

国家重点研发计划“高能量加速器关键技术研究”项目2025年会

晶体量能器探测单元性能测试及样机设计

报告人：赵芷钰
(上海交通大学 李政道研究所)

2025年5月28日



目录

- 研究背景
- 研究进展
 - 晶体样机设计及性能模拟
 - 晶体性能测试
 - 硅光电倍增器测试
 - 读出电子学测试
 - 冷却系统设计及测试
- 未来研究计划
- 总结

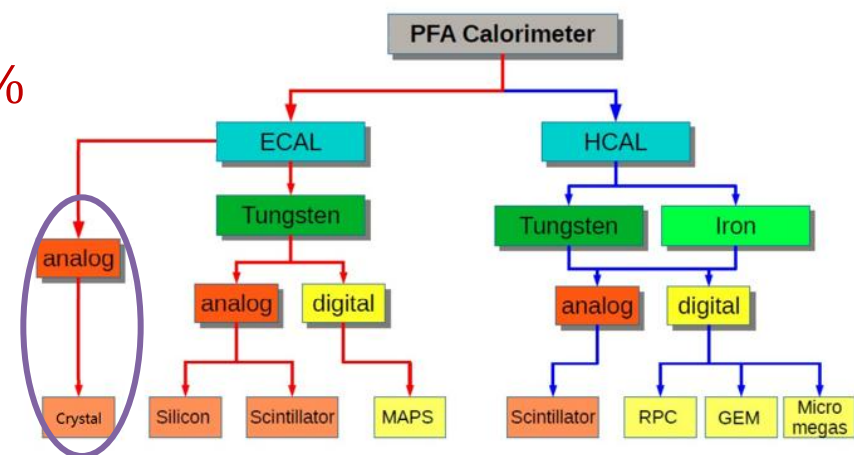
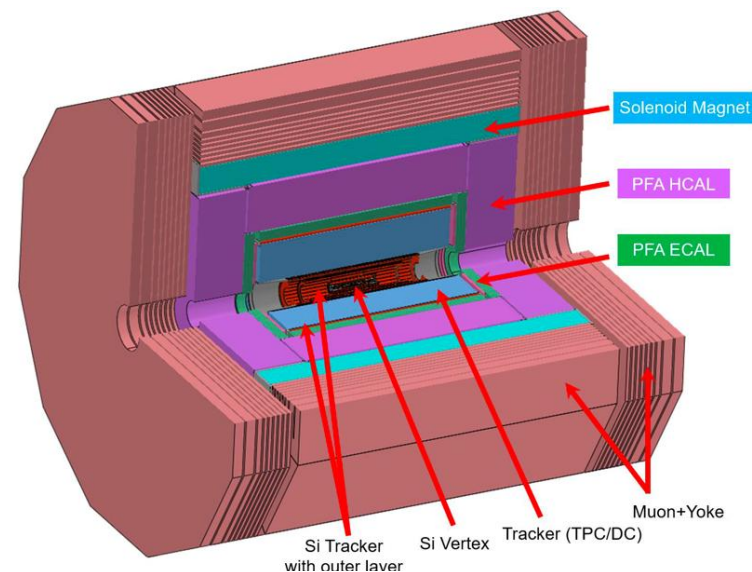
研究背景：CEPC上的晶体量能器

■ 未来环形正负电子对撞机（CEPC）探测器

- 实现精确的希格斯玻色子，电弱物理等的测量
- 探索超出标准模型（BSM）物理学等
- 探测器需要有极高的喷注能量分辨，满足3-4%的希格斯玻色子质量分辨（BMR）

■ 技术实现方案：高颗粒度晶体电磁量能器

- 全吸收型构造可获得极好的电磁能量分辨 $\sim 3\%/\sqrt{E} \oplus \sim 1\%$
- 基于粒子流算法的先进子探测器系统
- 高颗粒度、高度集成的成像型电磁量能器
- 对粒子簇射实现5D测量（三维空间+时间+能量）

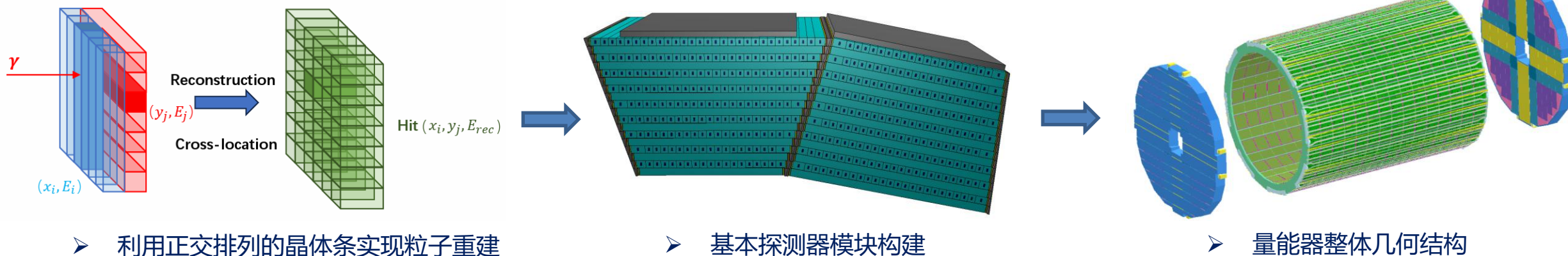


高颗粒度晶体量能器是新的PFA量能器技术路线

研究背景：晶体量能器设计方案

■ 高粒度晶体电磁量能器设计

- 基本单元： $1.5 \times 1.5 \times 40 \text{ cm}^3$ 长晶体条, 硅光电倍增器 (SiPM) 双端读出
- 不同于传统单层的晶体量能器, 具有较高的纵向颗粒度 (18层)
- 每两层晶体之间正交排列, 利用多层信息实现横向的位置分辨



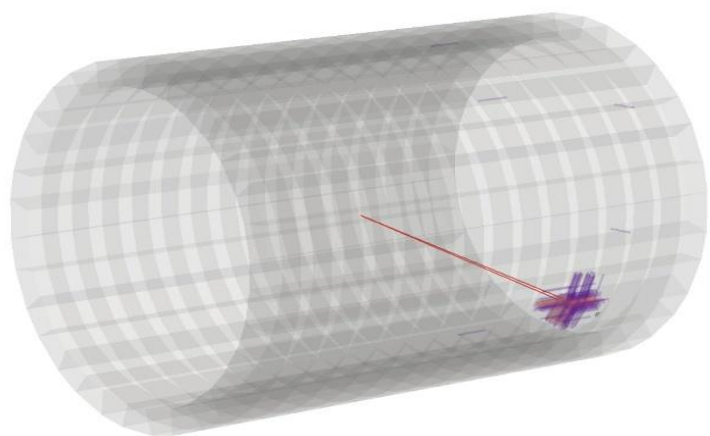
■ 设计优势

- 与取样型量能器相比, 最小化了层间的非灵敏物质
- 使用长晶体为基本单元, 减少了同等体积量能器需要的读出通道数
- SiPM双端读出具有更好的均一性, 可利用双端时间信息辅助粒子重建

研究进展：晶体量能器性能模拟

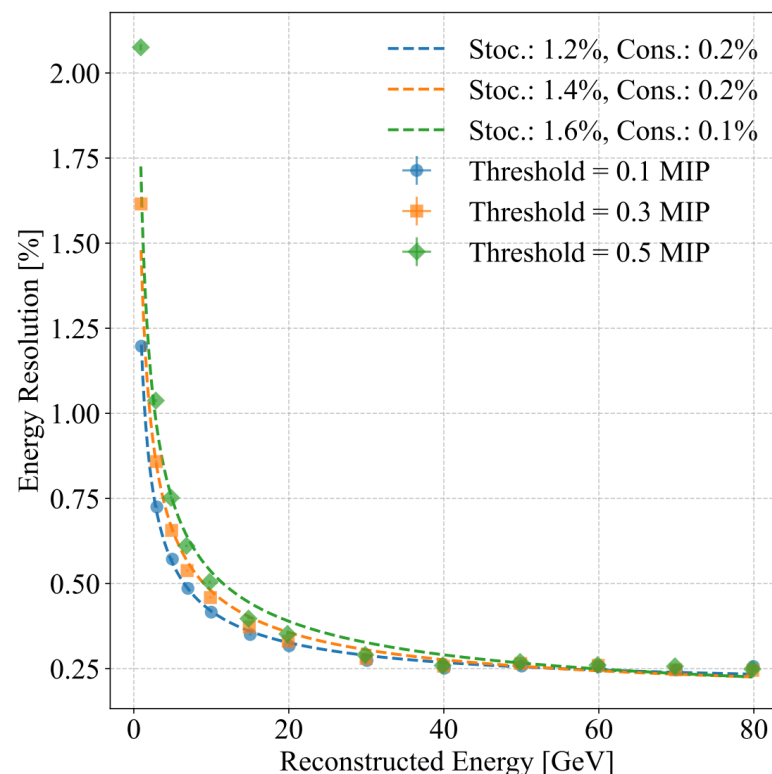
- 在**0.1 MIP**阈值下，当晶体-SiPM单元的有效光产额在**300 p.e./MIP**以上时，量能器电磁能量分辨率的统计项可控制在 **$2\%/\sqrt{E}$** 以内

– **BGO**晶体可满足光产额需求

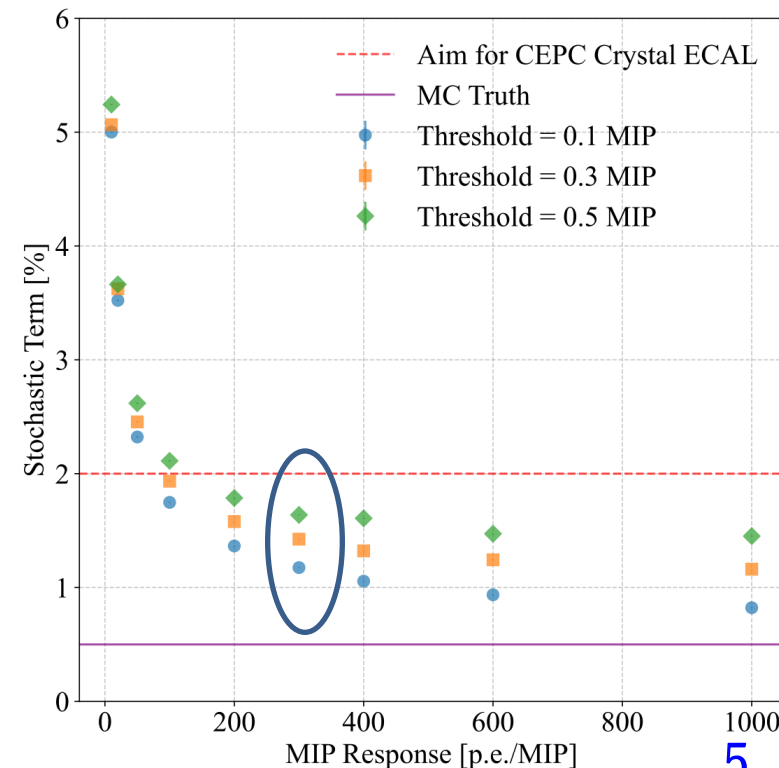


- 对量能器桶部模块做模拟，考虑光子统计涨落、SiPM响应、电子学效应等

晶体量能器能量分辨率

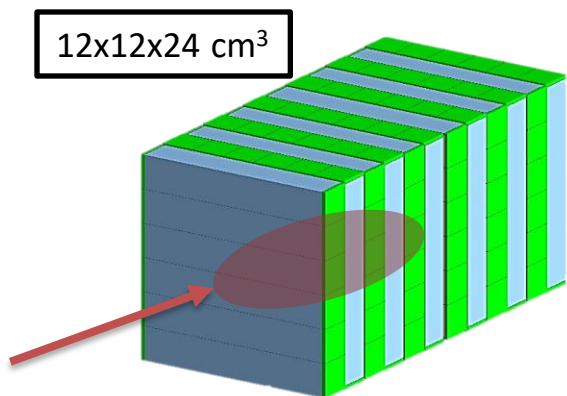


分辨率统计项随MIP光产额变化



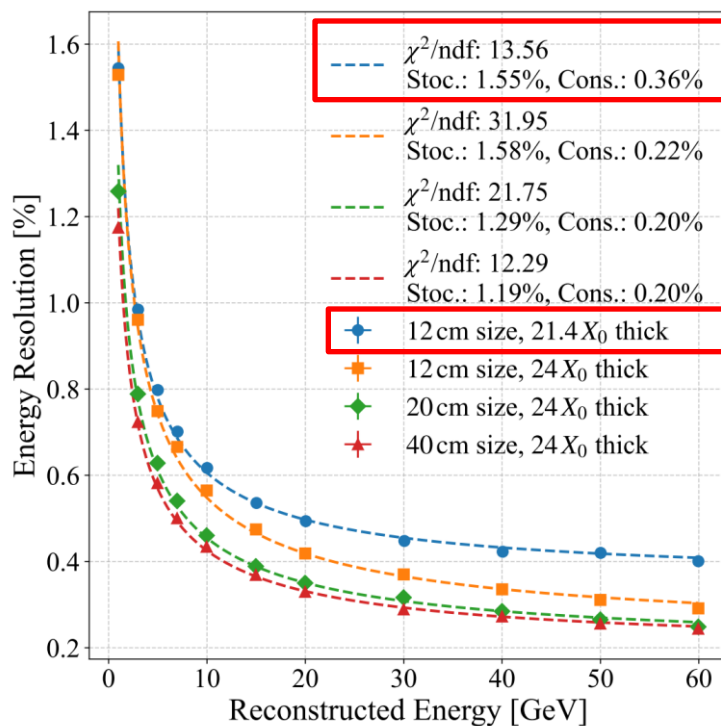
研究进展：样机设计及性能模拟

- 研究目标：设计晶体量能器样机，通过束流测试验证晶体量能器电磁性能；解决系统集成上的关键问题
- 横向12cm、纵向 $21.4X_0$ 的BGO晶体模块即可有效探测1-10GeV电子，并能实现较好的能量分辨率

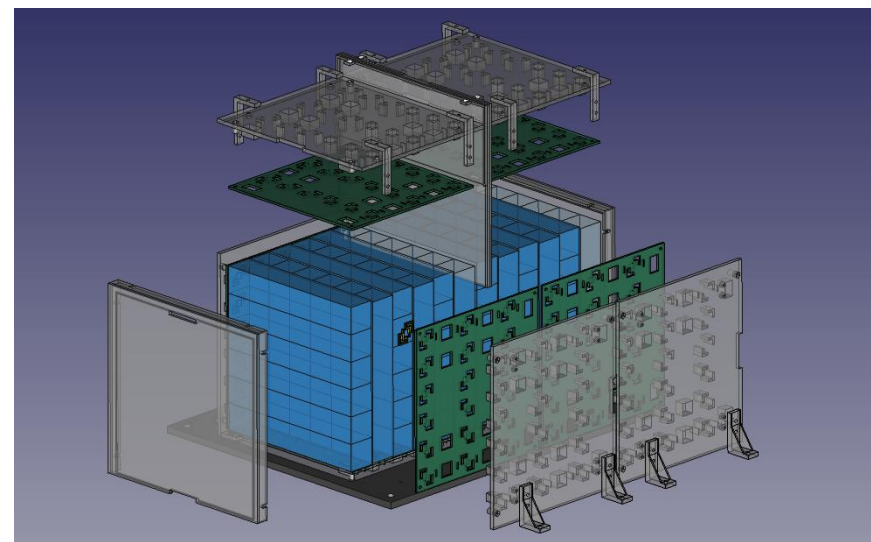


- 横向12cm、纵向 $21.4X_0$ 的模块即可实现对10GeV电子超过95%的吸收效率

不同尺寸的样机分辨率



晶体样机技术设计工程图



- 设计方案包括晶体、SiPM及读出系统、支撑结构，以及散热和触发系统

研究进展：晶体量能器基本探测单元

□ 晶体闪烁体性能要求：

- 高光产额，快响应
- 大长度，响应均匀
- 耐辐照

□ 选型：BGO(首选)，BSO(探索)

□ SiPM性能要求：

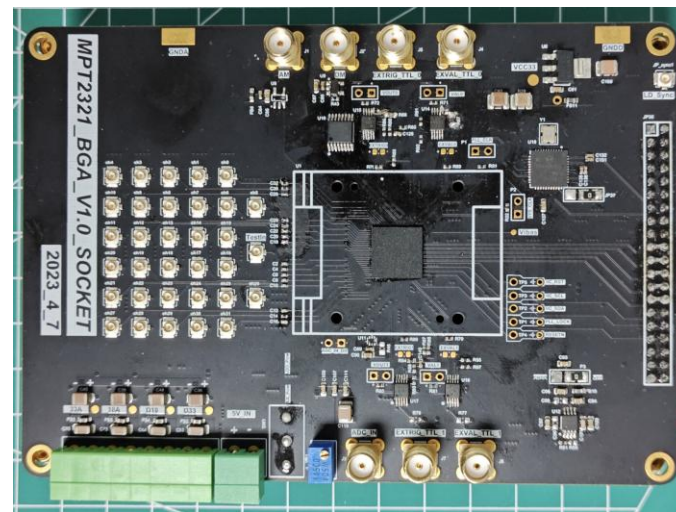
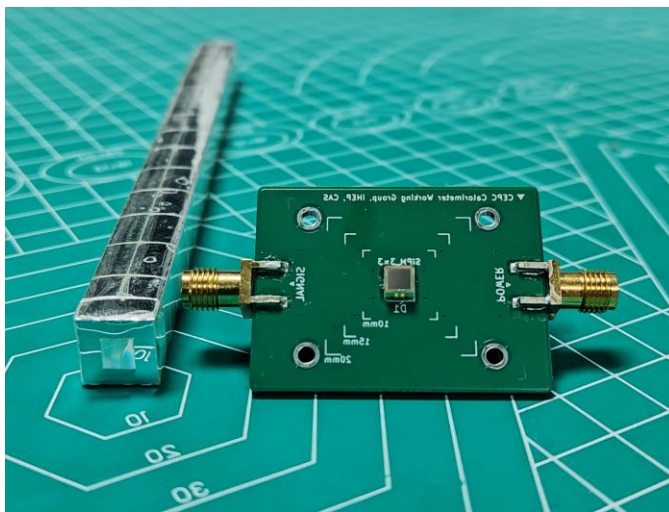
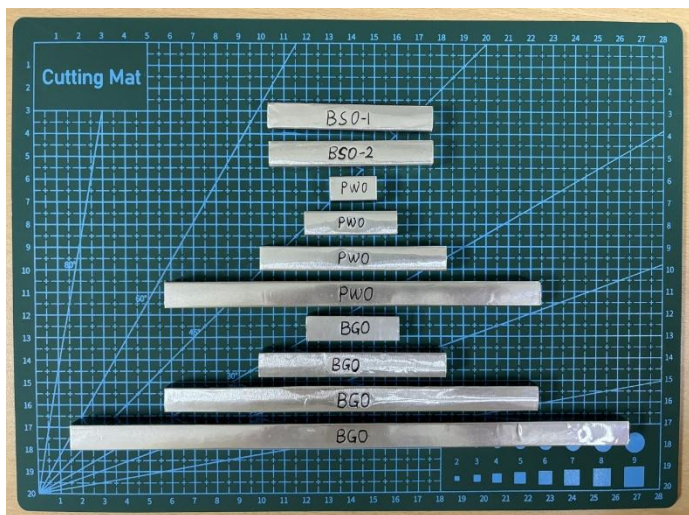
- 大动态范围
- 低噪声
- 耐辐照

□ 选型：国产NDL，日本滨松

□ 读出电子学系统性能要求：

- 大动态范围
- 低噪声

□ 选型：宇称MPT(长期测试)，CAEN A5202(短期测试)



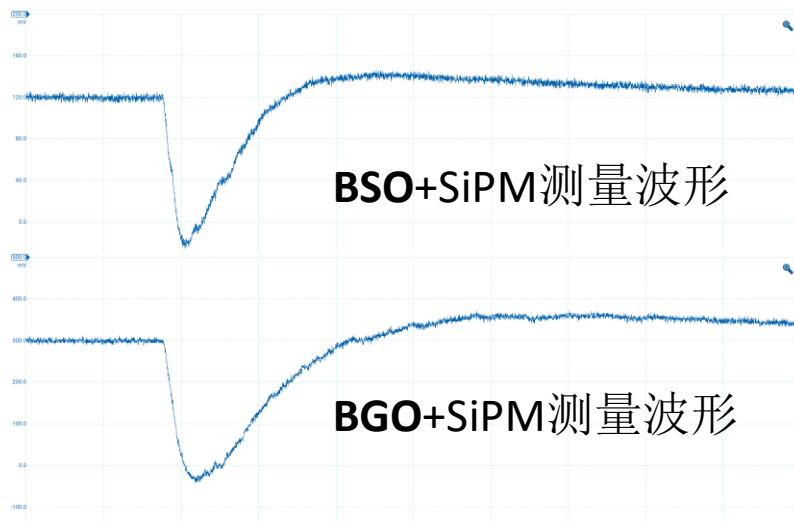
研究进展：晶体单元光产额及时间分辨率测试

- 利用10 GeV π^- 束流研究晶体单元的光产额和时间分辨率
- 相同尺寸下，BSO的光产额约为BGO的1/3，时间分辨率二者相当

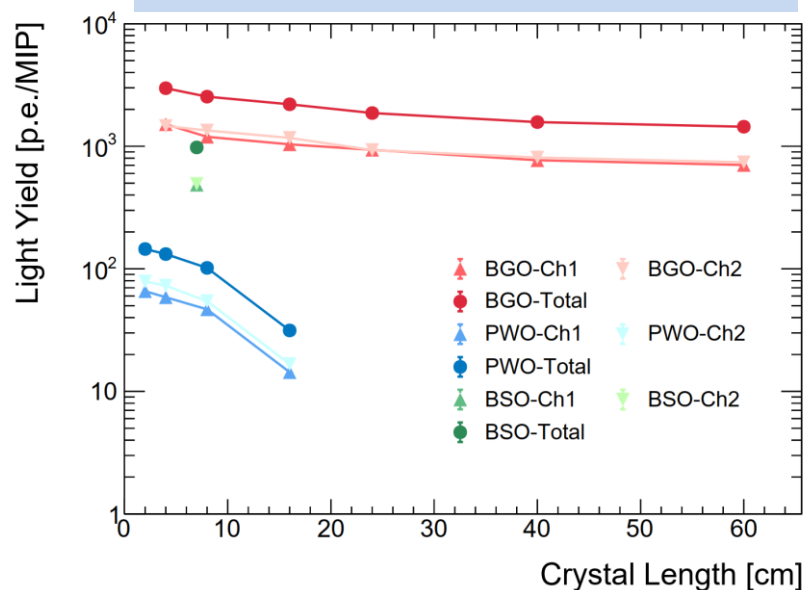
[arXiv:2503.16880](https://arxiv.org/abs/2503.16880)



BGO发光衰减时间更慢，波形更宽

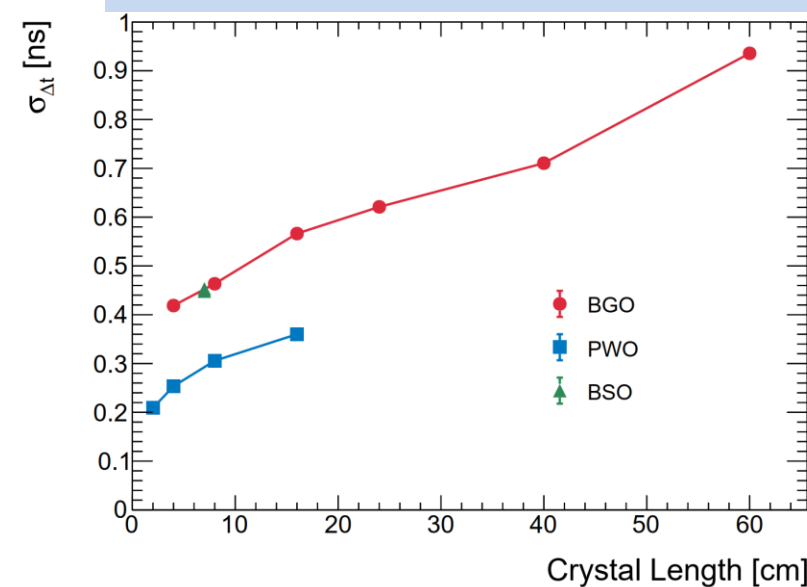


不同晶体的MIP光产额测试



光产额：BGO > BSO > PWO

不同晶体的MIP时间分辨率测试



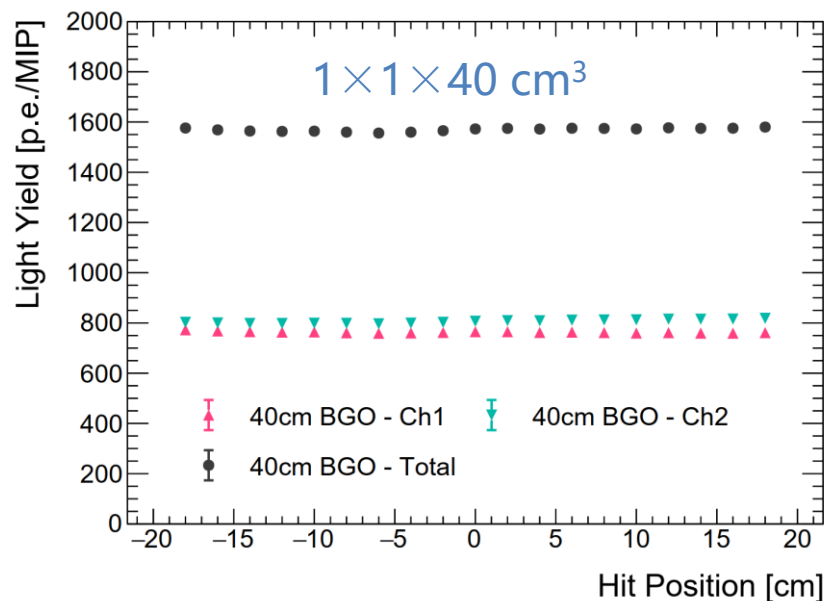
时间分辨率：PWO > BSO ≈ BGO

研究进展：晶体响应均匀性测试

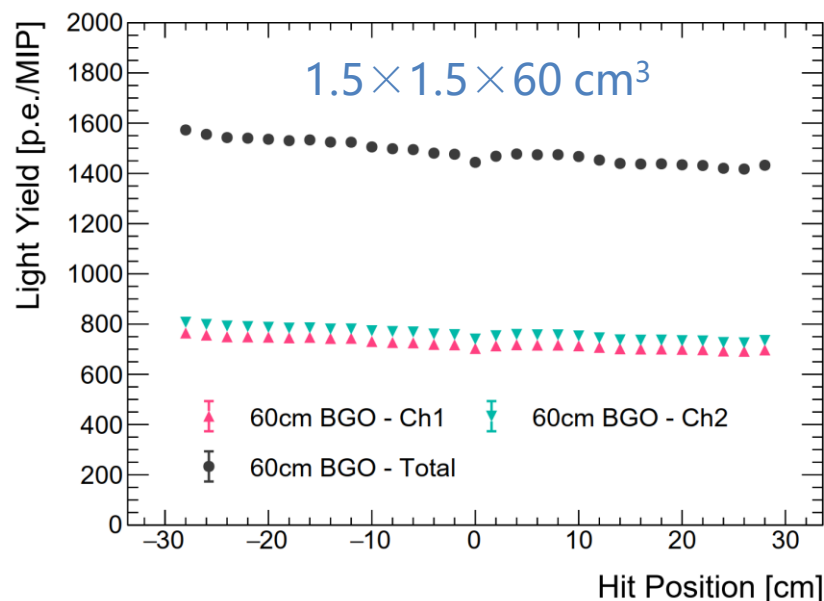
[arXiv:2503.16880](https://arxiv.org/abs/2503.16880)

- 晶体的不均匀响应会导致单元格的测量精度下降，影响探测器分辨率的常数项
- 利用10 GeV π^- 束流沿晶体长度方向扫描，测量光输出差异
- 40cm BGO晶体均匀性较好，60cm BGO晶体均匀性稍差

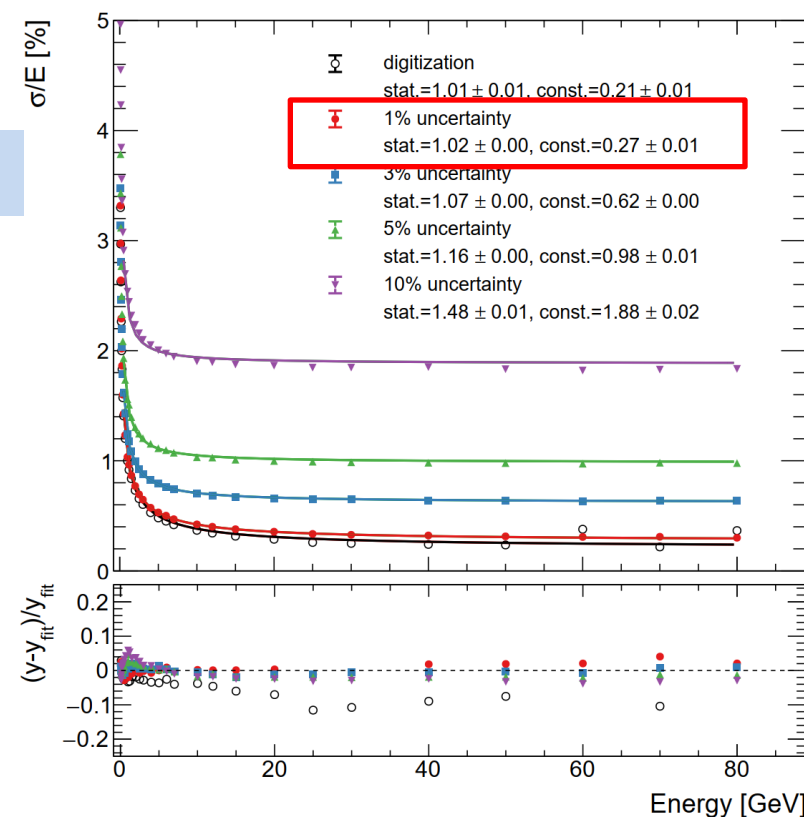
40cm BGO: $\frac{Max-Min}{Mean} = 1.5\%$, $\frac{StdDev}{Mean} = 0.4\%$



60cm BGO: $\frac{Max-Min}{Mean} = 10.5\%$, $\frac{StdDev}{Mean} = 3.0\%$



总能量分辨率随单元测量精度的变化



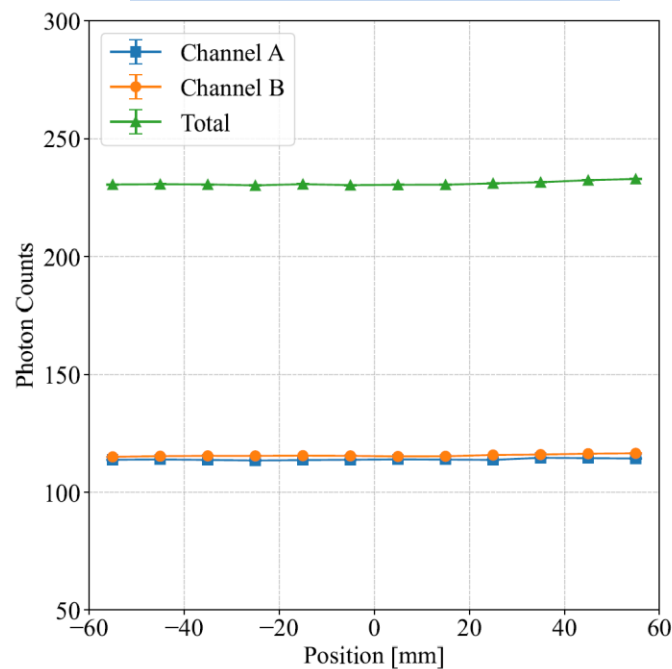
研究进展：BGO晶体批量测试

- 结合放射源测量尺寸为 $2 \times 2 \times 12\text{cm}^3$ 的BGO晶体条，共80根
- 晶体条长度方向上的响应均匀性良好，晶体间光产额差异基本在10%左右

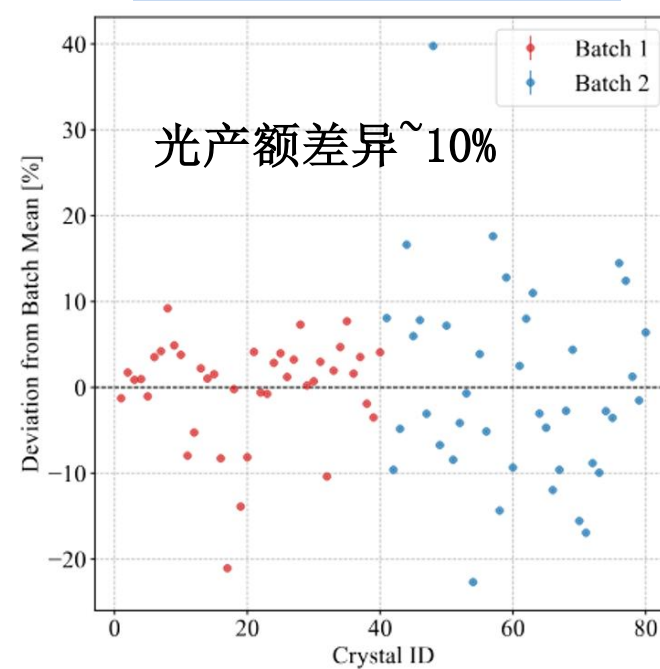


晶体条由ESR膜+铝膜包裹

单根晶体均匀性测试



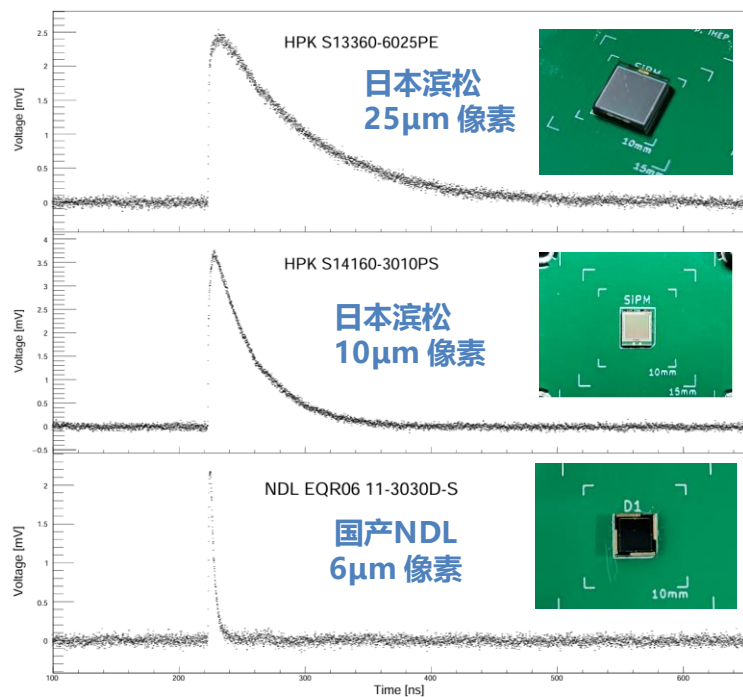
80根晶体光产额测试



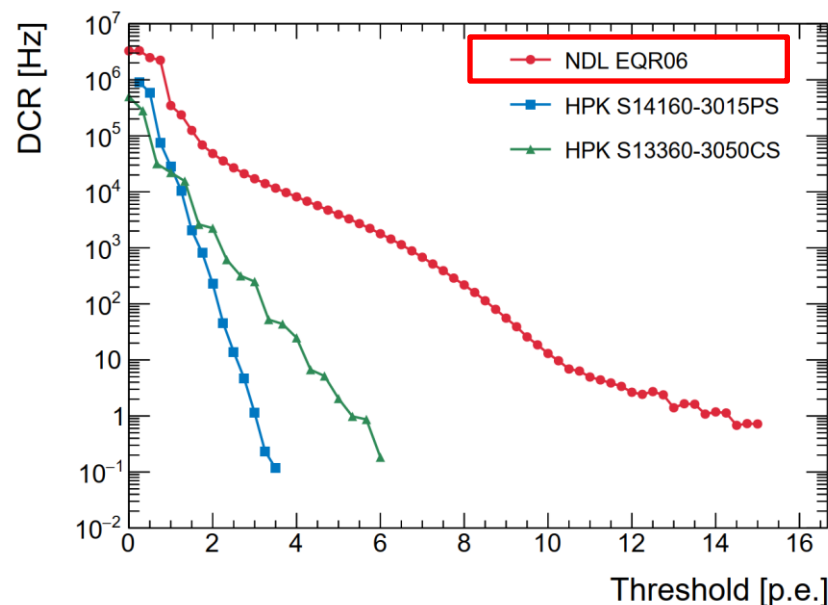
研究进展：硅光电倍增器测试

- 相比于日本滨松器件，国产NDL SiPM响应快、光子探测效率高、像素密度大，但同时噪声水平也更高

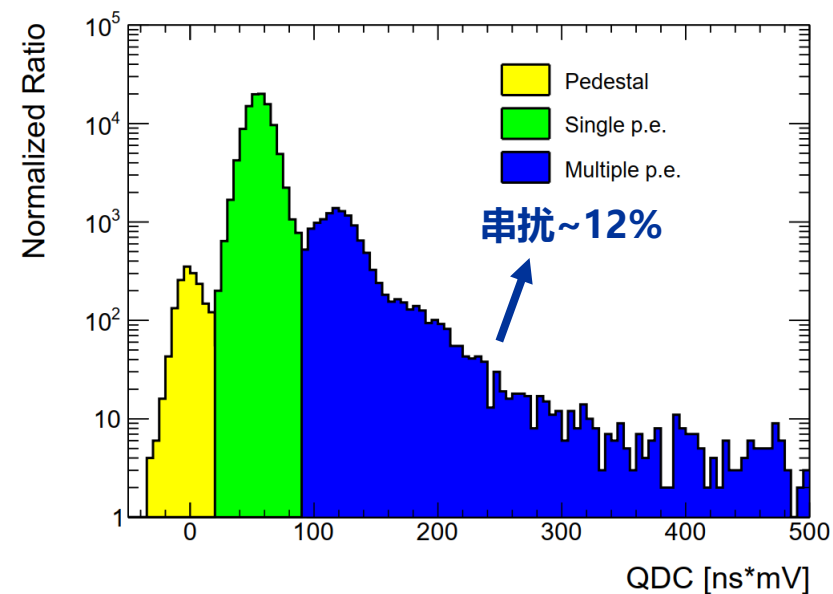
SiPM单光电子波形



SiPM暗计数率测试



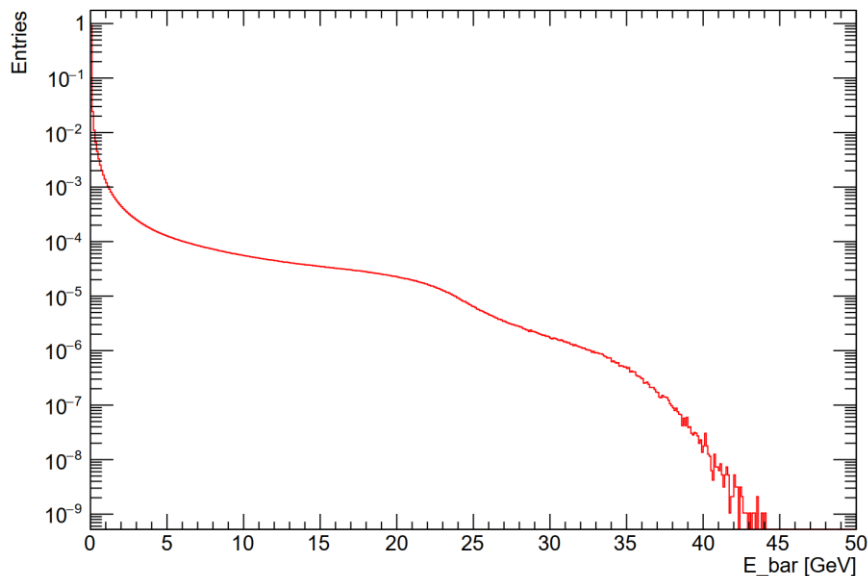
SiPM串扰率测试



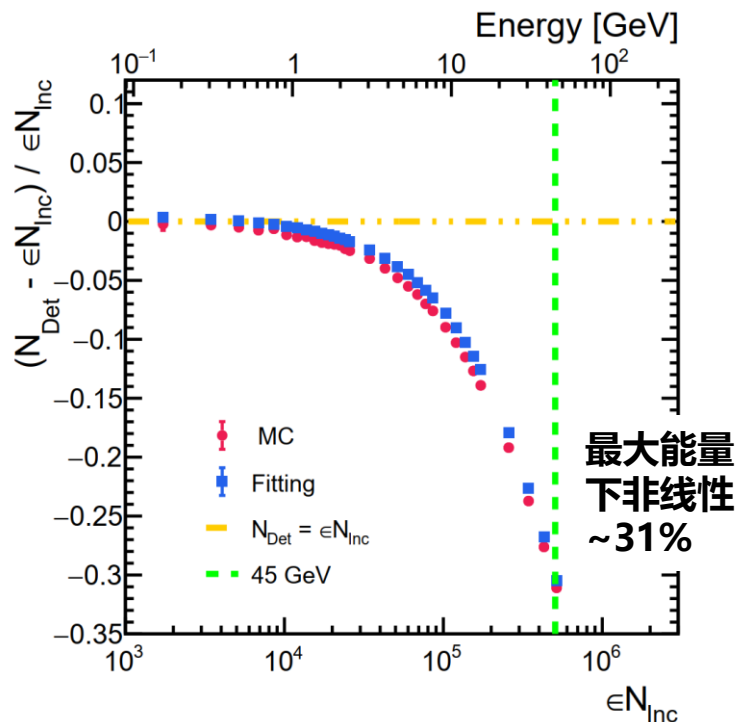
研究进展：硅光电倍增器非线性模拟

- 结合SiPM和BGO晶体基本性能参数，建立模型，模拟SiPM对BGO发光的响应
- SiPM线性范围和像素数及像素密度有关，NDL EQR06型号SiPM线性范围更大，最大能量下非线性仅2.4%

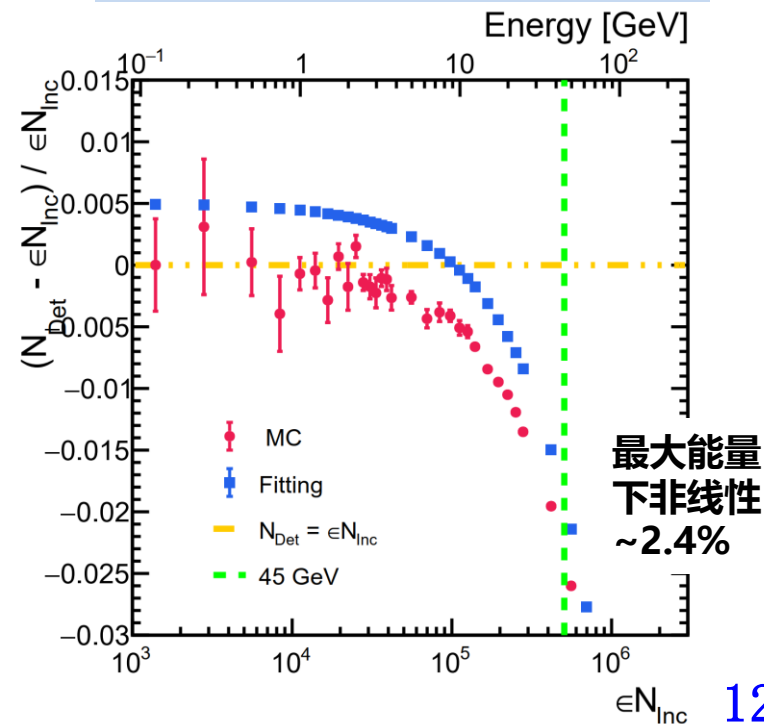
晶体量能器中晶体单元吸收能量范围，最大~45GeV



滨松 S14160-3010PS,
10 μm 像素, ~9万像素数



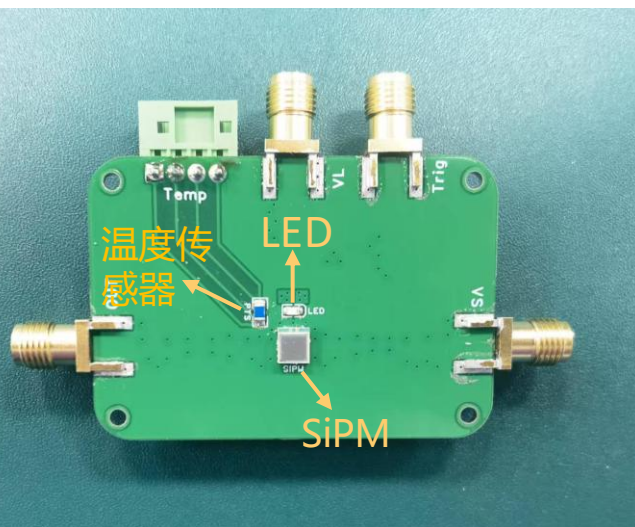
NDL EQR06, 6 μm 像素,
~24万像素数



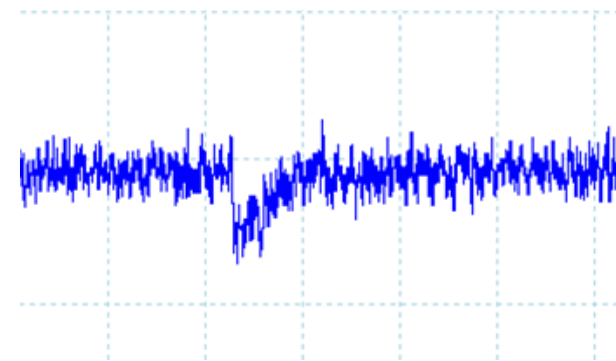
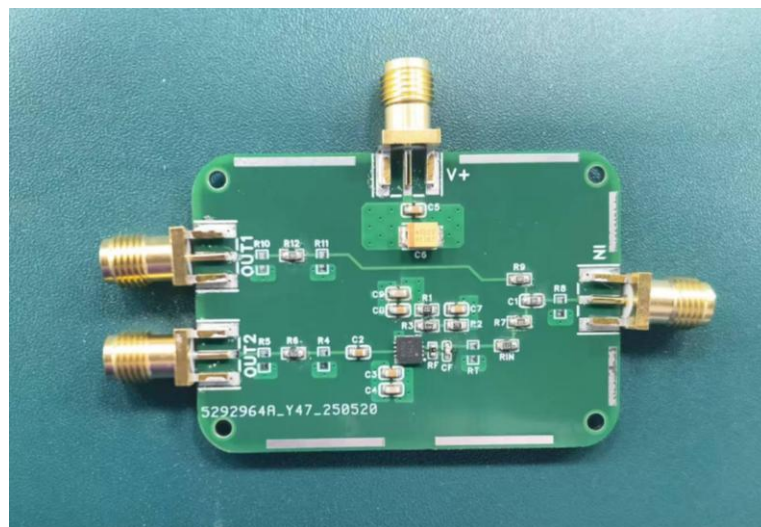
研究进展：探测单元前端电路设计

- 硅光电倍增器电路设计：
 - 集成硅光电倍增器、温度传感器、及LED脉冲驱动电路 (~5ns)
- 前置放大器电路设计：
 - TI LMH6629跨阻放大器, 带宽200MHz
- 前端电路设计可实现较好的信噪比

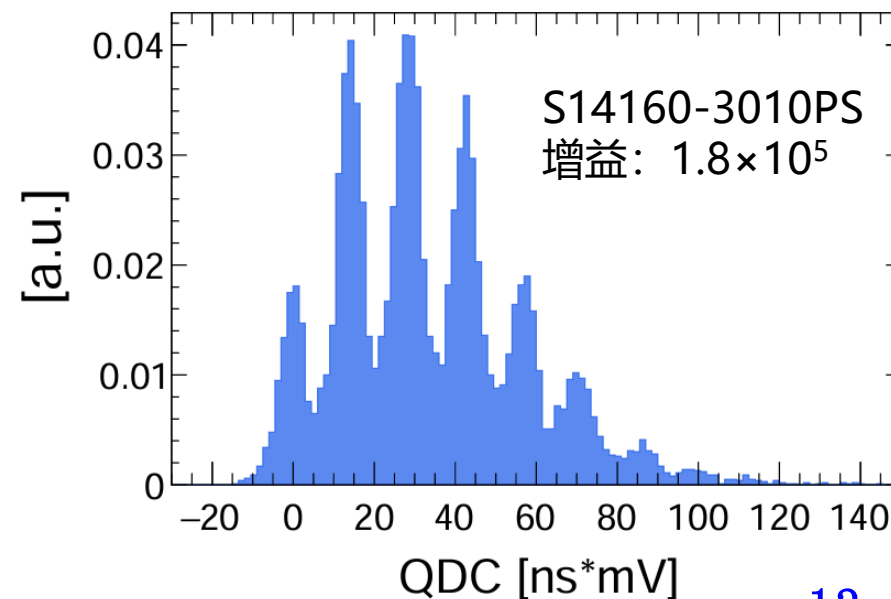
SiPM电路板



前放电路板



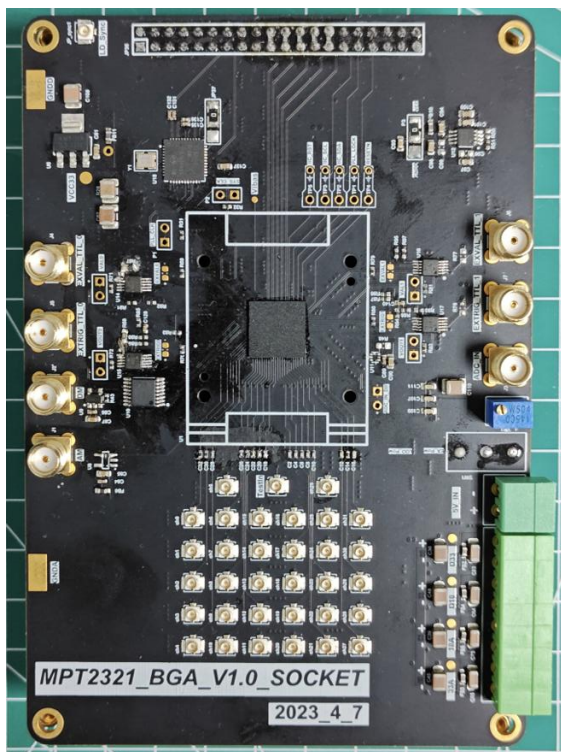
利用前端电路板对SiPM做单光电子刻度



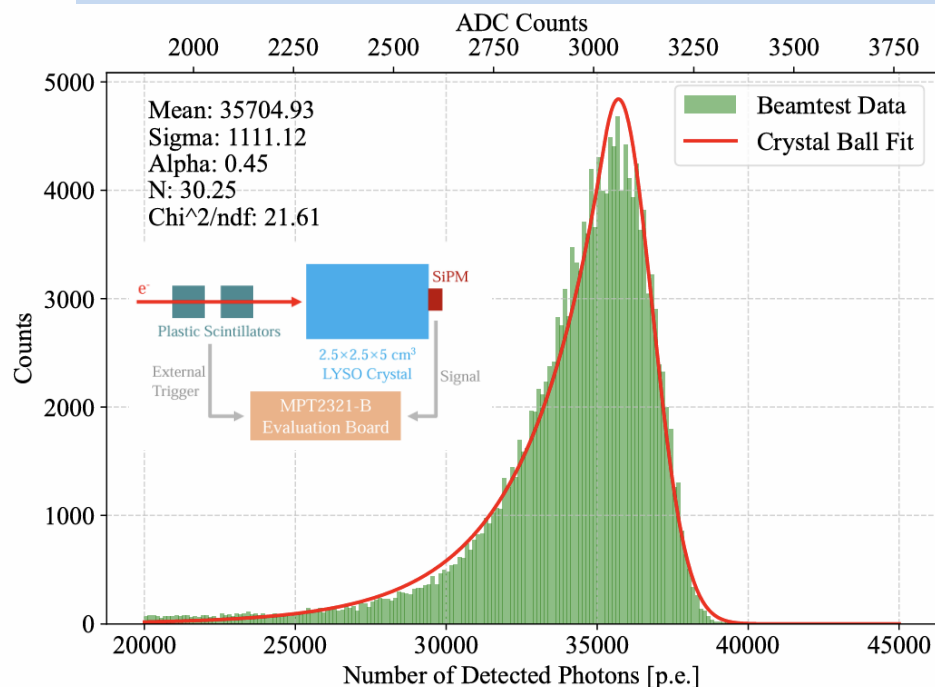
研究进展：样机读出电子学测试

[JINST 20 P05024](#)

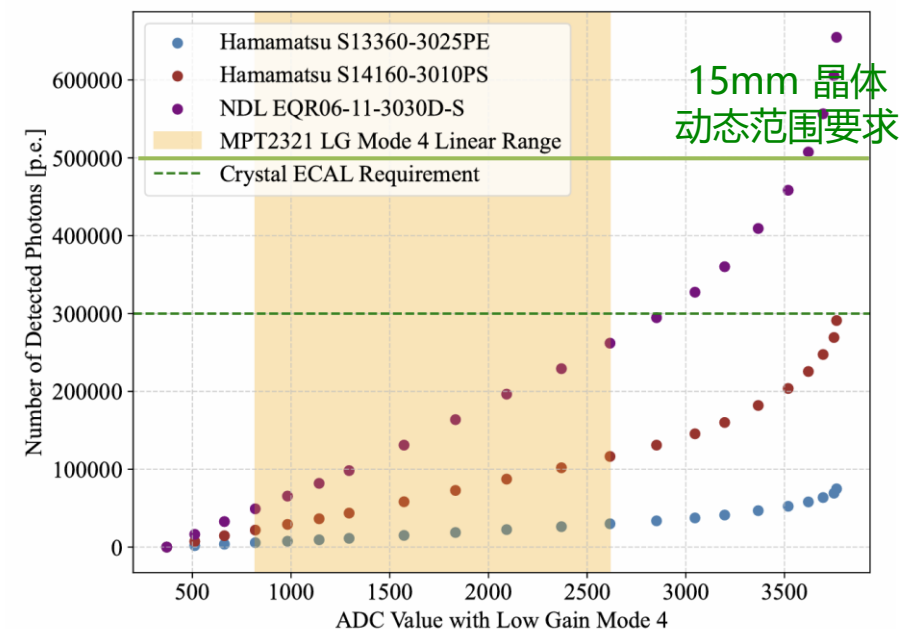
- 宇称MPT2321：用于SiPM读出的大动态范围ASIC
- 线性区最高可至3.35nC，可覆盖晶体量能器（15mm晶体）动态范围的60%。
对非线性区做刻度，可进一步增大动态范围



5GeV电子束流测试（LYSO晶体+SiPM）



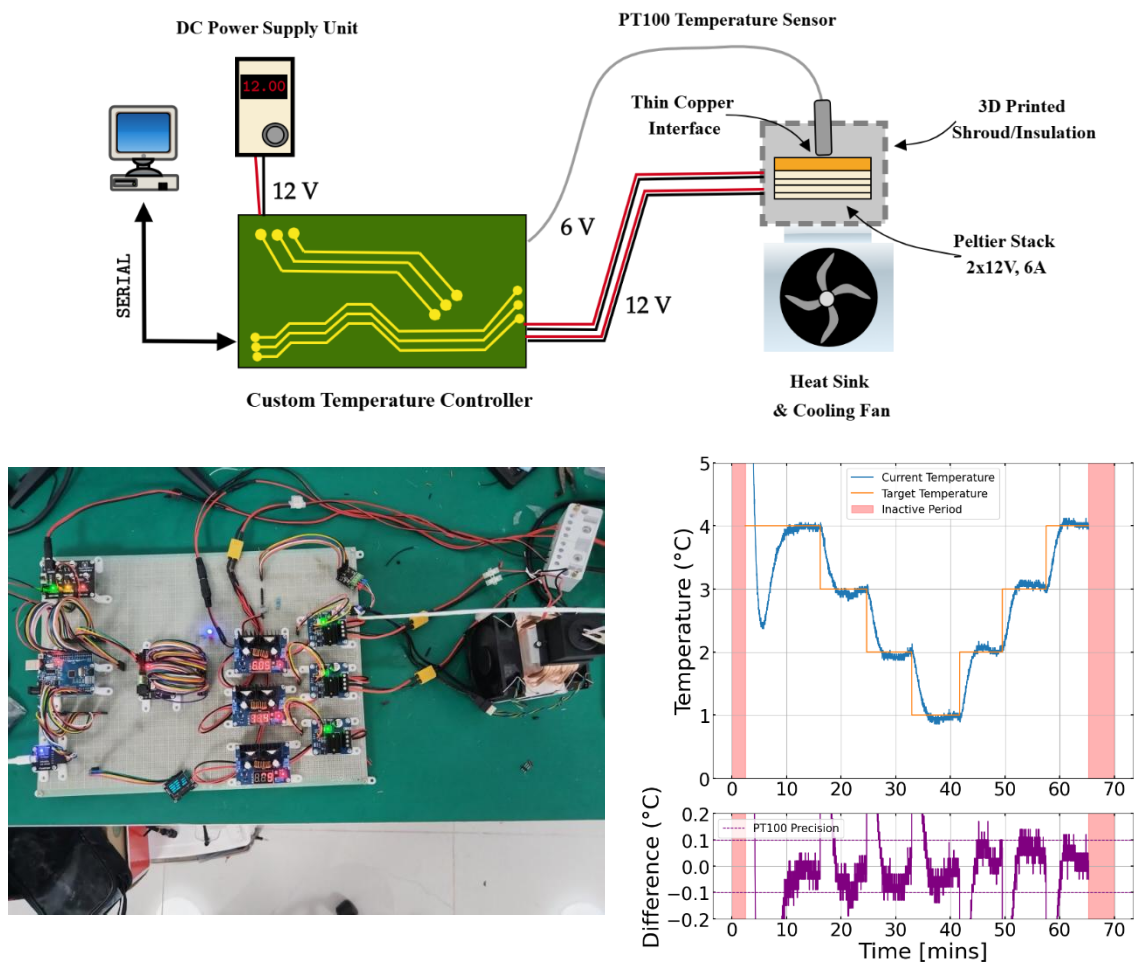
低增益模式动态范围



研究进展：探测器冷却系统设计

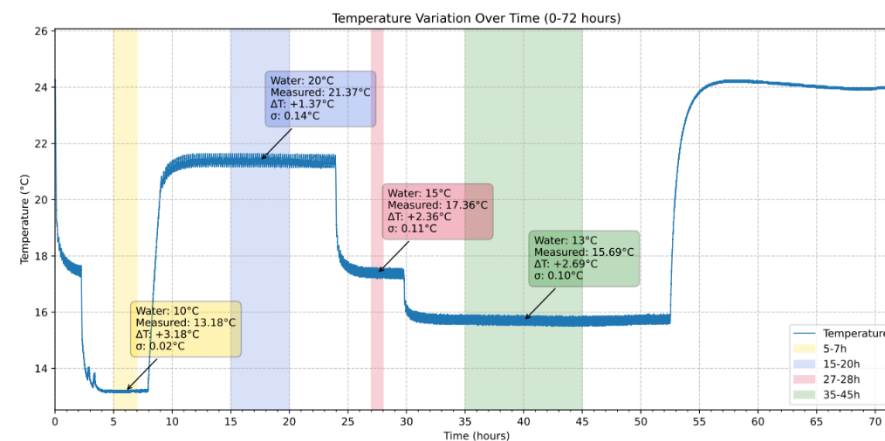
■ 基于半导体制冷片和单片机的温度自动控制系统

— 用于SiPM或晶体的单元测试



■ 基于水冷机和风扇的散热系统

— 用于晶体量能器样机散热



未来研究计划

■ 晶体样机研发及测试

- 完善晶体样机各子系统设计
- 制定样机单元的质量控制方案及样机刻度方案
- 利用国内外已有束流实验平台，对样机做粒子束流实验，验证样机的电磁性能

■ 对探测单元开展更多性能测试和优化工作

- 温度性能测试
- 辐照损伤测试
- 硅光电倍增器非线性响应测试
- 读出电子学多通道测试

总结

■ CEPC高粒度晶体量能器研发：关键技术指标的验证及优化

– 研究进展

- 对探测器样机做了模拟设计，确定了样机尺寸及大体设计
- 测量候选晶体的光产额、时间分辨率、响应均匀性等
- 测量SiPM的噪声水平，并通过模拟评估其非线性行为
- 对样机读出电子学系统开展了动态范围测试
- 初步设计了探测器的冷却系统

– 未来研究计划

- 小型晶体样机研发及束流测试
- 针对探测单元开展更多性能测试和优化工作