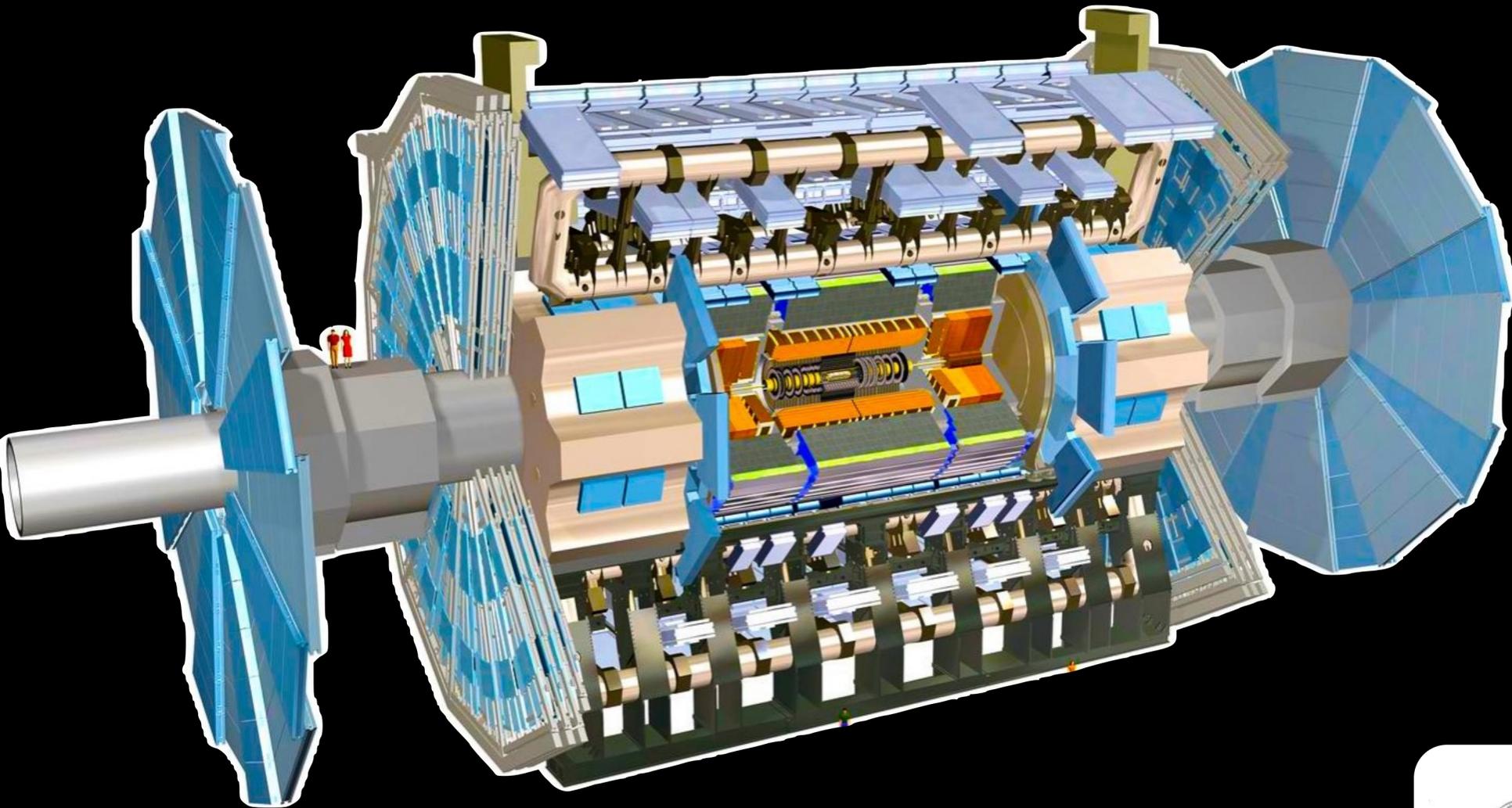


2023年国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”

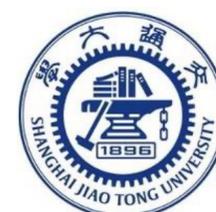
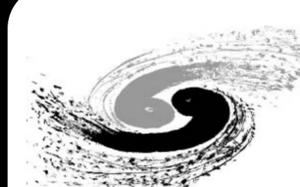
# 课题1: ATLAS 实验高粒度时间探测器升级



汇报人:

课题 1 课题负责人: 梁志均  
中国科学院高能物理研究所

2024年7月5日



# 物理需求与关键技术

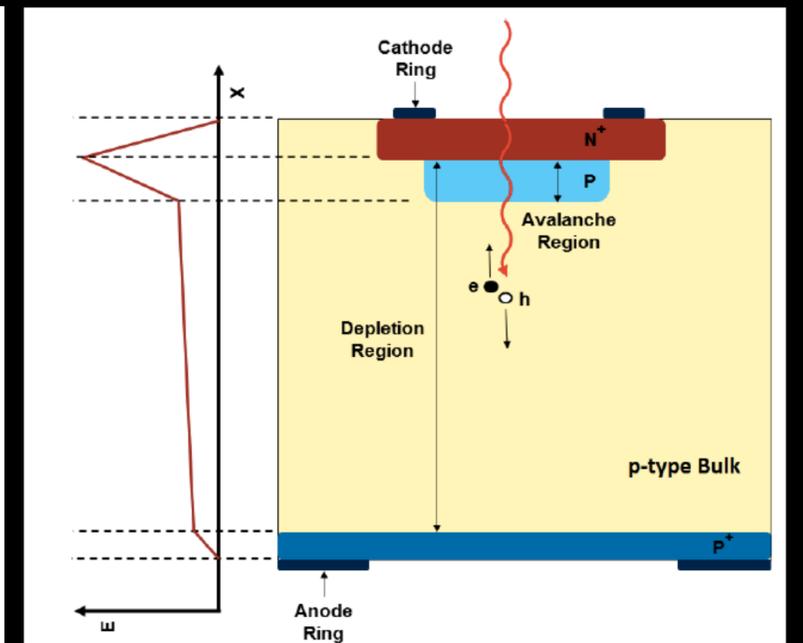
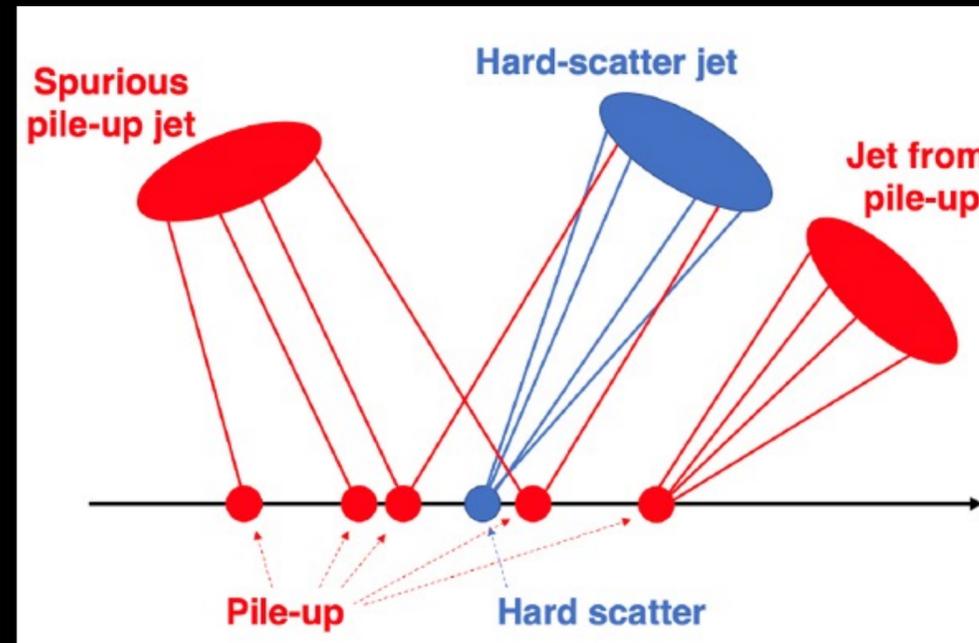
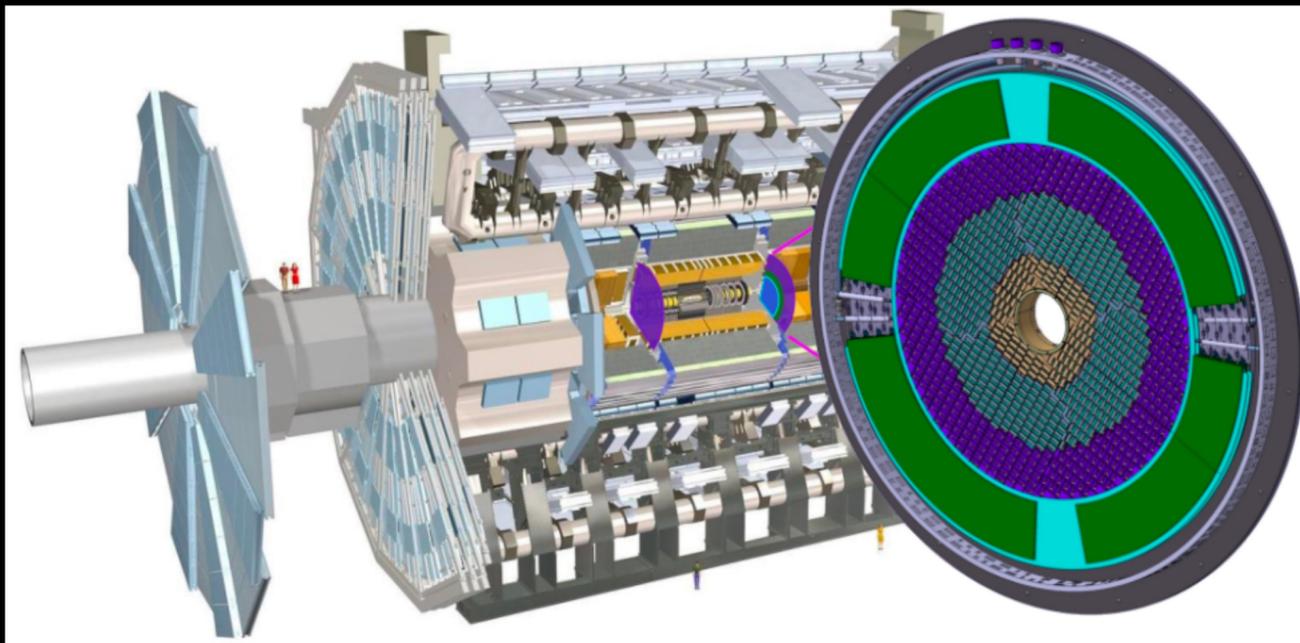
高粒度时间探测器(HGTD) 提供高精度时间测量 → 降低堆积背景

高粒度时间探测器提供准确的亮度测量 → 精确测量

实现 30-50 ps 高精度时间分辨率, 比传统硅探测器纳秒级分辨有显著提高

首次在对撞机实验实现准4维 (时间+空间) 粒子探测器

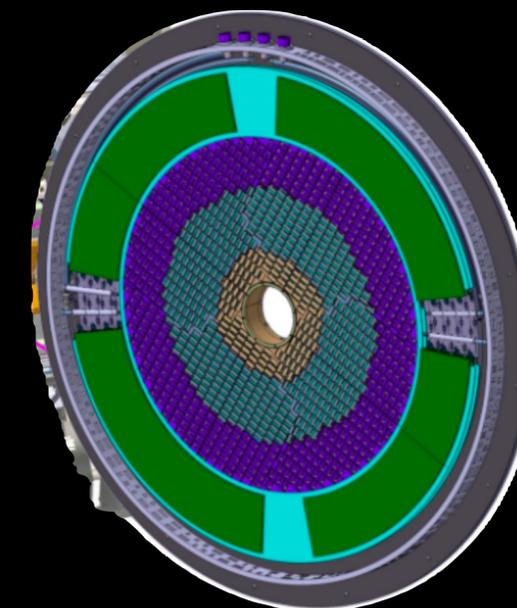
6.4平方米探测面积, 毫米级颗粒度, 超过三百万个读出通道



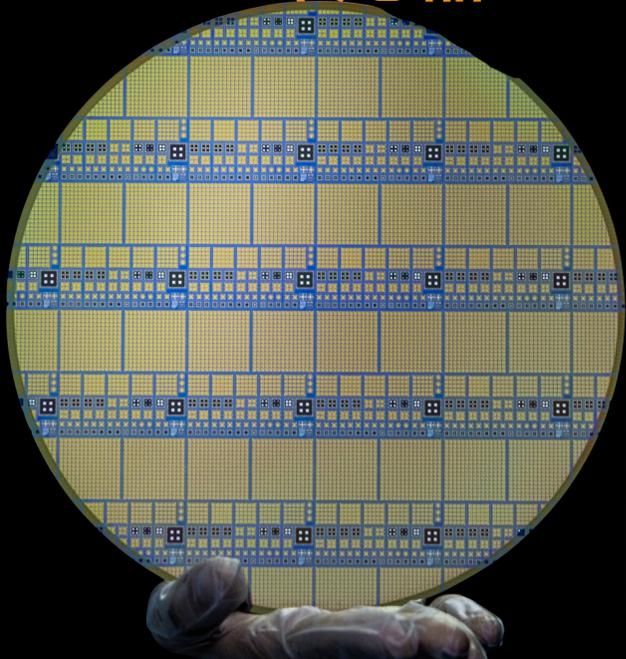
# 研究内容

## 研制高颗粒度时间探测器的关键部件

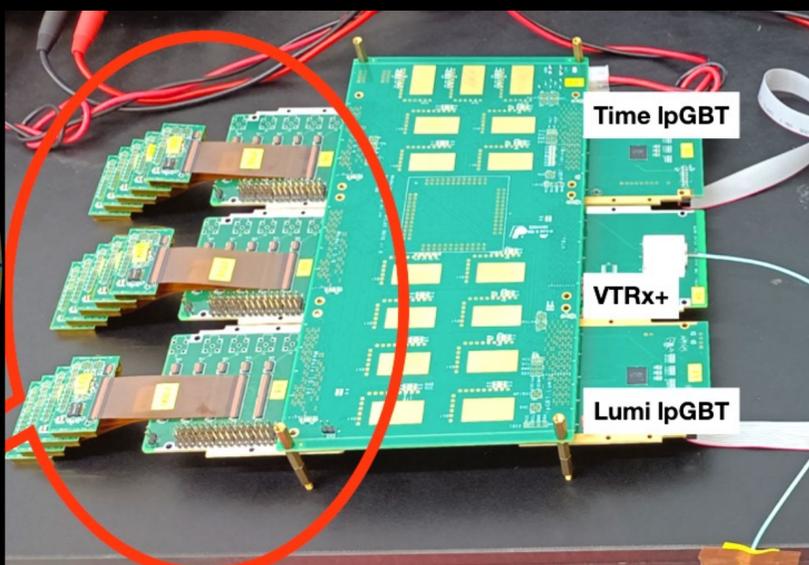
- 研制抗辐照LGAD硅传感器
- 大面积探测器模块的自动组装
- 研发前端电子学，高压系统，电子学柔性尾板



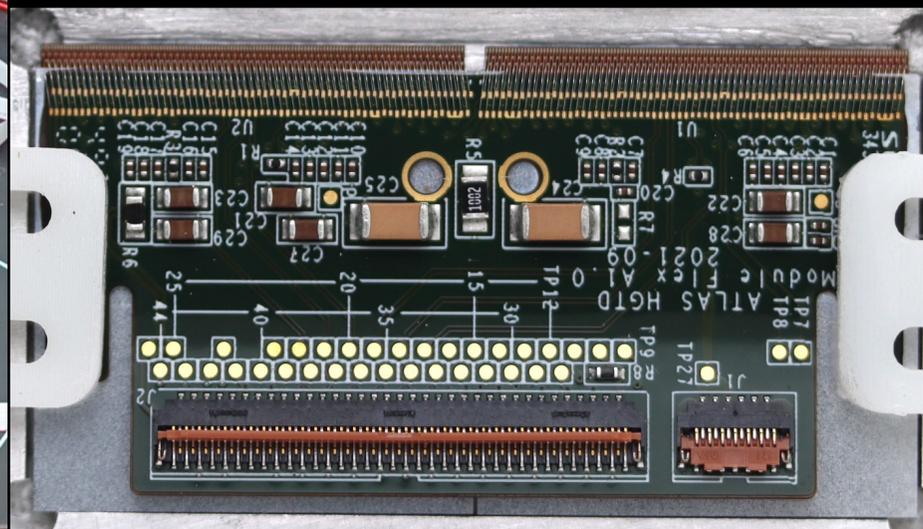
## LGAD 硅传感器



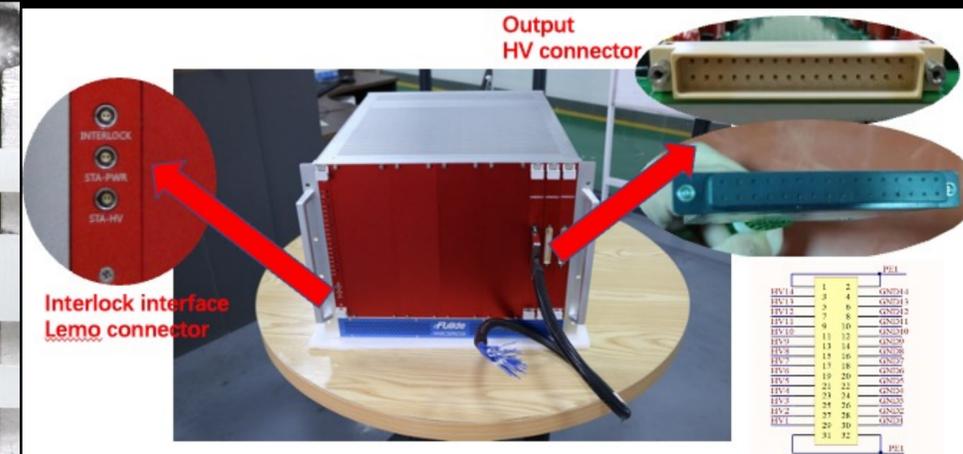
## 电子学



## 探测器模块 ASIC+LGAD



## 高压系统



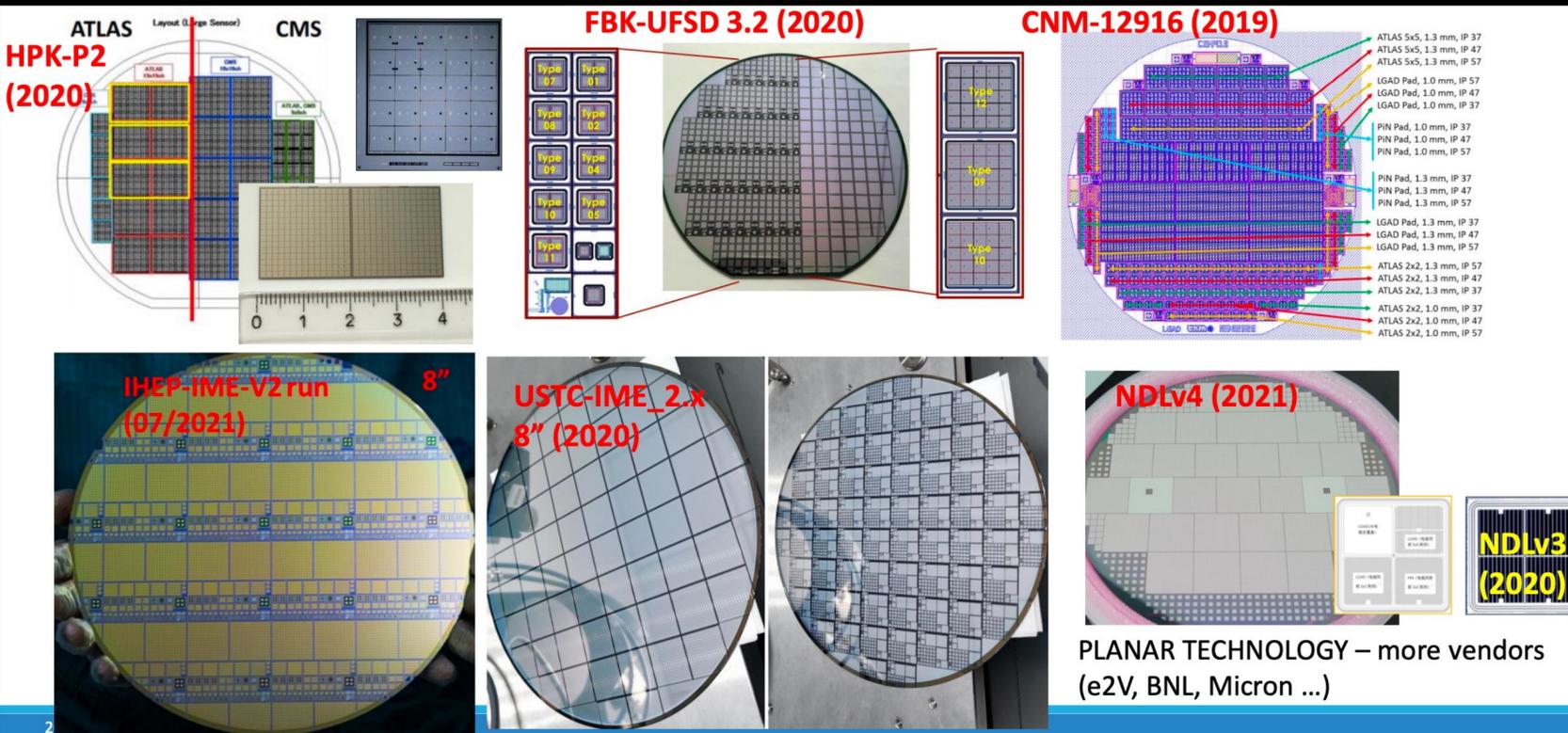
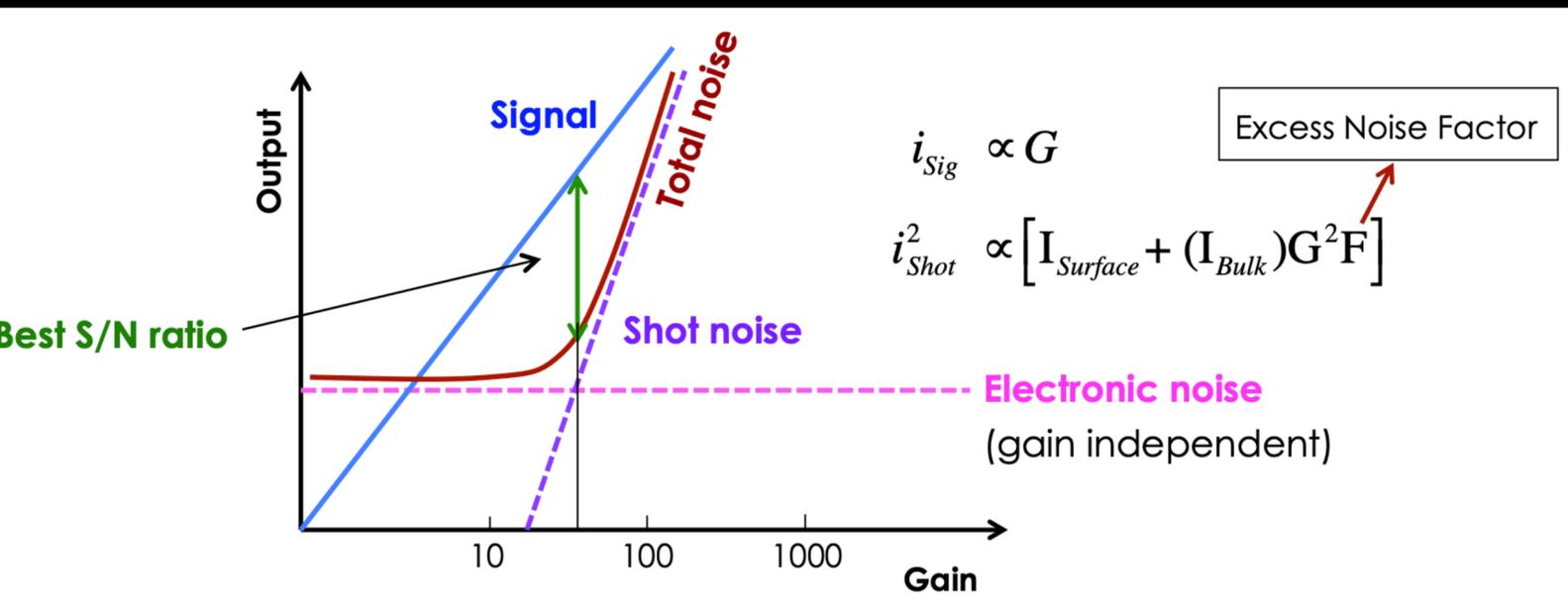
# 课题1: ATLAS 实验高粒度时间探测器升级

- **Assessment index** (考核指标):
  - 为ATLAS实验研制的探测器模块时间分辨率达到**30-50 皮秒**
  - **全新硅基时间探测器技术**

课题目标 <sup>1</sup>	预期成果		考核指标 <sup>2</sup>			考核方式 (方法) 及 评价手段 <sup>4</sup>		
	预期成果 名称	预期成果类型	指标 名称	立项时已有指 标值/状态	中期指标 值/状态 <sup>3</sup>		完成时指标 值/状态	
在高粒度 时间探测器 方面, 研发硅 传感器、前端 电子学、探测 器模块组装 等, 研制出高 时间分辨率 的探测器模 块与前端读 出电路板, 其 时间分辨率 好于 50 皮 秒。	主要成 果 1	高精度 时间探 测器	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input checked="" type="checkbox"/> 新技术 <input type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 临床指南/规范 <input type="checkbox"/> 加工工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 发明专利 <input type="checkbox"/> 其他_____	时间分辨率 (关键核心指标)	小面积原型硅 传感器时间分 辨率好于 50皮 秒	为 ATLAS 升级研制 出正式的 硅传感器, 时间分辨 率达到 30- 50 皮秒	探测器模块 时间分辨率 达到 30-50 皮 秒	测试报告、同 行评审。

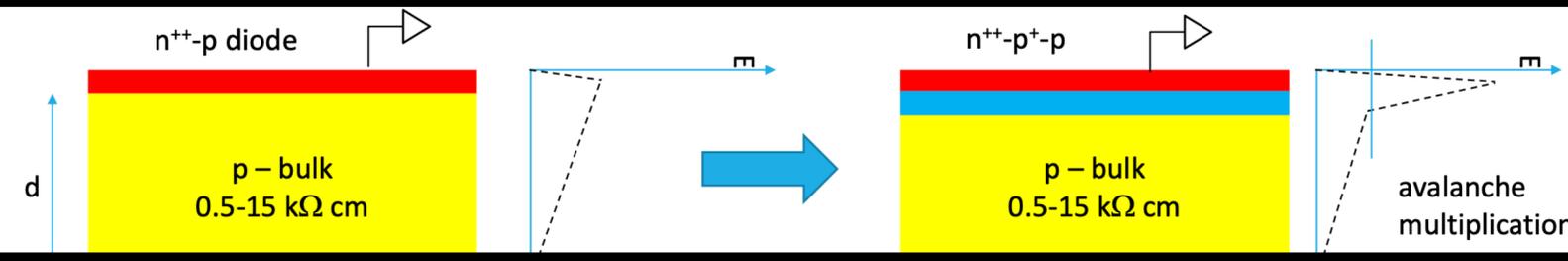
# 研究方法与技术路线：抗辐照LGAD传感器

- 研发一个新抗辐照硅传感器技术Low Gain Avalanche Diode (LGAD)
  - 雪崩增益~50, 信噪比高, 无暗计数, 优秀时间分辨率~30皮秒
  - 很强国际竞争: 日本滨松, 意大利FBK, 西班牙CNM, 英国Micron, 中国: 高能所、科大、微电子所



## PN结传感器

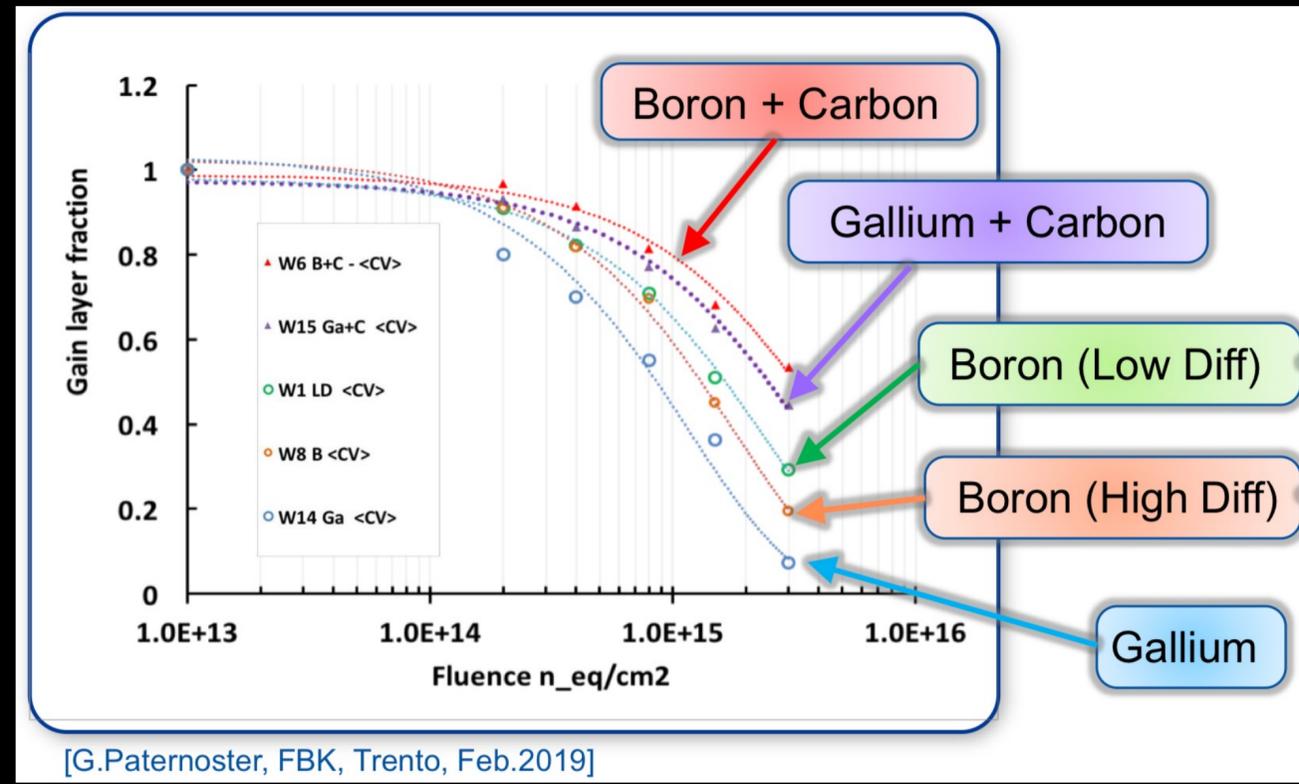
## LGAD低增益雪崩硅传感器



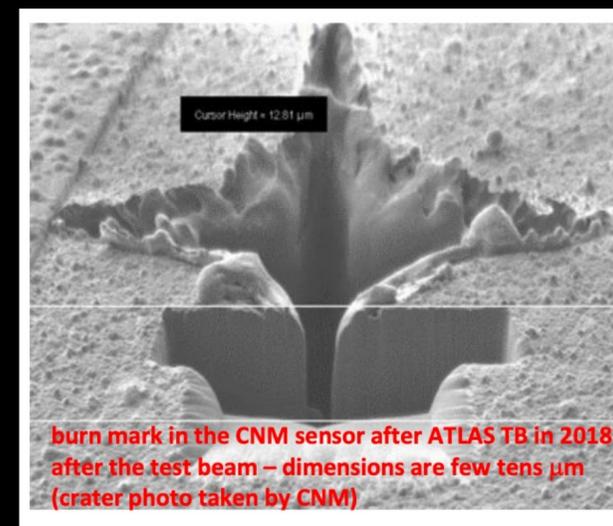
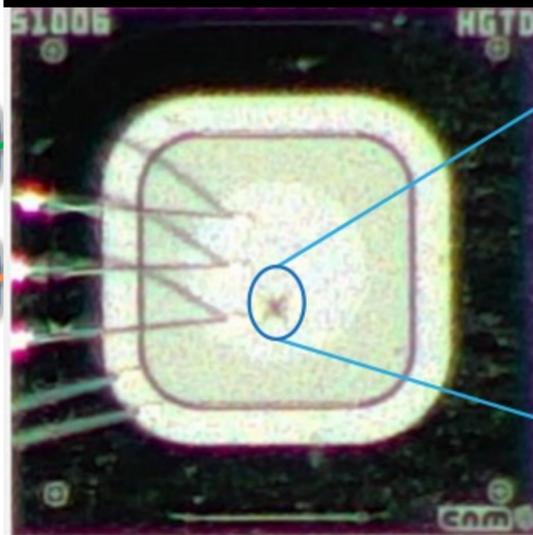
$$\sigma_{jitter}^2 = \left( \frac{t_{rise}}{S/N} \right)^2$$

# 研究方法与技术路线：抗辐照LGAD传感器

- 挑战：
  - 抗辐照性能要求：承受 $2.5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ 的等效中子通量的辐照，和200Mrad的电离辐照
  - LGAD传感器在质子对撞机最大困难：单粒子击穿效应
    - 辐照后的LGAD在束流实验中，容易出现单粒子击穿效应



## 单粒子击穿效应



## 束流实验



# 研究方法与技术路线：抗辐照LGAD传感器

**承担任务：** ATLAS实验高粒度时间探测器(HGTD) 将100%采用项目组研发的LGAD传感器

- 欧洲核子中心CERN采购高能所研制的LGAD，超过1万片，占其中66%
- **这是CERN在LHC实验首次采购国产硅传感器。** 未来有望用于CMS实验的时间探测器
- 高能所与科大的LGAD实物贡献占34%

## 技术路线：

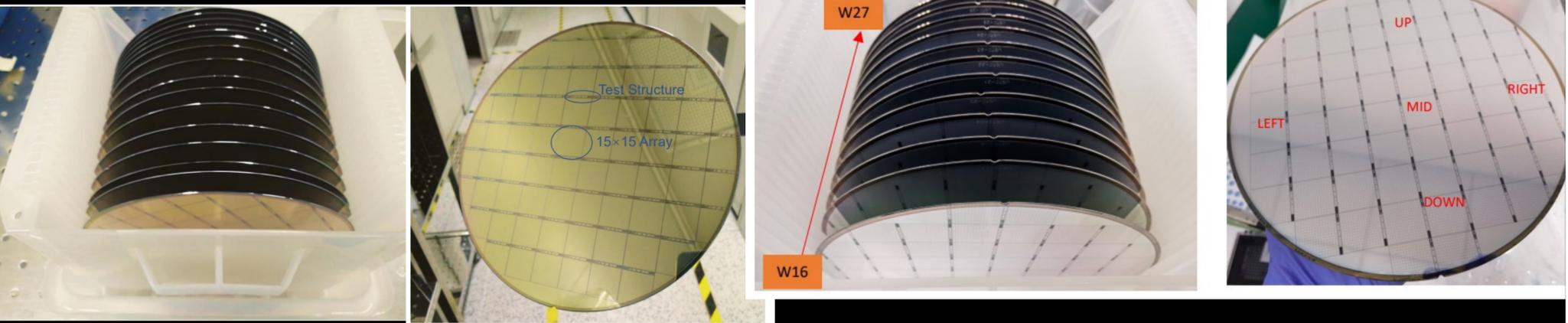
- 采用掺碳等加固技术提高LGAD抗辐照性能
- 工艺优化，提高成品率→ 研制大面积传感器

## 最新进展：

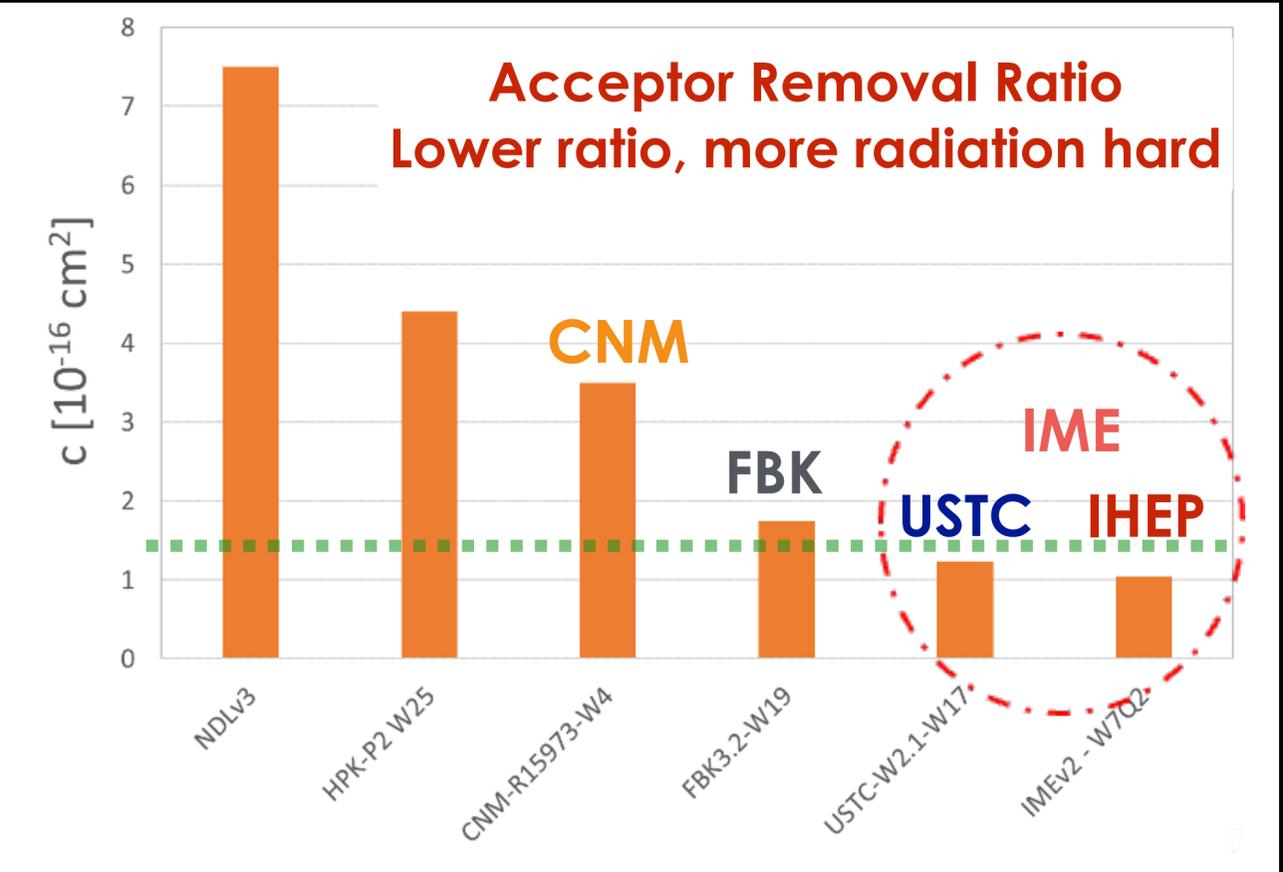
高能所与科大分别独立完成了预生产研制任务

高能所-微电子所  
预生产研制的LGAD

科大-微电子所  
预生产研制的LGAD



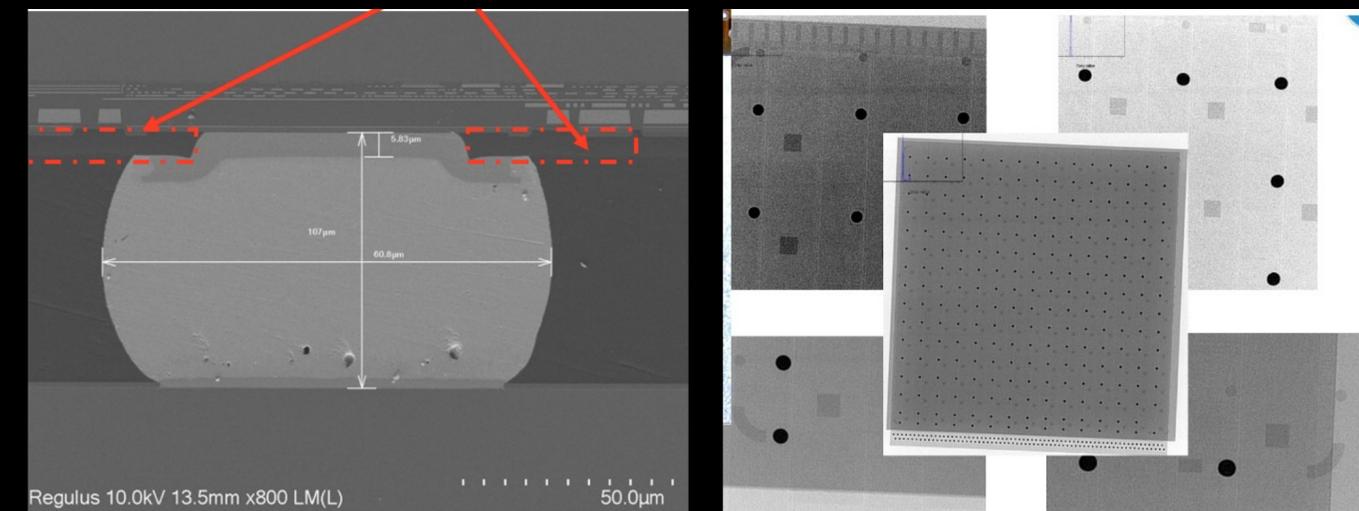
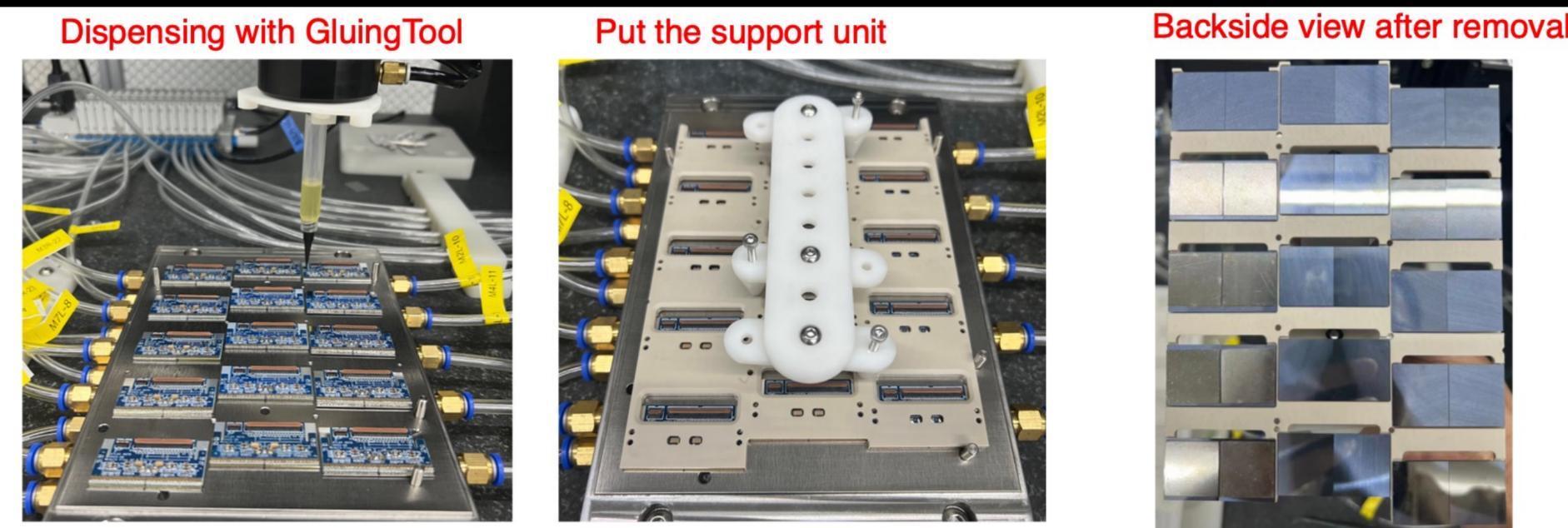
## 项目组LGAD抗辐照性能目前世界最好



# 研究方法与技术路线：探测器组装

- **任务：**
  - 承担50%LGAD传感器与超快读出ASIC的倒装焊封装，承担100%探测器模块PCB板研制（高能所）
  - 承担44% ATLAS实验HGTD探测器的探测器组装任务（高能所34%，科大10%）
- **挑战：**
  - 倒装焊的稳定性，模块的热循环后焊球脱落的问题
  - 组装大面积探测器的精度，可靠性与可重复性的问题
- **技术路线：**
  - 与国内业界合作研制与倒装焊等工艺
  - 主导研发全自动系统，高精度完成大面积探测器组装

## 倒装焊工艺优化



# 研究方法与技术路线： 高压系统与柔性电子学尾板

## 挑战：

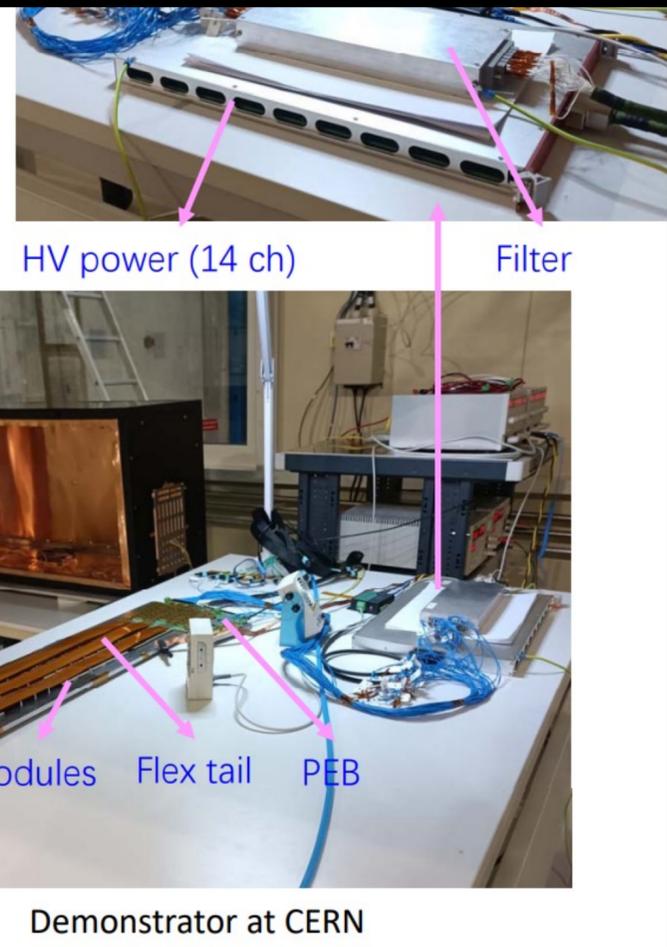
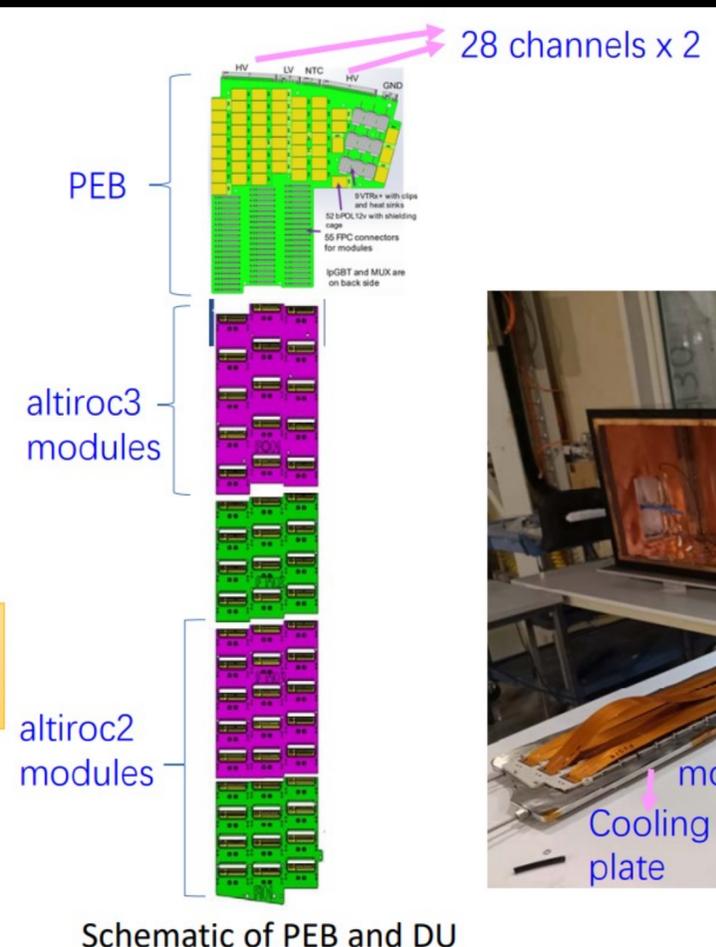
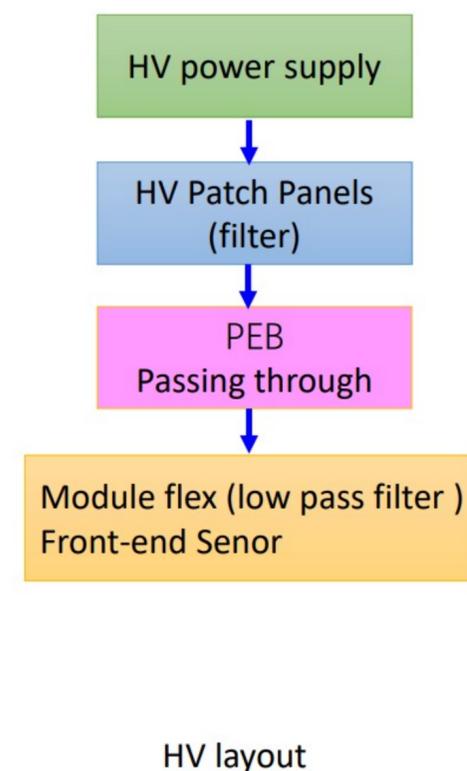
- 高压电源系统对漏电流测量精度达到**百纳安级**，需要**8000**多路独立高压
- 面临CANE等国际公司的强力竞争

## 技术路线

- 高能所、山大与国内公司合作研制高压电源，优化漏电流监测部分的电路
- 主导ATLAS实验HGTD项目电子学设计，测试不同接地方案对探测器的影响



### ■ HV layout



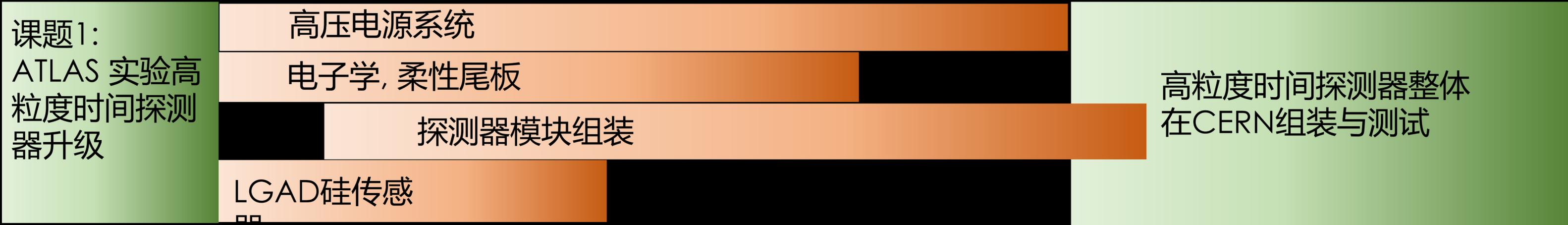
# 研究方法与技术路线：前端电子学板

- **挑战：**
  - 不规则形状的二十多层电路板，集成多个高速数据传输与电源模块，需要同时与数十个模块通讯
  - 欧洲核子中心在 2023 年对 LHC 升级项目 P2UG 评审意见
    - It is comparable with the most difficult boards manufactured for HEP projects
- **技术路线**
  - 与多个国内公司合作，优化工艺，选出最佳工艺方案
- **最新进展**
  - 高能所与南大完成第一个前端电路板样机设计
  - 南大与国内 4 个公司合作，都分别研制出前端电子学板的样机



HV, LV, Cooling plate prototype  
Electronics : PEB 1F + flex tails + 54 modules mounted on 4 support units (detector unit)

# 进度安排



第一年                      第二年                      第三年                      第四年                      第五年                      2029

2024

项目结题

# 进度安排：第一年

- **工作任务：**

- 完成LGAD 超快硅传感器的预生产研制
- 开始探测器模块、柔性电路板尾板的预生产研制；
- 电子学外围电路板的预生产研制；
- 高压电源的预生产研制

- **考核指标：**

- 完成LGAD传感器预生产，研制出正式的全尺寸LGAD传感器，满足ATLAS实验要求

- **成果形式**

- LGAD传感器预生产研制报告

# 进度安排：第二年

## • 工作任务：

- 全尺寸LGAD 超快硅传感器的正式生产研制；
- 电子学外围电路板的正式生产研制；
- 高压电源的正式生产研制
- 探测器模块、柔性电路板尾板的预生产研制；

## • 考核指标：

- 完成探测器模块、柔性电路板尾板、高压电源的预生产研制，满足ATLAS 实验要求
- 完成全尺寸LGAD 超快硅传感器的正式生产研制的工作，通过测试满足ATLAS 实验要求，**正式生产研制的LGAD硅传感器的时间分辨率达到30-50 皮秒。**

## • 成果形式

- 探测器模块的预生产研制的报告
- LGAD传感器正式生产研制的报告

# 进度安排：第三年

## • 工作任务：

- 探测器模块、柔性电路板尾板的正式生产研制；
- 电子学外围电路板的测试；
- 高压电源的正式生产研制
- 探测器模块正式生产研制；
- 电子学外围电路板在欧洲核子中心开始总体组装；

## • 考核指标：

- 基本完成探测器模块正式生产组装工作
- 完成电子学外围电路板、柔性电路板尾板的正式生产研制与测试工作

## • 成果形式

- 电子学外围电路板的测试报告

# 进度安排：第四年

## • 工作任务：

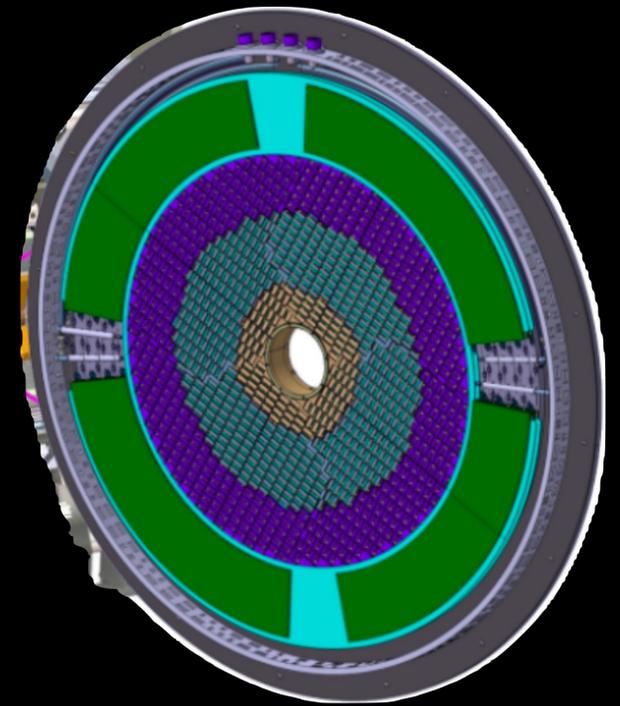
- 完成多个探测器模块的探测器单元的正式生产研制；
- 电子学外围电路板在欧洲核子中心总体组装；
- 完成高压电源的正式生产研制；
- 完成首个的高颗粒度探测器的disk 在欧洲核子中心的总体安装

## • 考核指标：

- 完成多个探测器模块的探测器单元的正式生产研制
- **正式生产研制的探测器模块的时间分辨率达到30-50 皮秒，达到ATLAS实验要求**
- 完成首个的高颗粒度探测器的disk 在欧洲核子中心的总体安装

## • 成果形式

- 探测器性能测试报告。



# 进度安排：第五年

- **工作任务：**

- 完成高颗粒度时间探测器的在欧洲核子中心的探测器整体联调

- **考核指标：**

- 完成探测器联调
- 正式生产研制的探测器模块的时间分辨率达到30-50 皮秒，达到ATLAS实验要求

- **成果形式**

- 结题报告

# 参与单位与人员

- **牵头单位：**中国科学院高能物理研究所， **课题负责人：**梁志均
- **参与单位：**中国科学技术大学， **单位负责人：**刘衍文
- **参与单位：**山东大学， **单位负责人：**胡坤
- **参与单位：**南京大学， **单位负责人：**夏力钢

## 分工：

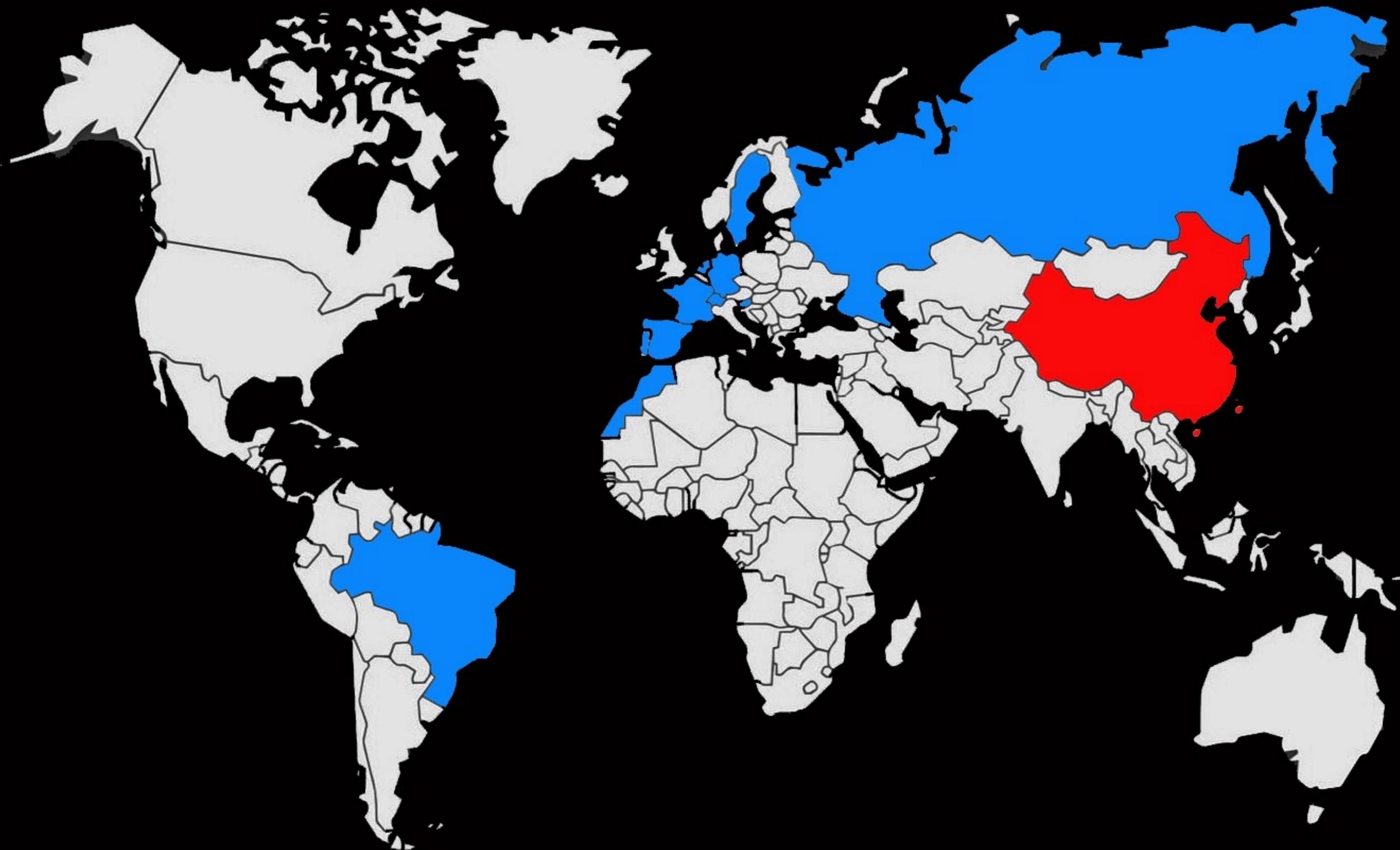
- **LGAD传感器研制：**高能所、科大
- **前端电路板：**高能所、南大
- **高压电路系统：**高能所、山大
- **柔性尾板：**山大
- **HGTD整体安装调试：**各单位均参与

Joao	高能所	项目负责人，HGTD项目经理
梁志均	高能所	课题负责人，HGTD模块召集人
赵梅	高能所	HGTD项目传感器召集人
张杰	高能所	HGTD项目电子学召集人
张照茹	高能所	HGTD项目风险管理召集人
樊磊	高能所	HGTD项目高压电源系统召集人
付金煜	高能所	探测器模块组装
刘衍文	科大	LGAD传感器研制
胡坤	山大	柔性电子学尾板的研制
刘彦麟	山大	高压电源研制
夏力钢	南大	前端电路板研制

# International Cooperation (国际合作)

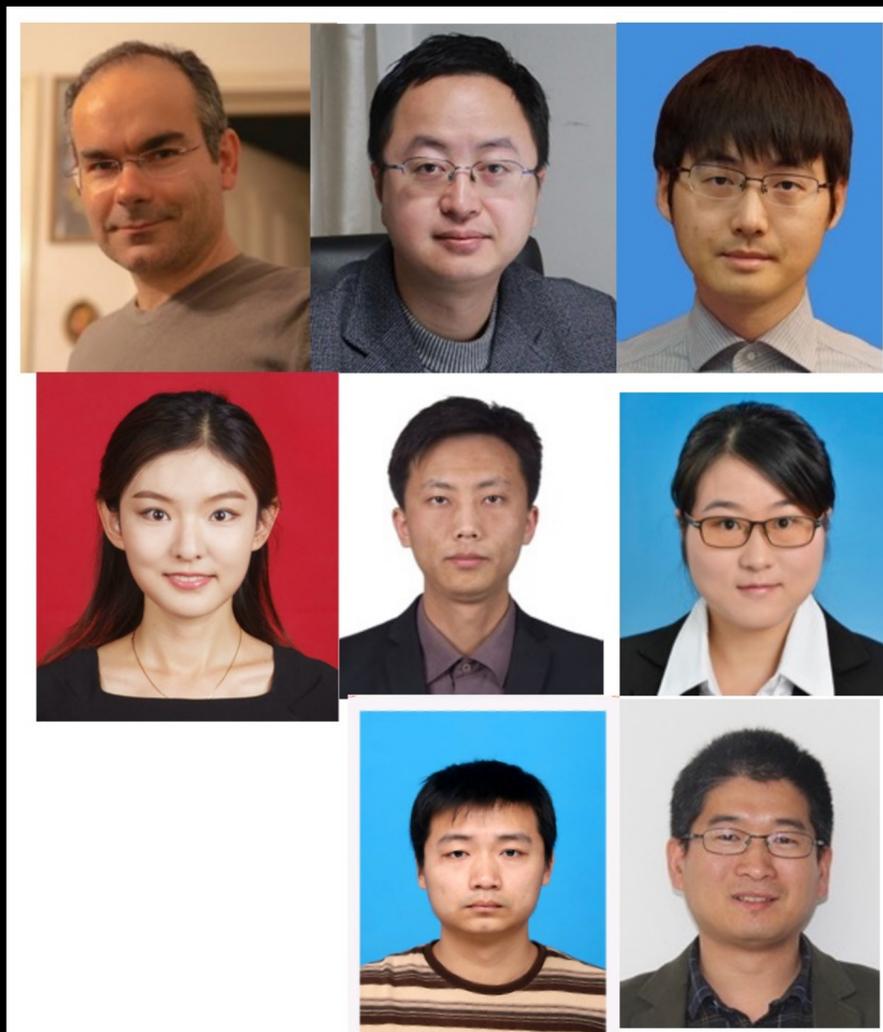
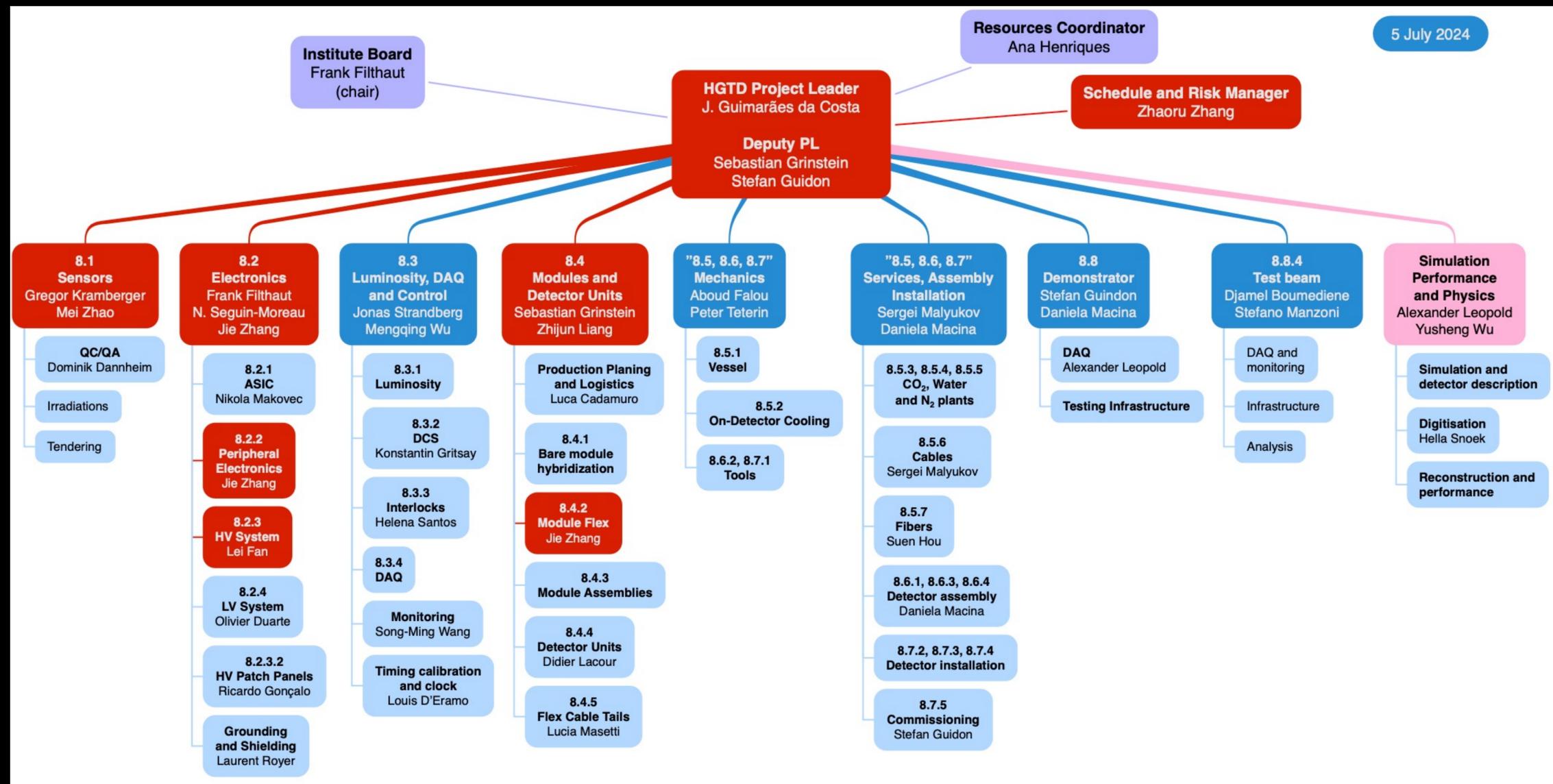
## 课题1 (HGTD):

Brazil  
China  
France  
Germany  
JINR  
Morocco  
Netherlands  
Portugal  
Russia  
Slovenia  
Spain  
Sweden  
CERN



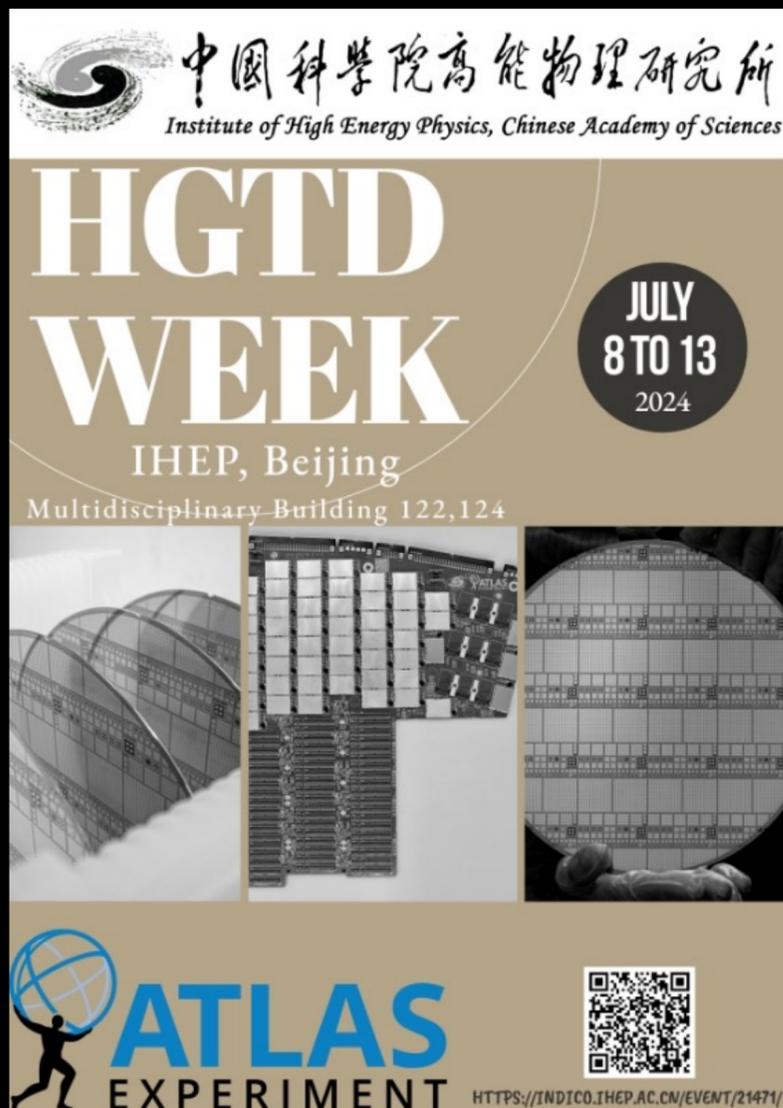
# 中国组在HGTD国际项目的管理职位

- 高能所Jiao担任HGTD探测器项目经理，ATLAS实验Level-1管理职位
- 中国组首次在LHC实验子探测器担任项目经理
- 5人担任探测器Level-2召集人（梁志均，赵梅，张杰，张照茹、吴雨生）
- 2人担任探测器Level-3召集人（张杰，樊磊），1人担任speaker committee（刘衍文）



# 国际合作与组织管理

- **本课题的会议：**本课题将组织参与单位定期讨论会，与年度会议
- **国际项目组方面：**
  - Joao负责组织HGTD项目高层steering会议
  - 梁志均、赵梅、张杰、张照如组织HGTD国际项目在模块、传感器、电子学、风险管理方面的会议
  - 下周在高能所举办年度的HGTD week工作组国际会议



中国科学院高能物理研究所  
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

# HGTD WEEK

JULY 8 TO 13 2024

IHEP, Beijing  
Multidisciplinary Building 122, 124



ATLAS EXPERIMENT



[HTTPS://INDICO.IHEP.AC.CN/EVENT/21471/](https://indico.ihep.ac.cn/event/21471/)



# Risk Analysis (风险分析)

The project is challenging and a key contribution to the ATLAS upgrade

- **The overall risk of the project is low**
  - The project team has rich experience in research and development
  - The research unit is supported by multiple detector research and development platforms
- **The two main risks (两个最主要的风险)**
  - **风险1: Degradation of international relations** prevent access to some advanced technologies from abroad (e.g. ASICs)
    - **Mitigation:** Collaborate with international colleagues to execute some of the tasks abroad
  - **风险2: Delay of LHC Upgrade Project** — the ATLAS upgrade is organized in a large international collaboration involving many institutions with interconnected work with centralized overall planning, so delays can occur due to issues outside our control
    - **Mitigation:** Work with ATLAS management to minimize impact to the project. The large international team will ensure that the project is feasible even if delays occur.

# 预期成果与创新点

## 第一个用于对撞机实验的硅基高精度时间探测器

- 粒子物理第一个硅基的时间探测器，30-50皮秒时间分辨率
- 国产LGAD传感器是目前世界上最抗辐照的

## 预期经济社会效益

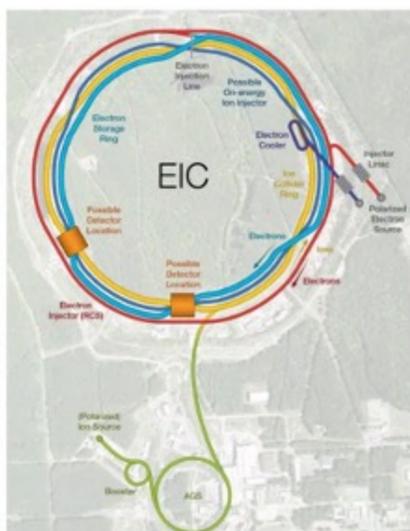
高颗粒度时间探测器的研制将发展很多种新技术，包括高时间分辨的抗辐照传感器技术、前端电子学超快芯片技术、大面积超快探测器集成技术等。

项目所研发的硅探测器具有高时间分辨率、高空间分辨率和抗辐照等优异性能，可以广泛应用于核物理实验与粒子物理实验、同步辐射成像与X射线成像、医疗成像、航空航天探测等重要领域。

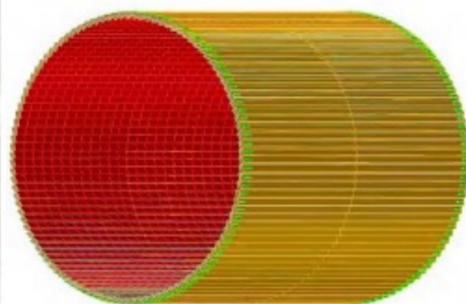
通过研制国产硅传感器，使更多的年轻科学工作者参与先进半导体探测器工艺研究，促进国内相关厂家掌握关键技术。

# 预期经济社会效益

## Electron-Ion Collider (EIC): Timing-tracker

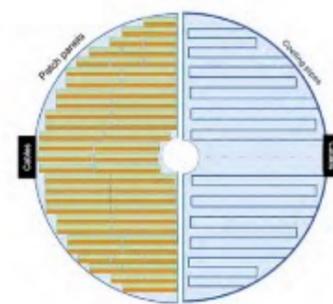


Barrel AC-LGAD detector



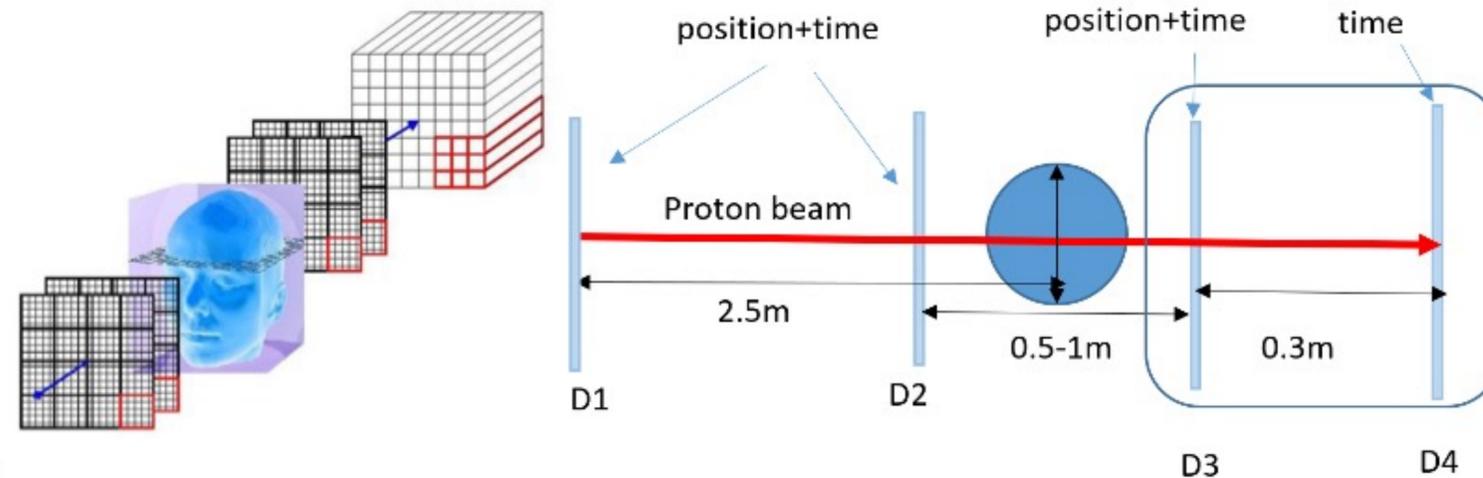
10.9 m<sup>2</sup>

Hadron endcap AC-LGAD detector

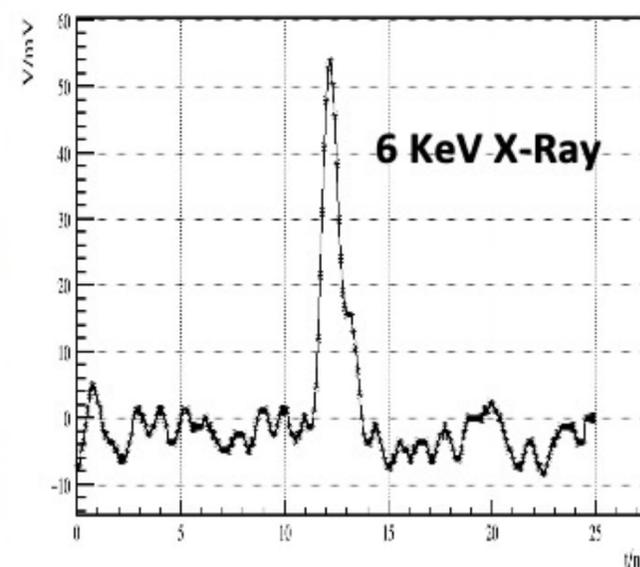


2.22 m<sup>2</sup>

## 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
- ...

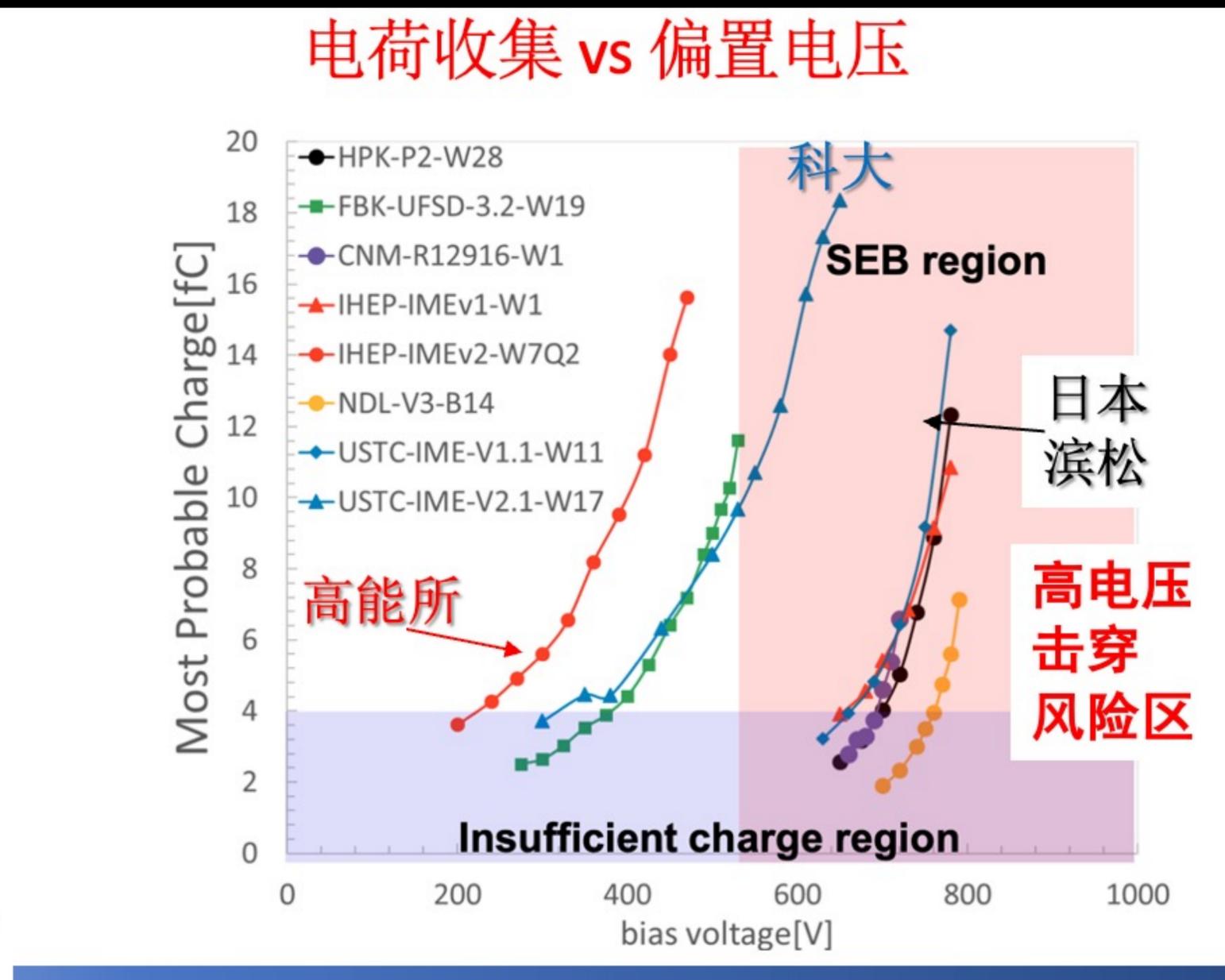
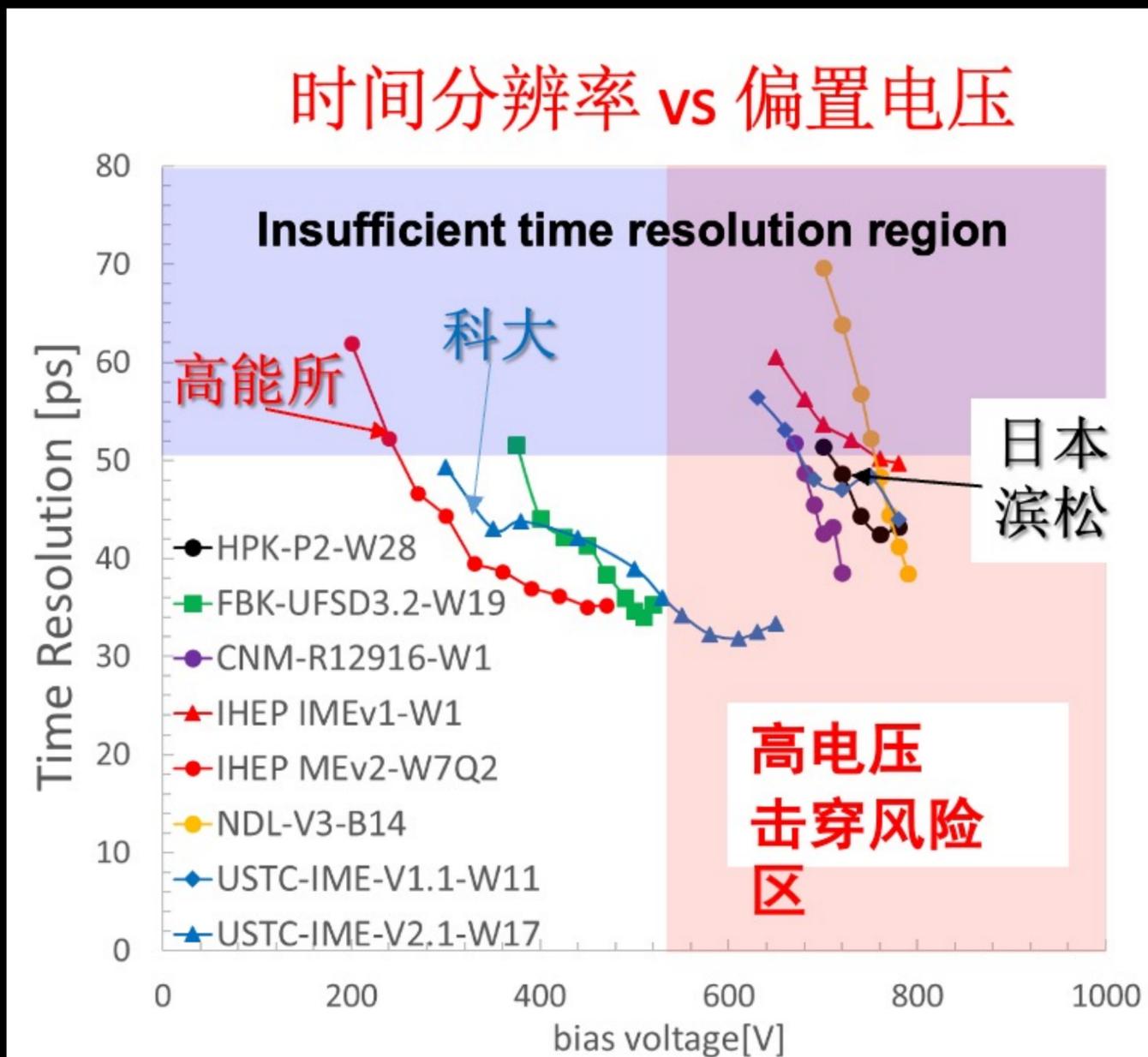
# Extra Slides

# LGAD传感器在辐照后的性能 ( $2.5e15 \text{ cm}^{-2}$ 等效中子通量)

## 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

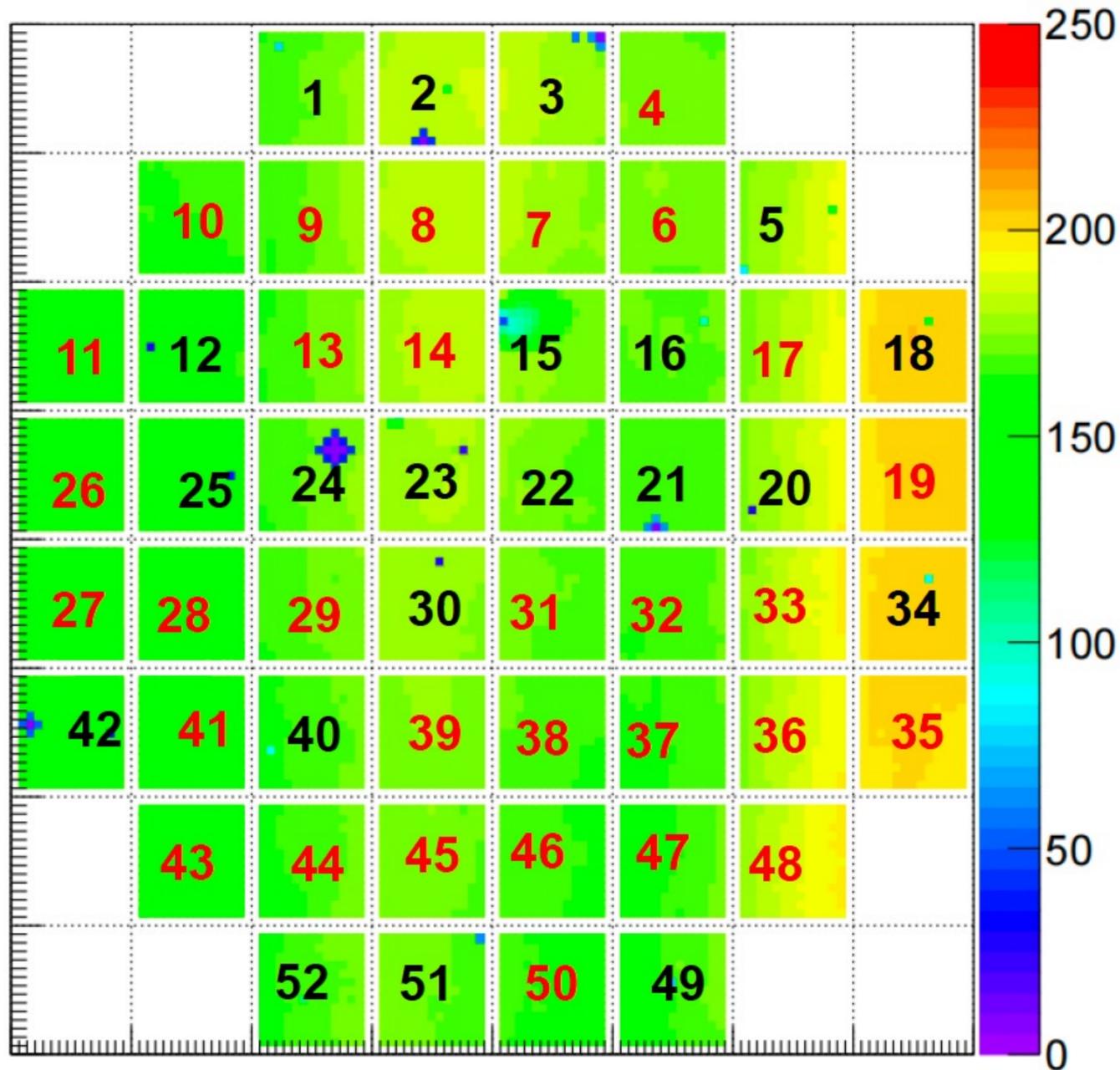
4fC以上的电荷收集, 工作电压低于550V (避免烧毁)



# 研究方法与技术路线：高能所预生产研制LGAD传感器

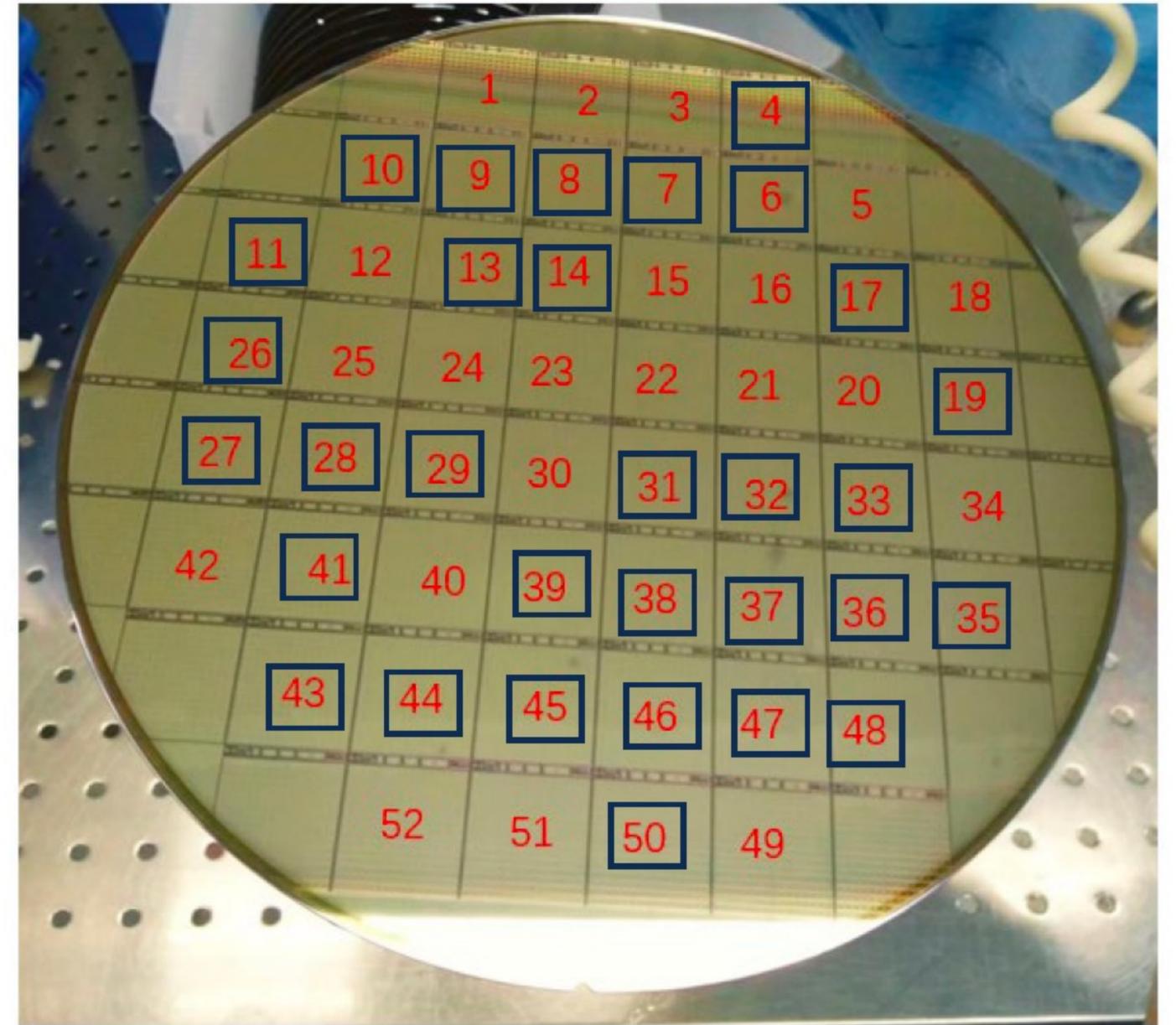
## 技术路线：

- 工艺优化，提高成品率→ 研制大面积传感器



A	B
Sensor	yield
1	
2	
3	
4	good
5	
6	good
7	good
8	good
9	good
10	good
11	good
12	
13	good
14	good
15	
16	
17	good
18	
19	good
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	good
27	good
28	good
29	good
30	
31	good
32	good
33	good
34	
35	
36	good
37	good
38	good
39	good
40	
41	good
42	good
43	good
44	good
45	good
46	good
47	good
48	good
49	
50	good
51	
52	

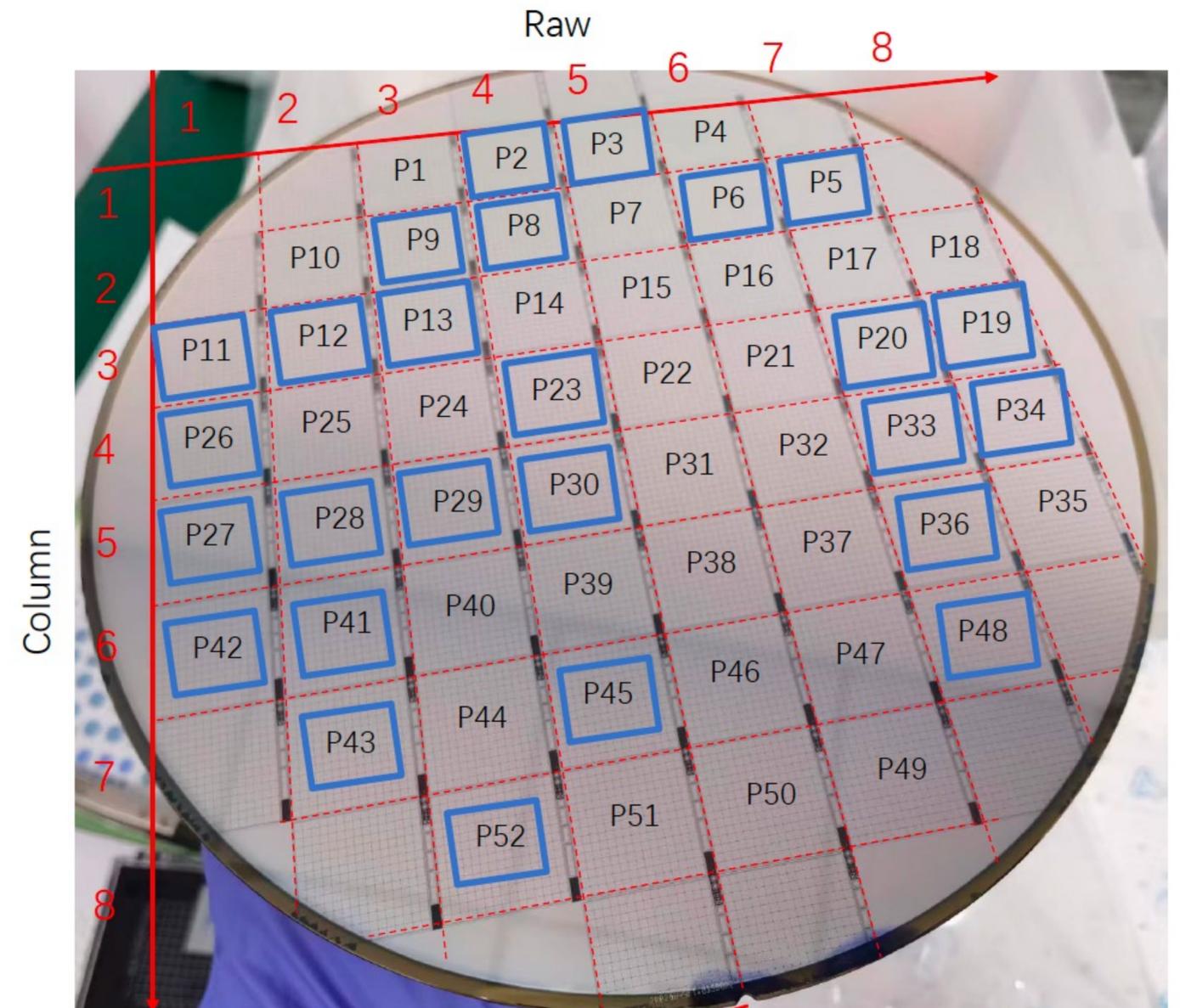
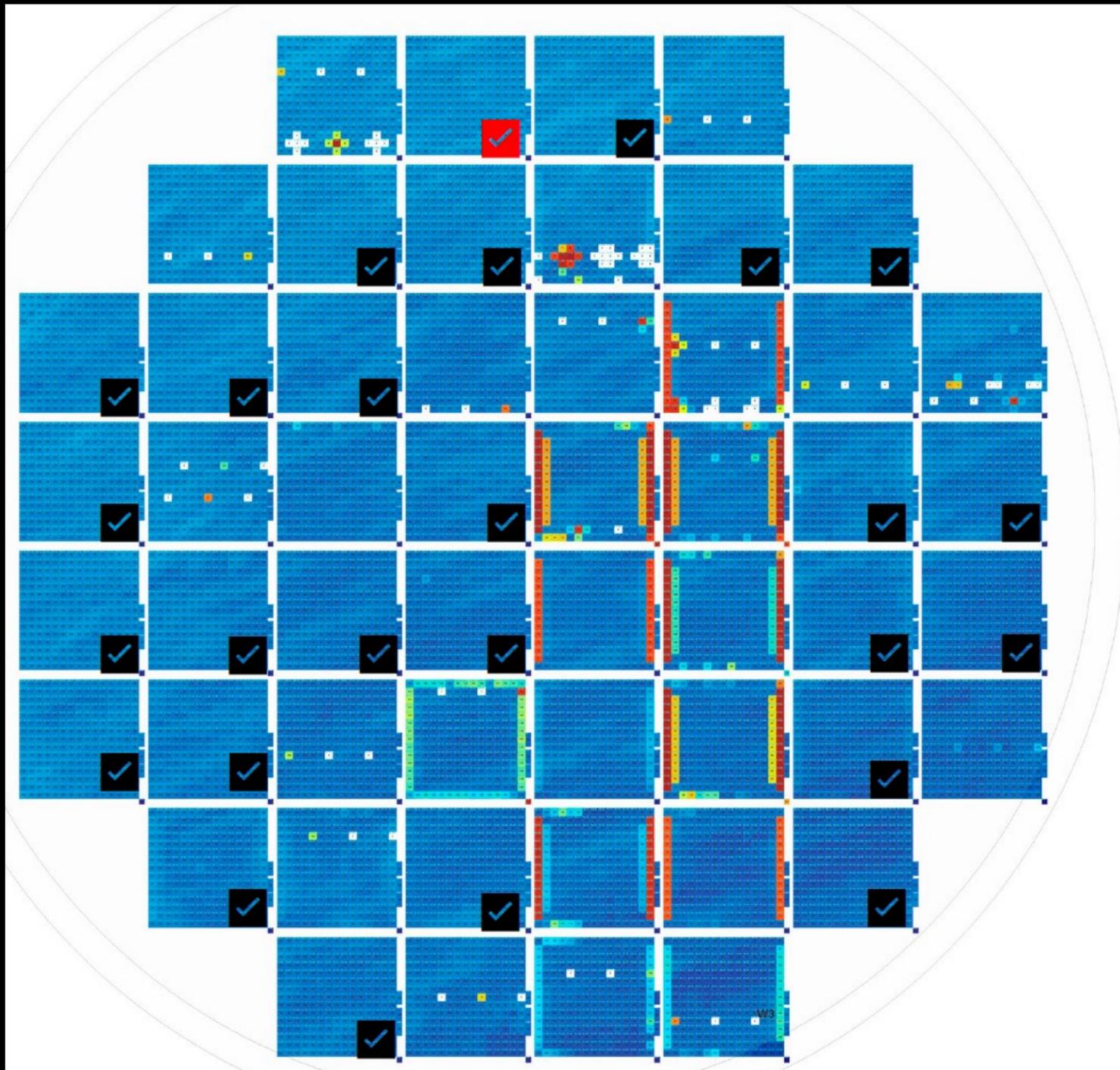
Pad Count: Pad Yield  
Sensor Count: Sensor Yield



# 研究方法与技术路线：科大预生产研制的LGAD传感器

## 技术路线：

- 工艺优化，提高成品率→ 研制大面积传感器



# 组织管理

- **本课题实行课题负责人全面负责制。**
- **课题负责人根据课题研究内容指定各方面的具体负责人，他们与课题负责人、保持密切的沟通和交流，在课题负责人的领导下开展各项研究工作。课题将定期组织课题组例会，进行课题内部的工作交流，讨论和解决各种技术问题；**
- **每年召开二次课题组研讨会，针对课题实施过程中存在的重要问题进行专题讨论；**
- **每年召开一次年终总结会，检查课题进度，安排一下年度的具体工作。**
- **课题负责人与项目负责人定期保持密切的沟通和交流，确保项目整体进度。**