

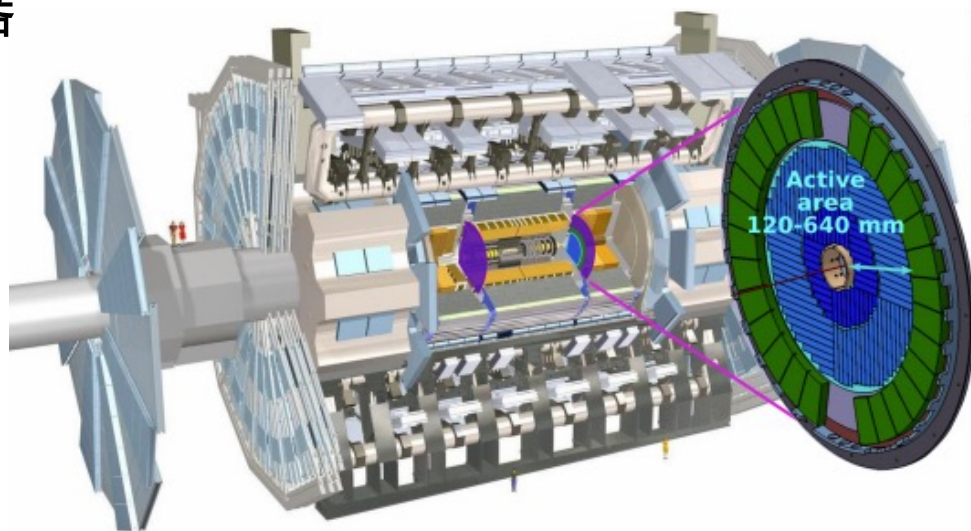
全国辐射探测微电子学术交流会 NME' 2021

ATLAS实验高颗粒度高时间分辨探测器

梁志均代表
高能物理研究所 HGTD团队

ATLAS高时间分辨探测器

- **目标:** 把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级
- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题, 项目于2020年底正式立项
 - **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 2.5×10^{15} neq/cm²的等效中子通量的辐照**
- 中国组在ATLAS超快探测器HGTD项目的贡献(MOU)
 - **>33%**的LGAD超快传感器
 - **45%**的探测器模块组装
 - **100%**的前端电路板
 - **50%**的ASIC芯片晶圆测试
 - **16%**高压系统



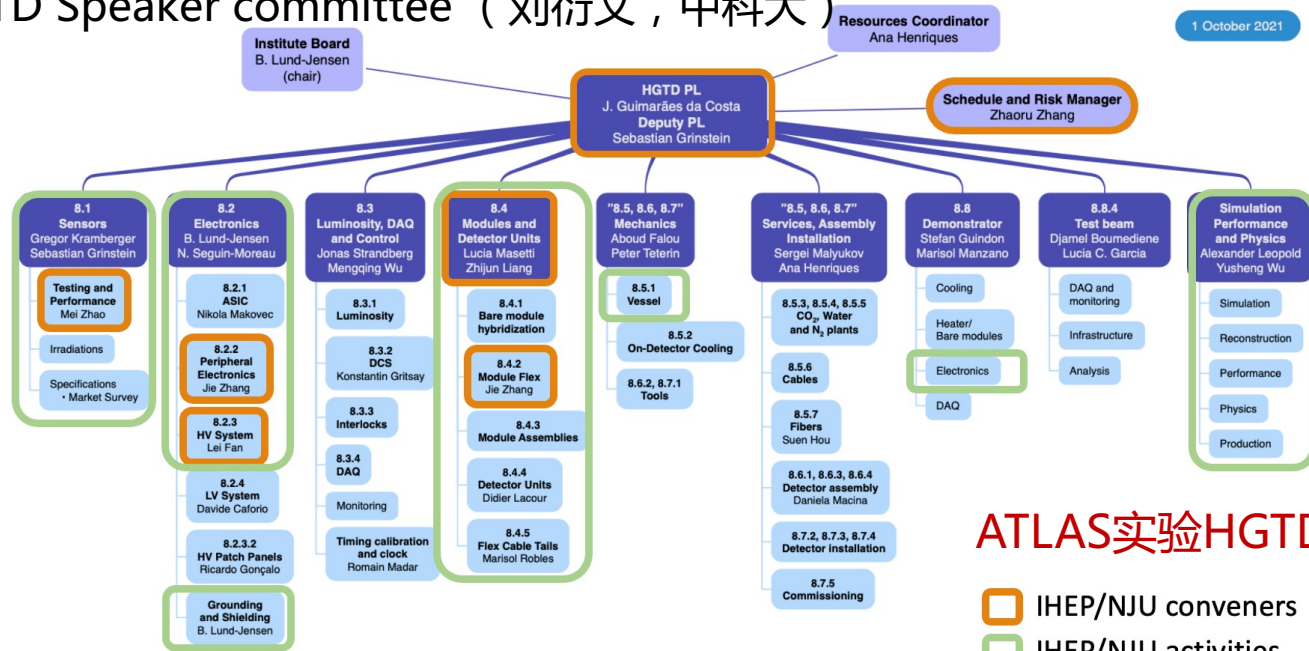
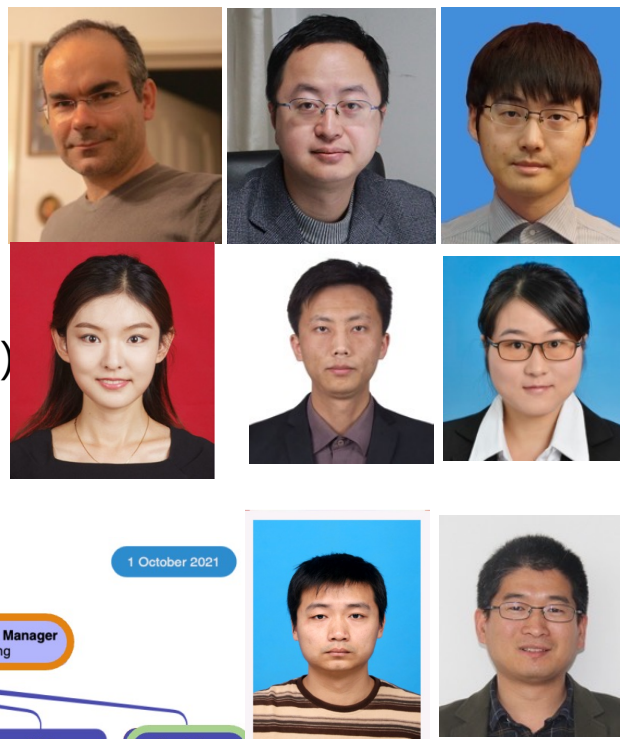
z position: ± 3.5 m

ATLAS高时间分辨探测器 – 中国组管理职务

中国组首次在ATLAS子探测器担任项目经理

中国组多名成员已经在HGTD项目的最高管理层中担任要职

- 项目经理 (Joao Guimaraes da Costa, 高能所)
- 探测器模块研制组Level-2召集人 (梁志均, 高能所)
- 探测器模拟与物理组Level-2 召集人 (吴雨生, 中科大)
- 项目进度与风险管理召集人(张照茹, 高能所)
- 外围电路组与模块柔性电路板Level-3召集人 (张杰, 高能所)
- 传感器测试Level-3召集人 (赵梅, 高能所)
- 高压系统Level-3召集人 (樊磊, 高能所)
- HGTD Speaker committee (刘衍文, 中科大)

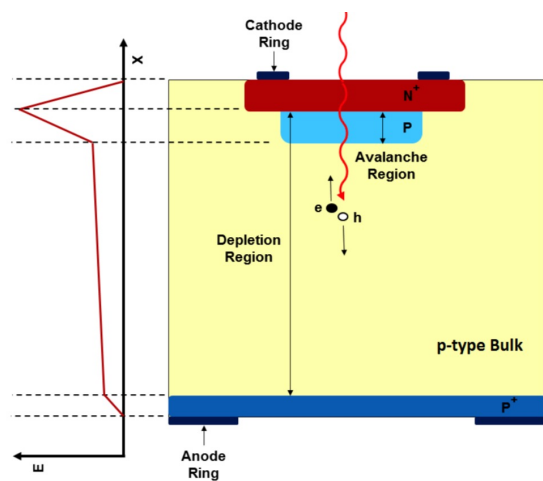


ATLAS实验HGTD项目管理层架构

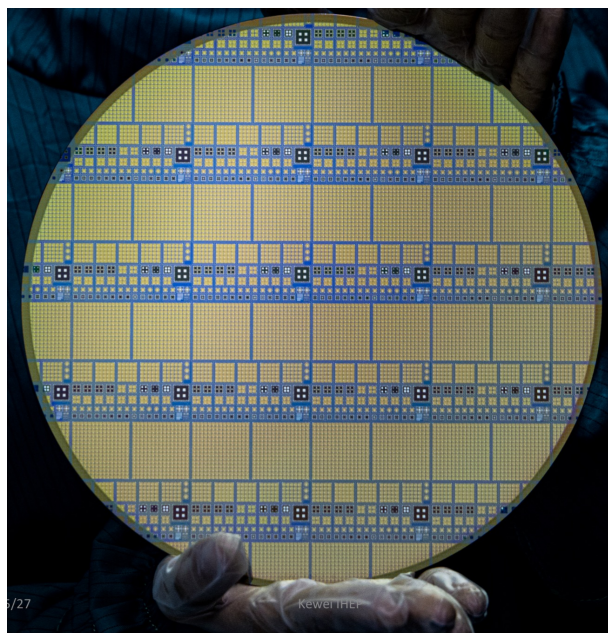
LGAD超快硅传感器的研制

- 先进性：对单粒子实现20-30皮秒时间分辨率，高颗粒度 (mm^2)
- 高能所研发出大面积国产LGAD超快传感器
 - 高能所负责版图设计，工艺设计，测试，微电子所流片
 - 全尺寸15*15像素阵列，单像素成品率 99.3%，一致性好
 - 计划为ATLAS提供7000个全尺寸国产传感器 (>项目33%)

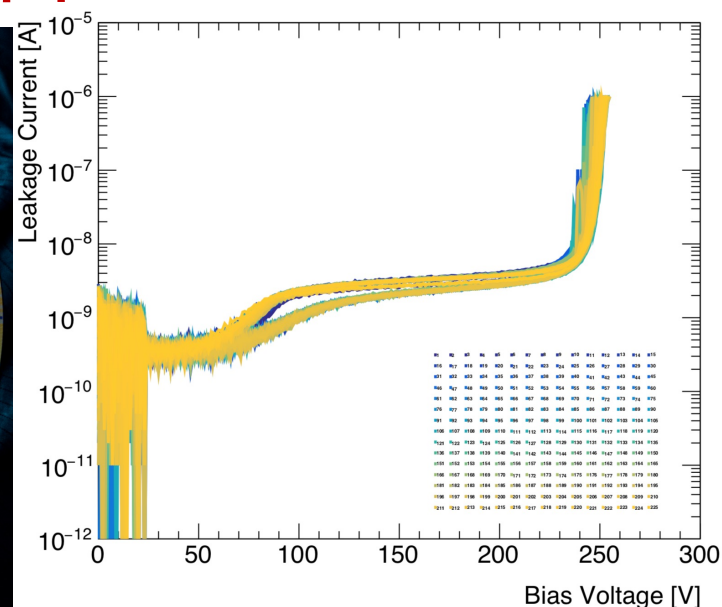
超快传感器原理



IHEP国产传感器晶圆



传感器一致性好



抗辐照超快LGAD硅传感器的研发

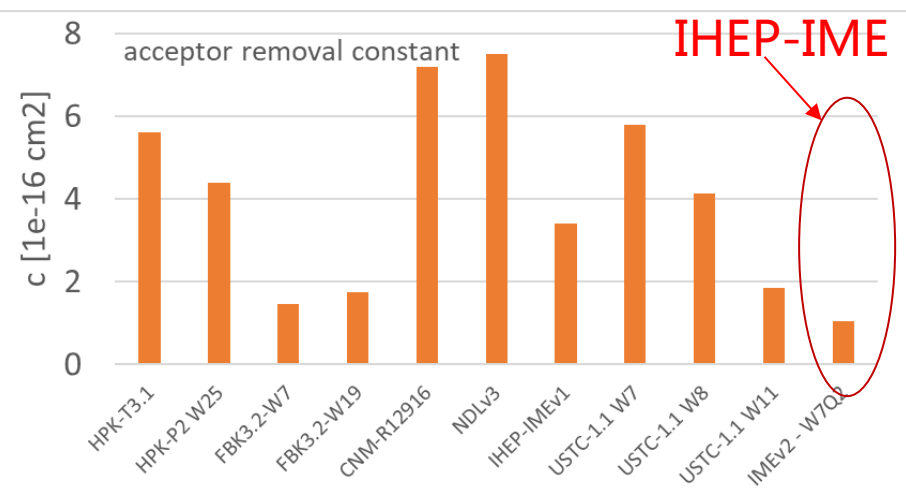
- 新挑战：辐照后的LGAD在高电压下 ($>600\text{V}$)，出现单粒子击穿
 - 高能所IHEP-IME传感器通过优化掺碳方案
 - 得到目前最低的硼移除速率
 - 最高的LGAD抗辐照性能
 - 辐照后降低工作电压，避免击穿
- 单粒子击穿的照片
-

单粒子击穿的照片

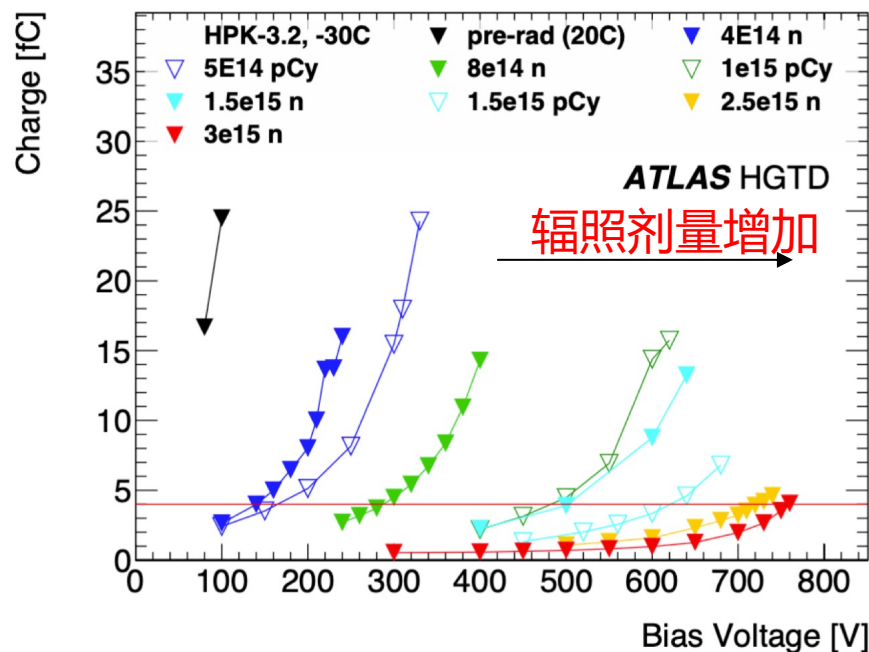


各国LGAD的硼移除速率

高能所LGAD得到最低硼移除率



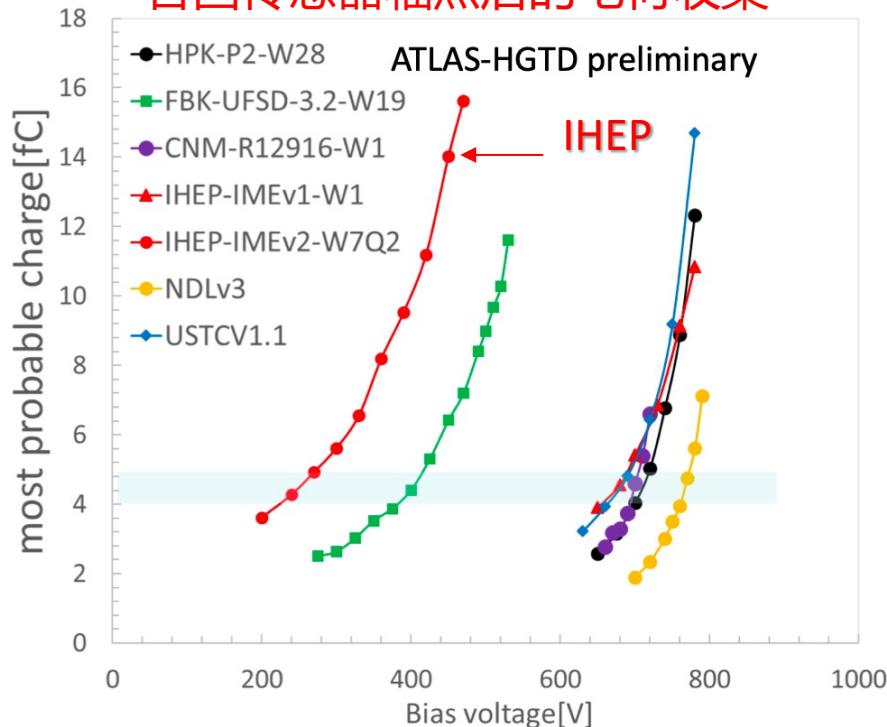
日本滨松的LGAD传感器的电荷收集



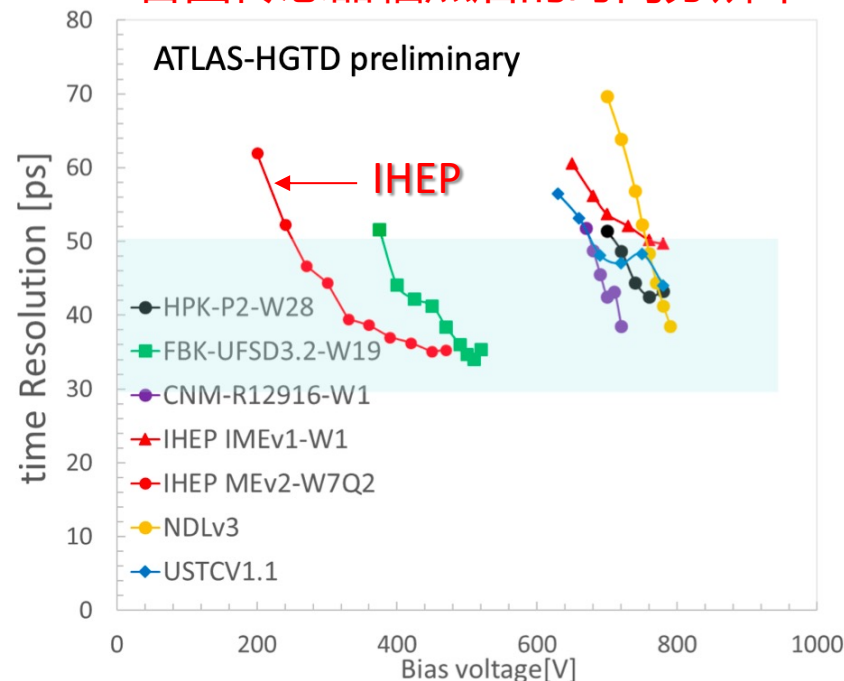
抗辐照超快LGAD硅传感器的研发

- 中国组与日本滨松、意大利竞争ATLAS的订单
- 高能所传感器得到目前最佳LGAD抗辐照性能
 - 辐照后，可以工作在300V左右（收集电荷到4fC以上）
 - 远远低于单粒子击穿效应发生的危险电压600V
 - 在CERN 高流强质子的测试中，8个传感器都没有击穿

各国传感器辐照后的电荷收集



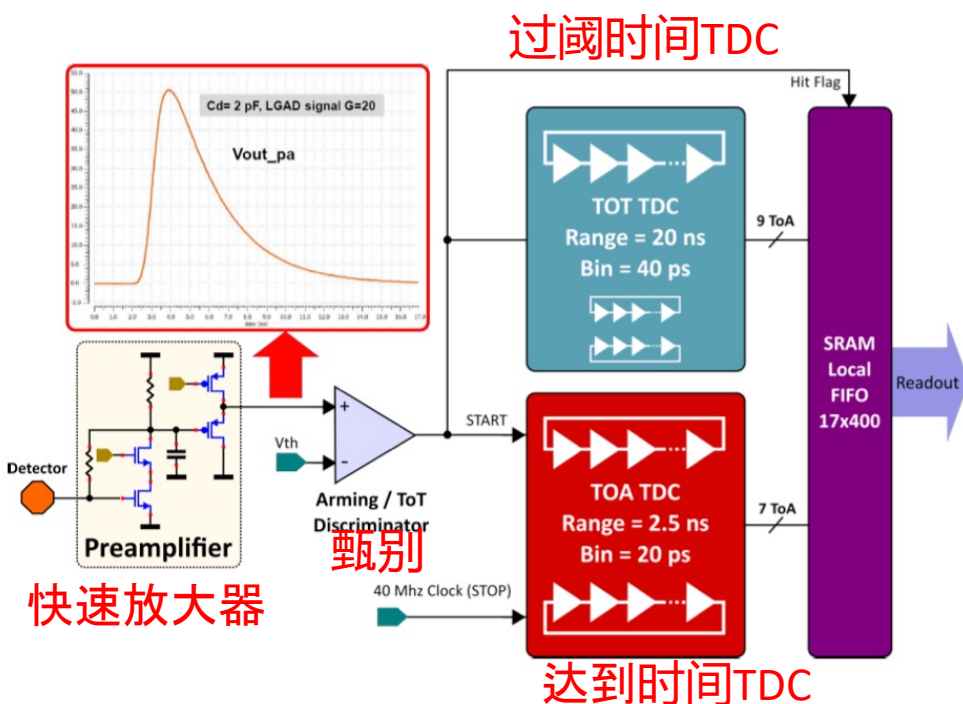
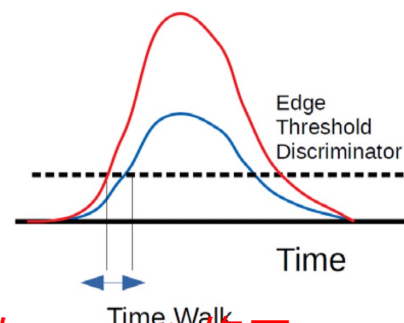
各国传感器辐照后的时间分辨率



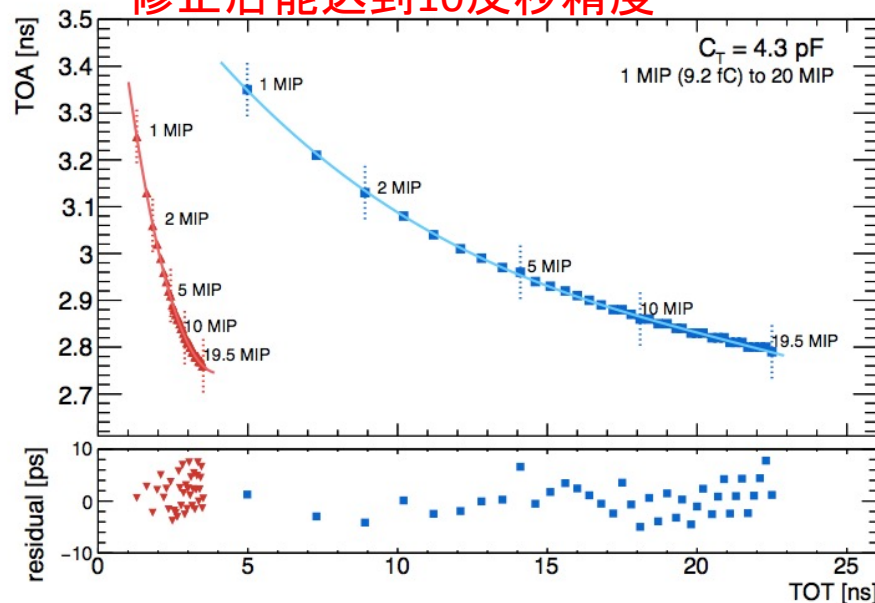
The effect of the C-enrichment is clearly very beneficial and allows the sensors to be operated at much smaller voltages – a critical point due to HV stability in the particle beam

超快ASIC读出芯片：ALTIROC芯片

- ALTIROC芯片（法国，西班牙，CERN，美国，中国合作研发）：
 - 低功耗，没有ADC，只用TDC，记录到达时间与过阈时间
 - 时间分辨率10皮秒量级的ASIC读出芯片
 - 能承受200 Mrad电离辐照剂量



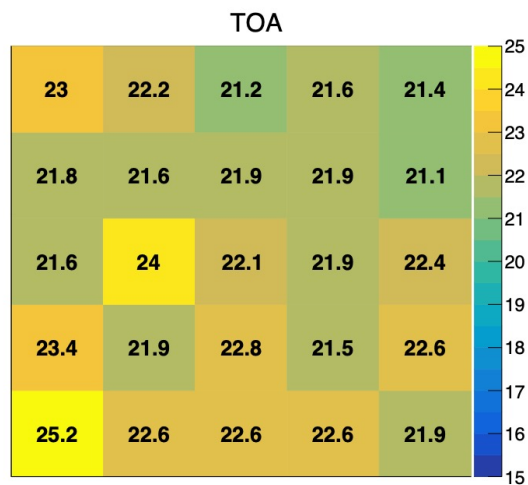
通过过阈时间来做time talk 修正
修正后能达到10皮秒精度



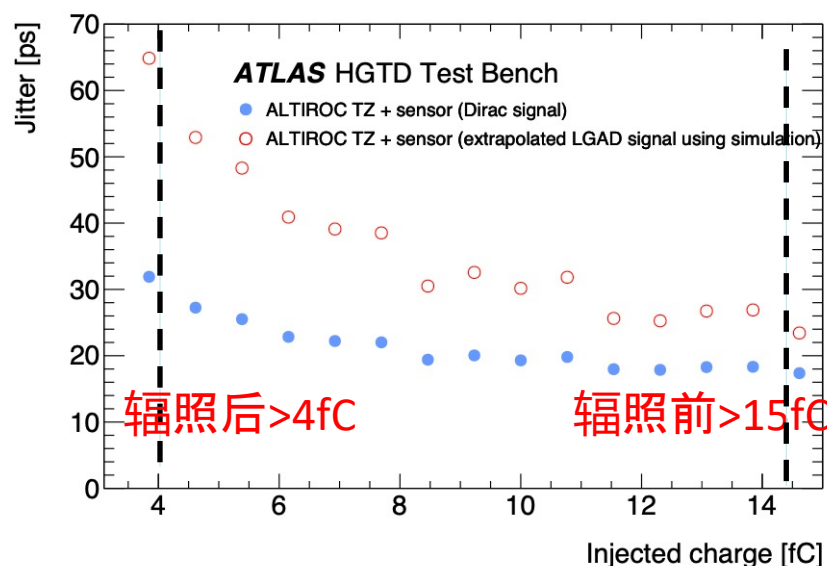
超快ASIC读出芯片

- 中国组承担ASIC的50%晶圆级测试任务，与抗辐照测试任务。
 - 高能所完成ALTIROC1芯片的测试任务
 - 开始ALTIROC2芯片测试，并开发晶圆级测试系统

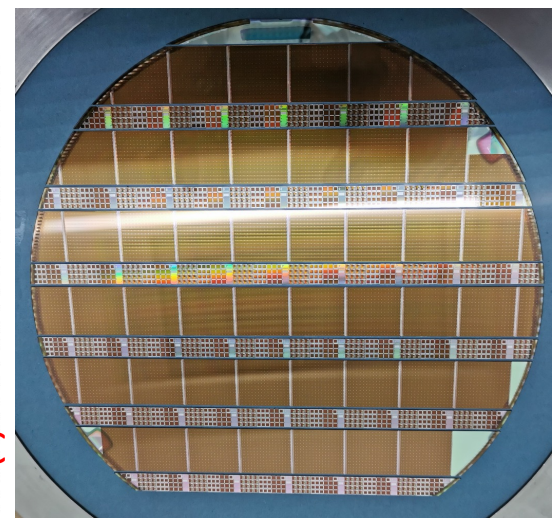
ALTIROC1芯片
25通道TDC的均匀性测试



ALTIROC1 ASIC芯片测试
注入电荷 vs 时间抖动(jitter)

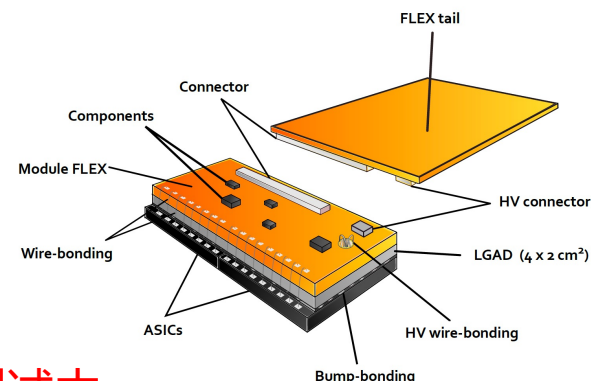


ALTIROC2 超快读出芯片
TSMC 130nm

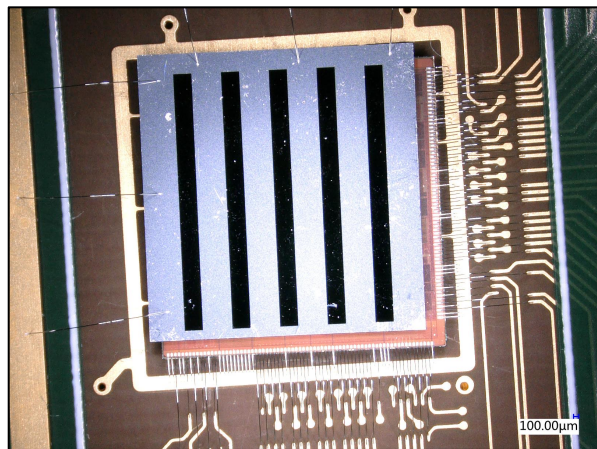
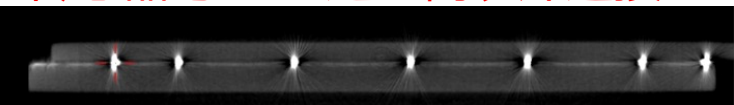


HGTD探测器模块

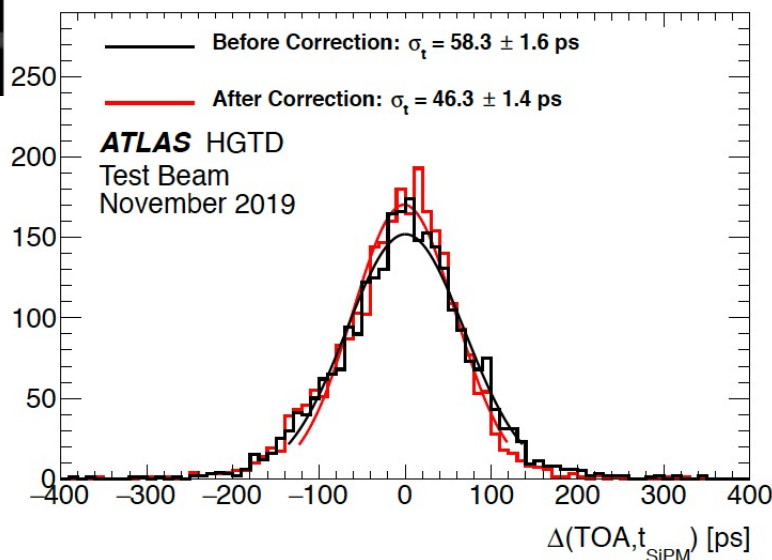
- 中国组将组装 ~ 4000 个探测器模块，占项目 45%
- 高能所研制出首批小面积模块，时间分辨率达到46皮秒
- 高能所团队设计探测器模块的柔性电路板
- 高能所团队研制模块自动组装系统
 - 计划每天组装10个模块



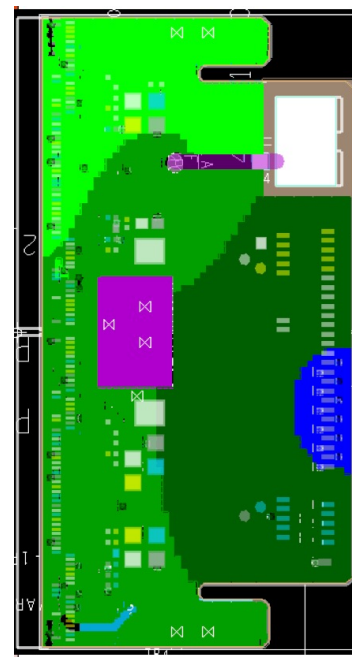
高能所研制探测器模块
传感器与ASIC通过倒装焊连接



高能所组装模块在束流测试中
达到46皮秒的时间分辨率

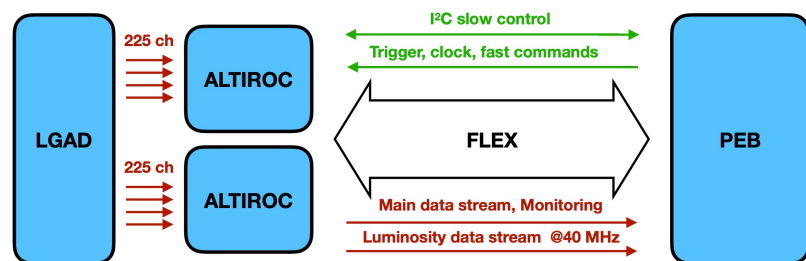


柔性电路板设计

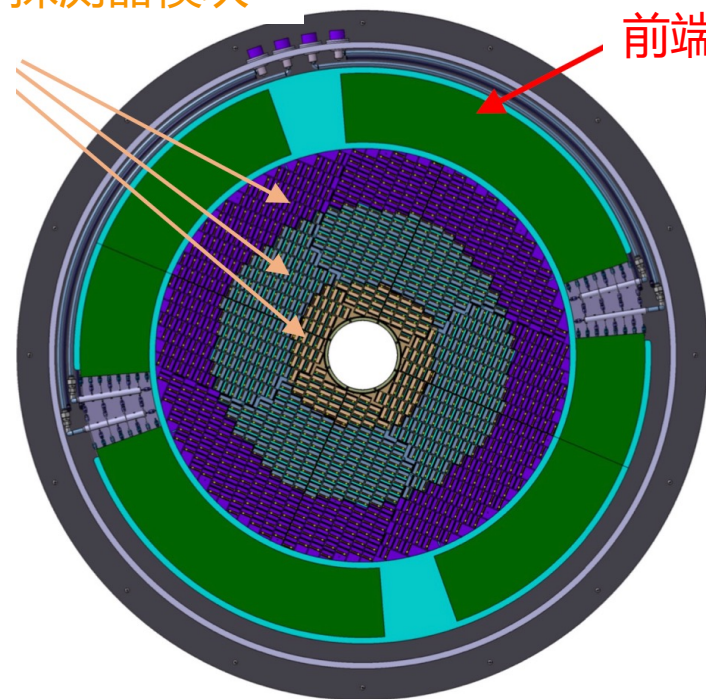


前端读出电路板

- 中国组负责100%的前端读出电路板研制工作
- 高能所与南大主导了外围电路板的设计与研制工作
 - 研制出电路板读出系统原型机。
 - 可以同时读出14个探测器模块

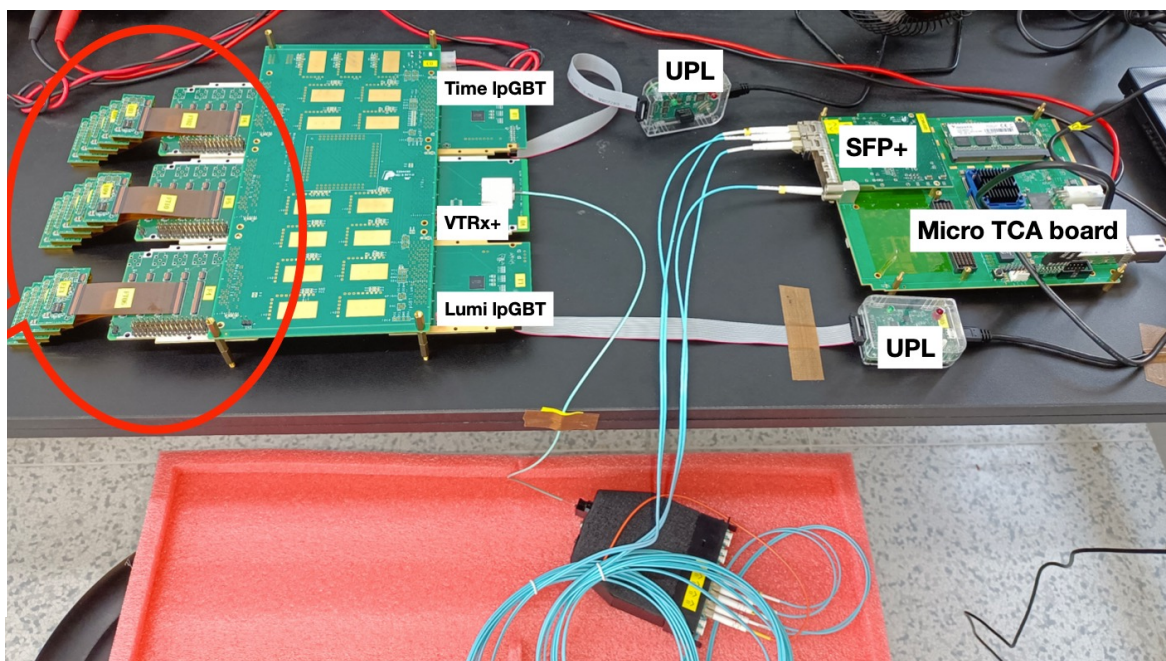


探测器模块



前端读出电路板

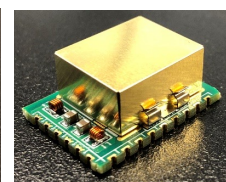
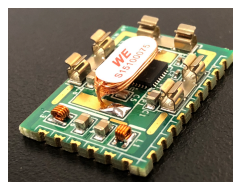
前端读出电路板原型机



前端读出电路板

➤ 开始了测试前端读出板的各种芯片与制作测试板

- IpGBT (Low Power Giga Bit Transceiver) : 抗辐照高速通信芯片
- VTRX (Optical Link for Data Transmission) : 抗辐照光通信模块
 - 测试了2.56G/10.24G communication, 误码率 $<10e-12$
- MUX64 : 64路选通芯片

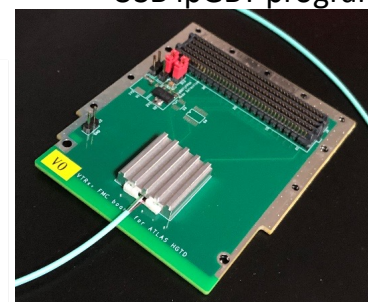


DC/DC converter

USB IpGBT programmer



IpGBT eval. board

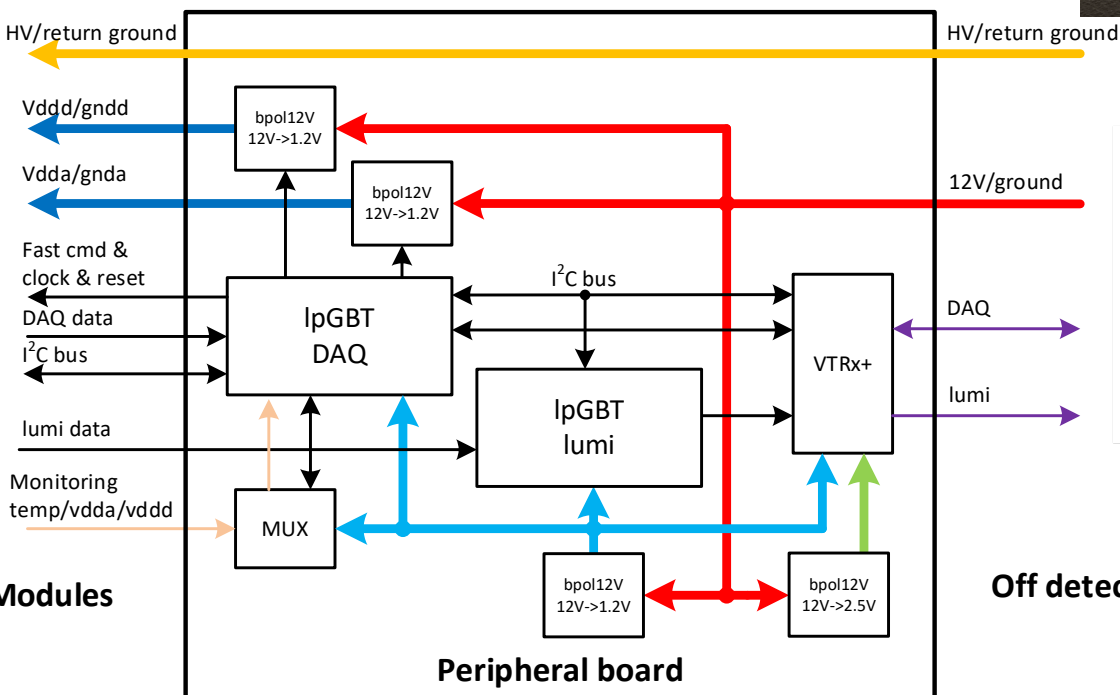


VTRx+ eval. board

Off detector



MUX64 in QFN88



Modules

Peripheral board

总结

- 中国组在项目中占**主导地位**，担任**项目经理**等多个领导职务。
- 传感器：高能所自主研发国产超快硅传感器，获得重大进展
 - 高能所传感器，得到目前**最佳抗辐照性能**；
 - 时间分辨达到**35皮秒@300V**，**低电压避免了单粒子效应**
- 外围电路：
 - 高能所，南大主导了外围电路板的设计与研制工作
 - **研制出电路板读出系统原型机。**
- 探测器模块：
 - 中国组主导模块研制，中国组将组装~4000个模块，**占项目45%**
- ASIC超快读出芯片：
 - 中国组承担ASIC的50%晶圆级测试任务，与抗辐照测试任务。