

LGAD质子能量测试系统 进展与其他应用

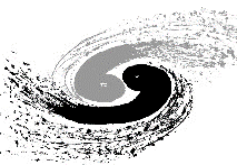
李梦朝

代表项目组

中国散裂中子源
中国科学院高能物理研究

2026年10月10日·长沙

email: mzli@ihep.ac.cn



高能质子实验站 (HPES)

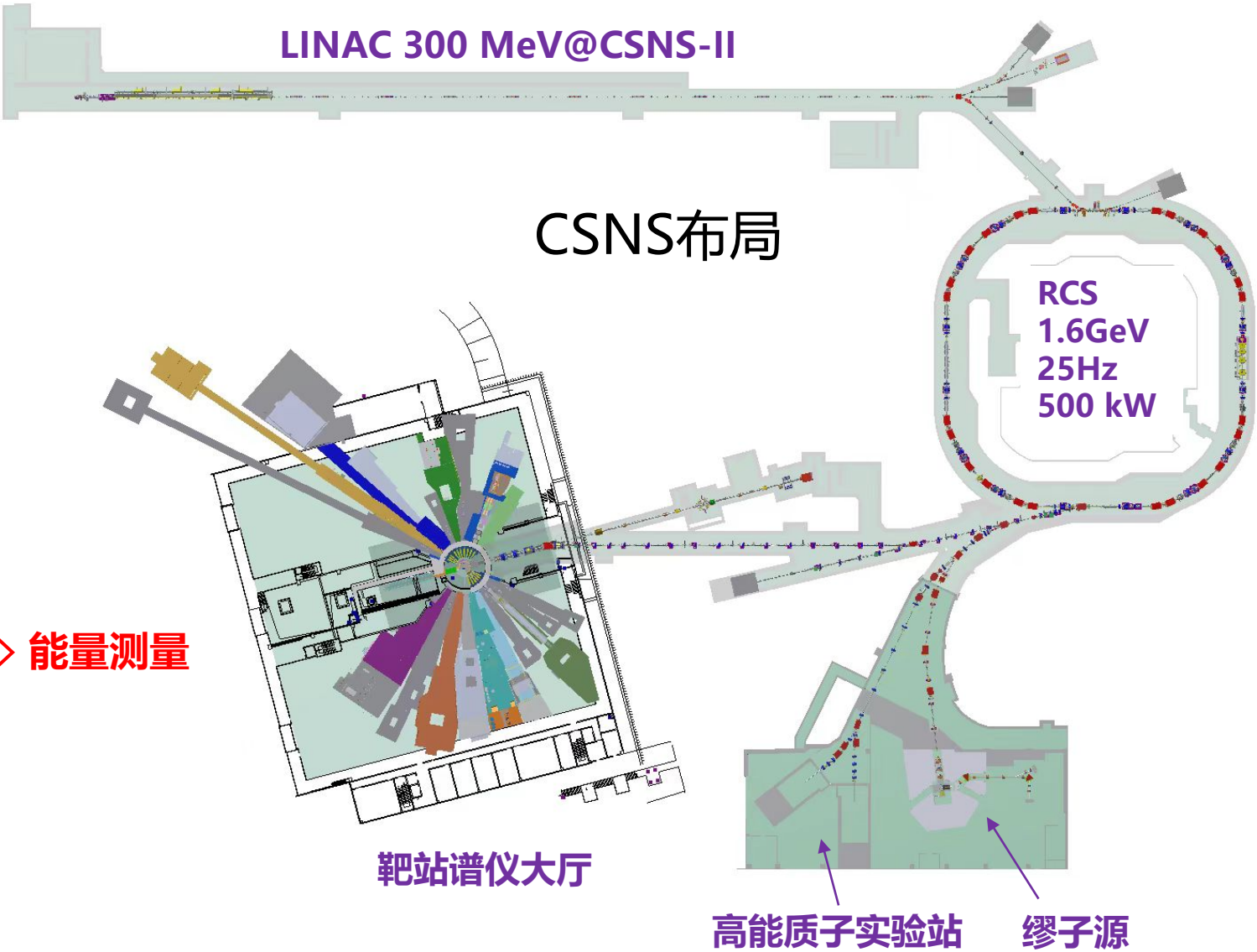


- CSNS二期规划建设的实验站之一
- 中国第一台1.6 GeV质子源
- 主要用于先进探测器的研发和测试

高能质子测试束参数

参数名称	设计指标
质子能量范围	0.8-1.6 GeV
质子脉冲频率	>1000 Hz
质子流强	>2*10 ⁶ n/cm ² /s
质子空间分辨	<10 μm

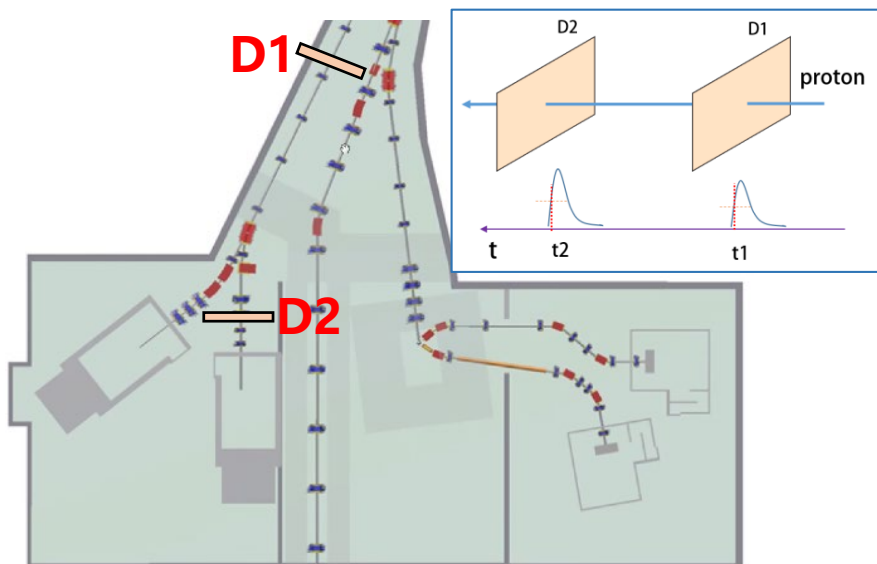
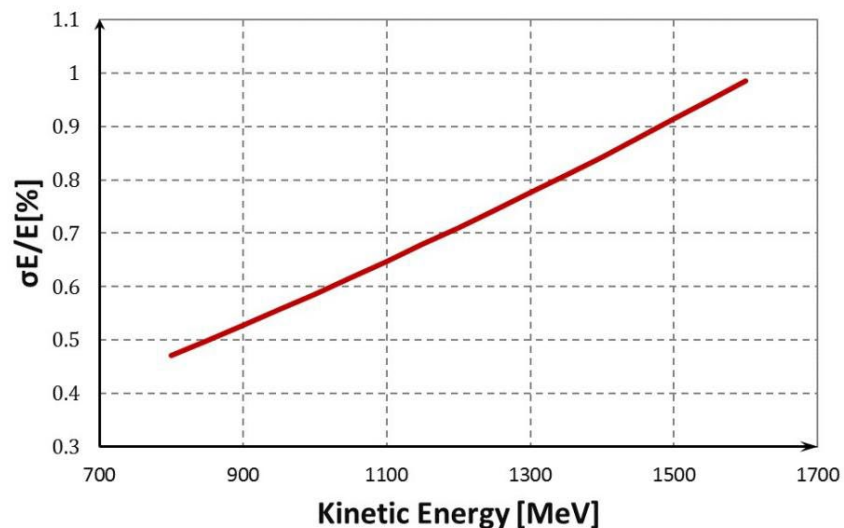
➡ 能量测量





质子通过降能器后，能量在800-1600MeV范围，为需求质子能量的用户提供能量参数，如量能器等。

利用飞行时间法标定能量: **要求探测器时间分辨率小于100ps (能量分辨率好于1%)**



质子能量测量方法:

- **LGAD Energy Measurement System (LEMS)**

基于 LGAD 飞行时间测量

- 质子飞行距离约 40 m
- 飞行时间 $t_2 - t_1$ -> 质子动量

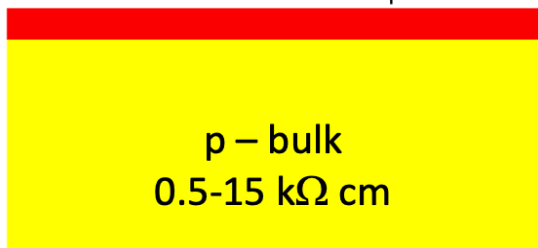
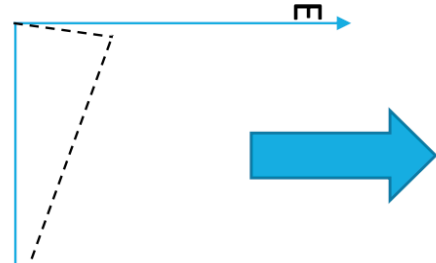
$$V = \frac{L}{(T_1 - T_2)}$$

- 1.6GeV质子飞行时间143ns
- 800GeV质子飞行时间158ns
- 探测器时间分辨率 $\leq 100\text{ps}$



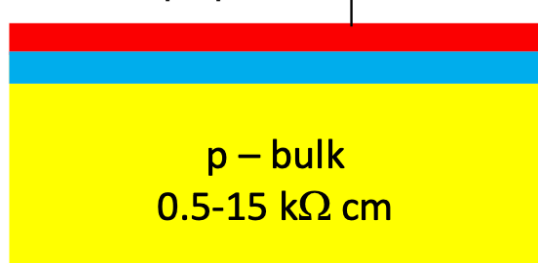
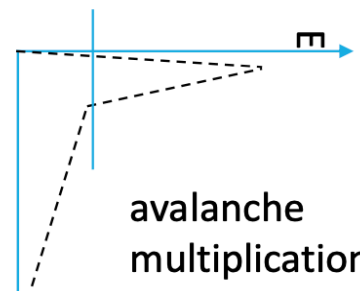
传统PIN器件

n⁺⁺-p diode



低增益雪崩二极管: 设置P+型增益层

n⁺⁺-p⁺-p



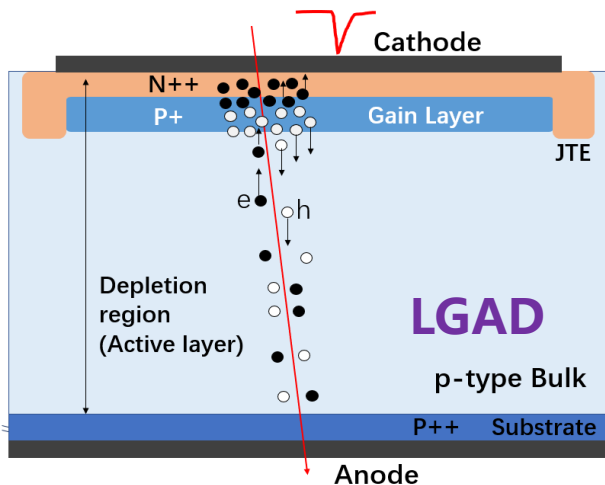
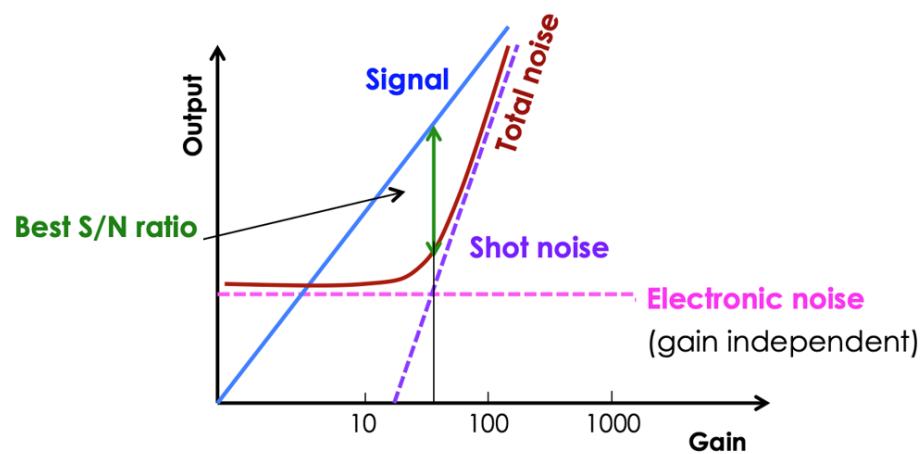
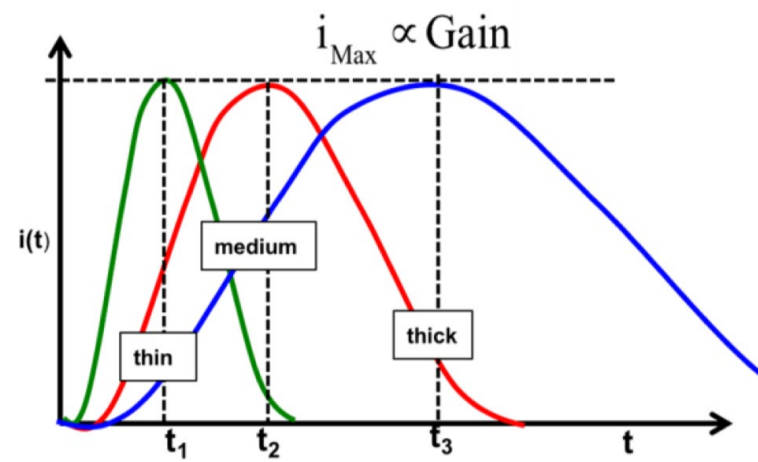
适中的增益(10-50)

- 压制散粒噪声但提升SNR
- 高信噪比, 且无暗计数

薄外延层

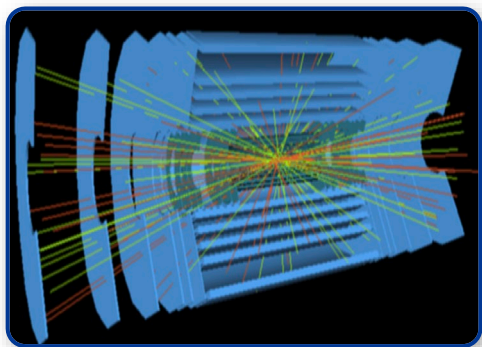
- 降低电离朗道贡献
- 短距离高速饱和漂移得到快的 t_{rise}

$$\sigma_{Jitter} = \frac{N}{dV/dt} \approx t_{rise} / \left(\frac{S}{N} \right)$$

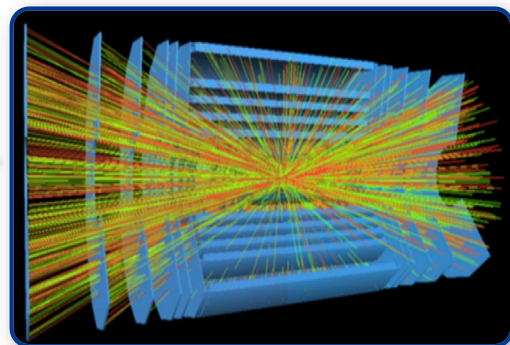


ATLAS HGTD 项目

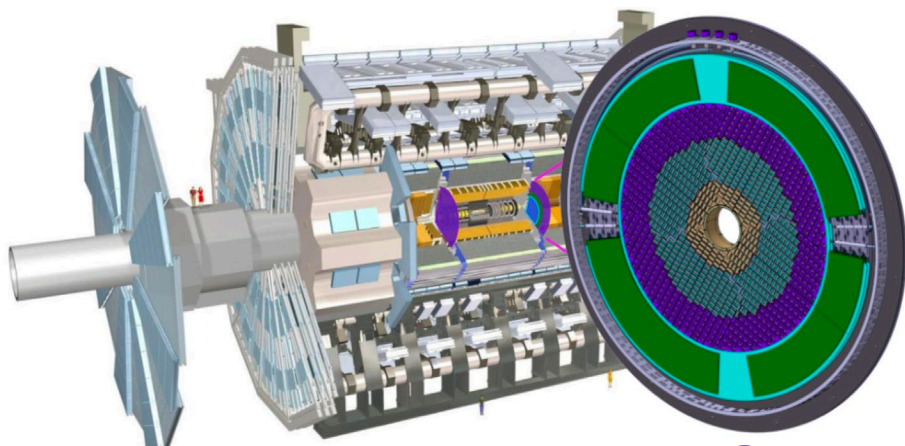
2029年升级为高亮度LHC (HL-LHC)



目前的ATLAS探测器



高亮度LHC升级后的
ATLAS探测器@2029



ATLAS探测器

HGTD

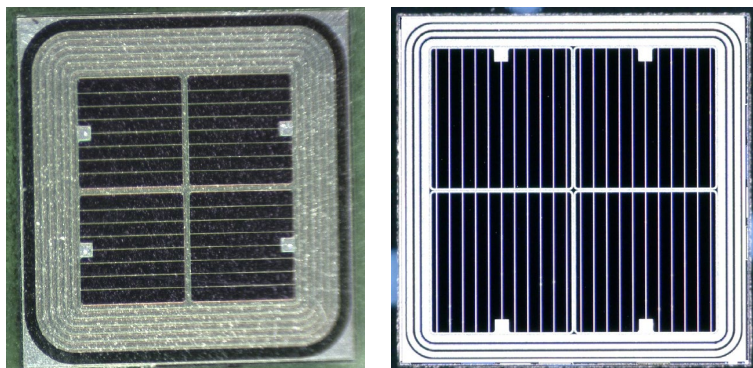
面临挑战：事例堆积、强辐照环境

- 解决高亮度LHC对撞事例堆积问题
- 把粒子到达时间的测量精度提高（纳秒→30皮秒）
- LGAD (Low-Gain Avalanche Diode)
- 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3.6M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

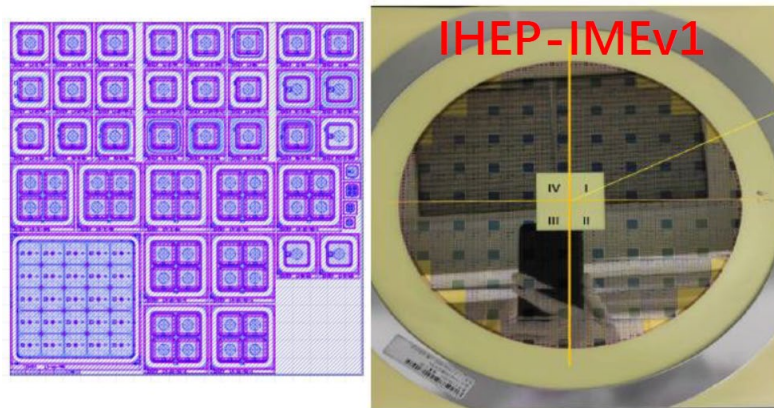
High Granularity Timing Detector (HGTD)
高颗粒度时间探测器



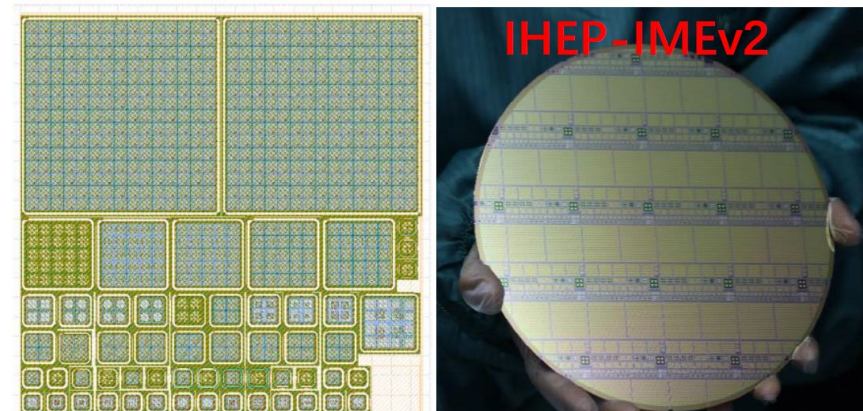
IHEP-NDL (2019)



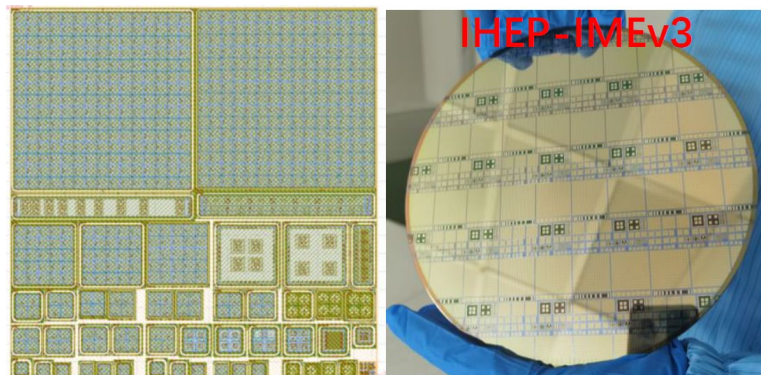
IHEP-IMEv1 (2020.9)



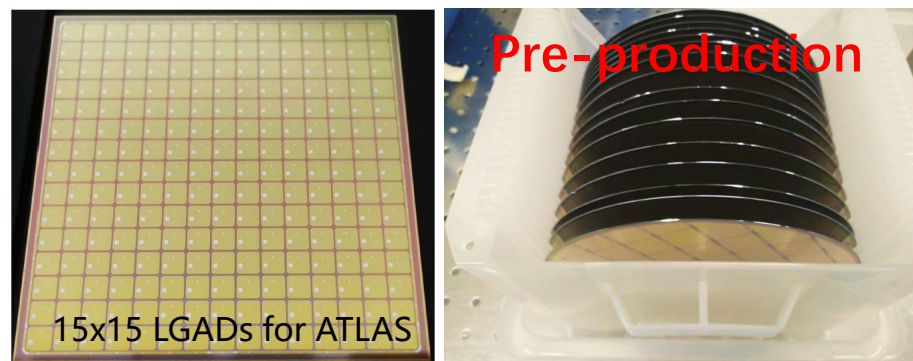
IHEP-IMEv2 (2021.6)



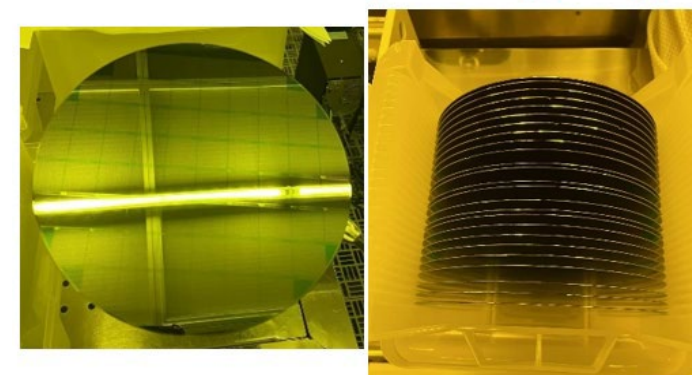
IHEP-IMEv3 (2022.5)



Pre-production for ATLAS (2023.7)

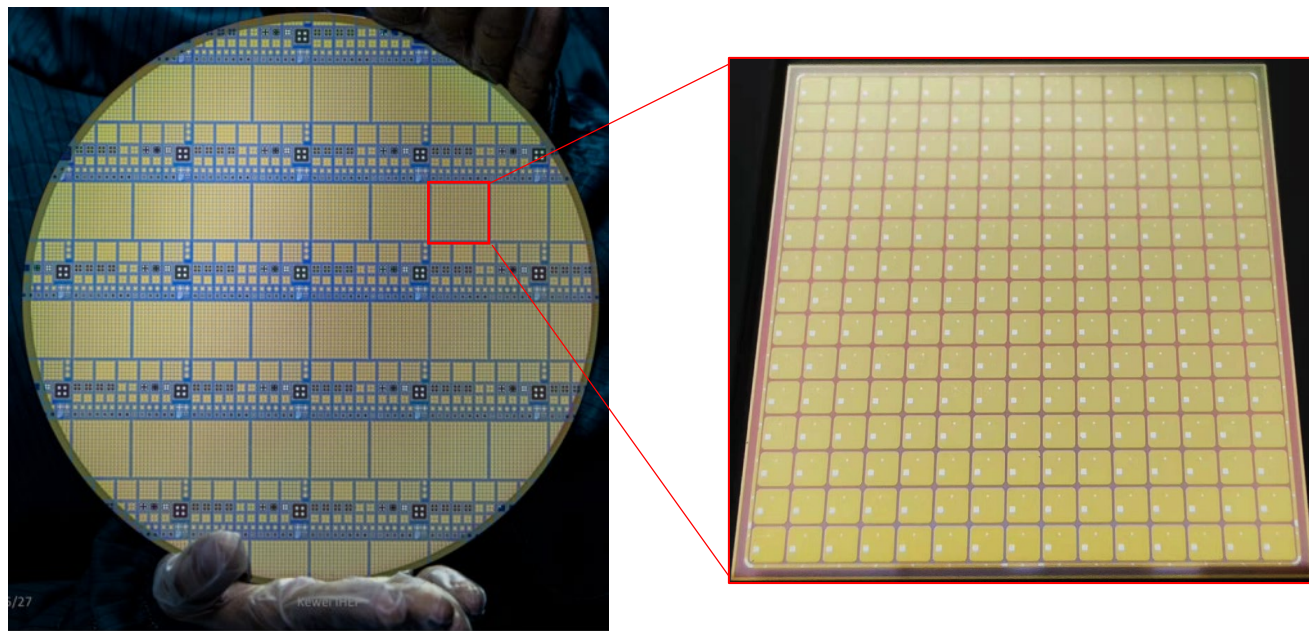


Mass production (2024.7) ongoing



欧洲核子中心 (CERN) 首次采购中国产的半导体器件, 打破日本滨松HPK垄断

HPES LGAD 探测器方案

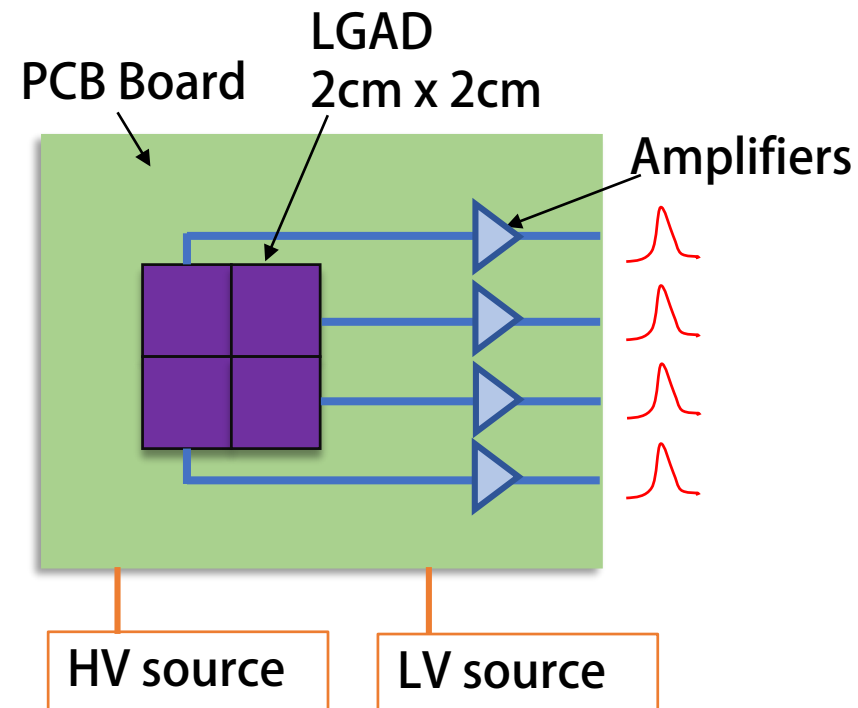


LGAD 探测器8寸晶圆

- IHEP独立设计
- 国产器件
- 抗辐照工艺

大面积LGAD器件

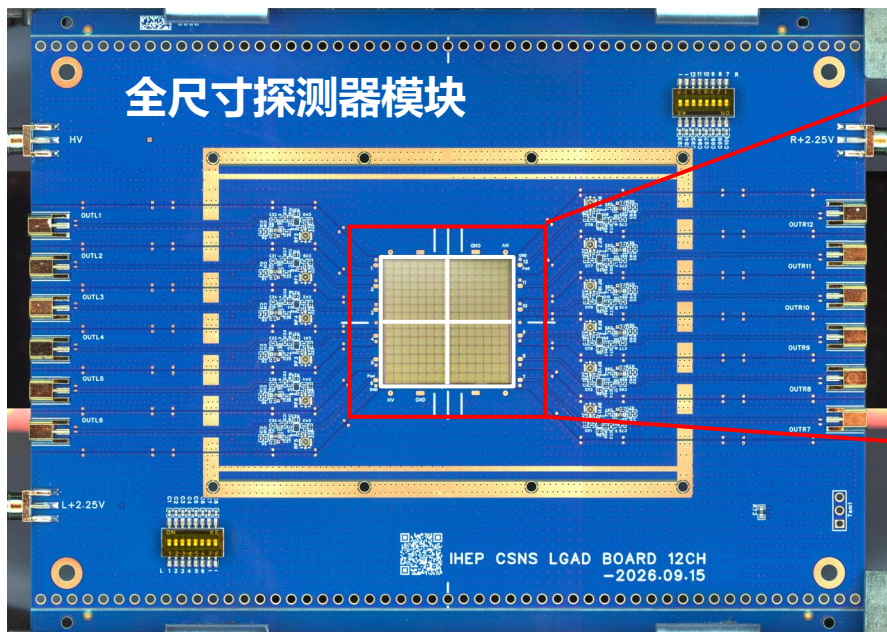
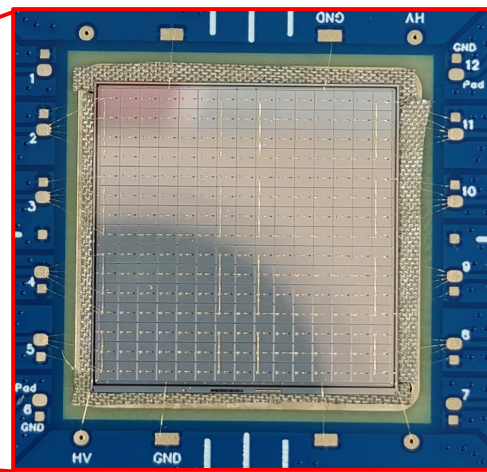
- 尺寸 $\sim 2\text{cm} \times 2\text{cm}$
- 15×15 像素阵列
- 单像素 $1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$
- 时间分辨率 $\leq 100\text{ps}$



LGAD探测器模块设计

- 分为 4 个通道读出
- 7×8 像素 (约 1cm^2) 合为一通道
- 单通道等效电容约 235pF
- 多通道读出版: 板载高带宽放大器, 高信噪比

HPES LGAD 探测器方案



多像素打线合并读出

□ 探测器模块 ✓

□ 待束流测试

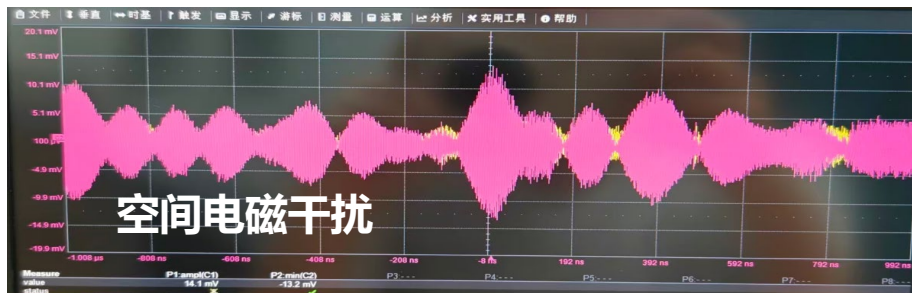
@KEK 2026.11

新LGAD探测器模块

- 超快跨阻放大器
- 设计带宽1GHz
- 高频多层板
- 降低物质量

工程问题与解决

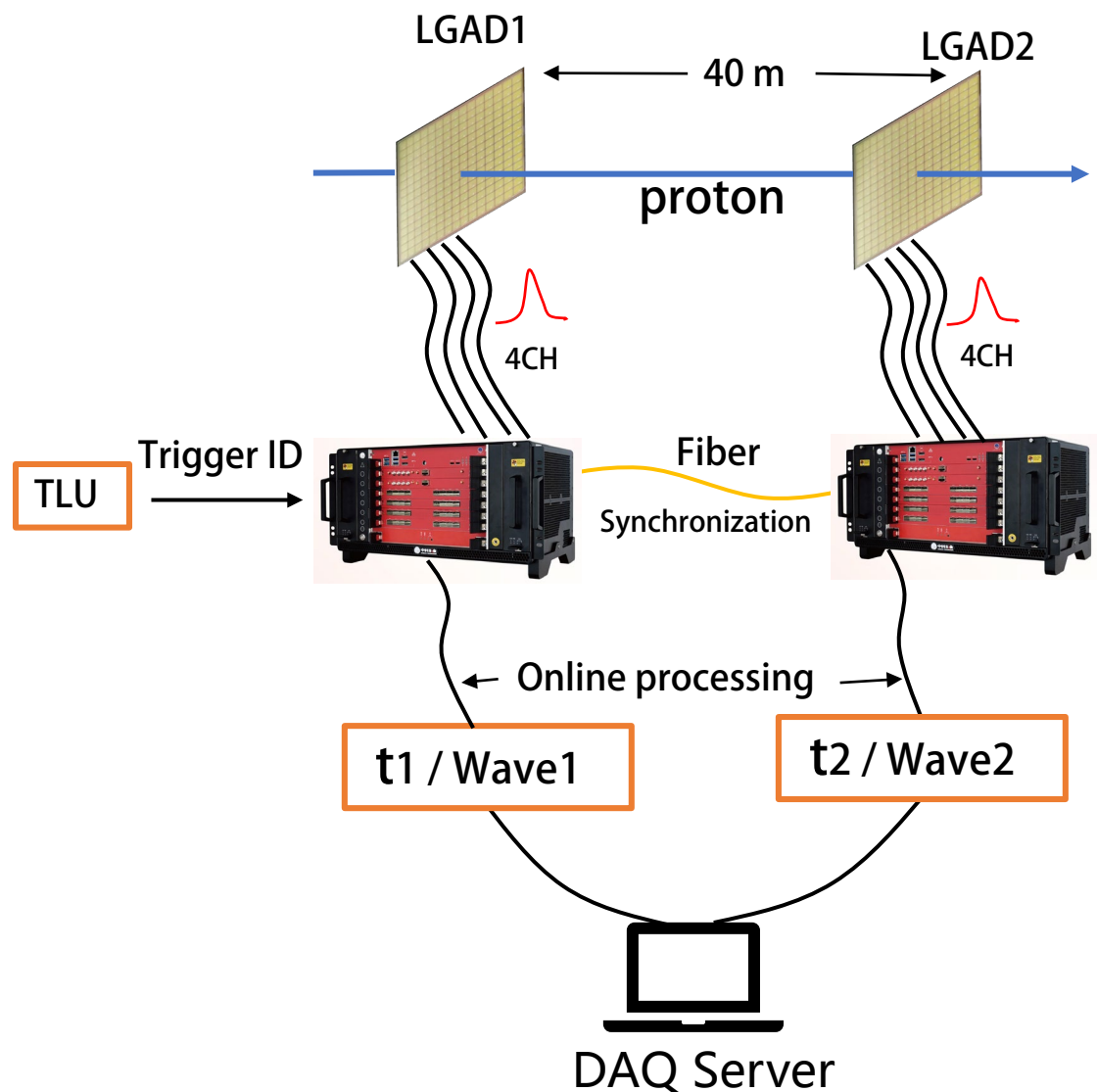
- ✗ 通道间串扰
- ✗ 空间电磁干扰
- ✓ 电源隔离与屏蔽
- ✓ PCB增加地屏蔽
- ✓ 电磁屏蔽罩、泄放



HPES LGAD 探测器电子学与数据获取方案



LGAD Energy Measurement System (LEMS)



全尺寸LGAD探测器模块*2 ✓

- **LGAD1: RABT隧道前段**
- **LGAD2: 实验终端T2**

采集卡与机箱 (到位一半)

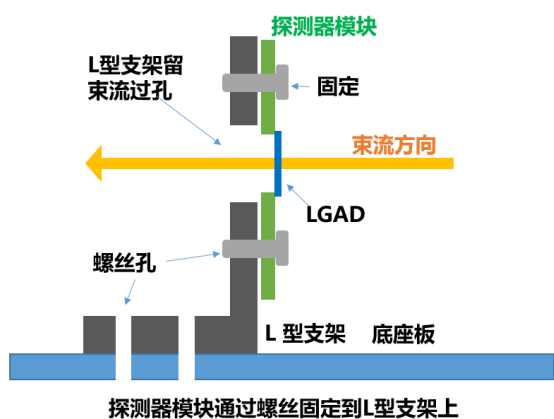
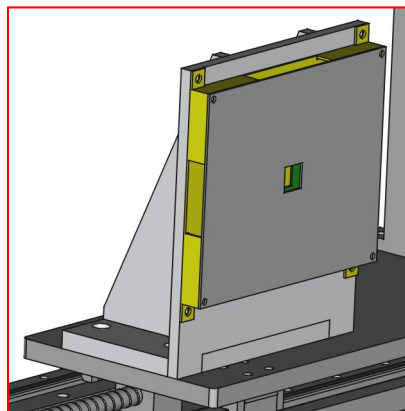
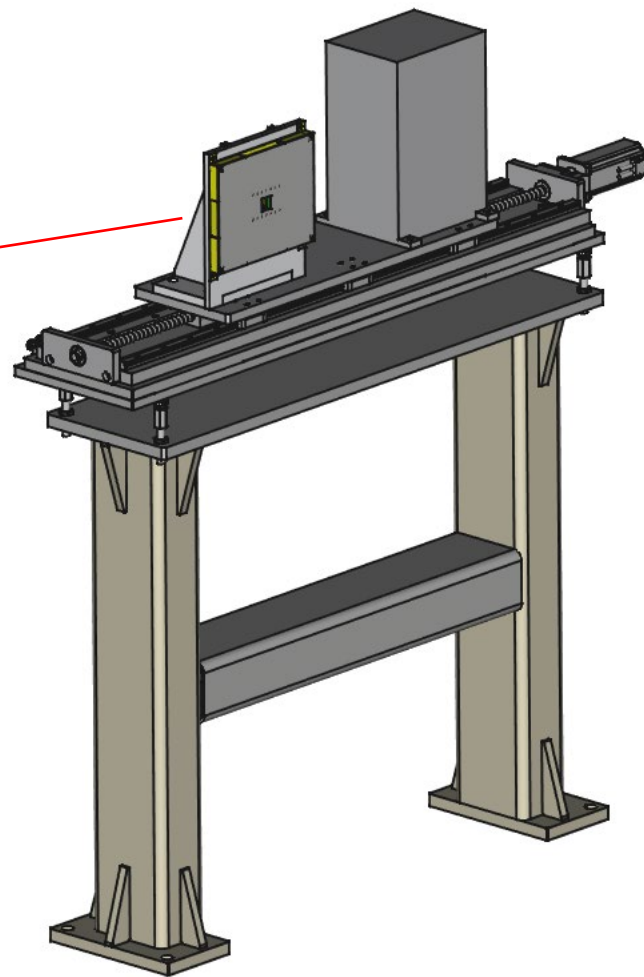
- **中科采象采集卡: 6.4Gs/S, 12bit**
- **采集机箱1: RABT隧道前段**
- **采集机箱2: 实验终端T2**
- **两机箱精准同步 (待测试)**
- **实现波形在线处理**

波形与时间信息处理 (进行中)

- **波形采集机箱进行预处理**
- **离线处理: 波形数据量预估~20MB/s**
- **在线处理: 可以直接获得时间**

HPES LGAD 探测器机械与控制方案

□ 完成设计 ✓



- 两组LGAD探测器模块 (LGAD1和LGAD2) 均放置于空气中环境中
- 设计探测器模块支架，并固定于一维平移台，根据实验需求进行位置调整

HPES LGAD能量测量系统工作计划

- 全尺寸探测器模块束流测试@KEK 2026.11
- 采集板卡完善、机箱间时间同步调试
- 在线数据处理软件开发

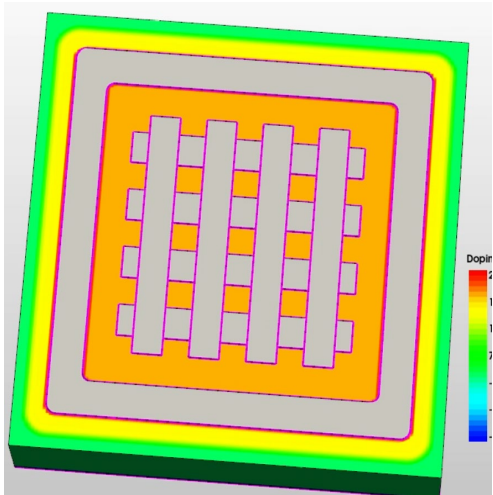


➤ 新型CS-LGAD用于未来的 **4D中子深度剖面仪**

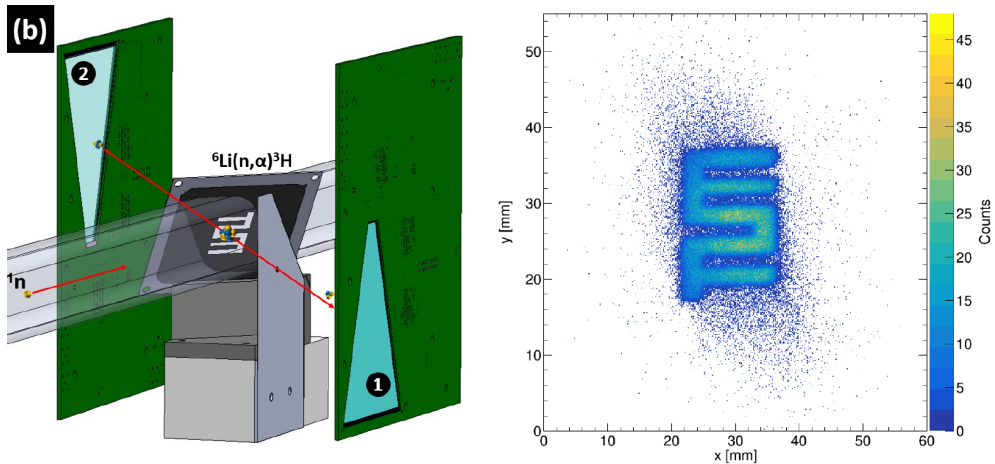
CS-LGAD方法

- α + triton 测量
- 单层单面器件实现
能量+时间+位置测量

CS-LGAD @IHEP



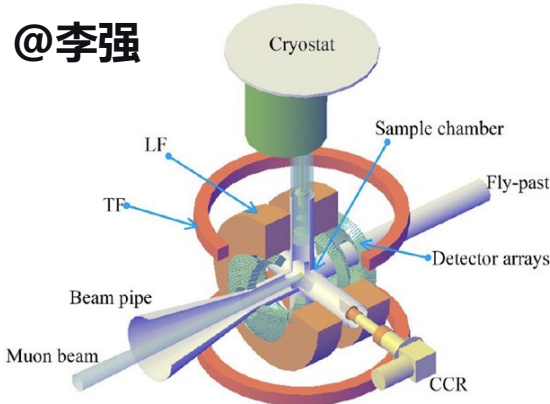
DSSD-based 4D 中子深度剖面 @FRM II



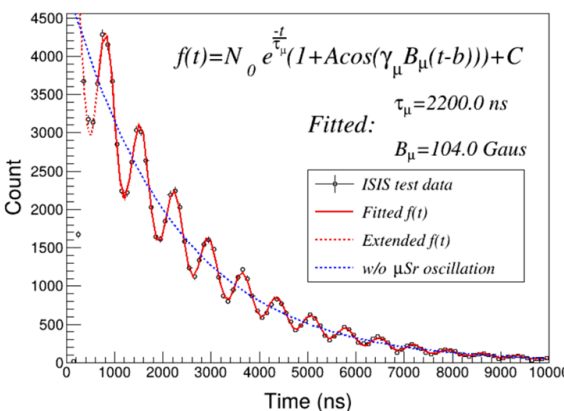
➤ 未来 **μ SR升级**，LGAD方案，计数率提升一个量级，实现径迹重建和缪子自旋成像

	第二代 (CSNS II)	LGAD (第三代)
技术	SiPM+闪烁体	LGAD
死时间	~ 20-30 ns	~2-3 ns 时间分辨 ~30 ps
单元尺寸	较小 10×10×50 mm ³	很小 1×1×0.3 mm ³
计数率	~ 200M Event/hour	> 2×10 ³ M Event/hour

@李强



CSNS μ SR

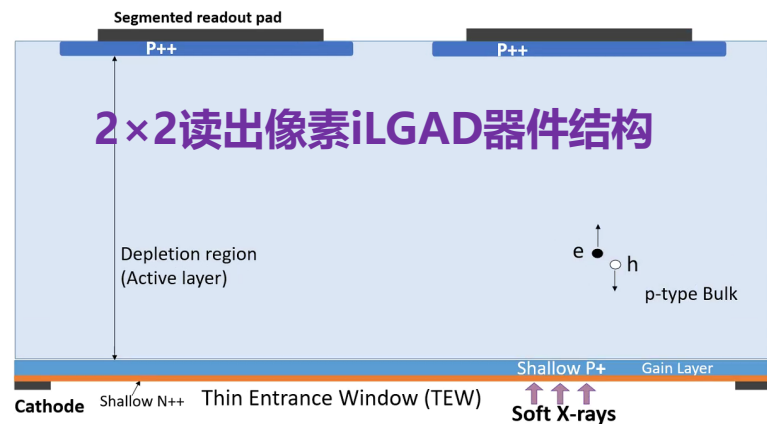
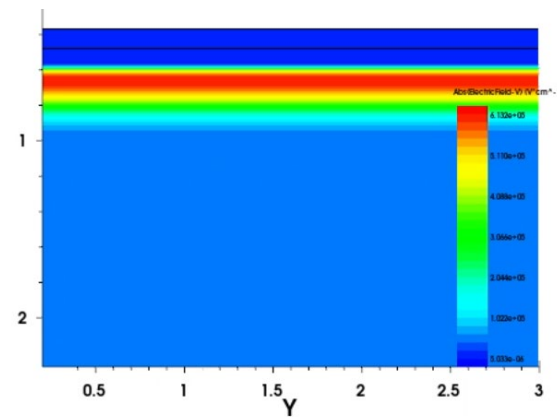


LGAD 测得muon衰变时间谱 @ISIS

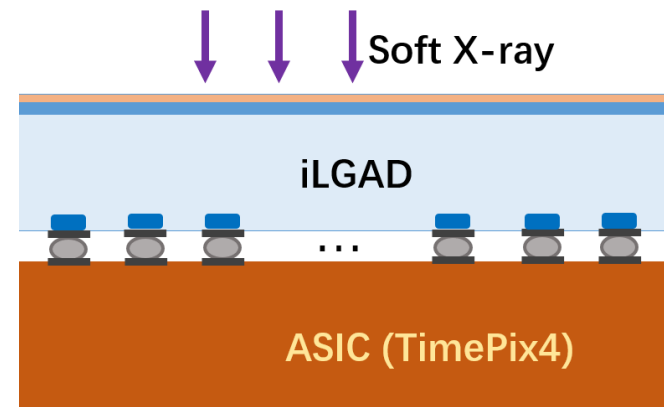
软X射线探测：inverse-LGAD



- 针对低能、穿透能力弱的射线（软X、轻离子）



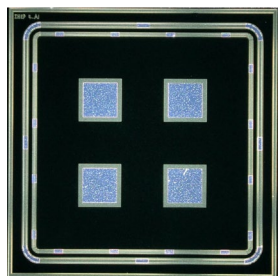
IHEP iLGAD 浅增益层设计



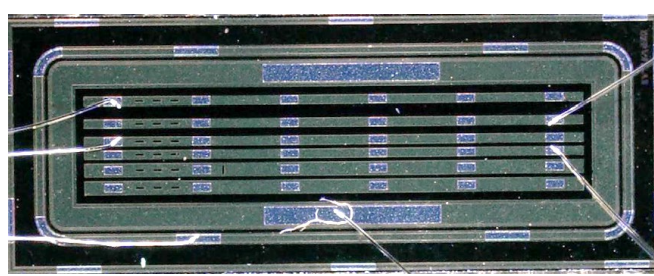
iLGAD + TimePix4 (@刘洪斌)
下一代软X射线成像模块

时间-径迹探测器：AC-LGAD

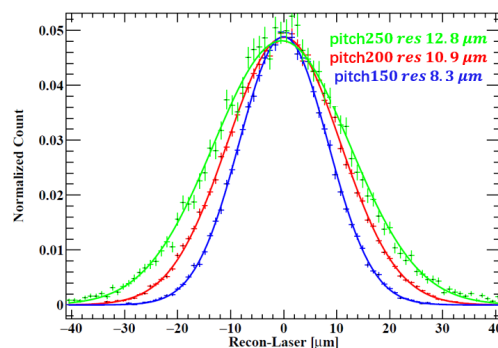
从“时间”到“时间+位置”



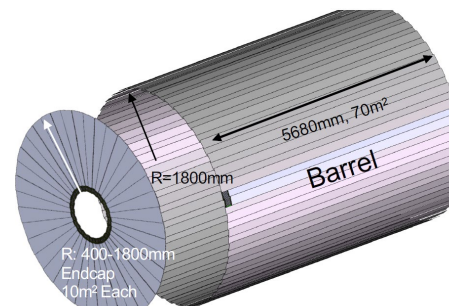
Pixels AC-LGAD



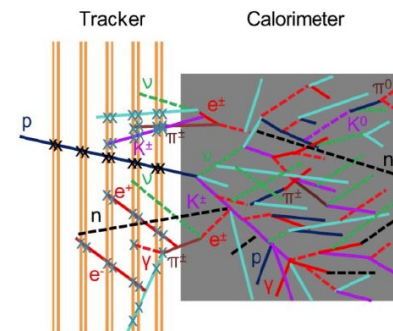
Strips AC-LGAD



空间分辨率 8.3 μm



Time-tracker
@对撞机实验

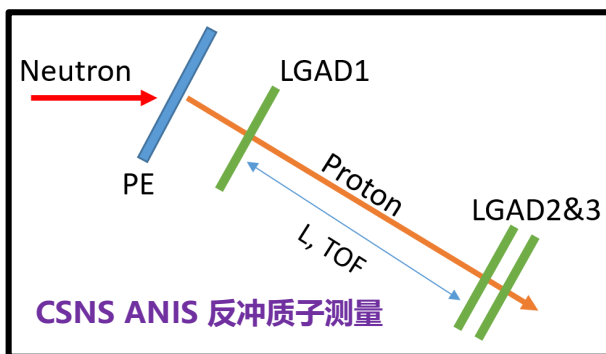
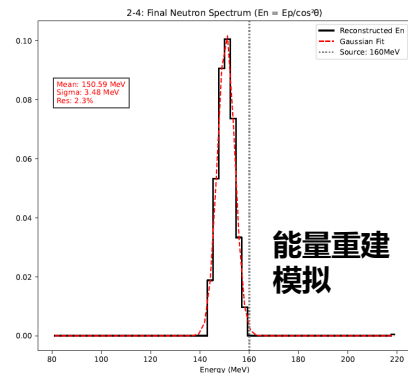


背散射径迹探测器
@空间实验

其他测量应用

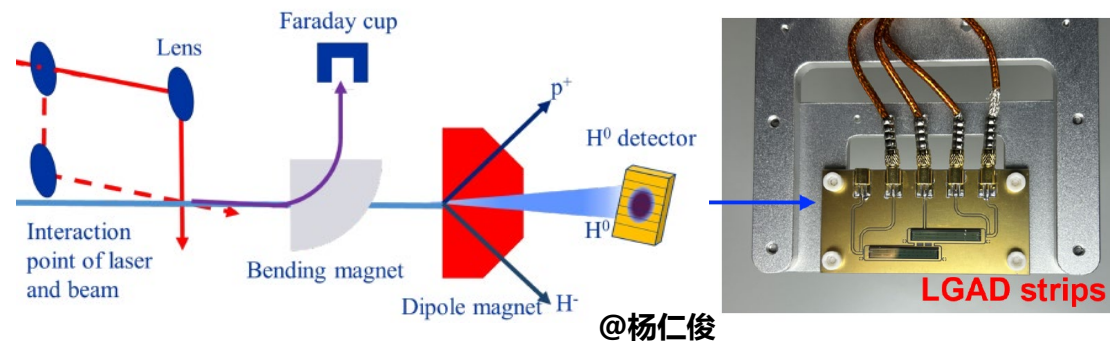
- 基于LGAD的反冲质子TOF法测量高能中子能谱(40-400MeV)

综合时间分辨率30-40ps, 能量分辨率好于3%, 无事例堆积



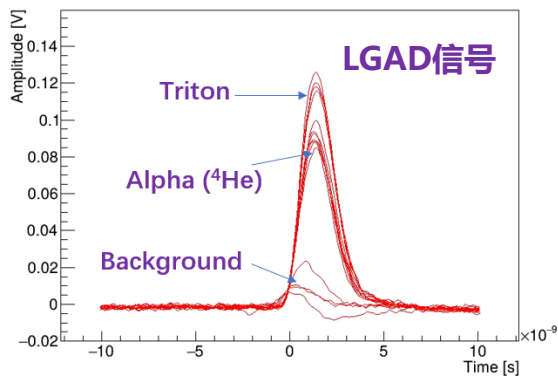
- LGAD用于CSNS 加速器 H^0 分布测量

CSNS 直线加速器非拦截式激光线发射度测量系统



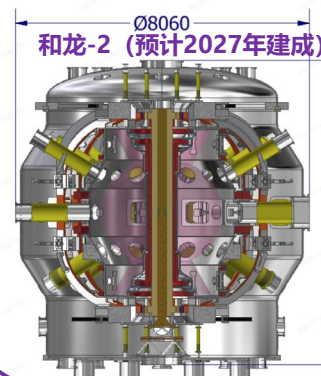
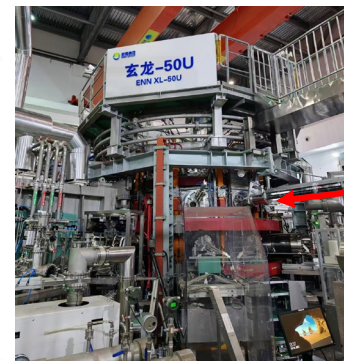
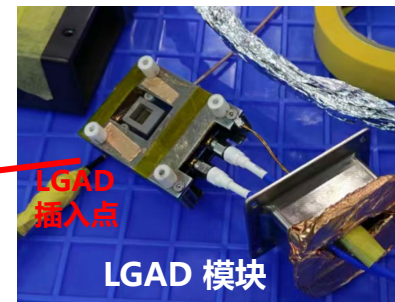
- 基于LGAD的 BNCT中子束流监测

取代昂贵的进口金刚石、LiCAF探测器



- 聚变诊断, 如氢硼聚变

损失 Alpha 粒子、高能中性粒子的测量诊断



谢谢

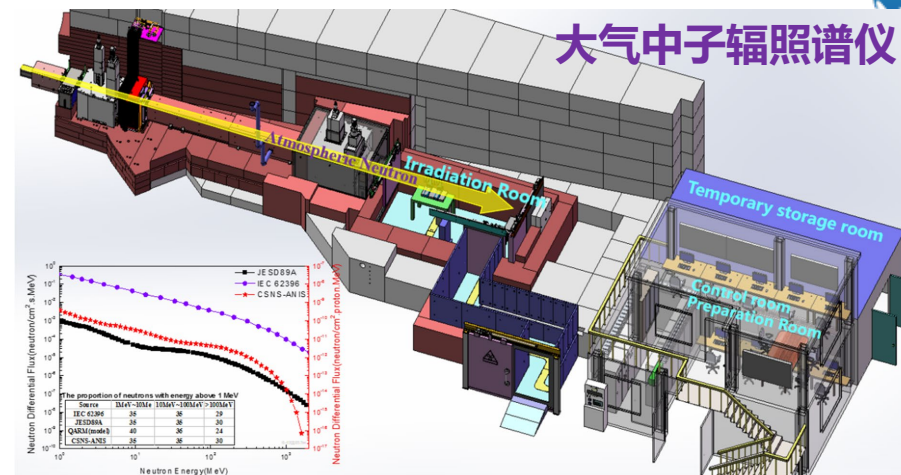


打俩广告

大气中子辐照谱仪 (CSNS-ANIS)

- 下半年课题征集截止到10月18日
- 如有实验需求, 请尽快申请 <https://user.csns.ihep.ac.cn/>
- 探测器、电子学辐照测试, 芯片器件单粒子效应等

课题组公开招聘2名博士后: 高薪!



岗位	岗位职责	岗位要求
岗位1: 新型LGAD探测器研究	半导体探测器LGAD仿真设计; 实验测试系统搭建、性能表征与分析; 探测器模块集成与应用研究	取得博士学位3年以内; 粒子探测器、微电子相关研究方向; 具备探测器仿真 (TCAD、Geant4等) 和性能测试能力; 有良好的沟通能力和团队合作精神; 有半导体探测器研究经验优先;
岗位2: 高能中子能谱测量及方法研究	聚焦高能中子探测, 发展高能区中子测量新方法; 开展新型中子探测器研发及多场景大气中子能谱测量; 并参加谱仪日常工作	取得博士学位3年以内; 核物理、粒子物理、辐射探测相关专业; 具备辐射探测器研发、中子能谱解谱、蒙特卡罗输运仿真经验

联系方式: mzli@ihep.ac.cn