

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

长条晶体量能器的重建算法： CyberPFA

郭方毅

高能物理研究所

2024年11月29日



报告提纲

- 研究背景简介
- 研究进展：软件开发
 - 探测器几何构建
 - 晶体量能器粒子流算法
 - 算法性能
- 研究计划

研究背景简介：粒子流重建

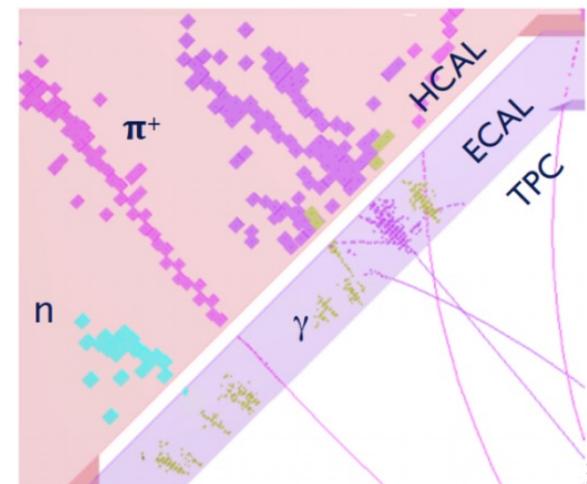
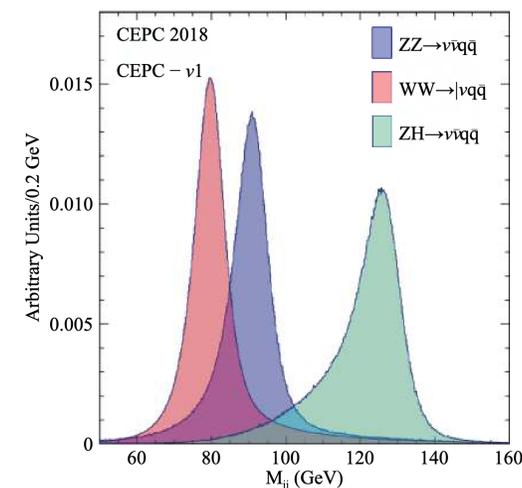
■ 环形正负轻子对撞机CEPC上的物理需求：

- 精确测量希格斯粒子、电弱过程、QCD过程等，检验标准模型；
- 寻找超出标准模型的新物理；

对探测器性能提出了前所未有的要求：喷注能量分辨 $30-40\% / \sqrt{E}$ 。

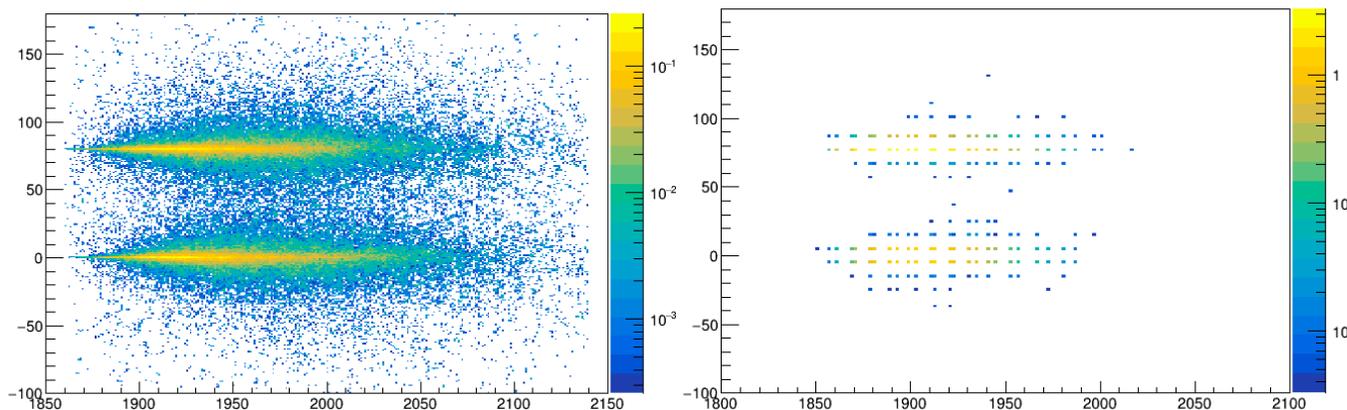
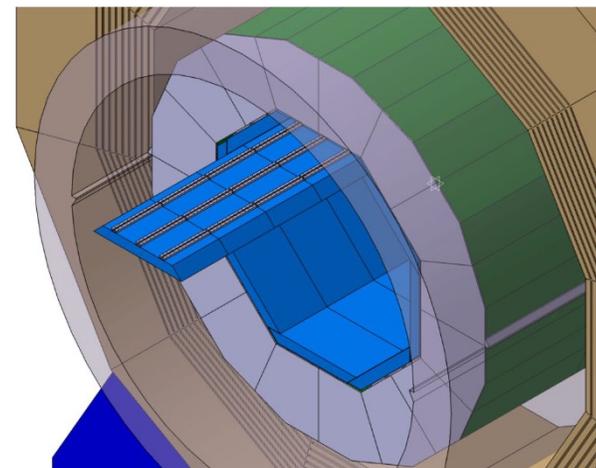
■ 国际主要解决方案：

- 双读出探测器：区分强子簇射中的电磁/非电磁成分，大幅提高强子量能器能量分辨。
- 粒子流探测器：径迹室 + 电磁量能器 + 强子量能器联合重建。
 - 高颗粒度、紧凑结构的成像型量能器 + 先进模式识别算法。
 - 本课题选定的研究方案

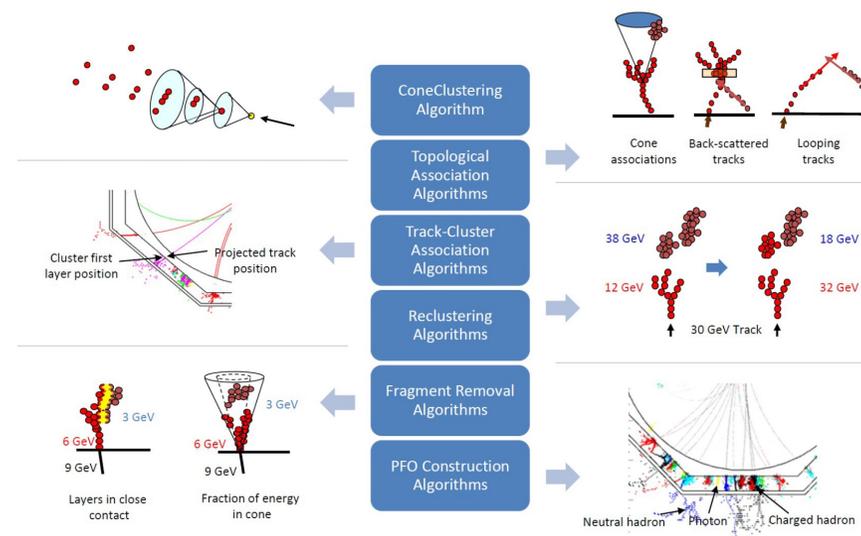


研究背景简介：粒子流重建

- 国际上的粒子流量能器与粒子流重建：
 - 硅+钨取样型电磁量能器 + PandoraPFA (CALICE合作组)
 - 本征能量分辨: $15\% \sim 20\%/\sqrt{E}$, 喷注能量分辨3-4% @ 100 GeV.
- 全吸收型晶体电磁量能器
 - 大幅提高本征能量分辨: $\sim 3\%/\sqrt{E}$.
 - 对低能电磁对象更灵敏.
 - 困难: 全吸收型晶体中的簇射重叠问题.



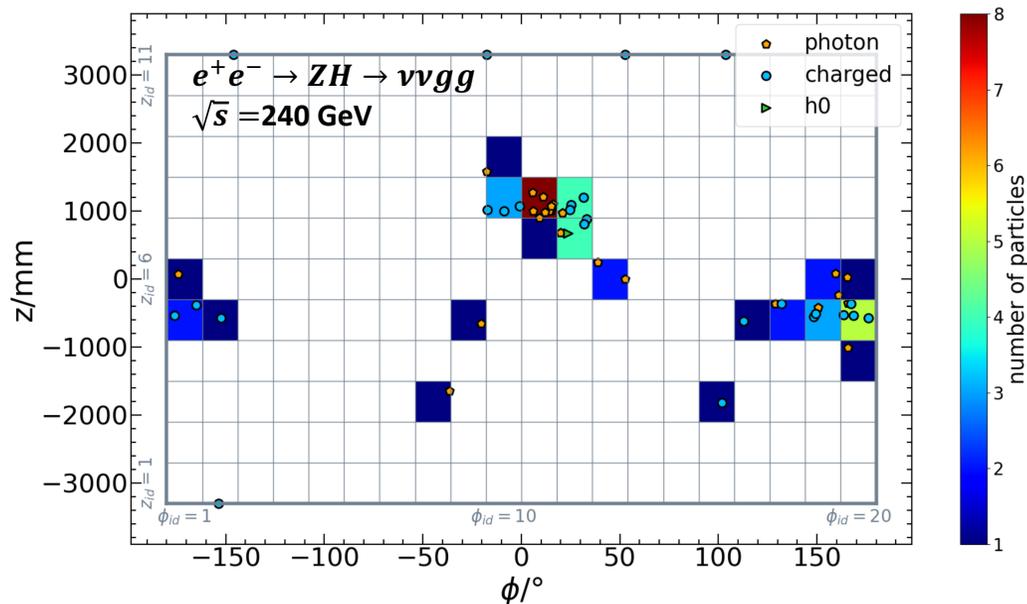
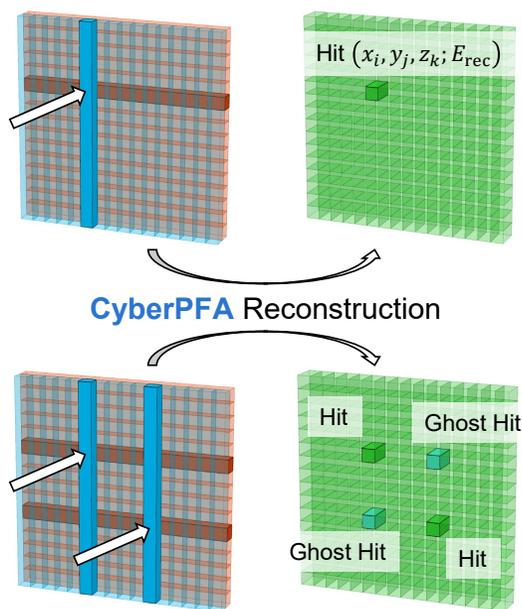
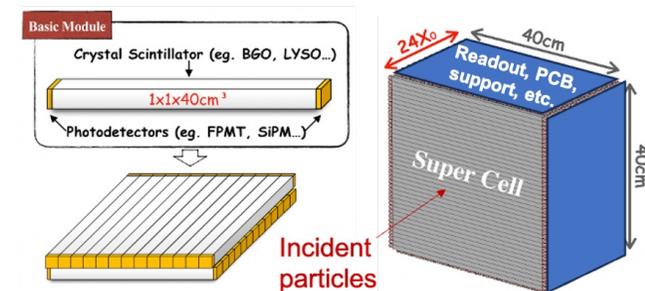
晶体（左）与硅-钨（右）电磁量能器中电磁簇射展宽的对比



研究背景简介：粒子流重建

■ 粒子流量能器需要高颗粒度信息：

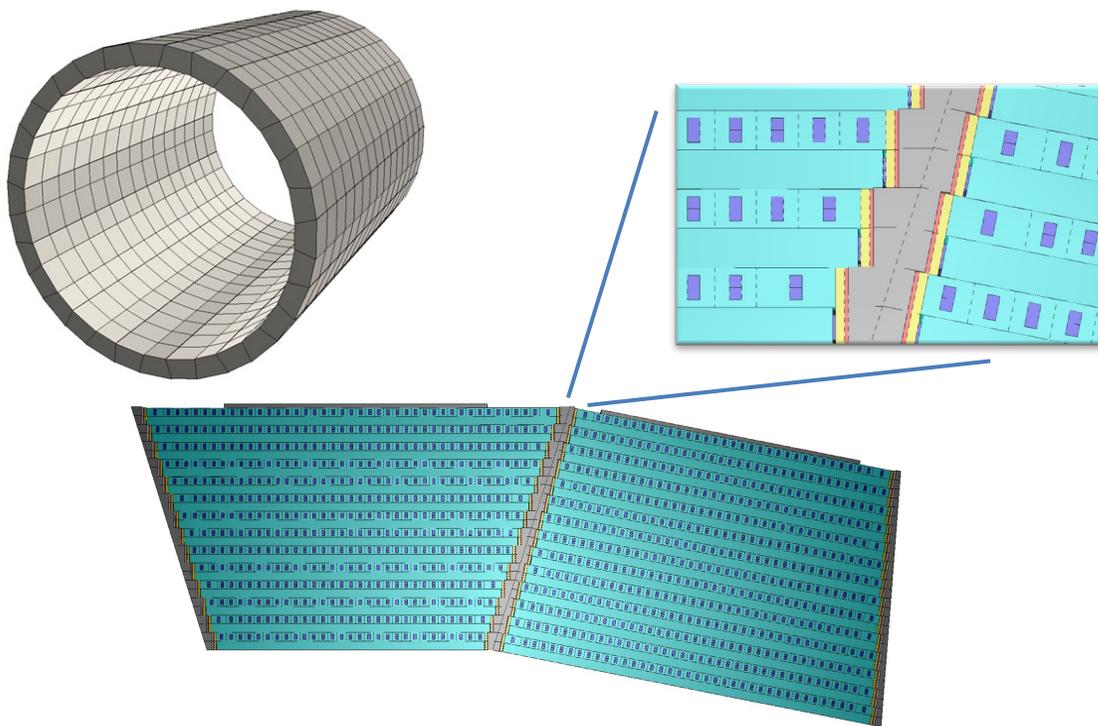
- 传统设计：取样型结构，取样点均匀分布在吸收体中，易于构建三维颗粒度信息；
- 本课题：全新长条晶体设计，通过正交密排结构得到三维颗粒度；
- 需要开发特定算法完成空间信息重建（2D → 3D）
 - 在物理过程重建中会引入多粒子混淆问题，亟需解决。



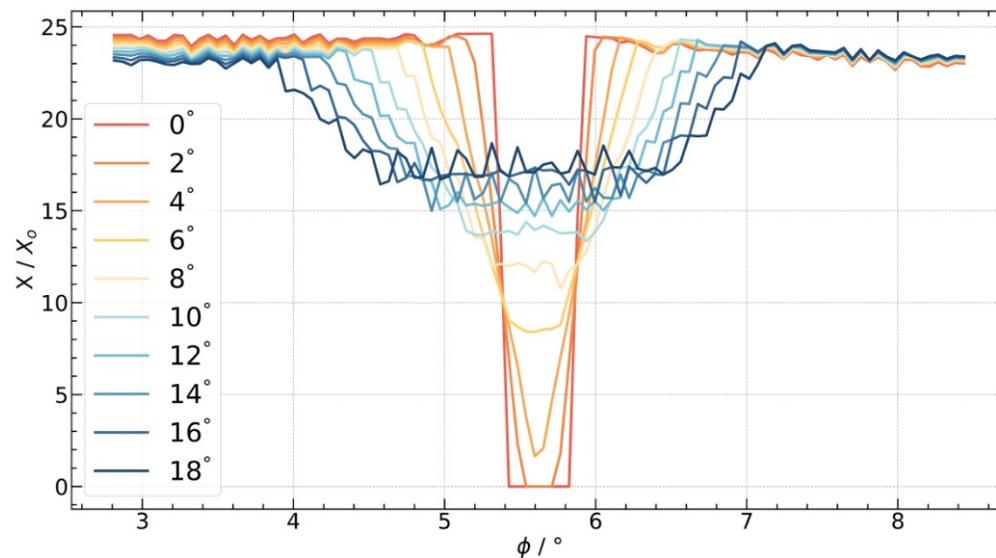
研究进展：探测器几何构建

■ 全新探测器设计，需要自主构建几何结构进行模拟研究：

- 采用国际通用的先进软件工具DD4HEP；
- 考虑晶体模块尺寸，自主设计正反梯形结构（桶部），优化探测器死区；
- 考虑支撑、冷却、电子学等必要非灵敏结构，提升设计可靠性。



不同梯形倾斜角对应的灵敏区大小及厚度

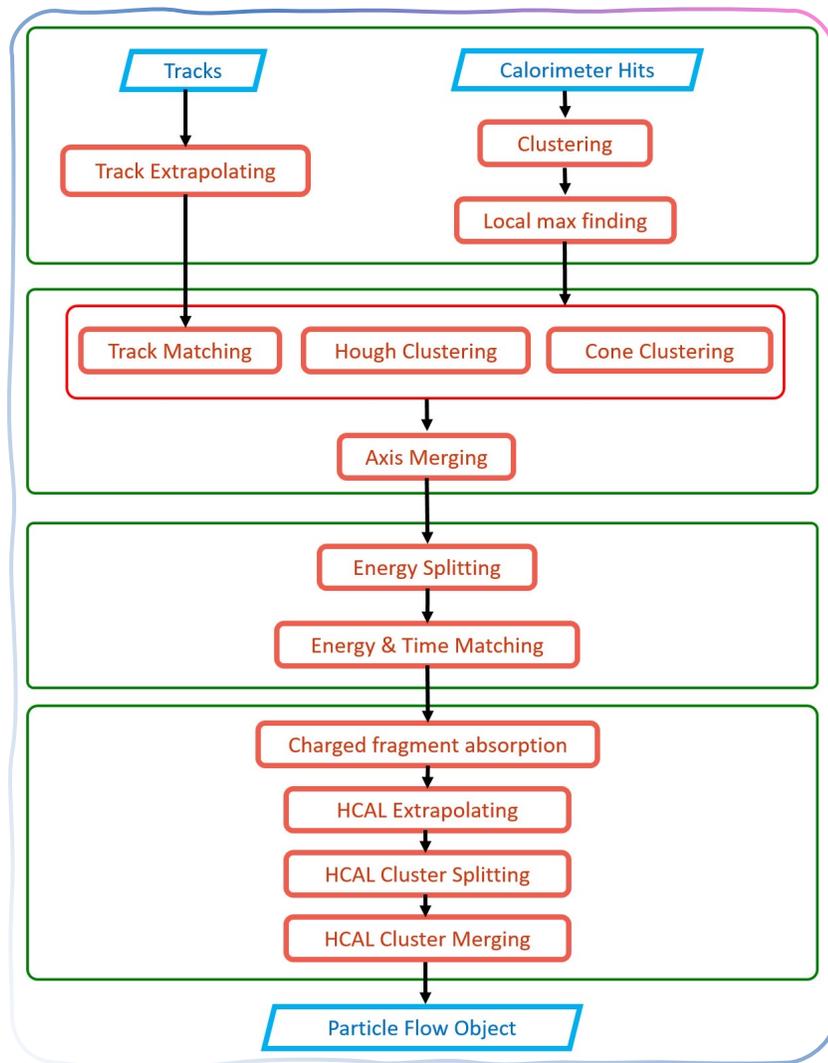
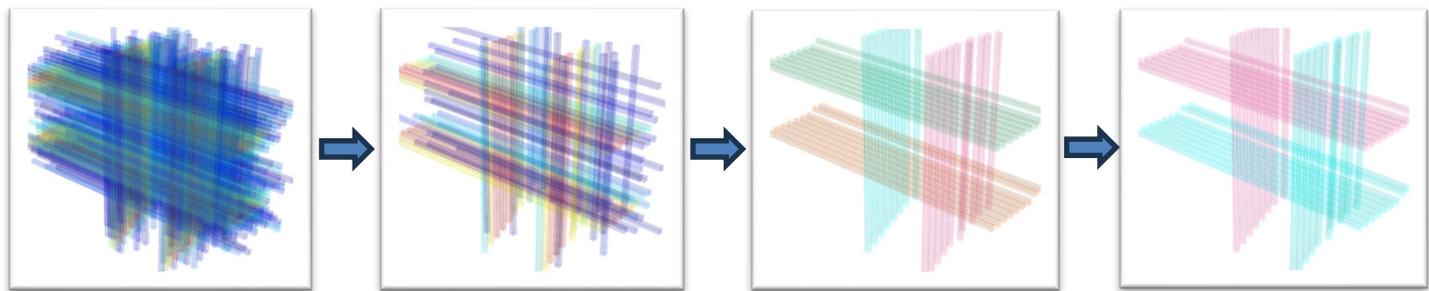


研究进展：粒子流算法开发

■ 全新粒子流算法：CyberPFA

- 事例预处理：临近晶体聚类
- 模式识别：
 - 多种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：综合探测器3（空间）+1（时间）+1（能量）维结构信息。

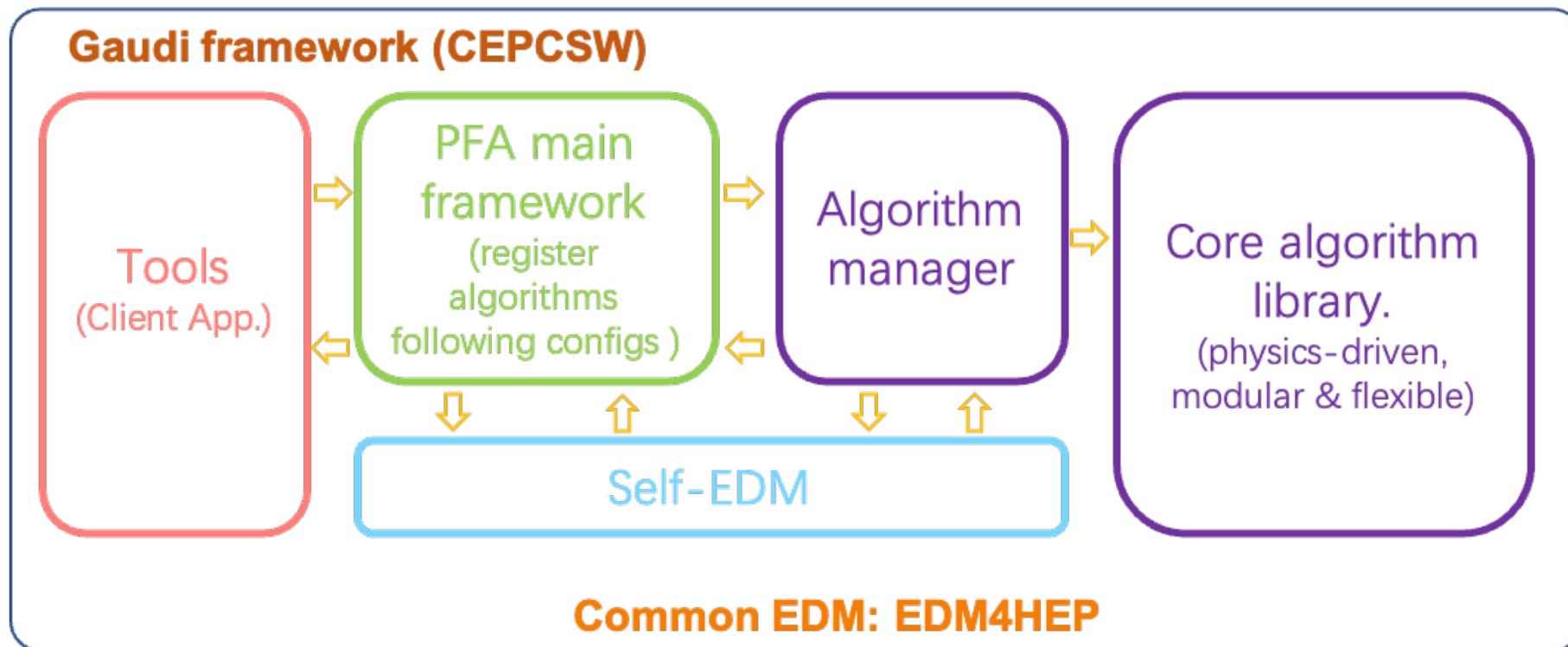
事例显示：临近双光子的区分



研究进展：粒子流算法开发

■ 算法构架：模块化设计

- 主程序控制调用，数据统一管理，各子算法独立开发及运行；
- 易开发，易扩展；
- 基于国际未来对撞机实验通用框架Key4HEP，有利于推广，提高国际影响力。

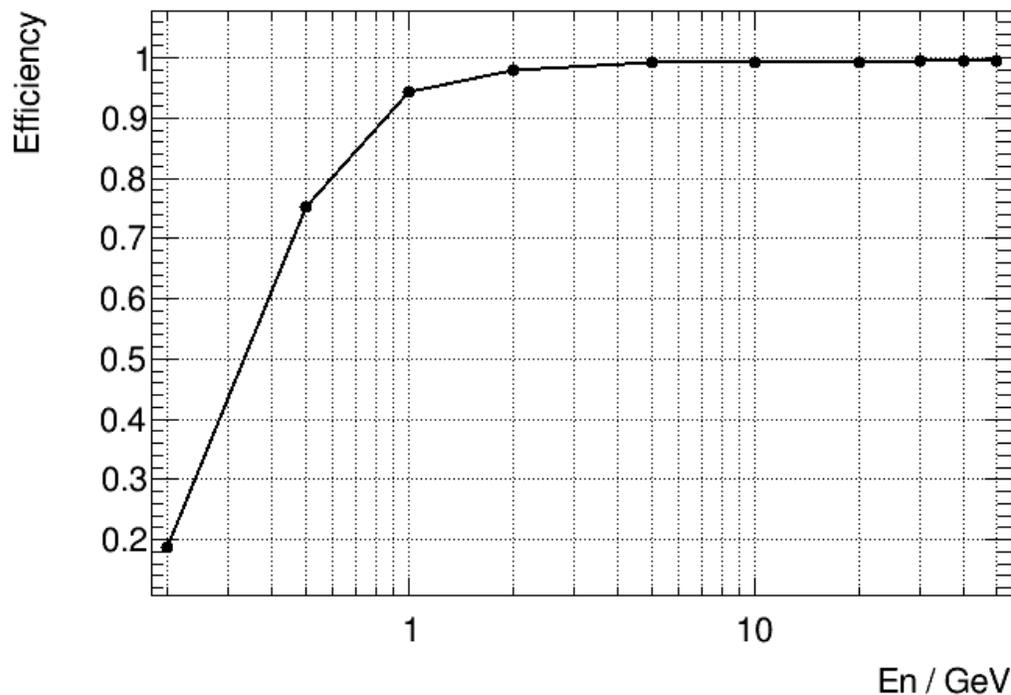


研究进展：算法性能研究

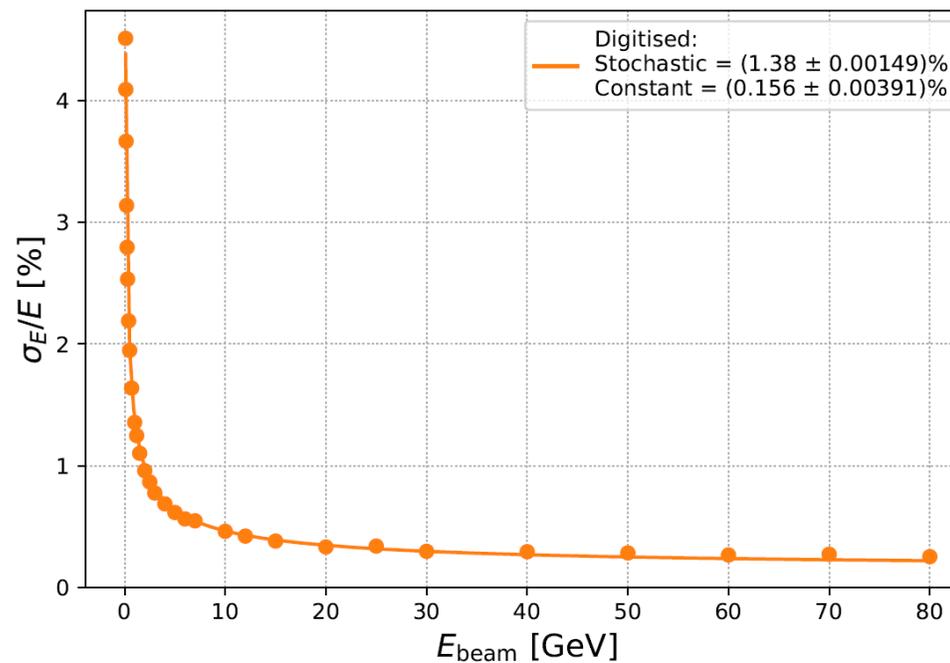
■ 单粒子重建：

- 单光子重建效率：100% @ > 1GeV
- 单光子能量分辨： $\sigma_E/E = 1.38\%/\sqrt{E} \oplus 0.16\%$ (模块中心)

单光子重建效率



单光子能量分辨

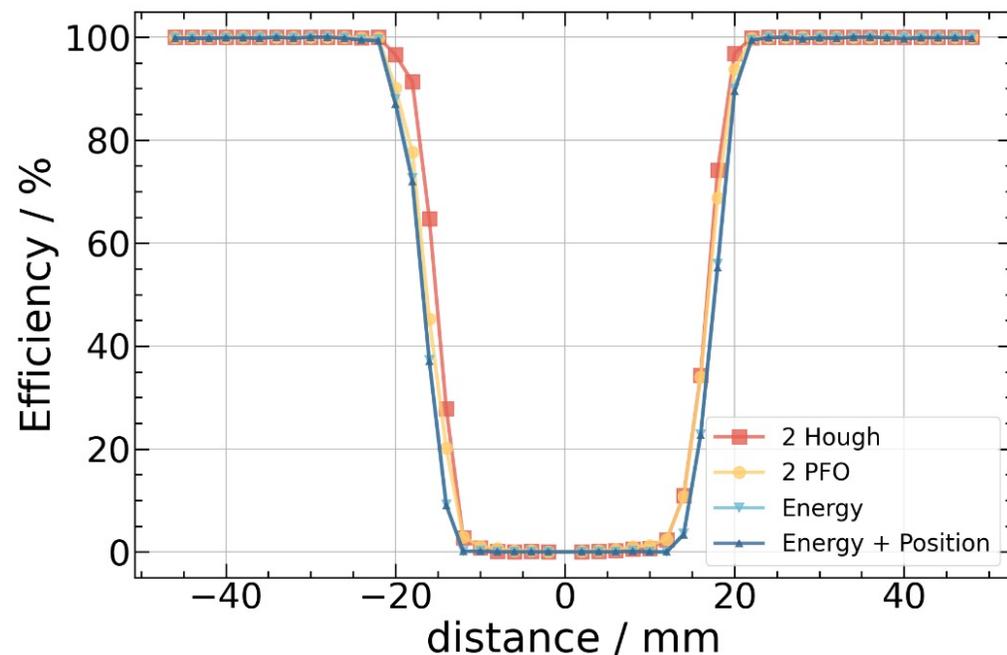


研究进展：算法性能研究

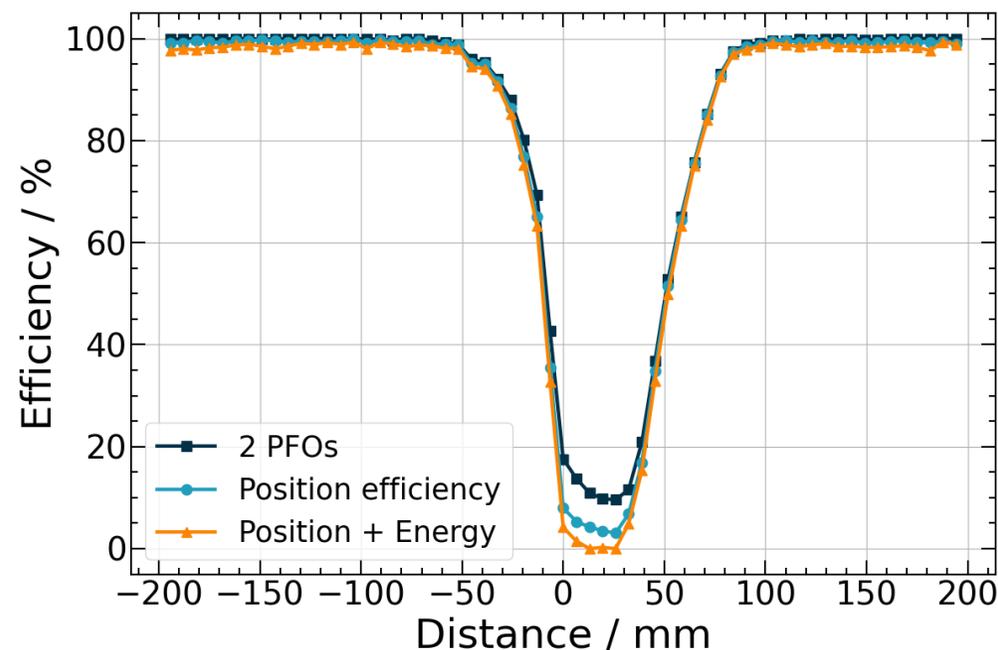
■ 临近粒子区分能力：

- 临近双光子区分：相邻2.2 cm时区分能力达到100%；
- 临近光子-强子 (π^-) 区分：相邻10 cm时区分能力达到100%。

临近双光子区分



临近光子-强子区分

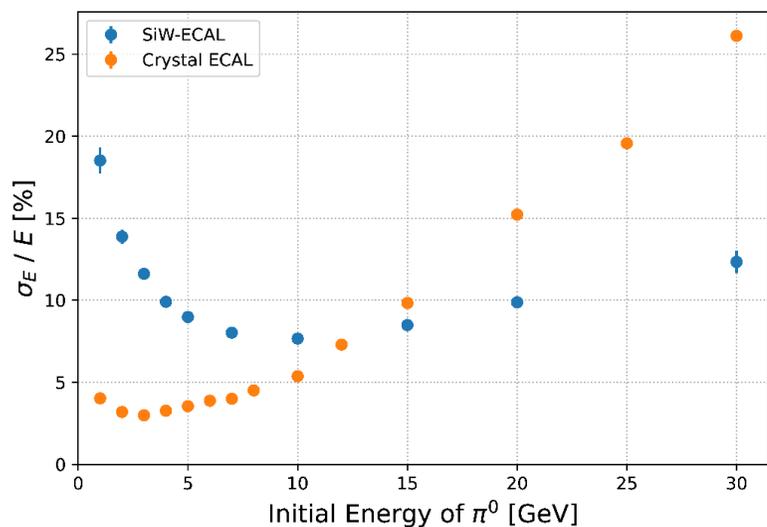


研究进展：算法性能研究

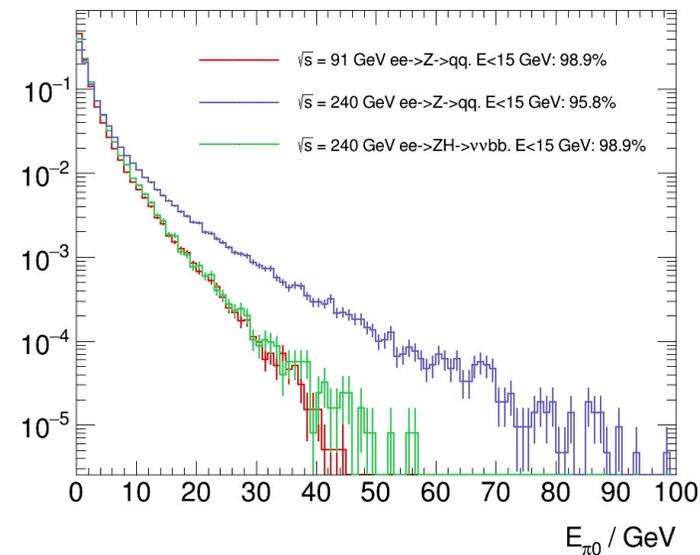
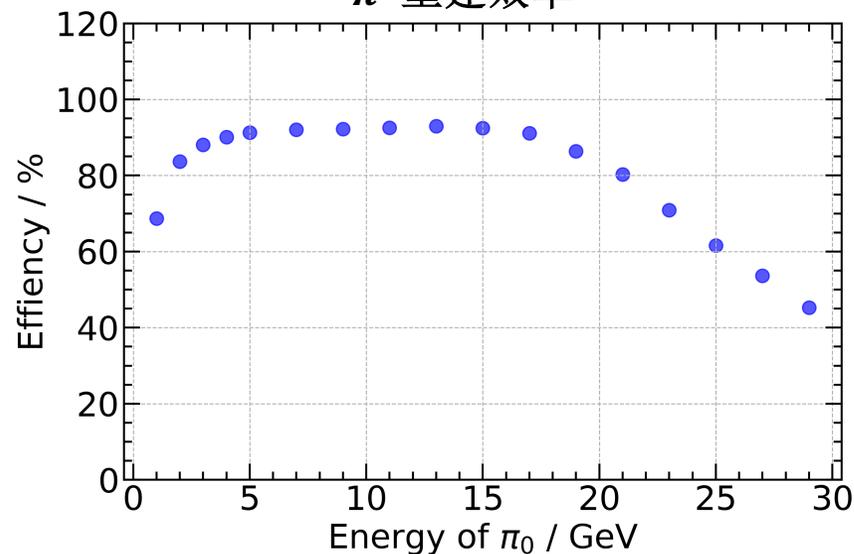
■ 物理对象重建： $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

- 质量分辨：低能区显著优于硅-钨取样型量能器，高能区有提升空间；
- 重建效率：针对 < 20 GeV π^0 可达到80%以上效率。
- CEPC典型物理过程中 π^0 能量普遍低于15 GeV，当前性能能够满足大部分物理测量要求。

π^0 质量分辨



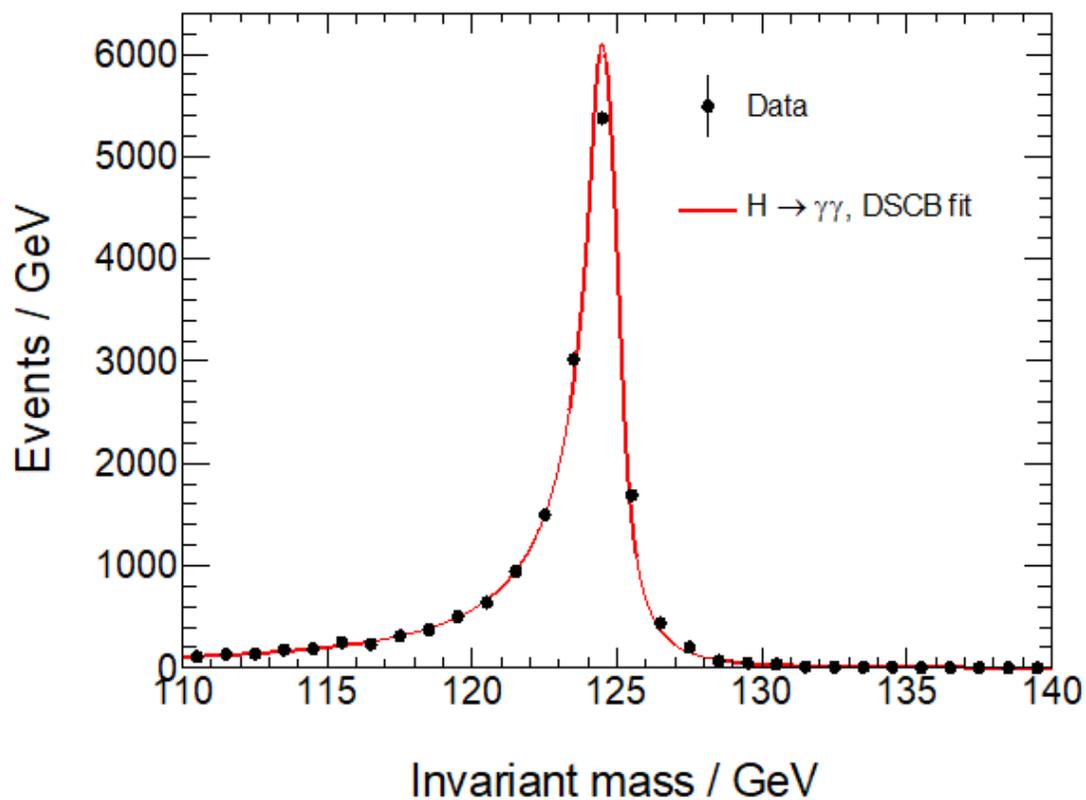
π^0 重建效率



研究进展：算法性能研究

■ 物理过程重建： $H \rightarrow \gamma\gamma$

- CEPC上典型物理过程，LHC实验上发现希格斯粒子的黄金道之一
- 优秀的希格斯粒子质量分辨 $\sigma(m_{\gamma\gamma}) = 0.57 \pm 0.01$ GeV：得益于全吸收晶体量能器能量分辨

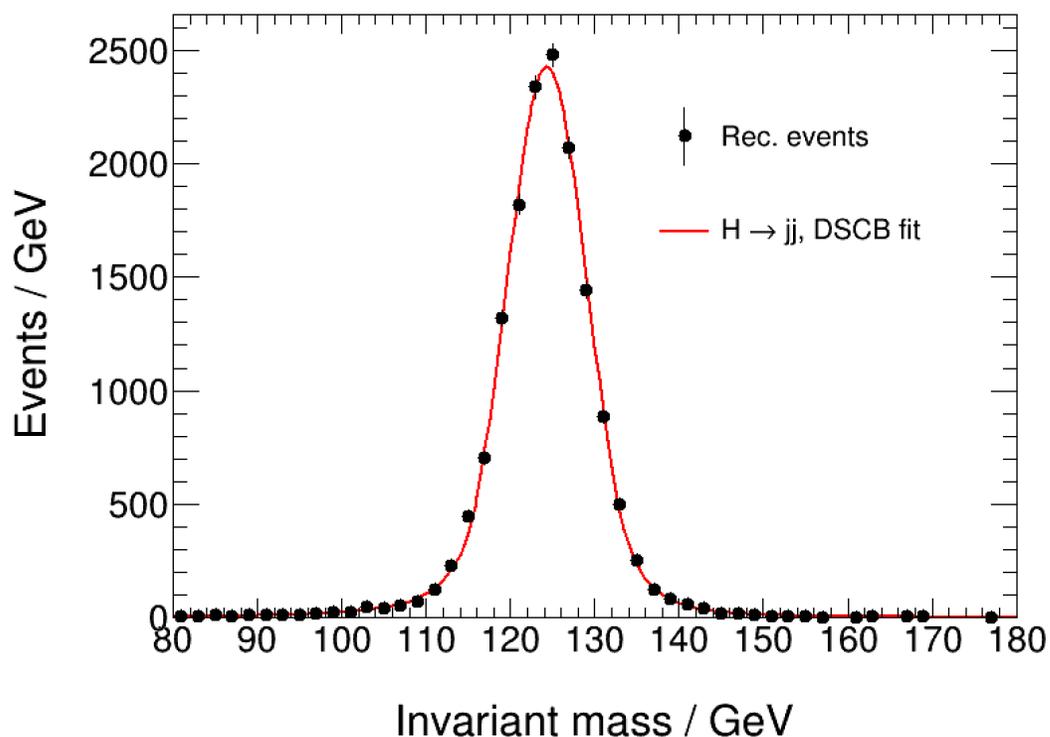


*存在能量泄漏问题，需要算法修正

研究进展：算法性能研究

■ 物理过程重建： $H \rightarrow gg$

- 双喷注末态，希格斯粒子主要衰变末态，**粒子流算法性能研究的标准过程**；
- 质量分辨 $\sigma(m_{jj}) = 4.87 \pm 0.03$ GeV，相对分辨BMR = $3.88\% \pm 0.02\%$ 。**接近项目指标喷注能量分辨3-4% @ 100 GeV.**



研究计划与总结

- 开发针对长晶体条电磁量能器的重建算法：CyberPFA
 - 几何模型和算法构架的搭建已完成；
 - 主要子算法开发工作已完成，取得了重要的物理性能指标 $BMR = 3.88\%$
 - 后续将按计划开展研究工作：
 - 优化算法性能，达到项目指标；
 - 优化量能器设计，尝试先进算法，达到国际领先水平；
 - 积极推广此设计方案，提升国际影响力。

本年度会议报告

- CEPC International Workshop in EU, Marseille, April 8-11, 2024. (Fangyi Guo)
- CALOR 2024, Tsukuba, May 20-24, 2024 (Weizheng Song)
- ICHEP, Prague, July 17-24, 2024 (Fangyi Guo)
- 第十四届全国粒子物理学术会议, 青岛, 8月14-18, 2024 (Yang Zhang)
- ECFA Workshop, Oct 9-11, 2024 (Yang Zhang)
- CEPC International Workshop, 杭州, 10月23-26, 2024 (Yang Zhang)

谢谢！