

# 应用于ATLAS HGTD 项目的LGAD探测器 辐照性能研究

中科院高能所  
赵梅

第三届全国辐射探测微电子学术交流会（NME'2023）

2023-10-22



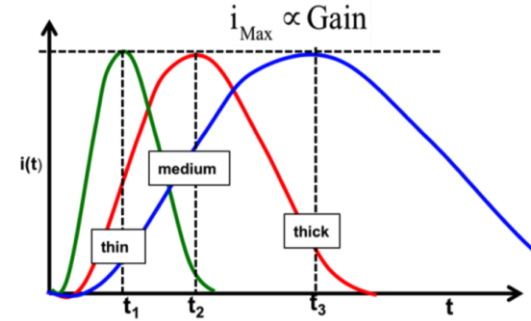
# 低增益雪崩二极管

➤ 低增益雪崩二极管: Low Gain Avalanche Detectors(LGAD)

➤ 工作在击穿电压之下 (线性区), 增益>10, 具有良好的时间分辨特性(<30ps)

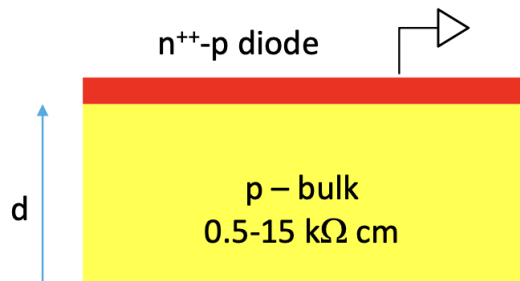
- 相比于普通的PIN器件, 在P和N之间多了一层额外的增益区
- 与APD 和 SiPM比较, LGAD具有适中的增益 (10-50)

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



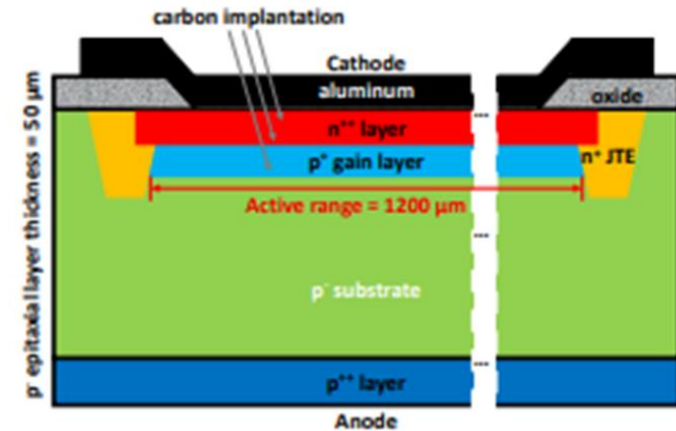
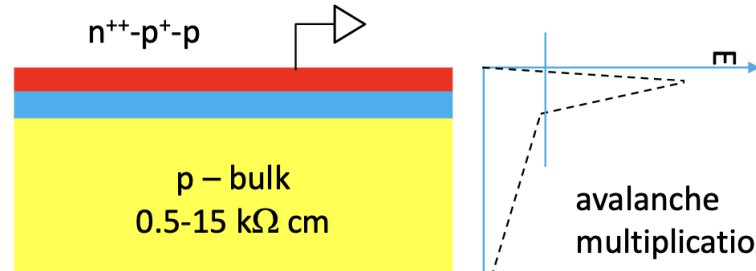
$$\sigma_{jitter}^2 = \left( \frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$

## 一般的 PIN结探测器



## 低增益雪崩硅探测器

P+ gain layer on top of PIN diode



# LGAD探测器研究背景

## ➤ 欧洲大型强子对撞机高亮度II期升级: ATLAS 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→30ps)

- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题

6.4m<sup>2</sup>的硅探测器, 30ps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 $2.5 \times 10^{15} n_{eq}/cm^2$ 的等效中子通量的辐照

- Two double-side layers mounted on the cooling disk

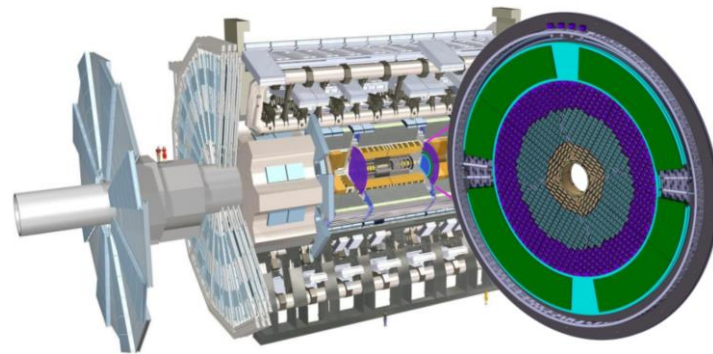
radius  $120\text{ mm} < R < 640\text{ mm}$  corresponding to  $2.4 < |\eta| < 4$

- 模块: 8032个

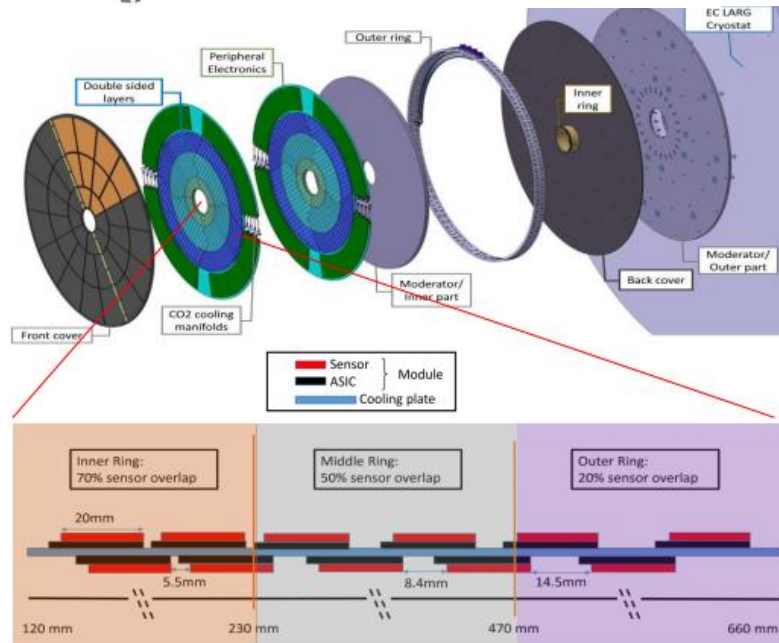
2 LGADs (15x15 pads) + 2 ASIC (15x15 channel) + flex

- HGTD探测器研制关键是LGAD探测器。时间分辨率可达30-50皮秒, 从而提高区分堆积的能力, 改进前向区域的粒子重建。

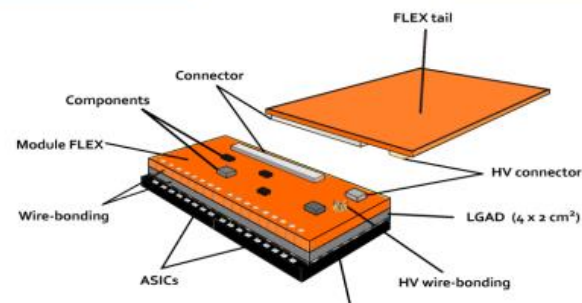
- **HGTD 需求LGAD探测器: >2万颗**



Disk



模块





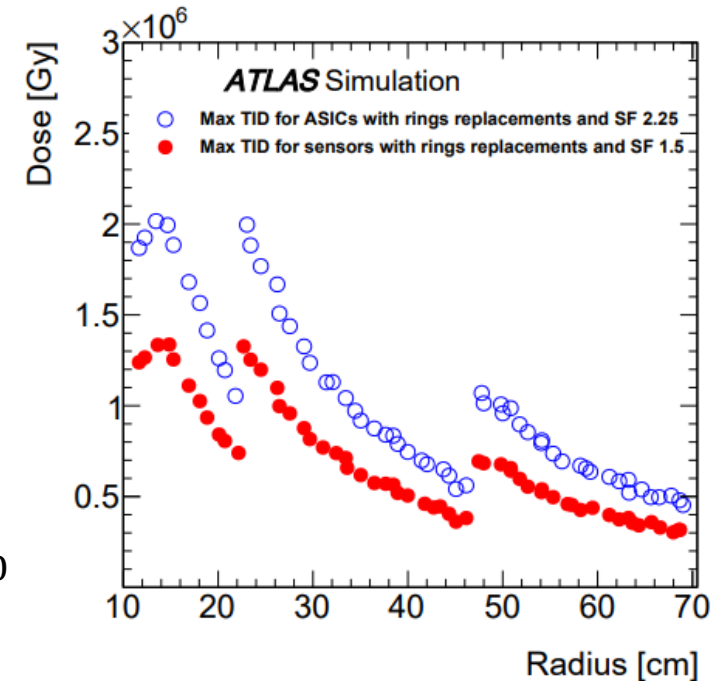
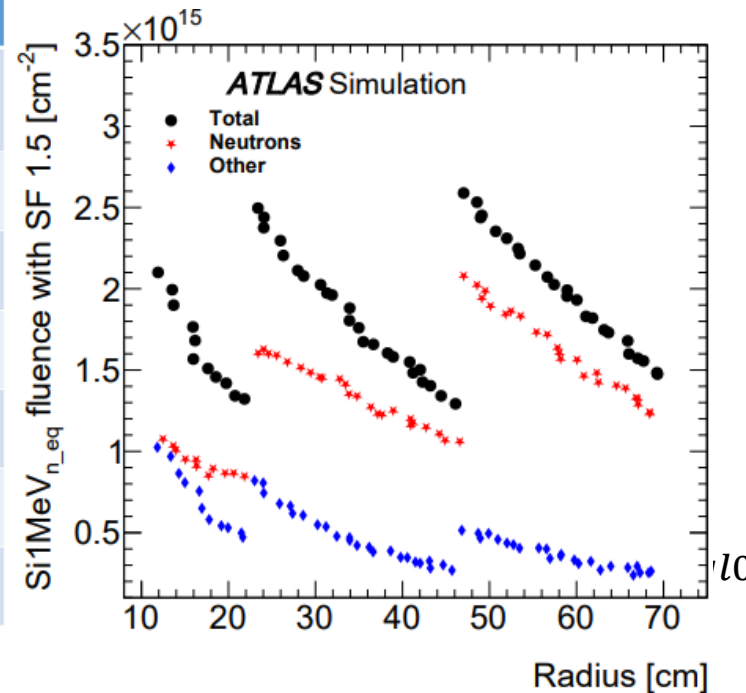
# HGTD LGAD探测器需求

➤ HGTD探测器研制关键是LGAD探测器。时间分辨率可达30-50皮秒，从而提高区分堆积的能力，改进前向区域的粒子重建。

➤ 抗辐照性能是HGTD项目中LGAD器件的一个重要性能要求。

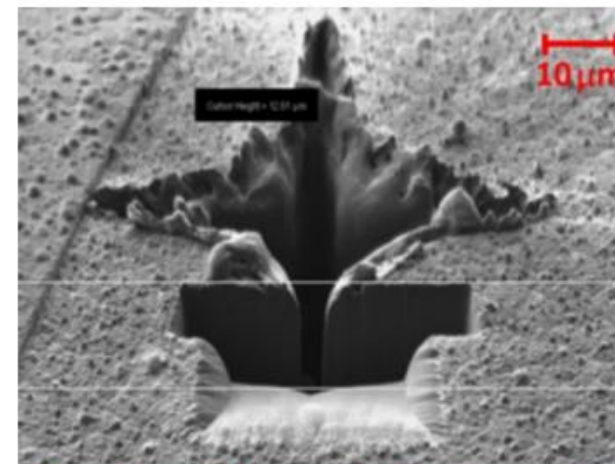
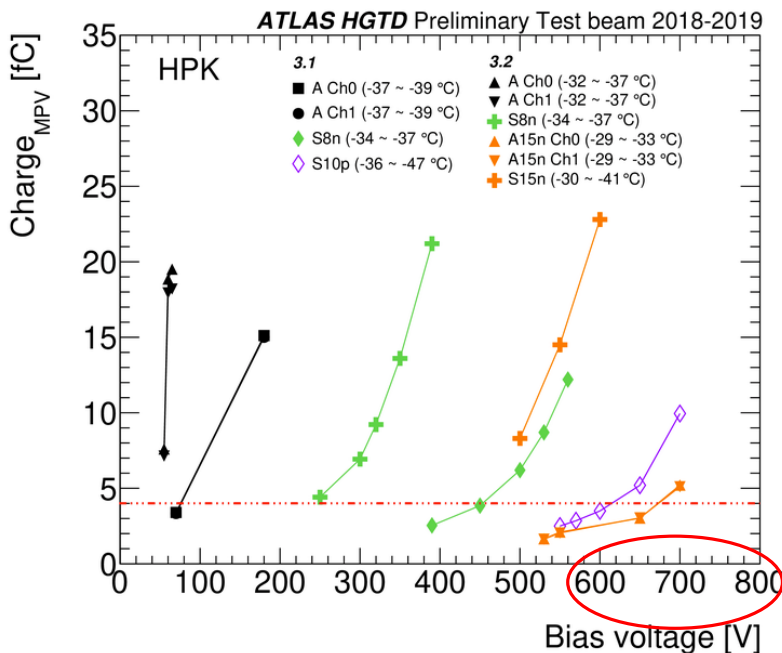
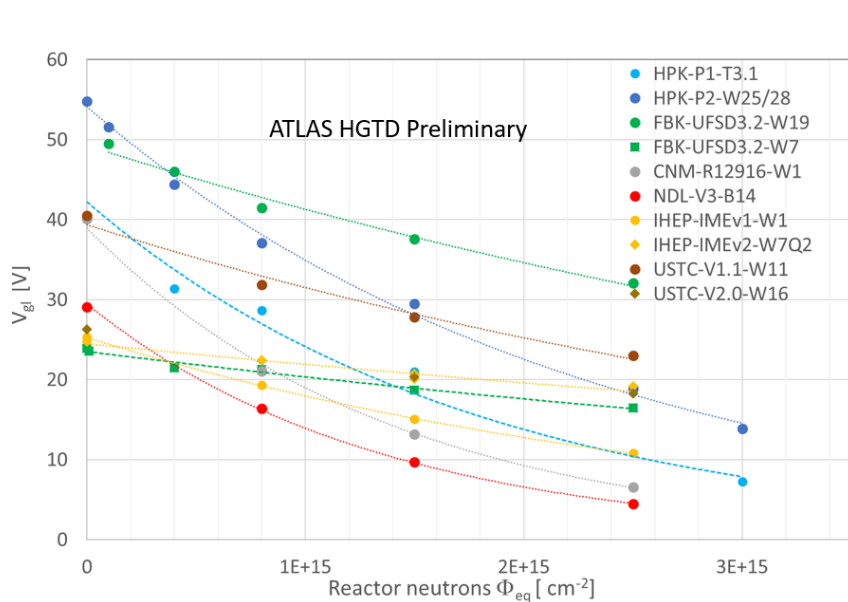
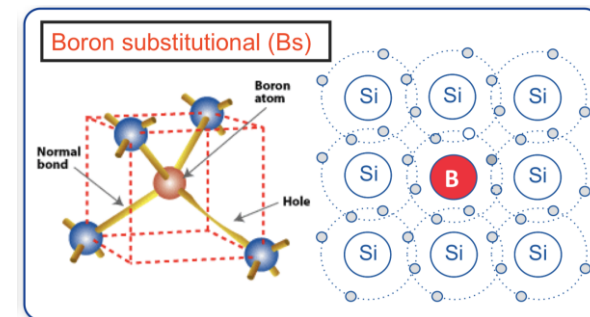
参数	指标
衬底材料厚度	50 $\mu\text{m}$ EPI /250 $\mu\text{m}$ silicon
像素尺寸	1.3mmX1.3mm
像素阵列	15X15
时间分辨率	<35ps(辐照前), <70ps(辐照后)
收集电荷	>15fC(辐照前), >4fC(辐照后)
辐照剂量	2.5e15 n <sub>eq</sub> /cm <sup>2</sup> , 2MGy
工作电压	<800V

Maximum fluence with replacements



# LGAD探测器辐照性能

辐照后，增益区硼掺杂失去活性，LGAD传感器增益下降(Acceptor removal)，且LGAD器件的电荷收集性能与时间分辨率随着辐照量的增加而变差



Burn mark on a CNM sensor after proton beam irradiation in Fermilab in 2018 (picture produced by CNM)

抗辐照特性表征参数：受主移除率  $c$

$$V_{gl} = V_{gl0} \times \exp(-c \times \Phi_{eq})$$

辐照后增加工作电压以满足读出ASIC的电荷要求

工作电压高  $>12V/\mu m * D$ ，束流测试出现单粒子烧毁现象





# LGAD探测器：国内外研究现状

- 国内：IHEP-IME (高能所-微电子所), USTC-IME (科大-微电子所), NDL(北师大)
- 国际：滨松HPK (日本)，FBK (意大利)，CNM (西班牙) ...

高能所自主设计LGAD探测器版图和工艺，在微电子所8寸工艺线流片

**ATLAS HPK-P2 (2020)**

**CMS**

**FBK-UFSD 3.2 (2020)**

**CNM-12916 (2019)**

- ATLAS 5x5, 1.3 mm, IP 37
- ATLAS 5x5, 1.3 mm, IP 47
- ATLAS 5x5, 1.3 mm, IP 57
- LGAD Pad, 1.0 mm, IP 57
- LGAD Pad, 1.0 mm, IP 47
- LGAD Pad, 1.0 mm, IP 37
- PIN Pad, 1.0 mm, IP 37
- PIN Pad, 1.0 mm, IP 47
- PIN Pad, 1.0 mm, IP 57
- PIN Pad, 1.3 mm, IP 37
- PIN Pad, 1.3 mm, IP 47
- PIN Pad, 1.3 mm, IP 57
- LGAD Pad, 1.3 mm, IP 37
- LGAD Pad, 1.3 mm, IP 47
- LGAD Pad, 1.3 mm, IP 57
- ATLAS 2x2, 1.3 mm, IP 57
- ATLAS 2x2, 1.3 mm, IP 47
- ATLAS 2x2, 1.3 mm, IP 37
- ATLAS 2x2, 1.0 mm, IP 37
- ATLAS 2x2, 1.0 mm, IP 47
- ATLAS 2x2, 1.0 mm, IP 57

**IHEP-IME-V2 run (07/2021)** 8" 高能所

**USTC-IME\_2.x 8" (2020)** 科大-微电子所

**NDLv4 (2021)** 北师大

**NDLv3 (2020)**

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



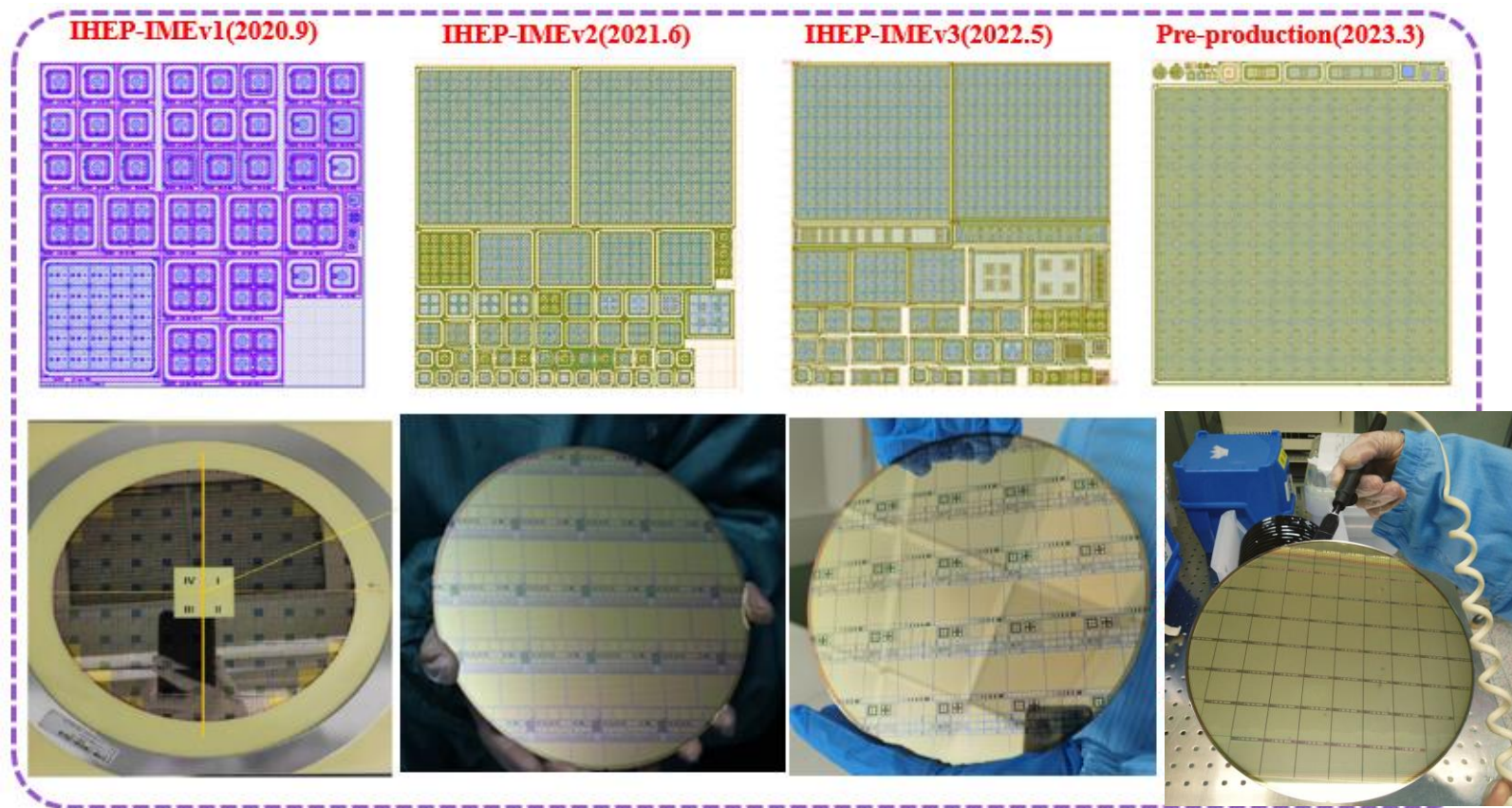


# 高能所LGAD探测器研发进展

高能所从2018年起致力于LGAD探测器的研发，自主设计版图与工艺参数，并基于微电子所8寸工艺线多次流片，成功研制出了具有良好时间分辨与抗辐照性能的国产LGAD探测器。

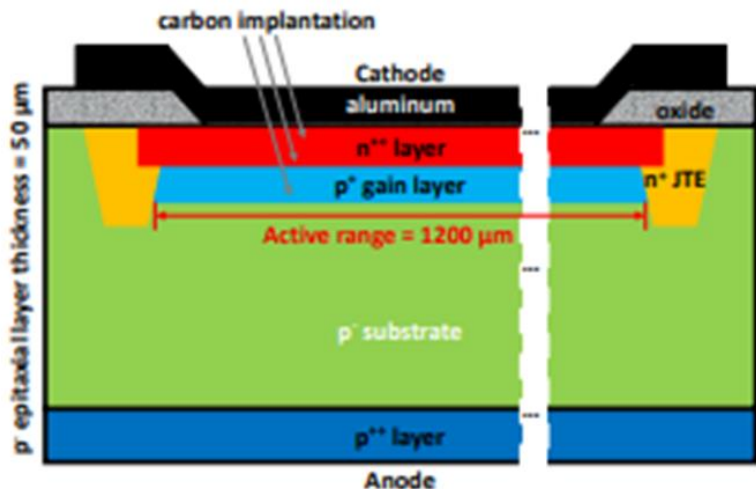
- IHEP-IMEv1(2020.9)，性能满足HGTD项目要求
- IHEP-IMEv2(2021.6)，掺碳工艺优化器件抗辐照性能，大阵列器件
- IHEP-IMEv3(2022.5)，工艺重复性验证，优化大阵列器件设计

**2023年3月开始HGTD项目LGAD器件批量预生产，第一批已流片完成，初测性能符合预期**



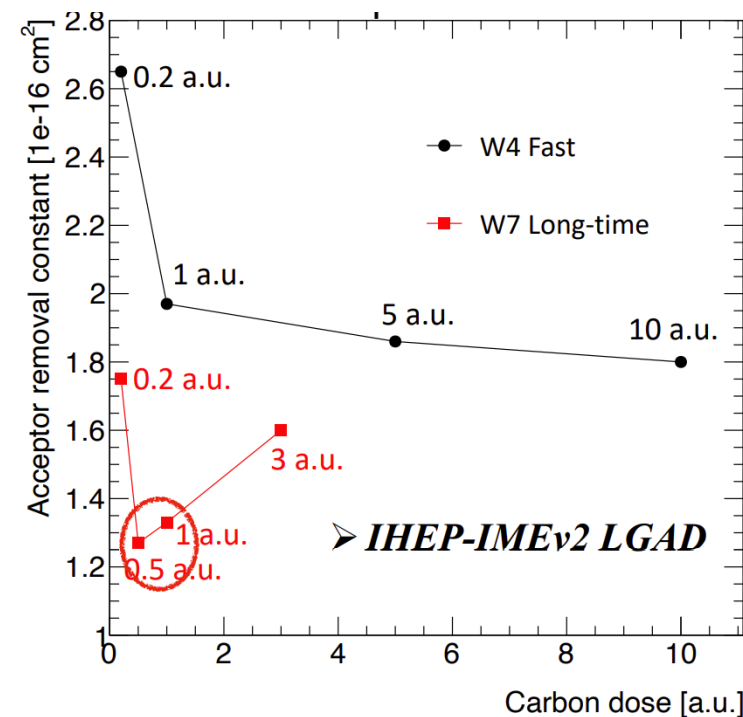


# LGAD探测器辐照性能



Sensor	Diffuse*	C dose(a.u.)	C factor (x10 <sup>16</sup> cm <sup>2</sup> )	
W4	Q1	CLBL	0.2	2.57
	Q2	CLBL	1	1.77
	Q3	CLBL	5	1.60
	Q4	CLBL	10	1.50
W7	Q1	CHBL	0.2	1.62
	Q2	CHBL	0.5	1.14
	Q3	CHBL	1	1.18
	Q4	CHBL	3	1.34
W8	Q1	CHBL	6	1.30
	Q2	CHBL	8	1.32
	Q3	CHBL	10	1.23
	Q4	CHBL	20	1.29

BEST



## ➤ 抗辐照性能研究:

增益区进行碳注入，并制备了12种不同的LGAD器件:

不同的碳注入剂量和热处理条件

- 在不同的条件里，存在一个最优的碳注入剂量与退火条件。这个情况下，辐照后的器件具有最小的受主移除率（反映了器件的抗辐照性能）

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167697>





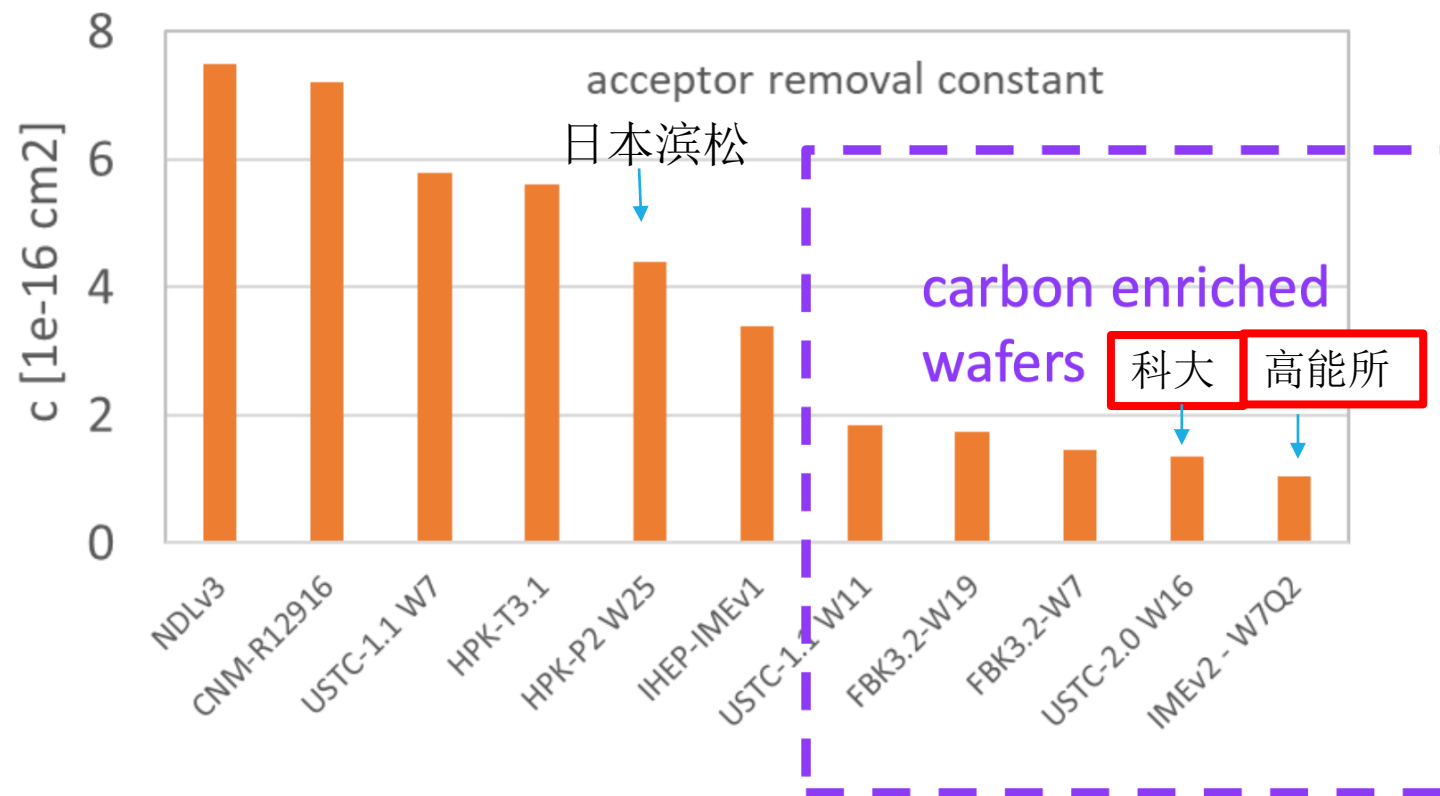
# LGAD探测器抗辐照性能

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）

抗辐照性能显著提高

目前抗辐照性能优于滨松





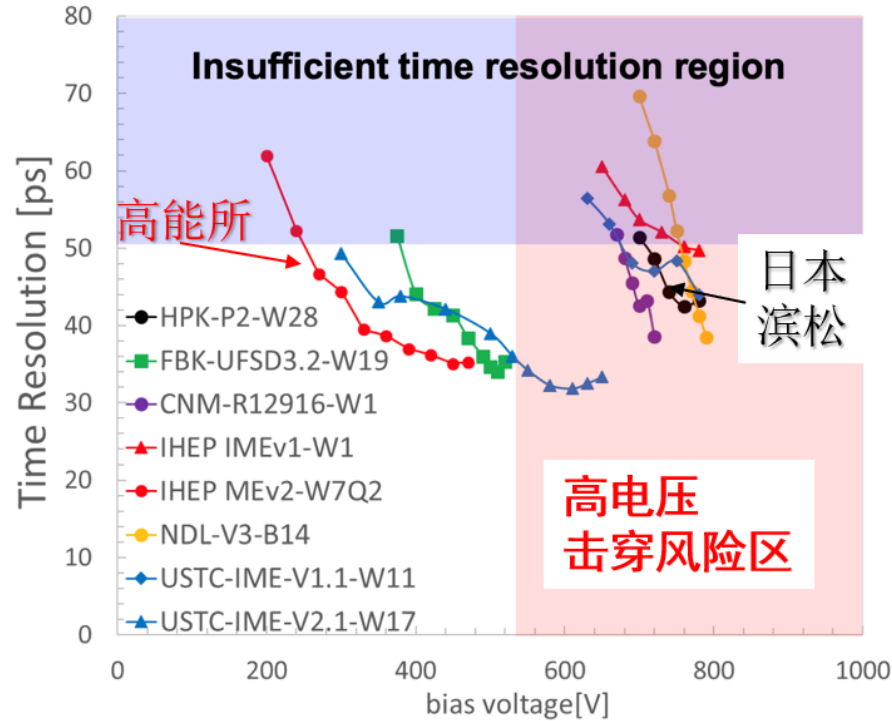
# LGAD探测器辐照性能

高能所LGAD器件辐照后（ $2.5e15cm^{-2}$ 等效中子辐照）：

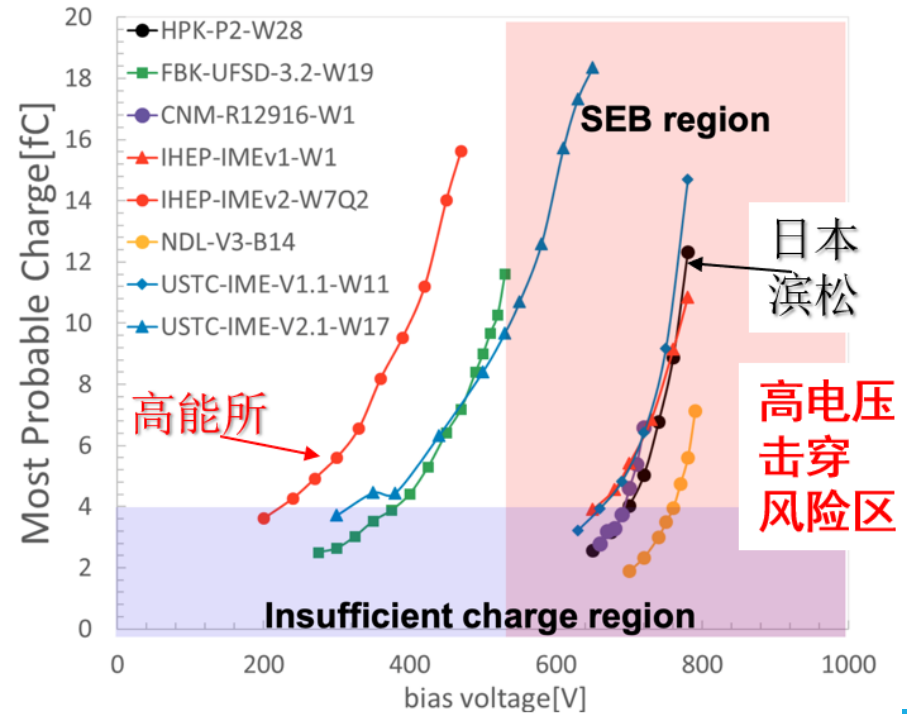
- 在低于400V的电压下收集足够的电荷（ $>4fC$ ）
- 达到30-50ps的时间分辨特性
- 有效避免束流测试中的单粒子烧毁现象(SEB)，完全满足HGTD项目的应用要求。

辐照后（ $2.5e15cm^{-2}$ 等效中子辐照）

时间分辨率 vs 偏置电压



电荷收集 vs 偏置电压

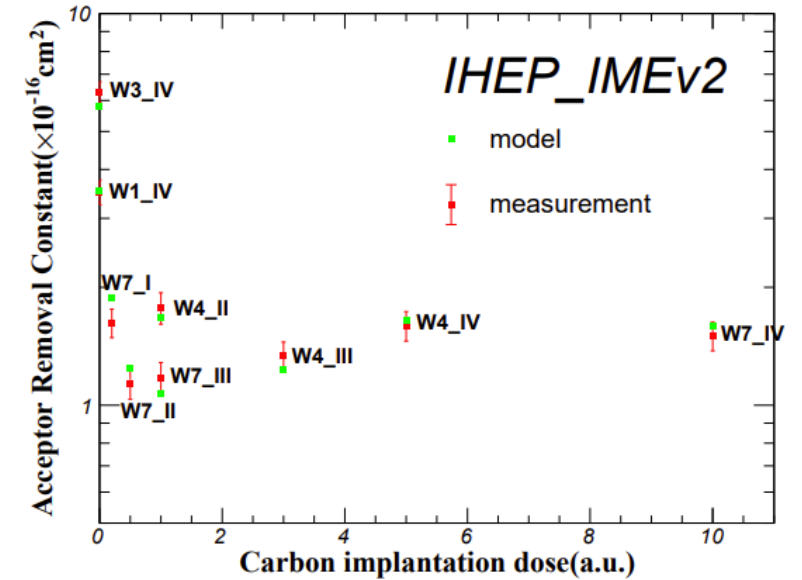
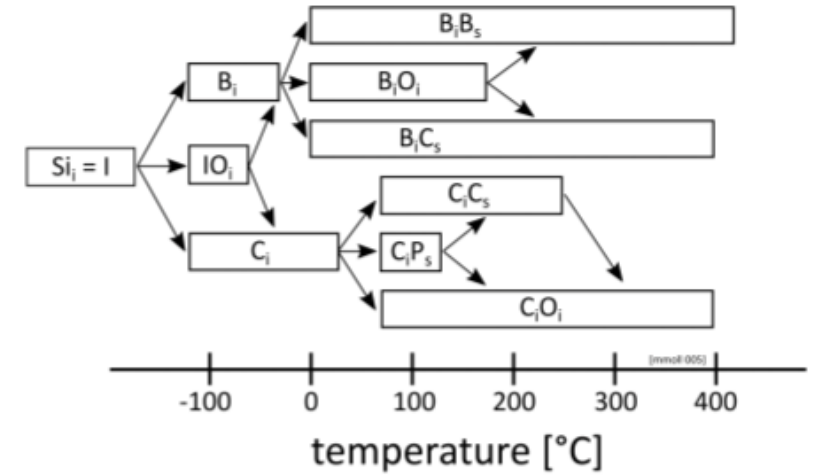


# LGAD探测器辐照性能



## 掺碳改善LGAD器件抗辐照性能的机理:

- 在 高能粒子的照射下，硅晶格中形成缺陷簇、间隙（I）和空位（V）
  - 辐射诱导的间隙与硼原子反应： $B_s + I \rightarrow B_i$ ，从晶格移动出来，并最终形成 $BiOi$ ，造成了硼原子失活
  - 掺杂进去的碳与辐照诱导的间隙同样可以反应： $C_s + I \rightarrow Ci$ ，并形成 $CiOi$
  - LGAD中掺杂的碳可替代硼与间隙反应并与 $O_i$ 结合，因此，碳注入有助于抑制硼受体的去除。
- 为了进一步明确注入碳浓度和分布对受主移除的抑制作用，SIMS分析了不同样品的碳和硼离子分布情况，并在此基础上建立了**LGAD关键区域硼和碳分布与受主移除系数的模型**。
- 模型计算得到的受主移除系数与高能所LGAD与其他传感器的测试结果吻合良好。
- 模型对LGAD抗辐照性能提升有一定的指导作用。



Study of the Acceptor Removal Effect of LGAD, TNS, 2022



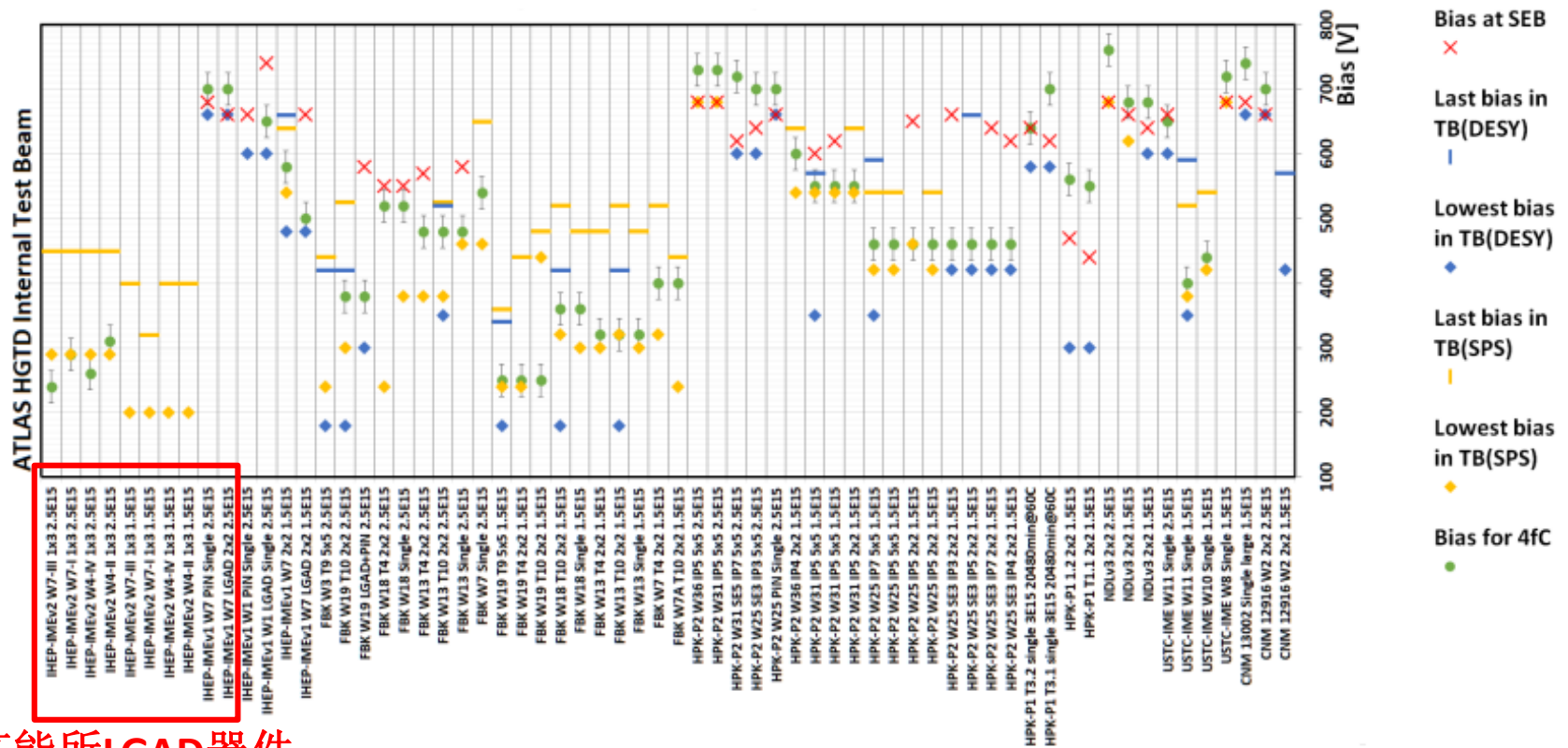


# LGAD探测器：束流测试

ATLAS合作组开展欧洲核子中心（CERN）的高能质子流测试（120GeV）：

辐照后，不掺碳的LGAD（滨松FBK，西班牙CNM）烧毁率较高

高能所LGAD器件辐照后均可在较低电压下收集足够的电荷（4fC），且在束流下长时间工作，无一烧毁



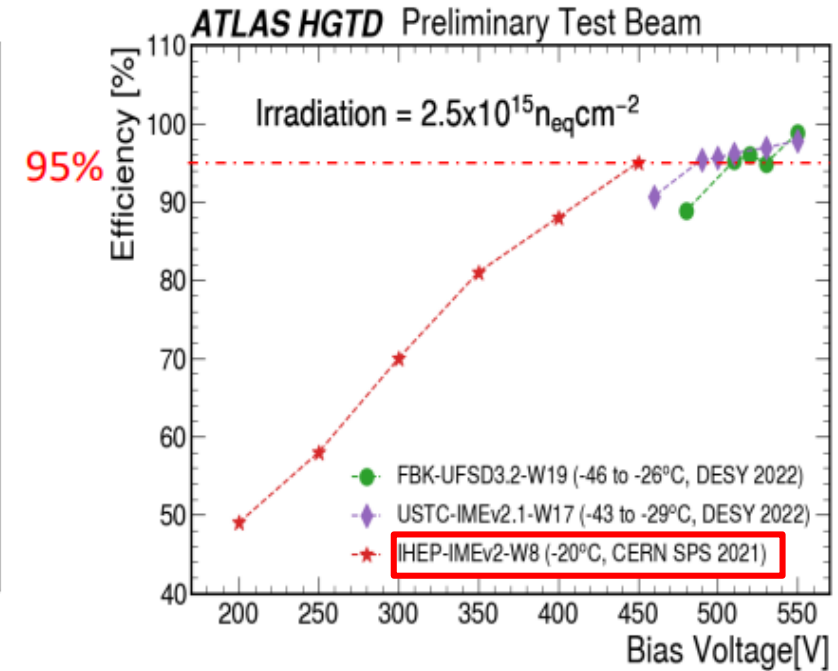
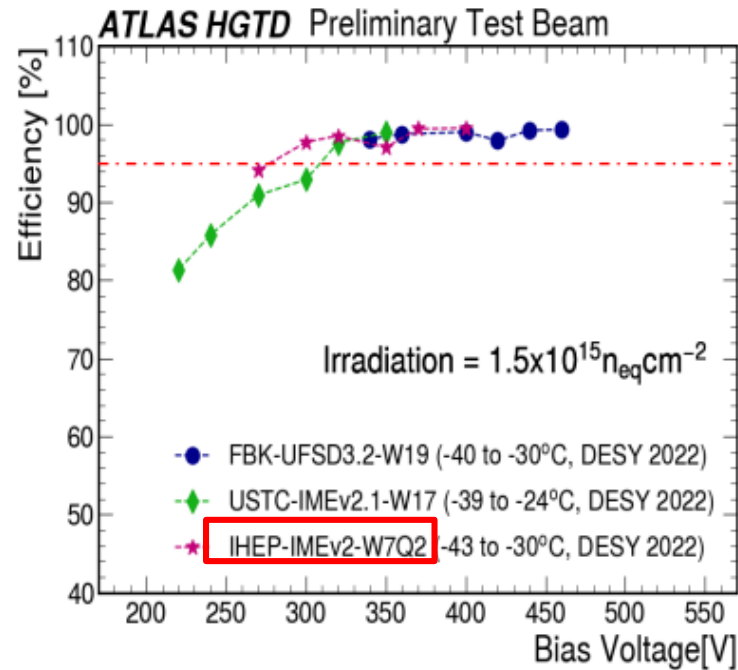
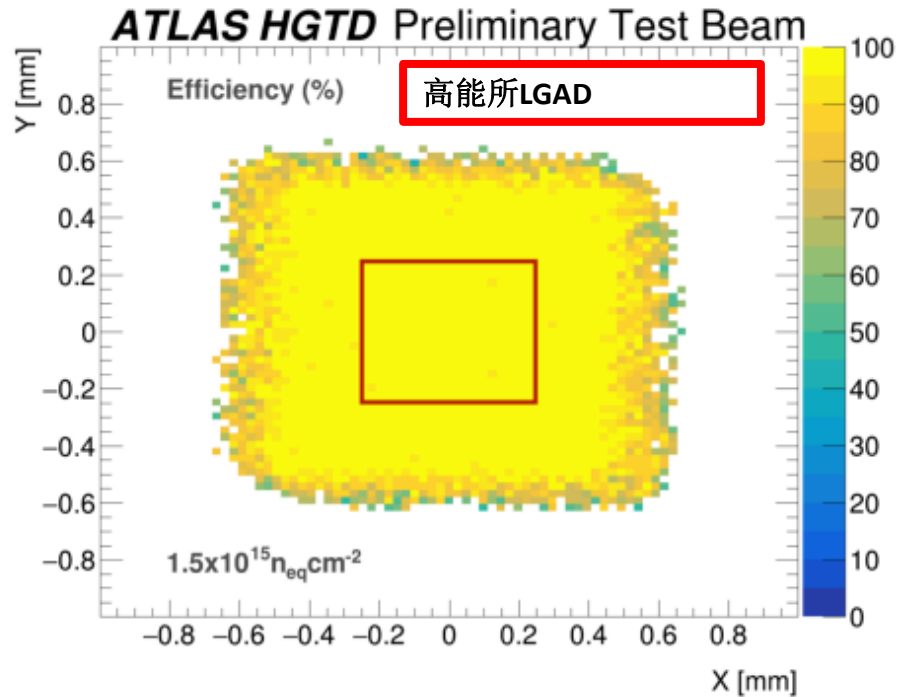
高能所LGAD器件

<https://arxiv.org/abs/2306.12269>



# LGAD探测器：束流测试

- **ATLAS合作组DESY和CERN SPS束流测试：**  
高能所LGAD探测器辐照后的探测效率可达**95%~100%**

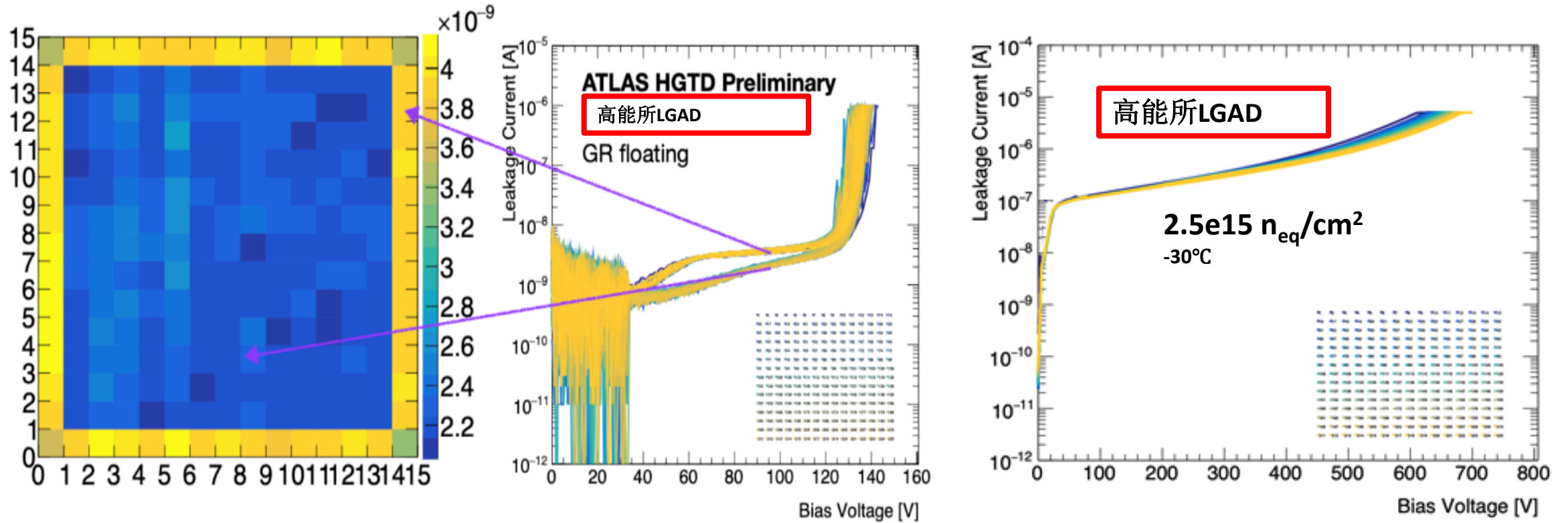


<https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/05/P05005>



# LGAD探测器

- 高能所LGAD器件 15x15阵列具有良好的电压-电流一致性（辐照前后）
- 裸片测试pad成品率可到99%以上

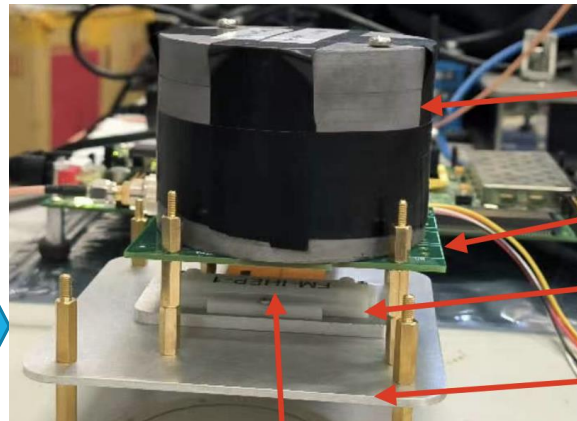






# LGAD探测器：模块测试

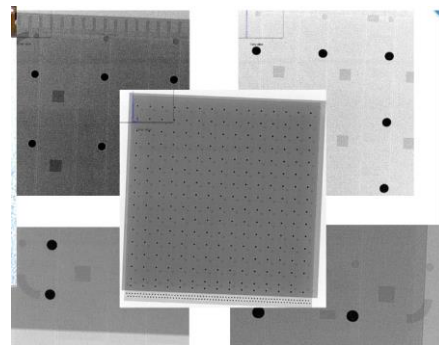
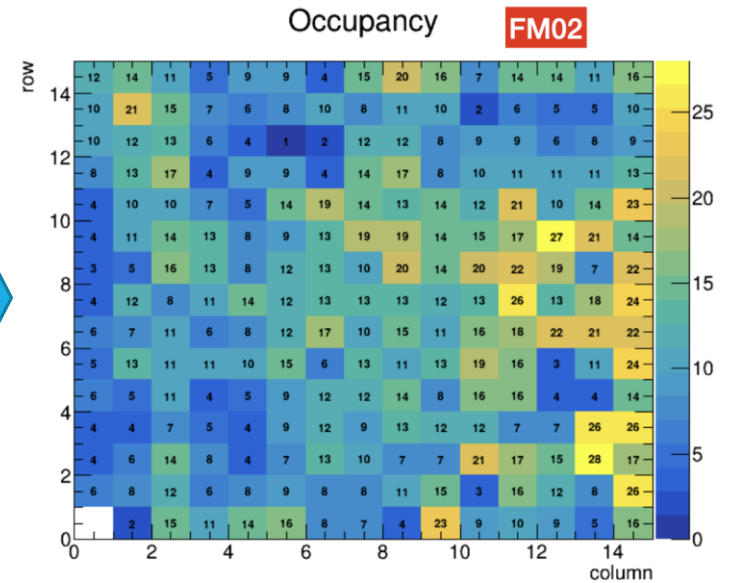
- ▶ 高能所LGAD 15x15探测器与ASIC通过倒装焊连接，之后对其性能进行测试。
- ▶ 在放射源功能测试中225个读出通道均正常工作



Sr90  
Holder  
Full Module  
Cooling plate



## 放射源测试的hit maps



IHEP sensor bonding with Altiroc2



# LGAD探测器：量产

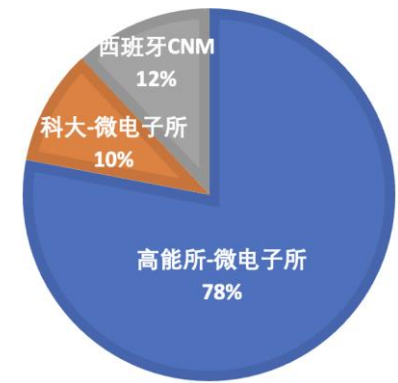
➤ 2023年高能所设计微电子所制备的LGAD探测器赢得CERN的LGAD全额招标订单 (>1万个LGAD)

- 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探测器

■ 高能所-微电子所 ■ 科大-微电子所 ■ 西班牙CNM

➤ 各单位在该项目LGAD探测器的贡献比重

- 高能所-微电子所：78% (54% CERN国际招标采购+ 24%实物贡献)
- 中科大-微电子所：10% 实物贡献
- 西班牙 CNM研究所：12% 实物贡献



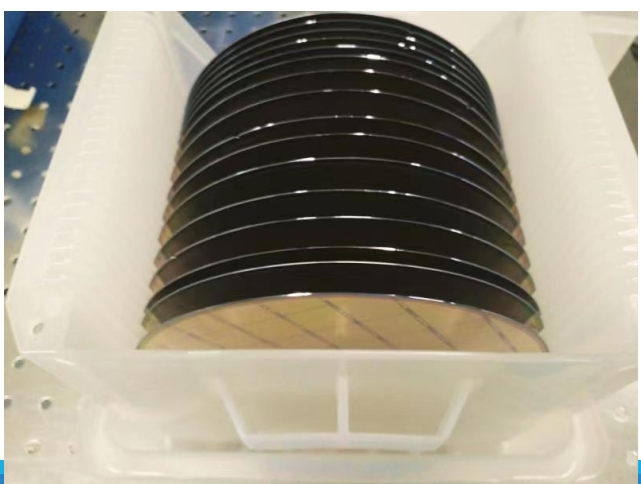
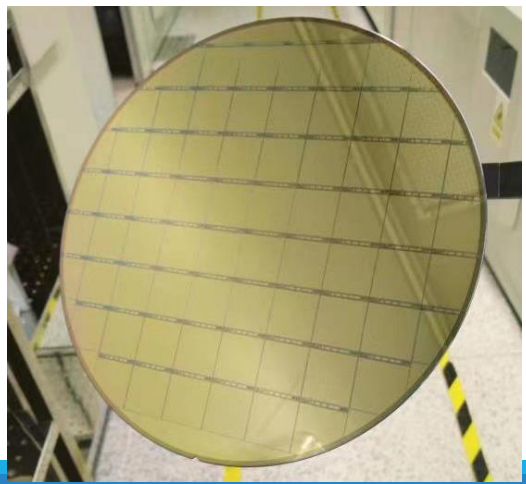
预生产阶段：1100颗  
生产阶段：~2.1万颗

目前处于预生产阶段 LGAD器件在制备中，明年初开始正式生产

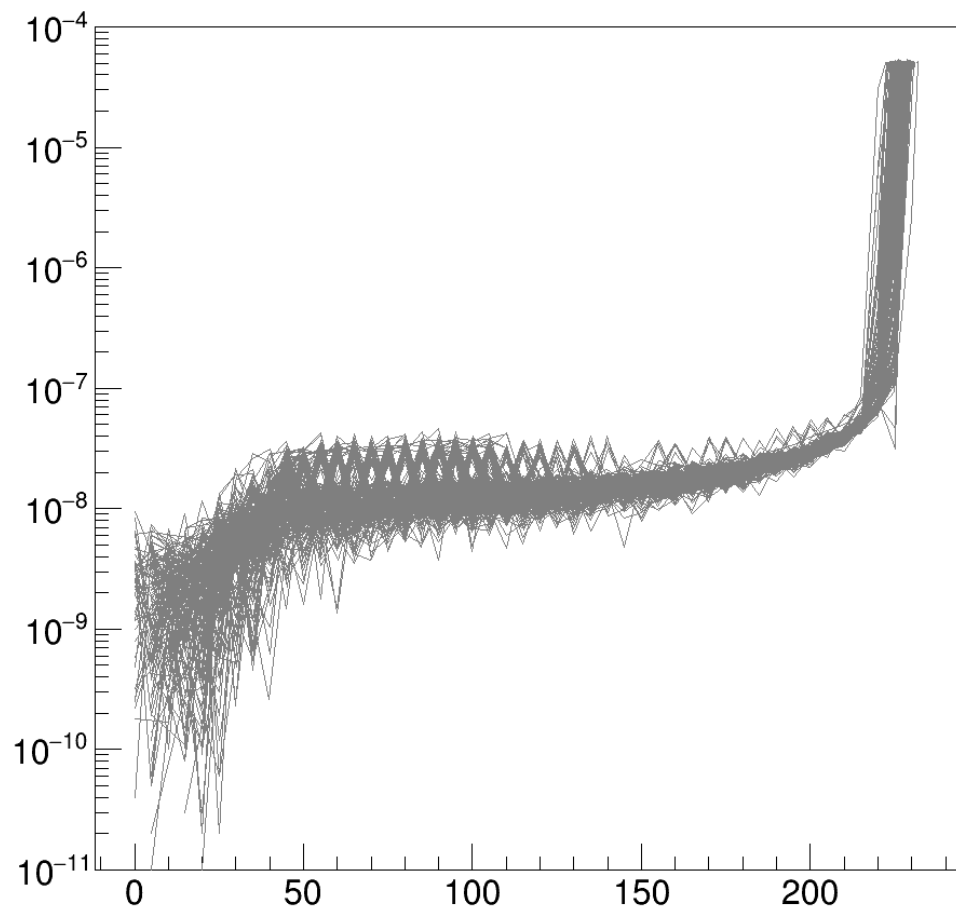
科大：投片27片，9片满足项目要求，基本上已完成预生产

高能所：90个8寸晶圆投片，其中43个晶圆制备完成第一批预生产器件已完成制备，初步测试性能符合预期

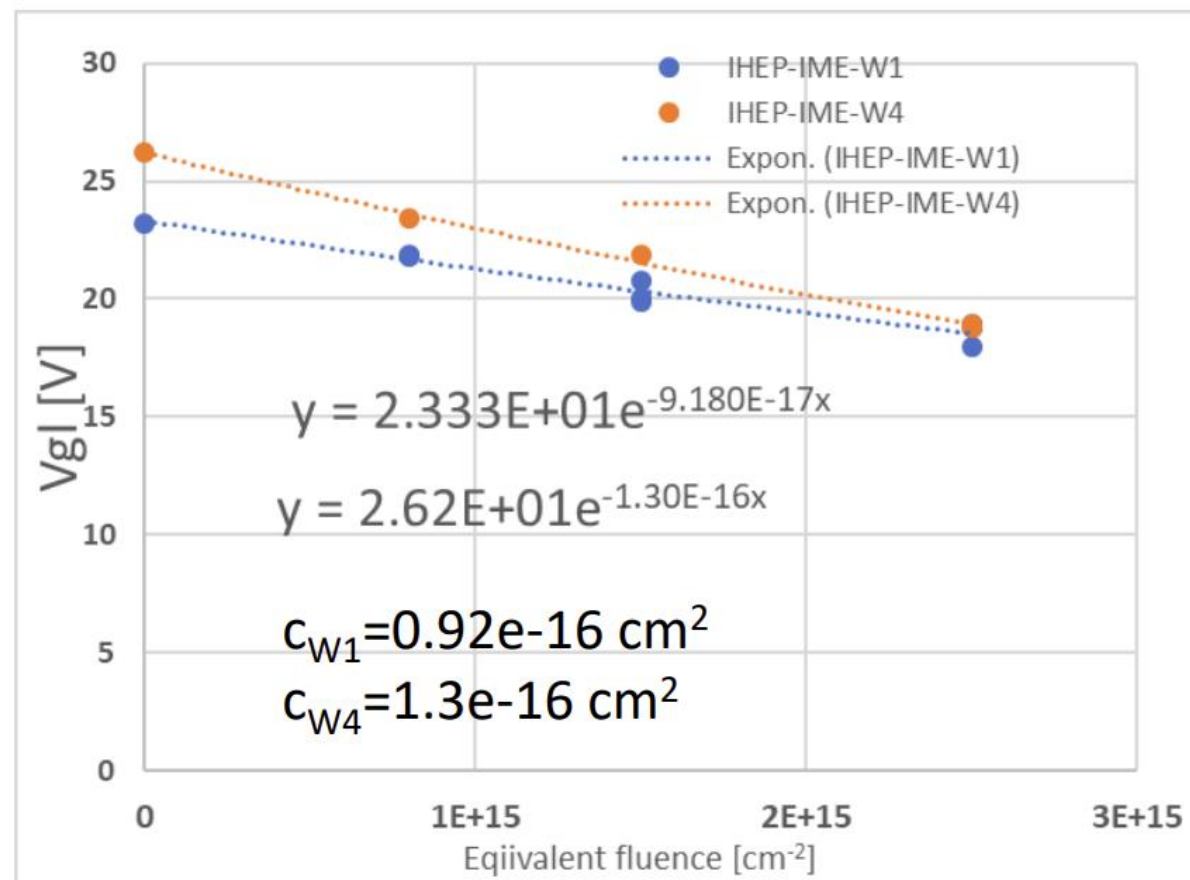
8寸晶圆  
单晶圆有52个  
15x15 LGAD器件



# HGTD项目LGAD探测器：预生产



15x15阵列具有良好的电压-电流一致性



受主移除率：优于R&D阶段的器件





# 总结

- ▶ 基于国产工艺自主研发的LGAD探测器在ATLAS实验规定的超高辐照后其时间分辨率仍可达到35ps，并且可以工作在400V左右的低电压区（安全工作区），避免了器件的单粒子烧毁现象。
- ▶ 2023年高能所研制的LGAD探测器赢得欧洲核子中心的HGTD项目硅探测器公开招标，并获得其中100%的招标份额。
- ▶ ATLAS HGTD LGAD: 目前预生产第一批已完成，性能符合预期，具有良好的抗辐照特性。  
2024年初开始正式生产。
- ▶ CMS LGAD: ~4万颗，高能所LGAD器件参与Market survey，性能满足项目需求（CMS测试）。
- ▶ 新型AC-LGAD 研制：4D探测器，同时具备位置与时间分辨能力。位置分辨最优可达5um，时间分辨可达15-20ps（激光测试结果），有望应用于未来对撞机实验。

# Backup



# ATLAS HGTD项目介绍

➤欧洲大型强子对撞机HL-LHC II期升级:

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

安装在ATLAS探测器的前向区域，把粒子到达时间的测量精度提高2个数量级（数纳秒→30ps），解决高亮度LHC对撞事例堆积问题

➤Pixel detector with coarse spatial resolution but precise timing

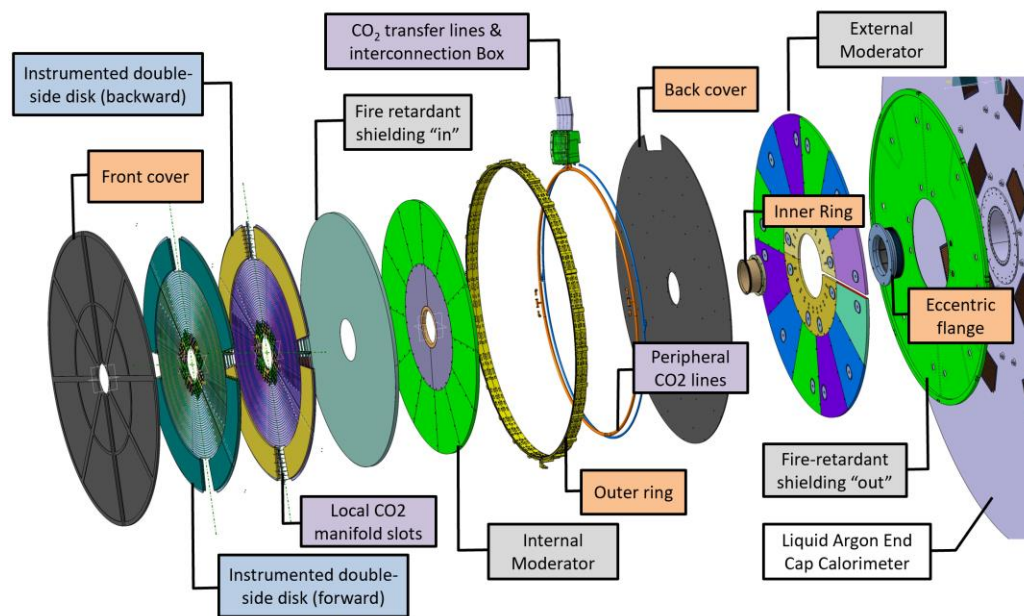
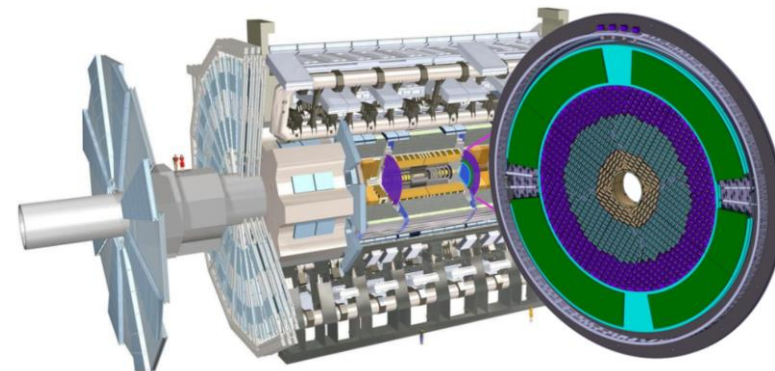
- 360万个通道，单像素 $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$
- 6.4 m<sup>2</sup> 有效面积
- 30ps的时间分辨
- 辐照剂量要求： $2.5e15 \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$ 的等效中子通量

➤Two end-caps 两个端盖

- $z \approx \pm 3.5 \text{ m}$  from the nominal interaction point
- Total radius半径:  $11 \text{ cm} < r < 100 \text{ cm}$
- Active detector region:  $2.4 < |\eta| < 4.0$

每个端盖:

Two instrumented disks, rotated by  $15^\circ$

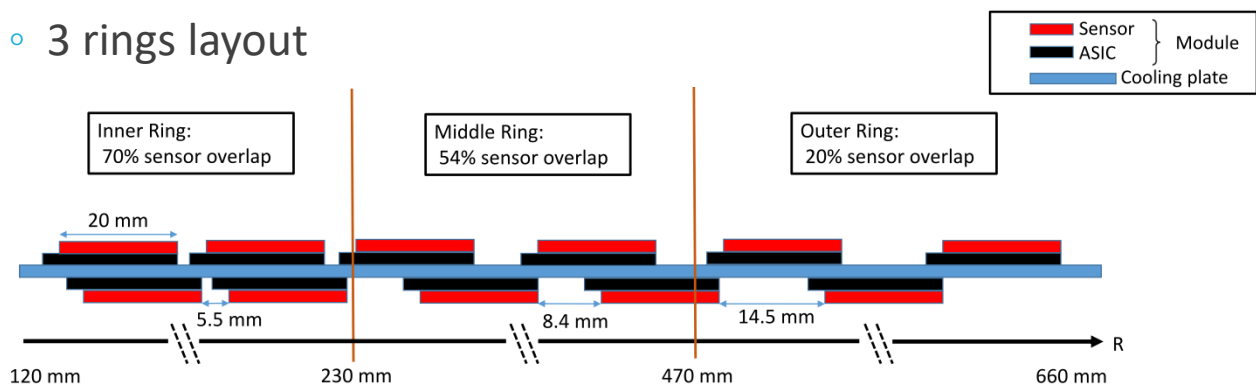




# ATLAS HGTD项目介绍

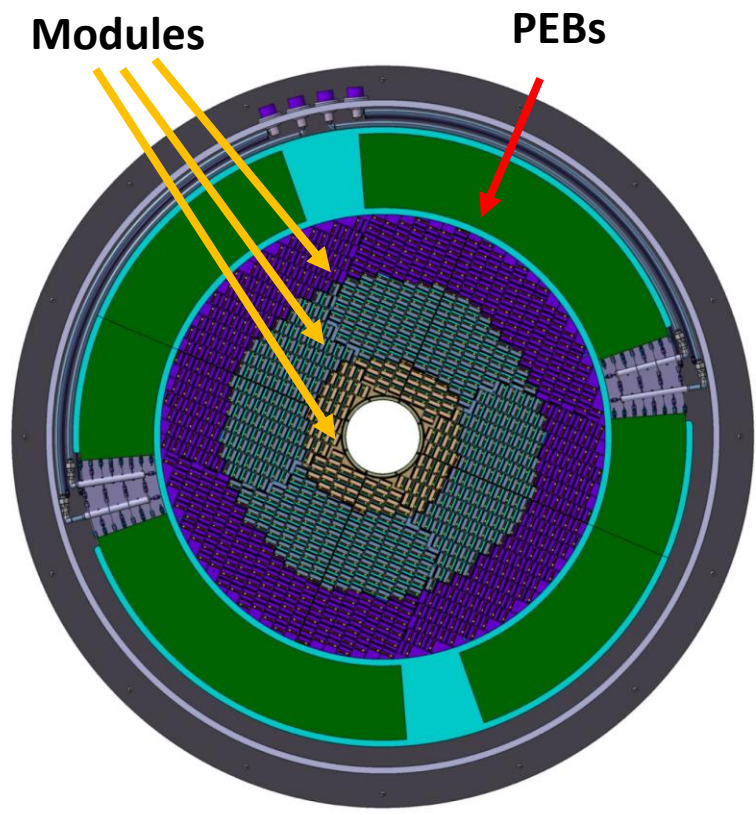
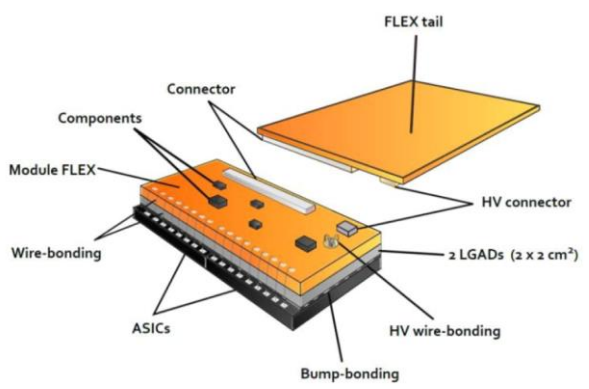
## 圆盘: 2 disks, each Disk:

- Double-sided layers mounted on a cooling plate
- 3 rings layout



## 模块: 8032 modules, each module:

- 两个倒装焊模块 Two hybrids (2 sensors + 2 ASICs)
- 一个柔性电路板 module Flex
- 2x4 cm<sup>2</sup>, 15x30通道



- 模块module通过 Flex tails连接到外设电路板 Peripheral Electronics Boards (PEB)上