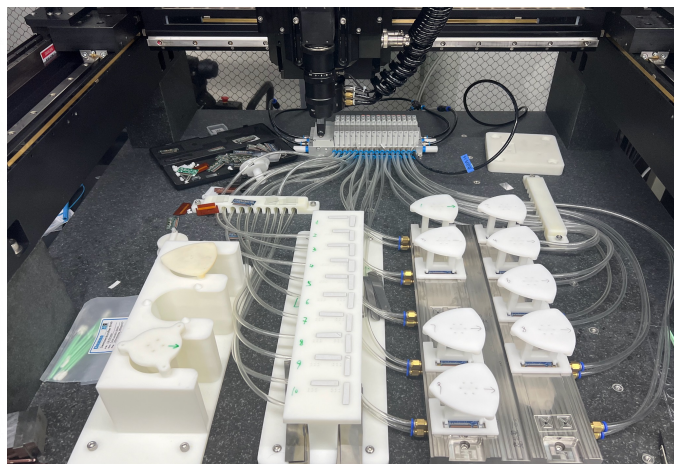
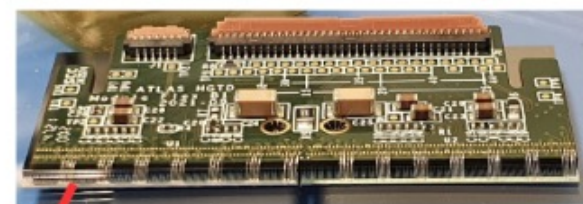
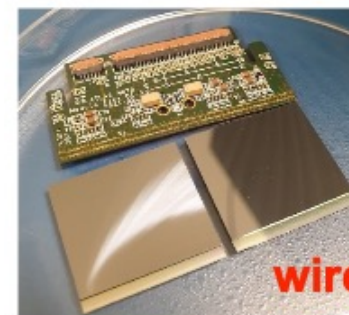
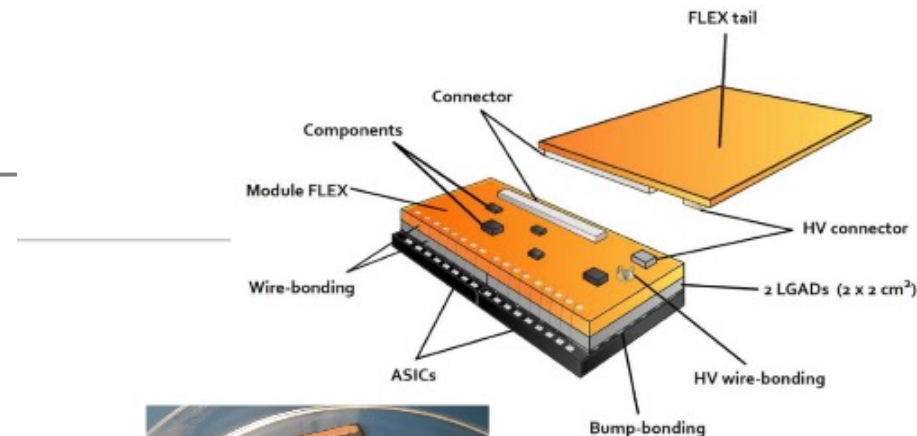


Consider low temperature (shrinking) situation
Length of arrow means deformation magnitude



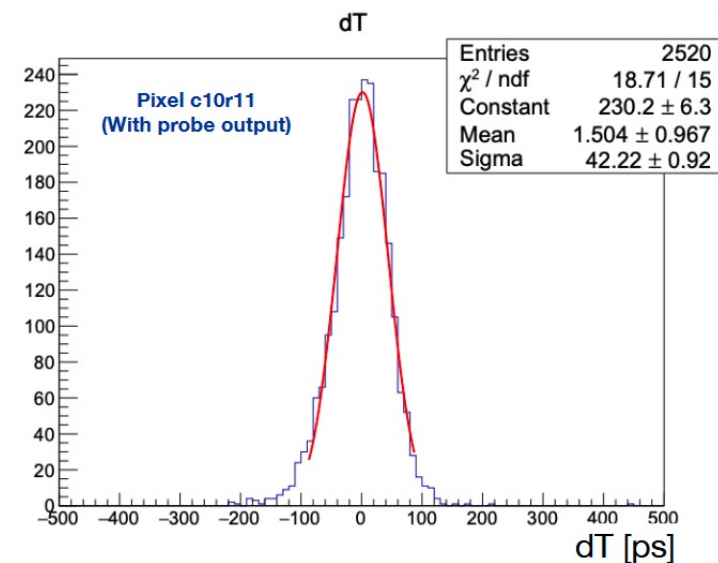
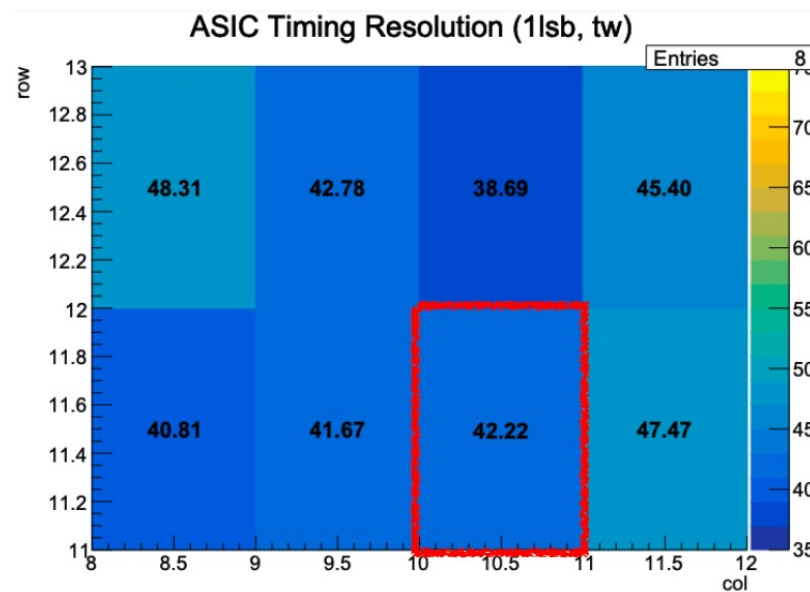
ATLAS时间探测器模块组装

- 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



探测器模块的束流测试

- 高能所组装的模块在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

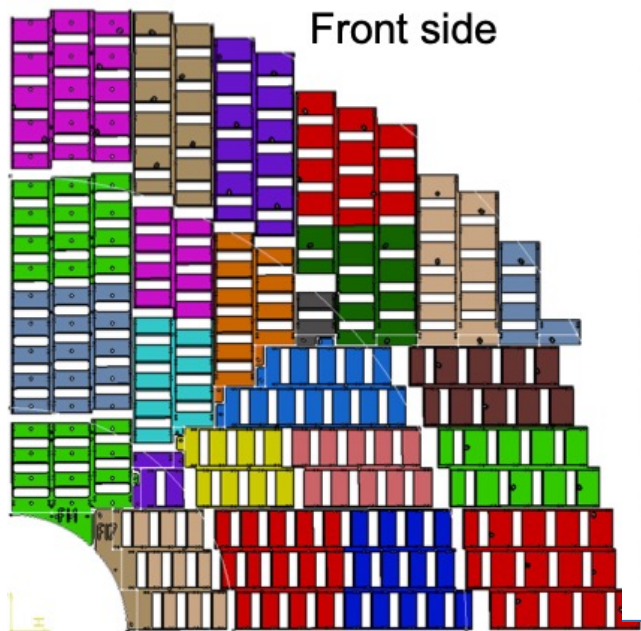


HGTD探测器单元

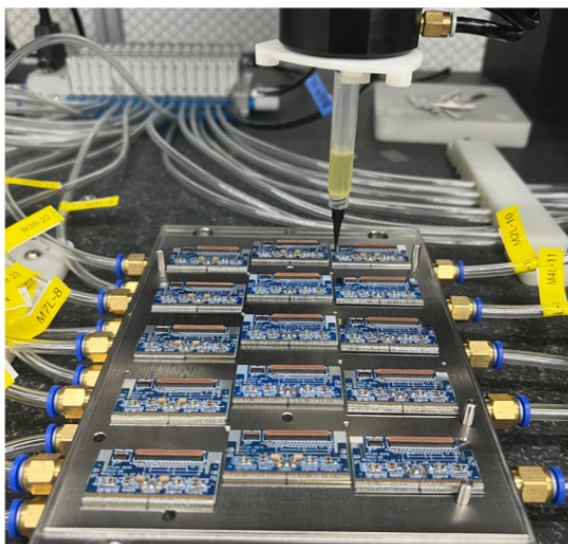
- 高能所研制项目首批两个ALTIROC3大面积探测器单元
 - 每个探测器单元有15个模块，约~500平方厘米面积。
 - 这两个探测器单元是HGTD项目首个大型系统级样机的重要组成部分

自动定位与点胶

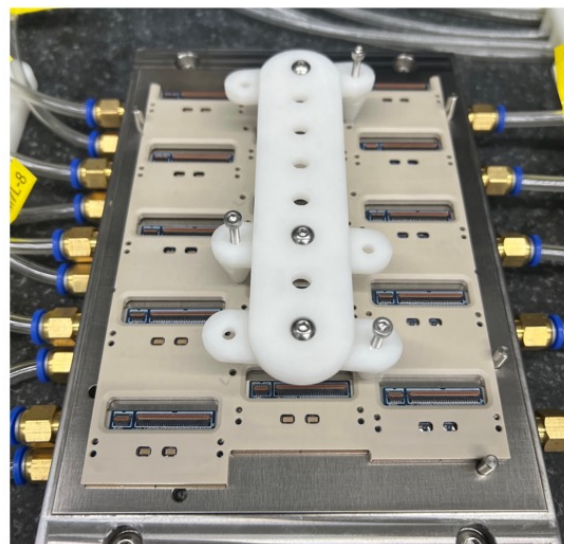
Front side



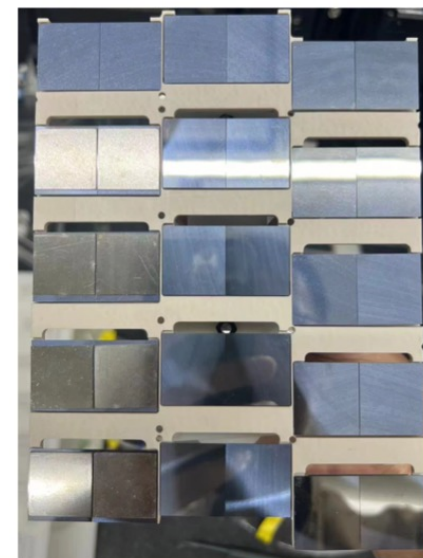
Dispensing with Gluing Tool



Put the support unit

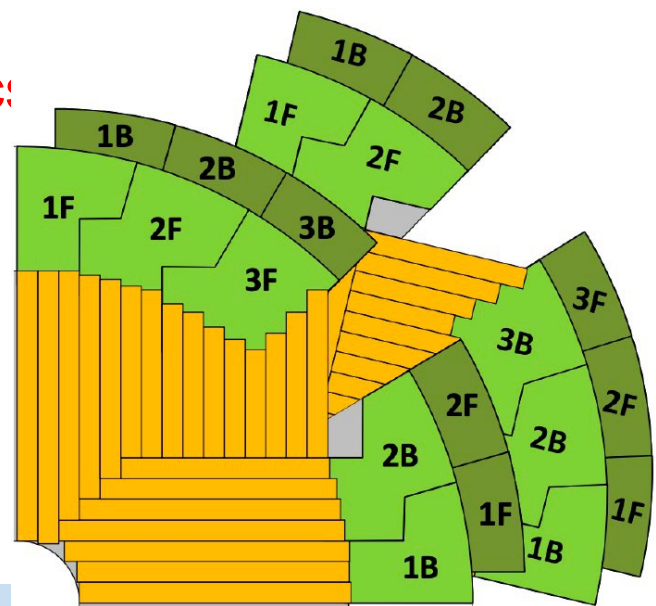
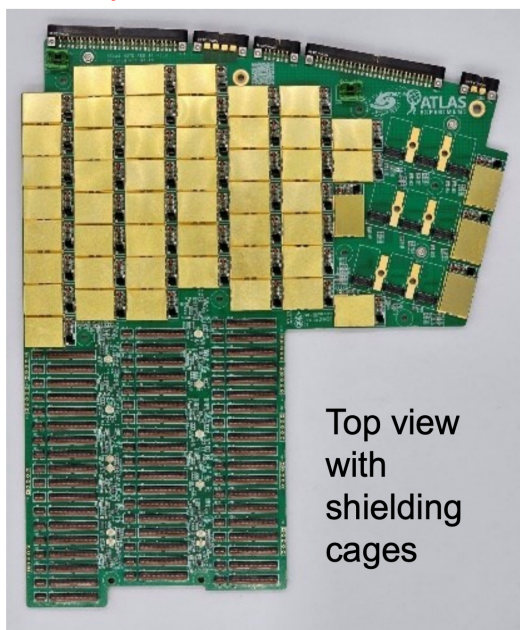


Backside view after removal

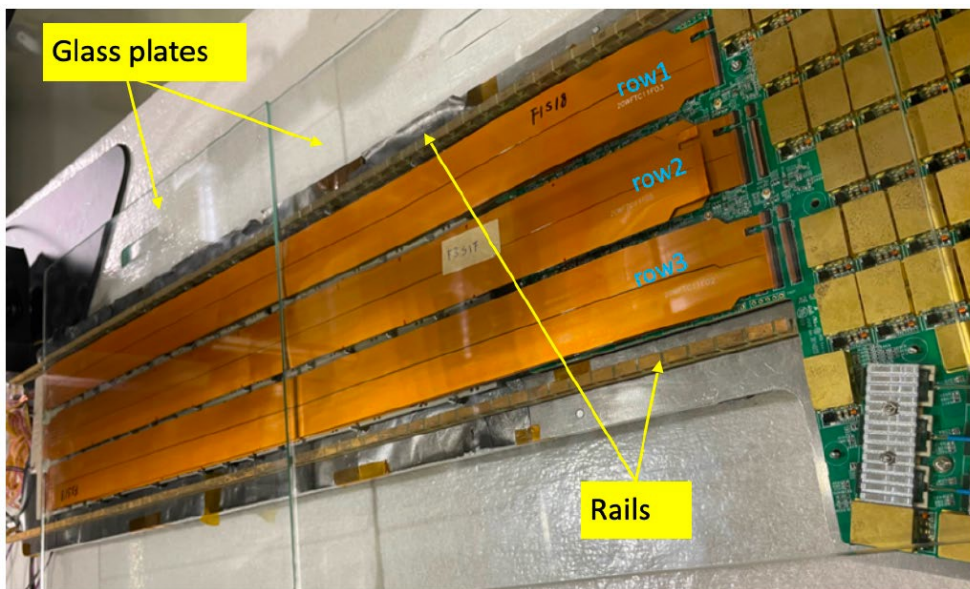


外围电路板

- 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
 - ❑ 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

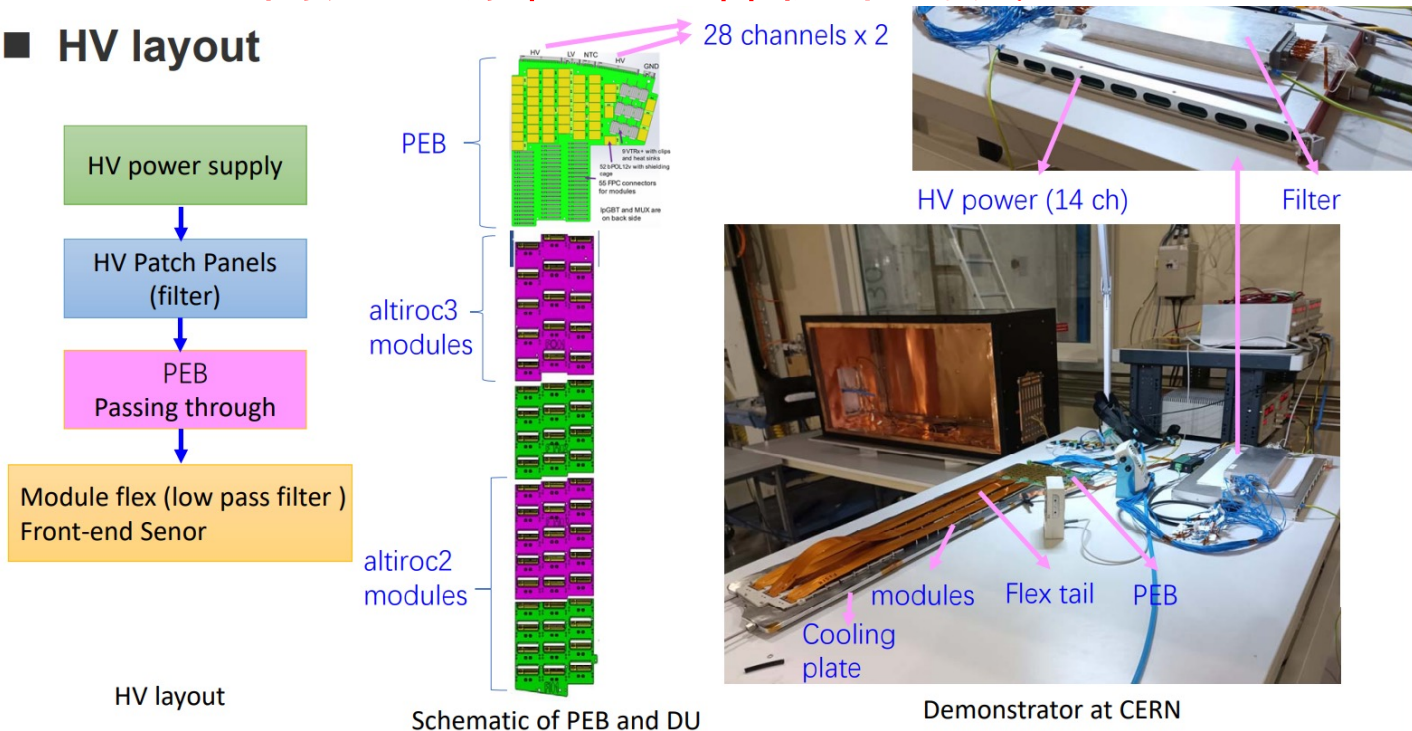


高压电源

- 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

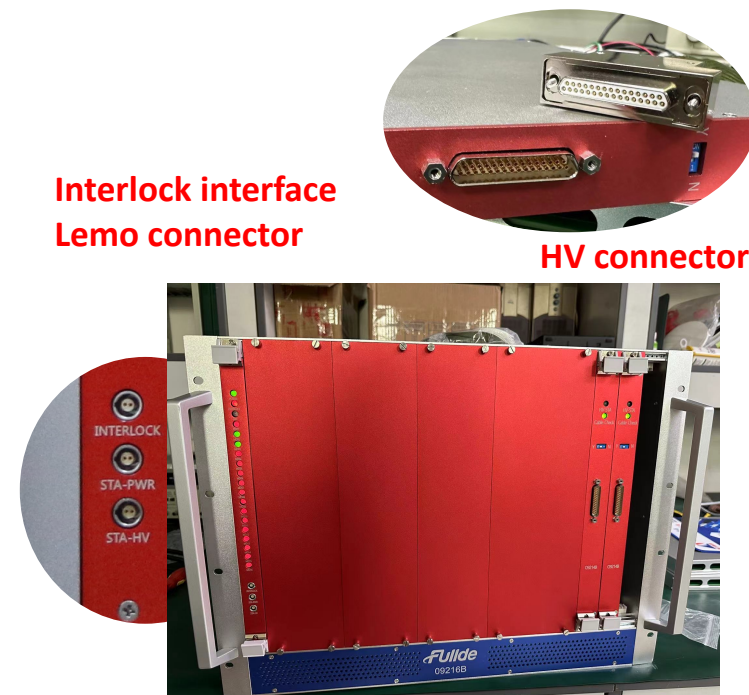
高压电源在工程样机中测试

■ HV layout



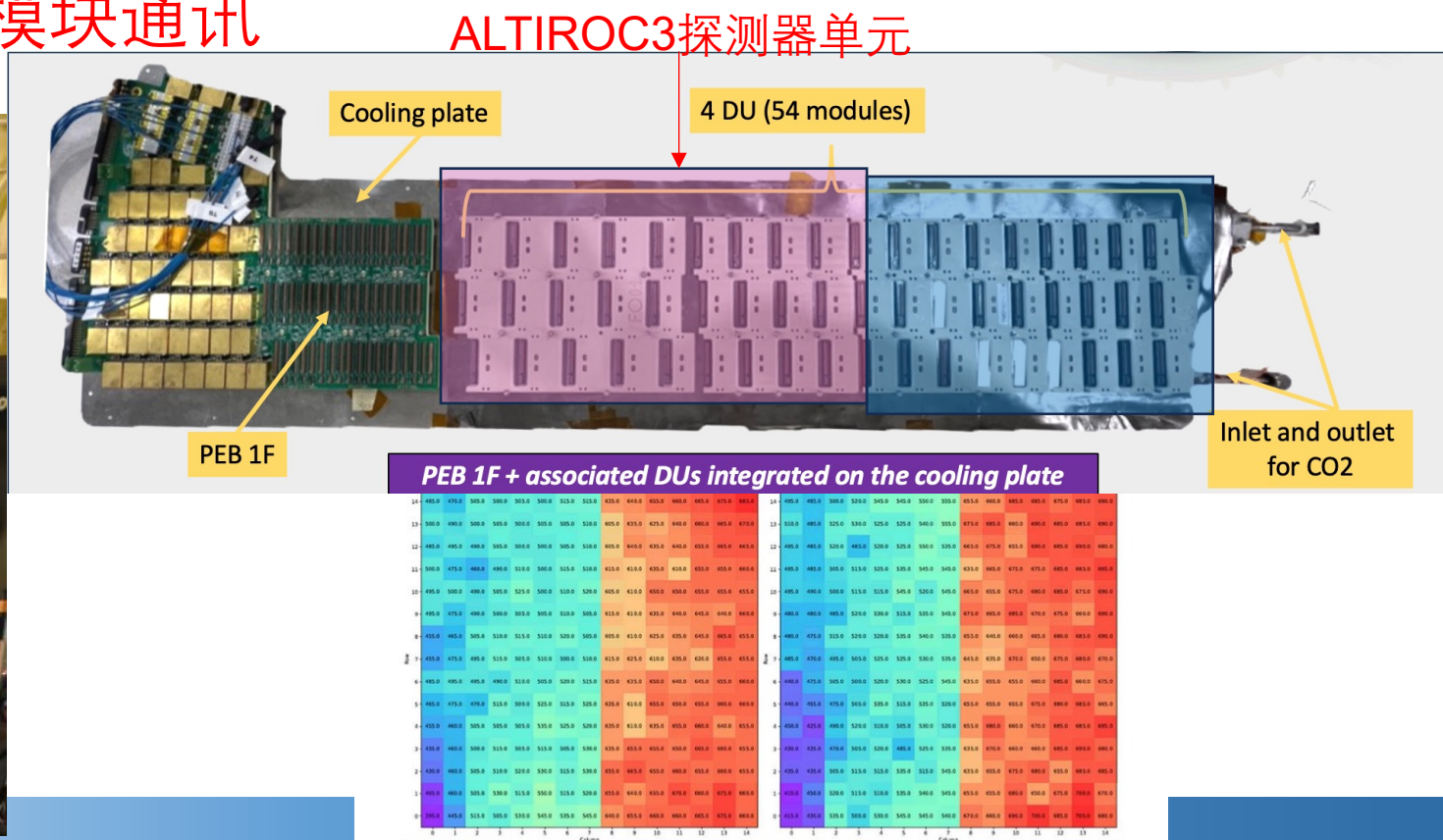
Interlock interface
Lemo connector

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