

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 中期进展报告

课题负责人：杨海军 (上海交大/李所)

2026年5月18日



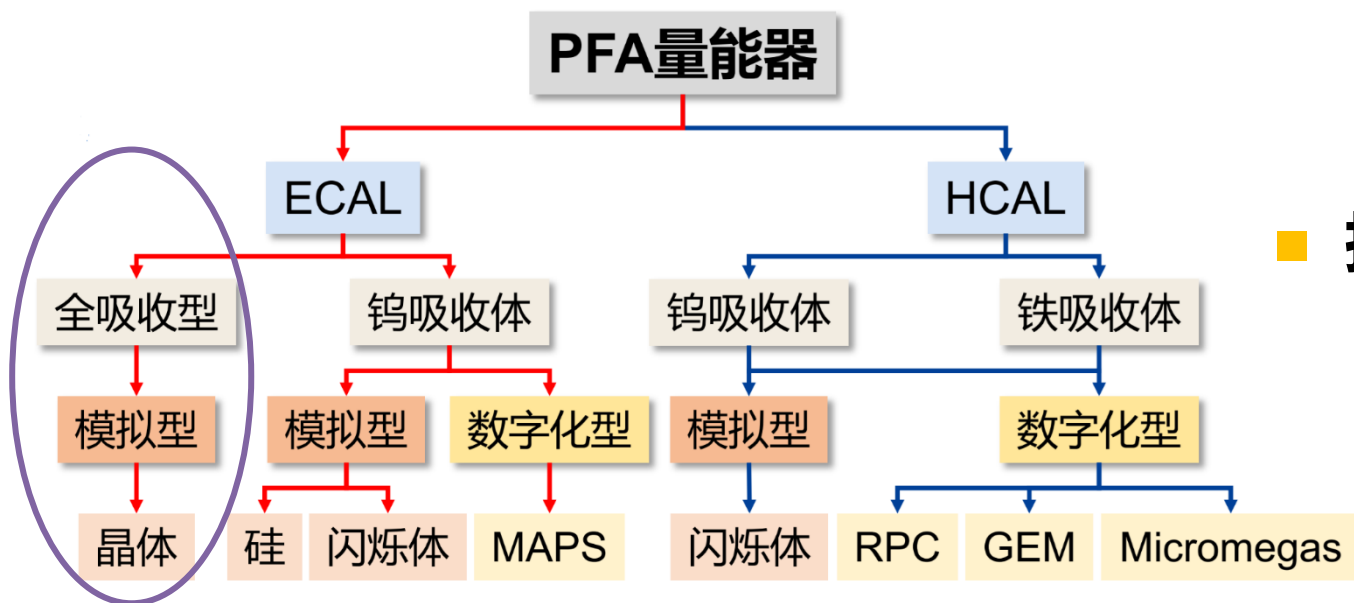
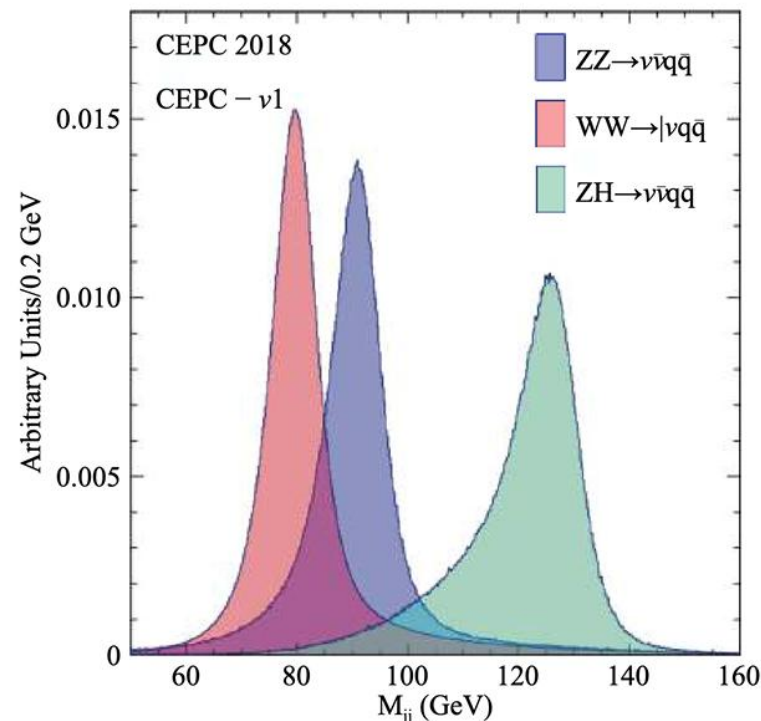
报告提纲

- **课题研究背景的介绍**
- **研究目标、内容和关键技术**
- **考核指标及评测方法**
- **研究进展及亮点成果**
- **团队成员和人才培养**
- **中期小结及未来计划**

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

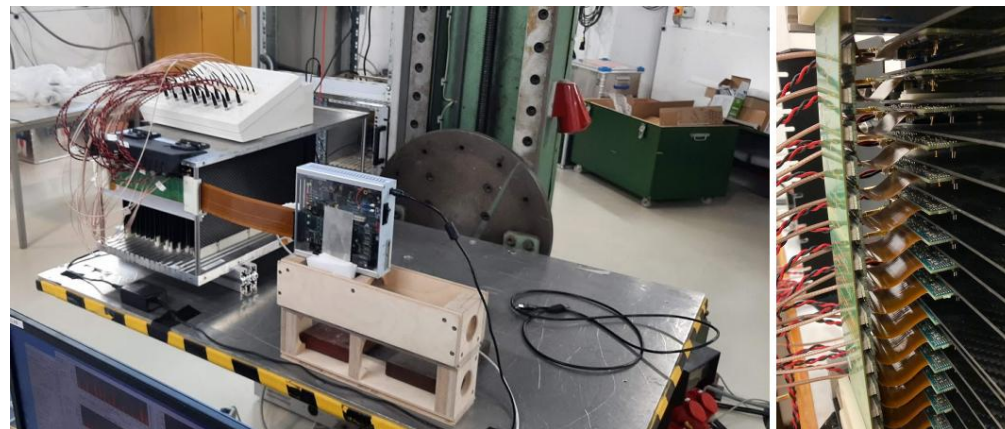
研究背景

- 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)



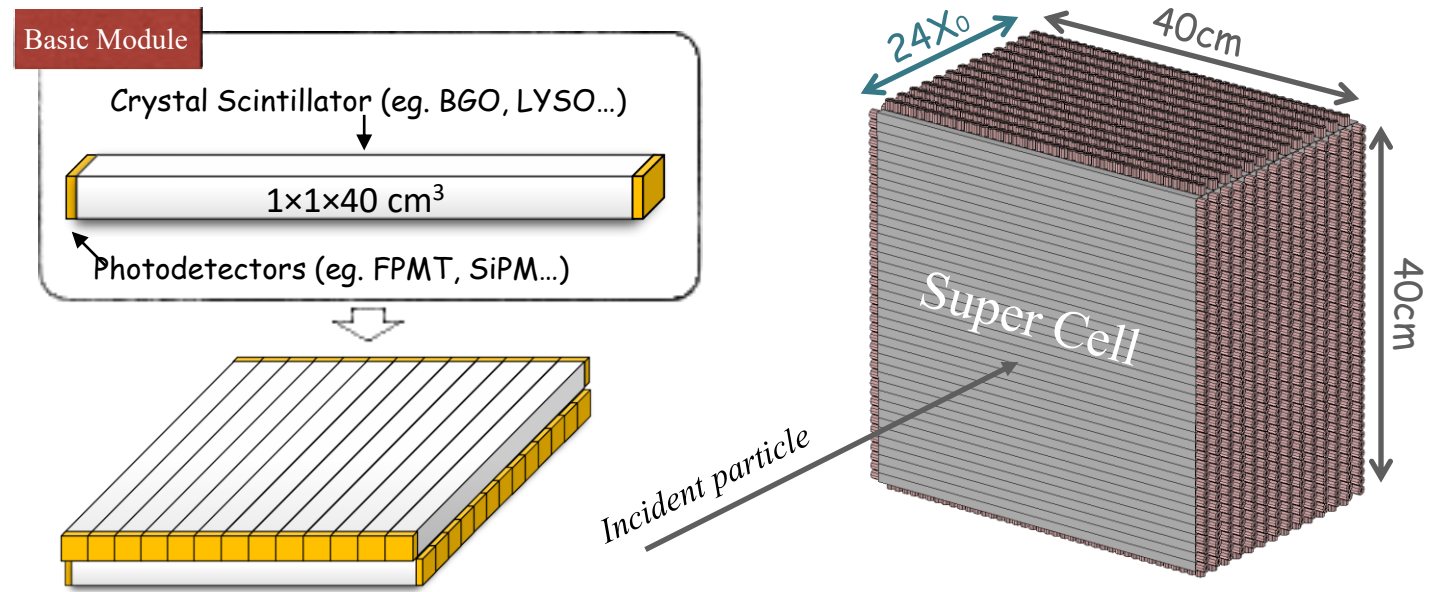
- 本课题**聚焦全吸收型电磁量能器技术**，拟研制国际上首个基于粒子流算法的高颗粒度全吸收型晶体电磁量能器样机，将大幅提高电磁能量分辨达到 $\sim 3\% / \sqrt{E} \oplus 1.5\%$ 的水平

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

■ **中期考核指标:** 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%

■ **完成时考核指标:** 全吸收型晶体电磁量能器样机的MIP探测效率大于95%,
模拟验证探测器系统的喷注能量分辨达到3-4% @ 100 GeV

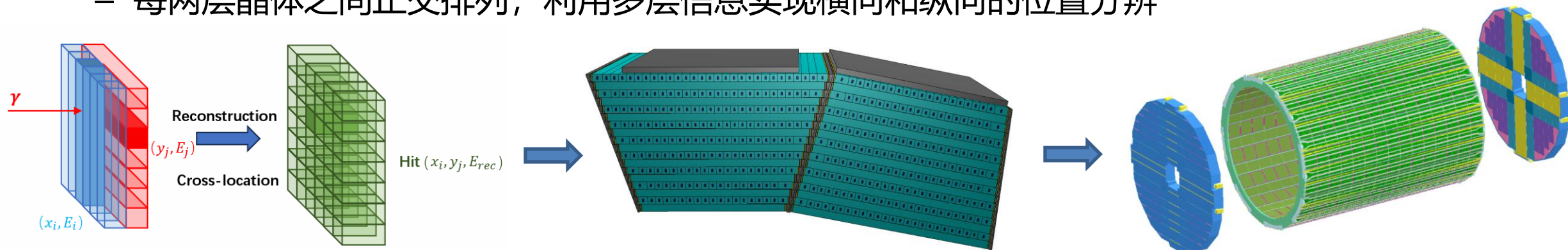
评测手段/方法: 利用宇宙线或高能粒子束流进行测量, 同行评议

课题目标 ¹	预期成果			考核指标 ²			考核方式 (方法)及 评价手段 ¹	
	预期成果 名称	预期成果类型		指标 名称	立项时已有指 标值/状态	中期指标 值/状态 ³		完成时指标 值/状态
(限500字以内) 掌握闪烁晶体-SiPM作为灵敏单元的全吸收型量能器的关键技术: 灵敏单元的批量制作和质量控制、探测模块	主要 成果 ¹	全 吸 收 型 电 磁 量 能 器	<input type="checkbox"/> 新理论 <input type="checkbox"/> 新原理 <input type="checkbox"/> 新产品 <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> 新技术 <input checked="" type="checkbox"/> 新方法 <input type="checkbox"/> 关键部件 <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> 数据库 <input type="checkbox"/> 软件 <input type="checkbox"/> 应用解决方案 <input type="checkbox"/> 实验装置/系统 <input type="checkbox"/> 临床指南/规范 <input type="checkbox"/> 工程工艺 <input type="checkbox"/> 标准 <input type="checkbox"/> 论文 <input type="checkbox"/> 发明专利 <input type="checkbox"/> 其他_____	1.1 电磁能量分辨	/	模拟中对1-60GeV电磁簇射达 $3-4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ 的能量分辨和1.5%的线性度	模拟中对1-60 GeV电磁簇射达 $3-4\%/\sqrt{E} \oplus 1.5\%$ 能量分辨和1.5%的线性度	同行专家评议
				1.2 喷注能量分辨	/	/	模拟中喷注能量分辨3-4% @ 100 GeV	同行专家评议
的系统集成技术、高集成度的前端读出电子学系统以及数据获取系统。建造一台全吸收型电磁量能器原型样机, 通过实验测试验证此技术方案的核心性能。				1.3 MIP探测器效率	/	/	高于95%	同行专家评议

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和纵向的位置分辨



➤ 利用正交排列的晶体条实现粒子重建

➤ 基本探测器模块构建

➤ 量能器整体几何结构

■ 设计优势

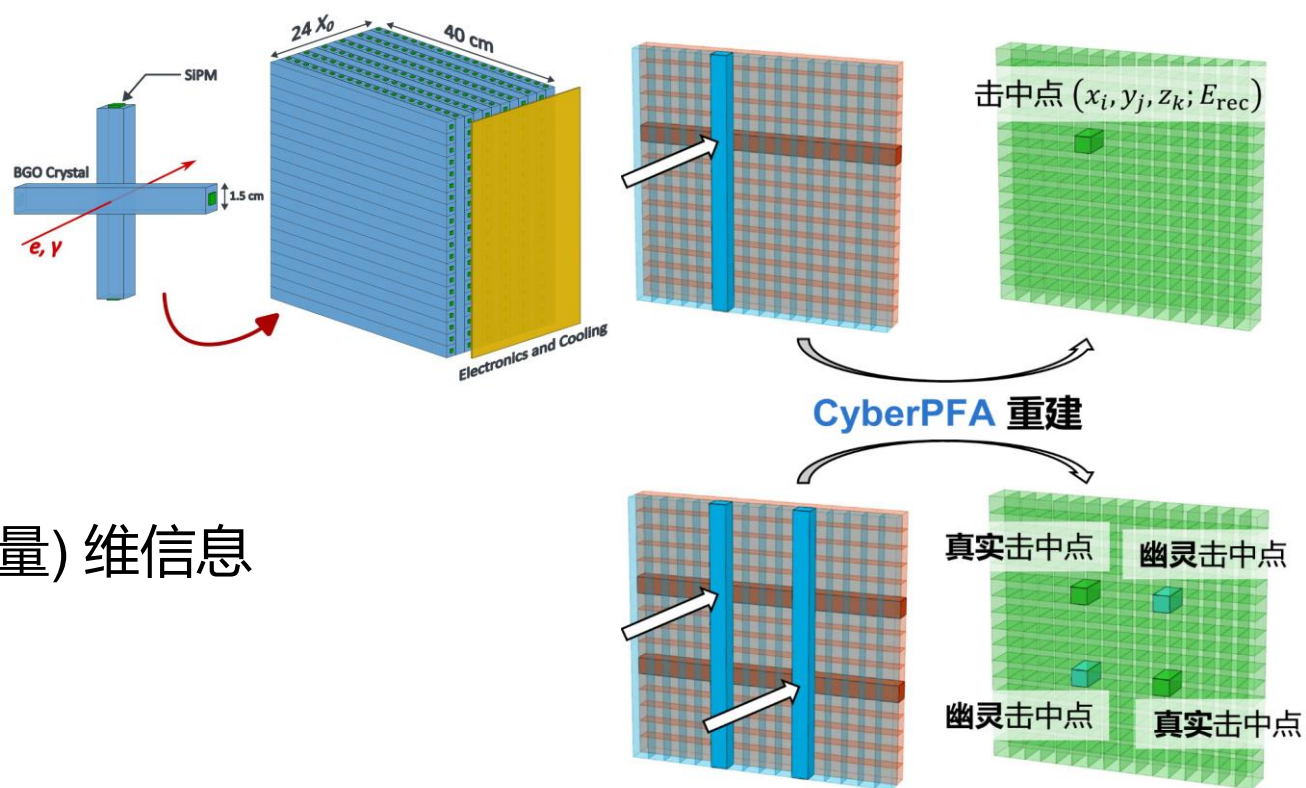
- 与取样型量能器相比, 最小化了层间的非灵敏物质, 显著提升能量分辨率
- 使用长条晶体为基本单元, 大幅减少了读出通道数
- SiPM双端读出具有更好的均匀性, 可利用双端时间信息辅助粒子重建

CEPC Reference Detector TDR
[2510.05260]

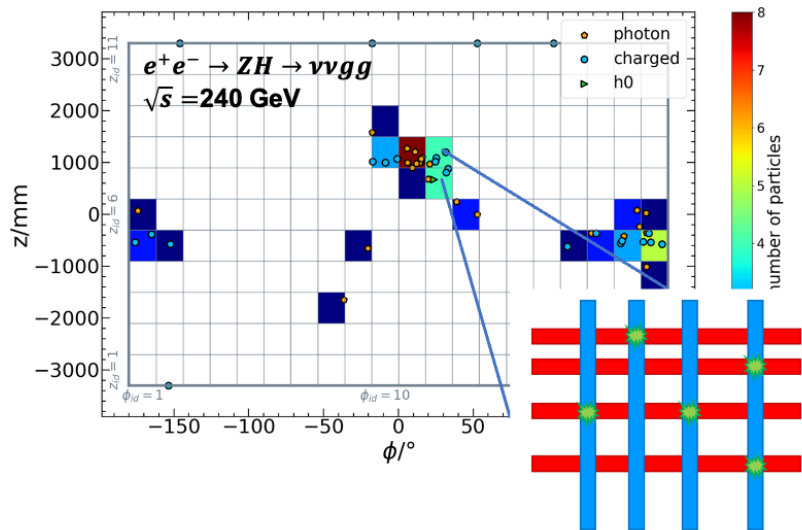
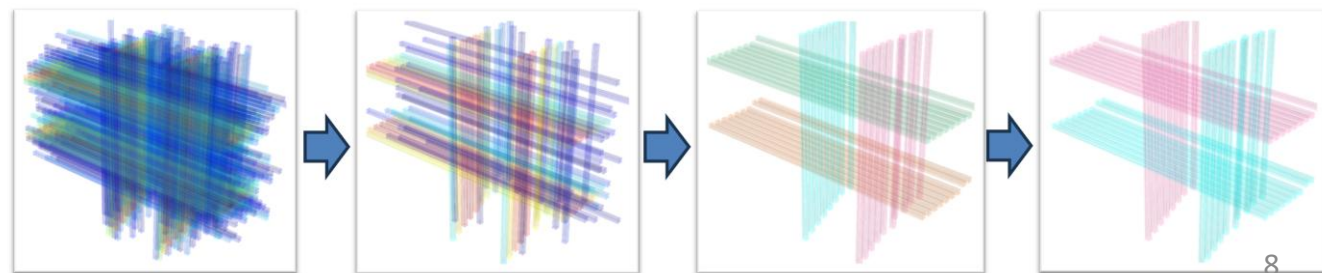
研究进展一：晶体量能器重建算法

■ 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

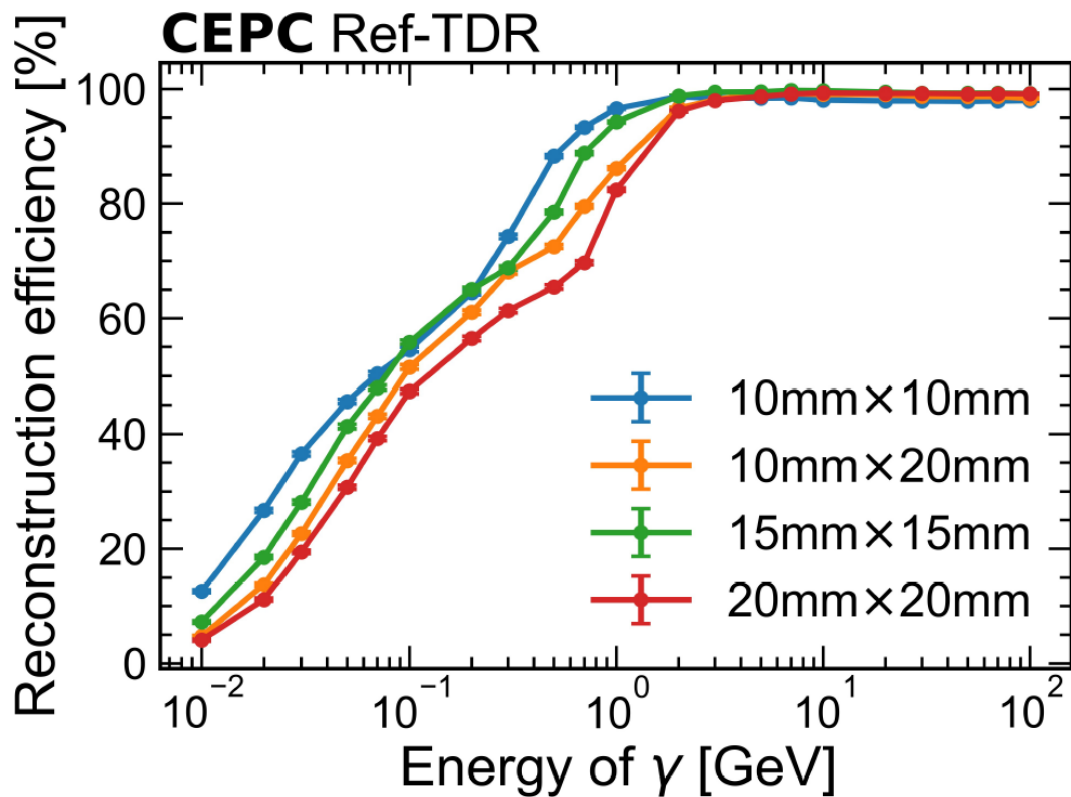


事例显示：临近双光子的区分

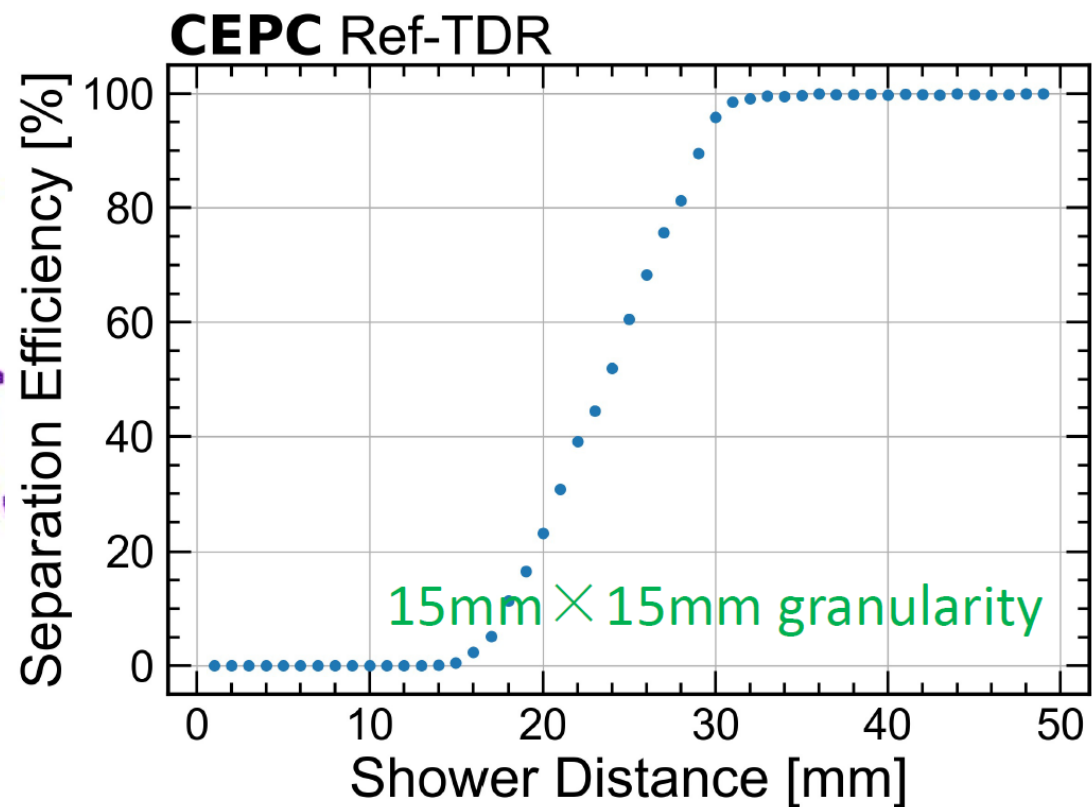


研究进展一：晶体量能器重建算法

光子重建效率 vs 颗粒度

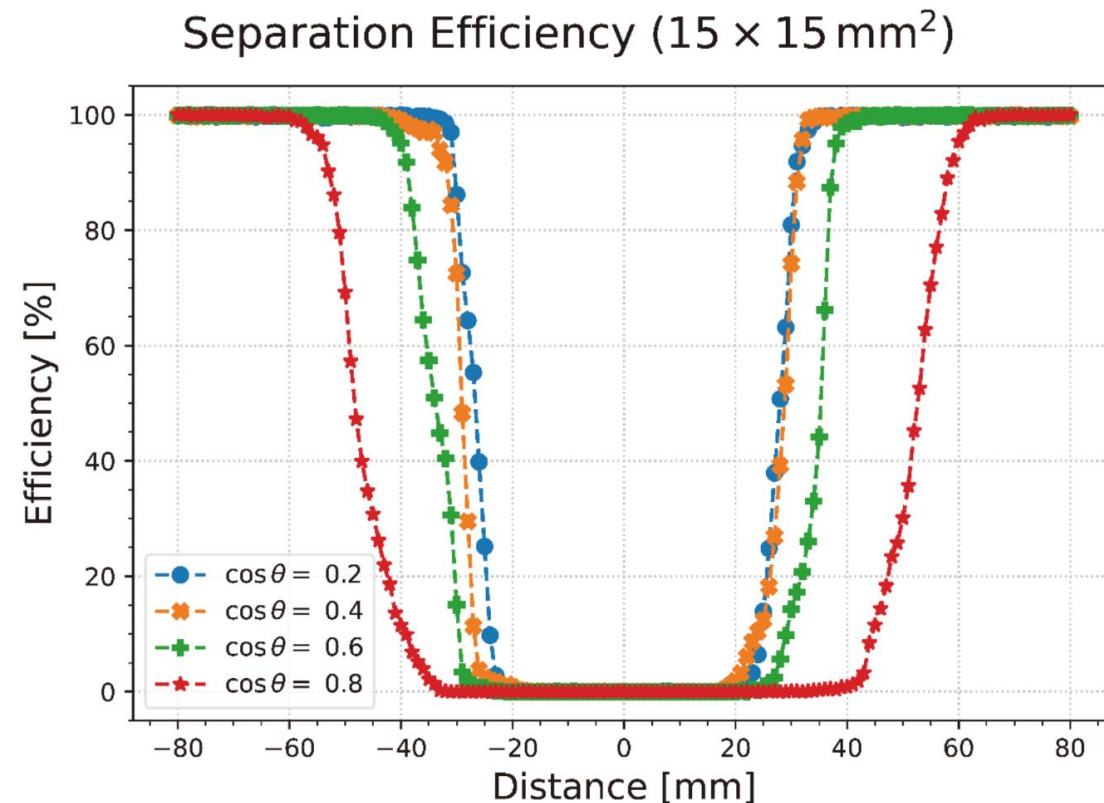
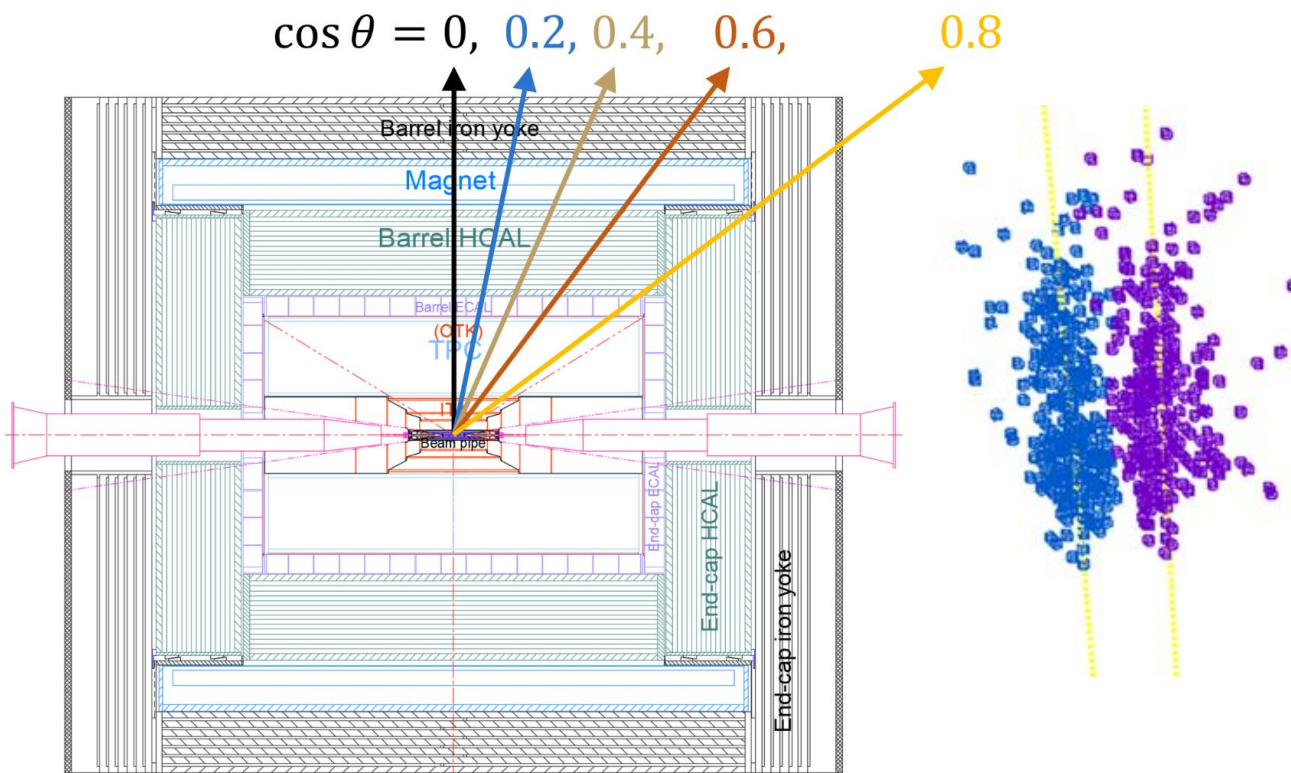


双光子区分效率 vs 双光子间距



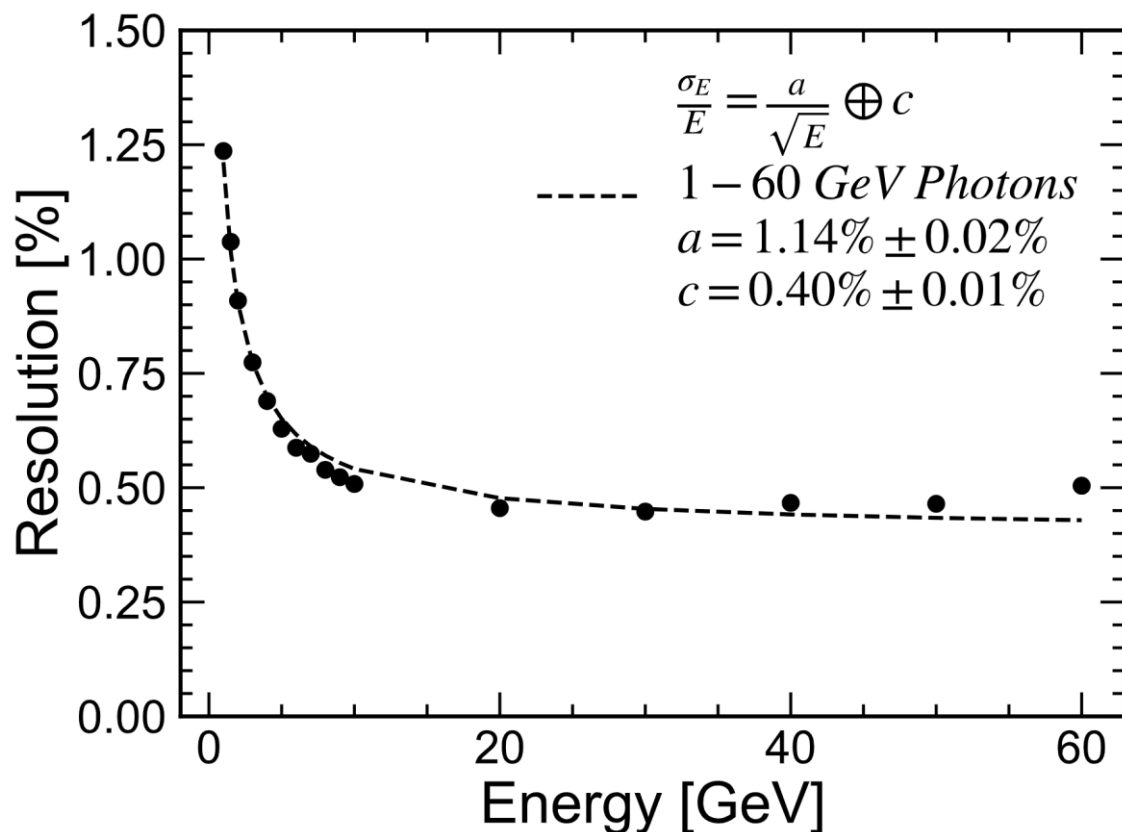
研究进展一：晶体量能器重建算法

- 算法性能：临近双光子区分效率随 $\cos\theta$ 角度变化

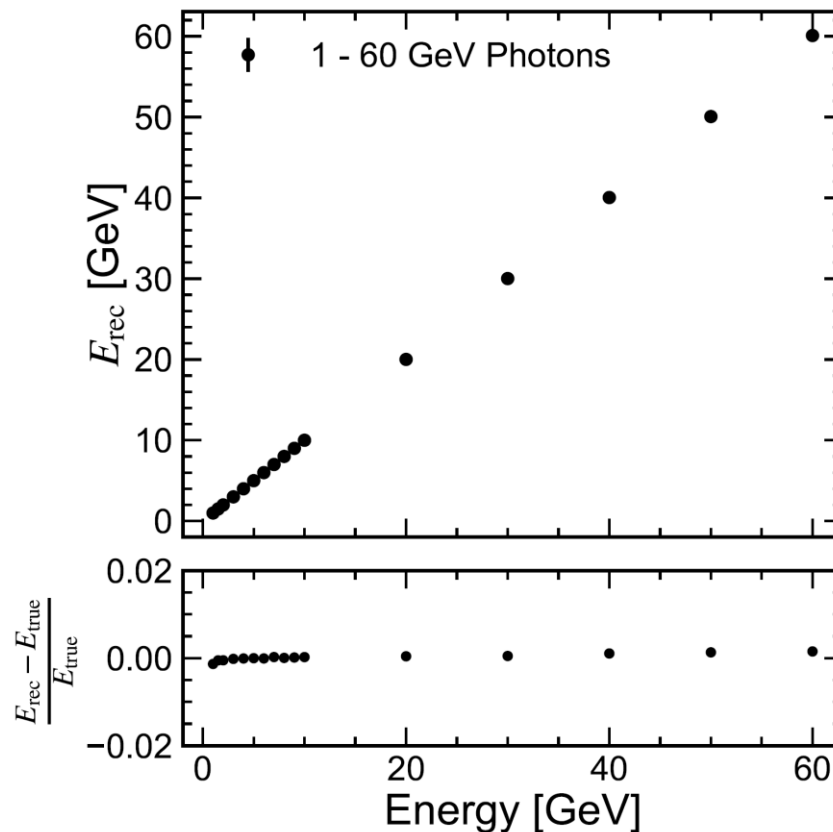


研究进展一：晶体量能器的能量分辨率

- 电磁能量分辨率: $1.14\% / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 0.4\%$
- 模拟结果优于考核指标: $3\% / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 1.5\%$



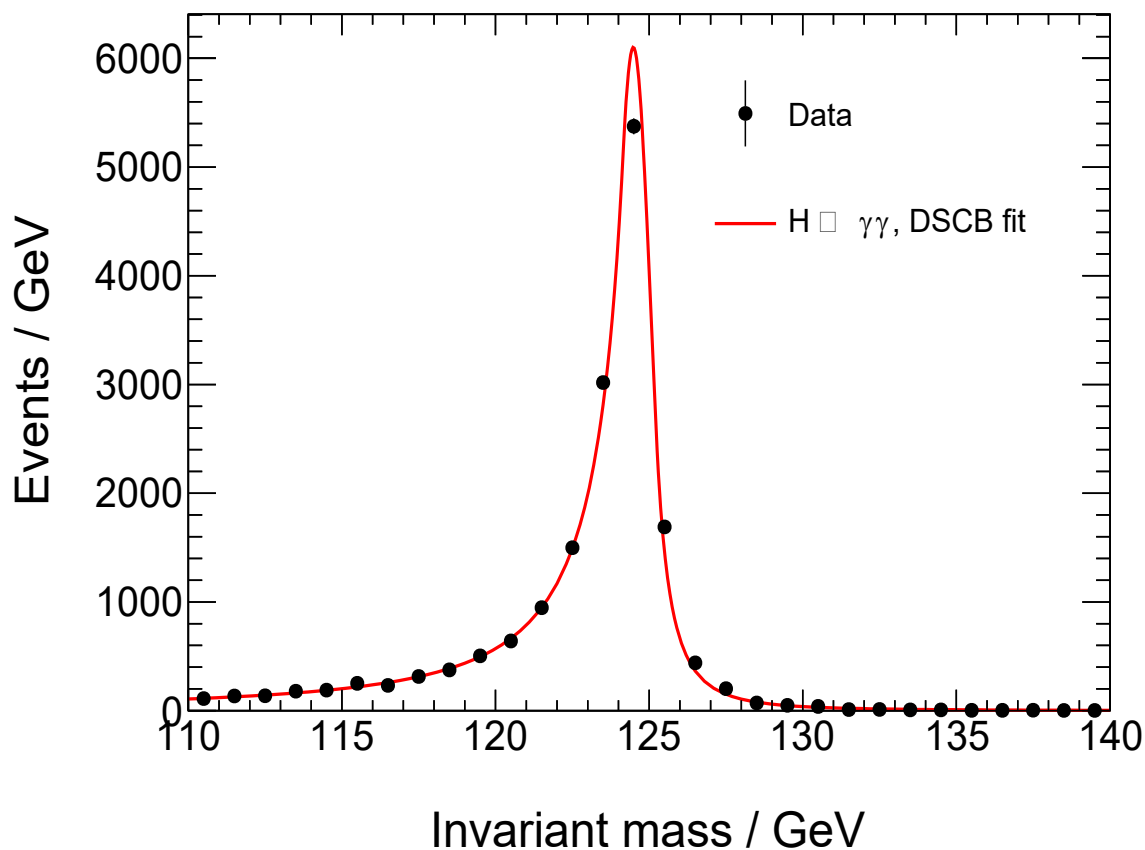
- 电磁簇射能量线性度: $< 1\%$
- 模拟结果优于考核指标: 1.5%



研究进展一：晶体量能器物理性能

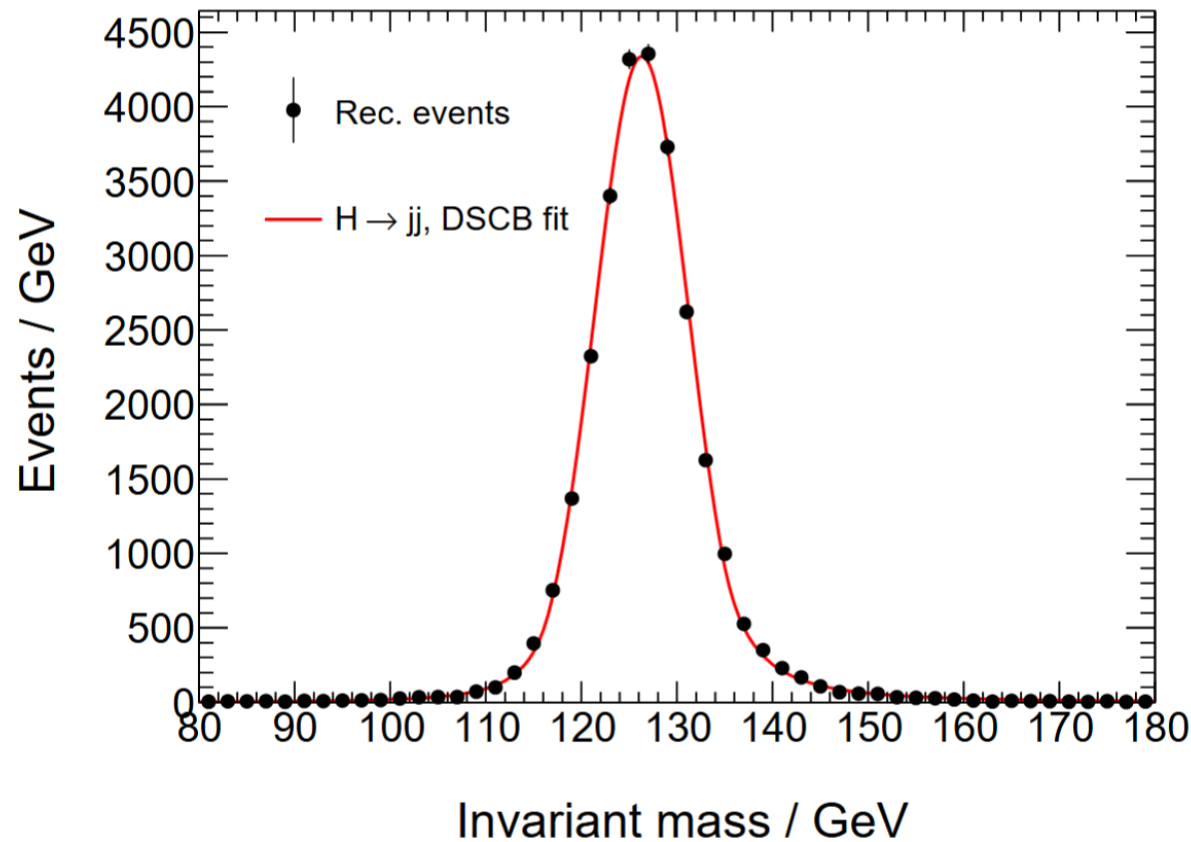
■ 希格斯衰变到双光子的质量分辨率

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



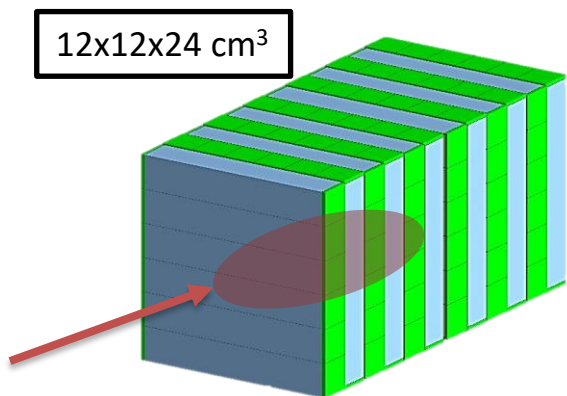
■ 希格斯衰变到双胶子的质量分辨率

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



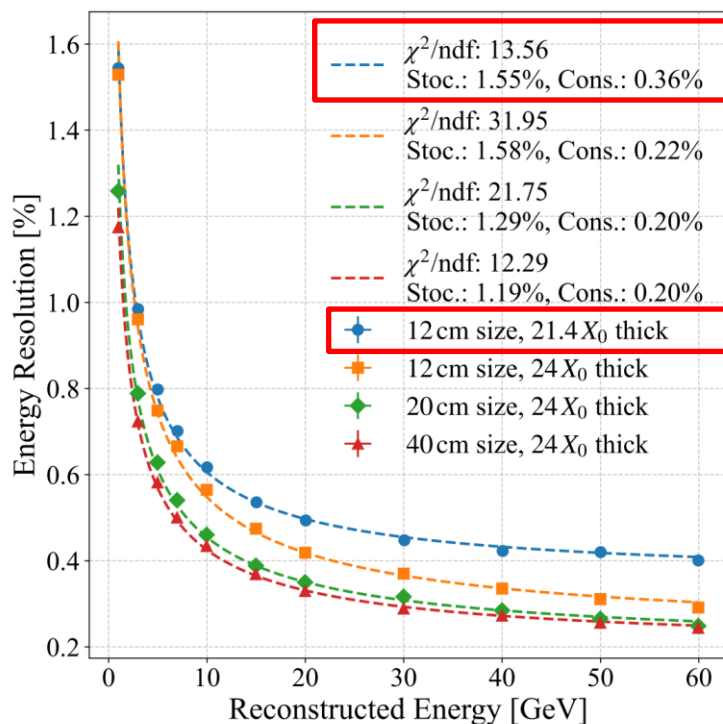
研究进展二：样机设计、模拟和测试

- **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，能够实现优异的能量分辨率

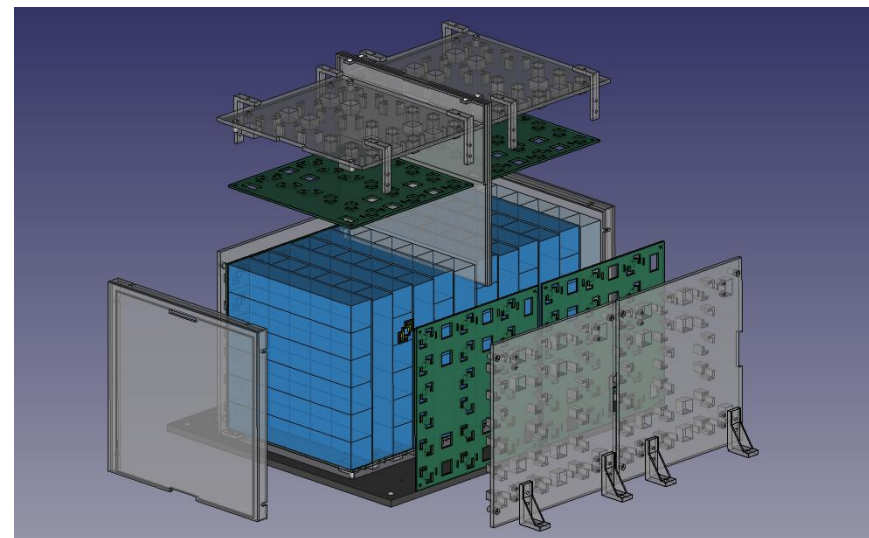


- 横向12cm、纵向 $21.4X_0$ 的模块即可实现对20GeV电子超过93.6%的吸收效率

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:

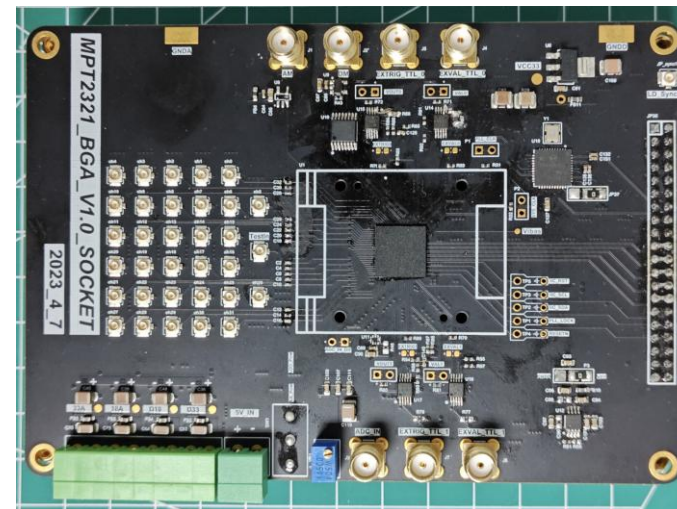
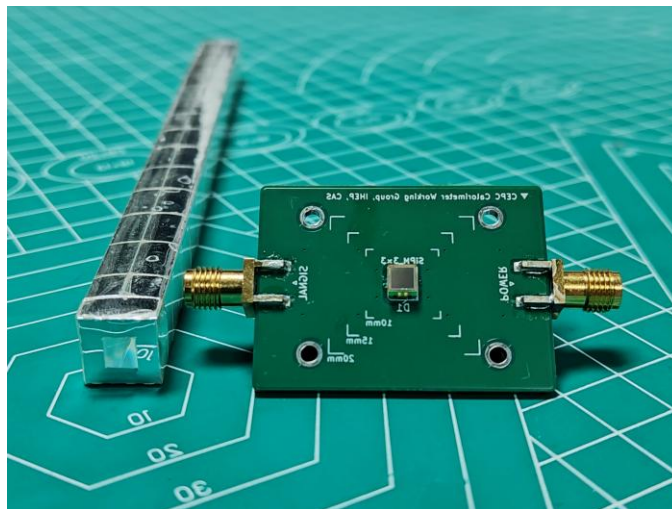
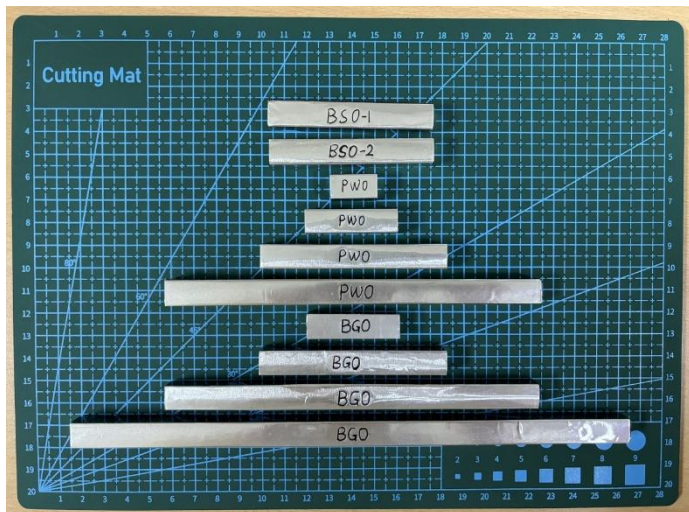
- 大动态范围
- 低噪声
- 耐辐照

□ 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)



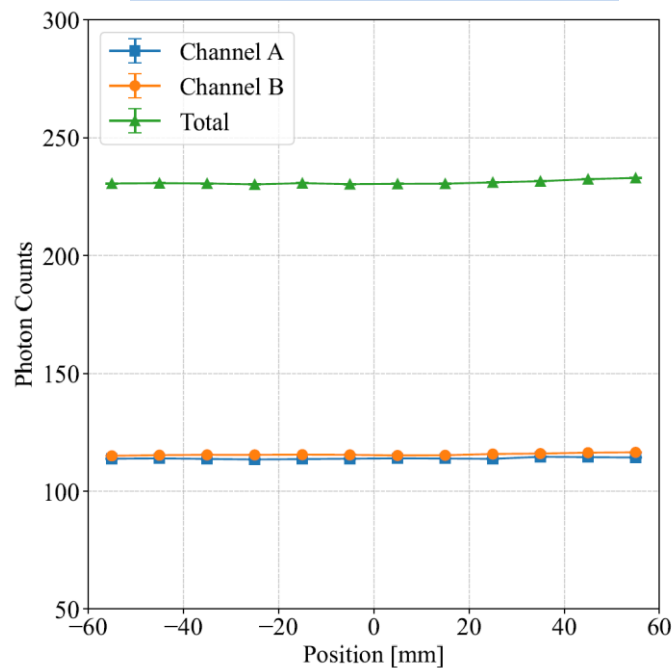
研究进展二：BGO晶体批量测试

- 用放射源测量尺寸为 $2 \times 2 \times 12\text{cm}^3$ 的BGO晶体条，共80根，选72根用于样机
- 晶体条长度方向上的响应均匀性良好，各晶体间光产额差异基本在10%以内

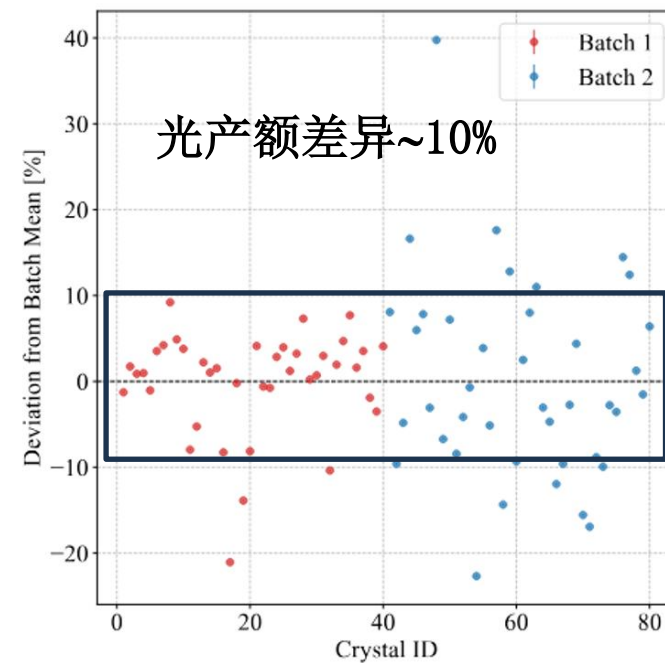


晶体条由ESR膜+铝膜包裹

单根晶体均匀性测试



80根晶体光产额测试

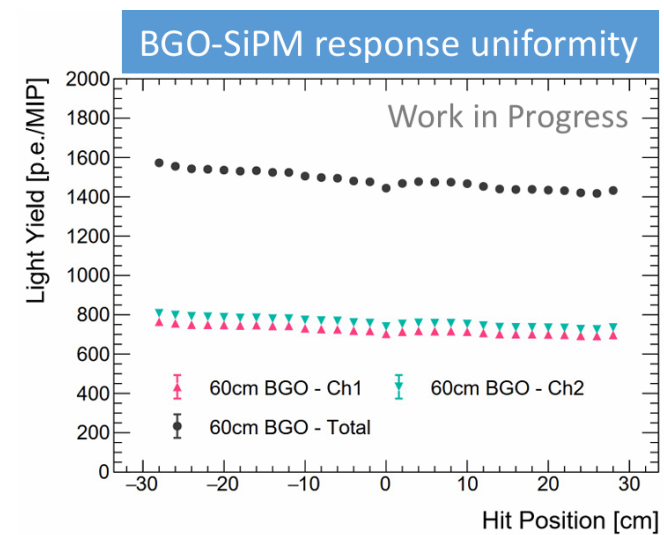
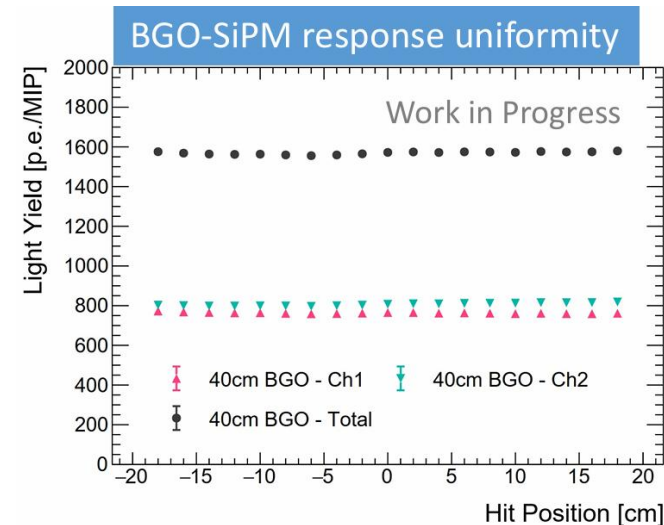
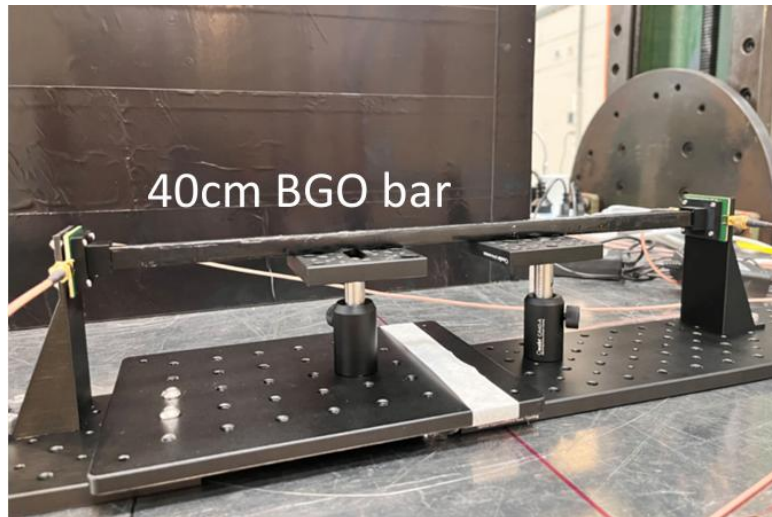


研究成果二：长条BGO晶体测试

■ 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：**
RMS / Mean = 0.43% ,
(Max - Min) / Mean = 1.5%

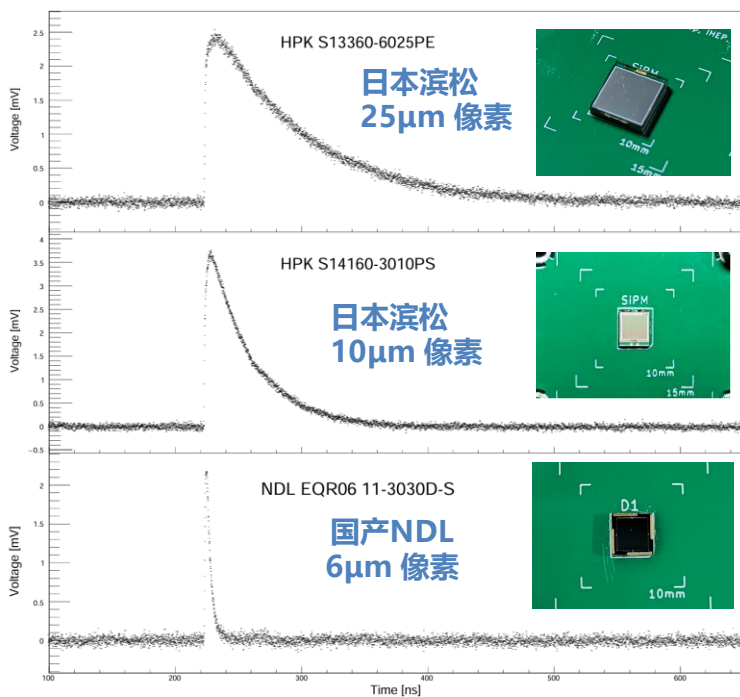
■ **60cm BGO 光输出均匀性：**
RMS / Mean = 3% ,
(Max - Min) / Mean = 10.5%



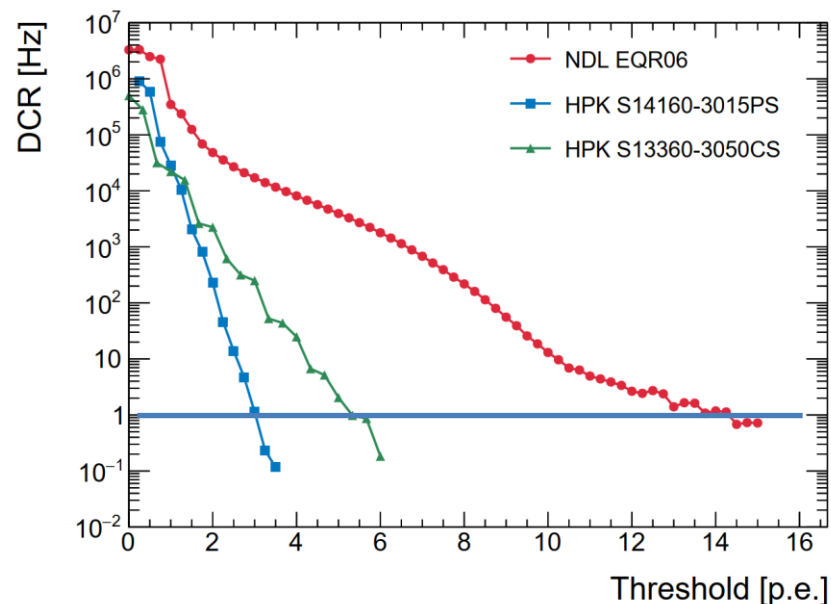
研究进展二：SiPM硅光电倍增器测试

- 相比于日本滨松的SiPM器件 (HPK S14160-3015PS, HPK-S13360-3050CS), 国产NDL SiPM (EQR06) 响应快、探测效率高, 但同时噪声水平也更高

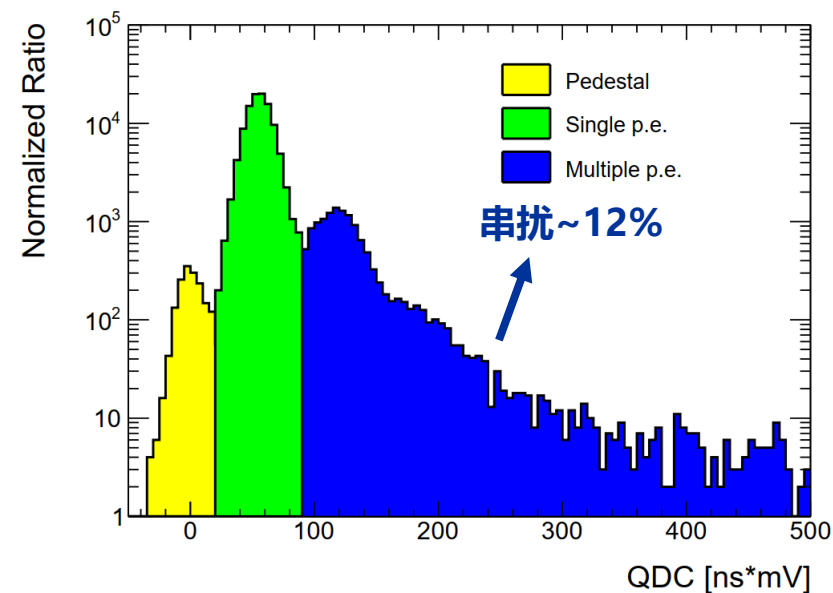
SiPM单光电子波形



SiPM暗计数率测试

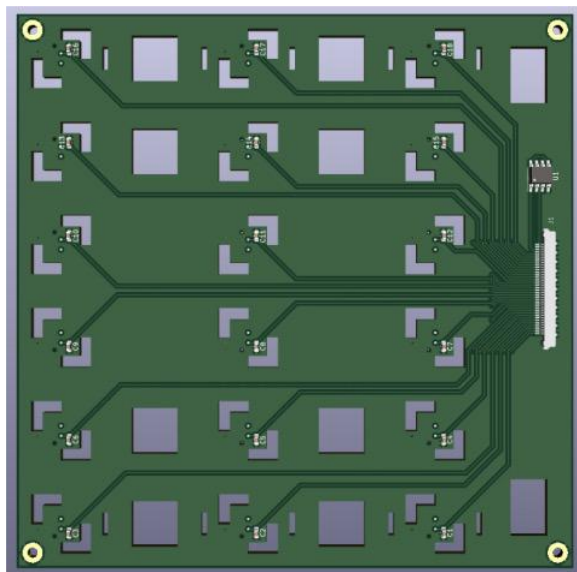
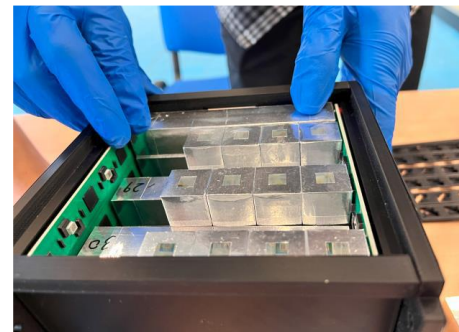


SiPM串扰率测试

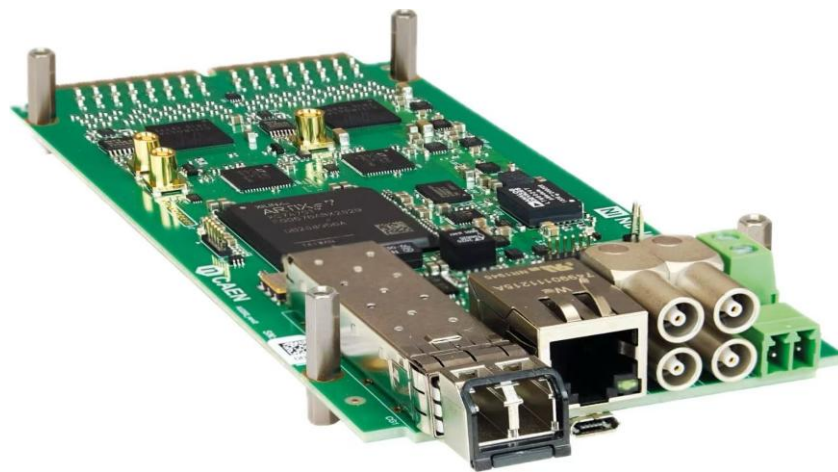


研究进展二：晶体量能器样机研制

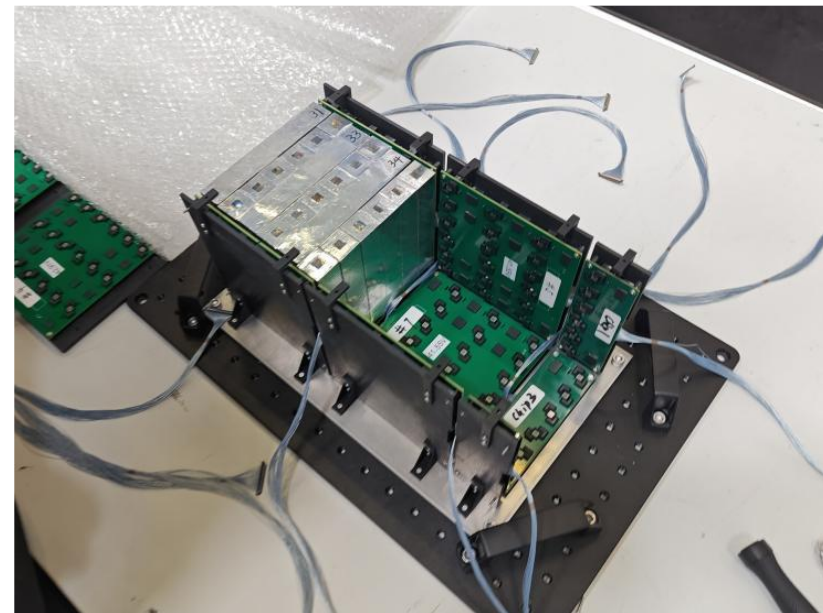
- **SiPM电路设计**：集成SiPM、温度传感器、及LED脉冲驱动电路(刻度)
- **前置放大器电路设计**：TI LMH6629跨阻放大器，带宽200MHz
- **样机模块2个**：各有36块BGO晶体，双端读出，共计144读出通道



SiPM 电路板



ASIC 读出板 (with FPGA)

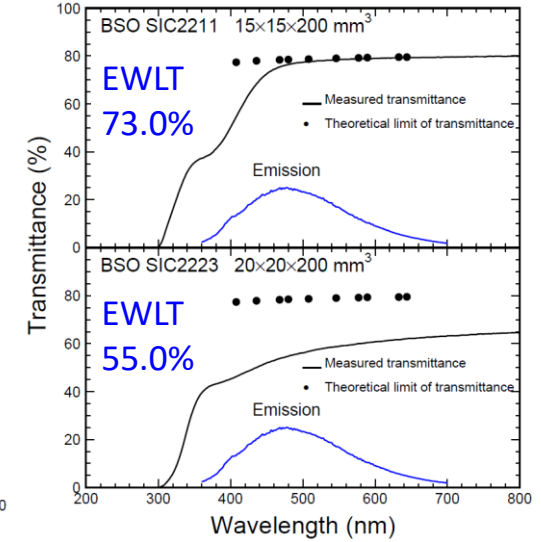
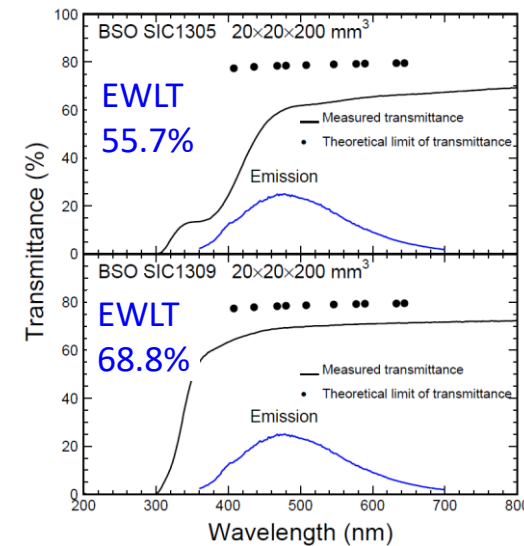
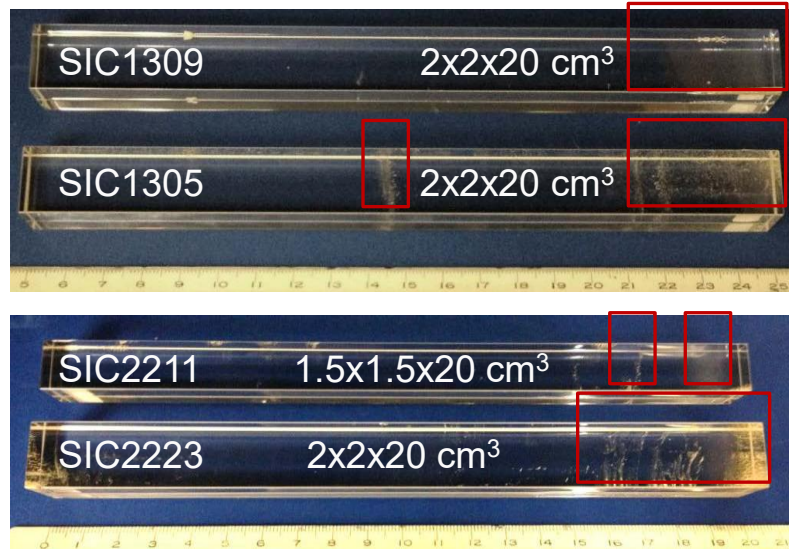


晶体量能器样机组装

研究进展三：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)
- ❑ **BSO瓶颈**：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；20cm 以上大尺寸的BSO晶体生长，当时被普遍认为不可行。

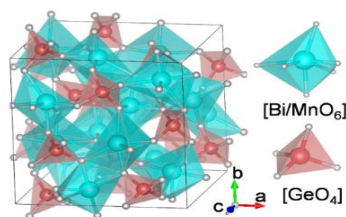
Parameters	Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (BGO)	Bi ₄ Si ₃ O ₁₂ (BSO)
ρ (g/cm ³)	7.13	6.8
λ _i (cm)	22.8	23.1
n @ λ _{max}	2.15	2.06
τ _{decay} (ns)	300	100
λ _{max} (nm)	480	470
Cut-off λ (nm)	310	300
Light Output (%)	100	20
Melting point (°C)	1050	1030
Raw Material Cost (%)	100	47



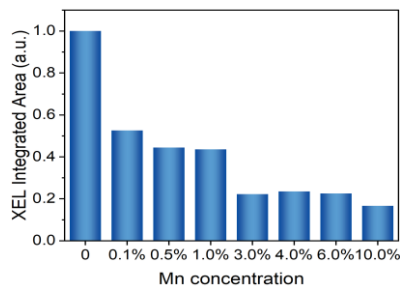
研究进展三：BGO晶体改性

■ BGO掺杂改性：Mn (锰) 掺杂

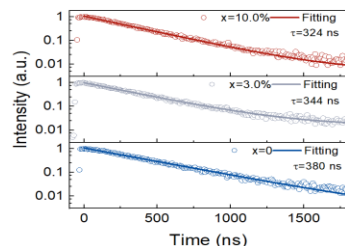
闪烁性能



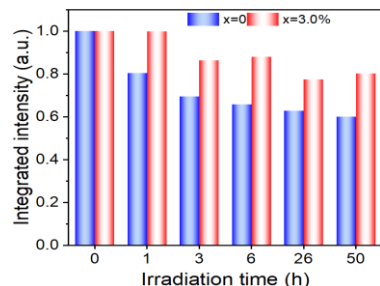
Mn掺杂占位



发光强度降低



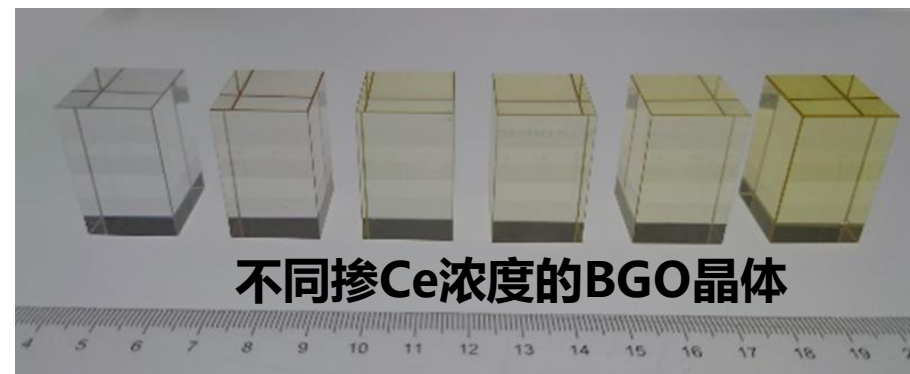
无慢成分引入



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

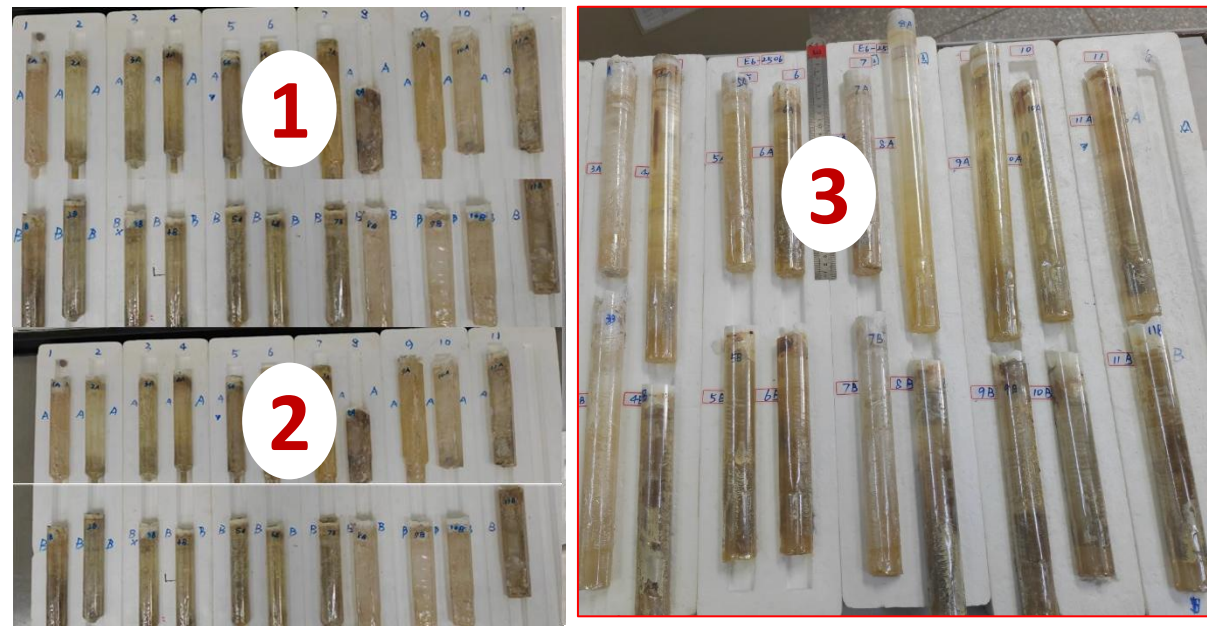
- **进展和成果：** 成功生长出Ce掺杂为0-5000ppm的高质量BGO晶体，Ce掺杂后
 - ✓ 光输出减少到 32.4%-10.2%
 - ✓ 衰减时间显著加快 318ns \rightarrow 113ns
 - ✓ 抗辐照性能提升，在10Mrad 伽马射线照射后，BGO:Ce掺杂的光输出为 ~60-70% vs 纯BGO晶体的光输出为 ~40%

研究进展三：新型BSO晶体研制

- ❑ 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
- ❑ 晶体生长尺寸从开始的7cm+到成功研制出当前**世界最长40cm+的BSO**大尺寸晶锭



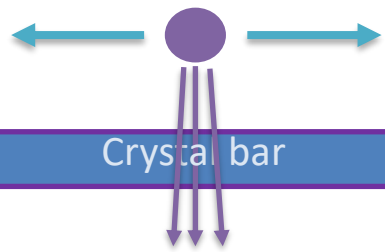
BSO晶体新制备路线



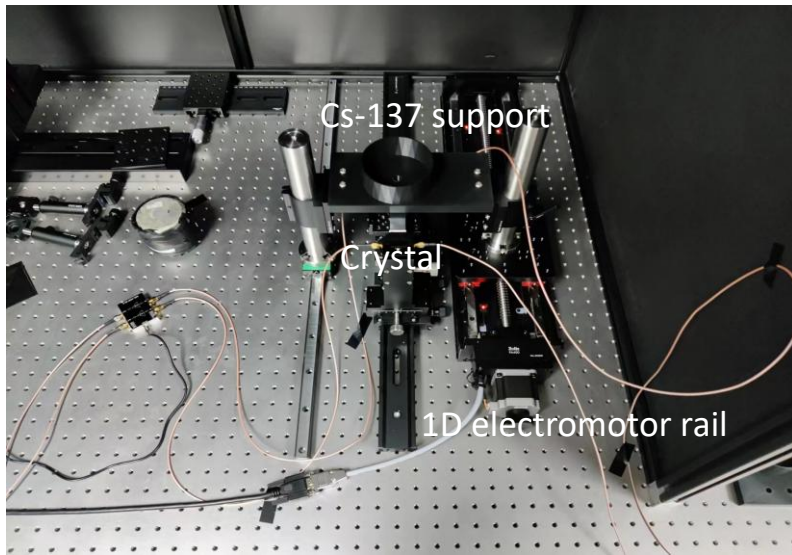
BSO晶体尺寸不断突破

研究成果三：晶体和硅光电倍增管性能测试

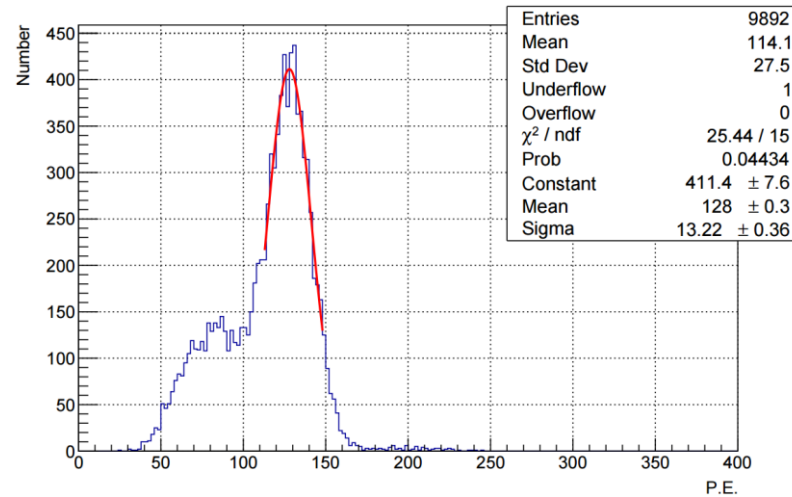
Cs-137 with ~ 8mm collimator



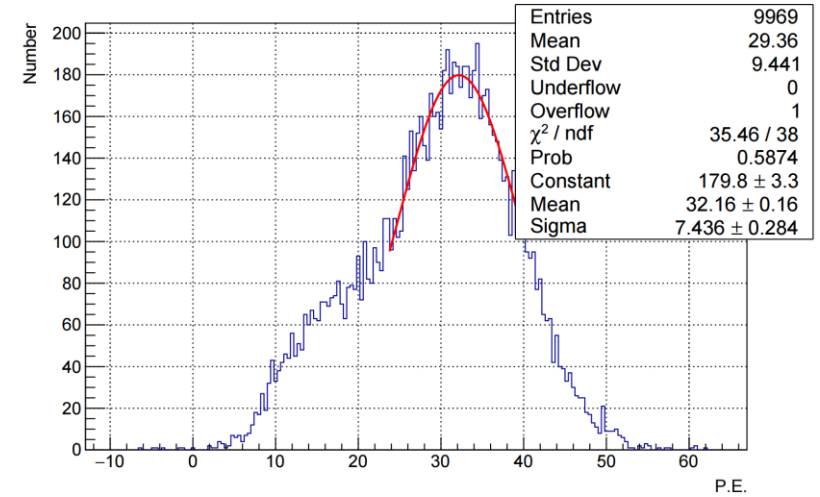
- **BGO vs BSO 晶体性能比较 (Cs-137, 宇宙线测试)**
- SiPM S13360-6025PE, NDL 20dB 前放, 5 GS/s 示波器
- 晶体用ESR, Al 包覆
- **晶体光产额: BSO/BGO ~ 1 / 4**
- **晶体衰减时间: BSO (~ 100ns) vs BGO (~ 300ns)**



40 cm BGO: 662 keV 光子

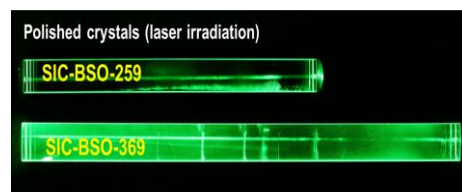
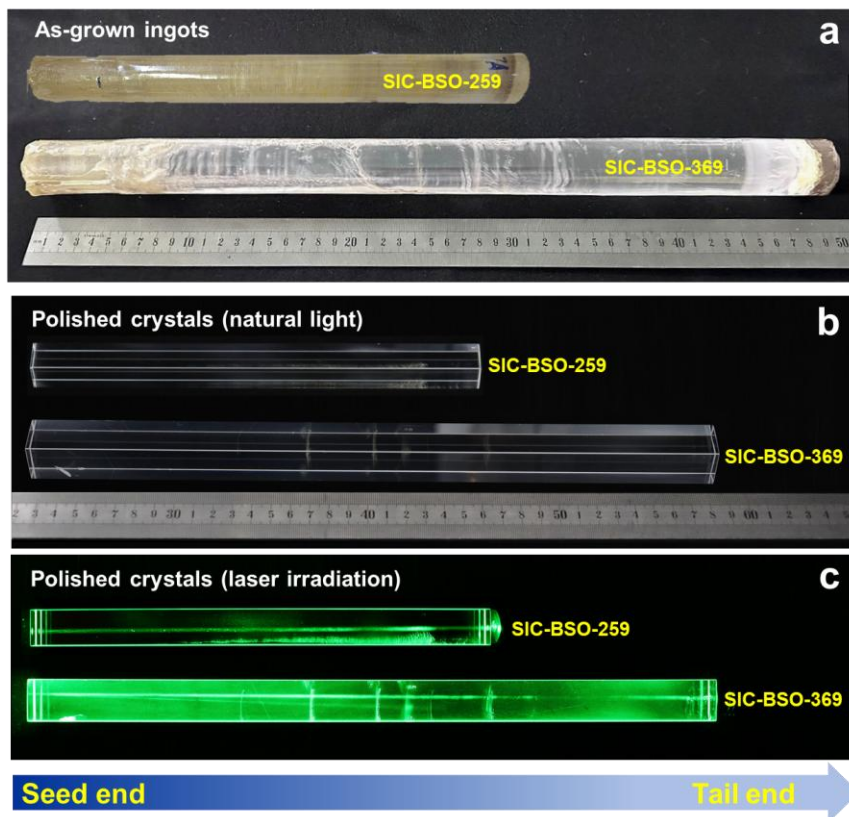


7 cm BSO : 662 keV 光子

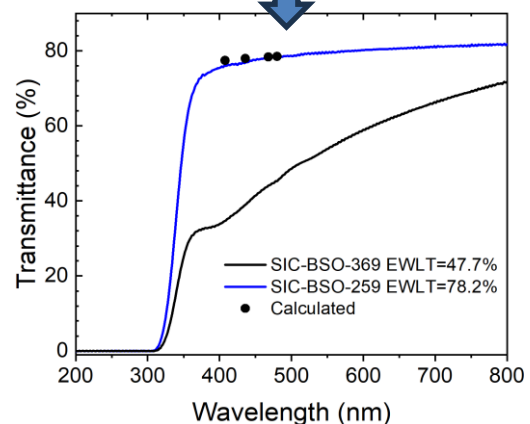


研究进展三：新型BSO晶体研制

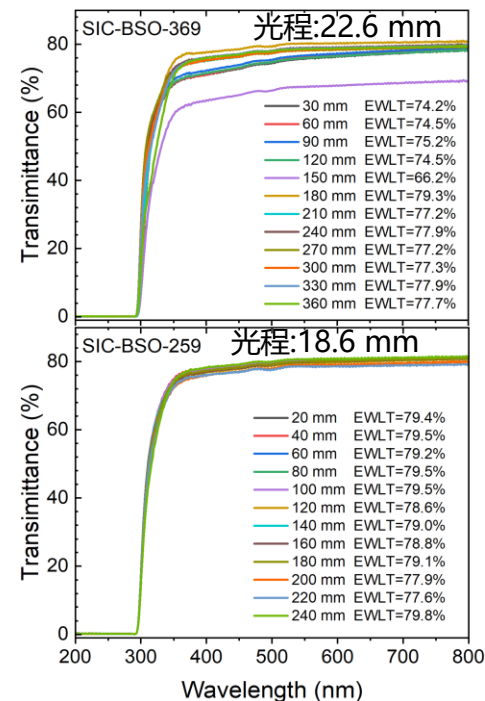
- 研制出迄今**世界最长的两根BSO晶体**——加工尺寸 $20 \times 20 \times 259 \text{ mm}^3$ (SIC-BSO-259) 和 $22 \times 22 \times 369 \text{ mm}^3$ (SIC-BSO-369)，光学透过率达 **80%**，接近理论透过率



SIC259:接近理论透过率



纵向透过率(LT)



横向透过率(TT)

- SIC-BSO-259: 78.32%@480nm(LT) ~80% in 350–800nm (uniform TT)
- SIC-BSO-369: 45.27%@480nm(LT) 60-79% in 350–800nm (TT)

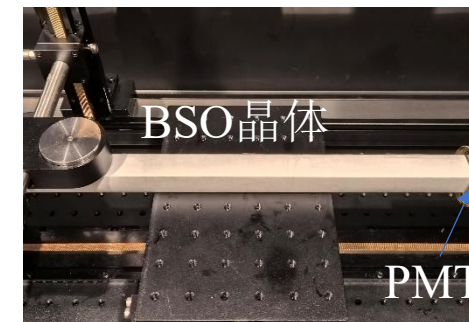
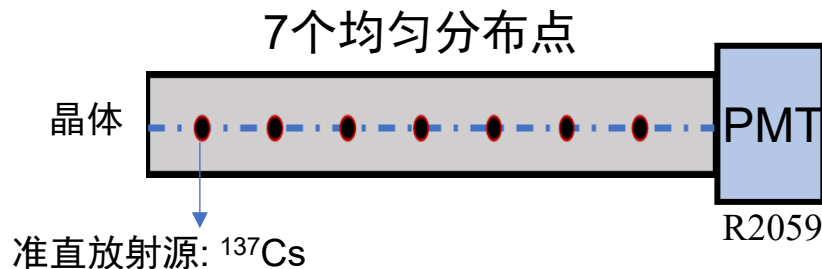
研究进展三：新型BSO晶体研制

- 通过选择合适的反射层、表面处理方式和耦合端，SIC-BSO-259和SIC-BSO-369实现最优 δ 值 $(-0.52 \pm 0.5)\%$ 和 $(1.41 \pm 1.8)\%$ ，显示极好的光响应均匀性，优于现有报导。

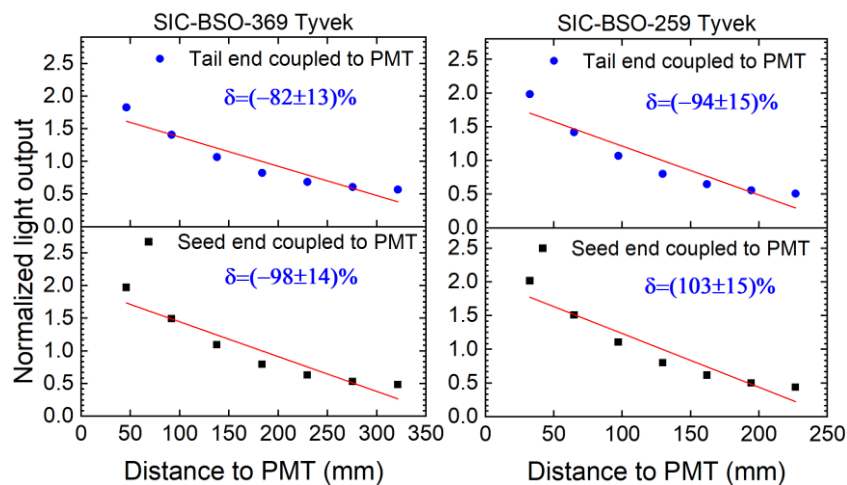
Calculation method of LRU:

$$\frac{LO}{LO_{ave}} = 1 + \delta \left(\frac{X}{X_{mid}} - 1 \right)$$

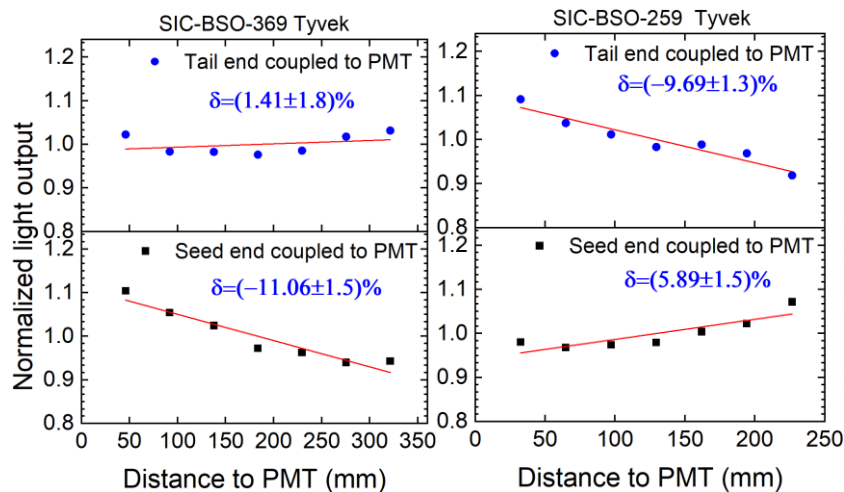
δ : the deviation of LRU.



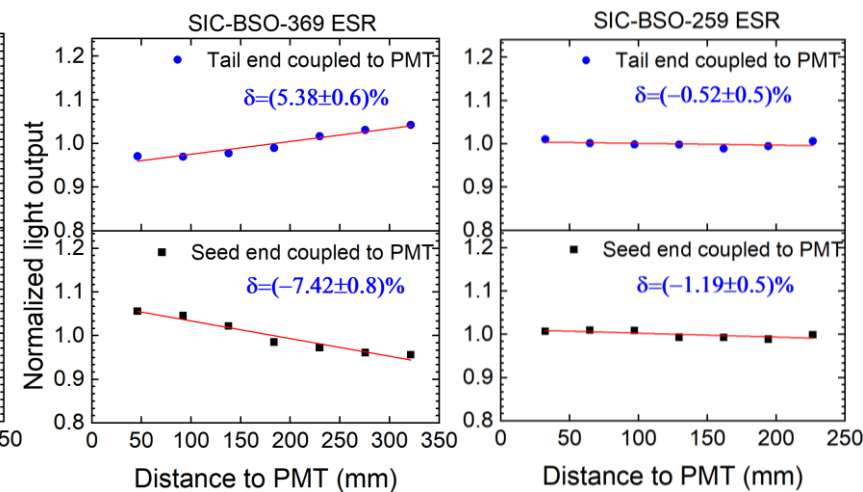
LRU of BSO: 四面磨砂



LRU of BSO: 全抛光



LRU of BSO: ESR反射层



团队成员和人才培养情况

- 研究团队：教工11人，博士后出站2人，博士生11人（毕业4），硕士生3人（毕业2），本科生1人
 - 上海交通大学：杨海军(教授)，陈纪元（硕士毕业），朱春祥，赵芷钰（博士生），熊钰杰，杨瑞
 - 高能物理研究所：刘勇，李刚（研究员），郭方毅（博后出站，CERN Fellow），Jack Rolph（博士后），齐宝华（博士毕业），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，王马超（博士毕业），武彤（博士毕业），许家炜（硕士毕业），张晶，左致平（博士生）
 - 中国科学技术大学：张云龙（教授），王震（博后出站，新凯莱），石禹坤（博士毕业，巴黎综合理工），刁洪滨，李想（博士生）



杨海军



李刚



刘勇



陈俊锋



张云龙

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 万元，间接经费 52.32 万元
- 2025年拨款161.28 万元（占 32%）
 - 其中直接经费 126.4万元，间接经费34.88 万元
- 截止2026年5月，课题总支出 290.16 万元，执行率 57.57%
 - 直接费用支出 231.2 万元，执行率 58.53%
 - 间接经费支出 58.96 万元，执行率 54.09%

论文和报告

- 发表7篇论文 (2篇JINST, 2篇IEEE TNS, 2篇CGD) , 4篇会议论文
- 会议报告 41个, 其中大会和邀请报告11个, 分会报告30个, 另外海报10个

作者 (全部作者)	通讯作者	论文题目	杂志名称	卷号	开始页码
M. Deng, Y. Liang, Y. Shi, J. Wang, J. Chen* and Q. Liu*	陈俊锋	Ultraviolet photoluminescent materials from traditional ion-activated phosphors to emerging carbon dots and perovskite	Materials Science and Engineering: R: Reports	159	100803
Z. Huang, J. Zhang, S. Zou, M. Yuan, J. Xu, X. Wang, et al.	Junfeng Chen	Scintillation and timing performance of a 3 at% yttrium-doped barium fluoride crystal	Journal of Instrumentation	20	P04017
Tong Wu, Xiaoyi Zuo, Shaohan Wang, Jing Zhang, Yun Shi,* Yiwen Tang,* and Junfeng*	Junfeng Chen	Enhanced Core-Valence Luminescence in Ultrafast Cs ₂ ZnCl ₄ Scintillation Crystals via Bandgap Engineering	Crystal Growth & Design	25	9395
J. Xu, J. Zheng, X. Li, J. Zhang, M. Deng, C. Peng, S. Sun, Y. Du, Y. Shi, F. Yang, J. Chen	Junfeng Chen	Influence of Yttrium Concentration on Scintillation Performance of Heavily Y-Doped Barium Fluoride Crystals	IEEE Transactions on Nuclear Science	72	2000
Mingxue Deng,* Lei Chen, Xiang Li, Xuejun Qi, Shaohan Wang, and Junfeng Chen*	Junfeng Chen	Mn ²⁺ -Induced Robust Radiation Hardness in Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ for NextGeneration High-Energy Physical Colliders	Crystal Growth & Design	25	1477
Baohua Qi, Yong Liu, Huangchao Shi, Danqi Wang, Zhiyu Zhao and Hongbo Zhu	Yong Liu	Lab and beam tests of a SiPM-readout ASIC with a large dynamic range	Journal of Instrumentation	20	P05024
B. Qi, X. Xia, D. Du, S. Li, Y. Liu*, B. Lu, H. Shi, Z. Zhao and H. Zhu	Yong Liu	Characterisation studies of two front-end electronics chips for SiPM-based detectors	Proceedings of Science	476	1135
F. Guo*, B. Qi, Z. Zhao, Y. Zhang, W. Song, L. Wu, S. Sun and Y. Liu	Fangyi Guo	Development of a Novel Crystal Electromagnetic Calorimeter and Particle Flow Algorithm for Future Lepton Collider Experiments	Proceedings of Science	476	1070
Baohua Qi, Fangyi Guo, Yong Liu and Zhiyu Zhao	Yong Liu	Studies on Dynamic Range of SiPMs with High Pixel Densities	EPJ Web Conf.	320	61
Baohua Qi, Fangyi Guo, Yong Liu and Zhiyu Zhao	Yong Liu	Development of a novel high granularity crystal electromagnetic calorimeter	EPJ Web Conf.	320	12
Mingxue Deng, Wenpeng Li, Jian Zhang, Xuejun Qi, Lei Chen, Yun Li, Haihong Ni, Junfeng Chen, Dong Wang	Junfeng Chen	Scintillation Properties of Large BSO Crystals for Future High-Energy Physics Experiments	IEEE Transactions on Nuclear Science	73	1535

论文和报告

■ 学术报告（国内外报告40余次，其中11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)
- TOPAC研讨会, 成都, Sept. 2024 (H. Yang)
- 23rd Int. Conference on Few-Body Problems, 北京, Sept. 2024 (H. Yang)
- DRD6 合作者会议, 法国巴黎, April, 2025 (Y. Liu)
- 2025 CEPC Int. Workshop, 巴塞罗那, June, 2025 (H. Yang, J. Rolph)
- DRD-Calo 合作组会议, 意大利安科纳, Sept, 2025 (Y. Liu)
- 2025 CEPC 会议, 广州, Nov. 2025 (2 talks, BH.Qi, ZY. Zhao)
- 2026 HKUST IAS Fundamental Physics, 香港, Jan. 2026 (H. Yang)
- CEPC Int. Workshop, 葡萄牙里斯本, April, 2026 (Y. Liu)

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
- 模拟电磁量能器能量分辨率和线性度指标满足课题考核指标
- 亮点研究成果：
 - 设计了CEPC高粒度晶体量能器，开发出量能器重建算法，成功用于CEPCSW和性能分析
 - 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，大尺寸BSO晶体生长取得突破，创造新记录 (>40cm)
 - 利用CERN 高能 π^- 束流对长条晶体 (40cm vs 60cm) 的性能进行测试
- 课题将按照计划开展研究，
 - 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；
 - 研制和组装晶体量能器样机，开展性能测试研究等

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 中期进展报告

课题负责人：杨海军 (上海交大/李所)

2026年5月18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%）

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

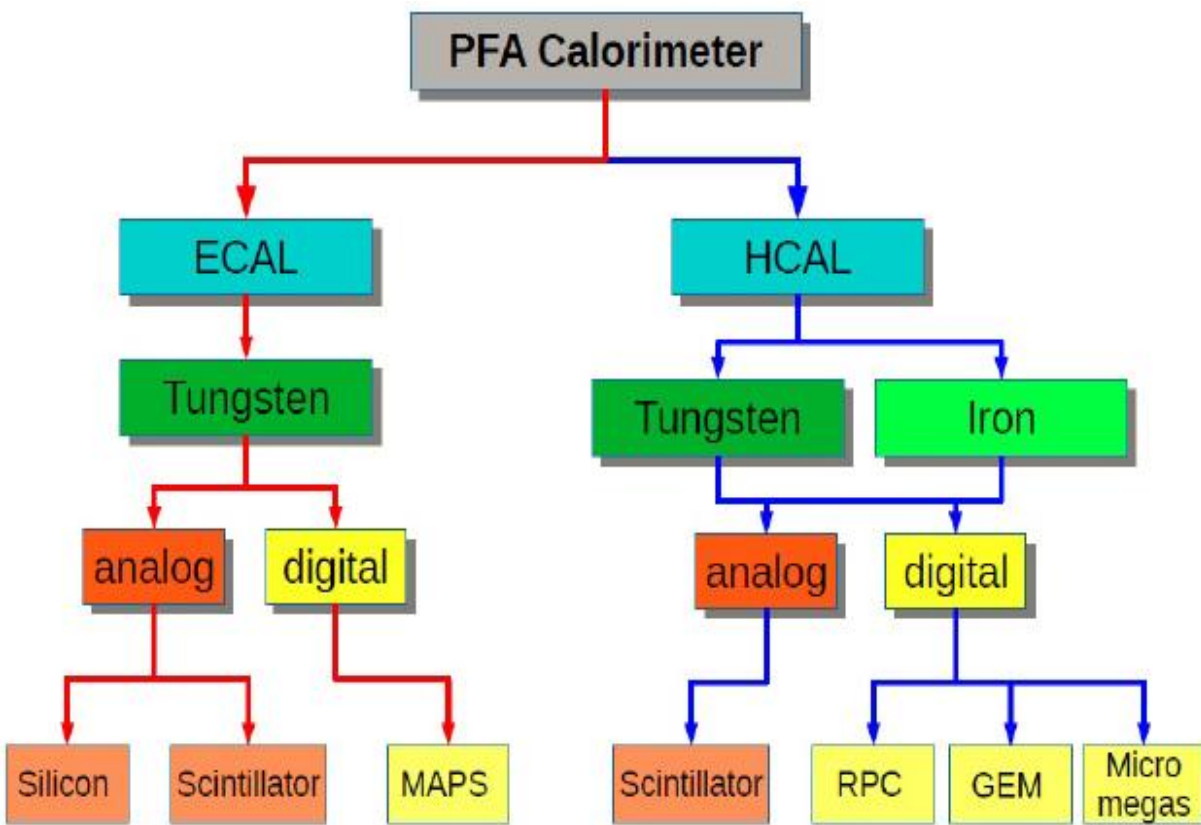
[课题三：全吸收型电磁量能器 · Indico of IHEP \(Indico\)](https://indico.ihep.ac.cn/category/1090/)
<https://indico.ihep.ac.cn/category/1090/>

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)

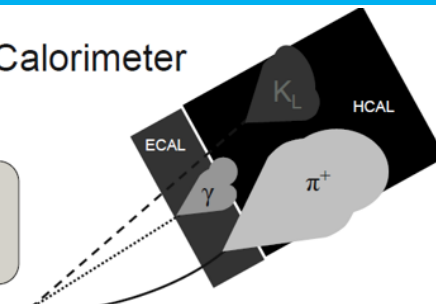
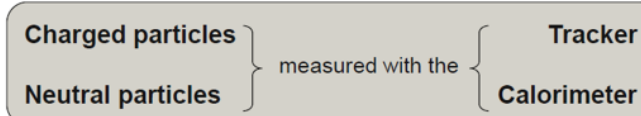
课题背景介绍

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

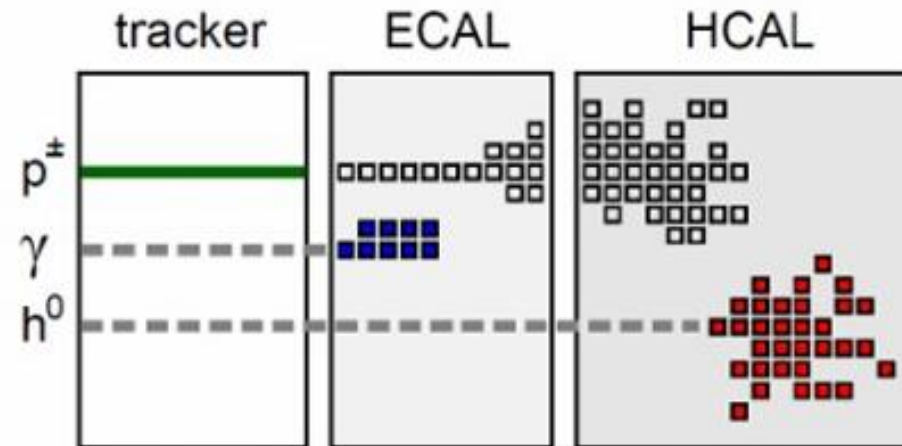
The idea...



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

} 18%/√E

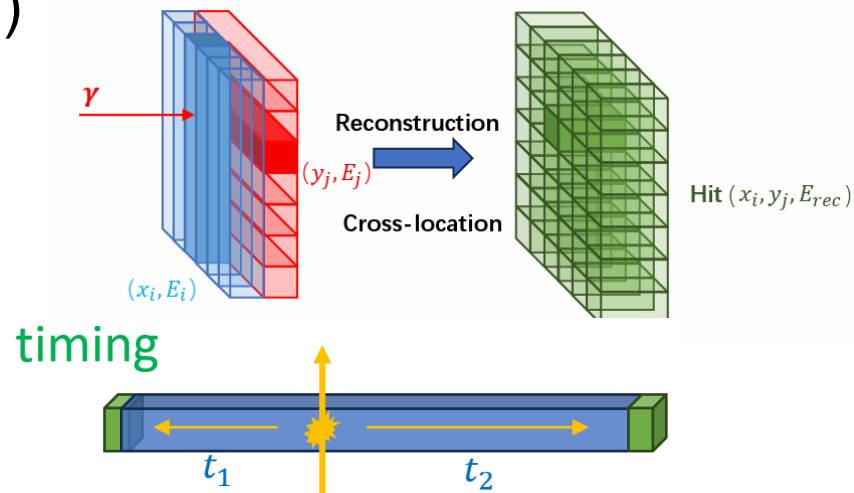
Particle Flow



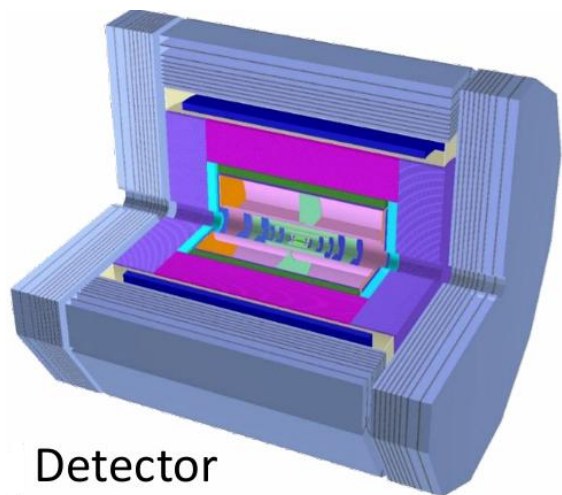
晶体量能器：总体设计

■ 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

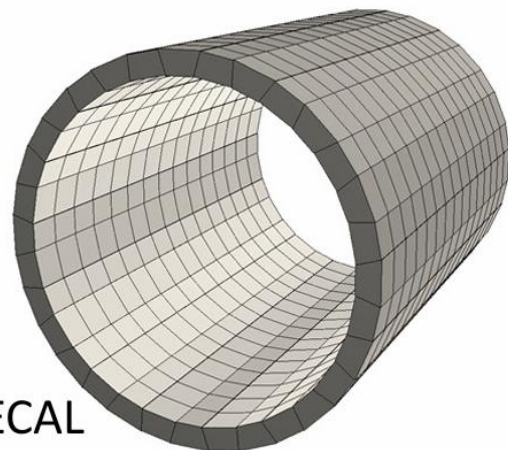
- 取样型 → 全吸收型，显著提升电磁能量分辨 $3\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$
- 采用长条晶体 → 大幅减少电子学读出通道
- 长条晶体正交密排 → 提高颗粒度 ($1\times 1\times 2\text{ cm}^3$)
- 晶体两端读出 → 提高电磁簇射的时间响应和位置分辨
- 晶体与SiPM相结合 → 结构小巧紧凑



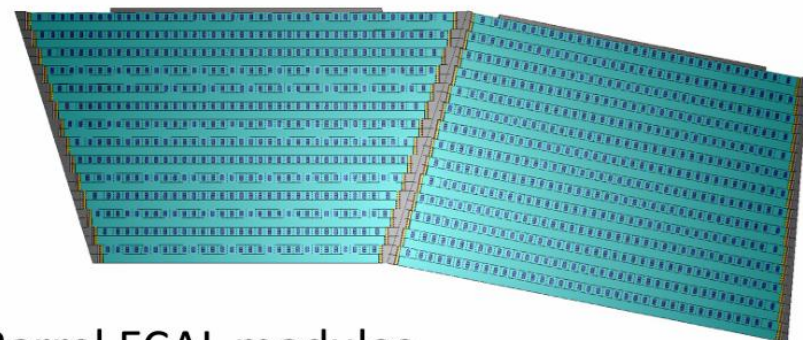
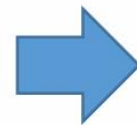
晶体ECAL模块设计(桶部)



Detector



Barrel ECAL



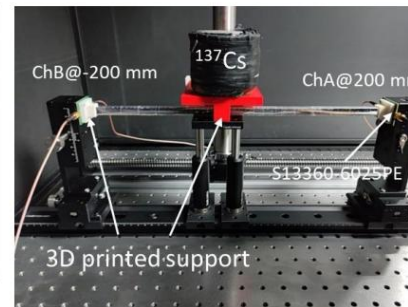
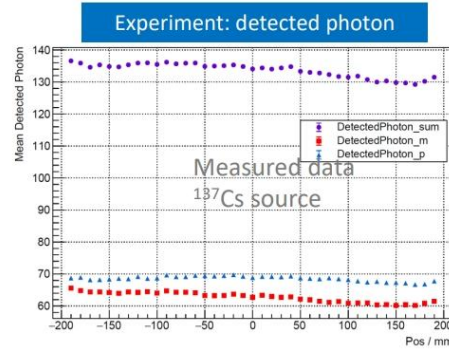
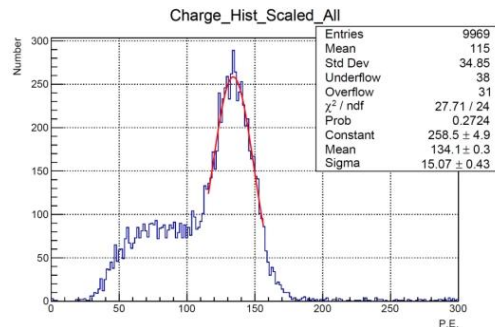
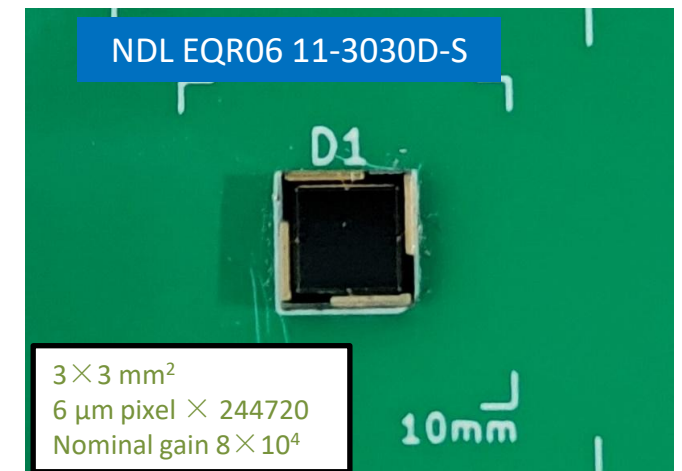
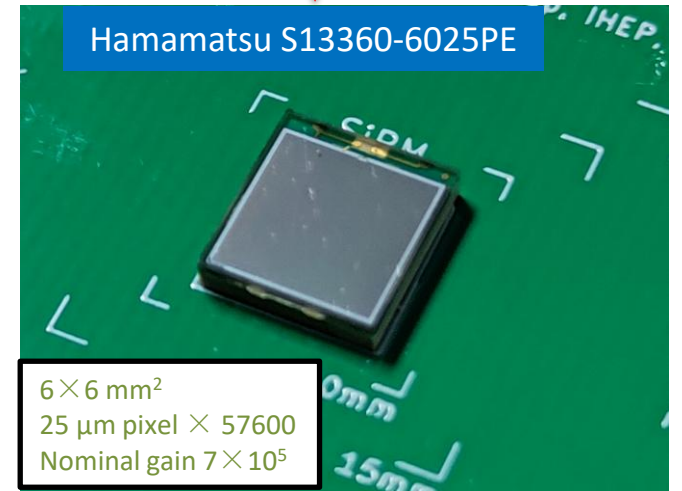
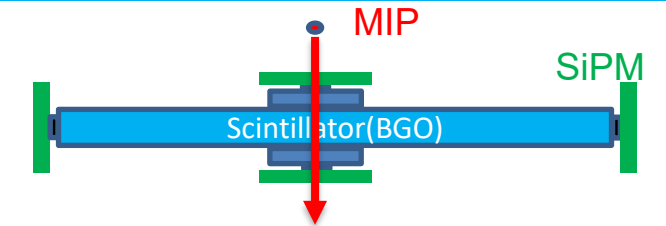
Barrel ECAL modules

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

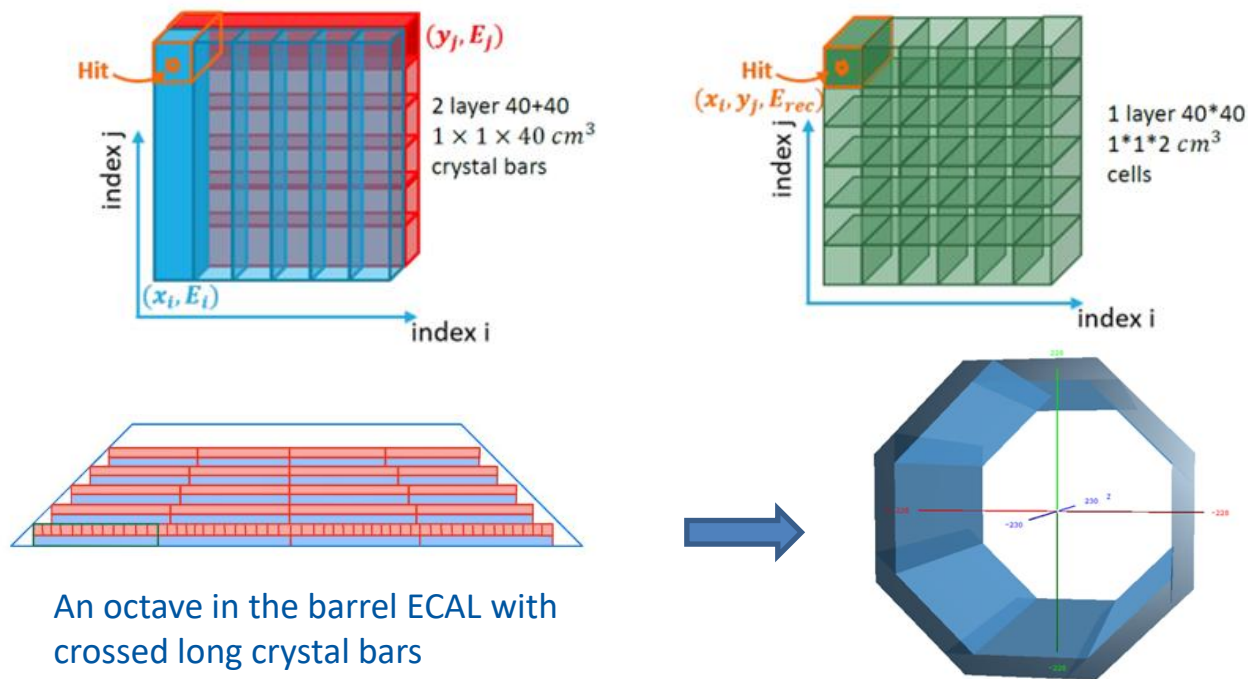
- 完整的桶部几何描述：DD4HEP
- 径向 28 层，正交密排，辐射长度 $\sim 24 \times 0$
- 单根晶体尺寸： $1 \times 1 \times 40 \text{ cm}^3$

• 重建算法：CyberPFA

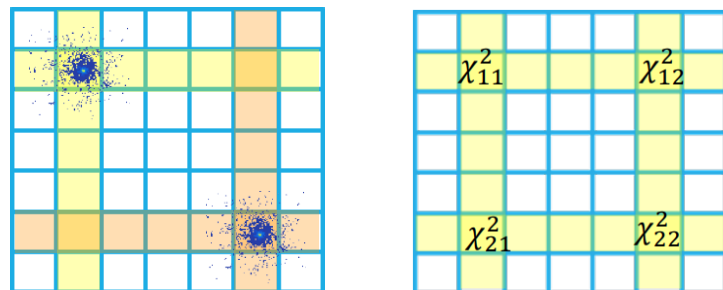
- 颗粒度： $1 \times 1 \times 2 \text{ cm}^3$
- 利用多层hits信息有效排除 ghost hits

• 主要挑战

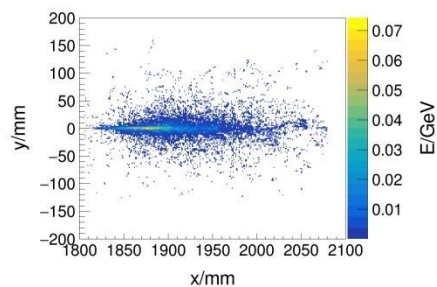
- 能量沉积 Cluster 的模式识别
- 能量沉积 Cluster 与带电径迹的匹配



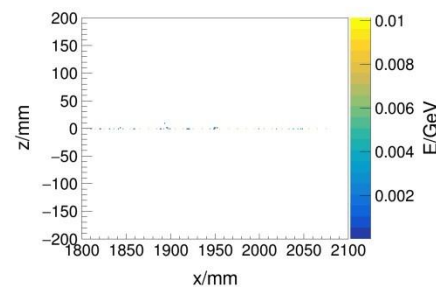
An octave in the barrel ECAL with crossed long crystal bars



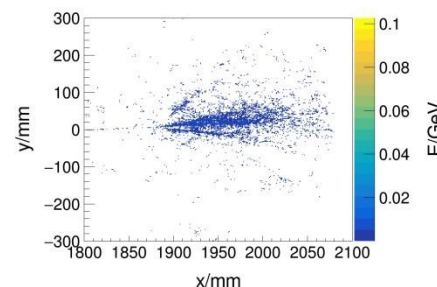
Remove ghost hits



EM cluster



MIP cluster

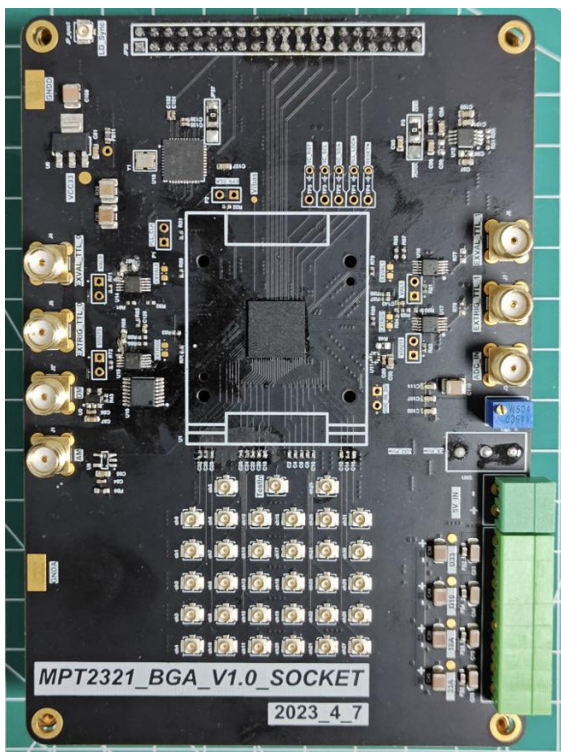


Hadronic cluster

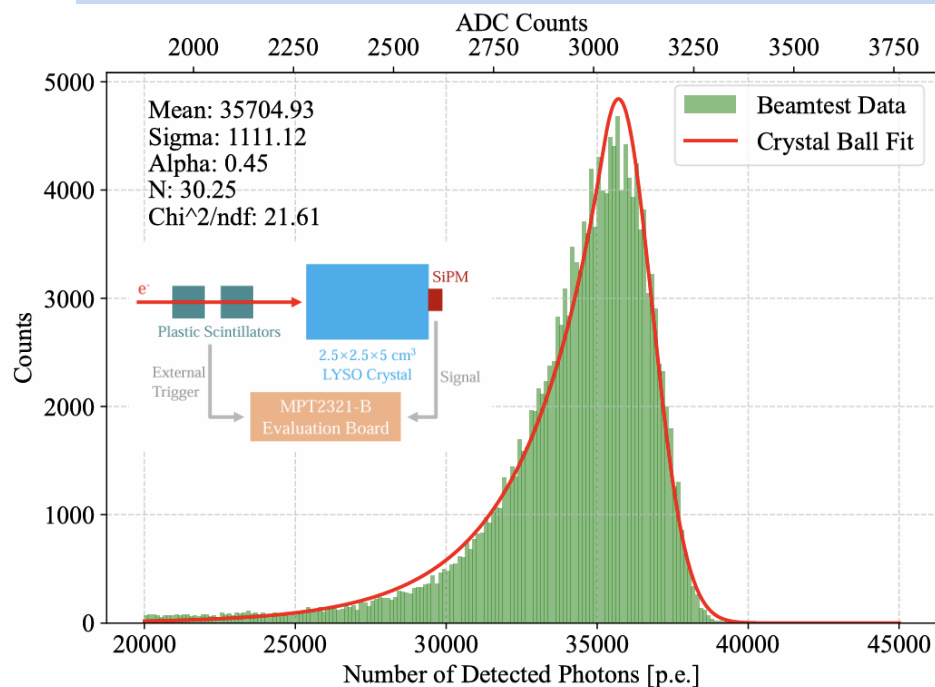
研究进展二：读出电子学测试

JINST 20 P05024

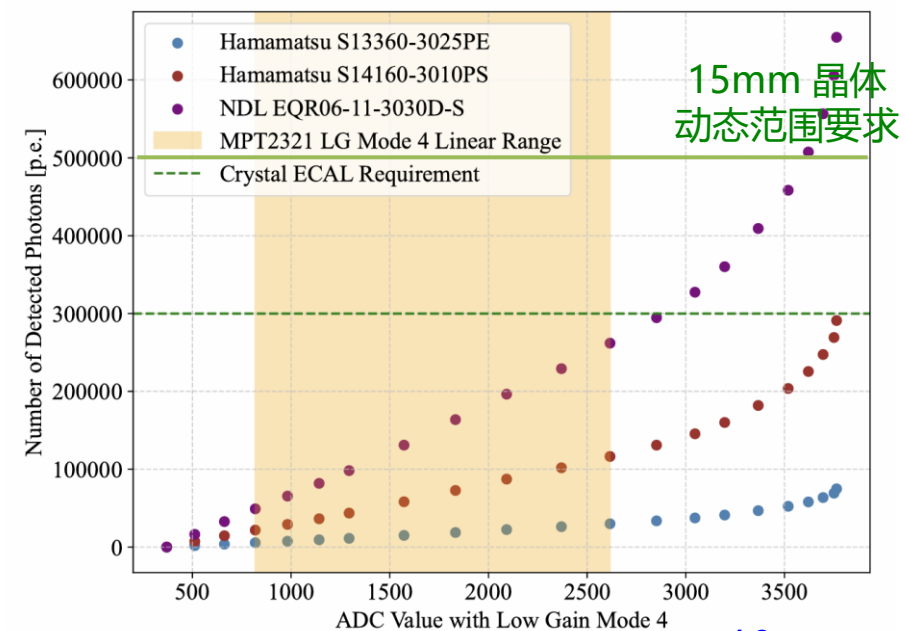
- 宇称MPT2321：用于SiPM读出的大动态范围ASIC
- 线性区最高可至3.35nC，可覆盖晶体量能器（15mm晶体）动态范围的60%。
对非线性区做刻度，可进一步增大动态范围



5GeV电子束流测试 (LYSO晶体+SiPM)



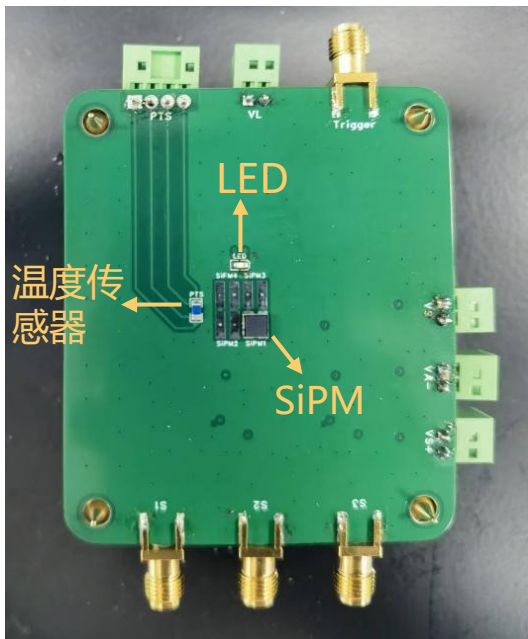
低增益模式动态范围



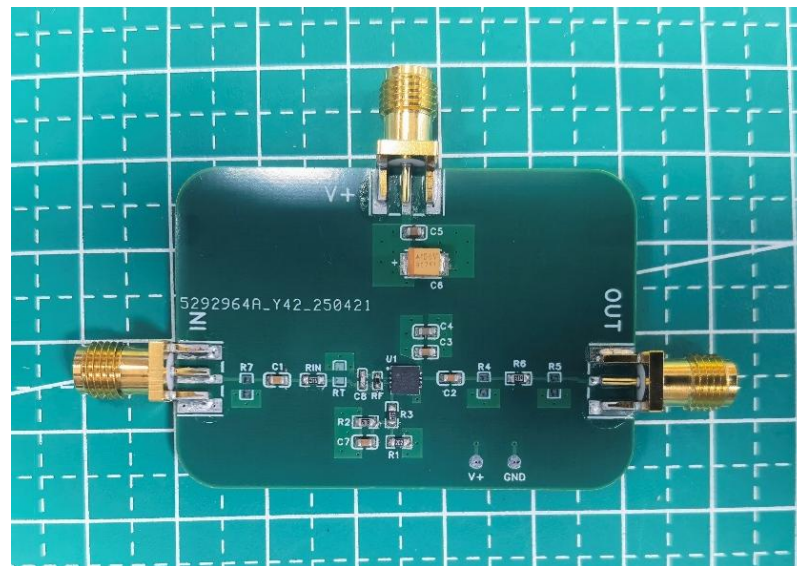
研究进展二：探测单元前端电路设计

- **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

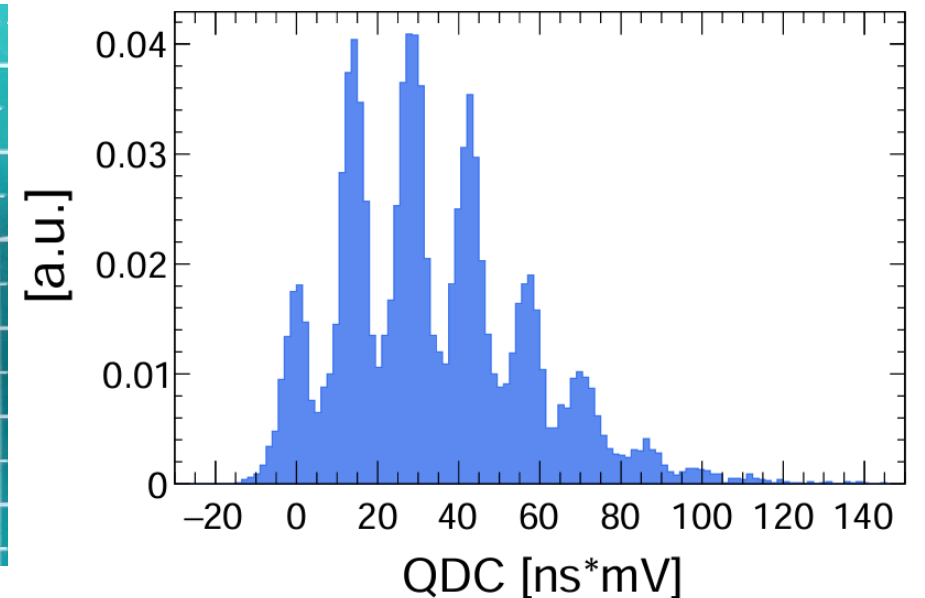
SiPM电路板



前放电路板



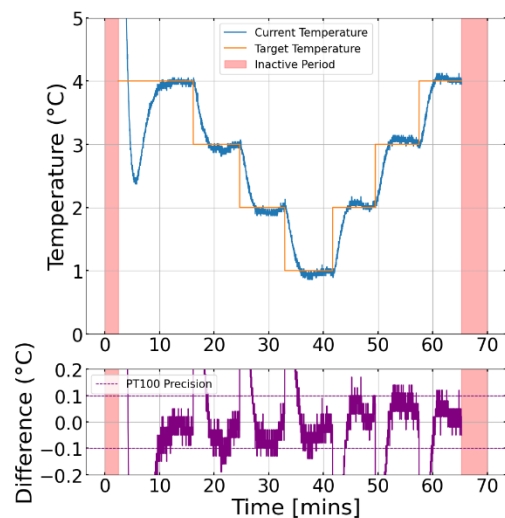
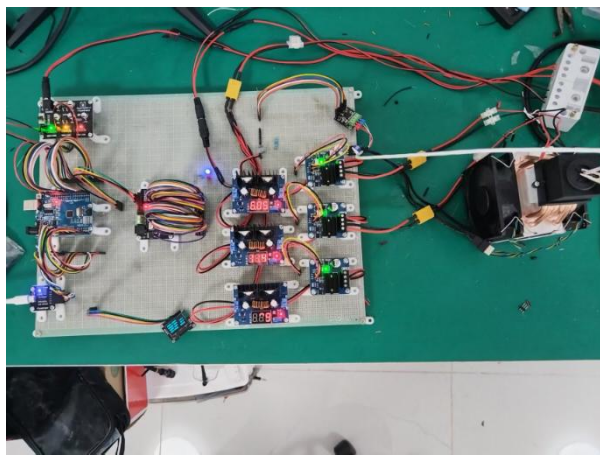
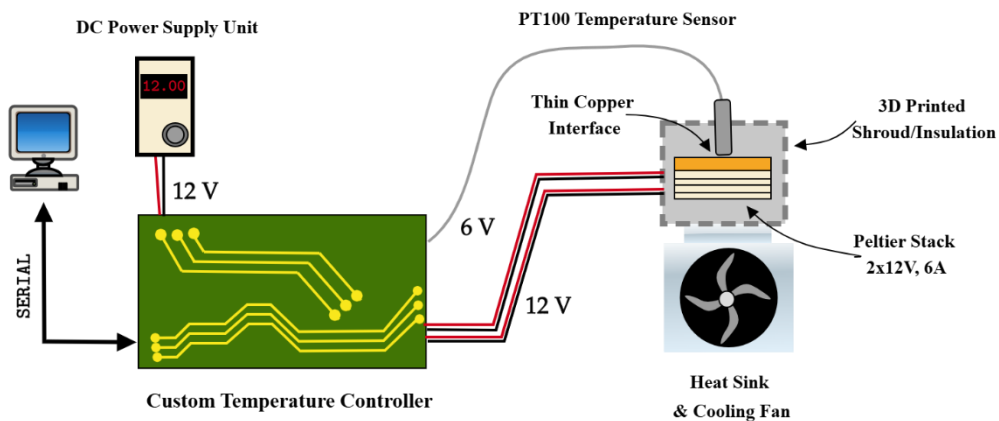
利用前端电路板对SiPM做单光子刻度



研究进展二：探测器冷却系统设计

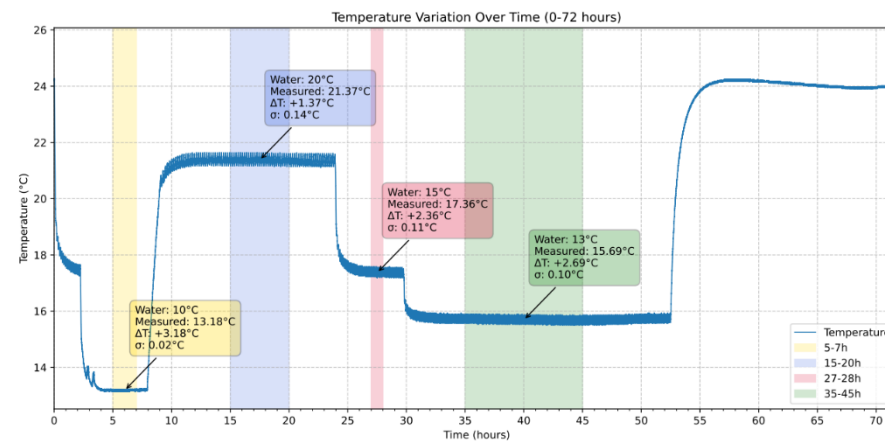
■ 基于半导体制冷片和单片机的温度自动控制系统

— 用于SiPM或晶体的单元测试



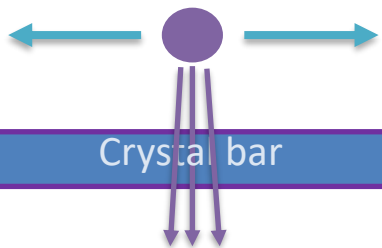
■ 基于水冷机和风扇的散热系统

— 用于晶体量能器样机散热

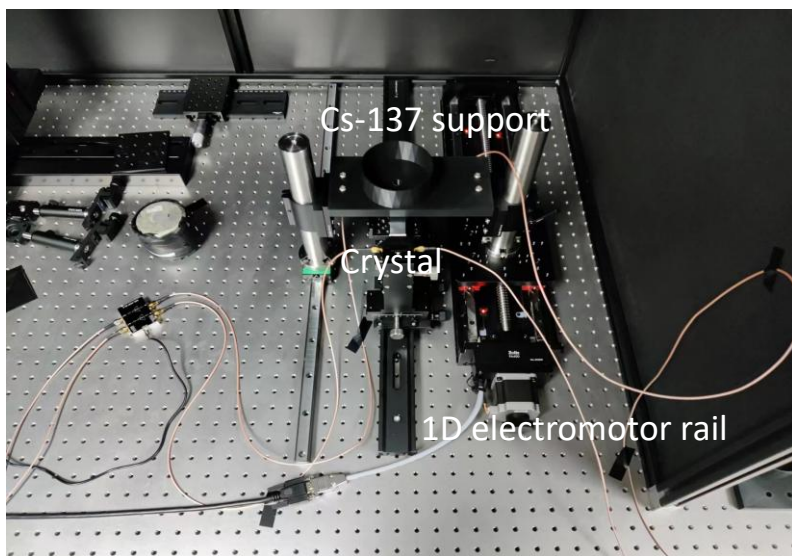


研究进展三：晶体性能测试

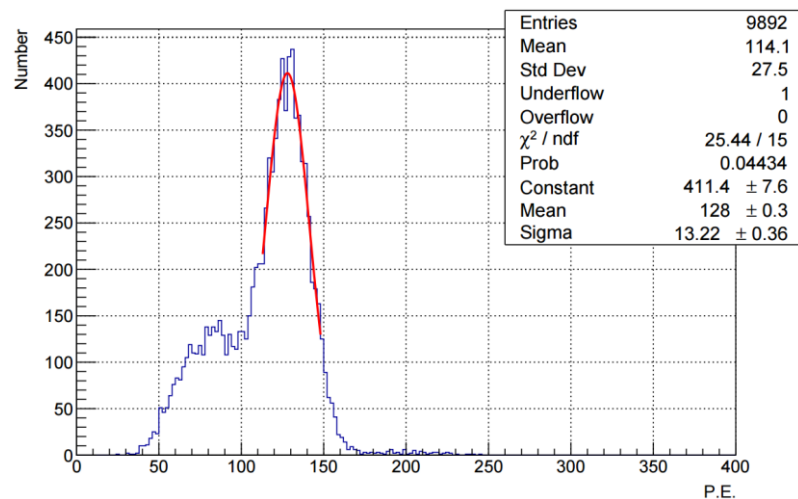
Cs-137 with ~ 8mm collimator



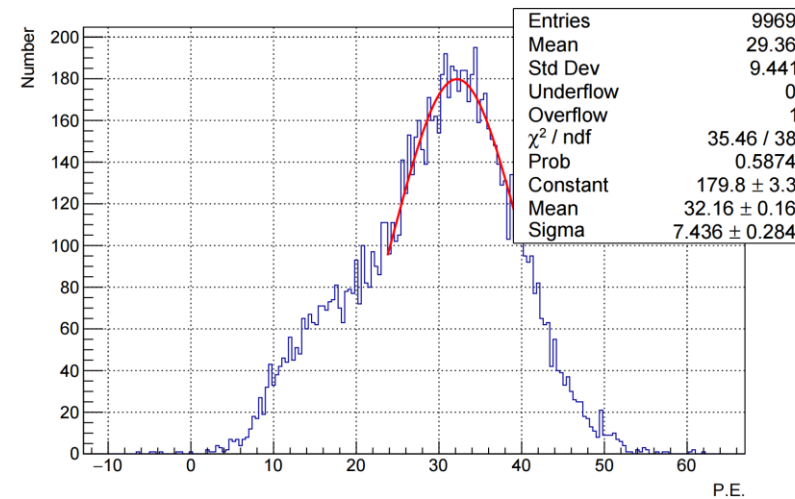
- **BGO vs BSO 晶体性能比较 (Cs-137放射源测试)**
- SiPM S13360-6025PE, NDL 20dB 前放, 5 GS/s 示波器
- 晶体用ESR, 铝包覆
- **晶体光产额: BSO/BGO ~ 1 / 4**
- **晶体衰减时间: BSO (~ 100ns) vs BGO (~ 300ns)**



40 cm BGO: 662 keV 光子

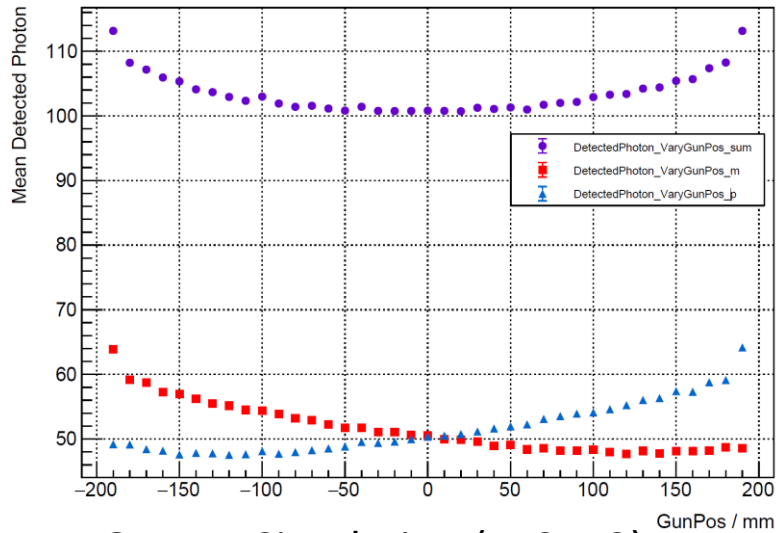


7 cm BSO : 662 keV 光子



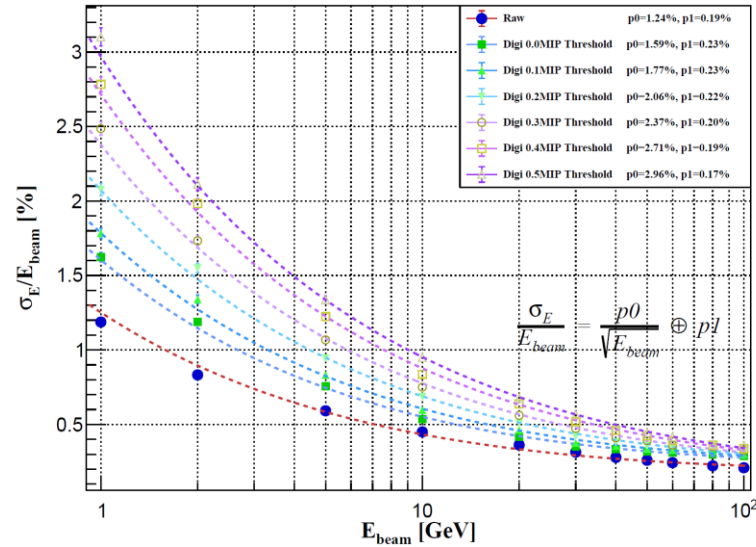
课题研究基础：模拟结果

DetectedPhoton_VaryGunPos

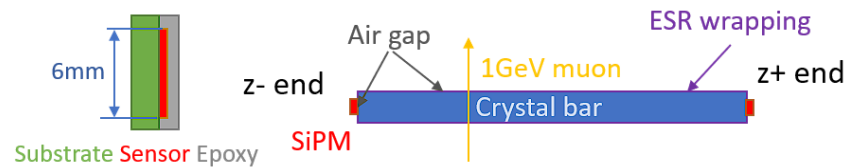
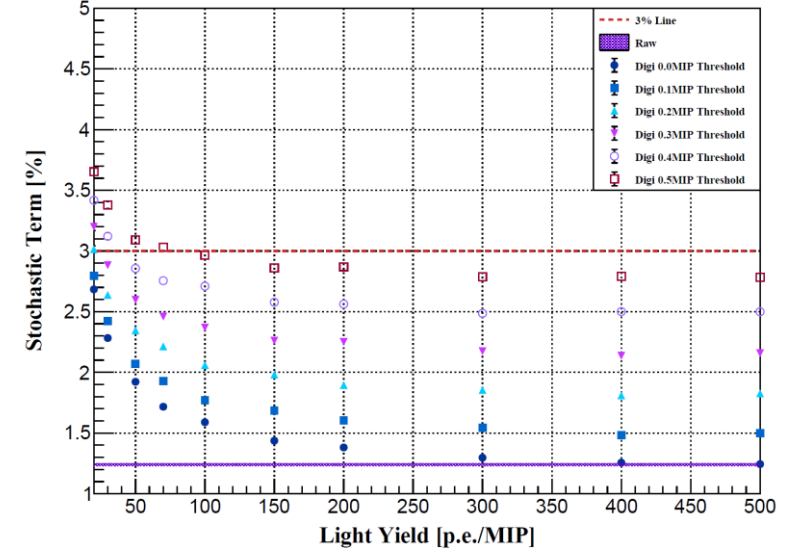


Geant4 Simulation (v10.7.3)

Energy Resolution 100p.e./MIP



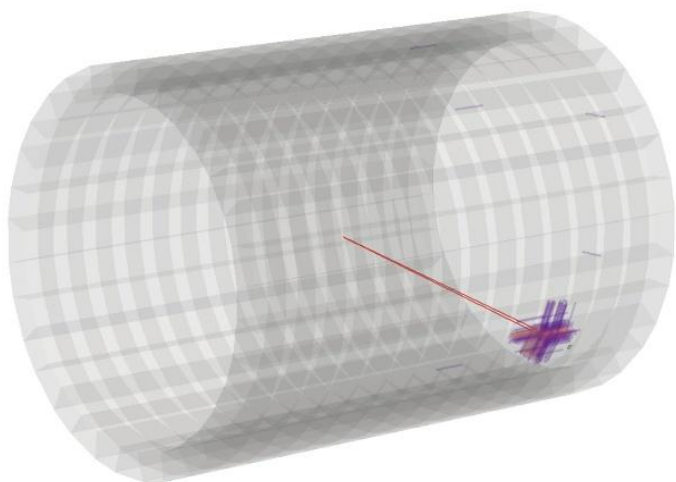
Light Yield vs Stochastic Term



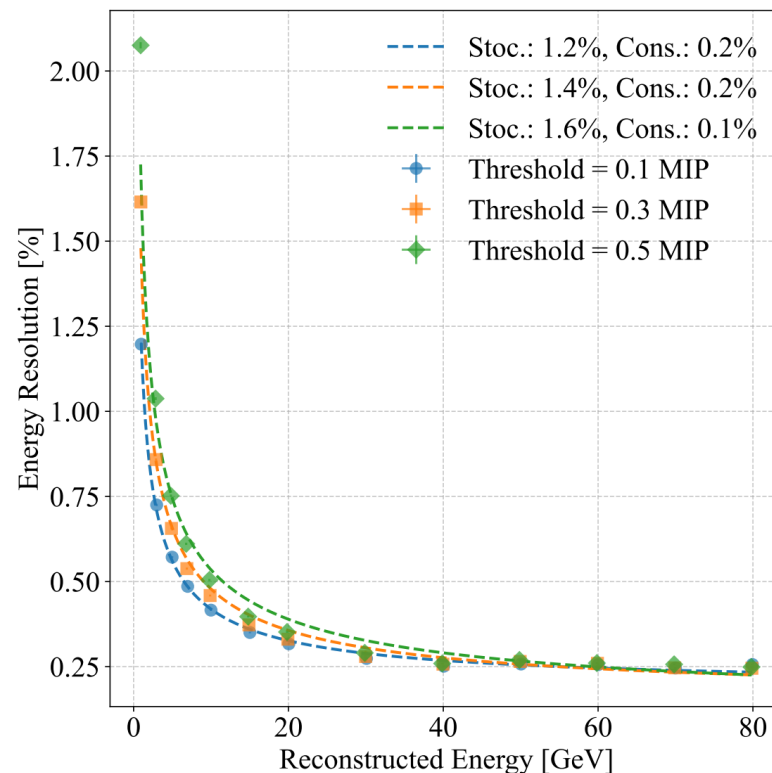
Key Parameters	Value	Notes
MIP light yield	~200 p.e./MIP	8.9 MeV/MIP in 1cm BGO
Energy threshold	0.1 MIP	Depends on S/N and light yield
Crystal non-uniformity	<1%	Calibration precision
Dynamic range	1 – 1.7 × 10 ⁵ p.e.	Up to 15GeV per crystal bar
Time resolution	~400 ps @ 1-MIP	Ideal performance from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

晶体量能器性能模拟

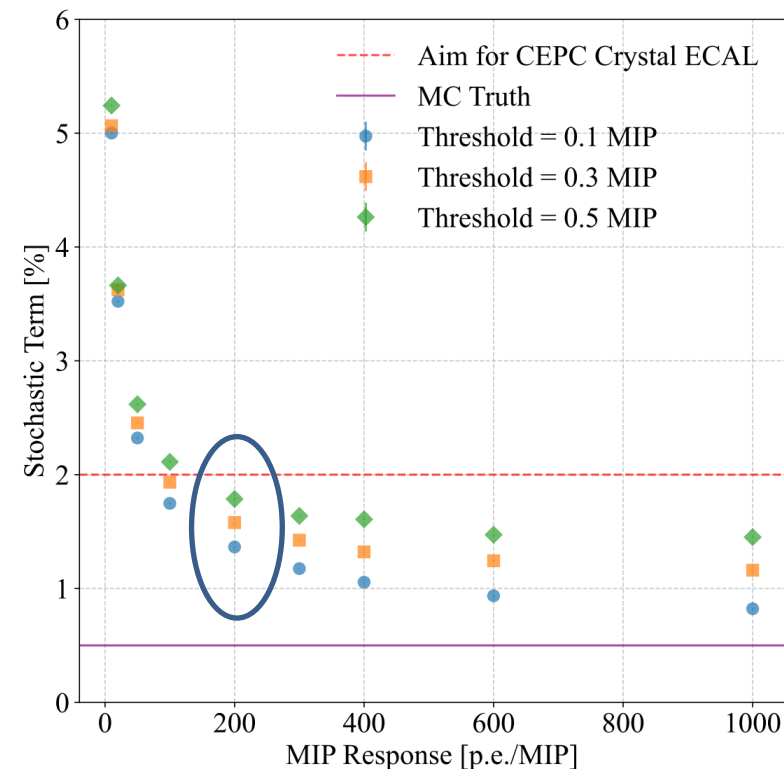
- 在 **0.1 MIP** 阈值下，当晶体单元的有效光产额在 **200 p.e./MIP** 以上时，晶体量能器的能量分辨率可控制在 **$2\%/\sqrt{E}$** 以内。



晶体量能器能量分辨率

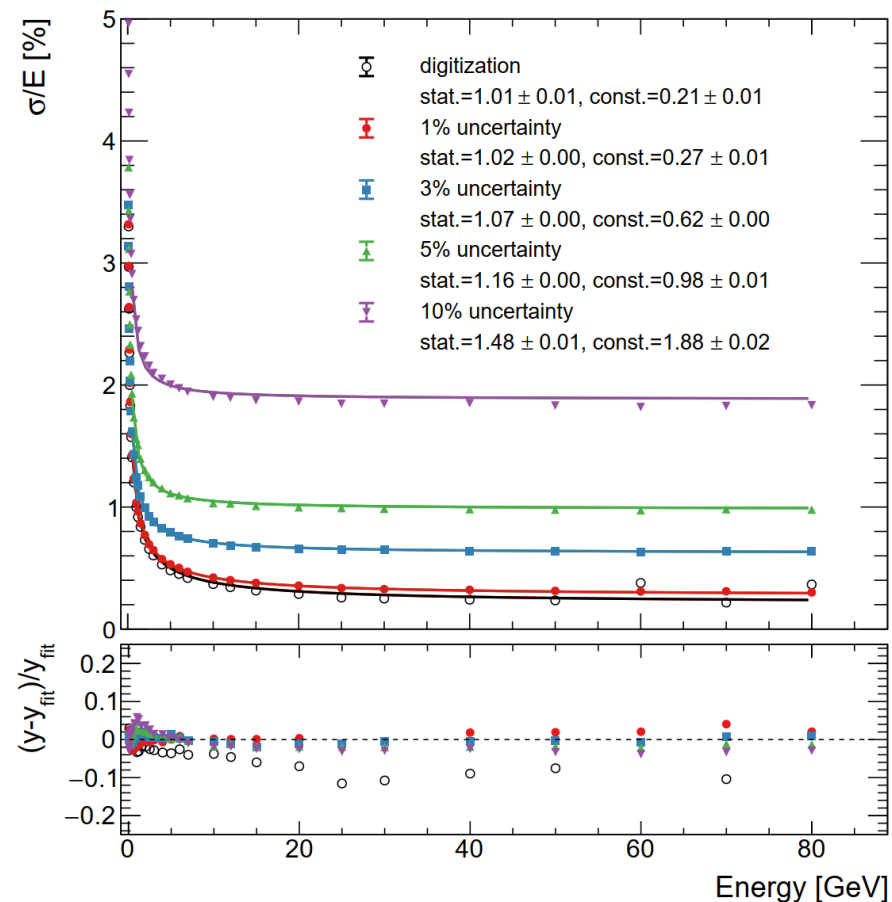
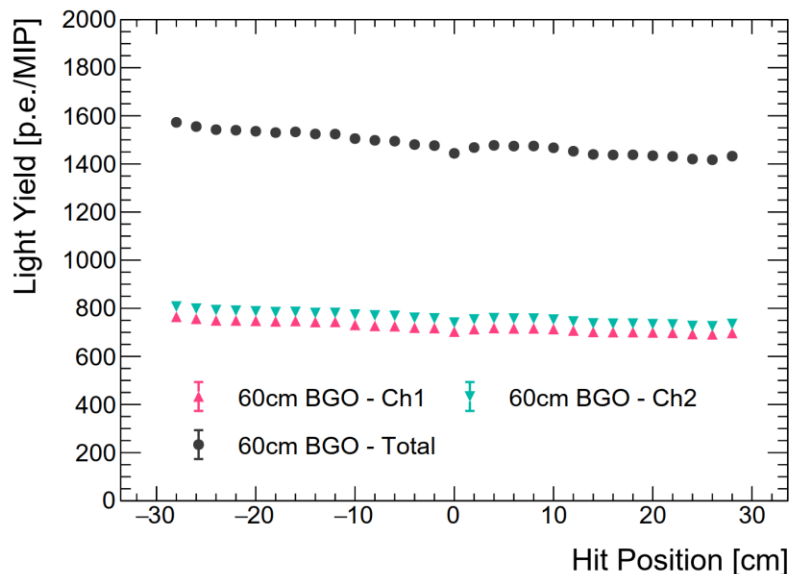
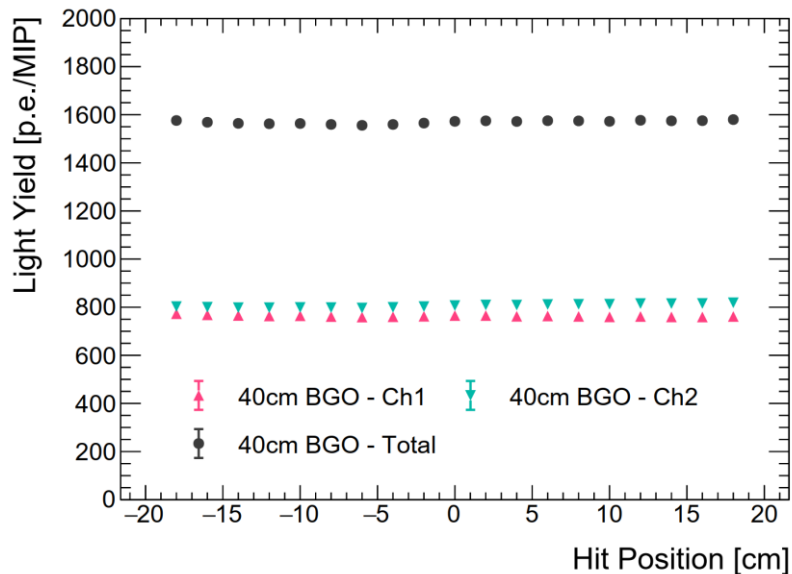


分辨率统计项随MIP光产额变化



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

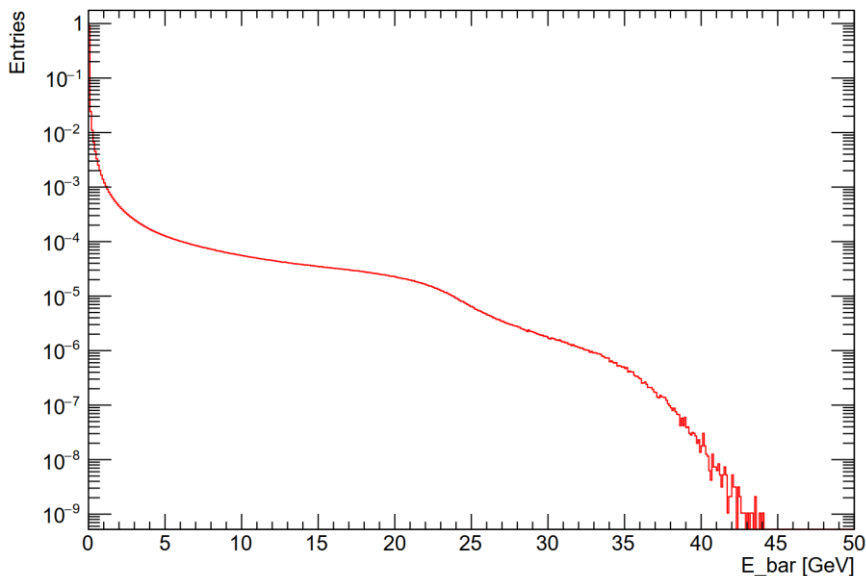
60cm BGO: $\frac{Max-Min}{Mean} = 10.5\%$, $\frac{StdDev}{Mean} = 3.0\%$

总能量分辨率随单元测量精度的变化

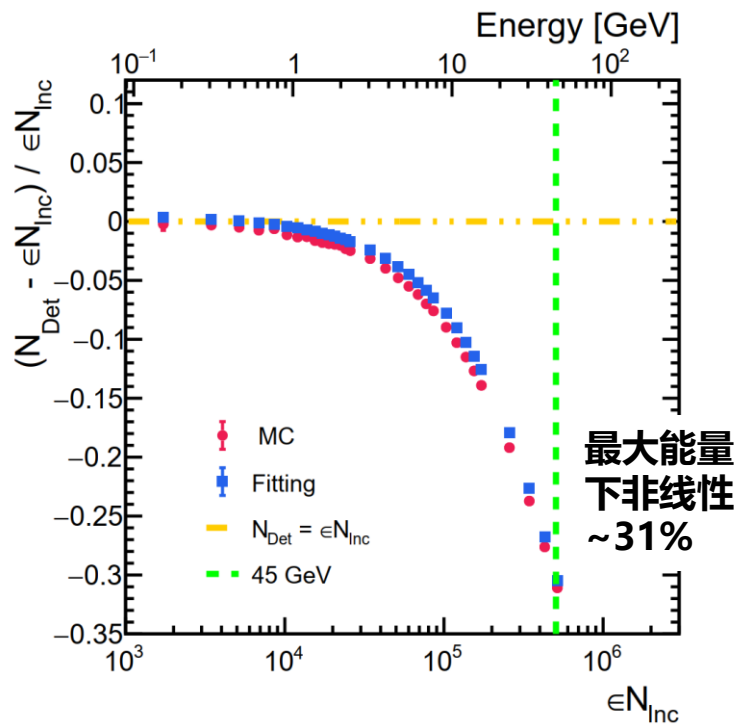
硅光电倍增器非线性模拟

- 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%

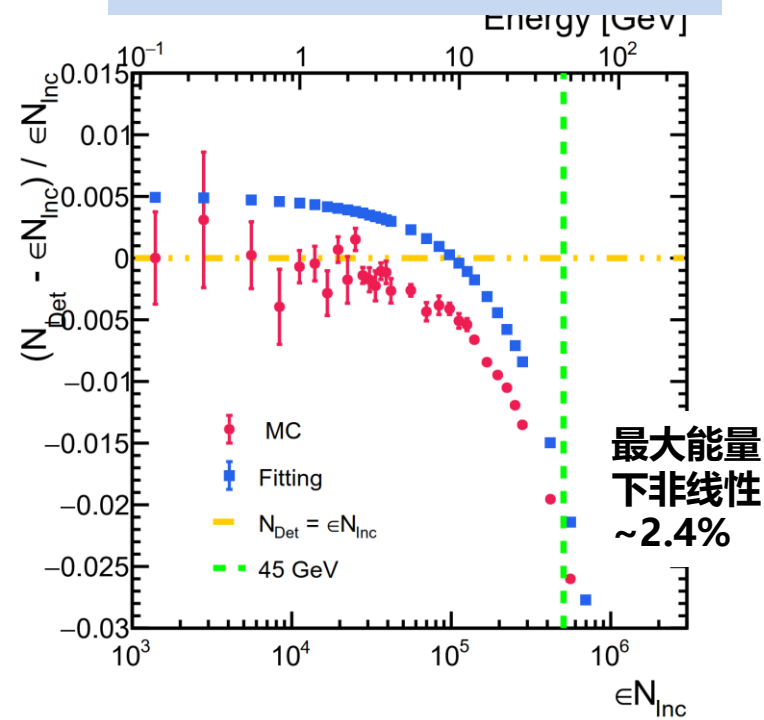
量能器中晶体单元吸收能量范围，
最大~45GeV



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

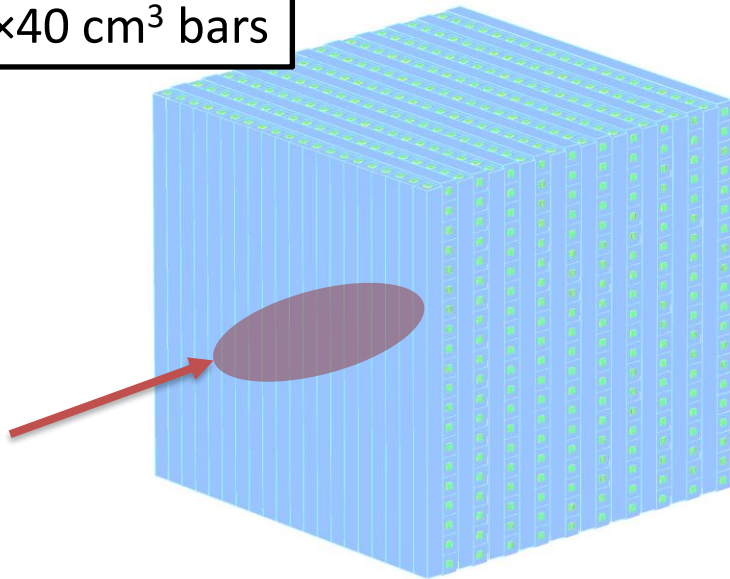


晶体电磁量能器模块：模拟与优化

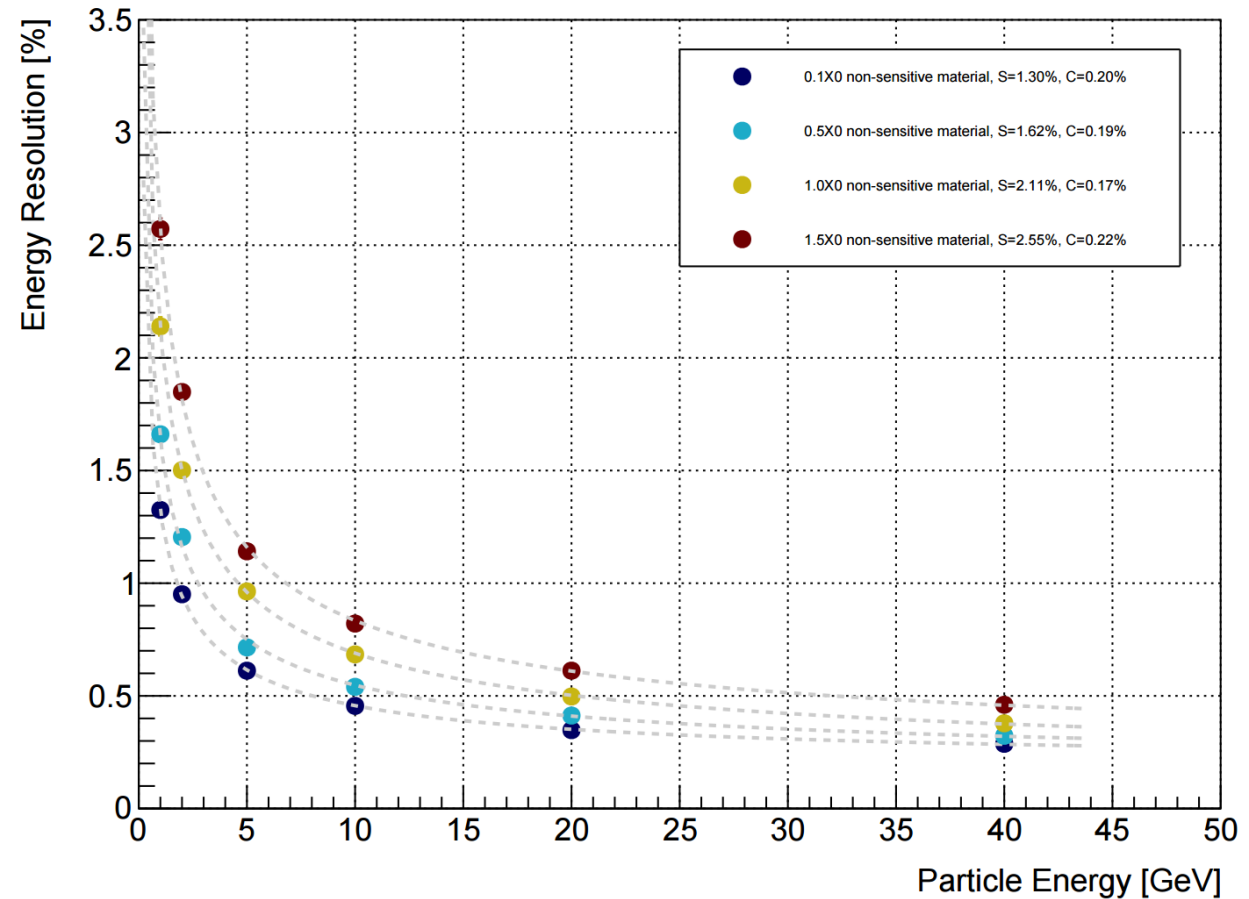
■ BGO 晶体量能器模块 ($40 \times 40 \times 27 \text{ cm}^3$) 的能量分辨率

- 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 $1.5X_0$, $\sigma/E = 2.6\%/\sqrt{E} \oplus 0.2\%$

1x1x40 cm³ bars



能量分辨率 vs 死物质

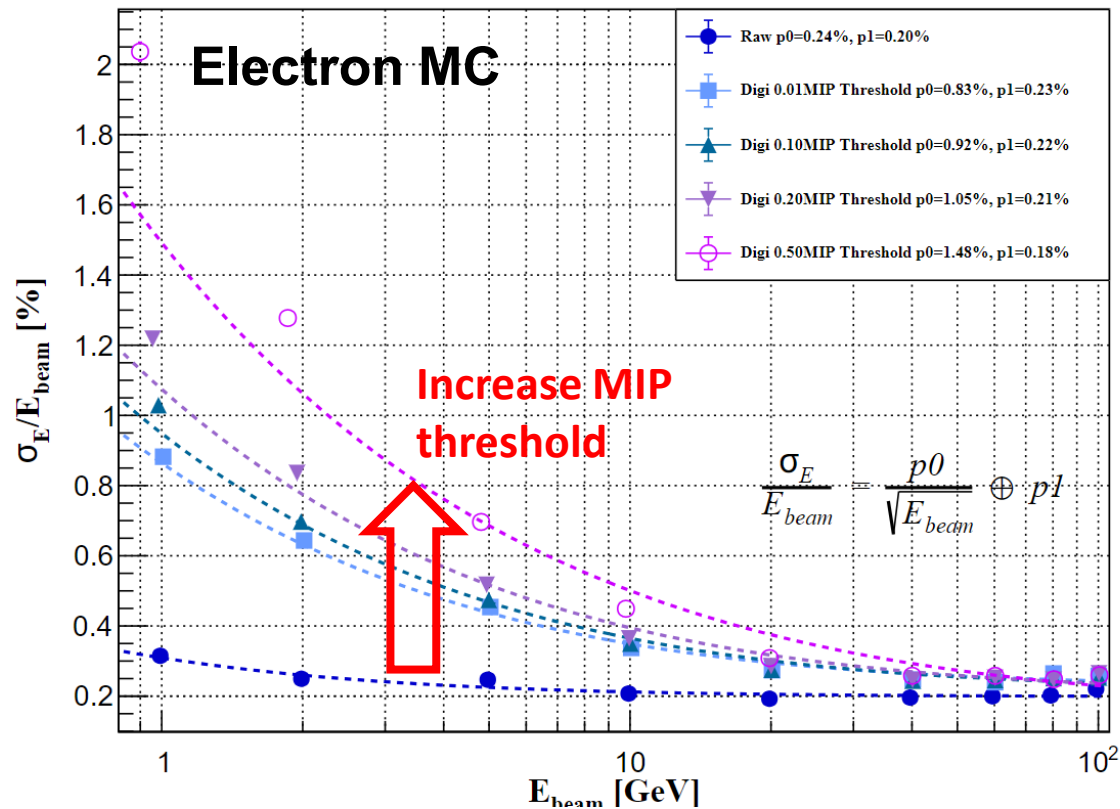


晶体电磁量能器模块：模拟与优化

■ 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

Energy Resolution 200 p.e./MIP



能量分辨统计涨落项与光产额之间的关系

Light Yield vs Stochastic Term

