

LGAD器件用于中子探测的研究

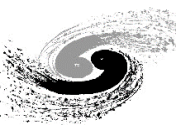
Study of LGAD Sensor in Neutron Detection

李梦朝

中国散裂中子源
中国科学院高能物理研究所

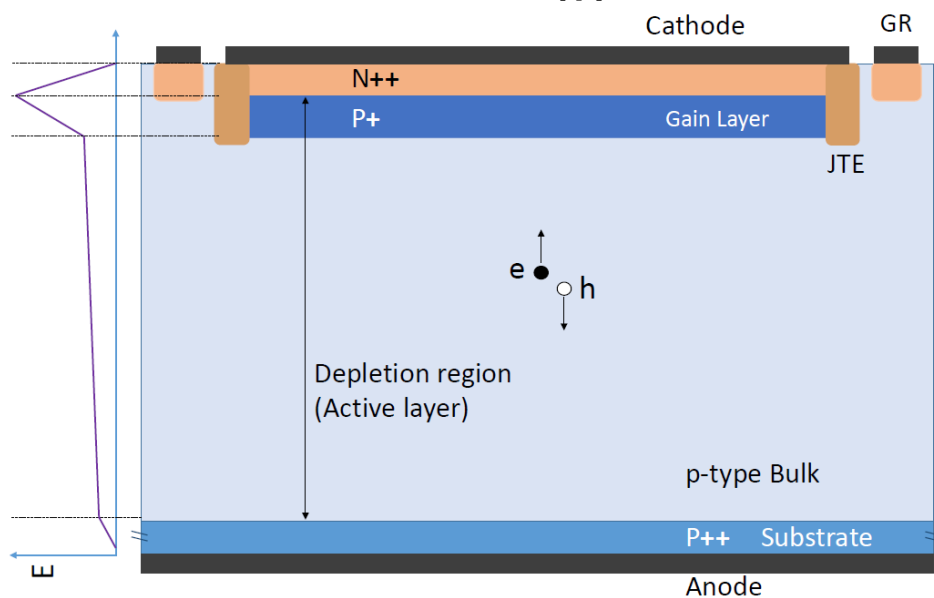
2025 年7月17日 · 西安

email: mzli@ihep.ac.cn

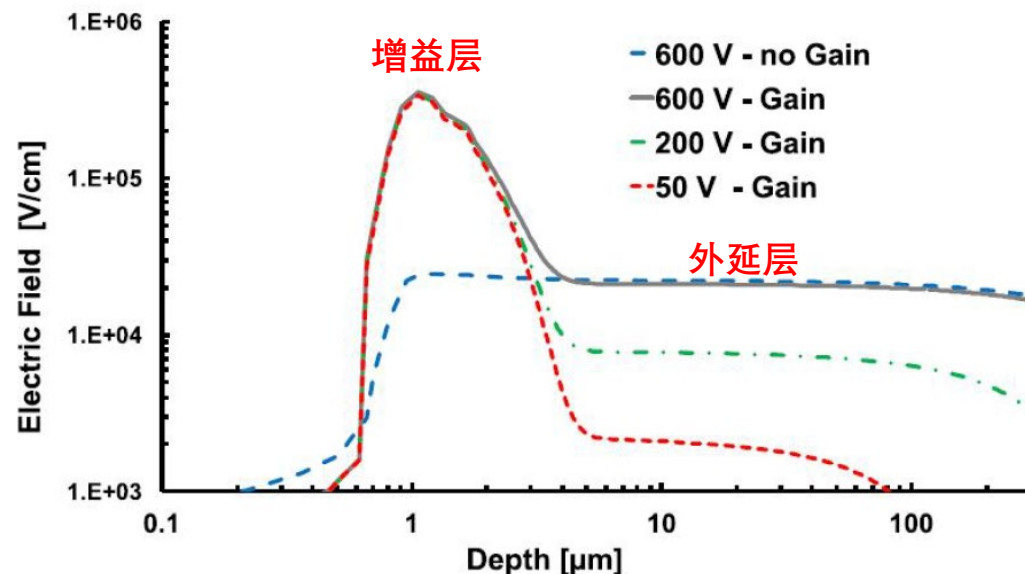


LGAD简介

LGAD 结构



LGAD 厚度方向电场分布



LGAD (Low-Gain Avalanche Diode)

- PN结下注入重掺杂增益层
- 增益10-100倍
- 脉冲宽度~3ns, 时间分辨率~30ps
- 强的抗辐照性能 $\sim 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

目前参与LGAD研制的科研单位和制造商有:

- 日本滨松 HPK、意大利 FBK、美国 BNL
- 国内: 高能所 IHEP、北师大 ND L、中科大 USTC

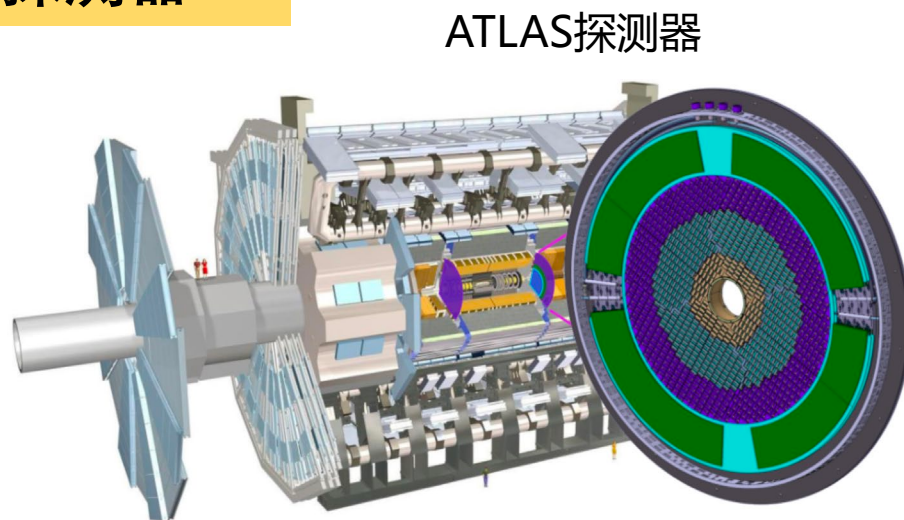
- IHEP 联合 ND L 研制出了国内首个LGAD器件 (2019)
- 并联合 微电子所 (IME) 重点研制出了碳注入的LGAD器件



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

- LHC ATLAS实验升级采用LGAD技术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LGAD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

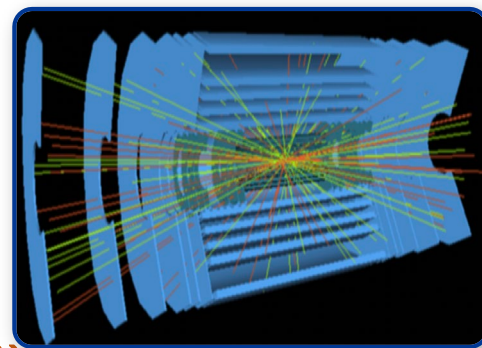


ATLAS探测器

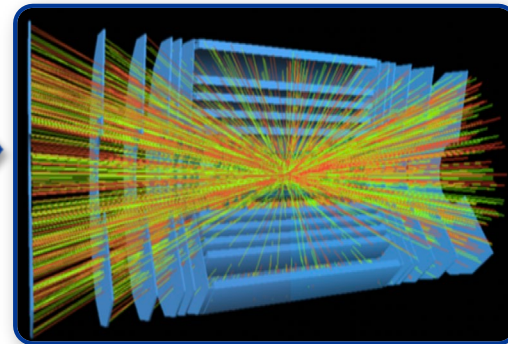
➤ 中国组主导ATLAS HGTD探测器研制

- 45%探测器组装（34% 高能所， 11%科大）
- 100%抗辐照高时间分辨LGAD传感器
(90% 高能所-微电子所， 10%科大-微电子所)

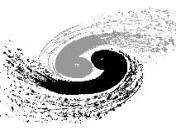
目前的ATLAS探测器



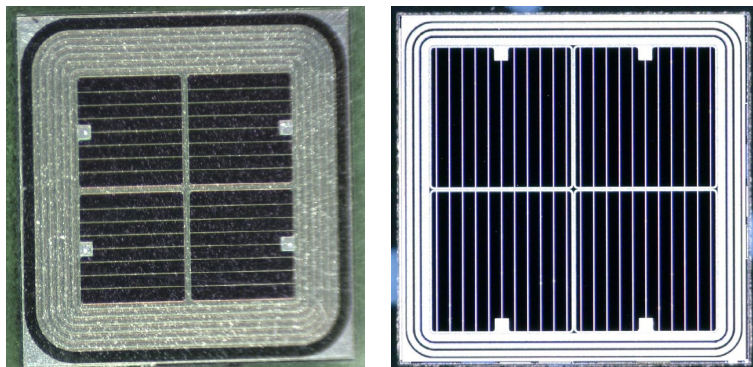
高亮度LHC升级后的ATLAS探测器



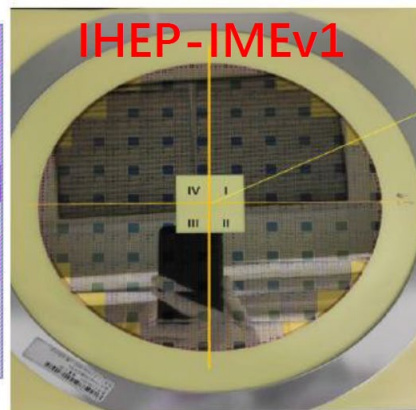
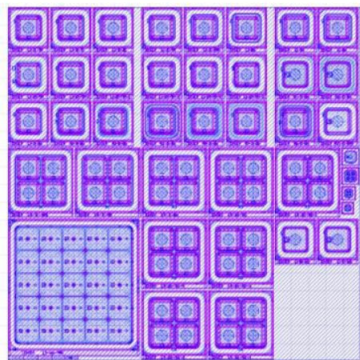
面临的问题：事例堆积、强辐照环境



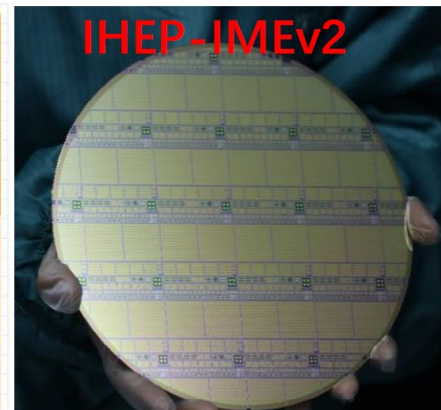
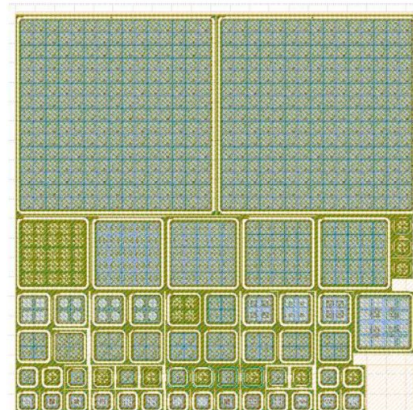
IHEP-NDL (2019)



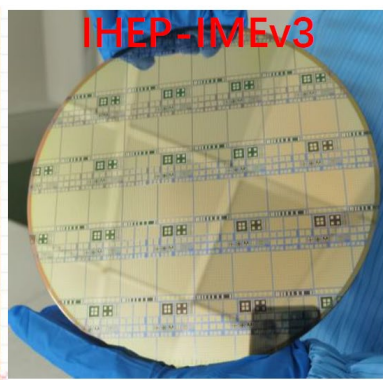
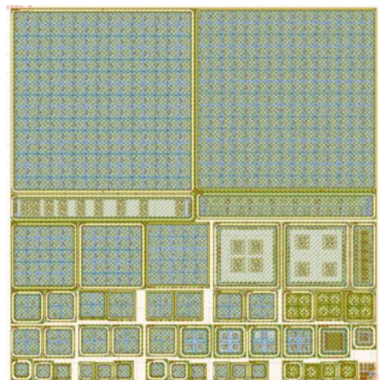
IHEP-IMEv1 (2020.9)



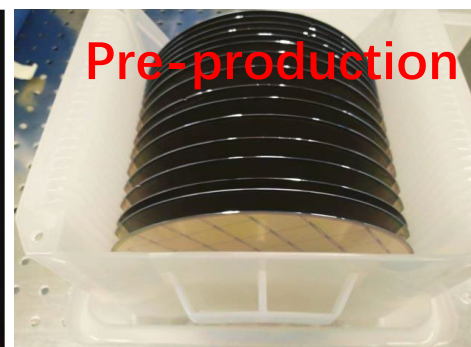
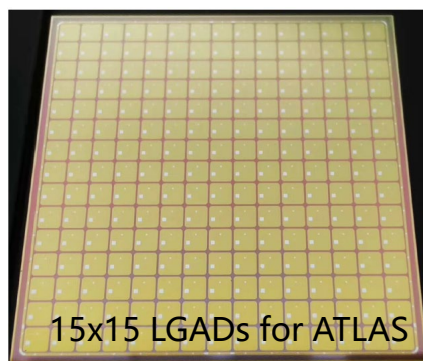
IHEP-IMEv2 (2021.6)



IHEP-IMEv3 (2022.5)



Pre-production for ATLAS (2023.7)



Mass production
(2024.7)

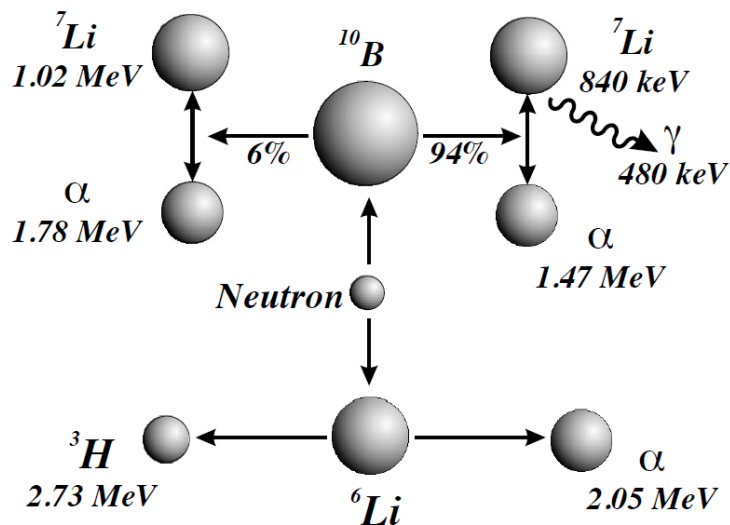
欧洲核子中心（CERN）首次采购中国产的半导体器件，打破日本滨松垄断



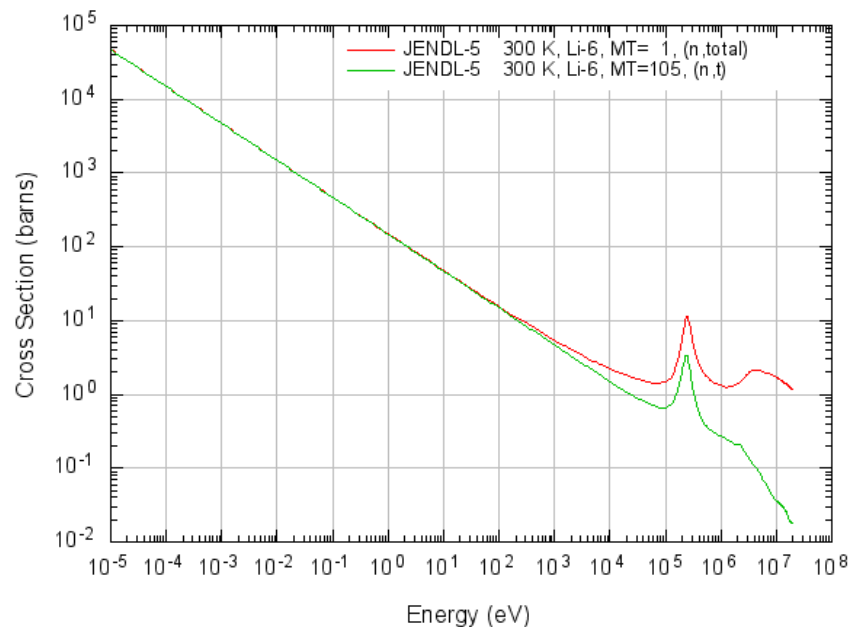
LGAD中子探测原理

➤ 低能中子/热中子

- 镀热中子转换层间接探测，如Li6、B10
- 通过(n, T)、(n, α)反应产生次级的质子、氦核等次级粒子



中子与Li6、B10作用



中子与Li6作用截面 (n, T) (n, α)

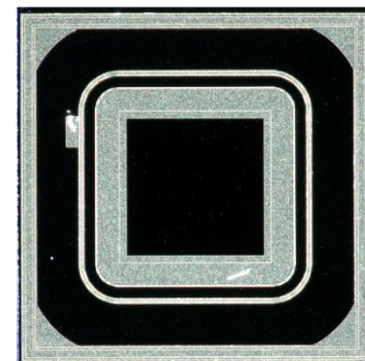


LGAD中子探测原理

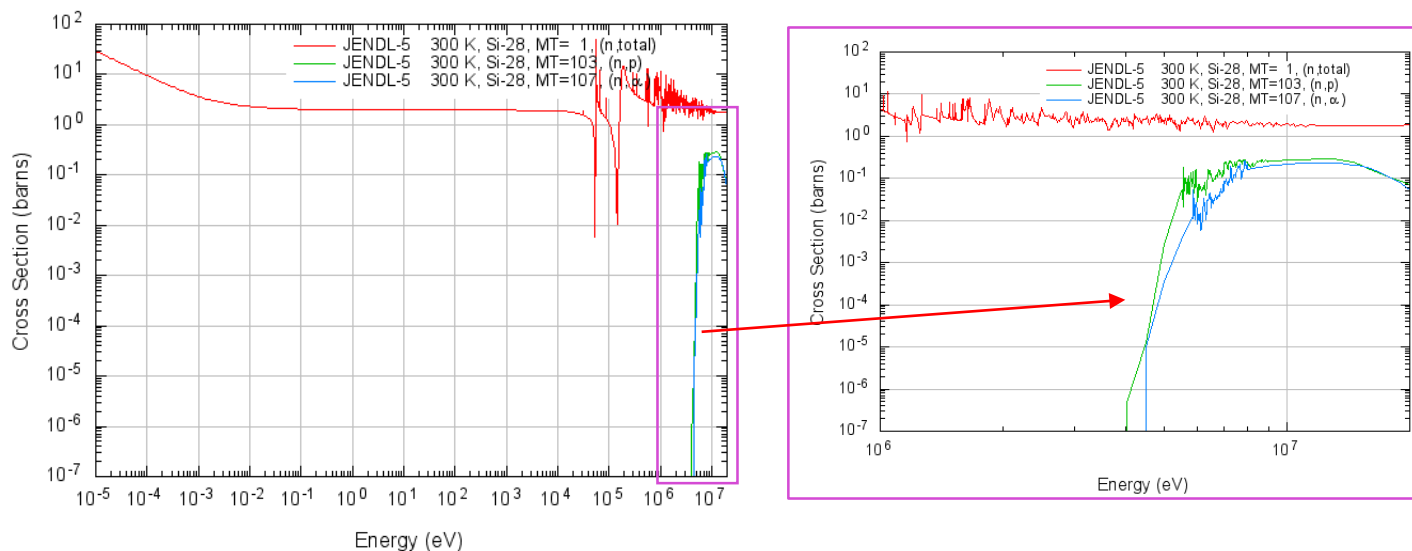
将LGAD用于中子成像、能谱测量、束流监测等

➤ 高能中子

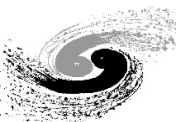
- 利用核反应、弹性散射直接探测
- 通过(n, p)、(n, α)等核反应道产生次级的质子、 α 、氘核、氚核等次级粒子
- 次级粒子在LGAD中电离产生信号



LGAD



中子与硅(n, p)(n, α)截面

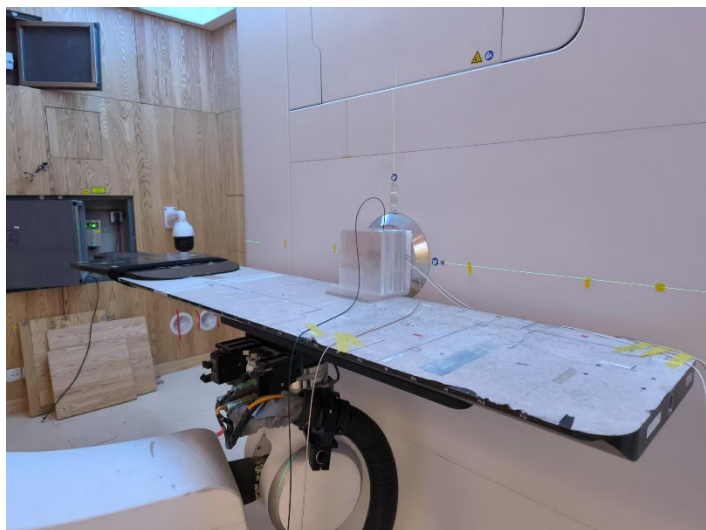


► 硼中子俘获治疗 (BNCT) 装置中子束流测量

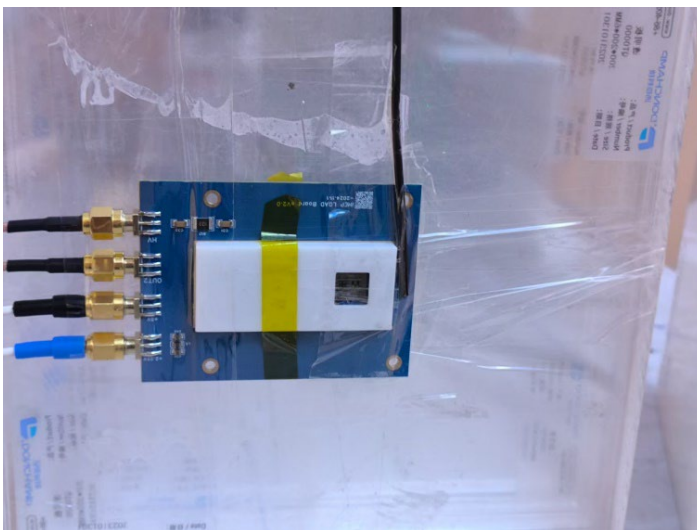
- LGAD器件：镀1微米厚 ^6LiF
- 东莞市人民医院BNCT治疗束：
 - 能量 0.5e V - 10 keV，通量 $\sim 10^9 \text{ cm}^2/\text{s}$
- 根据幅度谱可实现中子信号与本底 γ 信号的甄别

国内在建和计划建的BNCT项目超20项，中子束流监测以进口探测器为主（He3、金刚石、锂玻璃、LiCAF晶体），需求量大，价格高、售后难。

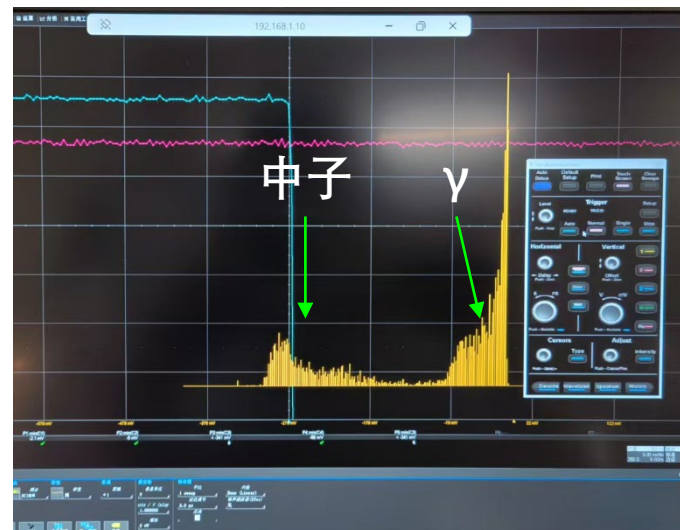
初步证实了自研LGAD用于BNCT中子束测量的可行性



BNCT治疗室



LGAD探测器模块

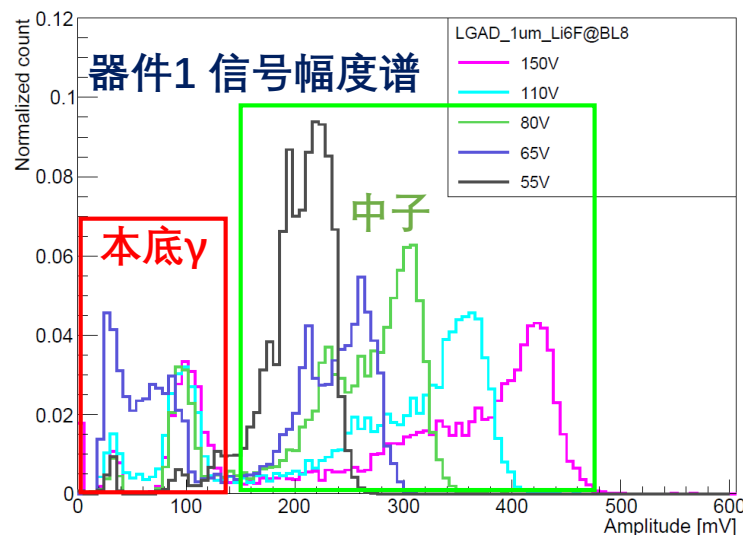
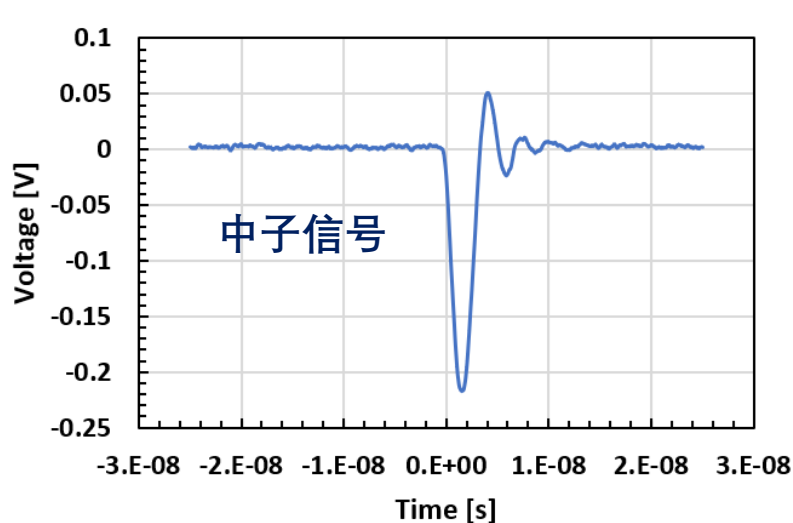


测量得到能谱

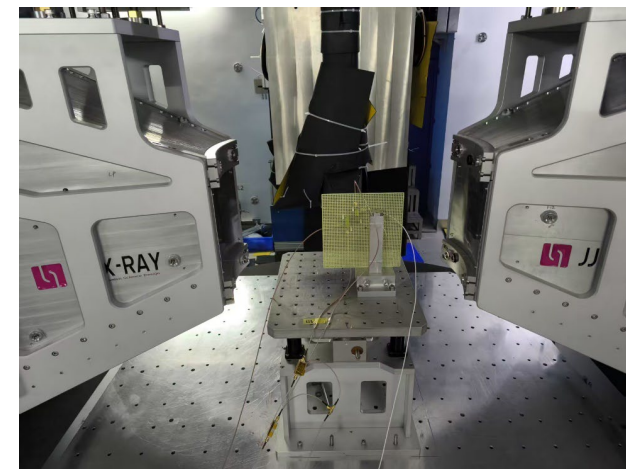


➤ CSNS实验线热中子测量

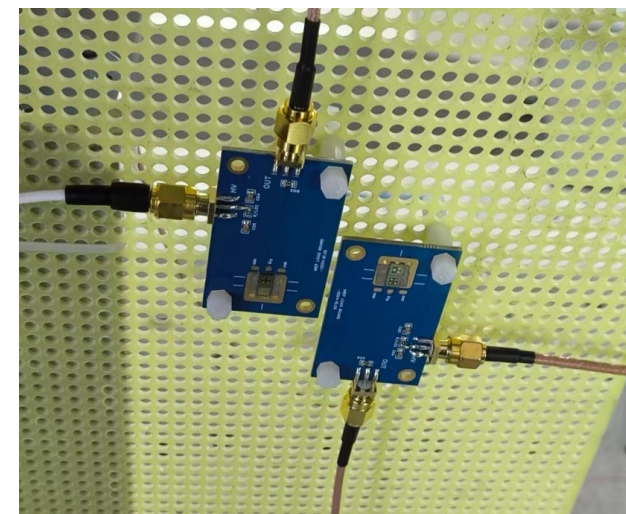
- 器件1: LGAD镀1微米 ^6LiF
- CSNS-BL8, 中子波长0.8~3.8 Å, 通量 $\sim 10^6$ @ 140kW



- 中子与 Li6 产生 α 2.05MeV进入LGAD能量全沉积, 信号幅度大
- 本底 γ 通过产生次级电子, 电子在硅中电离, 信号幅度小
- 镀膜LGAD: 本底 γ 和中子可通过幅度区分
- 未镀膜LGAD: 探测到本底 γ



CSNS-BL8 测试现场

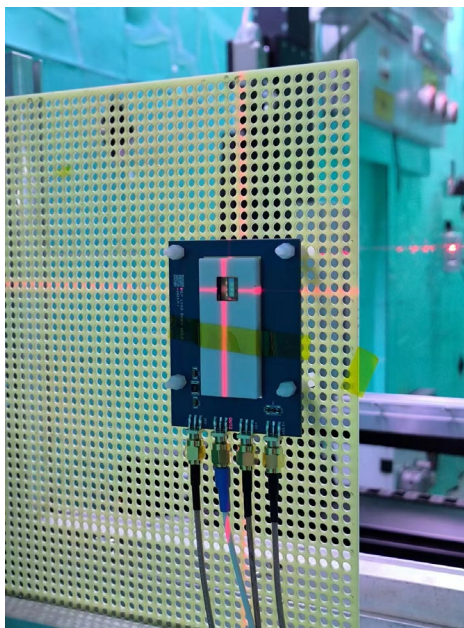
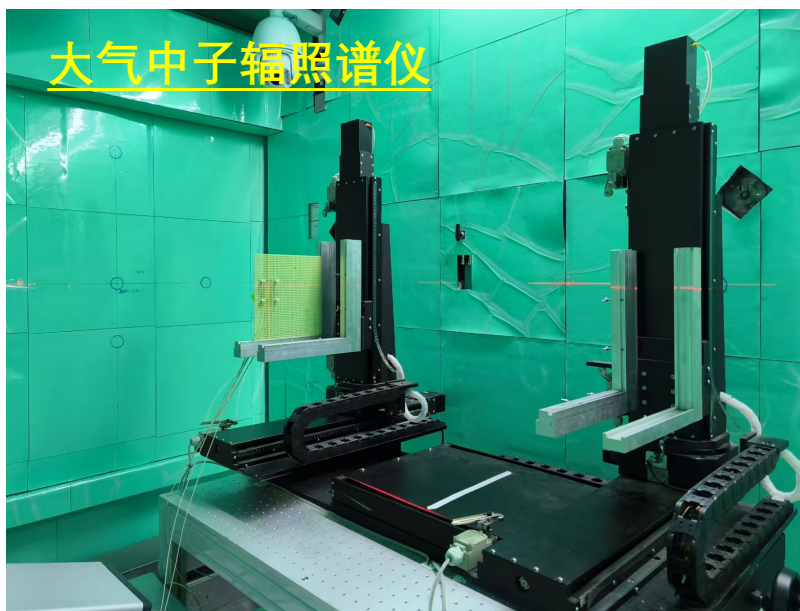


➤ CSNS实验线高能中子测量

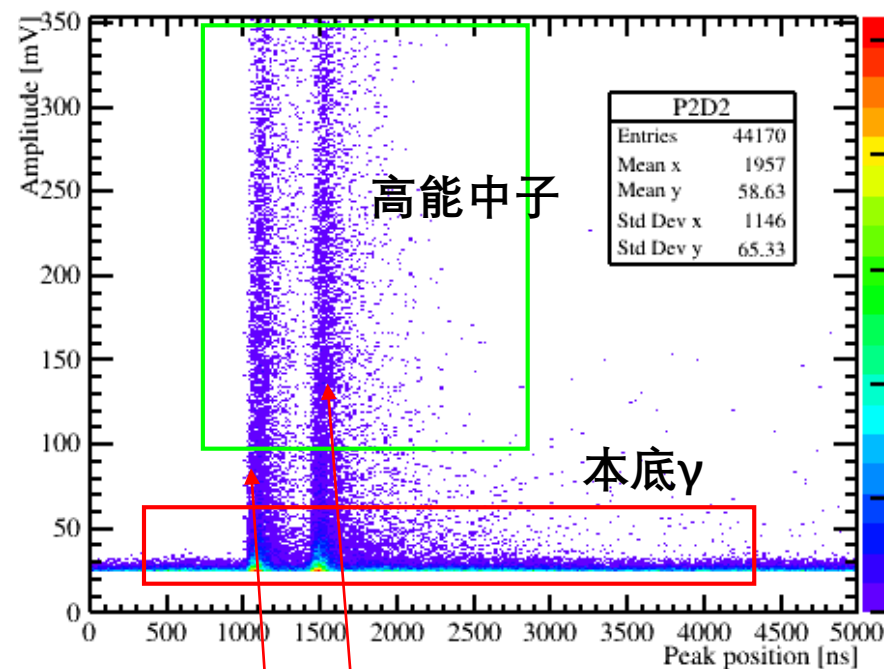
- 器件：LGAD镀1微米 ^6LiF
- CSNS-BL11 大气中子辐照谱仪

CSNS大气中子辐照谱仪：

- 注量率 $10^5 \sim 10^7$ n/cm²，能量 meV-GeV，束斑 2-10cm 可调
- 单粒子效应研究，FPGA、ASIC、存储类芯片、功率器件等
- 探测器辐照与性能测试、材料辐照、生物辐照等
- 实验申请咨询：mzli@ihep.ac.cn

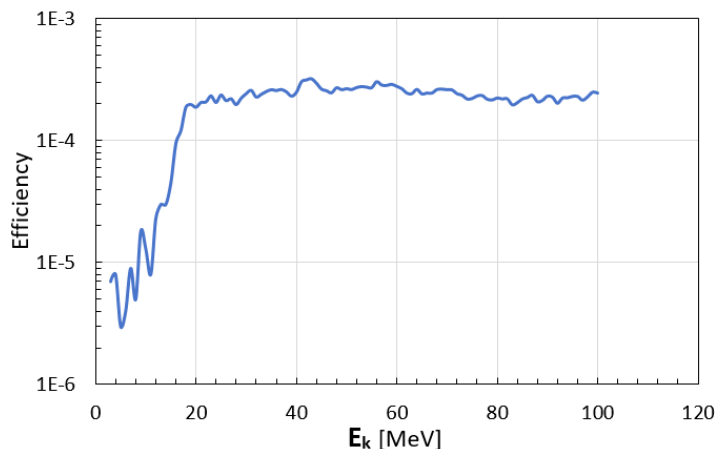
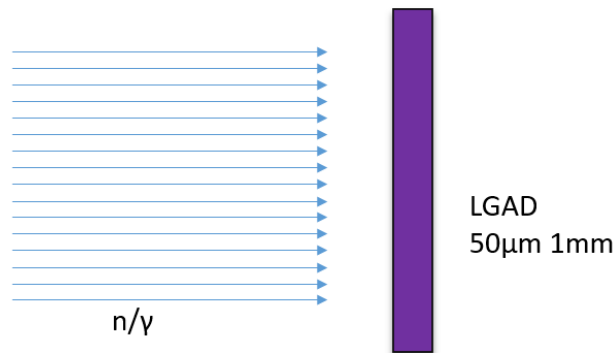


- 高能中子信号与本底 γ 信号的幅度分布界限不明显

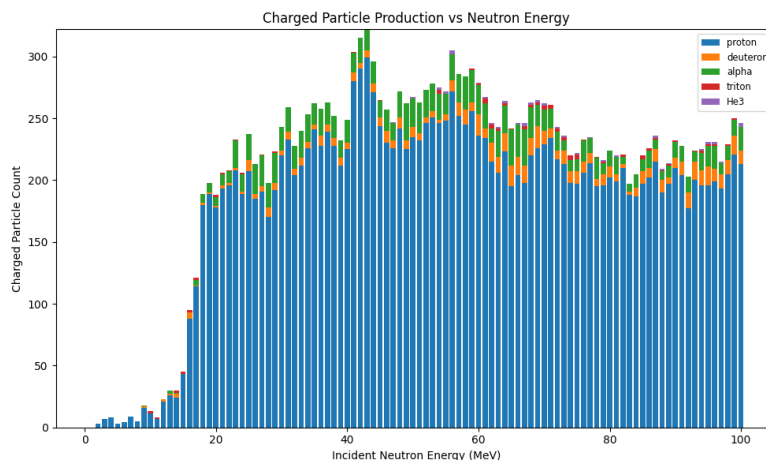


➤ 高能中子与LGAD 作用GEANT4模拟

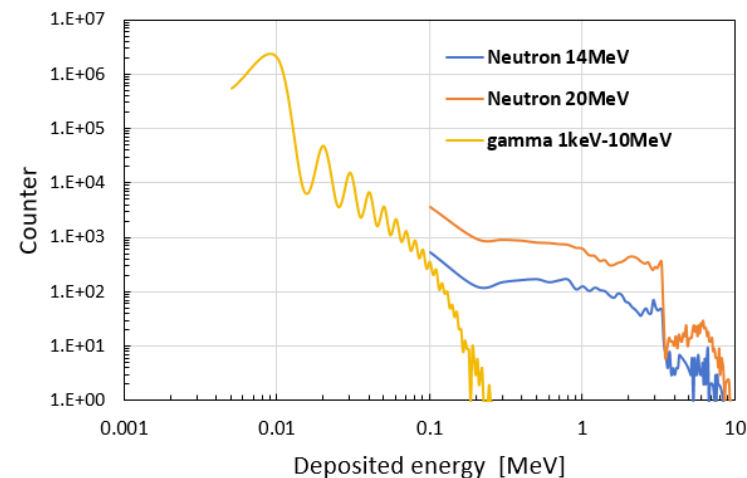
- LGAD 厚度50 μm 硅 像素1mm
- 中子/ γ 平行束



LGAD对中子的探测效率



次级带电粒子类型



中子与 γ 产生的能量沉积

模拟结果显示

- 对大于20MeV的中子，LGAD探测效率约万分之二
- 与硅作用后次级带电粒子以质子为主， α 粒子次之
- 高能中子与 γ 在LGAD的沉积能量范围不同，可以此甄别高能中子与 γ 本底

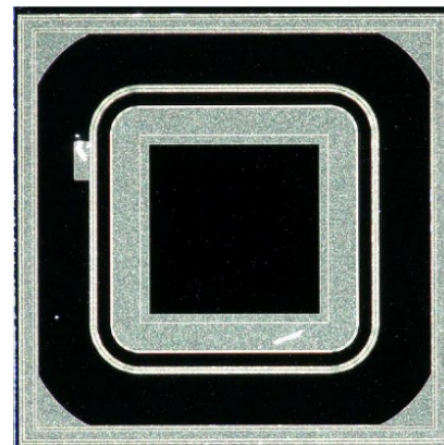


总结

- LGAD作为超快抗辐照探测器已经被用于ATLAS实验
- LGAD未来可用于中子成像、能谱测量、束流监测等
- 实验结果显示：
 - 镀膜(Li-6)后的LGAD在热中子测量方面，中子与 γ 的信号界线清晰
 - 高能中子信号与本底 γ 信号的幅度分布无明显分界
- 模拟显示：高能中子与 γ 在LGAD的沉积能量范围不同，以此甄别高能中子与 γ 本底

研究计划：

- 中子探测效率标定
- 高能中子与 γ 在线甄别方法、高能中子成像
- 用于BNCT中子束流监测的模块设计、长期稳定性测试



LGAD



谢谢大家

同时感谢对本研究提供帮助的各位老师和同学！

