

国家重点研发计划“高能量加速器关键技术研究”项目2024年会

晶体和硅光电倍增管的性能测试

报告人：齐宝华 (高能所)

2024年11月29日



目录

- **研究背景**
- **研究进展**
 - **晶体性能测试**
 - **硅光电倍增管响应研究**
- **未来研究计划**
 - **前端电子学性能研究**
 - **小型晶体样机研发**

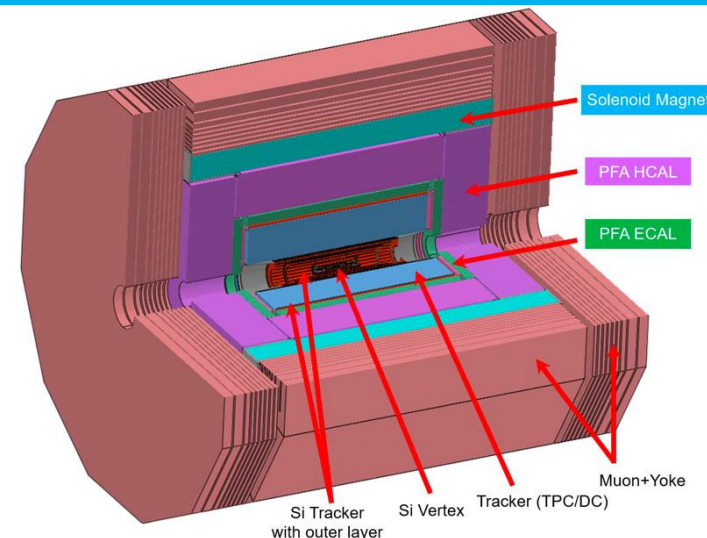
研究背景：CEPC上的晶体量能器

■ 未来环形正负电子对撞机（CEPC）探测器

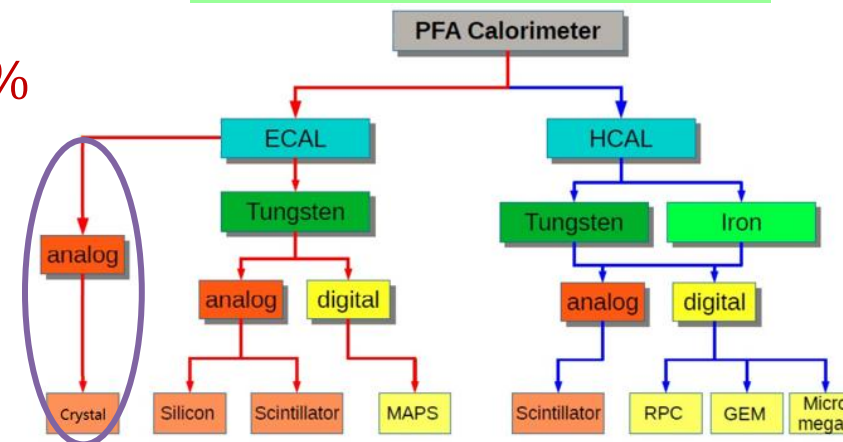
- 实现精确的希格斯玻色子，电弱物理等的测量
- 探索超出标准模型（BSM）物理学等。
- 探测器需要有极高的喷注能量分辨，满足3-4%的希格斯玻色子质量分辨（BMR）

■ 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）



CEPC第四代探测器概念设计

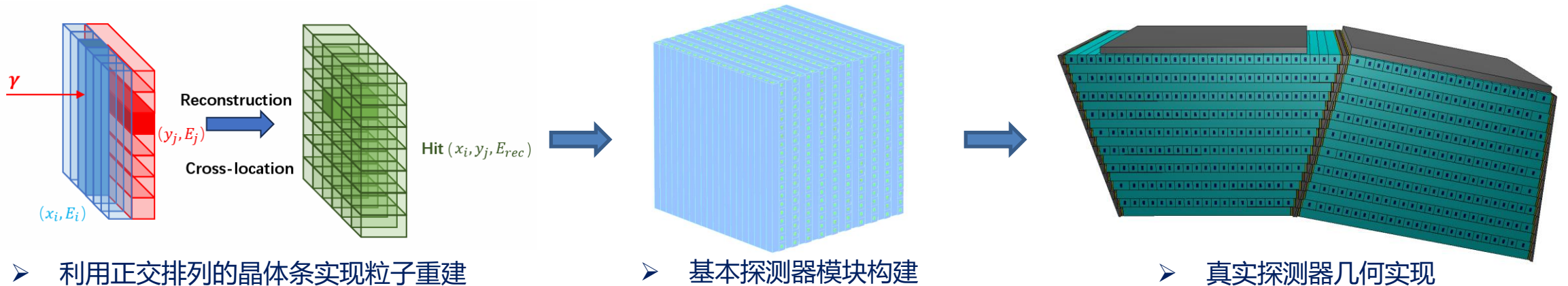


高颗粒度晶体量能器是新的PFA量能器技术路线

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： $1 \times 1 \times 40 \text{ cm}^3$ 长晶体条, 硅光电倍增管 (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 (28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

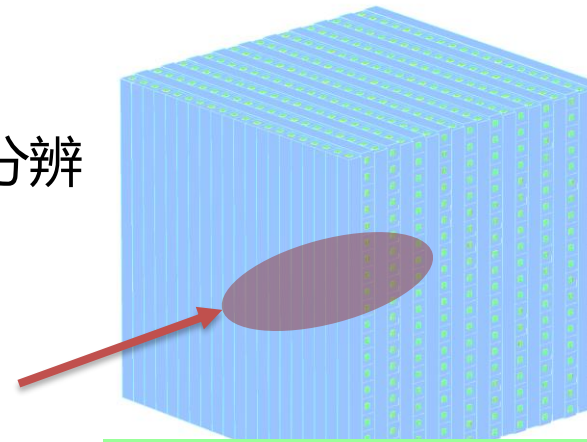
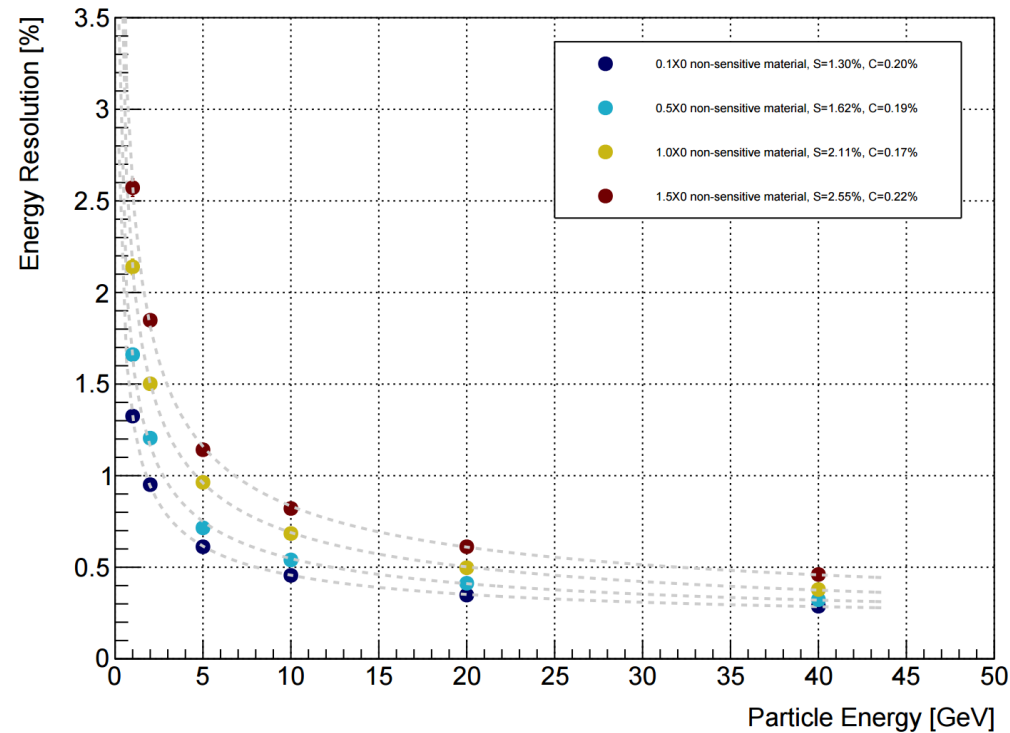
- 与取样型量能器相比, 最小化了层间的非灵敏物质
- 使用长晶体为基本单元, 减少了同等体积量能器需要的读出通道数
- SiPM双端读出具有更好的均一性, 可利用双端时间信息辅助粒子重建

研究背景：预期性能

■ 晶体电磁量能器模拟

- 40cm模块对电子的响应：理想情况下的能量分辨
- 研究层间总非灵敏物质对能量分辨的影响

不同层间非灵敏物质量下的能量分辨



Geant4模拟40cm晶体模块

- 模拟考虑28层晶体，40cm模块
- 构建ESR反射膜以及SiPM几何
- 使用不同的层间非灵敏物质量
- 应用数字化模型：考虑晶体发光属性和SiPM及电子学响应

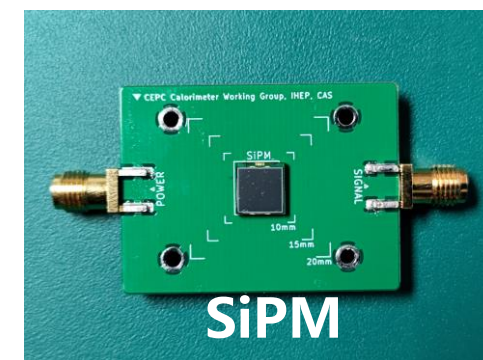
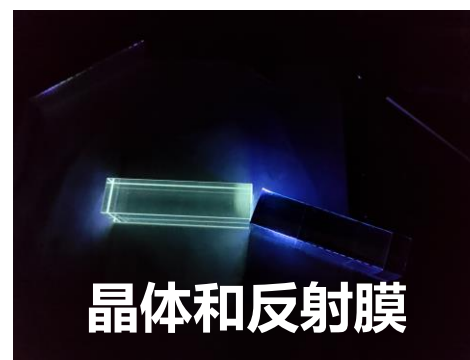
- 模拟预期：能量分辨统计项好于3%，满足指标要求
 - 降低非灵敏物质量可得到更好的能量分辨
- 硬件实现：关键技术指标
 - 晶体：光输出、机械性能、均一性等
 - SiPM：噪声水平，响应非线性等
 - 电子学：动态范围等
 - 整体性能：时间分辨、电磁簇射响应等

研究背景：关键技术指标

关键参数	参考值 (初步)	注释
晶体光输出	~200 p.e. / MIP	保证能量分辨 $\sim 3\%/\sqrt{E}$
能量阈值	0.1 MIP	取决于信噪比及MIP响应
晶体不均一性	< 1%	包括晶体内部和晶体间均一性
动态范围	0.1~3000 MIPs	360 GeV Bhabha事例单个读出通道的要求
时间分辨	~500 ps @ 1 MIP	辅助粒子位置重建
温度稳定性	~0.05 °C	CMS ECAL的参考值

■ 关键技术指标的验证及优化

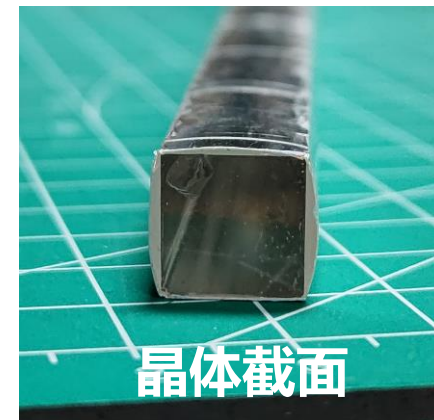
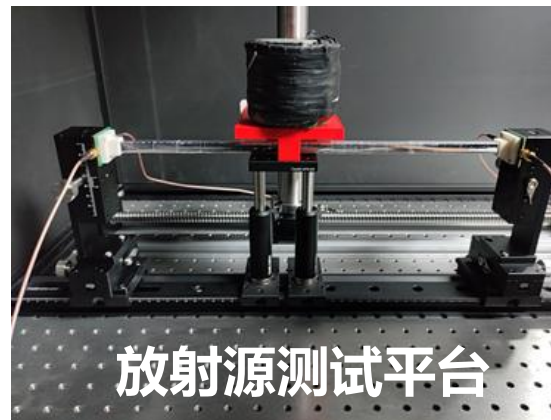
- 晶体性能测试：放射源、宇宙线、束流
- SiPM性能测试：LED、激光
- 系统层面性能：晶体样机束流实验



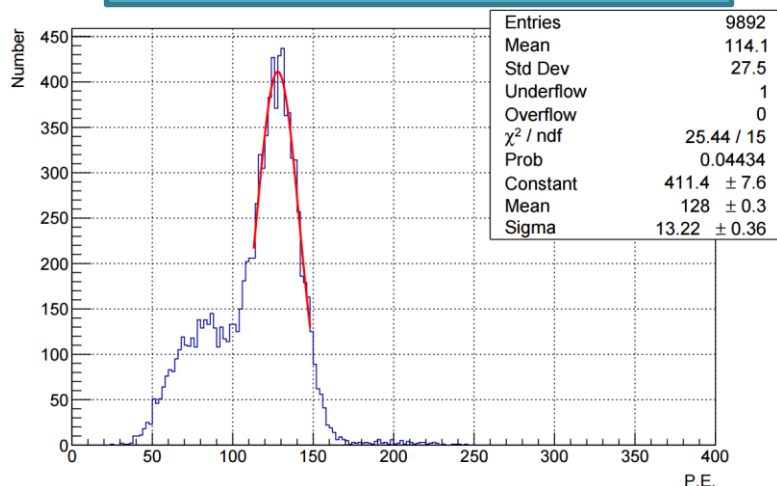
研究进展：晶体性能测试

■ 晶体能谱测试：放射源、宇宙线

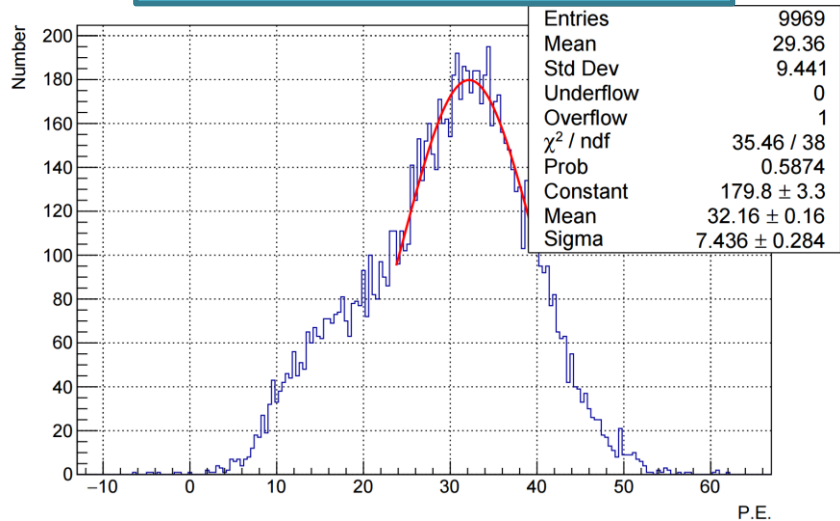
- 晶体候选材料：BGO/BSO
 - BGO和BSO整体类似，BSO密度略小，光产额较低，发光衰减更快，抗辐照性能更强，原材料成本更低
- 晶体包装：ESR反射膜和铝膜



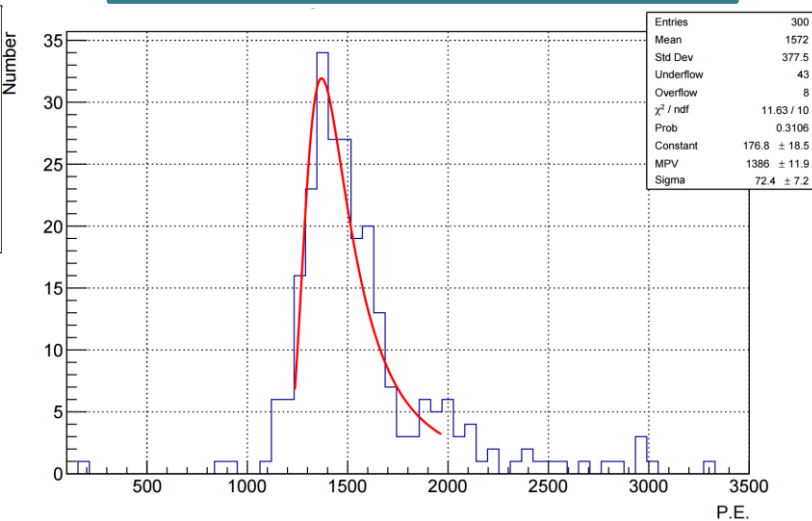
40 cm BGO晶体 + 662 keV放射源



7 cm BSO晶体 + 662 keV放射源



40 cm BGO晶体 + 宇宙线 (MIP)

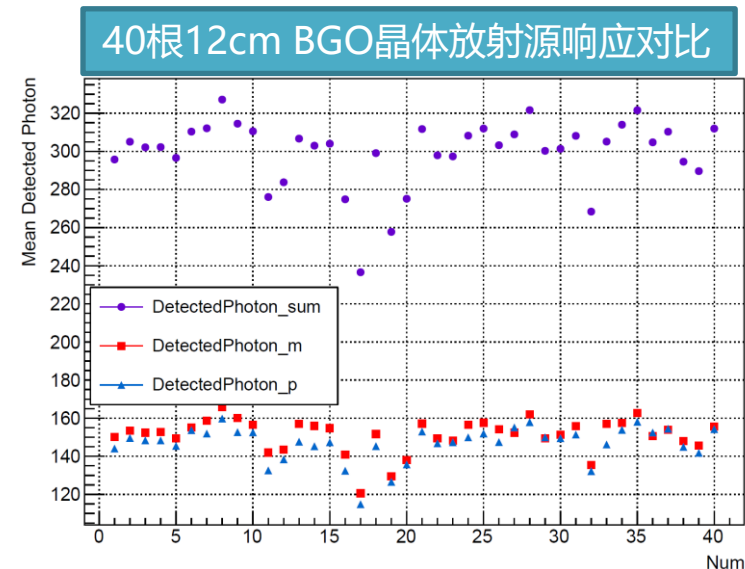
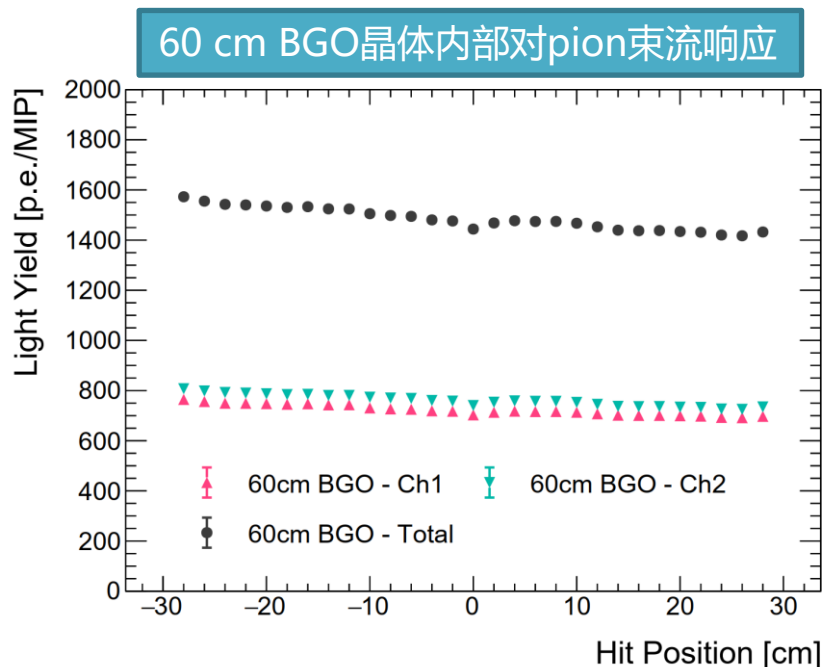
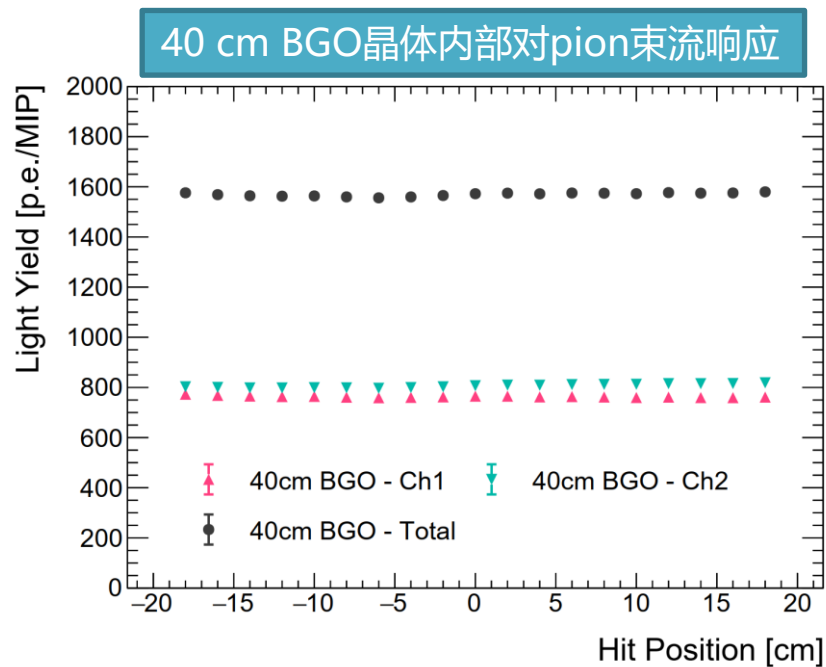
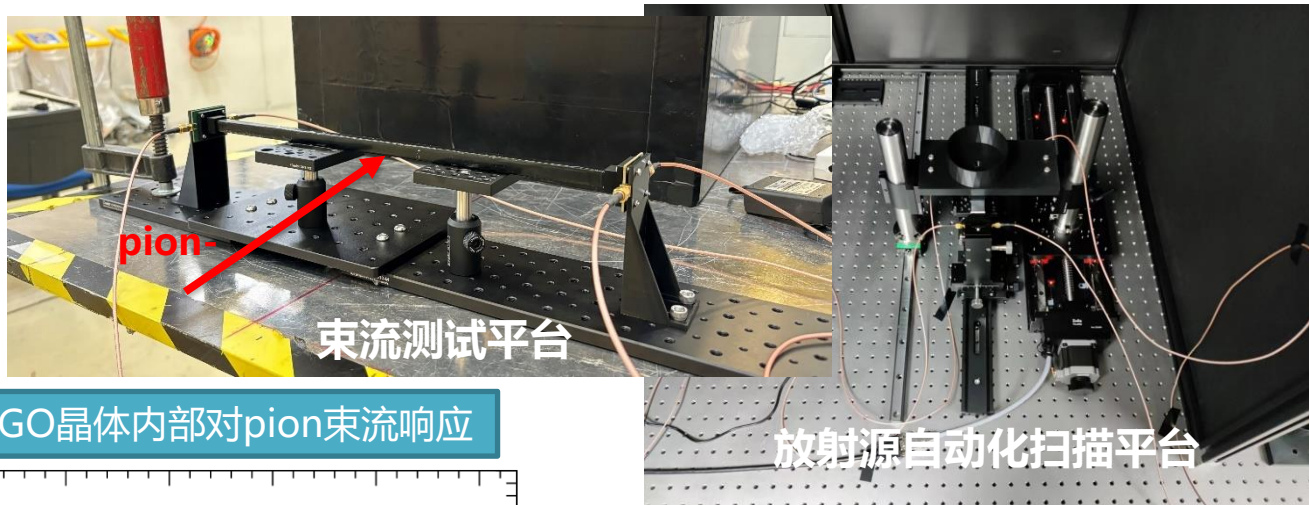


晶体测试使用滨松S13360-6025PE SiPM以及NDL x10前置放大器

研究进展：晶体性能测试

■ 晶体均一性测试：放射源、束流

- 长晶体内部均一性：影响簇射响应能谱
- 晶体间相应差异：大批量晶体刻度

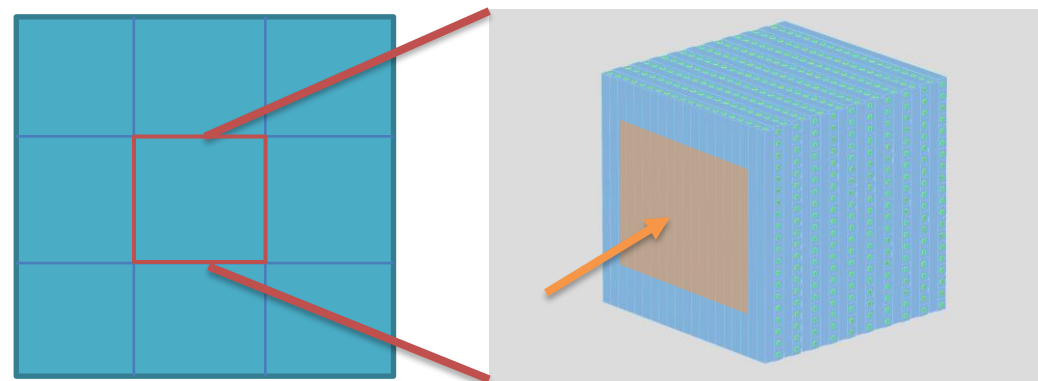
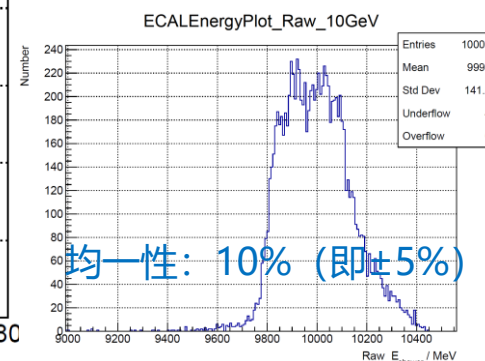
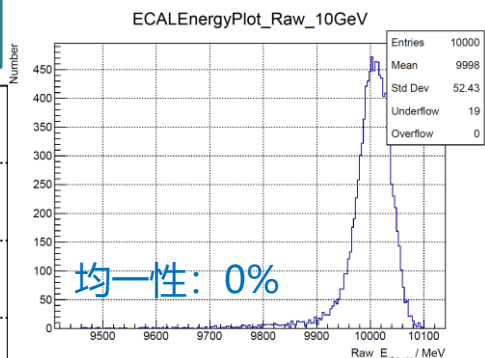
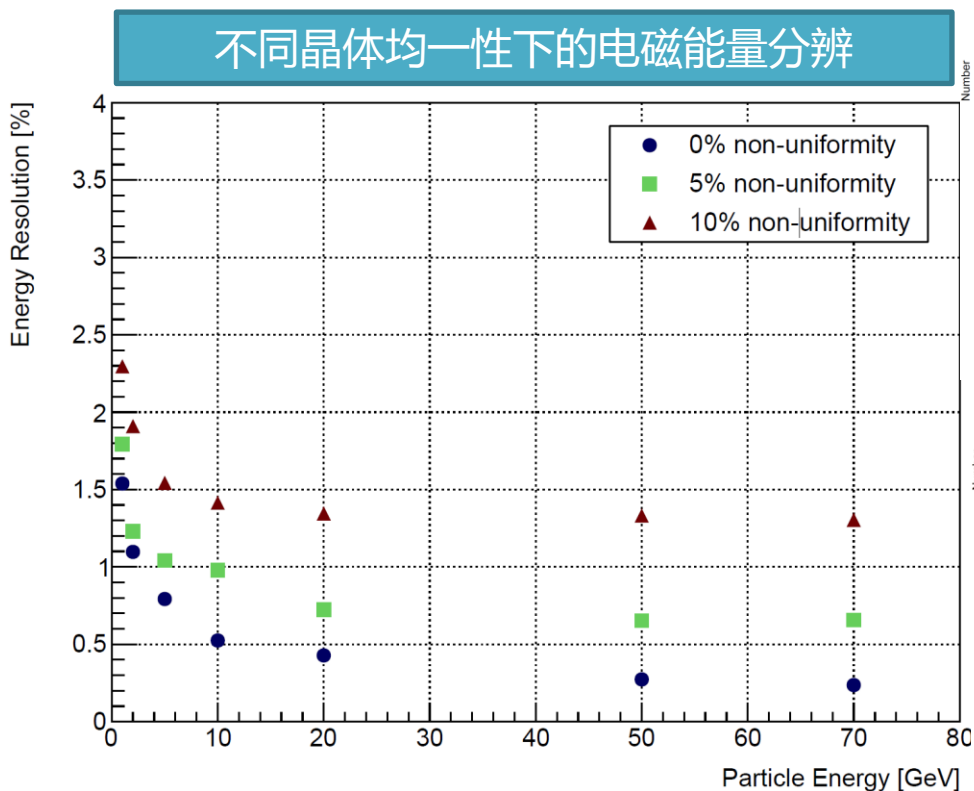


- 晶体内响应均一性：40 cm BGO为 $\pm 0.75\%$ ，60 cm BGO为 $\pm 5\%$

研究进展：晶体性能测试

■ 模拟验证：均一性对能量分辨的影响

- 3×3个晶体量能器模块阵列用于研究
- 改变长晶体条内部的响应均一性



Geant4模拟9个晶体模块阵列，电子入射在中心模块上

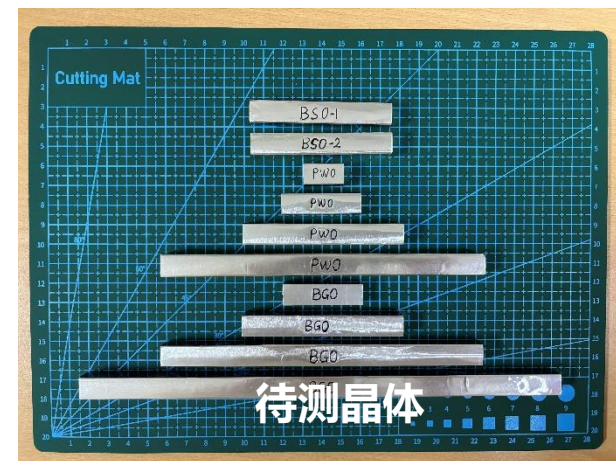
- 均一性较差时，电子能谱将偏离高斯分布
- 能量分辨显著收到晶体内部均一性影响
 - 对能量分辨常数项有明显贡献
- 晶体质量控制上，需要对均一性提出要求

研究进展：晶体性能测试

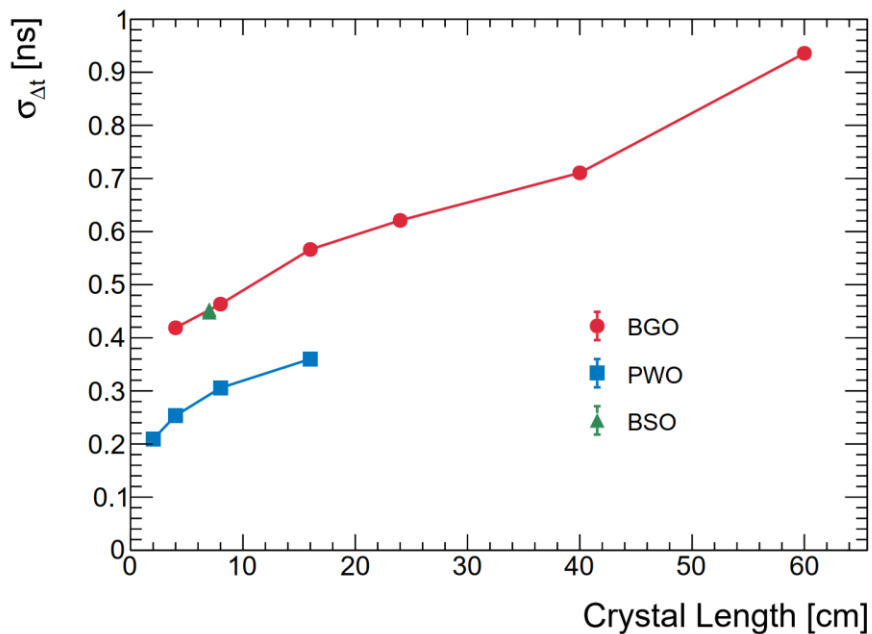
■ 晶体时间分辨研究：束流实验

- 不同长度、不同种类晶体的双端读出时间分辨
- 为时间分辨性能指标提供参考

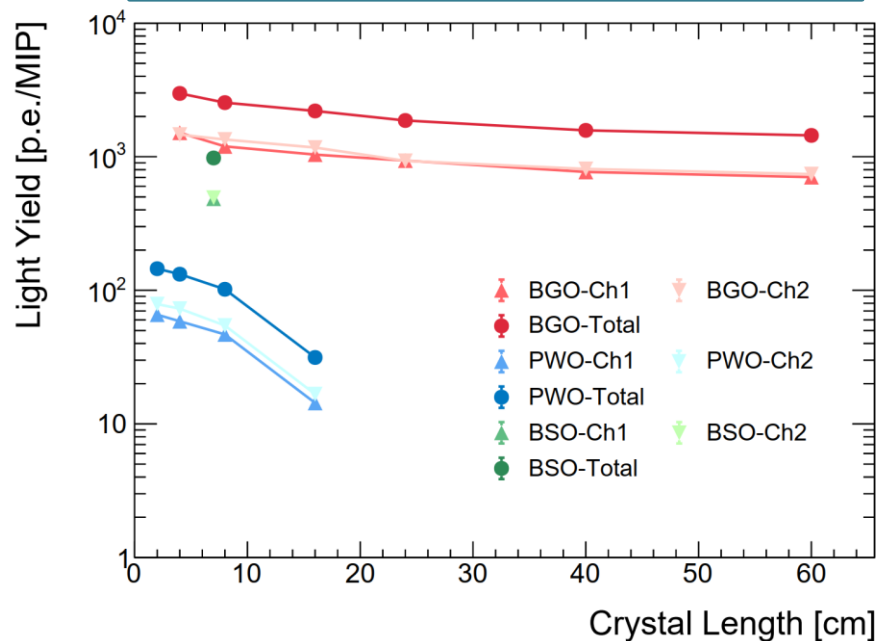
晶体	衰减时间
BGO	300 ns
BSO	100 ns
PWO	30 ns



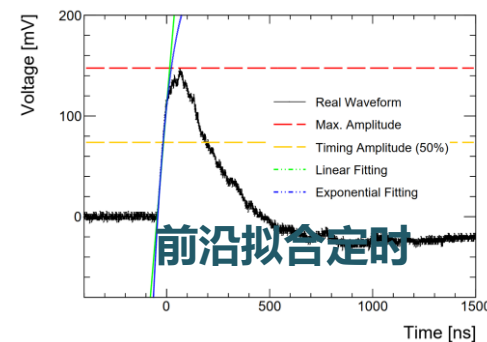
不同晶体的时间分辨



不同晶体的MIP响应



• 对于同种晶体，时间分辨与MIP响应相关；不同晶体衰减时间快的时间分辨好

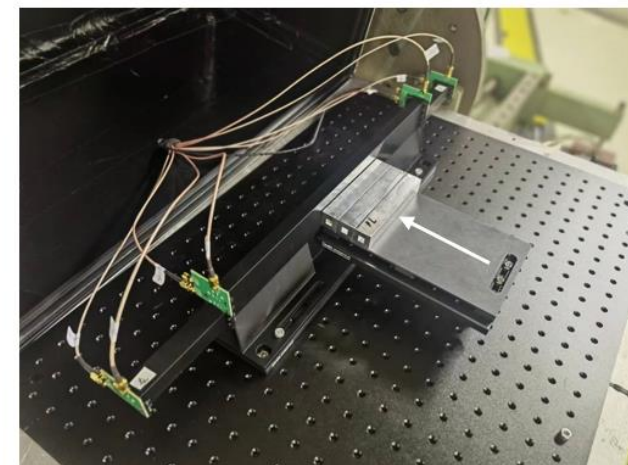
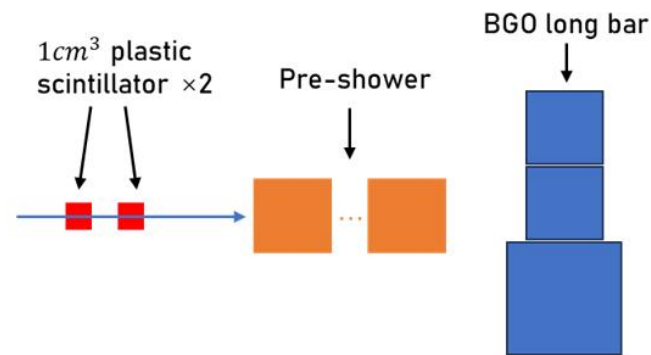
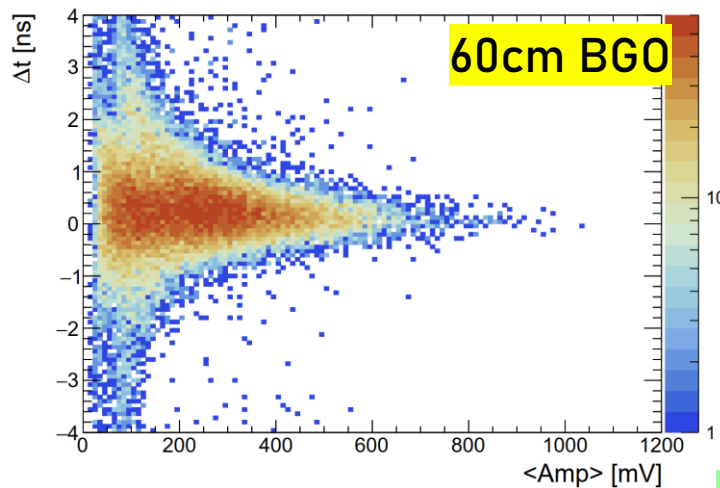
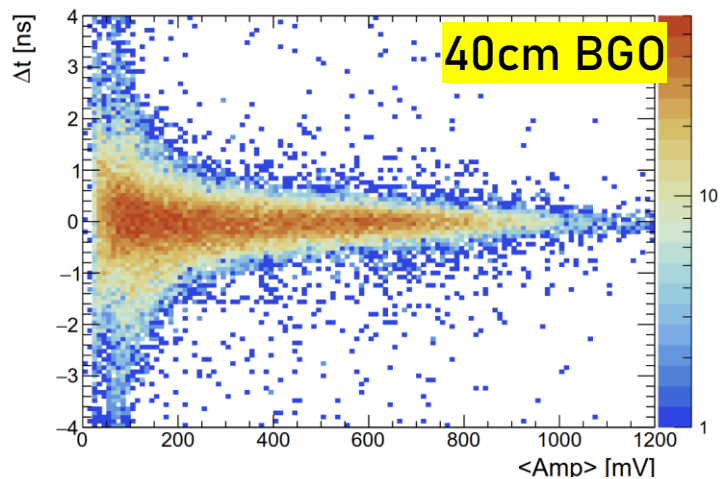
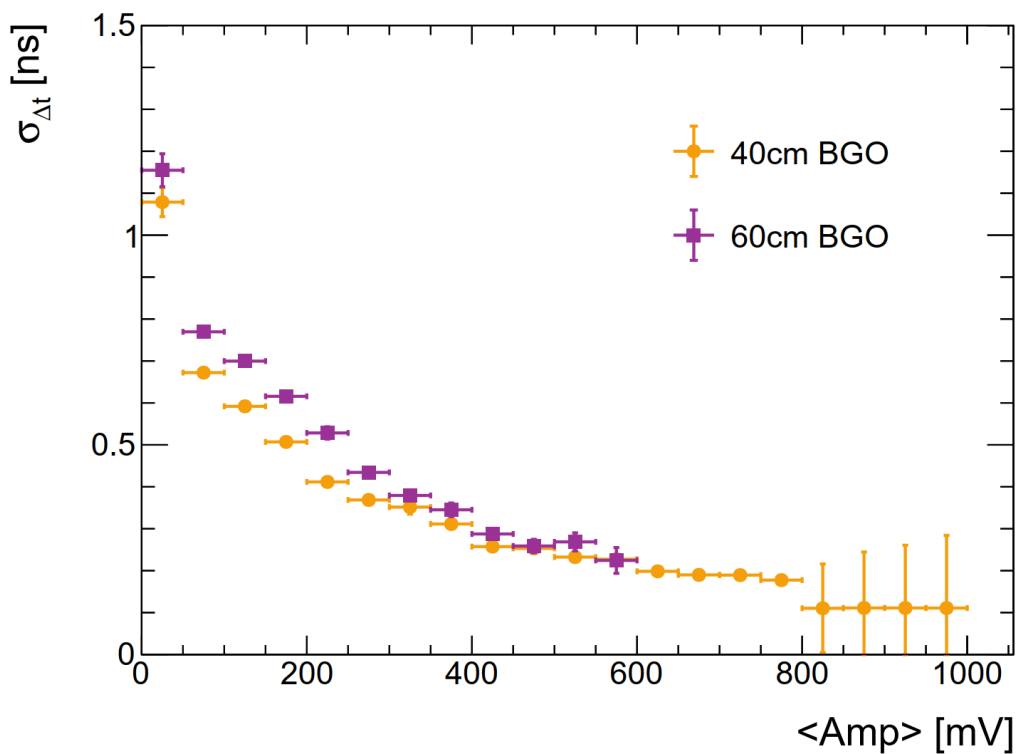


前沿拟合定时

研究进展：晶体性能测试

■ 晶体时间分辨研究：束流实验

- 电子束流研究不同幅度下的时间分辨
- 不使用前置放大器

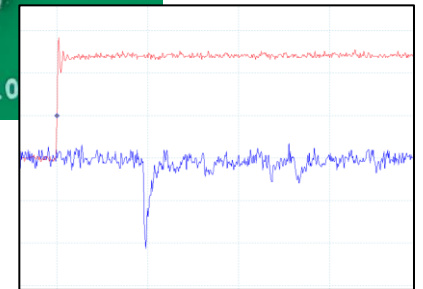
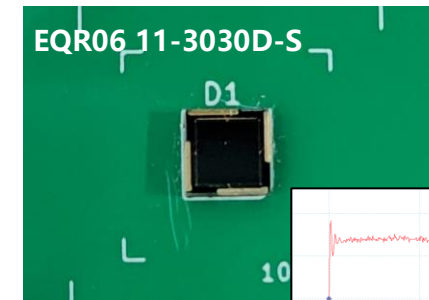
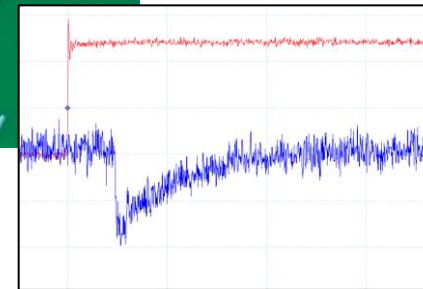
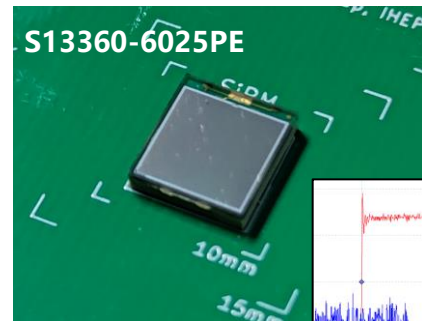
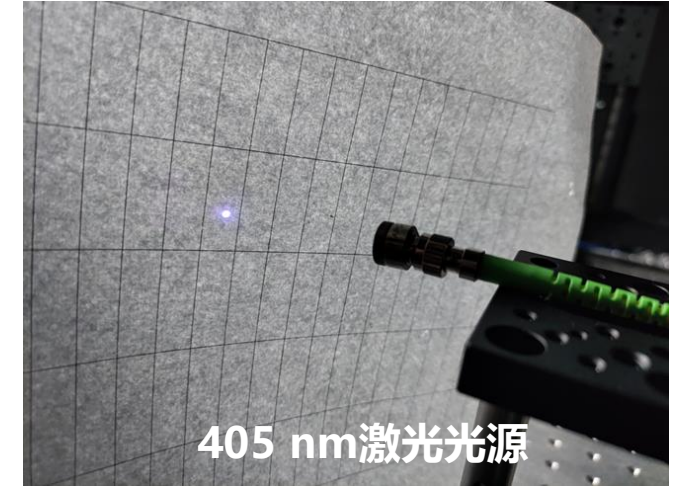
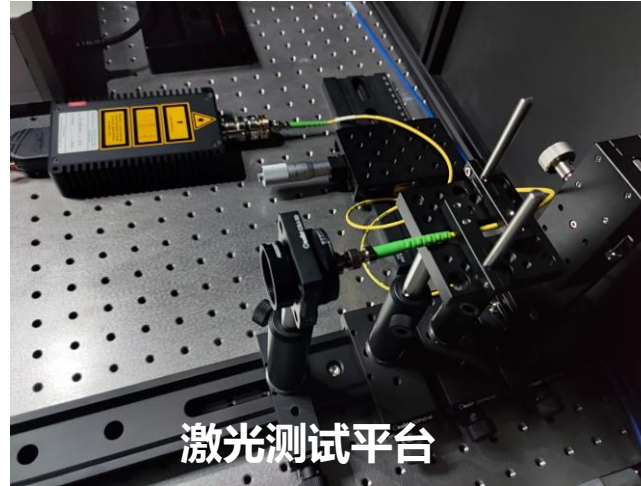
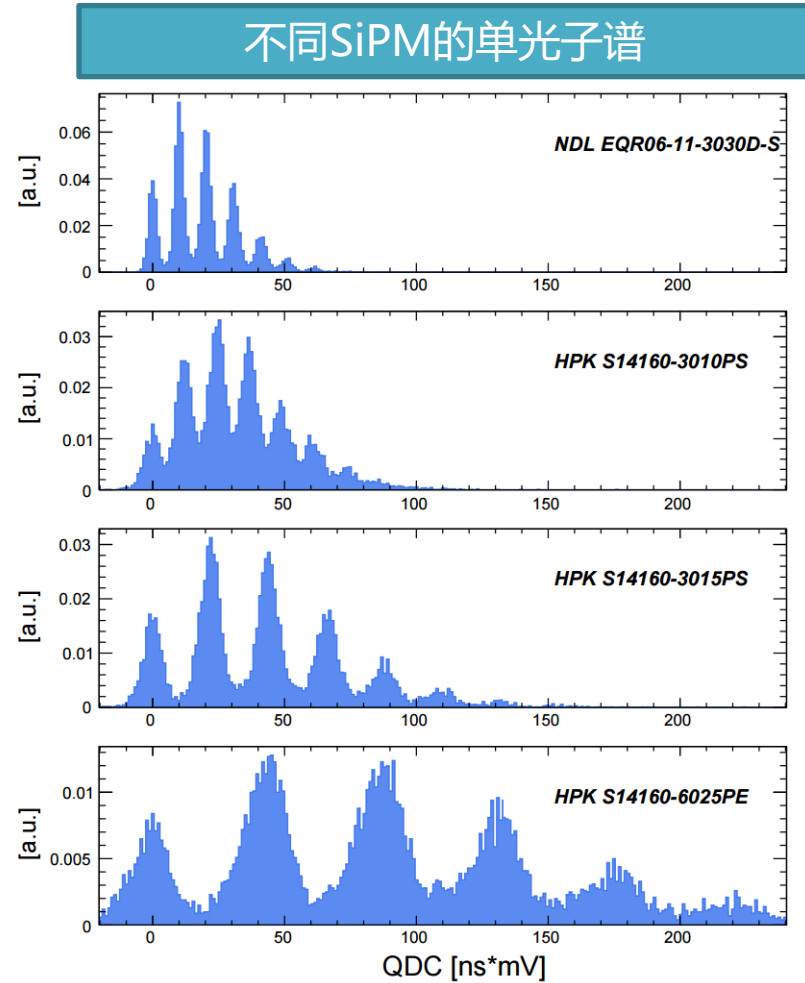


束流测试使用BGO晶体作为Pre-shower

- 信号幅度越大，时间分辨越好；实验受到电子学采样率的限制

研究进展：硅光电倍增管响应研究

单光子刻度：激光测试

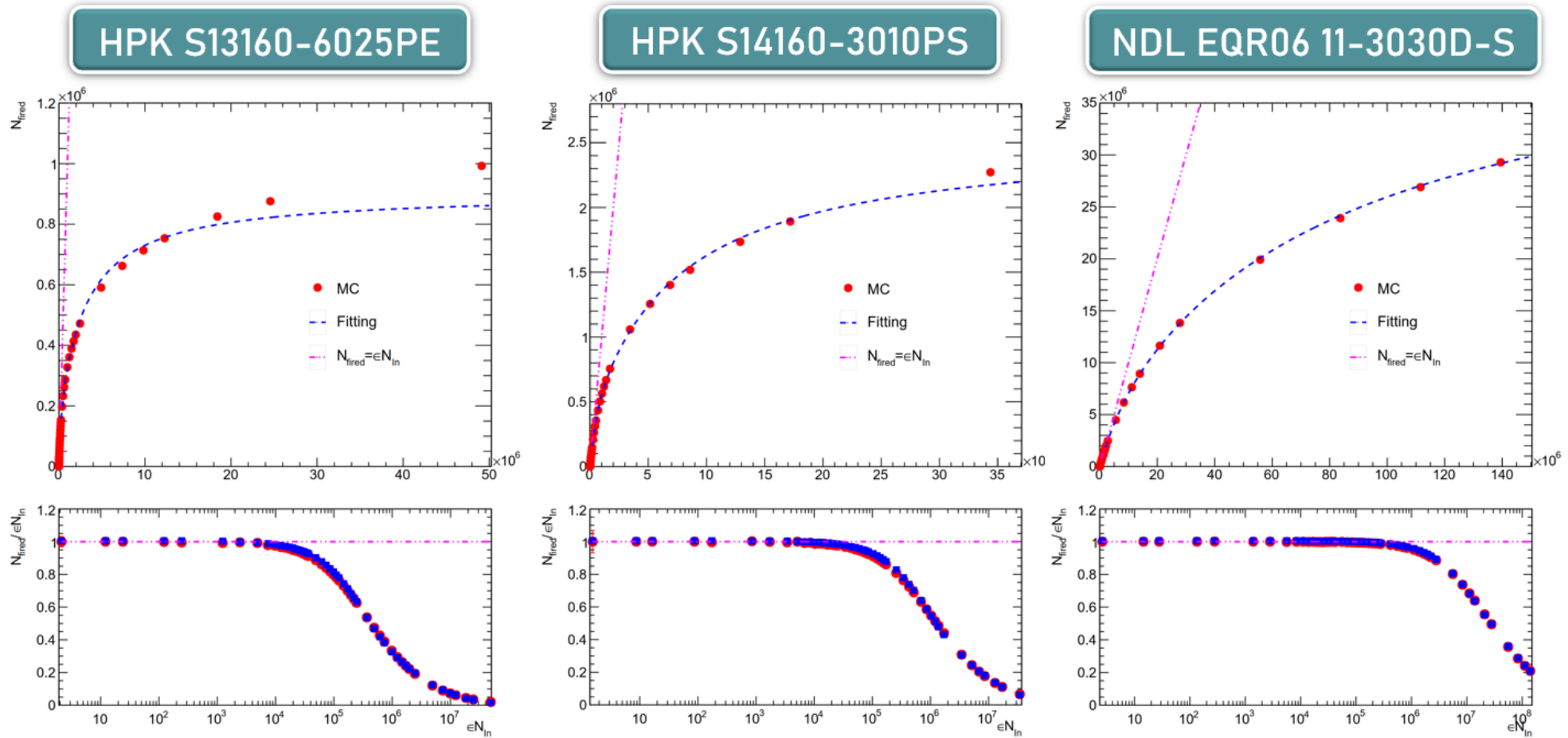


典型SiPM器件及其波形

研究进展：硅光电倍增管响应研究

2024 CEPC Workshop: [Studies on the Dynamic Range of SiPMs with High Pixel Densities](#)

■ 动态范围研究：模拟晶体-SiPM单元响应



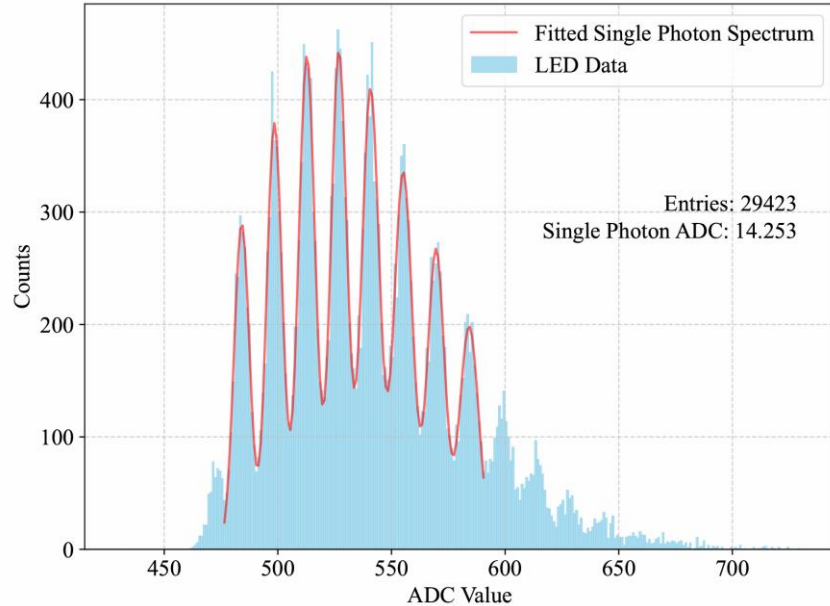
- 考虑到SiPM的像素恢复效应，使用衰减时间长的晶体可增大线性范围

未来研究计划：前端电子学性能研究

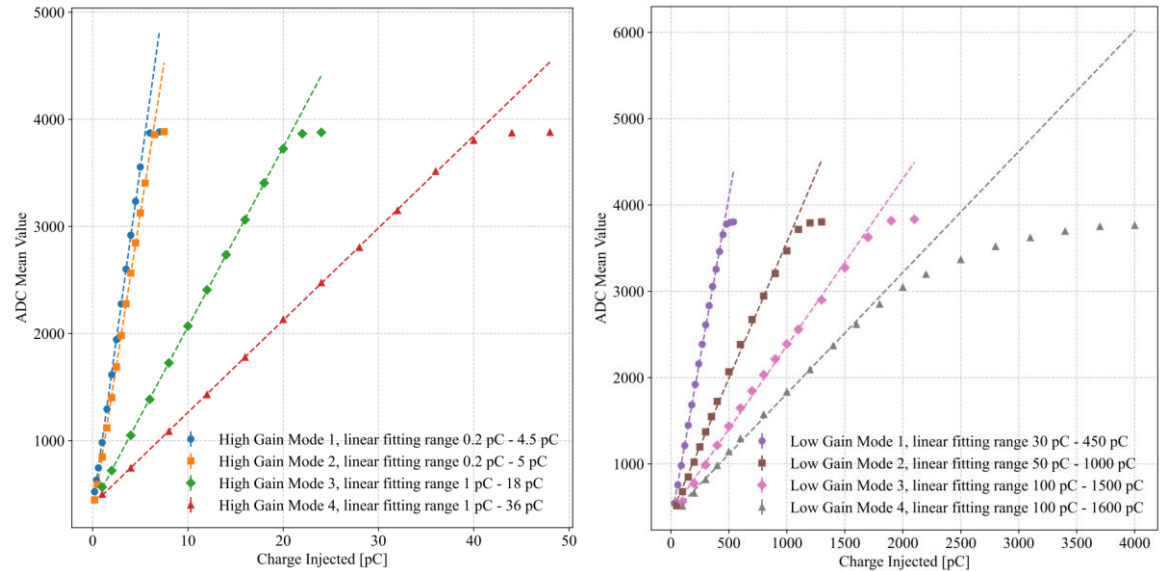
■ 研究基础：商用ASIC MPT2321-B初步测试

- 单光子刻度；电荷注入测试响应线性

MPT单光子刻度



电荷注入响应线性测试

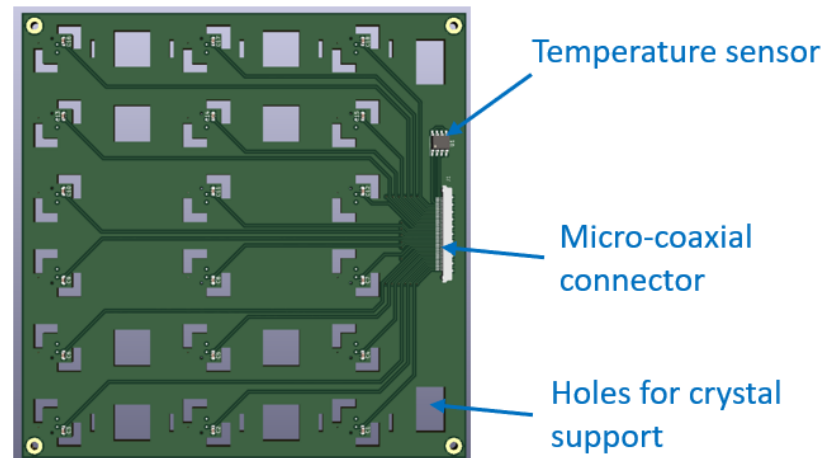
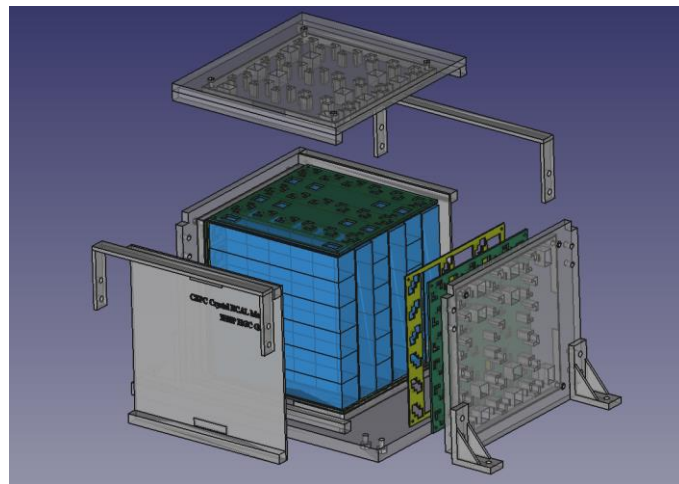
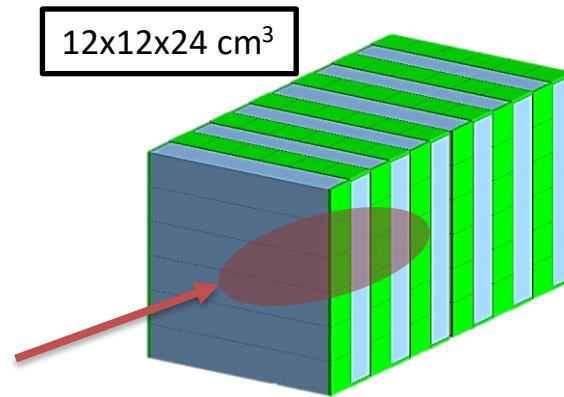
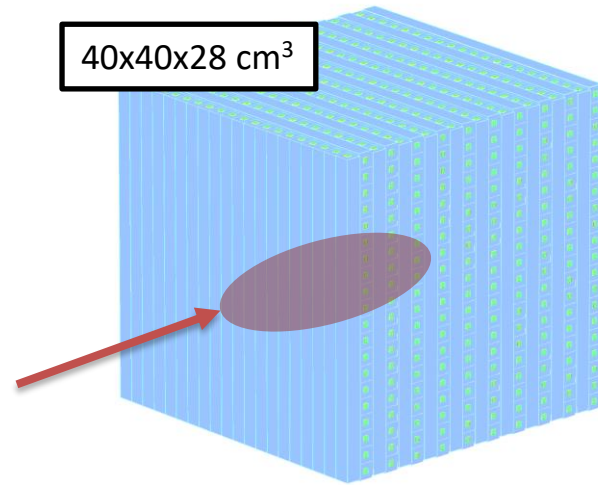


■ 研究计划：

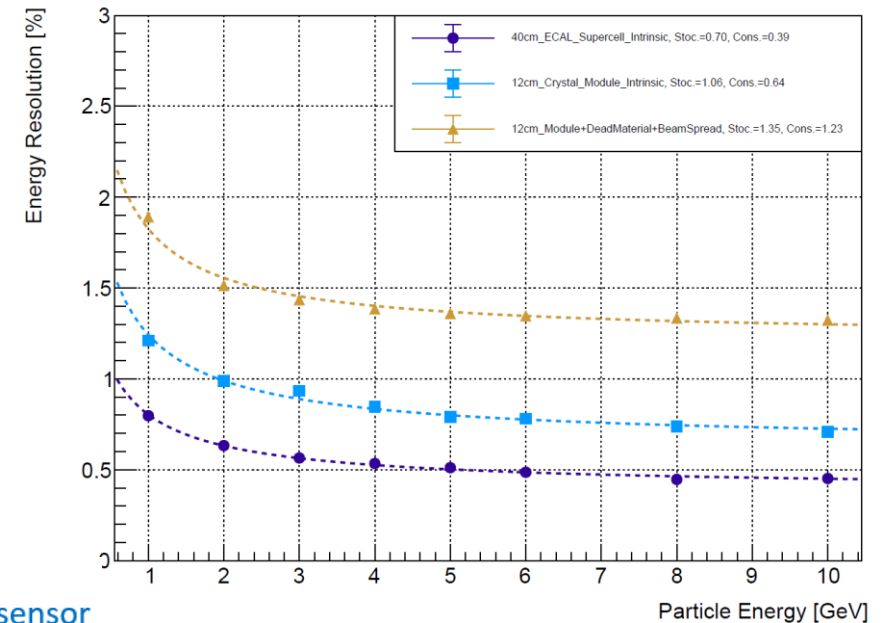
- 在系统级别测试ASIC的响应及动态范围

未来研究计划：小型晶体样机研发

研究基础：小型晶体样机设计



不同尺寸样机的预期能量分辨对比

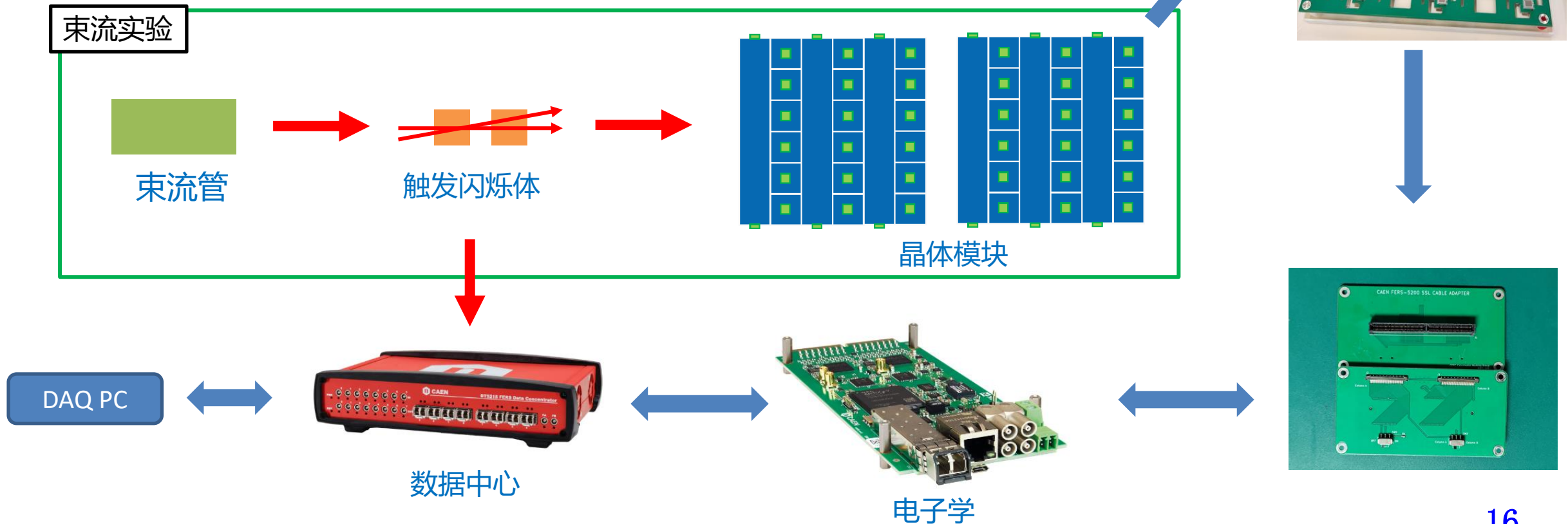


- 12 cm模块可以有效探测1-10 GeV电子
- PCB和机械需要独特设计
- 考虑电子学和触发方案
- 研究温度控制对性能的影响

未来研究计划：小型晶体样机研发

■ 研究计划：束流实验

- 首次安装及测试实验
- 电子响应测试：能量分辨研究



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

- 对候选晶体进行了放射源、宇宙线、束流测试：充分研究了晶体能谱、MIP响应、均一性、时间分辨等
- 利用激光研究SiPM特性：单光子谱、非线性响应

– 未来研究计划

- 用于高粒度晶体量能器的大动态范围ASIC的测试
- 小型晶体样机研发及束流测试

本年度会议报告

- 2024 CEPC EU Workshop, Talk, “High-granularity crystal ECAL R&D activities and highlights”
- 2024 CEPC Workshop, Talk, “Development of a Highly Granular Crystal ECAL for CEPC”
- CALOR 2024, Talk, “Development of a novel high granularity crystal electromagnetic calorimeter”
- ICHEP 2024, Talk, “Development of a Novel Crystal Electromagnetic Calorimeter and Particle Flow Algorithm for Future Lepton Collider Experiments”
- PISA 2024, Poster, “Development of a novel high granularity crystal electromagnetic calorimeter for future lepton collider experiments”
- 第十四届全国粒子物理学术会议, Talk, “High-granularity Crystal ECAL R&D for Future Higgs Factories”

Thanks for your attention!