

2023年国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”

全吸收型电磁量能器技术 年度进展报告

课题负责人：杨海军 (上海交大/李所)

2025年5月28日



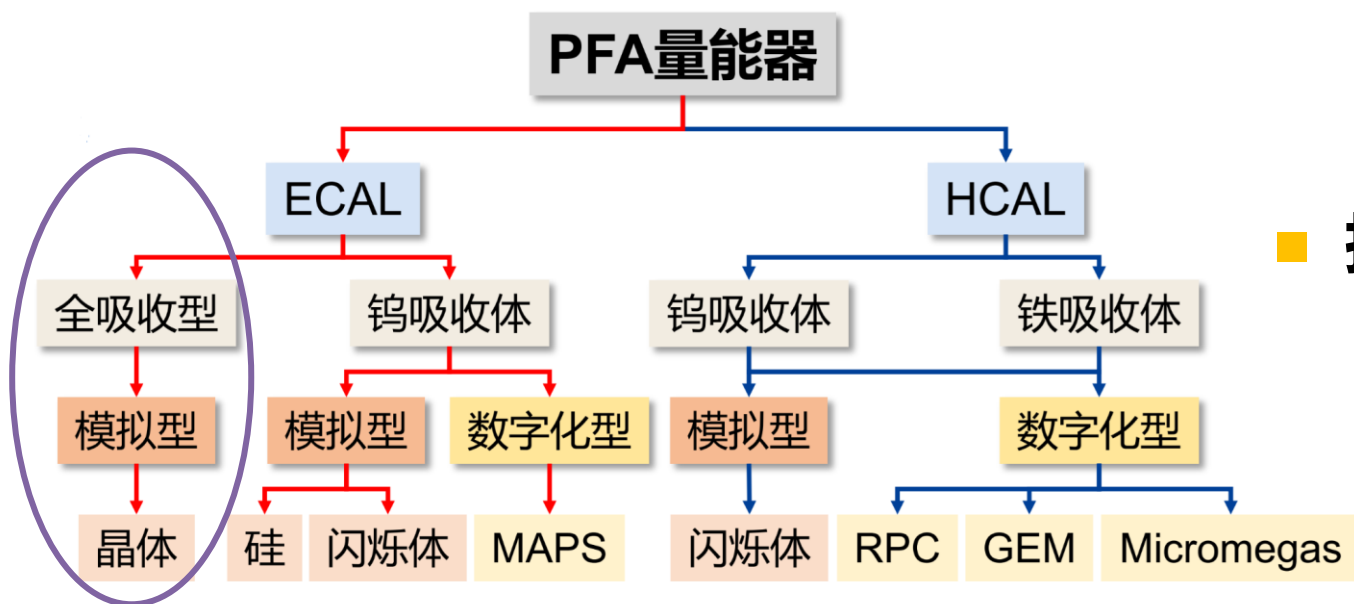
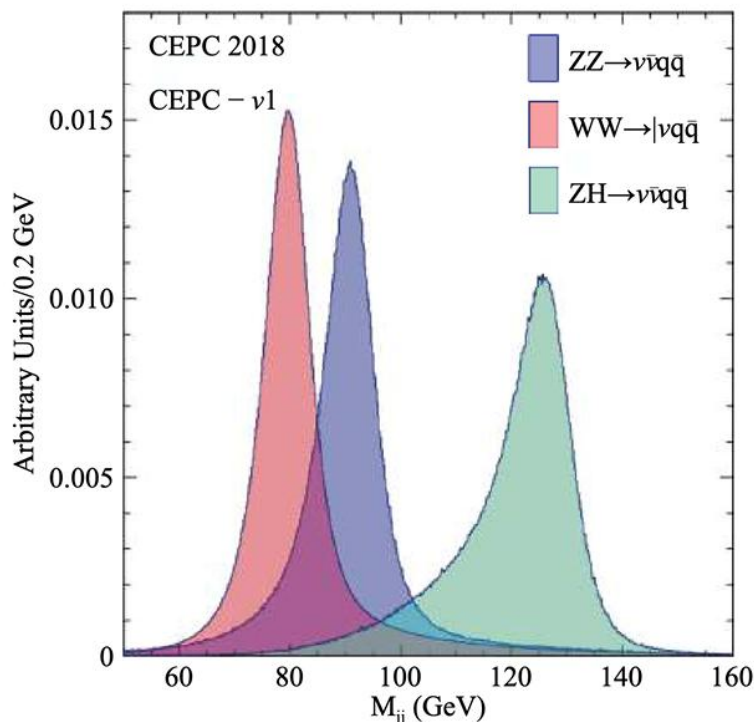
报告提纲

- 课题研究背景介绍
- 研究目标和研究内容
- 研究方案和技术路线
- 研究进展及亮点成果
- 团队成员和人才培养
- 总结和未来计划

研究背景

■ 未来环形正负电子对撞机（CEPC）探测器

- 以前所未有的精度测量希格斯玻色子，电弱物理等
- 探索超出标准模型的新物理现象
- 对探测器性能提出了极具挑战性的要求：喷注能量分辨满足3-4%@100 GeV，以取得优异的玻色子质量分辨率



■ 技术方案：高颗粒度电磁量能器

- 基于粒子流算法的高颗粒度成像型电磁量能器
- **取样型量能器**：硅+钨，塑料闪烁体+钨方案
- **全吸收型量能器**：晶体量能器方案

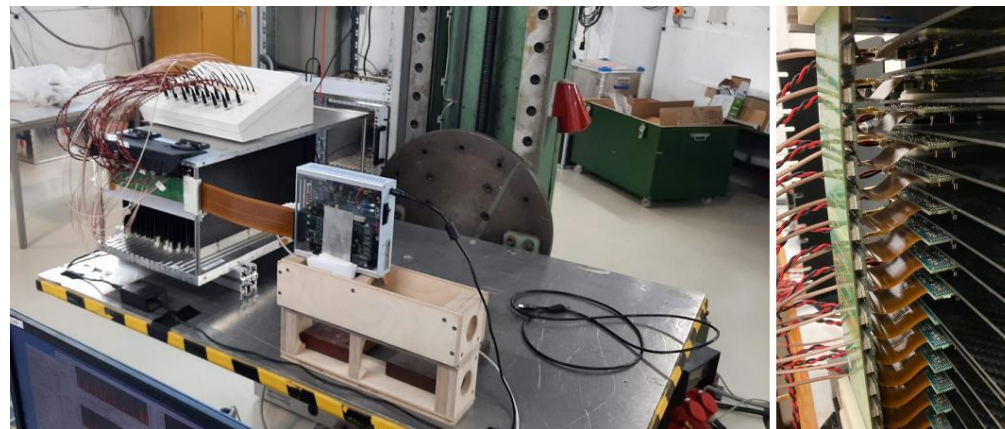
研究背景

- 国际上基于粒子流算法的高颗粒度电磁量能器样机均采用取样型方案，能量分辨约 $15\% \sim 20\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$

基于闪烁体+钨吸收体的电磁量能器样机 (中国)



基于硅片+钨吸收体的电磁量能器样机 (欧洲)



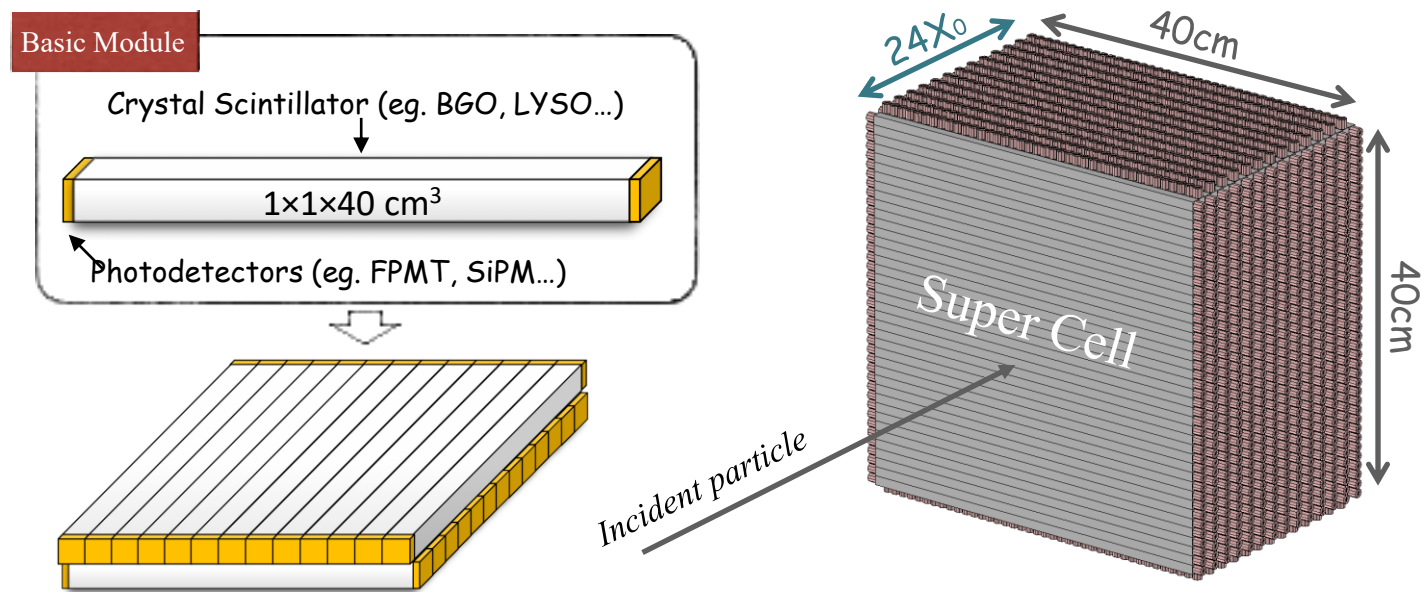
- 本课题**聚焦全吸收型电磁量能器技术**，拟研制国际上首个基于粒子流算法的高颗粒度全吸收型晶体电磁量能器样机，将大幅提高电磁能量分辨达到 $\sim 3\% / \sqrt{E} \oplus 1.5\%$ 的水平

研究目标、研究内容和关键技术

■ **研究目标：** 研制国际上首个基于粒子流算法的高颗粒度全吸收型晶体电磁量能器样机

■ **研究内容：**

- 闪烁晶体批量生产制备和性能测试
- 晶体+SiPM灵敏探测模块设计优化
- 读出电子学和数据获取系统的研制
- 量能器物理设计，机械设计和制作
- 探测器模块集成为电磁量能器样机
- 宇宙线，束流测试分析和性能研究



□ **关键技术：** 大长径比晶体光响应均匀性调制技术、闪烁晶体批量制备和质量控制技术、晶体表面处理和反射膜选型与包覆、晶体与SiPM耦合技术、大动态范围信号读出系统、灵敏探测模块与读出电子学的高度集成技术等

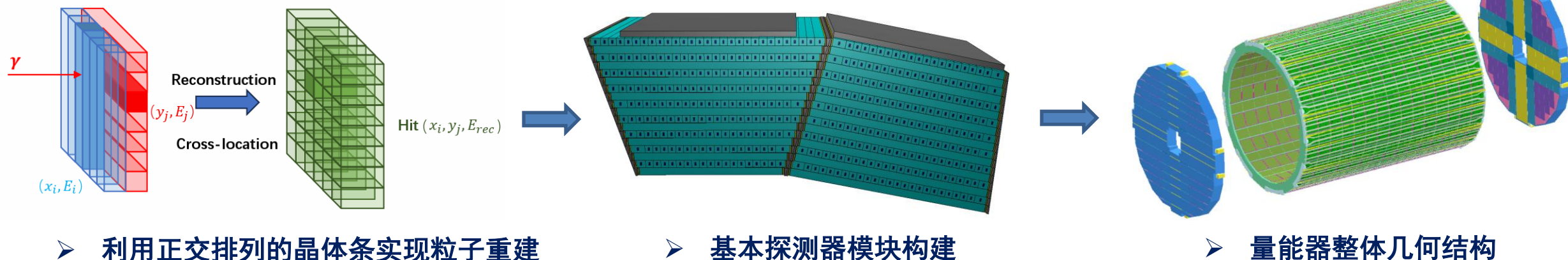
课题考核指标及评测手段

- **考核指标1：**全吸收型晶体电磁量能器样机的MIP探测效率大于95%
- **评测手段/方法：**利用宇宙线或高能粒子束流进行测量
- **考核指标2：**在1-60 GeV能量范围，模拟电磁簇射能量分辨达到 $3-4\% / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 1.5\%$ ，线性度为1.5%；
模拟验证探测器系统的喷注能量分辨达到3-4% @ 100 GeV
- **评测手段/方法：**利用模拟数据分析获得探测器性能指标，
发表论文，进行同行评议

研究进展一：晶体量能器设计方案

■ 高颗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 (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



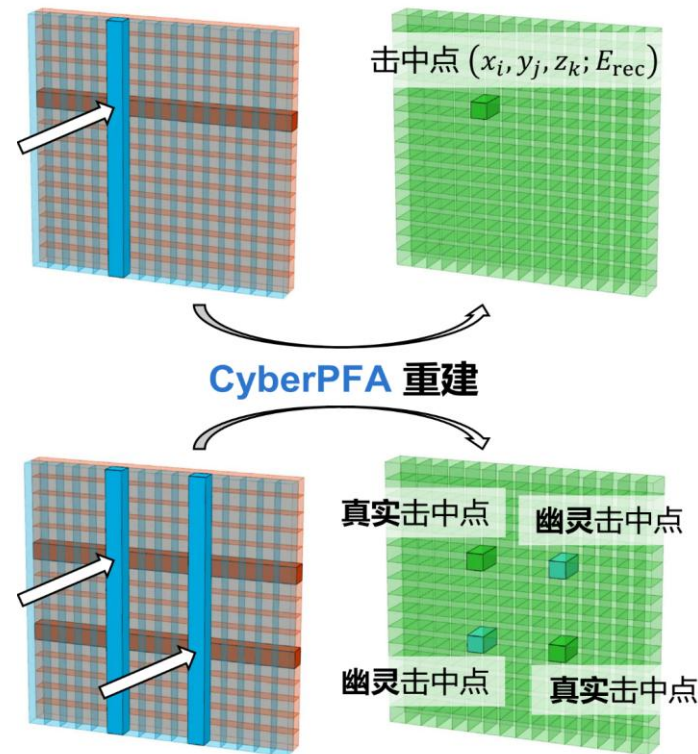
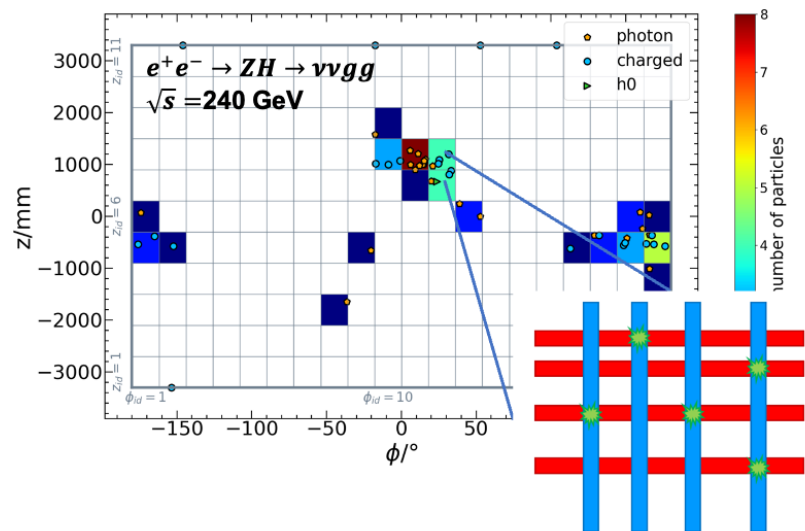
■ 设计优势

- 与取样型量能器相比, 最小化了层间的非灵敏物质, 显著提升能量分辨率
- 使用长条晶体为基本单元, 大幅减少了读出通道数
- SiPM双端读出具有更好的均匀性, 可利用双端时间信息辅助粒子重建

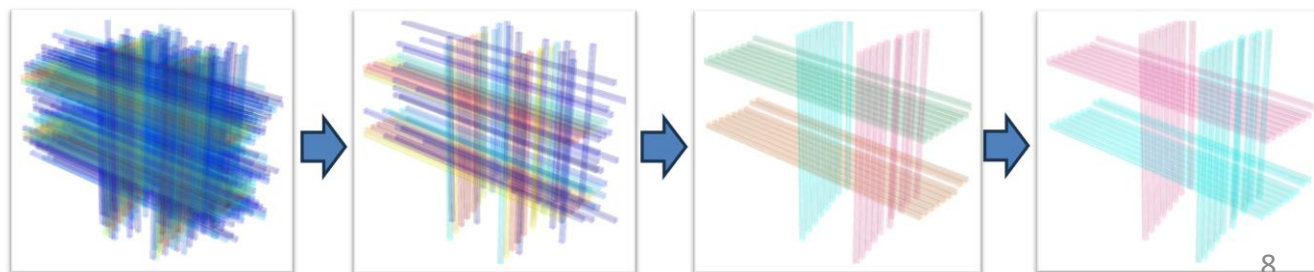
研究进展一：晶体量能器重建算法

■ 针对难点开发全新粒子流算法

- ✓ - 事例预处理：临近晶体聚类
- ✓ - 模式识别：多个子算法进行簇射识别
抽取簇射核心，精简簇射结构
- ✓ - 能量分配：采用先验簇射形状分布知识；
- ✓ - 混淆簇射去除：3 (空间) + 1 (时间) + 1 (能量) 维信息

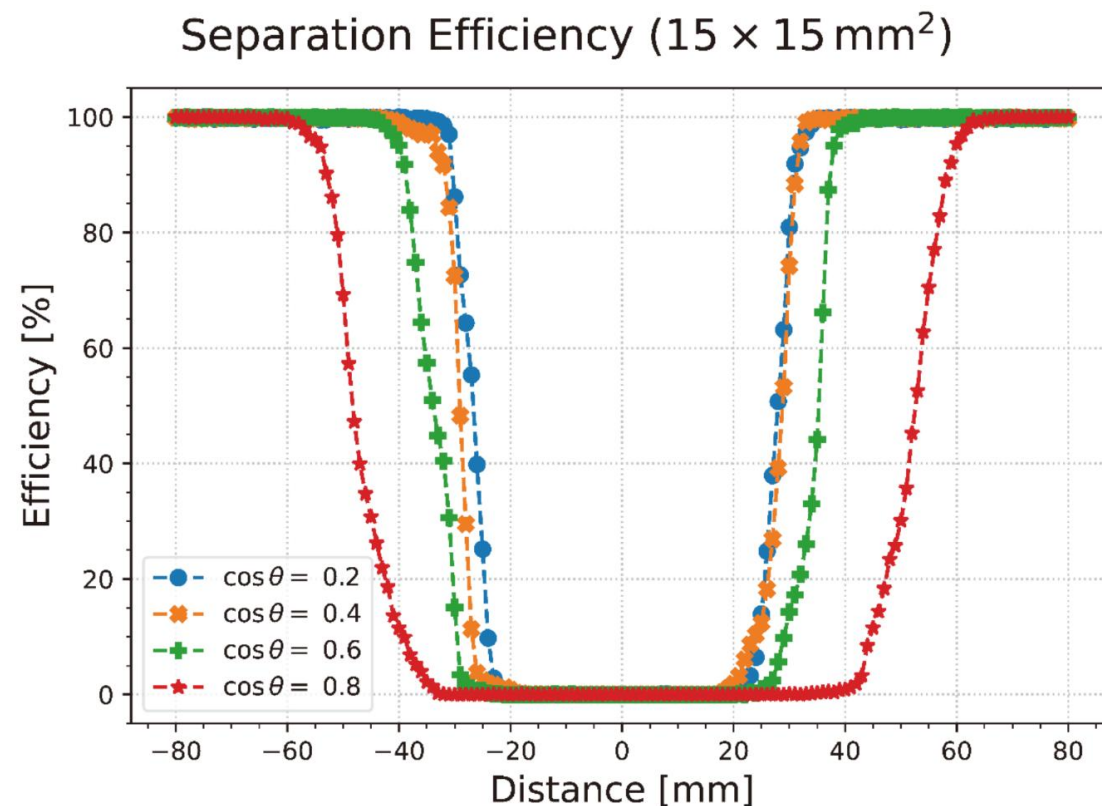
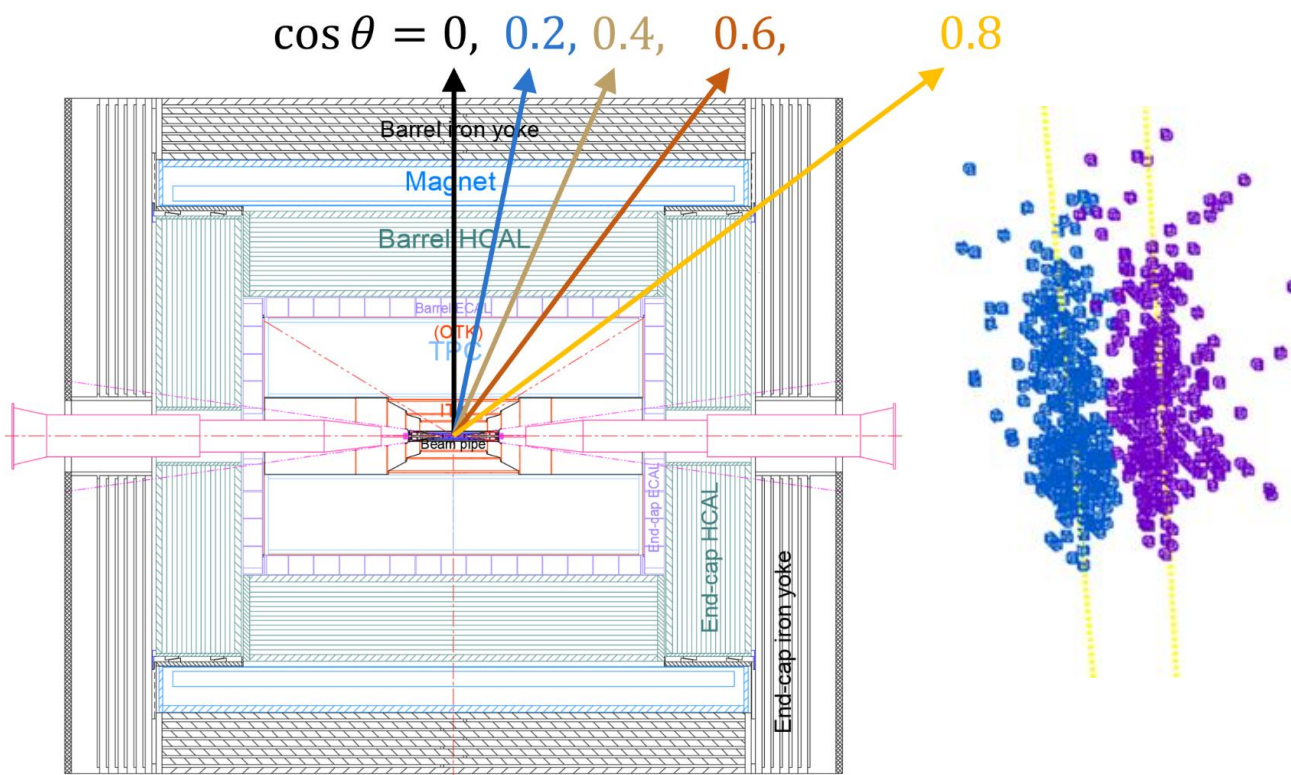


事例显示：临近双光子的区分



研究进展一：晶体量能器重建算法

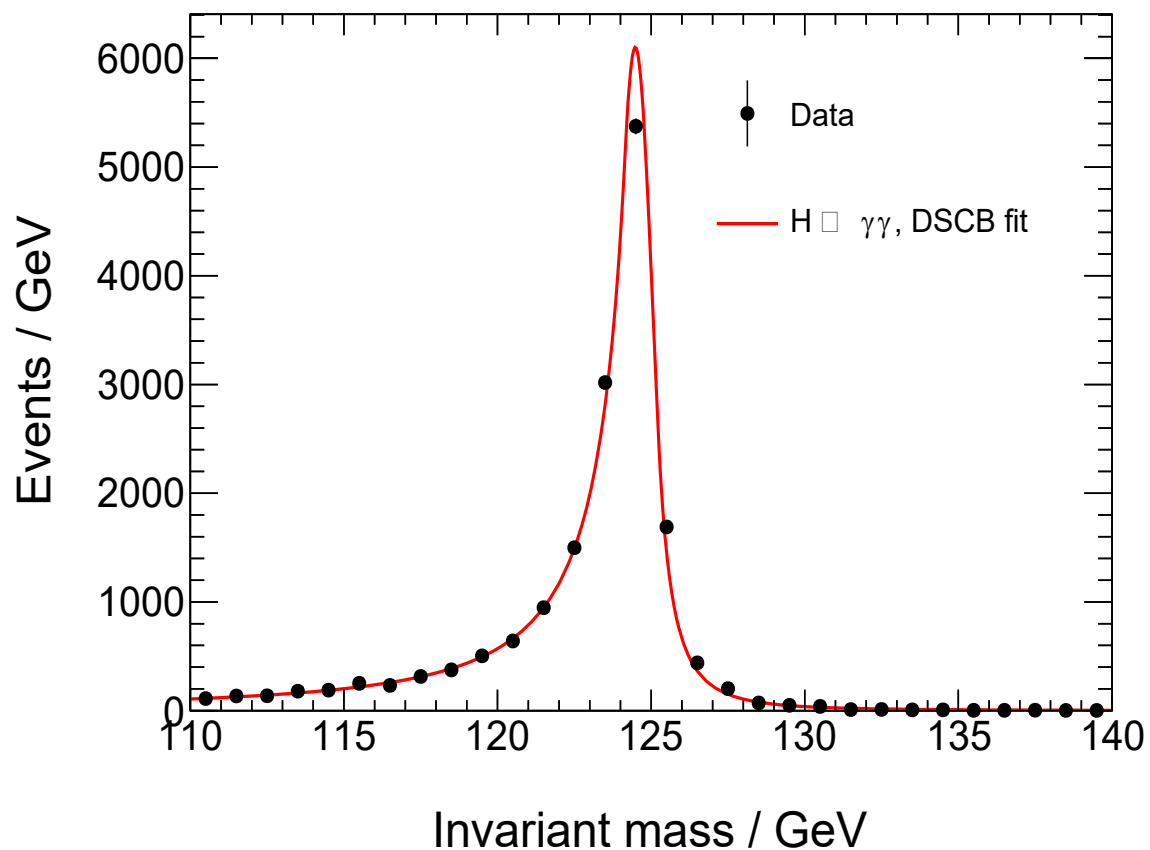
■ 算法性能：临近双光子区分效率随 $\cos\theta$ 角度变化



研究进展一：晶体量能器物理性能

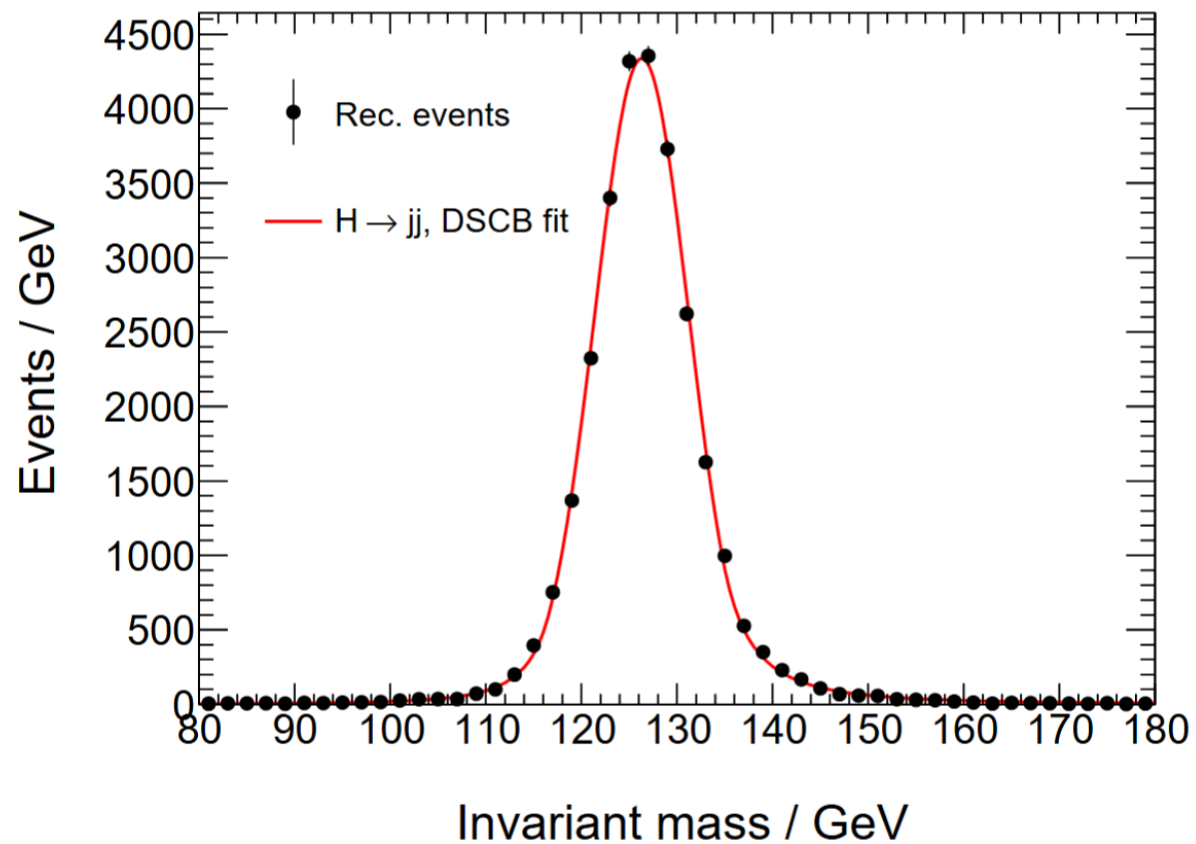
■ 希格斯衰变到双光子的质量分辨率

$$H \rightarrow \gamma\gamma: \sigma(m_{\gamma\gamma}) = 0.57 \text{ GeV}$$



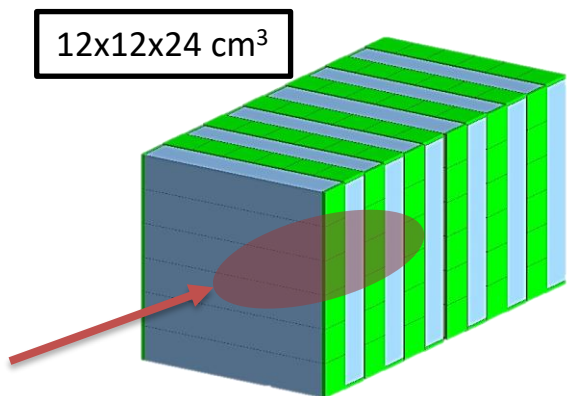
■ 希格斯衰变到双胶子的质量分辨率

$$H \rightarrow gg: \sigma(m_{gg}) = 4.9 \text{ GeV, BMR}=3.88\%$$



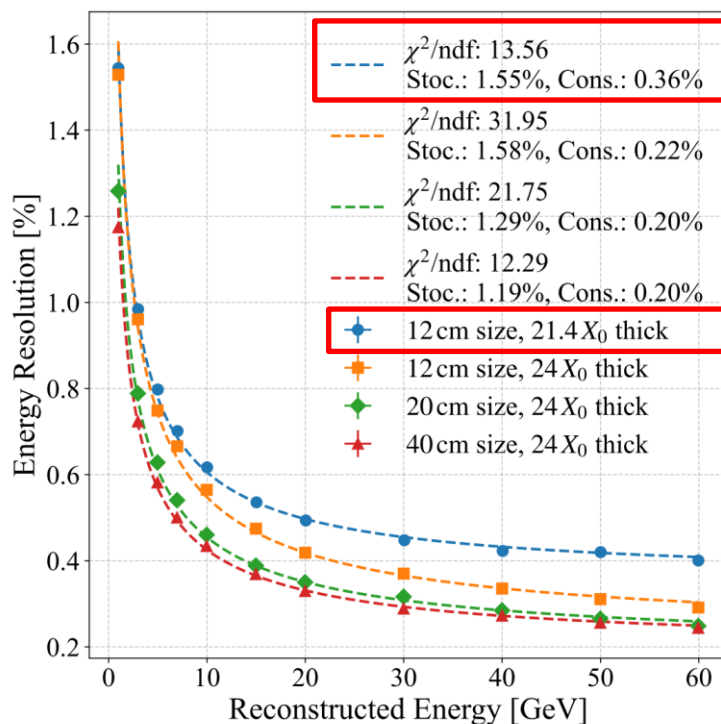
研究进展二：样机设计、模拟和测试

- **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的电磁性能；解决探测器和读出电子学系统集成上的关键问题
- 横向12cm、纵向 $21.4X_0$ 的晶体模块即可有效探测1-10GeV电子，能够实现优异的能量分辨率

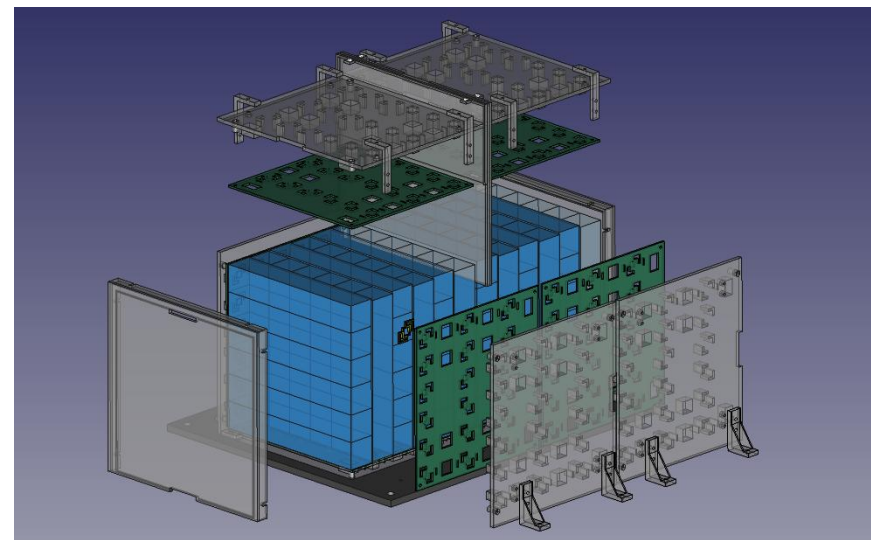


- 横向12cm、纵向 $21.4X_0$ 的模块即可实现对10GeV电子超过95%的吸收效率

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

研究进展二：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:

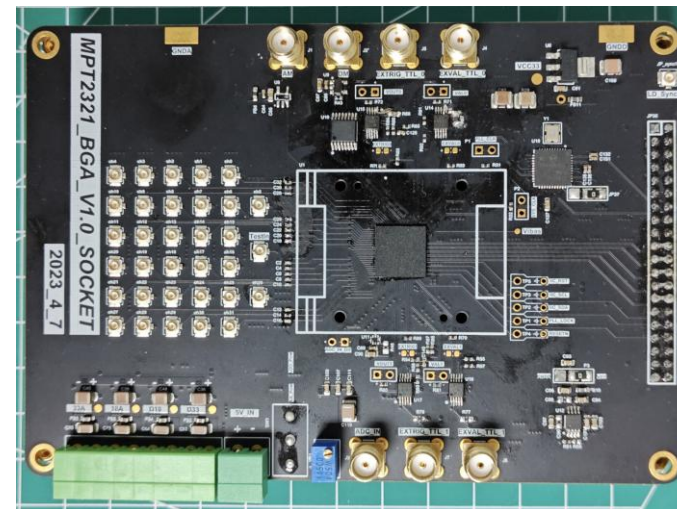
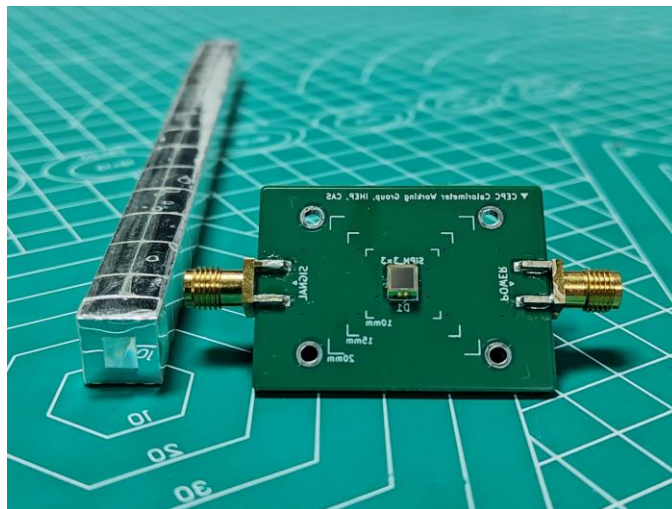
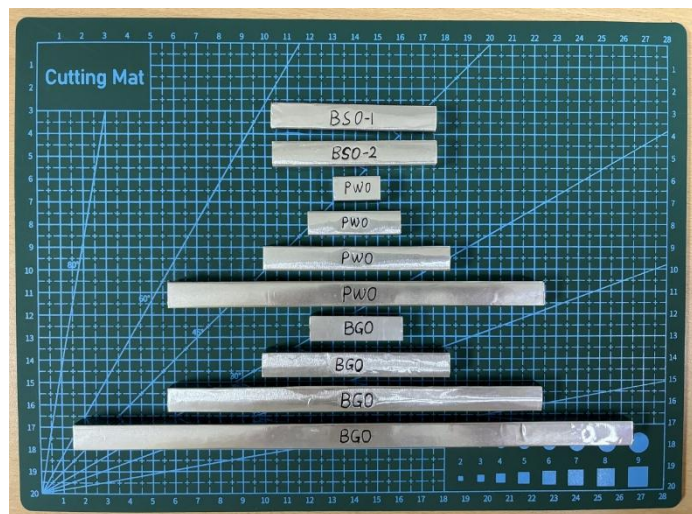
- 大动态范围
- 低噪声
- 耐辐照

□ 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)



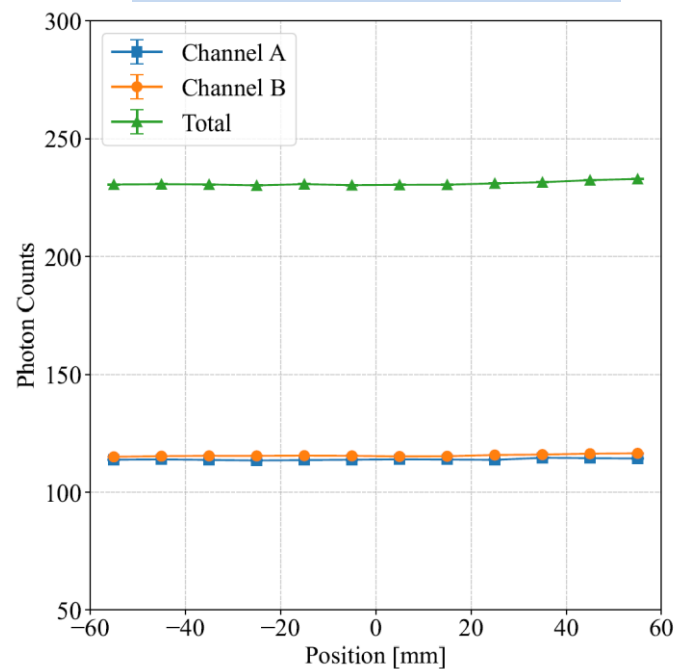
研究进展二：BGO晶体批量测试

- 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

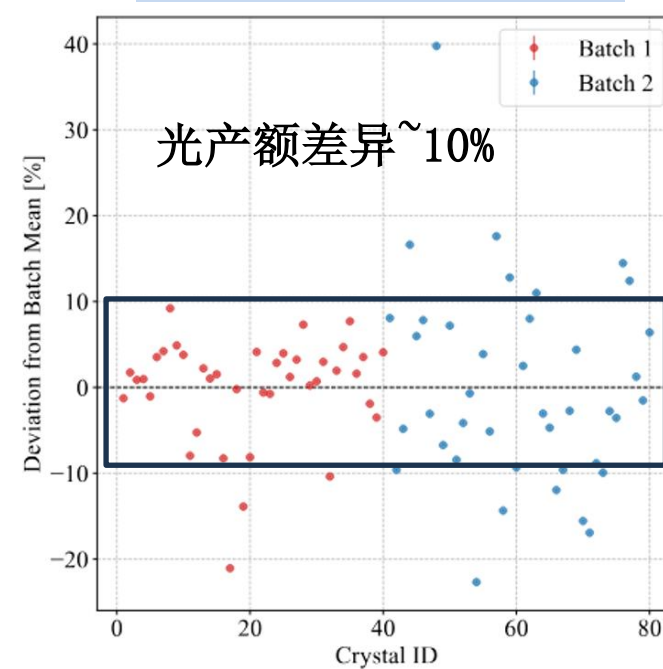


晶体条由ESR膜+铝膜包裹

单根晶体均匀性测试

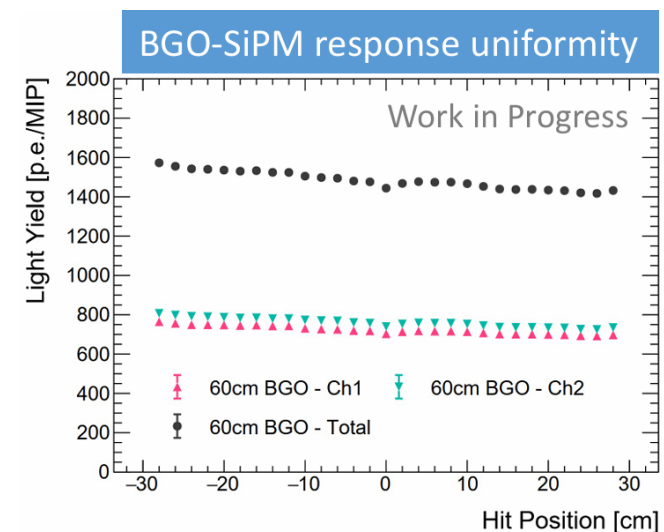
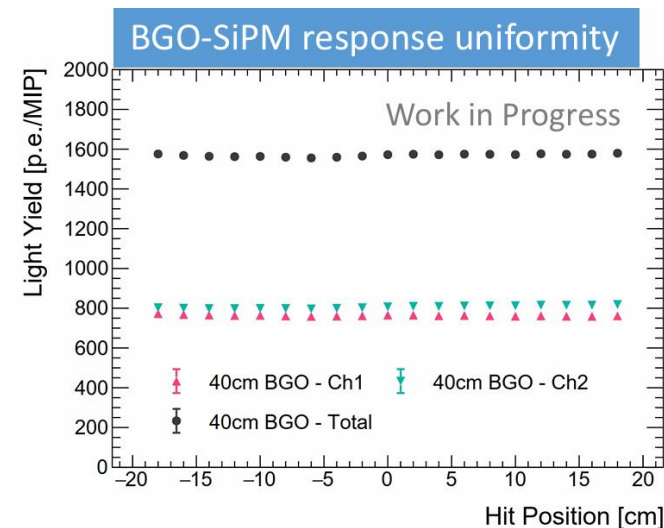
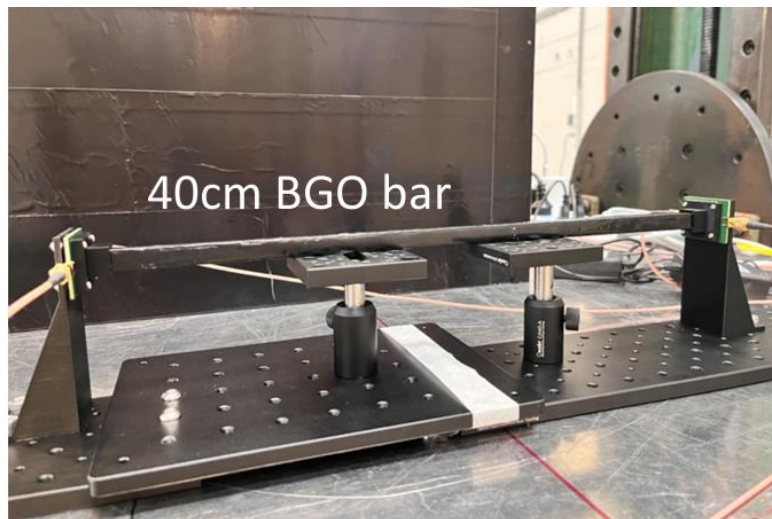


80根晶体光产额测试



研究成果二：长条BGO晶体测试

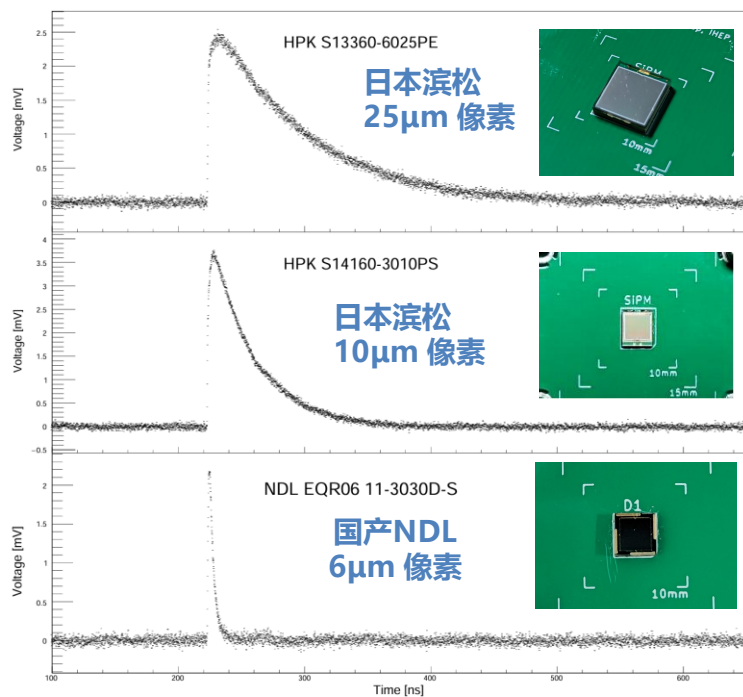
- 2024年7月，利用CERN 10 GeV π^- 束流对长条 BGO 晶体进行性能测试
- **40cm BGO 光输出均匀性：**
 $\text{RMS} / \text{Mean} = 0.43\%$ ，
 $(\text{Max} - \text{Min}) / \text{Mean} = 1.5\%$
- **60cm BGO 光输出均匀性：**
 $\text{RMS} / \text{Mean} = 3\%$ ，
 $(\text{Max} - \text{Min}) / \text{Mean} = 10.5\%$



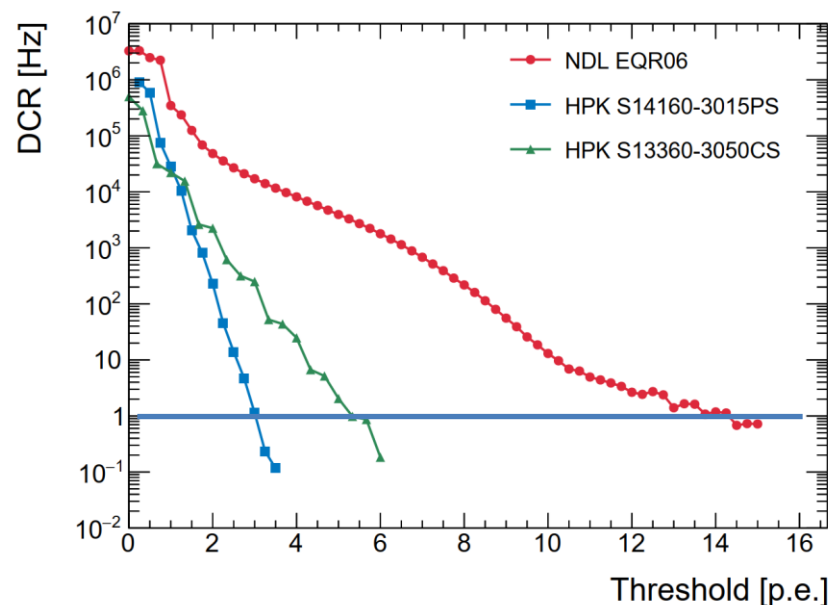
研究进展二：硅光电倍增器测试

- 相比于日本滨松的SiPM器件，国产NDL SiPM响应快、探测效率高，但同时噪声水平也更高

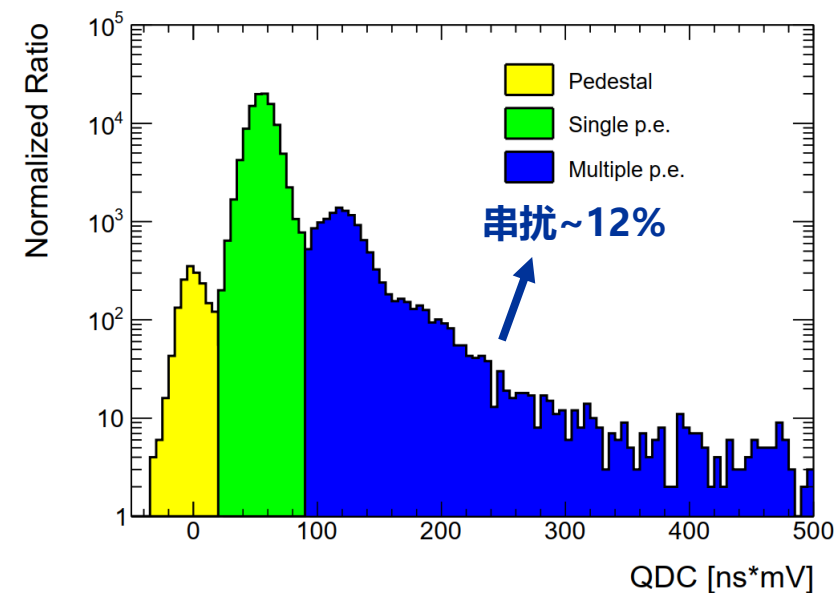
SiPM单光电子波形



SiPM暗计数率测试



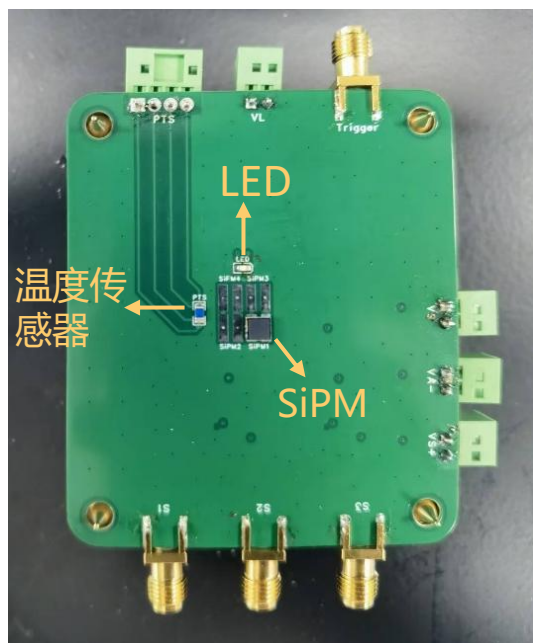
SiPM串扰率测试



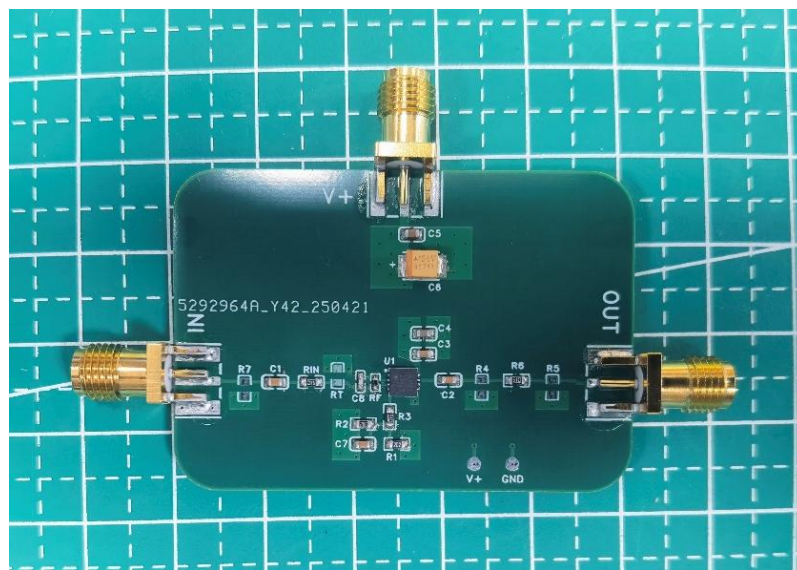
研究进展二：探测单元前端电路设计

- **SiPM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（用于刻度）
- **前置放大器电路设计**：TI LMH6629跨阻放大器，带宽200MHz
- **目的**：实现较好的信噪比

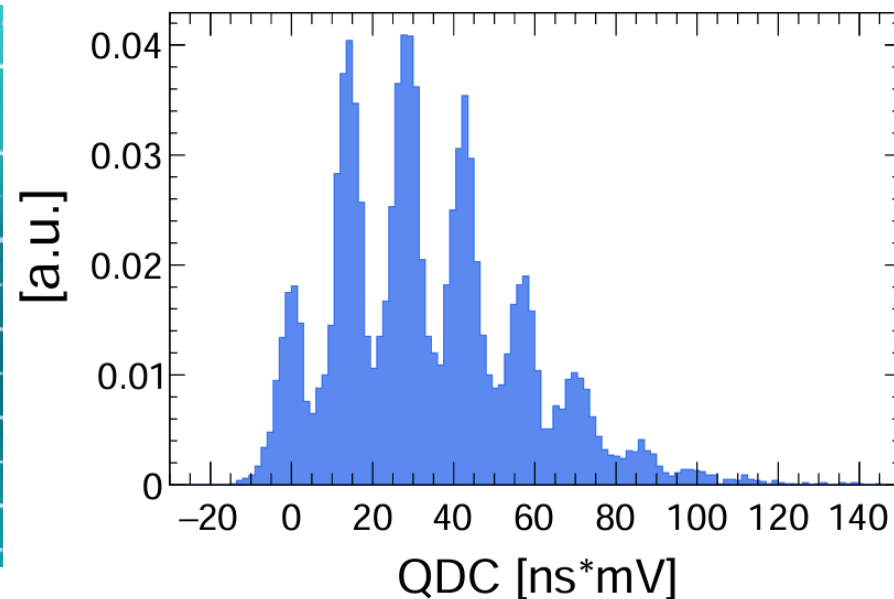
SiPM电路板



前放电路板



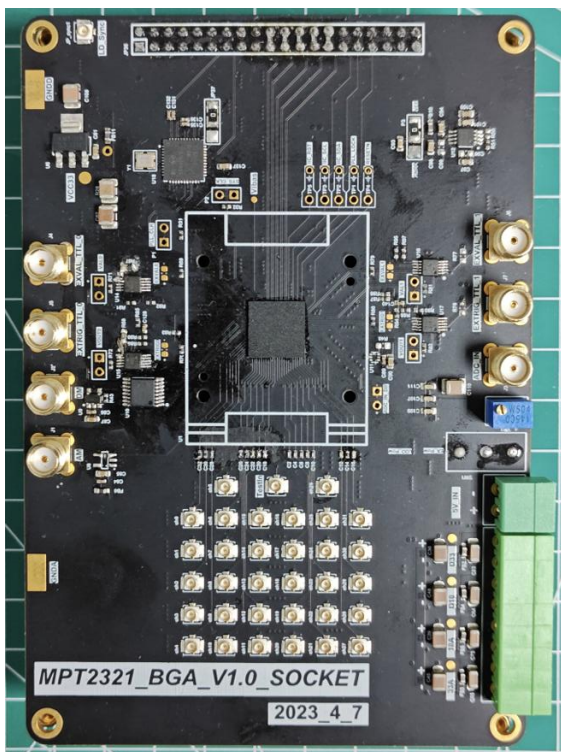
利用前端电路板对SiPM做单光子刻度



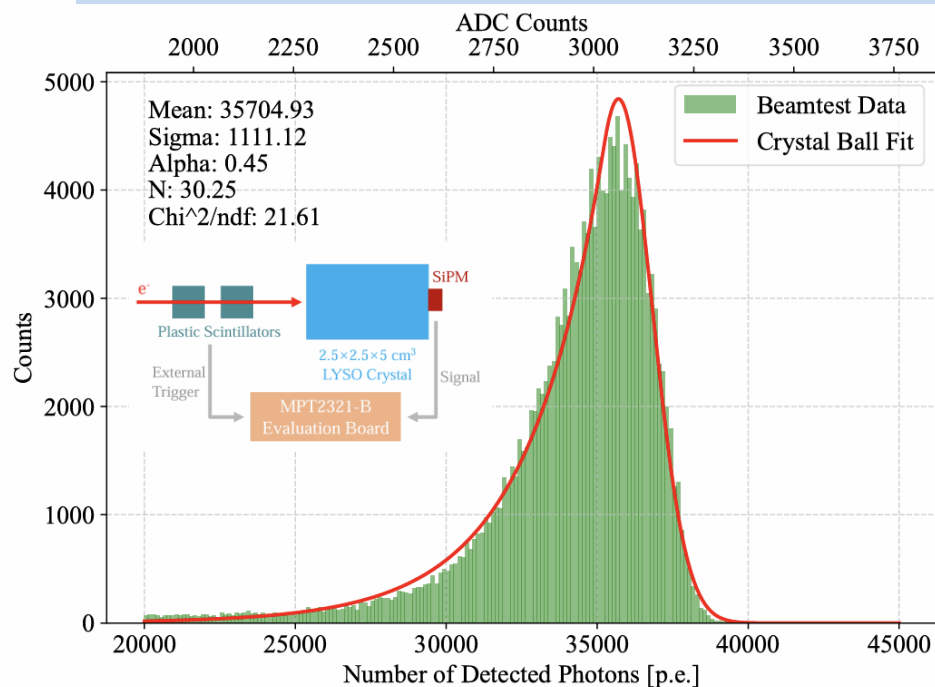
研究进展：读出电子学测试

[JINST 20 P05024](#)

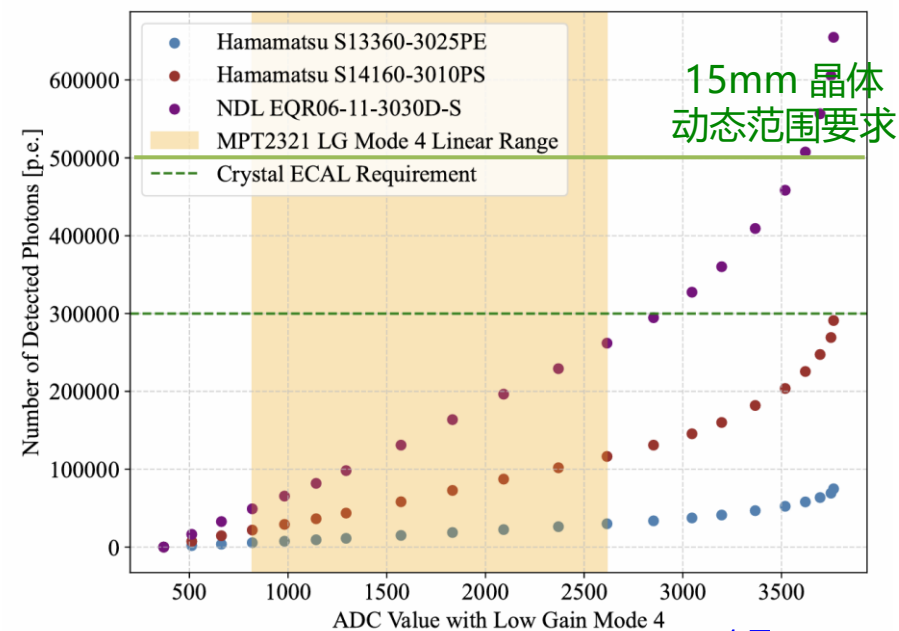
- 宇称MPT2321：用于SiPM读出的大动态范围ASIC
- 线性区最高可至3.35nC，可覆盖晶体量能器（15mm晶体）动态范围的60%。
对非线性区做刻度，可进一步增大动态范围



5GeV电子束流测试 (LYSO晶体+SiPM)



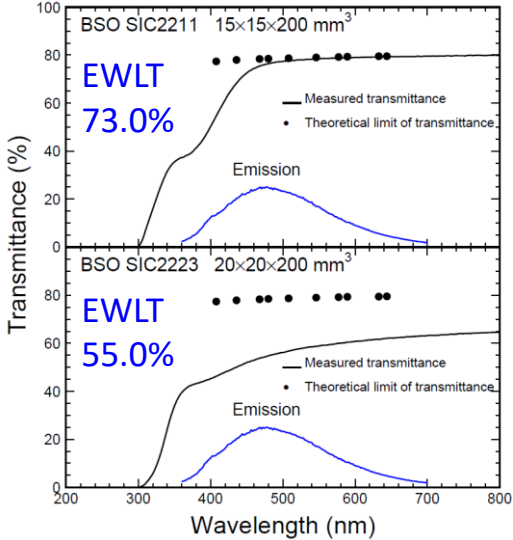
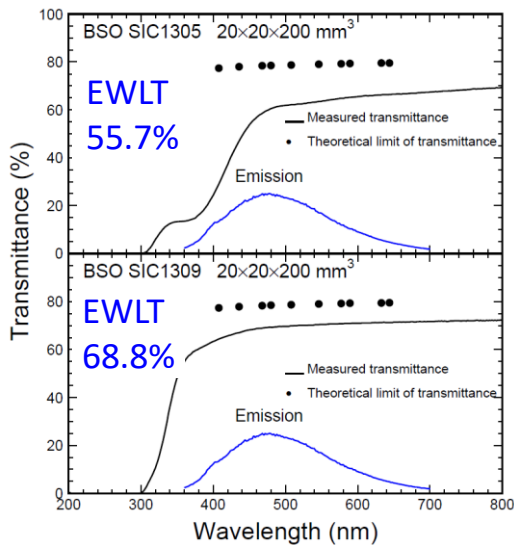
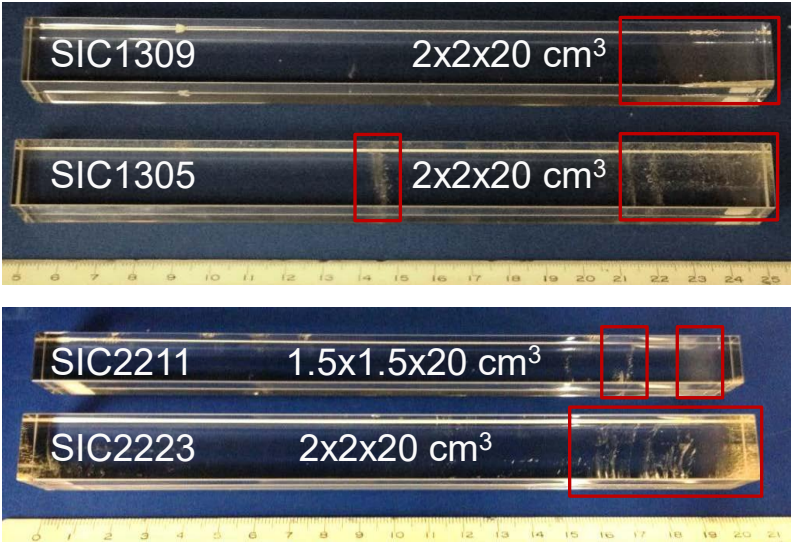
低增益模式动态范围



研究进展三：新型大尺寸闪烁晶体研制

- ❑ BGO晶体：不耐辐照、衰减慢，亟需改性（Ce、Mn）；GeO₂原料上涨至3倍（2019 Vs 2025），
- ❑ BSO晶体：更耐辐照(10⁵ rad)、更快衰减（~100 ns）、更低原料成本（SiO₂/GeO₂: ~1/20），但现有长度~20cm、光学质量差（光吸收和光散射）、生长成品率和材料利用率低，综合成本高于BGO；20 cm 以上大尺寸的BSO晶体生长，被普遍认为不可行。

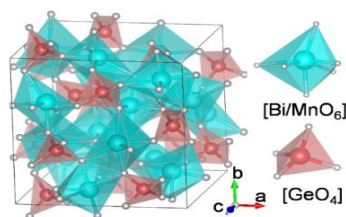
Parameters	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	Bi ₄ Si ₃ O ₁₂ (BSO)
ρ (g/cm ³)	7.13	6.8
λ _i (cm)	22.8	23.1
n @ λ _{max}	2.15	2.06
τ _{decay} (ns)	300	100
λ _{max} (nm)	480	470
Cut-off λ (nm)	310	300
Light Output (%)	100	20
Melting point (°C)	1050	1030
Raw Material Cost (%)	100	47



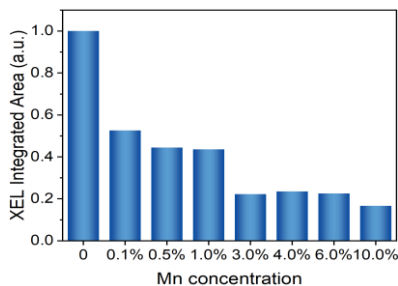
研究进展三：新型大尺寸闪烁晶体研制

■ BGO掺杂改性：Mn (锰) 掺杂

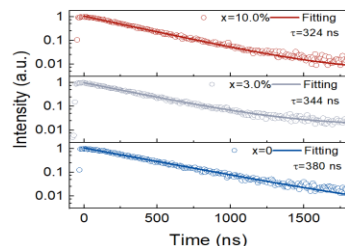
闪烁性能



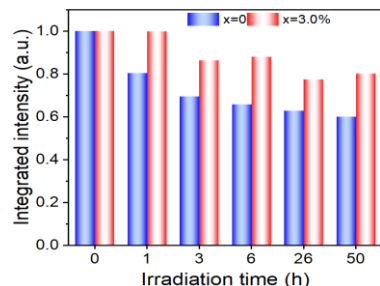
Mn掺杂占位



发光强度降低



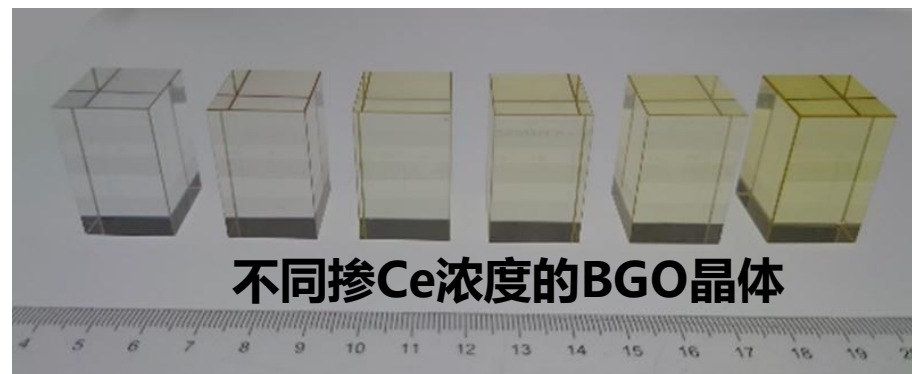
无慢成分引入



抗辐照性能提升

- **进展和成果：** Mn掺杂后BGO发光减弱、抗辐照能力提升、不引入慢发光成分，Mn掺杂在能带中引入新中间能级，抑制辐照诱导色心形成 (**发表 CGD 论文1篇**)

■ BGO掺杂改性：Ce (铈) 掺杂

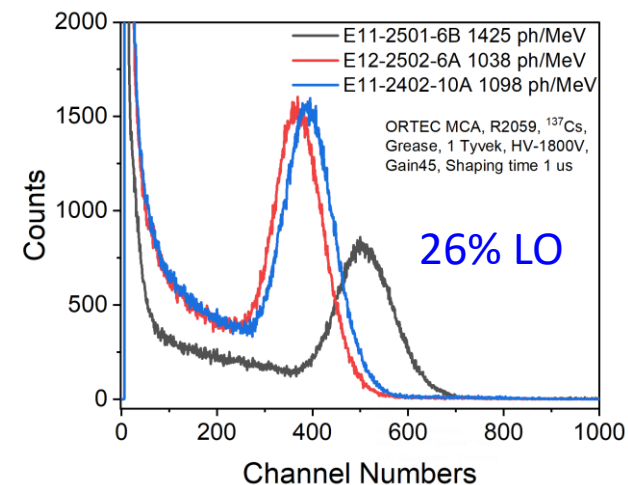
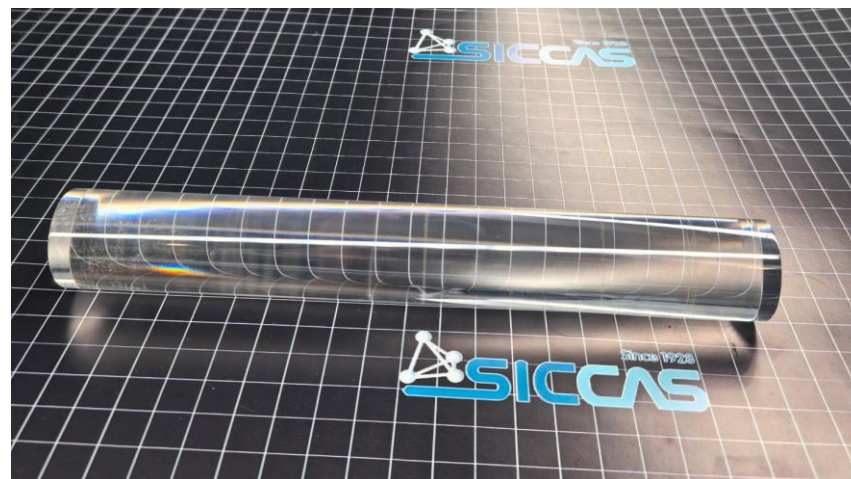
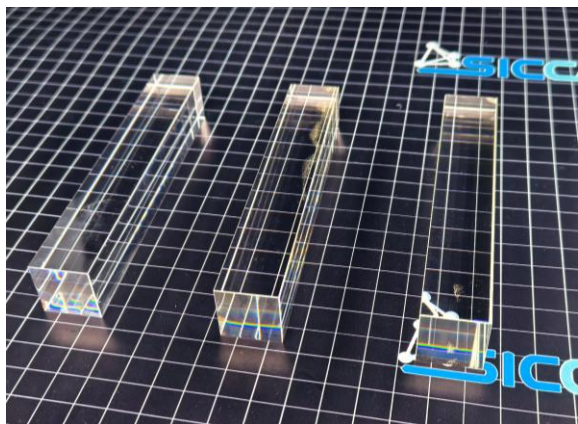


不同掺Ce浓度的BGO晶体

- **进展和成果：** 成功生长出Ce掺杂为0-5000ppm的高质量BGO晶体，Ce掺杂后
 - ✓ 光输出减少到 32.4%-10.2%
 - ✓ 衰减时间显著加快 318ns → 113ns
 - ✓ 抗辐照性能提升，在10Mrad 伽马射线照射后，BGO:Ce掺杂的光输出为 ~60-70% vs 纯BGO晶体的光输出为 ~40%

研究进展三：新型BSO晶体研制

- 研制出12cm长、高光学质量的BSO晶体，光学透过达80%，接近理论透过率；研制出直径2.8 cm×19.7 cm长、高光学质量的BSO晶体，光响应均匀性较好。



- 采用新制备技术，成功研制出40cm+的BSO大尺寸晶锭，见现场实物BSO晶锭
- 开发出BSO新制备技术，采用多坩埚下降生长法，单一炉次内成功获取3种规格、22根BSO晶体，为晶体制备技术的快速迭代，性能提升奠定了良好的基础。

团队成员和人才培养情况

■ 研究团队（教工11人，博士后2人，博士生5人，硕士生1人）

- 上海交通大学：杨海军(教授)，陈纪元（硕士生），朱春祥，赵芷钰（博士生）
- 高能物理研究所：刘勇，李刚(研究员)，郭方毅（博士后），齐宝华，张洋（博士生）
- 上海硅酸盐研究所：陈俊锋(研究员)，邓明雪，李文朋，陈雷，齐雪君，陆裕贵，张建
- 中国科学技术大学：张云龙（教授），王震（博士后），刁洪滨（博士生）



杨海军



李刚



刘勇



陈俊锋



张云龙

论文和报告

■ 论文成果

- [1] M. Deng, Y. Liang, Y. Shi, J. Wang, J. Chen* and Q. Liu*, Ultraviolet photoluminescent materials from traditional ion-activated phosphors to emerging carbon dots and perovskites, **Materials Science and Engineering: R: Reports**, 2024, **159**, 100803. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2024.100803>.
- [2] M. Deng*, J. Chen* et.al., Mn²⁺-Induced Robust Radiation Hardness in Bi₄Ge₃O₁₂ for Next-Generation High-Energy Physical Colliders, **Crystal Growth & Design** 2025, **25**, 5, 1477-1483.
- [3] Z. Zhao et.al., 'Measurements on Time Resolution of BGO, PWO and BSO Crystals', **arXiv:2503.16880**

■ 学术报告（国内外报告20余次，其中5次大会报告）

- 第十届中国LHC物理会议 (CLHCP), 青岛, Nov.13-17, 2024 (1 talk, Yong Liu)
- CEPC Intl Workshop, 杭州, Oct. 23-26, 2024 (3 talks, JY Chen, BH Qi, Y Zhang)
- ICHEP, Prague, July 17-24, 2024 (2 talks, H. Yang, Y. Liu)
- 海峡两岸尖端探测器与技术研讨会, 台湾, June 17-19, 2024 (2 talks, Y. Liu, JF Chen)
- CEPC Intl Workshop, Marseille, April 8-11, 2024 (4 talks, Y. Liu, ZY Zhao, FY Guo, H. Yang)
- 中国稀土学会第六届青年学术会议, 长沙, May 1, 2025 (2 talks, JF Chen, MX Deng)

总结和未来计划

- 全吸收型晶体量能器课题按照年度计划开展相关研究，进展良好
- 亮点研究成果：
 - 通过掺杂 (掺Mn, 掺Ce) 显著提升BGO晶体的抗辐照性能
 - 开发出BSO新制备技术，在长条BSO晶体生长方面取得重要突破
 - 利用CERN 高能 π^- 束流对长条晶体 (40cm vs 60cm) 的性能进行测试
 - 开发出晶体量能器重建算法，成功用于CEPCSW和性能分析
- 课题将按照计划开展研究，
 - 进一步改进模拟、重建和分析软件，优化量能器设计；
 - 研制新型BSO晶体，提升发光性能和尺寸，开展批量制备和测试；
 - 研制晶体量能器样机，开展性能测试研究等

谢 谢 ！

2023年国家重点研发计划“大科学装置前沿研究”

全吸收型电磁量能器技术 年度进展报告

课题负责人：杨海军 (上海交大/李所)

2025年5月28日



课题年度研究计划

- **第一年：**开展晶体量能器的物理设计和优化；开发相关模拟和重建软件；采购制备晶体原料、电子学元器件；设计探测单元的前端读出电子学等
- **第二年：**利用粒子流算法开展晶体量能器关键性能研究，开发数据分析软件；研制晶体及批量测试装置，确定晶体质量控制流程和标准；设计SiPM监测和刻度系统；设计灵敏探测器单层结构；开展温度监控和冷却系统设计等
- **第三年：**完成量能器样机的整体性能模拟，完善相关重建算法和软件框架；晶体的批量生产、包装及性能测试；单层灵敏探测器组装和测试；批量制作读出电子学板；开发数据获取系统，SiPM监测刻度系统；设计原型样机的整体结构；**完成课题中期报告（2026年中）**
- **第四年：**利用粒子流算法研究关键物理过程的模拟事例，研究喷注能量分辨；开展晶体量能器样机集成及机械结构的建造，进行宇宙线测试和束流实验
- **第五年：**完成晶体量能器样机的测试数据分析，获取样机的核心性能指标，发表论文；课题相关材料整理归档，**完成结题报告（2028年底）**

研究方案和技术路线

■ 本课题技术路线的可行性：

- **国内自主研制高性能闪烁晶体：**采用上海硅酸盐研究所独创的多坩埚下降法装置，研究晶体生长的特性和调控，进行各种光学性能测试与分析，确保课题组获得高品质的晶体用于样机研制
- **国内自主研制先进的SiPM器件：**拟采用北京师范大学NDL研制的SiPM和日本滨松的MPPC作为光电转换器件，样机研制将有助于提升国内SiPM的性价比和应用
- **团队成功研制了基于塑料闪烁体和SiPM的取样型电磁和强子量能器样机：**利用CERN的高能束流完成测试，掌握了SiPM和读出电子学高度集成组装的核心技术

课题参与单位、任务分解及经费预算

■ 课题参与单位和任务分解：

- 上海交通大学（144万）：课题牵头单位，负责量能器样机研制和性能研究
- 高能物理研究所（144万）：负责样机研制、读出电子学研制和性能研究
- 上海硅酸盐研究所（144万）：负责晶体生长、批量制备和性能测试
- 中国科学技术大学（72万）：负责量能器模拟、重建和数据分析

■ 课题总预算504万元

- 设备费28万元（5.6%）
- 业务费299.5万元（59.4%）
- 劳务费67.5万元（13.4%）
- 间接费109万元（21.6%）

业务费明细	预算（占比）
材料费（晶体原料，SiPM，读出电子学）	212（42%）
测试化验加工费	21（4.2%）
燃料动力费	1.2（0.2%）
差旅费+会议费+国际合作交流+束流实验	59.3（11.8%）
出版/文献/信息传播/知识产权事务费	3（0.6%）
专家咨询费	3（0.6%）

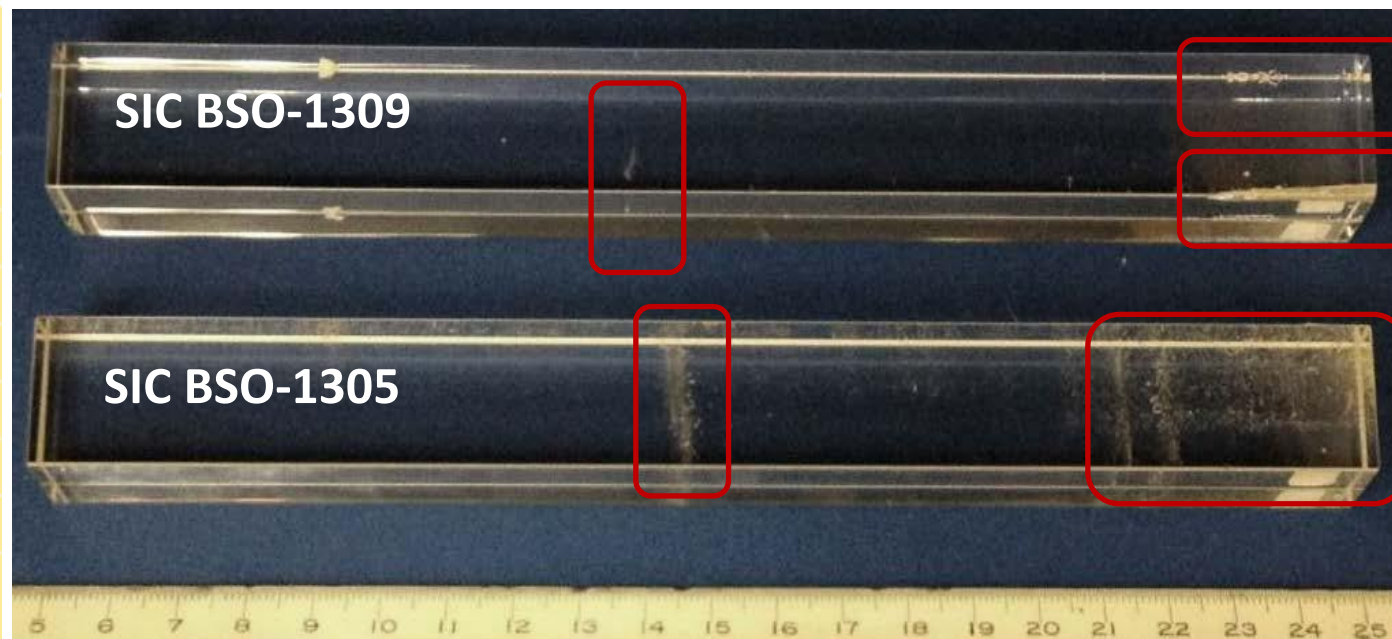
风险分析

- **实施过程中可能存在的风险点如下：**经详细分析，**风险均可控或有相应的预案**，能保障项目顺利实施，达到指标要求。
 - 晶体批量制备和质量控制 (**风险可控**，自主采购原料进行生长制备，工艺成熟)
 - 晶体与SiPM耦合技术 (**风险可控**，已有塑闪或晶体与SiPM耦合技术)
 - 大动态范围信号读出系统 (**风险可控**，选择高像数SiPM，提高阈值，高低增益)
 - 灵敏探测模块与读出电子学的高度集成技术 (**风险可控**，有研制两台基于塑料闪烁体与SiPM量能器技术样机的经验)
 - 晶体量能器样机宇宙线测试 (**风险可控**，具备相应的宇宙线测试平台和经验)
 - 晶体量能器样机束流实验 (**风险可控**，CERN/DESY等国际装置预计在2026-2028无束流，积极寻找国内装置进行束流测试，譬如BEPC等)

研究进展三：新型晶体研制

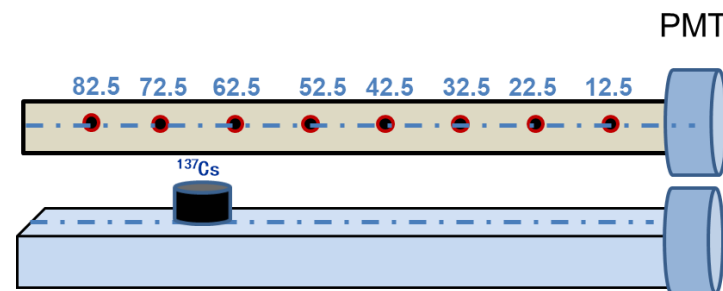
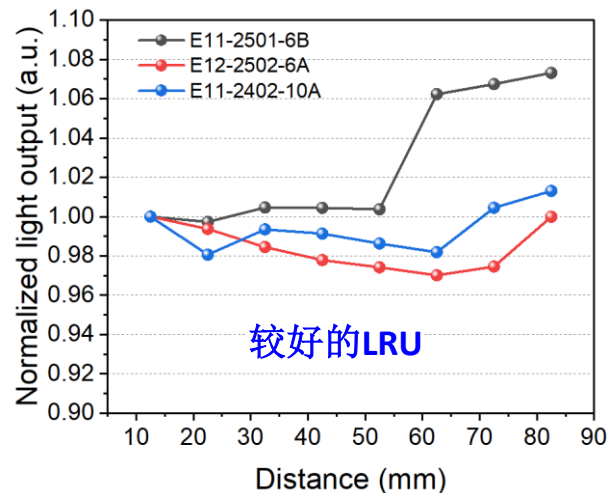
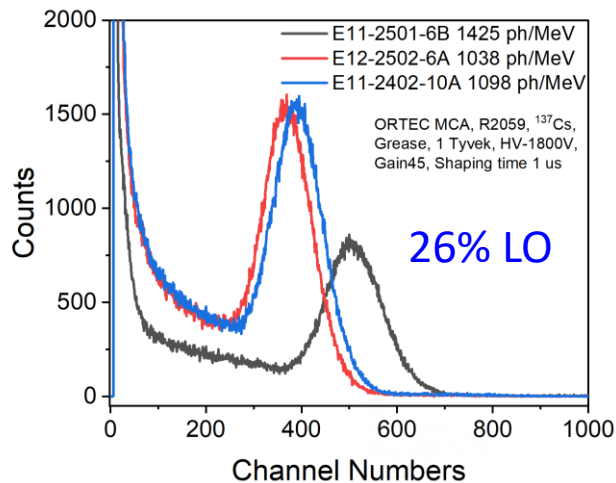
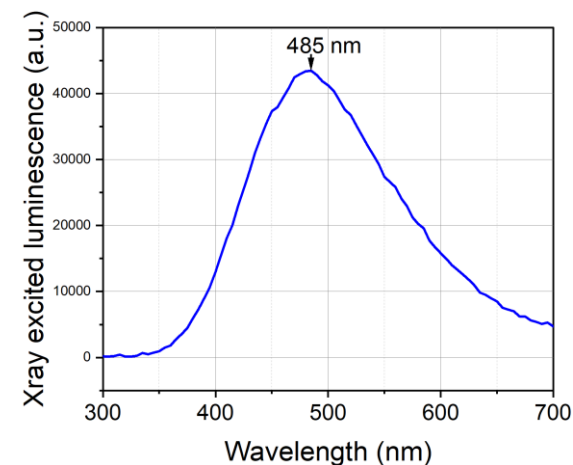
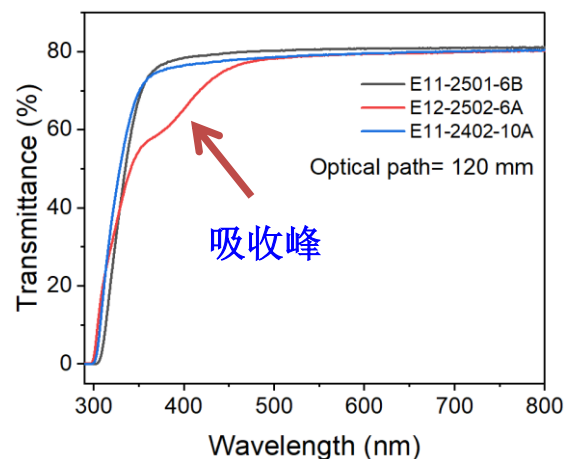
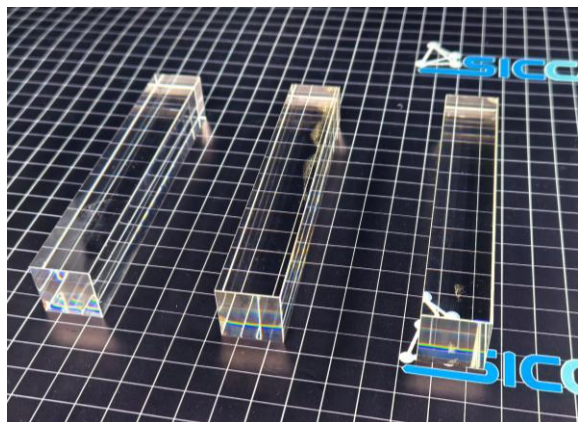
- ❑ ECAL需~30m³ 晶体，BGO晶体存在抗辐照能力差、衰减慢等瓶颈，亟需掺杂改性；
- ❑ GeO₂价格不断走高，造成 BGO 晶体的价格相应增加；
- ❑ SiO₂ 低廉（GeO₂ 价格的1/20），BSO是很好的备选材料，具有高抗辐照能力、快衰减等优点，但也面临不少挑战：BSO晶体尺寸相对较小，光学质量较差等

Parameters	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	Bi ₄ Si ₃ O ₁₂ (BSO)
ρ (g/cm ³)	7.13	6.8
λ _i (cm)	22.8	23.1
n @ λ _{max}	2.15	2.06
τ _{decay} (ns)	300	100
λ _{max} (nm)	480	470
Cut-off λ (nm)	310	300
Light Output (%)	100	20
Melting point (°C)	1050	1030
Raw Material Cost (%)	100	47



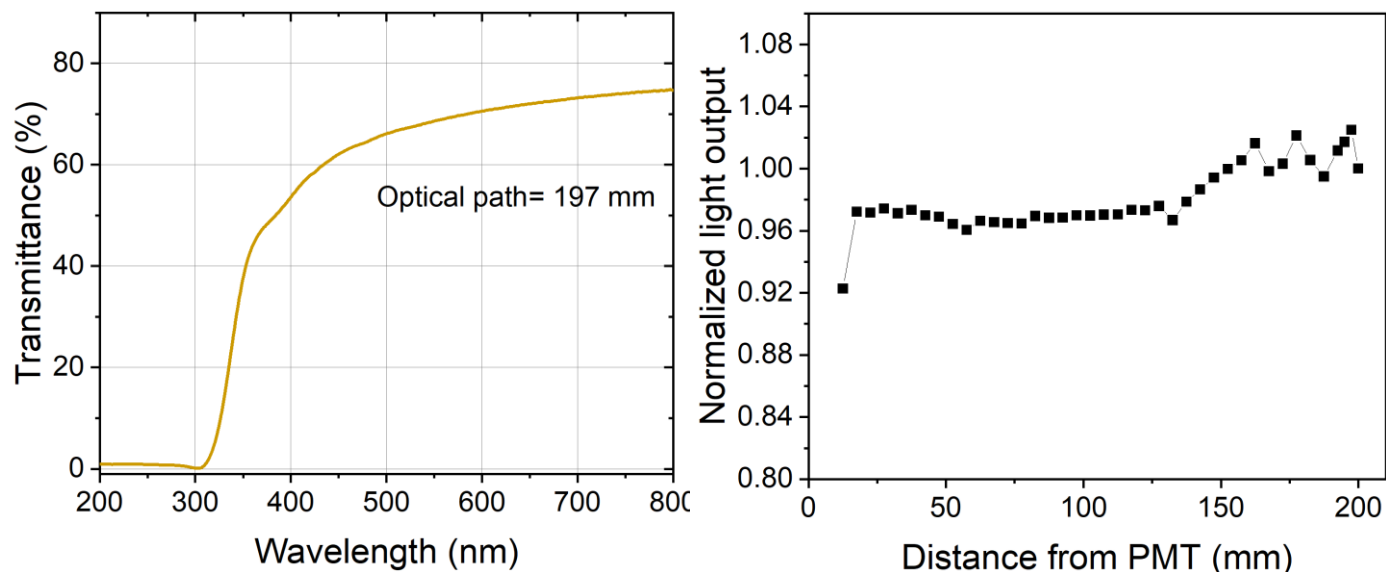
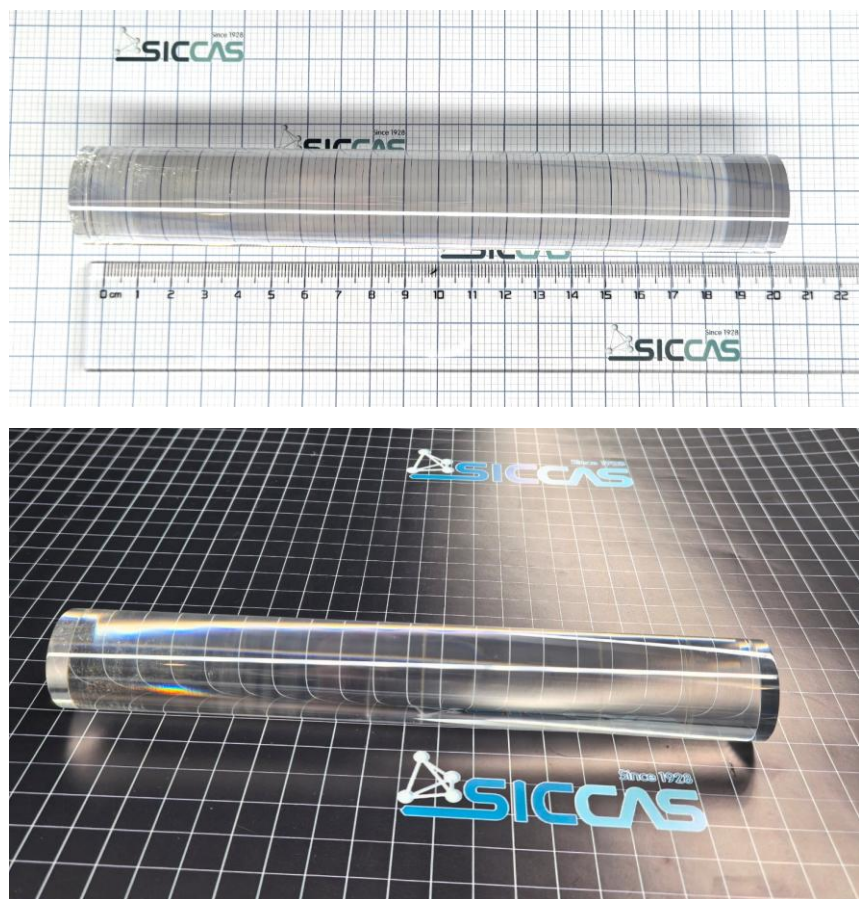
研究进展三：新型大尺寸闪烁晶体研制

- ❑ 研制出12cm长、高光学质量的BSO晶体，光学透过达**80%**，接近理论透过率；
- ❑ 2根BSO晶体的光响应均匀性良好，1根晶体LRU仍有待提升；光输出为BGO晶体的**26%**。



研究进展三：新型大尺寸闪烁晶体研制

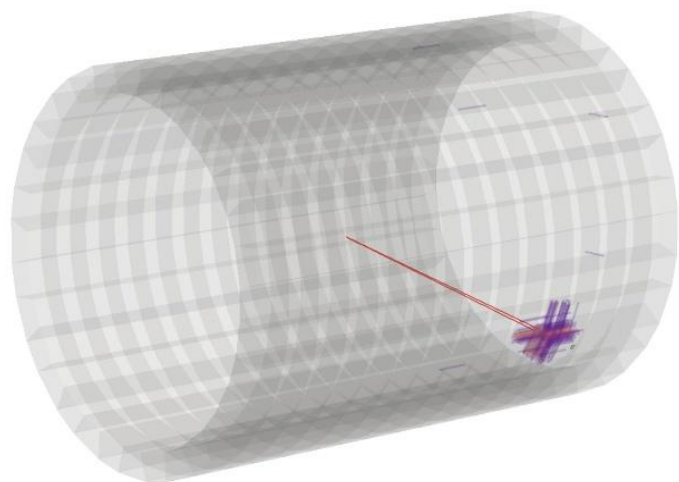
- ❑ 研制出直径2.8 cm×19.7 cm长、高光学质量的BSO晶体，光响应均匀性较好。
- ❑ 采用新制备技术，成功研制出40cm+长度的BSO大尺寸晶锭，见现场实物BSO晶锭。



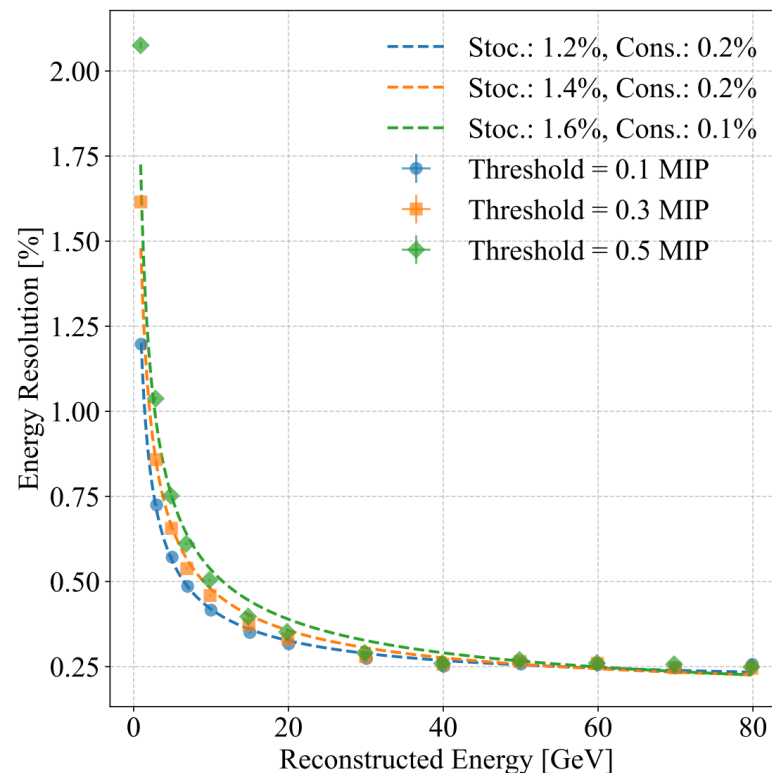
- 样品尺寸：直径28mm×197mm
- 光学质量：整体透光性好，尾部存在轻微散射颗粒

研究进展一：晶体量能器性能模拟

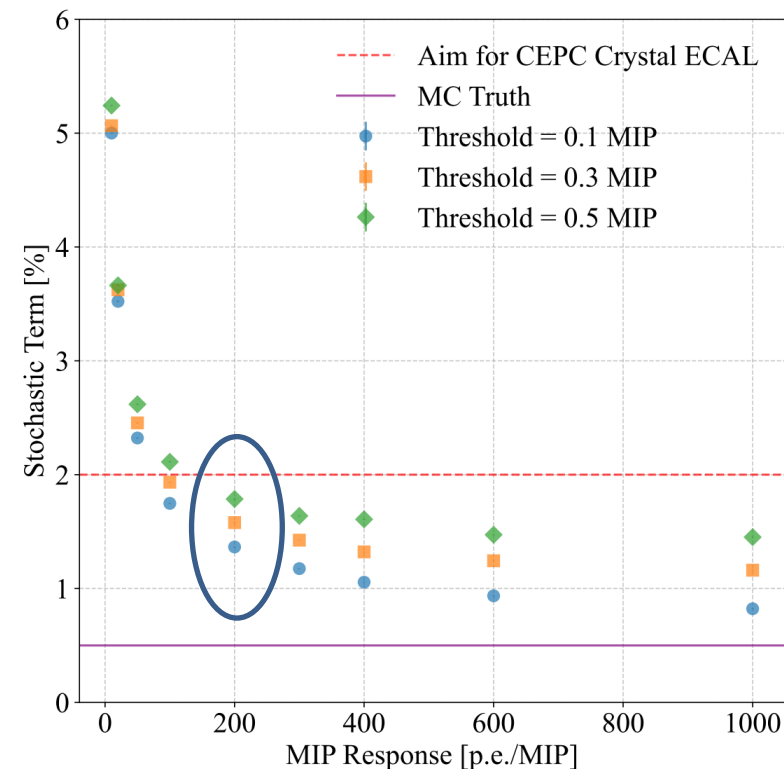
- 在 **0.1 MIP** 阈值下，当晶体单元的有效光产额在 **200 p.e./MIP** 以上时，晶体量能器的能量分辨率可控制在 **$2\%/\sqrt{E}$** 以内。



晶体量能器能量分辨率

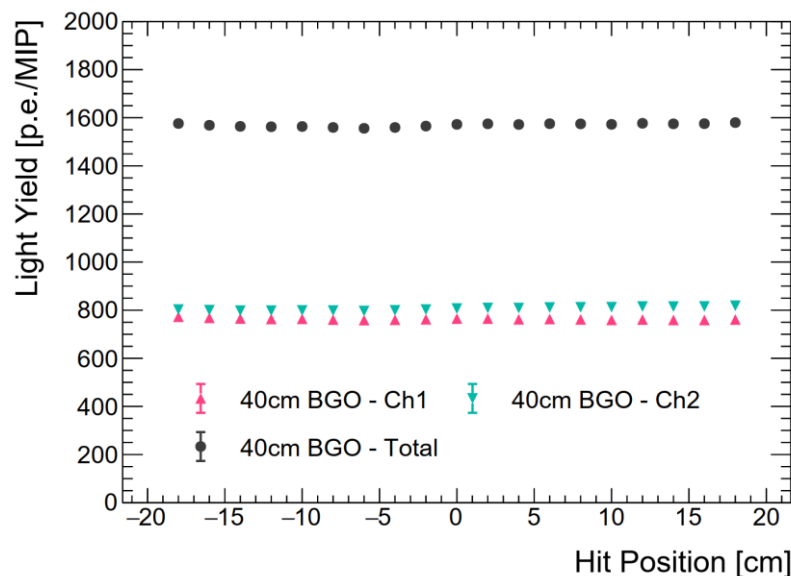


分辨率统计项随MIP光产额变化

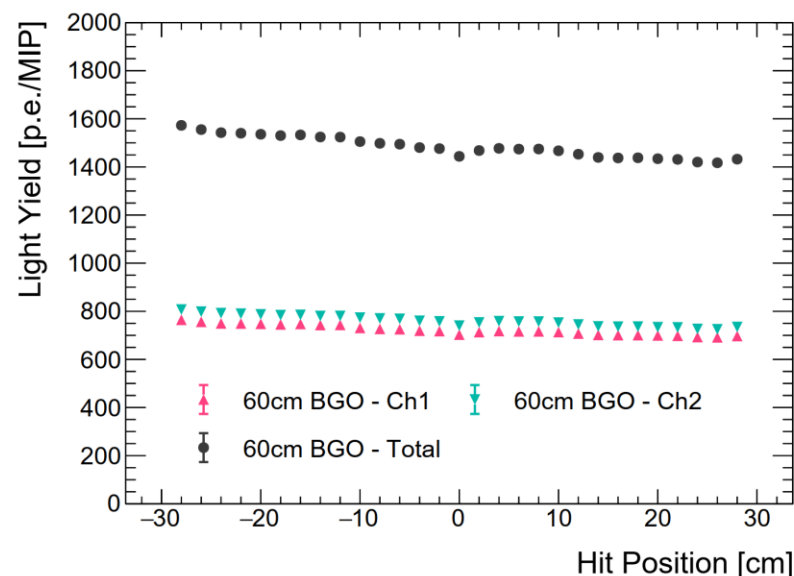


研究进展：晶体响应均匀性测试

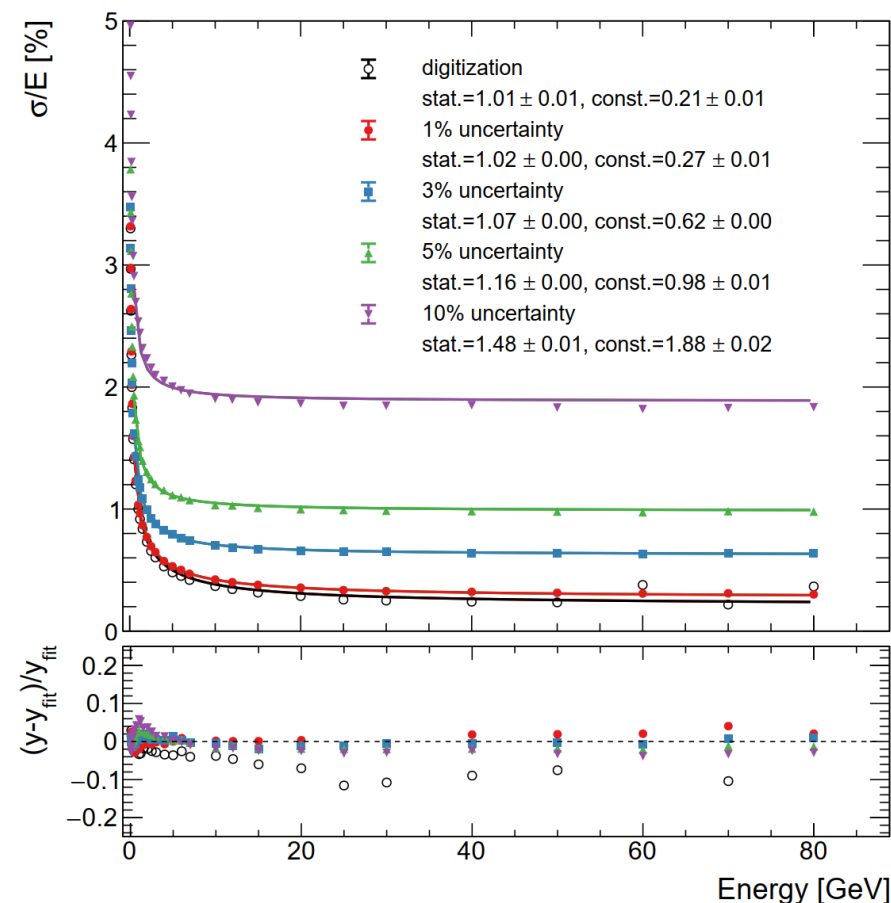
- 利用10 GeV π^- 束流沿晶体长度方向扫描，测量光输出差异
- 晶体的不均匀响应会影响探测器分辨率的常数项
- 40cm BGO晶体均匀性较好，60cm BGO晶体均匀性稍差



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



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



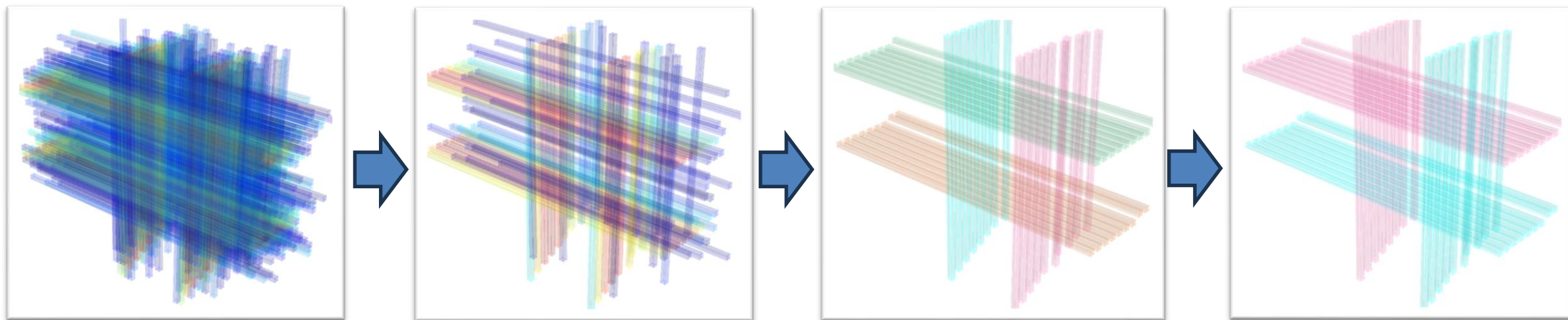
总能量分辨率随单元测量精度的变化

研究进展一：晶体量能器重建算法

■ 针对难点开发全新粒子流算法

- **簇射重叠问题**：选取簇射核心进行模式识别，采用簇射形状分配能量
- **混淆问题**：综合径迹 + 临近模块 + 时间信息实现簇射定位
- **先进簇射模式识别**：以核心为轴，开发多个子算法实现簇射区分和提升性能

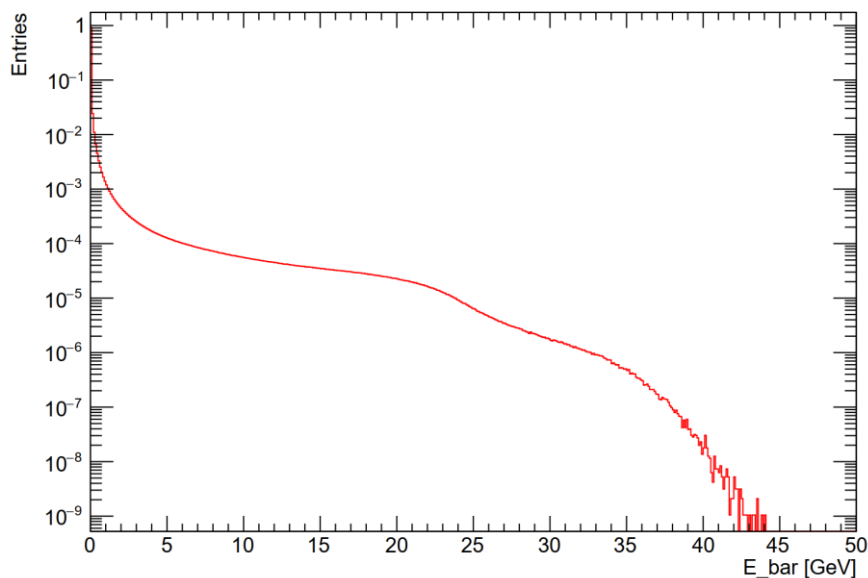
事例显示：临近双光子的区分



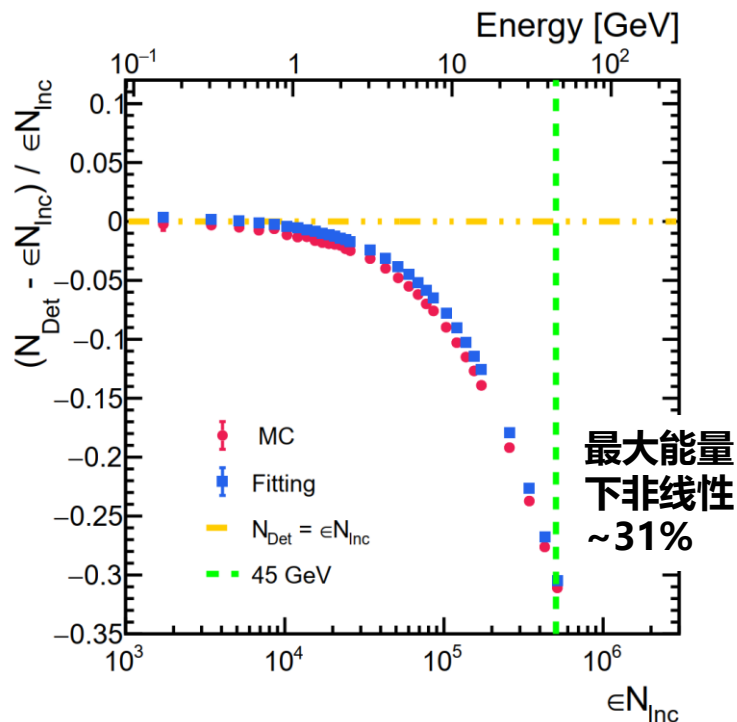
研究进展二：硅光电倍增器非线性模拟

- 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%

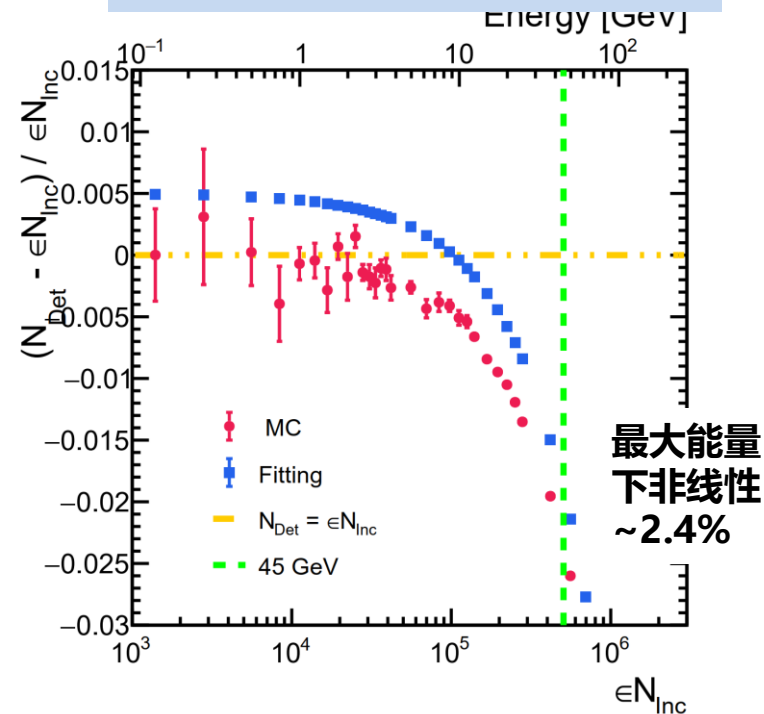
量能器中晶体单元吸收能量范围，
最大~45GeV



滨松 S14160-3010PS,
10 μ m 像素, ~9万像素数



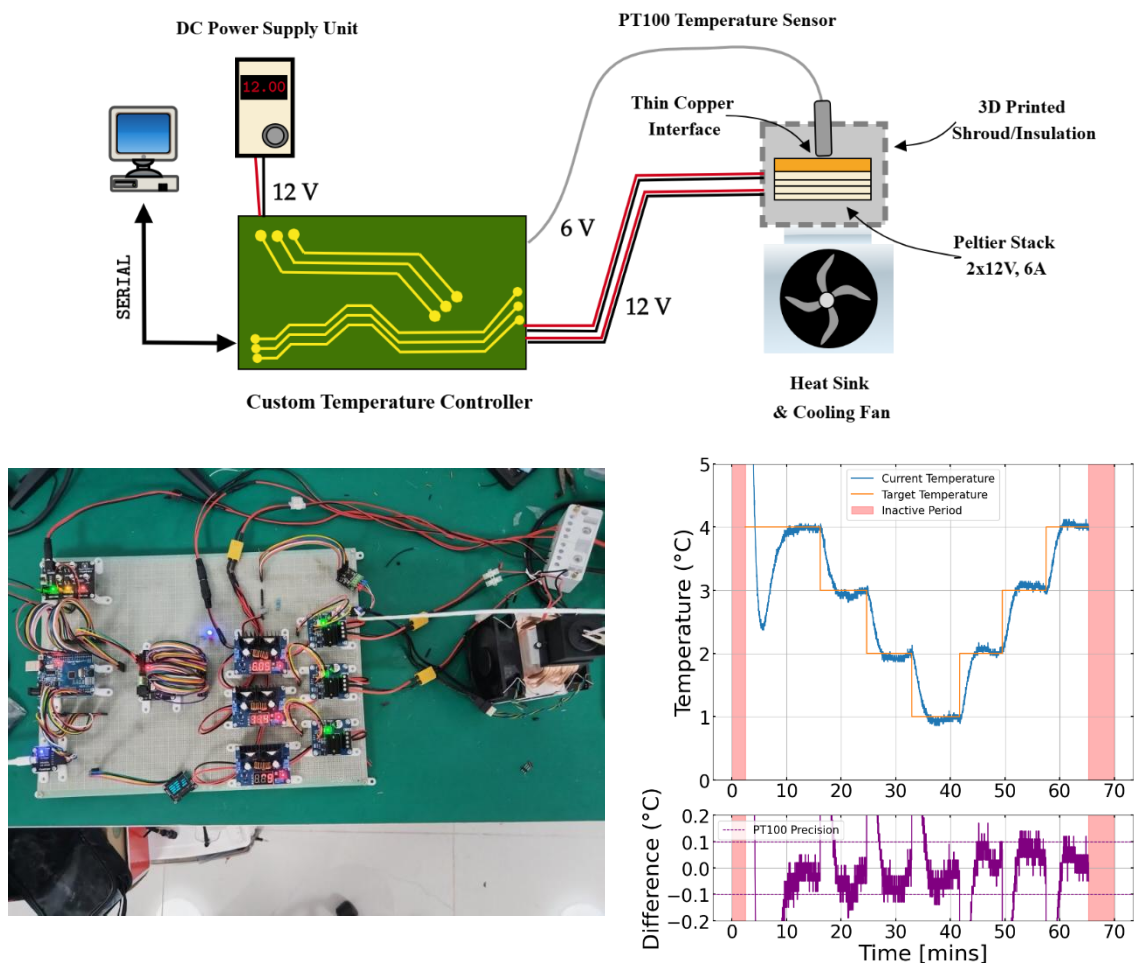
NDL EQR06, 10 μ m 像素,
~24万像素数



研究进展二：探测器冷却系统设计

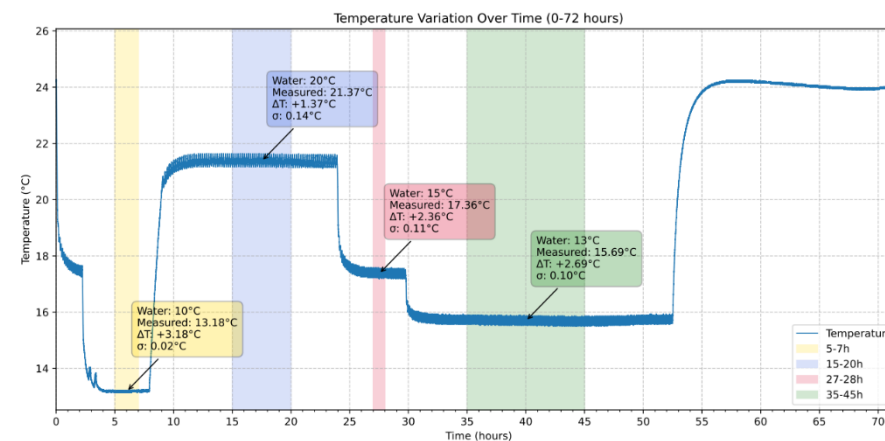
■ 基于半导体制冷片和单片机的温度自动控制系统

— 用于SiPM或晶体的单元测试



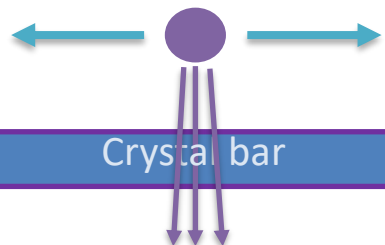
■ 基于水冷机和风扇的散热系统

— 用于晶体量能器样机散热

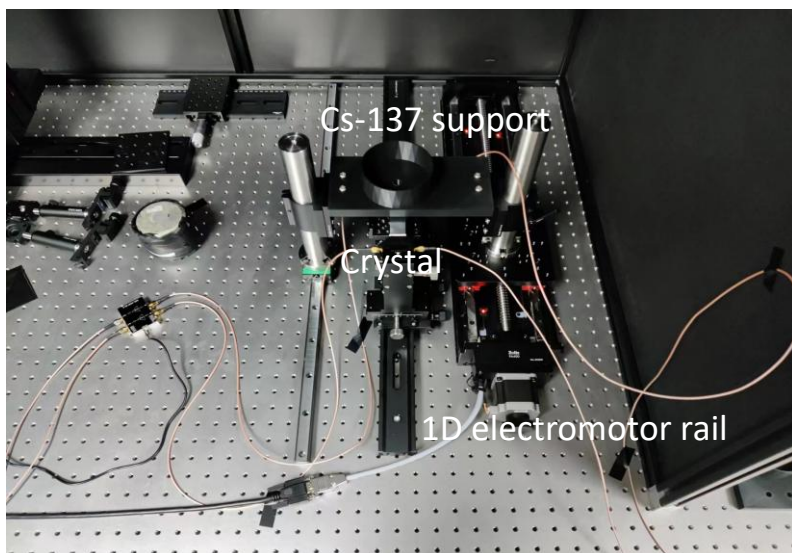


研究进展三：晶体性能测试

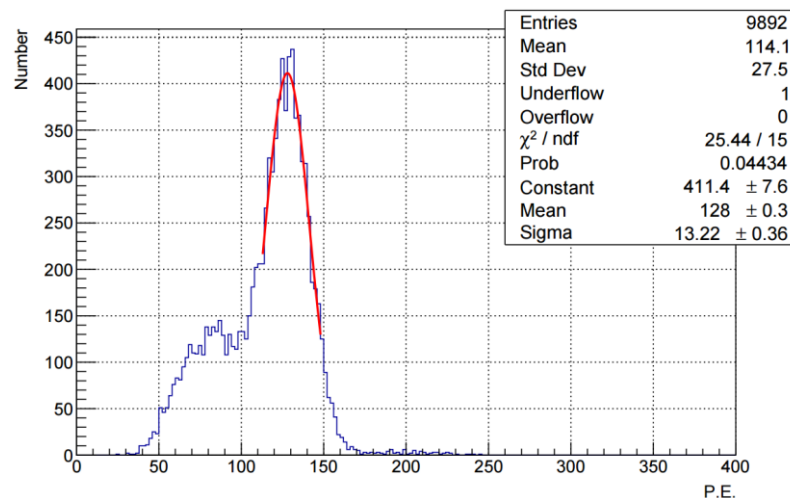
Cs-137 with ~ 8mm collimator



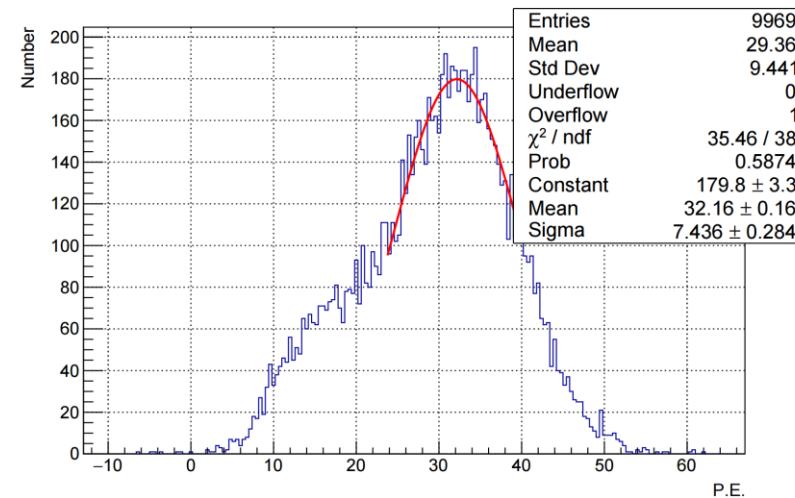
- **BGO vs BSO 晶体性能比较 (Cs-137放射源测试)**
- SiPM S13360-6025PE, NDL 20dB 前放, 5 GS/s 示波器
- 晶体用ESR, 铝包覆
- **晶体光产额: BSO/BGO ~ 1 / 4**
- **晶体衰减时间: BSO (~ 100ns) vs BGO (~ 300ns)**



40 cm BGO: 662 keV 光子



7 cm BSO : 662 keV 光子



课题参与单位经费预算

■ 第一批拨款金额241.92万元（占48%）

单位	2024年拨款 （万元）	直接经费 （万元）
交大	69.1200	53.7600
高能所	69.1200	54.7200
上海硅所	69.1200	54.2400
中科大	34.5600	26.8800

课题三经费预算表（单位：万元）					
预算科目名称	交大	高能所	上海硅所	中科大	合计
合计	144	144	144	72	504
（一）直接费用	112	114	113	56	395
1.设备费	8	12	8	0	28
2.业务费	86.5	86	89	38	299.5
材料费	59	58	80	15	212
测试化验加工费	4.5	8	3	5.5	21
燃料动力费	1.2	0	0	0	1.2
差旅费	6.6	6	2	6	20.6
会议费	1	0	0	0.5	1.5
国际合作交流费	12.2	12	3	10	37.2
出版文献等	1	1	1	0	3
专家咨询费	1	1	0	1	3
3.劳务费	17.5	16	16	18	67.5
（二）间接费用	32	30	31	16	109

课题管理和经费使用情况

■ 2024年拨款241.92万元（占48%，其中直接经费189.6万，间接经费52.32万）

课题三经费使用情况（单位：万元）					
预算科目名称	交大	高能所	上海硅所	中科大	合计
预算经费	144	144	144	72	504
2024年到款	69.12	69.12	69.12	34.56	241.92
合计支出	34.0059	5.76	15.1404	29.1205	84.0267
使用进度	23.62%	4.0%	10.51%	20.22%	16.67%
（一）直接费用	19.0299	0	15.1404	21.4405	55.6107
1.设备费	0	0	8	0	0
2.业务费	12.9399	0	15.1404	3.5918	31.6720
3.劳务费	6.09	0	0	17.8487	23.9387
（二）间接费用	14.976	5.76	0	7.68	28.416

组织管理方式

■ 课题负责人召集相关研究活动

- 每两周召开一次课题组例会，开展内部的学术交流和讨论
- 根据课题研究计划的执行进度和进展情况，统筹安排研究工作
- 建立专门会议网页和文档管理数据库，对论文、专利和会议报告、实验数据等相关资料进行规范管理和存档
- 每年召开一次年度总结会议，检查课题进度，安排下一年的具体工作
- 组织编写年度进展报告

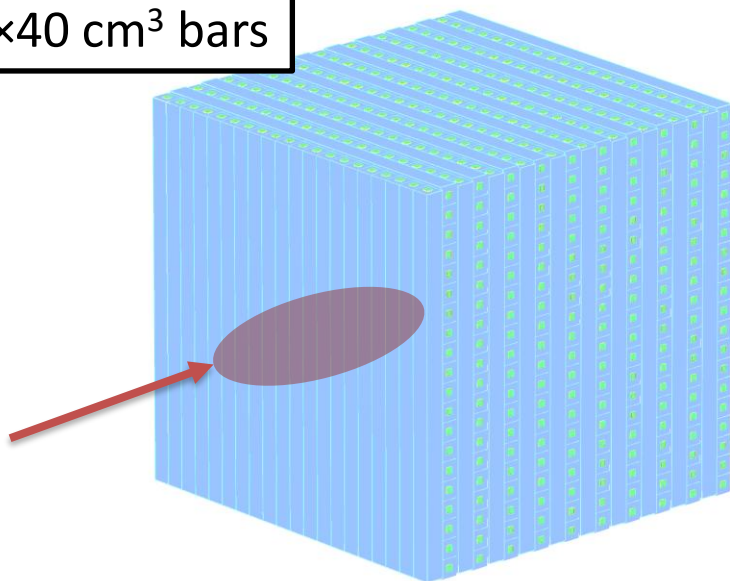
课题三：全吸收型电磁量能器 · Indico of IHEP (Indico)
<https://indico.ihep.ac.cn/category/1090/>

晶体电磁量能器模块：模拟与优化

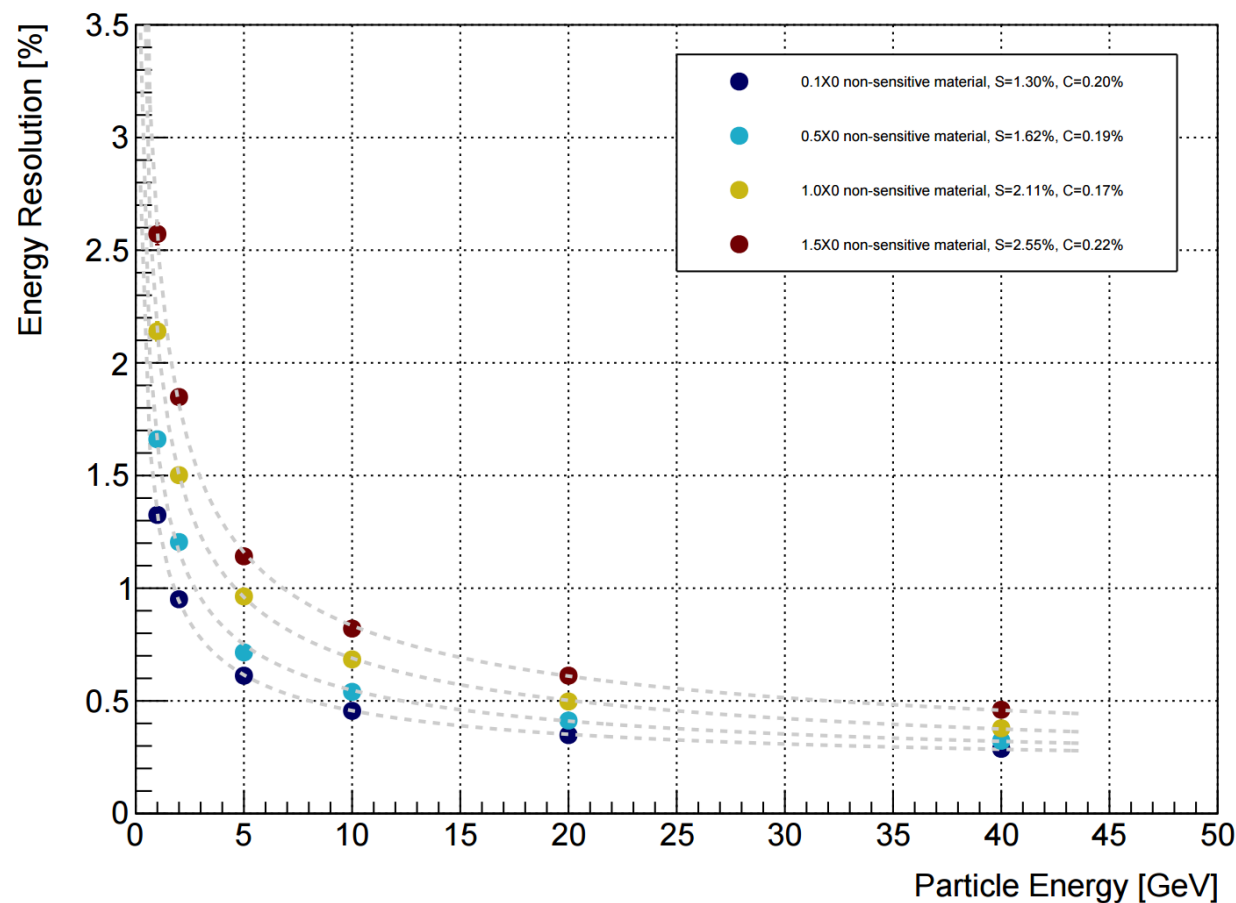
■ BGO 晶体量能器模块 ($40 \times 40 \times 27 \text{ cm}^3$) 的能量分辨率

- 死物质 $0.1X_0$, $\sigma/E = 1.3\%/\sqrt{E} \oplus 0.2\%$
- 死物质 $0.5X_0$, $\sigma/E = 1.6\%/\sqrt{E} \oplus 0.2\%$
- 死物质 $1.0X_0$, $\sigma/E = 2.1\%/\sqrt{E} \oplus 0.2\%$
- 死物质 $1.5X_0$, $\sigma/E = 2.6\%/\sqrt{E} \oplus 0.2\%$

$1 \times 1 \times 40 \text{ cm}^3$ bars



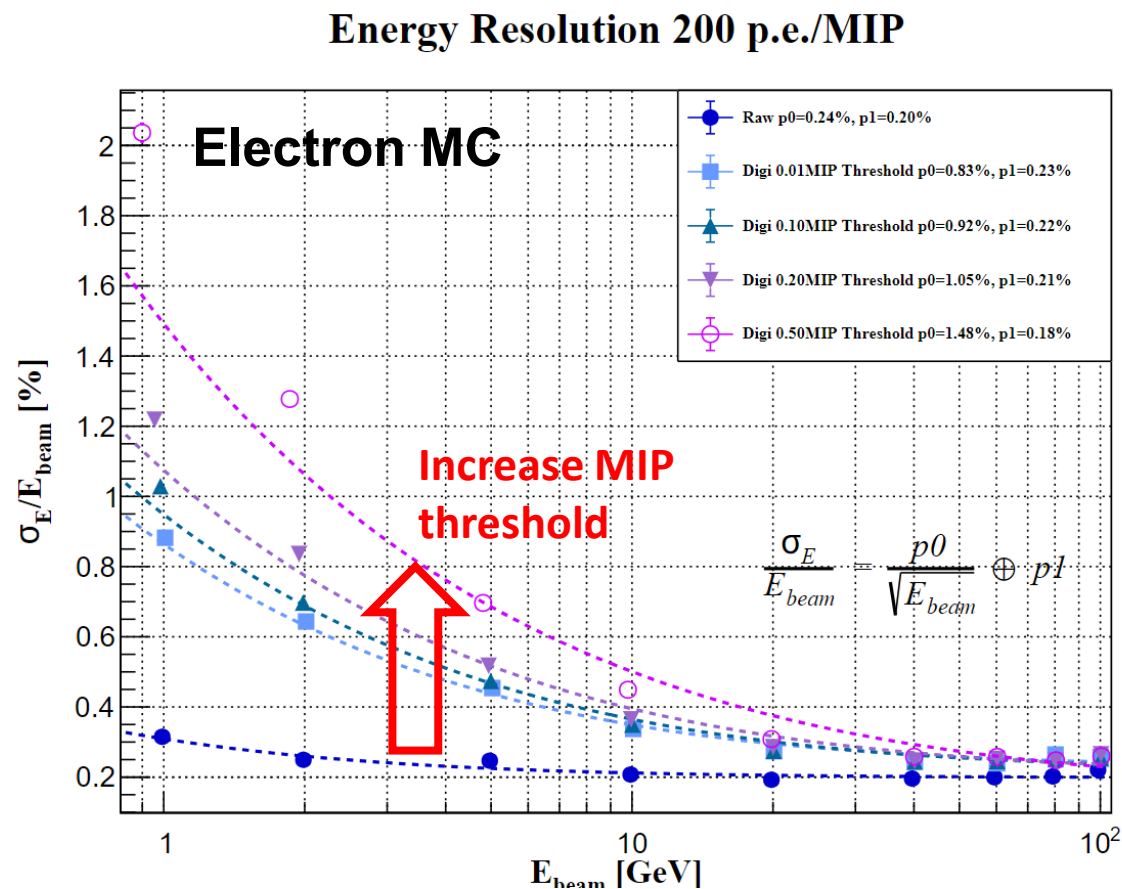
能量分辨率 vs 死物质质量



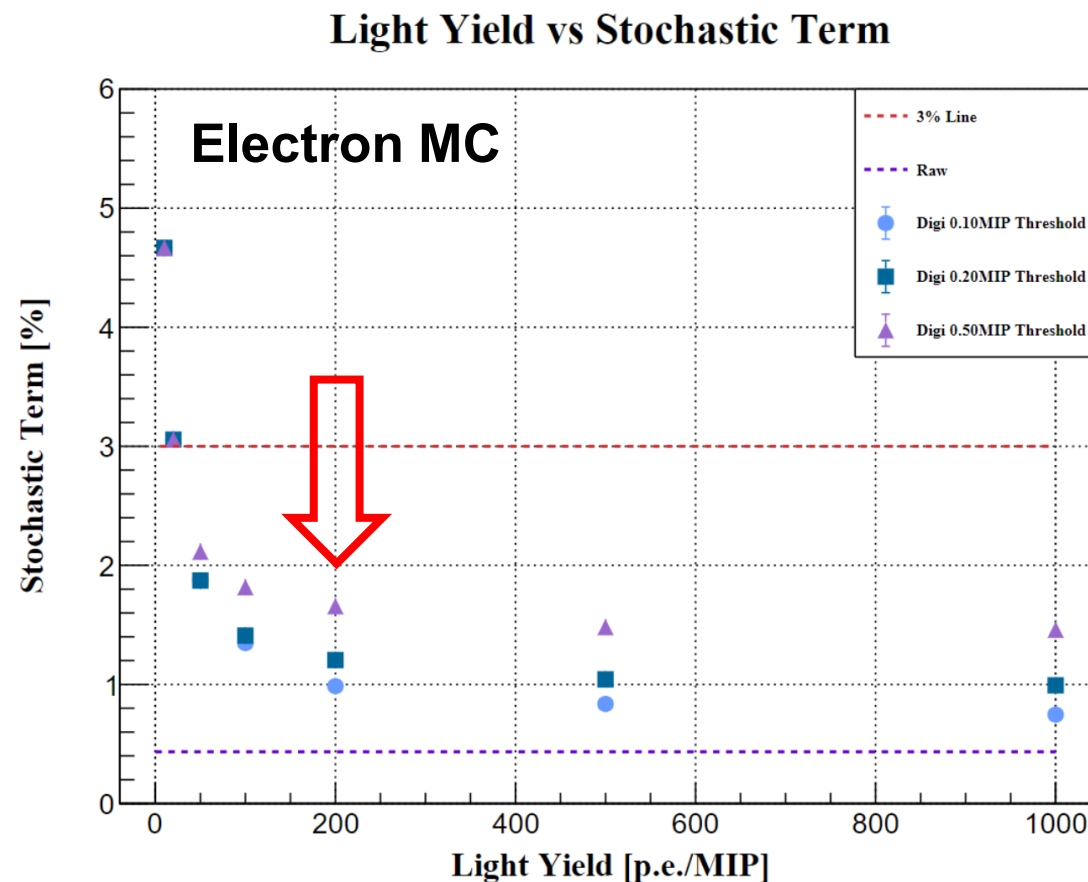
晶体电磁量能器模块：模拟与优化

■ BGO 晶体量能器模块（40cm）的能量分辨

能量分辨率与 MIP 阈值之间的关系

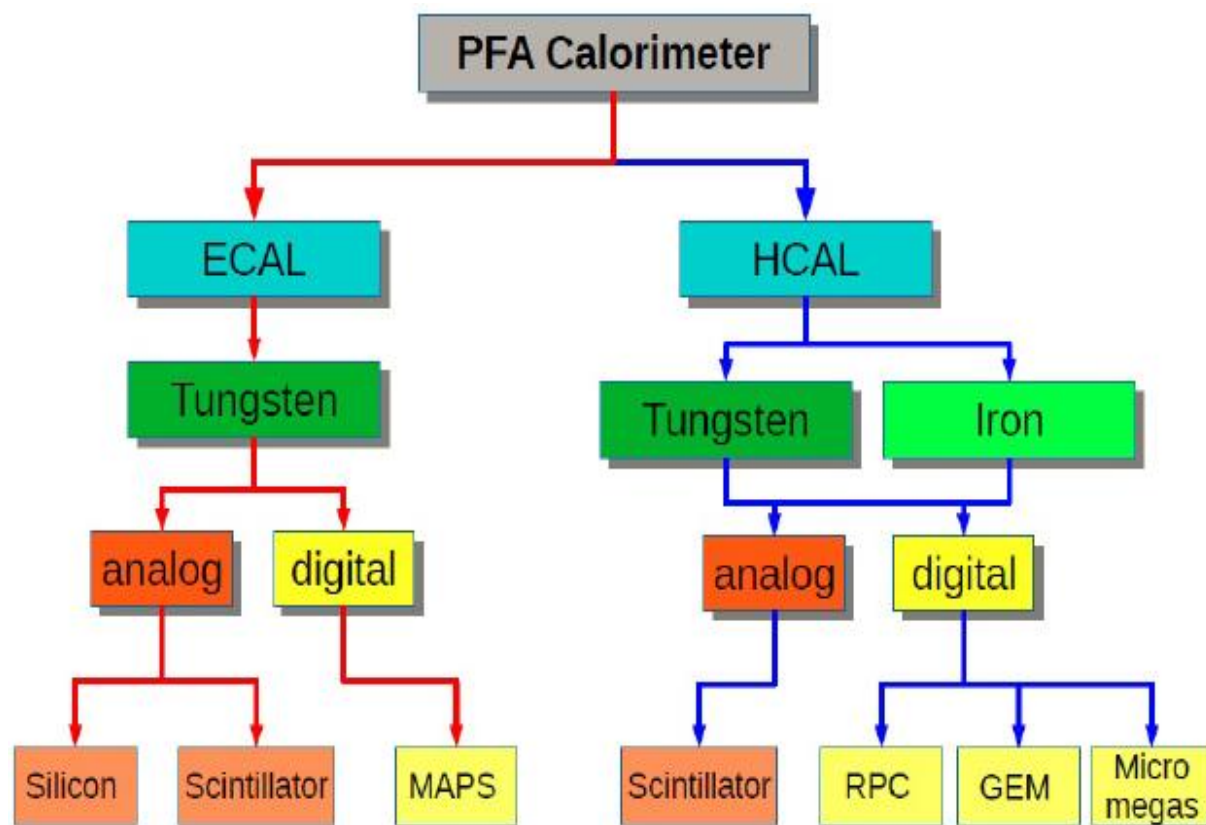


能量分辨统计涨落项与光产额之间的关系



课题背景介绍

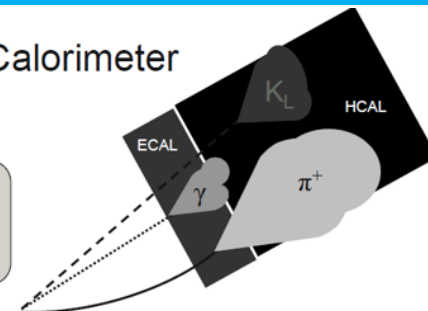
■ 国际上基于粒子流算法(PFA)高颗粒度量能器研制现状



Particle Flow Algorithms and Imaging Calorimeter

The idea...

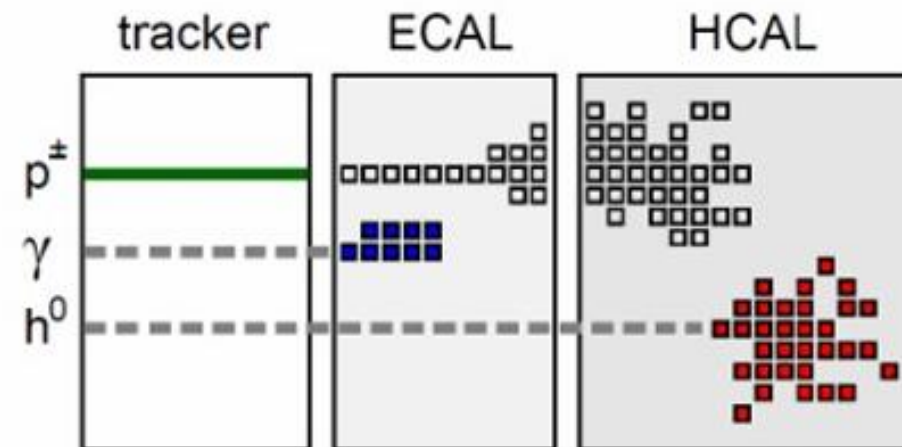
Charged particles } measured with the Tracker
Neutral particles } Calorimeter



Particles in jets	Fraction of energy	Measured with	Resolution [σ^2]
Charged	65 %	Tracker	Negligible
Photons	25 %	ECAL with $15\%/\sqrt{E}$	$0.07^2 E_{\text{jet}}$
Neutral Hadrons	10 %	ECAL + HCAL with $50\%/\sqrt{E}$	$0.16^2 E_{\text{jet}}$
Confusion		Required for $30\%/\sqrt{E}$	$\leq 0.24^2 E_{\text{jet}}$



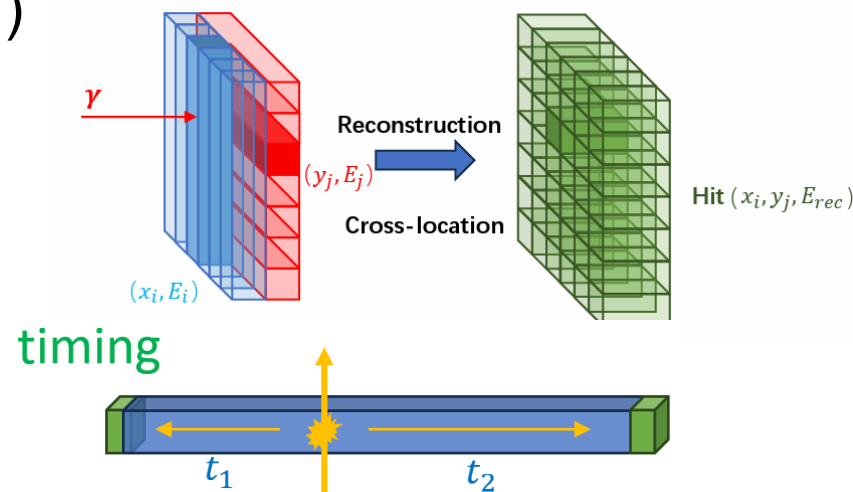
Particle Flow



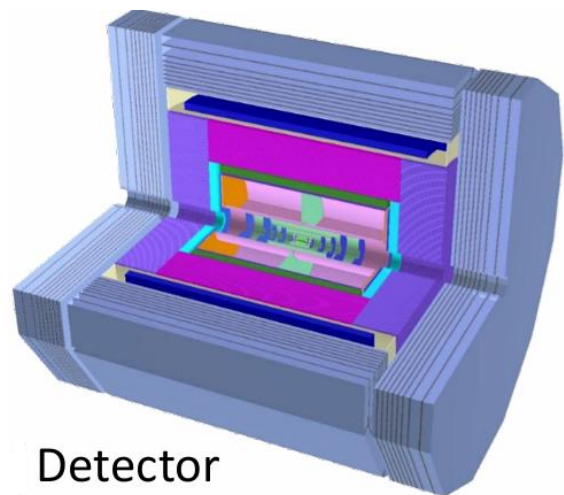
晶体量能器：总体设计

■ 研制国际首个基于粒子流算法的高颗粒度全吸收型晶体电磁量能器样机

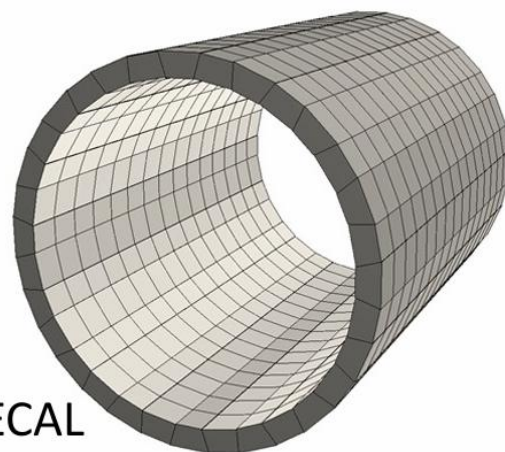
- 取样型 → 全吸收型，显著提升电磁能量分辨 $3\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$
- 采用长条晶体 → 大幅减少电子学读出通道
- 长条晶体正交密排 → 提高颗粒度 ($1\times 1\times 2\text{ cm}^3$)
- 晶体两端读出 → 提高电磁簇射的时间响应和位置分辨
- 晶体与SiPM相结合 → 结构小巧紧凑



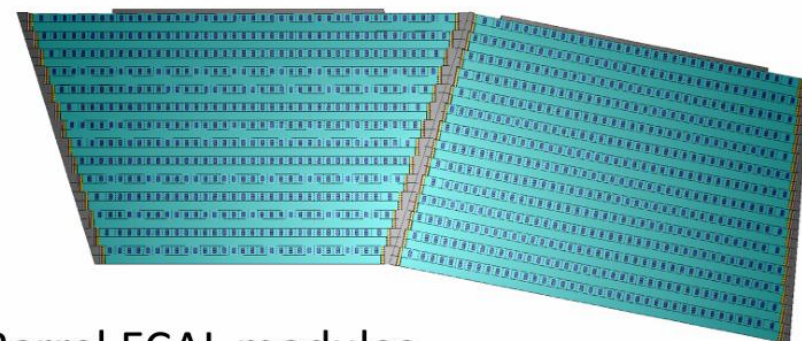
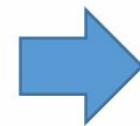
晶体ECAL模块设计(桶部)



Detector



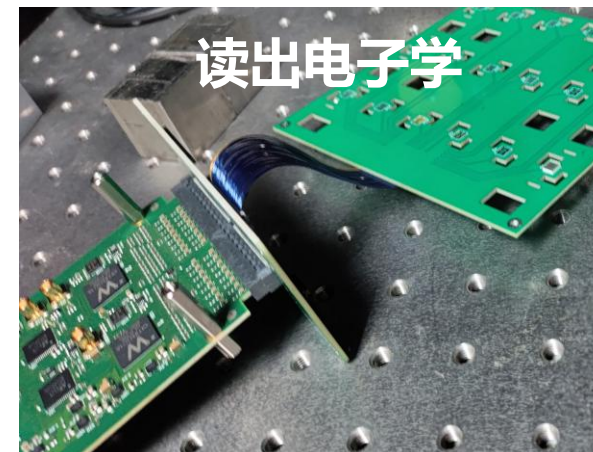
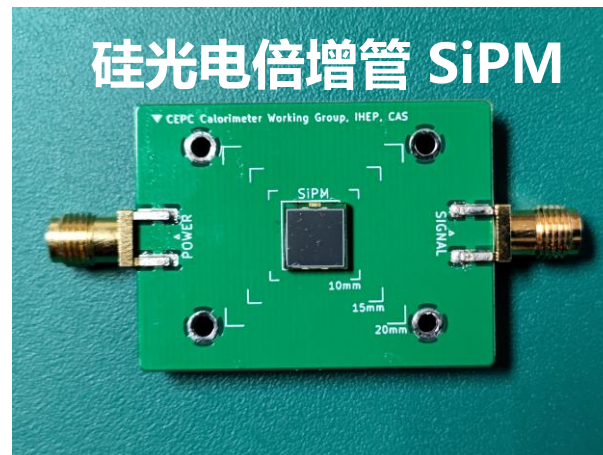
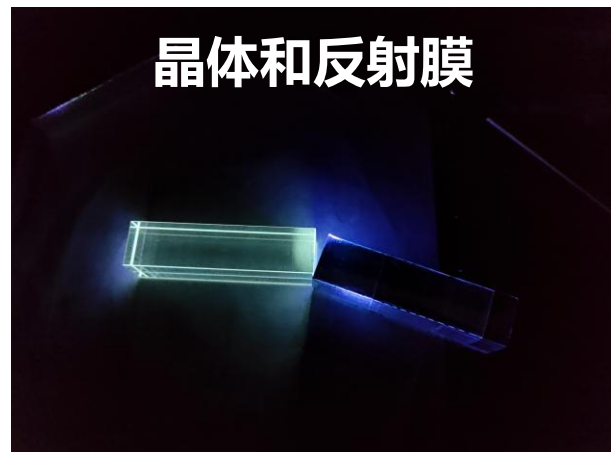
Barrel ECAL



Barrel ECAL modules

晶体量能器模块：研究方案和技术路线

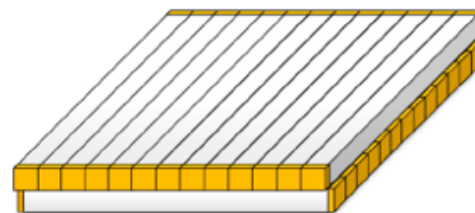
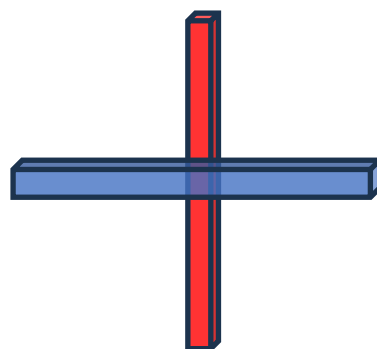
■ 晶体+SiPM灵敏探测器模块：



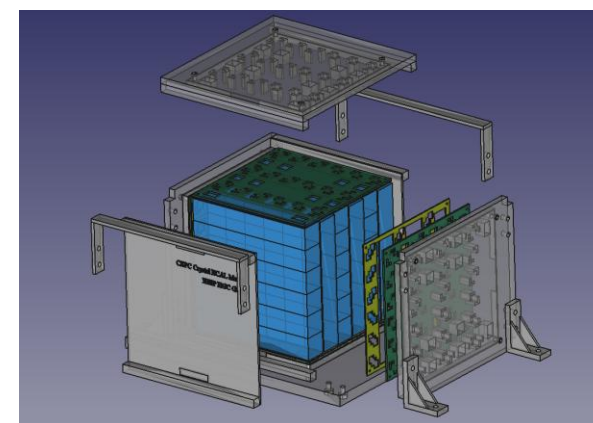
■ 晶体灵敏探测器模块组装集成电磁量能器样机：



长条晶体 +
两端SiPM读出



晶体条正交紧密排列 → 提高颗粒度



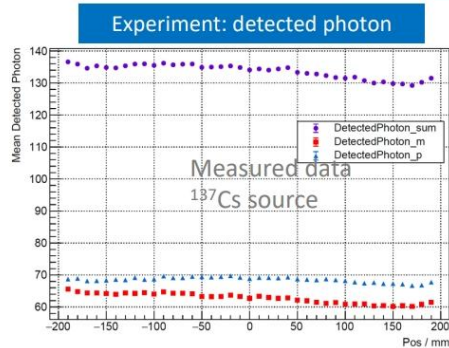
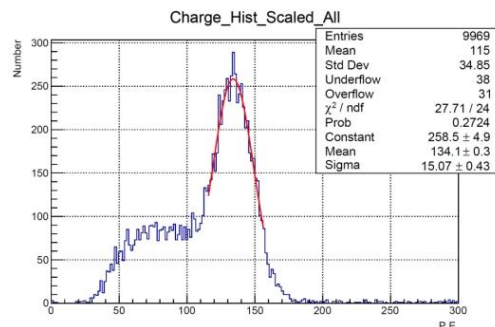
全吸收型晶体量能器样机

课题研究进展：晶体和SiPM选型

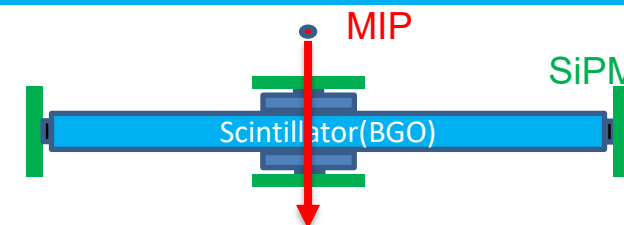
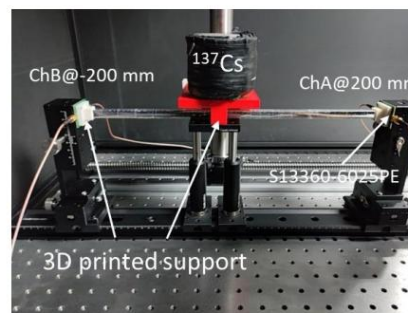
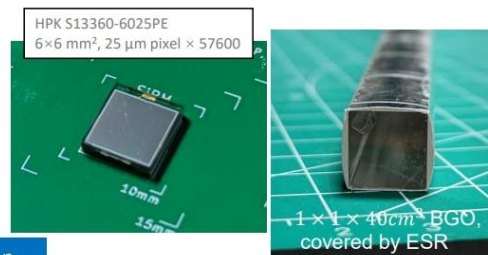
- 晶体长度? 22cm vs 40cm vs 60cm
- SiPM型号:
 - HPK S13360-6025PE, 57600 pixels
 - HPK S14160-3010PS, 89984 pixels
 - NDL EQR06 11-3030D-S, 244760 pixels

Test of Radioactive Sources for Long Crystal Bar

- BGO crystal bar coupled with SiPM
 - Energy resolution of : 11.2% @662keV
 - Light yield: ~200 p.e./MeV, enough for the LY requirement
 - Uniformity scan: <5% non-uniformity



- Relatively low response near one side
- Coupling, crystal manufacture.....



晶体量能器：模拟与重建

■ 模拟和重建多个粒子在量能器中的簇射，如何有效区分，减少PFA的confusion term?

• 量能器几何结构

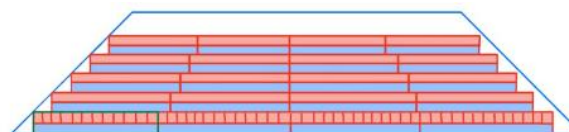
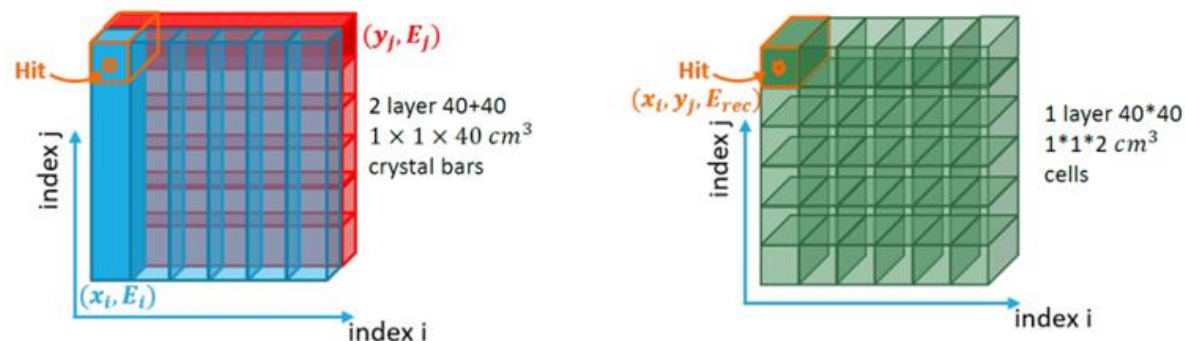
- 完整的桶部几何描述：DD4HEP
- 径向 28 层，正交密排，辐射长度 $\sim 24 \times 0$
- 单根晶体尺寸： $1 \times 1 \times 40 \text{ cm}^3$

• 重建算法：CyberPFA

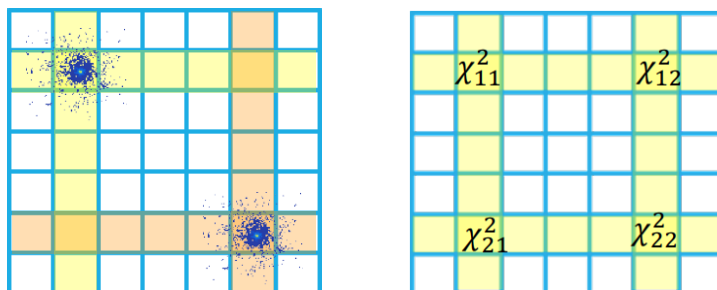
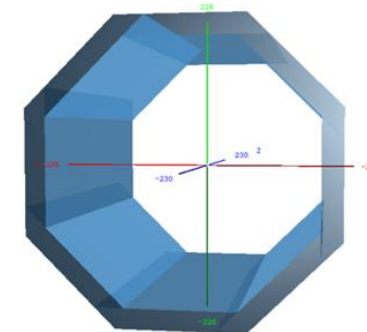
- 颗粒度： $1 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$
- 利用多层hits信息有效排除 ghost hits

• 主要挑战

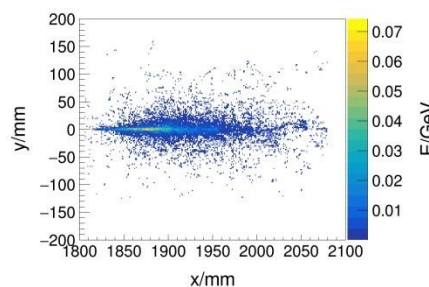
- 能量沉积 Cluster 的模式识别
- 能量沉积 Cluster 与带电径迹的匹配



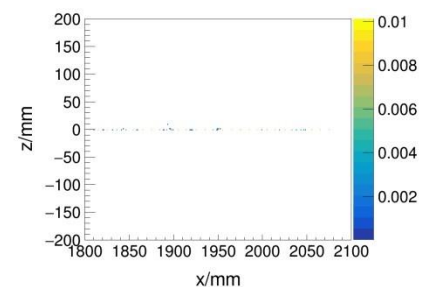
An octave in the barrel ECAL with crossed long crystal bars



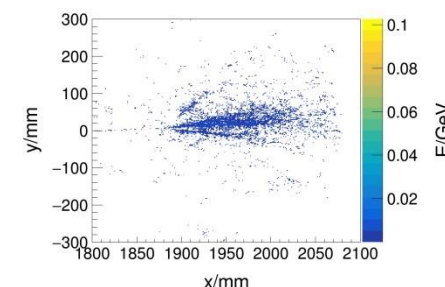
Remove ghost hits



EM cluster



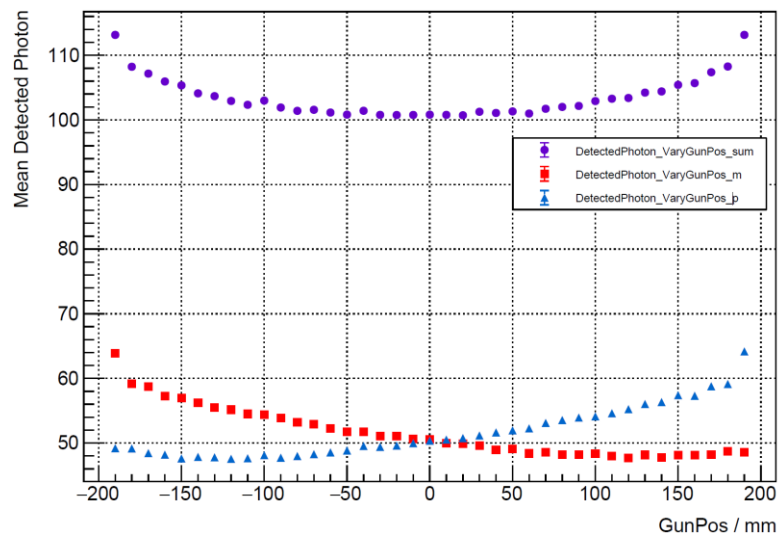
MIP cluster



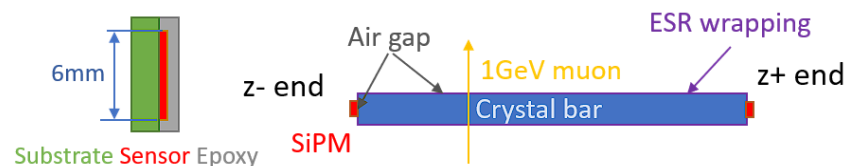
Hadronic cluster

课题研究基础：模拟结果

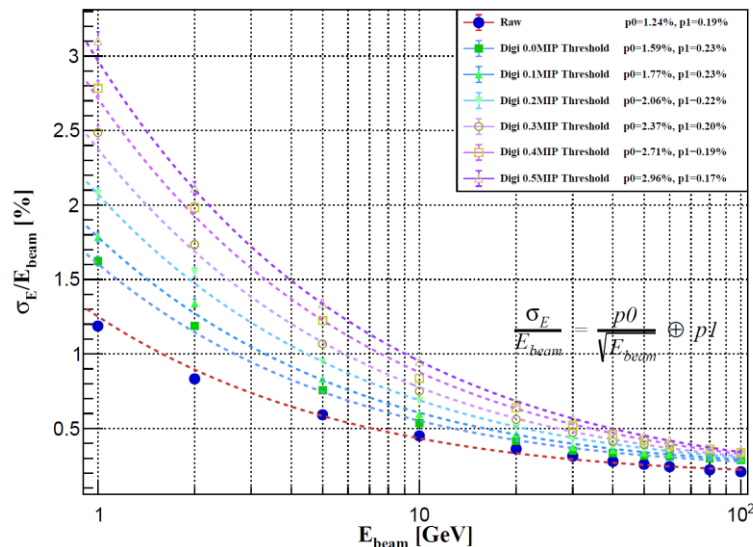
DetectedPhoton_VaryGunPos



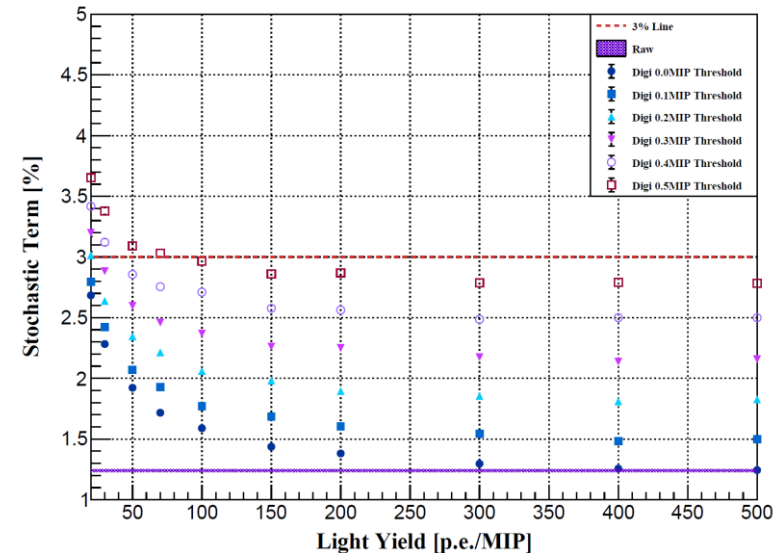
Geant4 Simulation (v10.7.3)



Energy Resolution 100p.e./MIP



Light Yield vs Stochastic Term



Key Parameters

Value

Notes

MIP light yield	~200 p.e./MIP	8.9 MeV/MIP in 1cm BGO
Energy threshold	0.1 MIP	Depends on S/N and light yield
Crystal non-uniformity	<1%	Calibration precision
Dynamic range	$1 - 1.7 \times 10^5$ p.e.	Up to 15GeV per crystal bar
Time resolution	~400 ps @ 1-MIP	Ideal performance from G4 simulation
Temperature stability	Stable at the level of 0.05°C	CMS ECAL value
Gap tolerance	~100μm	-