



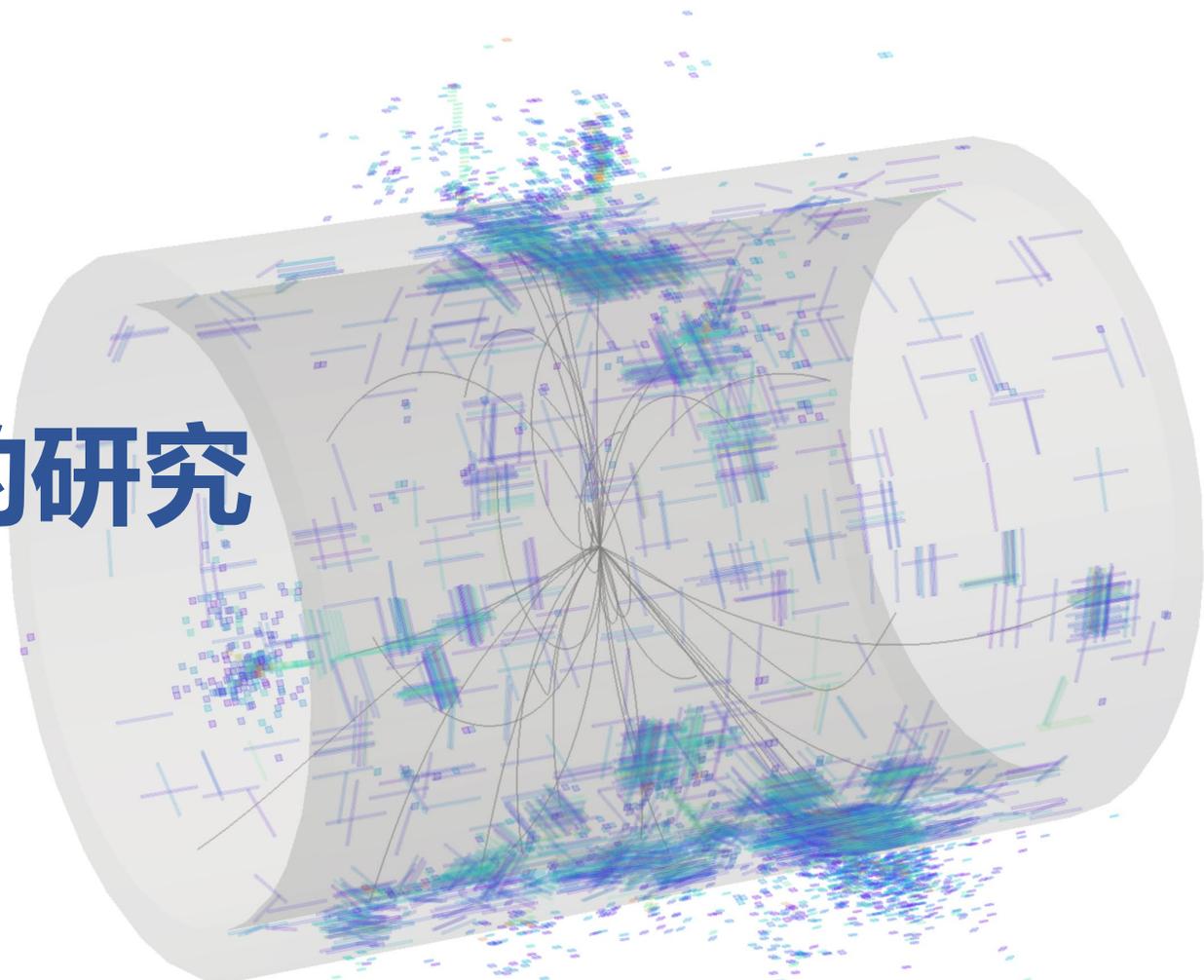
CEPC晶体电磁量能器的研究

——CCAST 博士后面试

张洋

博士后导师：王贻芳

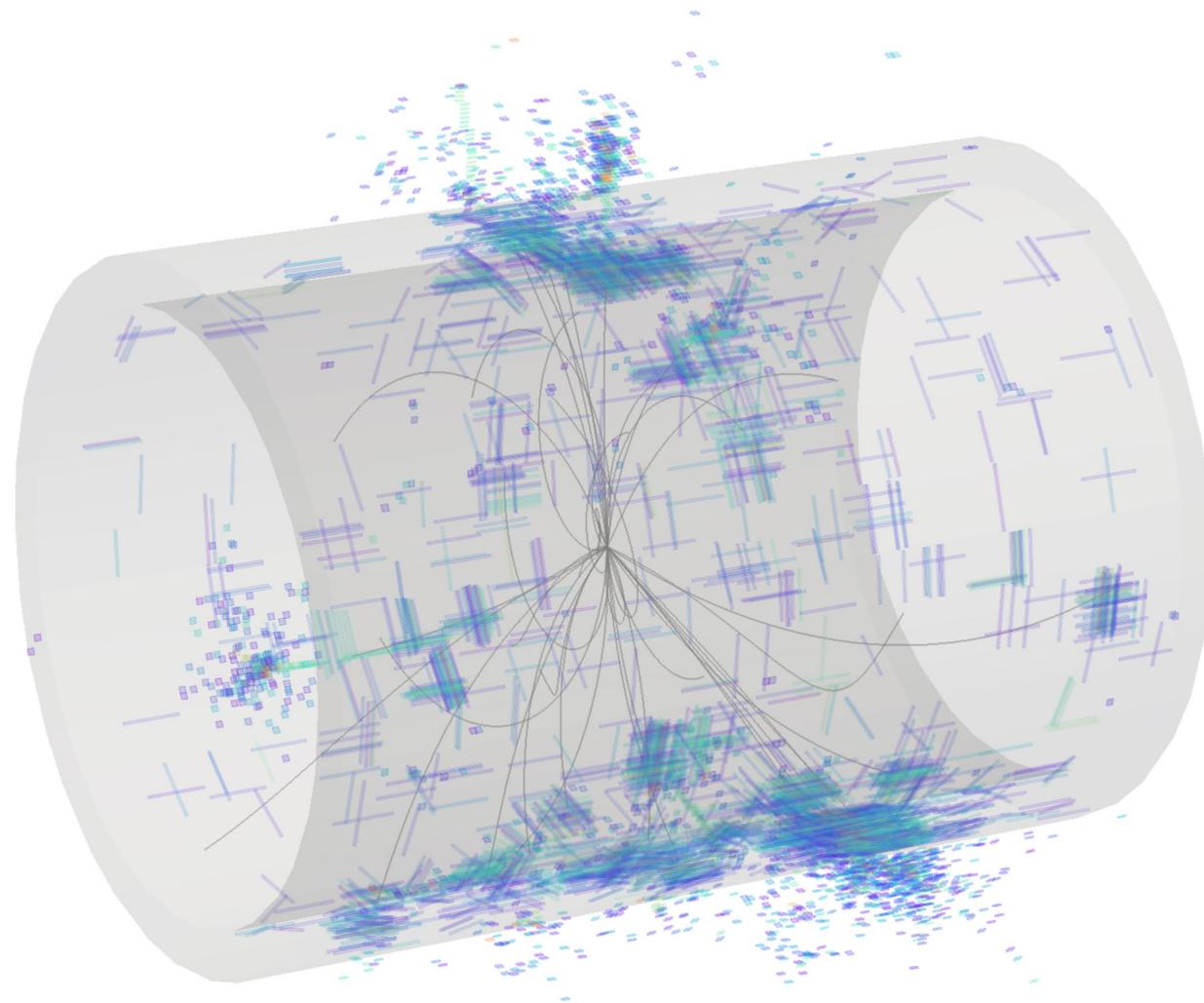
2025年1月11日



中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

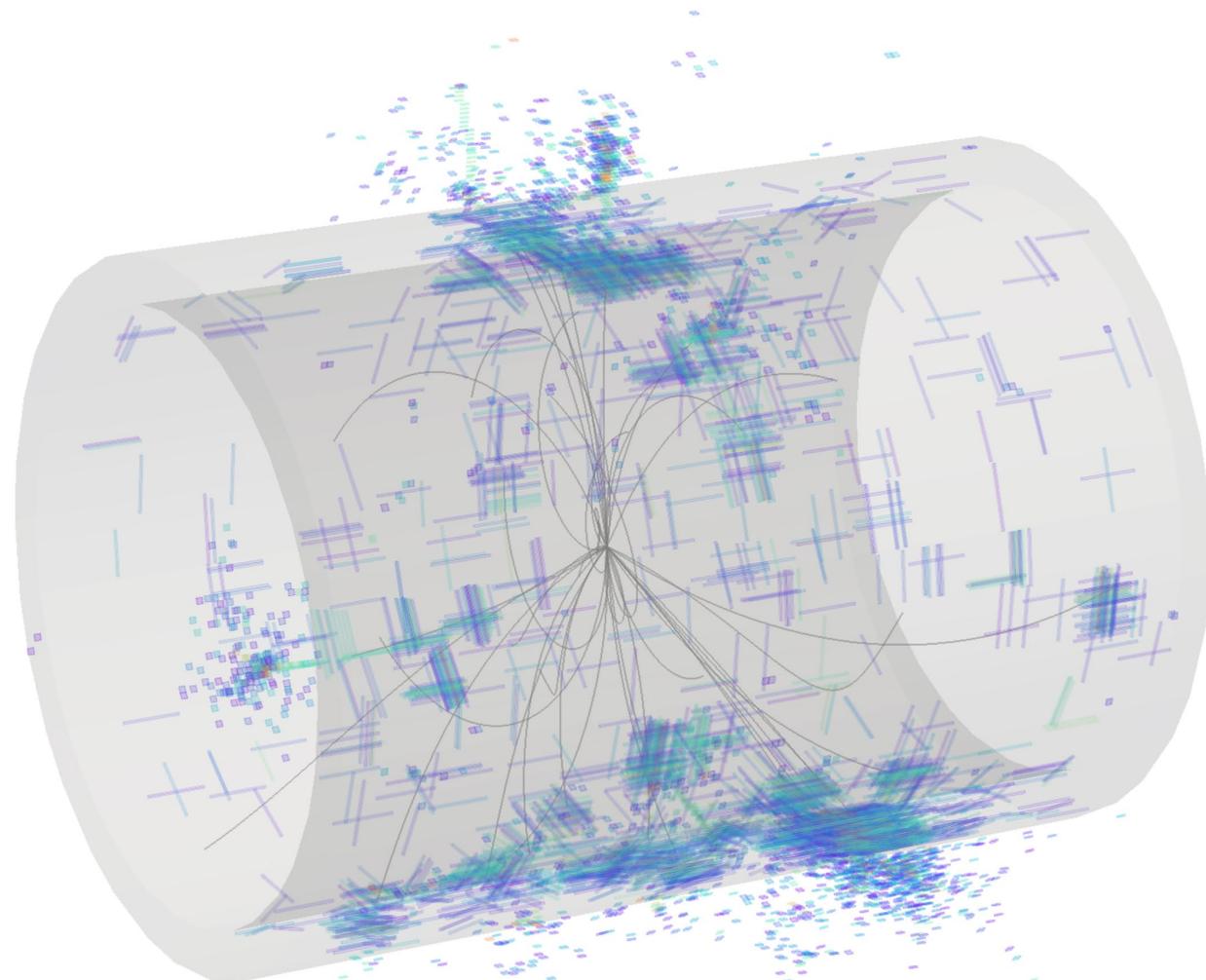
目录

- 个人简介
- 研究背景
- 博士阶段研究成果
- 博士后研究计划





个人简介



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

个人简介

• 教育经历

- 2016年9月-2020年7月 吉林大学物理学院 本科
- 2020年9月-2025年6月 中国科学院大学 高能物理研究所 博士

• 获得奖项

- 国家奖学金, 2017
- 高能所所长奖学金, 2024

• 论文发表

- Hough transformation for photon recognition in imaging calorimeter (第一作者, 待发表)
- Simulation of the long crystal bar electromagnetic calorimeter of the circular electron positron collider (本人参与, 待发表)
- Conceptual Design of a Highly Granular Crystal Calorimeter (本人参与, 待发表)

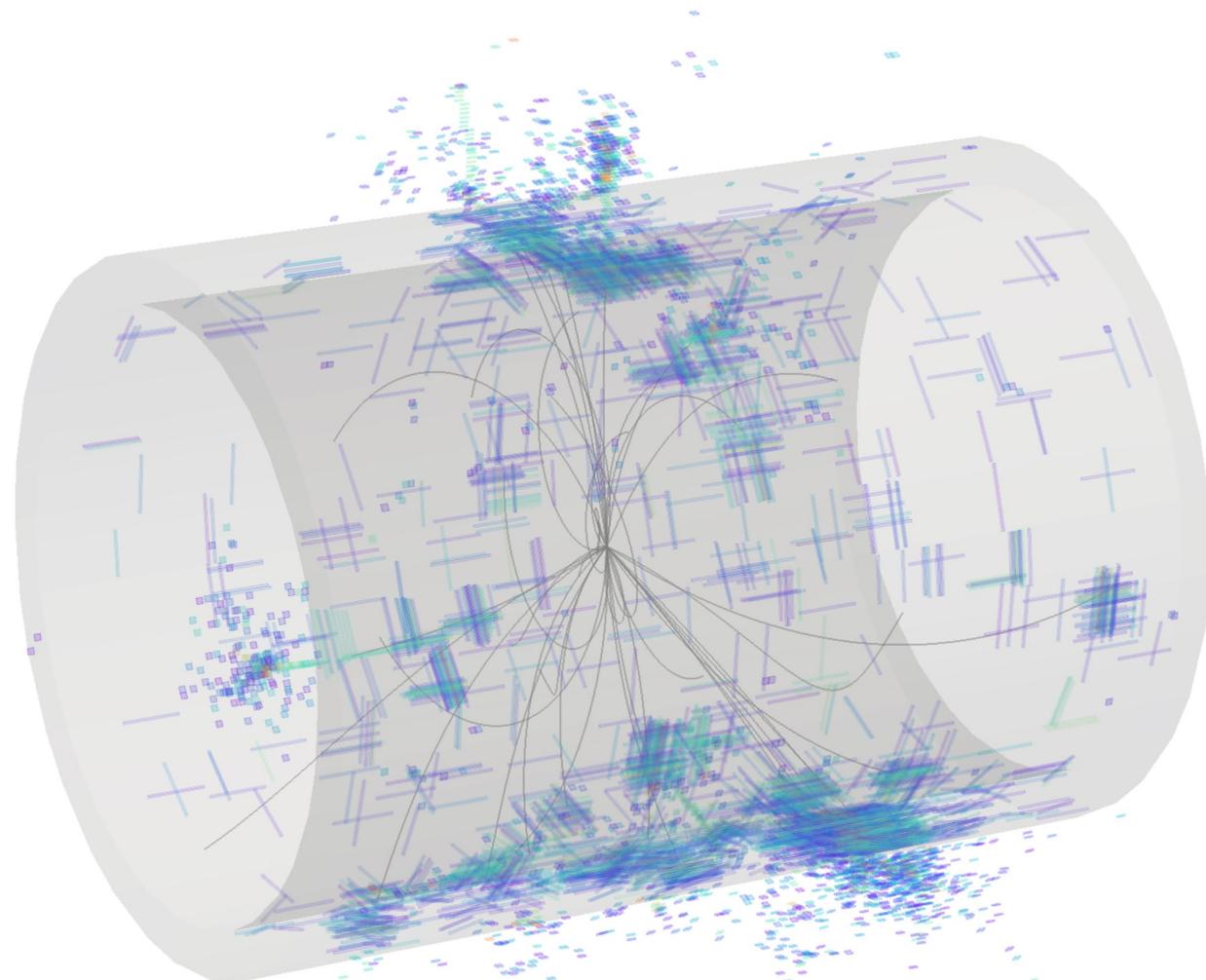
个人简介



- 学术报告
 - [CEPC Physics and Detector Plenary Meeting](#), Application of Hough Transformation in ECAL Reconstruction (口头)
 - [CEPC international workshop 2022](#), Updated Progress in a New PFA for Crystal Bar ECAL
 - [CEPC international workshop 2023\(European Edition\)](#), Long Crystal Bar ECAL Software(口头)
 - [中国物理学会高能物理分会第十四届全国粒子物理学术会议](#), Particle Flow Algorithm for Long Crystal Bar ECAL(口头)
 - [3rd ECFA workshop](#), CyberPFA: CrYstal Bar ECAL Reconstruction in CEPC(口头)
 - [CEPC international workshop 2024](#), CyberPFA: CrYstal Bar ECAL Reconstruction in CEPC(口头)



研究背景



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

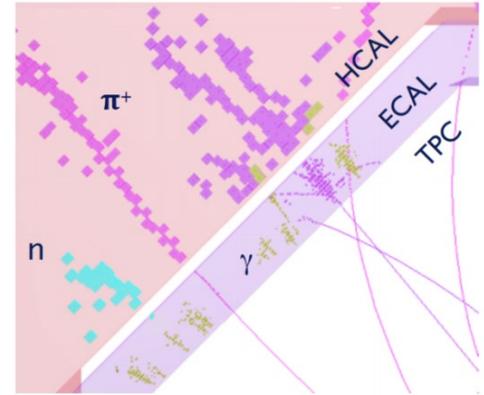
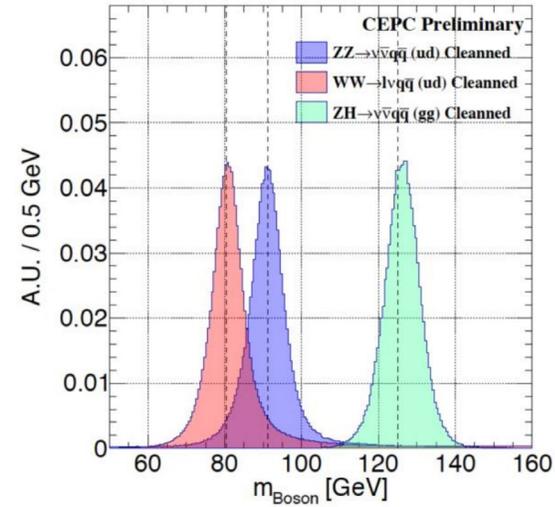
研究背景

- **CEPC: 高精度 H/Z 工厂**

- 精确测量希格斯粒子, 电弱物理等的性质
- W, Z, H 主要衰变为强子(喷注), 为区分它们的强子衰变, 要求玻色子质量分辨(BMR) < 4%

- **粒子流方法:**

- 重建事例中所有可见粒子
- 硬件 + 软件

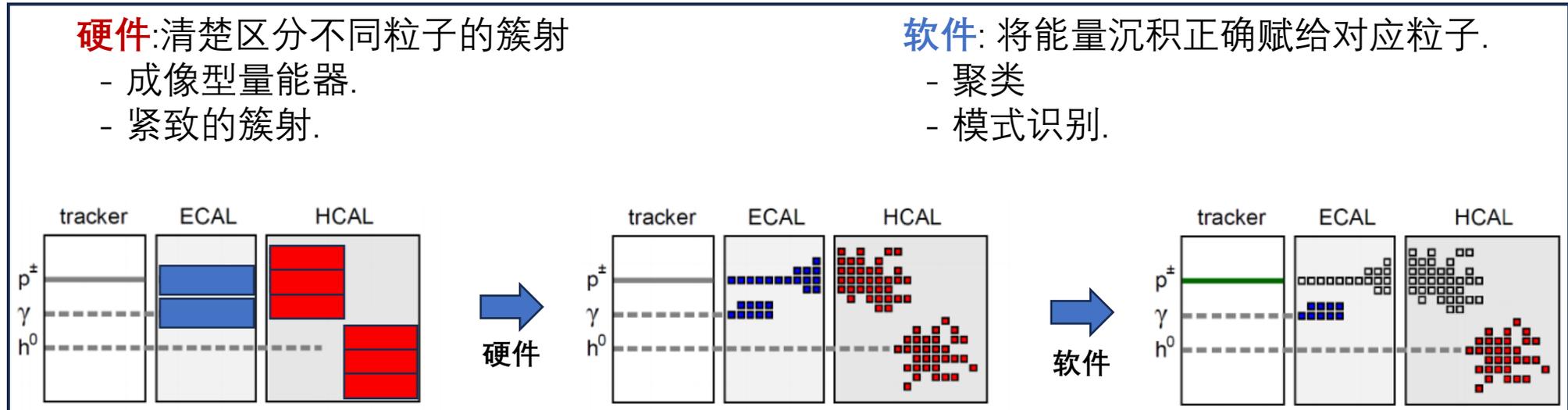


硬件: 清楚区分不同粒子的簇射

- 成像型量能器.
- 紧致的簇射.

软件: 将能量沉积正确赋给对应粒子.

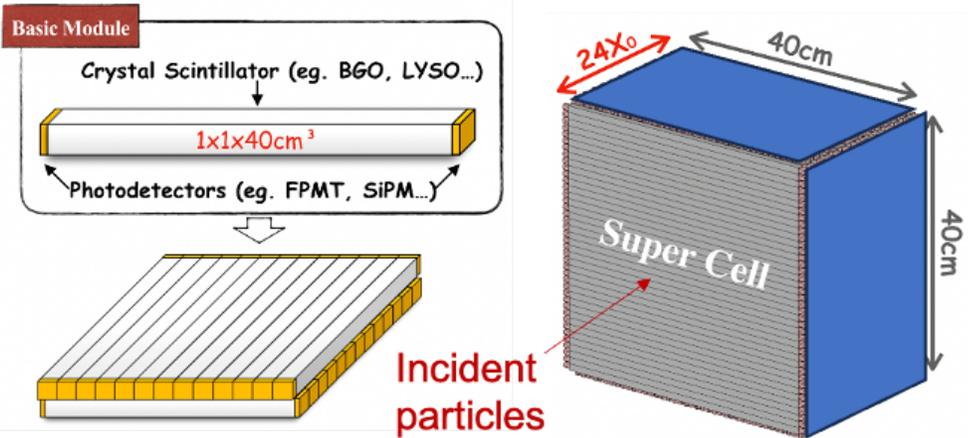
- 聚类
- 模式识别.



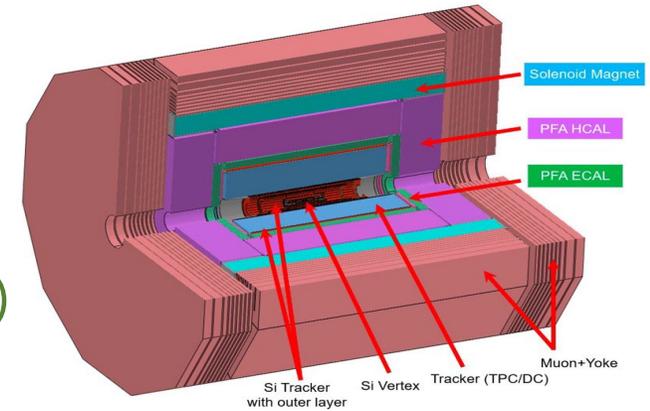
研究背景

• CEPC Ref-TDR: 全新的长条形晶体电磁量能器设计方案

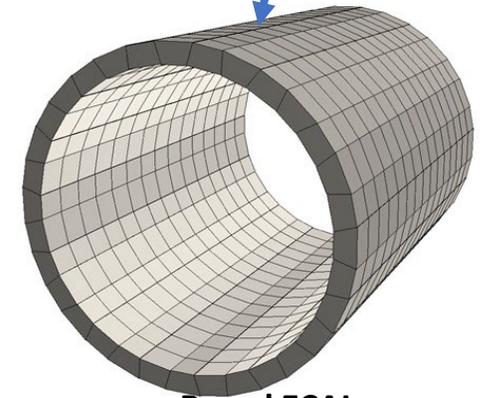
- 极佳的能量分辨: $\sigma/E < 3\%/\sqrt{E}$, 远好于取样型量能器($\sim 15\%/\sqrt{E}$)
- 电子学通道数少, 造价低
- 长条形晶体设计, 死物质少



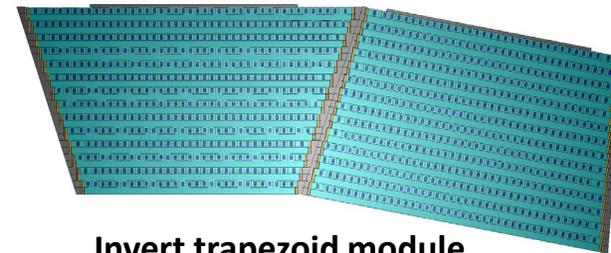
- BGO 晶体, $1 \times 1 \times \sim 40 \text{ cm}^3$
- 信号由晶体两端读出
- 相邻两层晶体垂直摆放



CEPC Reference detector



Barrel ECAL

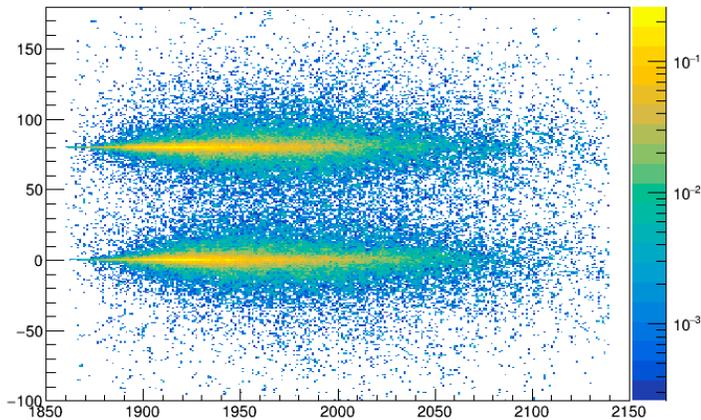


Invert trapezoid module

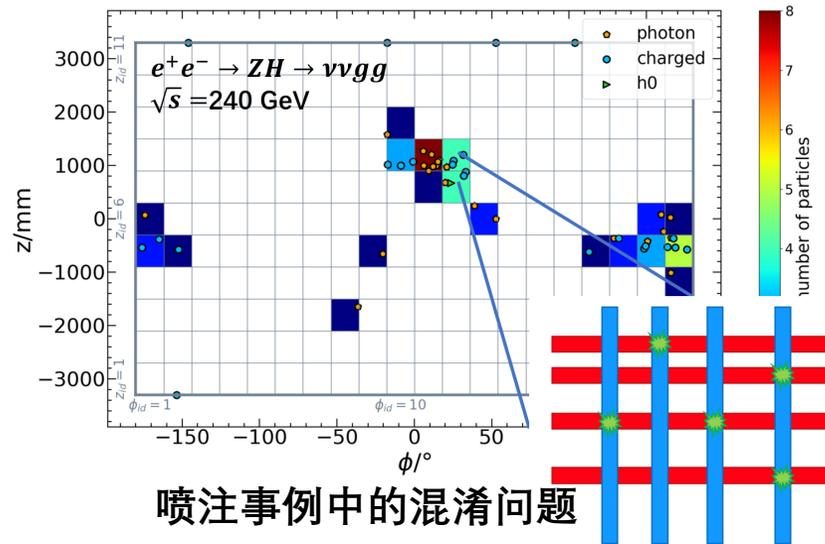
研究背景

• CEPC Ref-TDR: 全新的长条形晶体电磁量能器设计方案

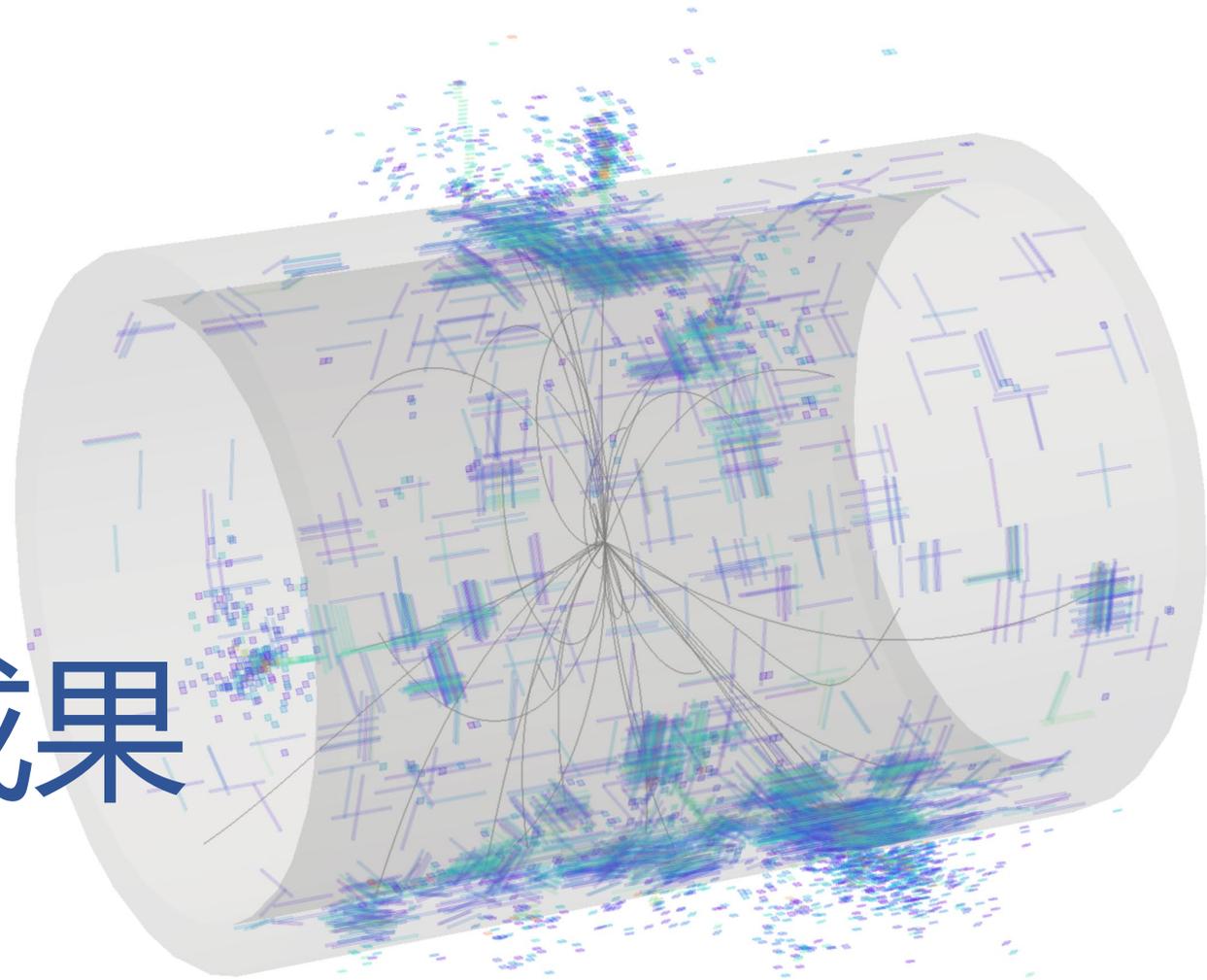
- 过去的粒子流算法基于高粒度量能器开发，不适用于长条晶体的设计。
 - 针对长条形设计开发全新的粒子流算法
 - 基于算法性能验证长条晶体设计的可行性
- 重建算法要解决的**关键问题**:
 - 不同粒子**簇射重叠**的几率更大
 - 晶体条横纵排列引入**混淆问题**



BGO晶体中的电磁簇射



喷注事例中的混淆问题



博士阶段研究成果



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

CyberPFA 的开发

- **CyberPFA (CrYstal Bar Ecal Reonstriction)**

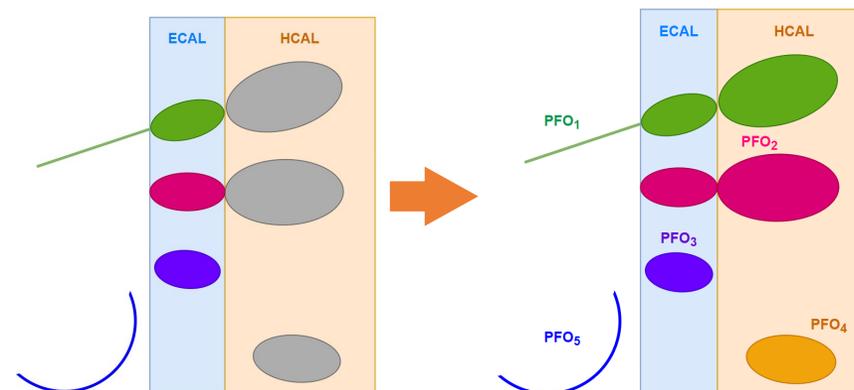
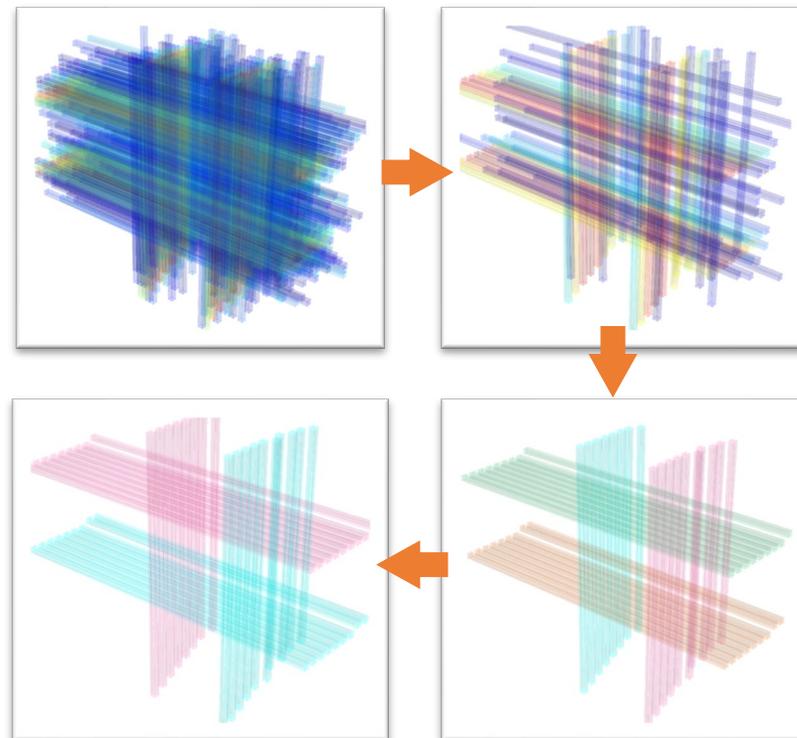
- 针对长条晶体电磁量能器的全新粒子流算法

- **CyberPFA 核心步骤**

- 相邻击中晶体聚类为簇射团;
- 挑选能量的局域最大值, 为模式识别做准备
- 识别粒子的簇射
 - 三个模式识别算法侧重识别不同种类的簇射
- 基于簇射形状做能量劈裂
- 通过能量、时间等信息做横纵条的匹配, 解决混淆问题
- 连接电磁量能器与强子量能器的簇射团

本人的主要工作:

- 粒子簇射的识别 (模式识别)
- 电磁量能器与强子量能器簇射团的连接



模式识别算法的开发

- 性能优异的模式识别算法

- 粒子簇射的高效识别是粒子流算法**最基本、最核心**的要求，直接决定了算法的**整体性能**

- 不同粒子的行为差异大，需要**有针对性的模式识别算法**

- 光子：

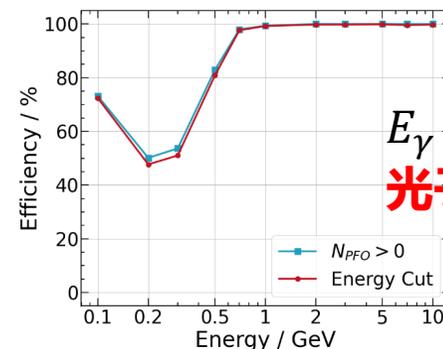
- 多粒子簇射重叠下的高效识别
- 霍夫变换算法识别簇射的能量核心

- 最小电离粒子：

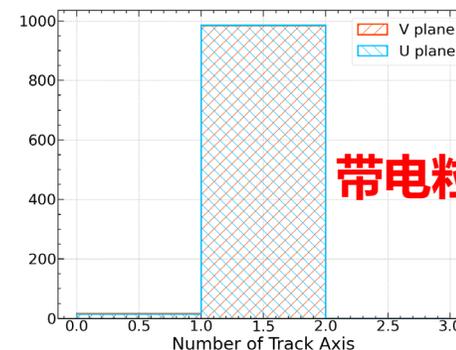
- 受电离能损与库仑散射影响，簇射轨迹难以预测
- 径迹外推+径迹匹配（直接匹配+基于 cone 角的匹配）

- 带电强子：

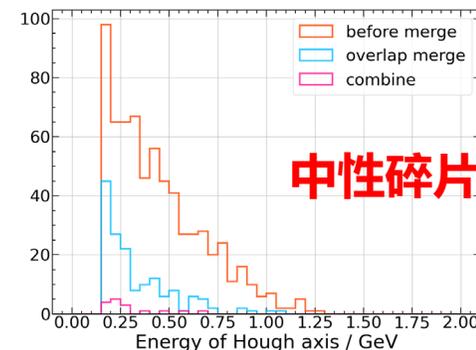
- 簇射没有固定形状；簇射周围有大量中性碎片
- 径迹匹配+碎片合并



$E_\gamma > 1\text{GeV}$ 时，
光子识别效率~100%



带电粒子识别效率~100%



中性碎片能量占比仅0.48%

电磁量能器与强子量能器的连接

• 连接算法的必要性

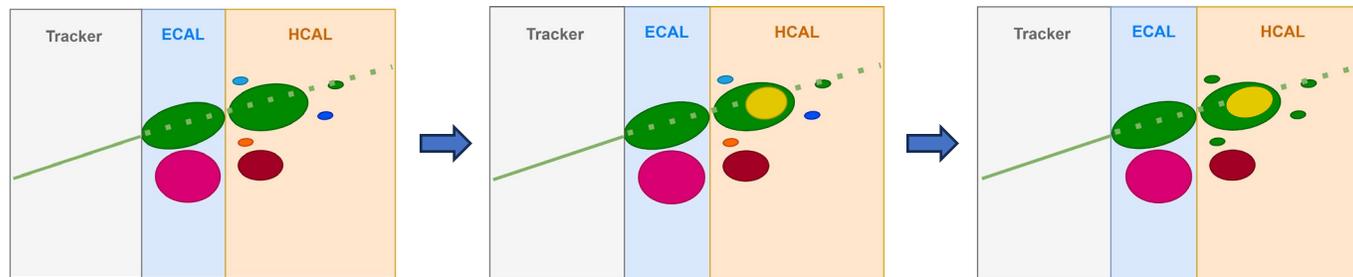
- 粒子流算法需结合所有子探测器的信息，将所有末态可见粒子重建为粒子流对象（PFO）。CyberPFA 最后需要将电磁量能器与强子量能器的簇射团连接，重建出完整的 PFO。

• 挑战

- 强子簇射没有固定形状
- 簇射周围有大量的碎片
- 难以区分重叠的簇射

• 应对

- 利用带电粒子的径迹动量约束簇射团的能量



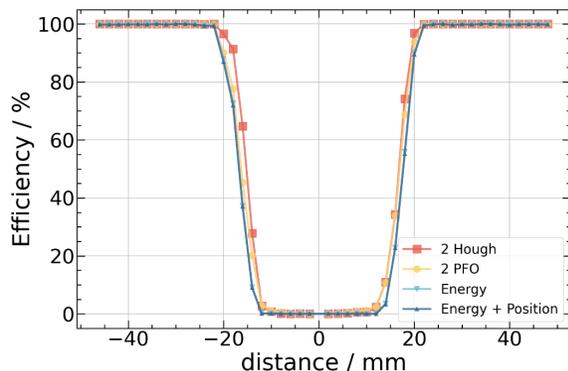
利用外推径迹连接电磁量能器与强子量能器的簇射团

$E_{cluster} > P_{track}$ 时，劈裂出中性簇射团

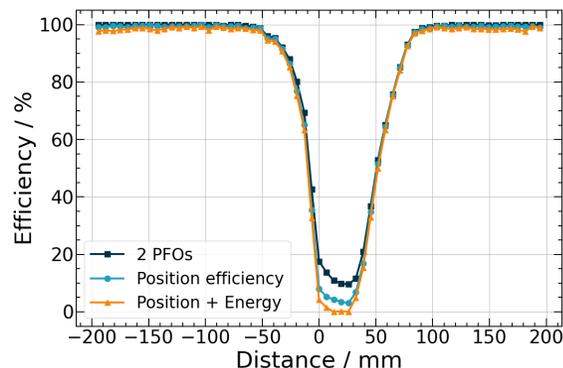
$E_{cluster} < P_{track}$ 时，吸收中性碎片

CyberPFA算法性能

• 双粒子区分能力

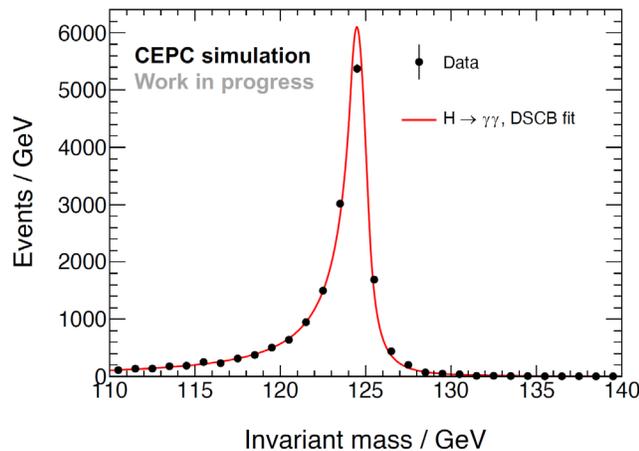


γ - γ 区分能力:
簇射距离 > 2.2cm,
区分效率 ~ 100%

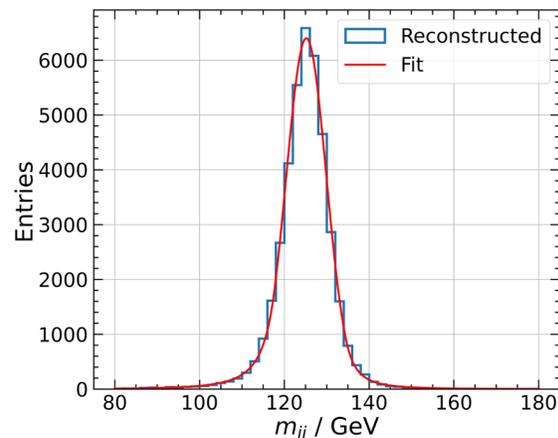


γ - π 区分能力:
簇射距离 > 10cm,
区分效率 ~ 100%

• 物理过程的重建



$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H, H \rightarrow \gamma\gamma$:
 $\sigma(m_{\gamma\gamma}) = 0.57 \text{ GeV}$

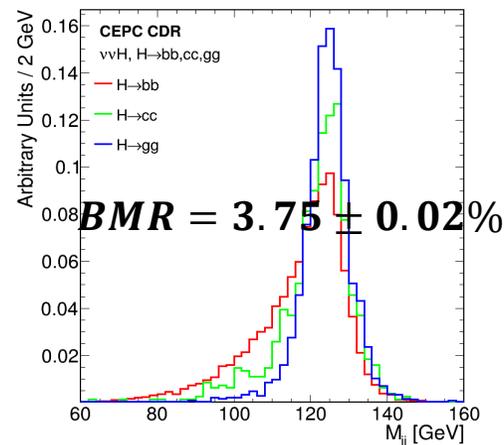
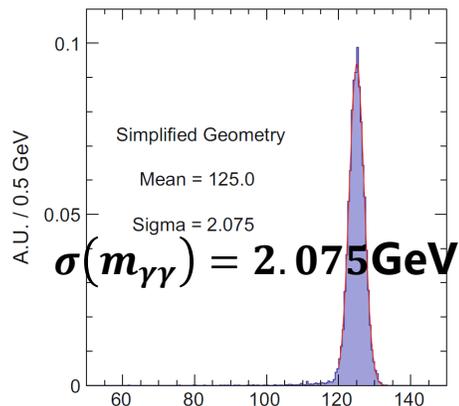
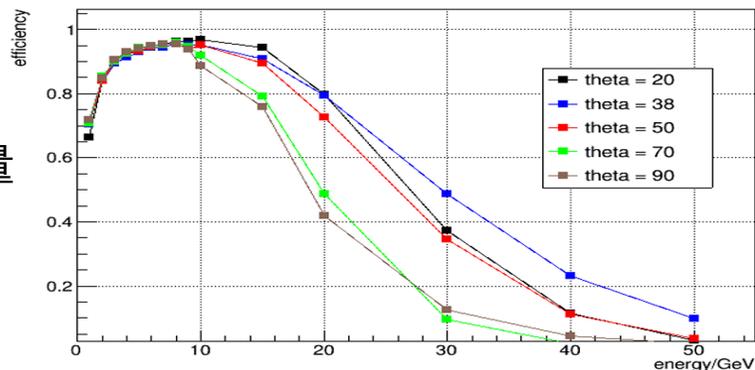


$e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}H, H \rightarrow gg$:
 $m_{jj} = 124.6 \pm 4.8 \text{ GeV}$
 $\text{BMR} = 3.82 \pm 0.03\%$

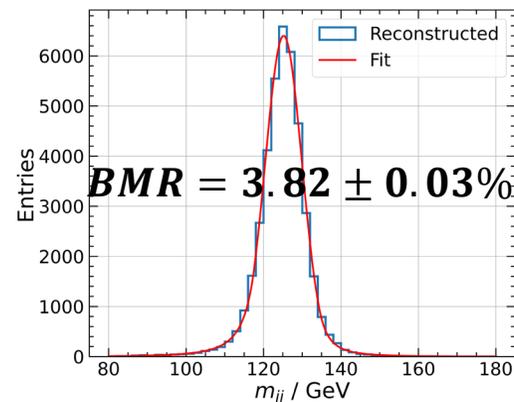
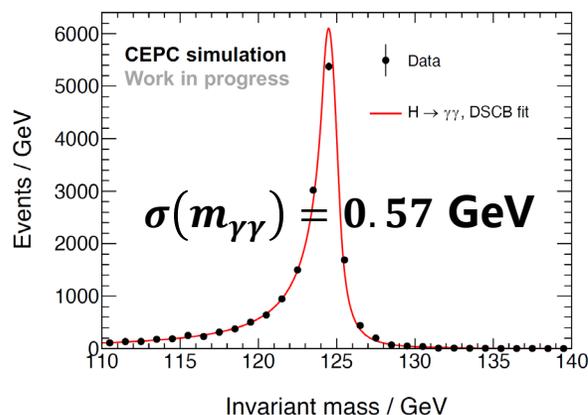
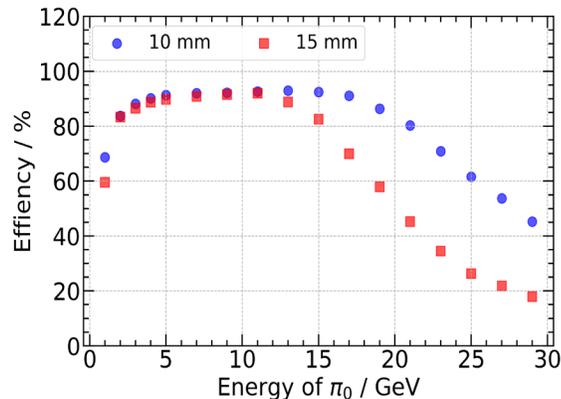
**满足物理要求,
验证了长条形晶体电磁量能器方案的可行性!**

CyberPFA 与取样型量能器重建性能对比

硅-钨取样型量能器重建性能



晶体全吸收量能器 + CyberPFA 重建性能



π^0 识别效率

得益于先进的模式识别技术，CyberPFA 对高能 π^0 有着更高的识别效率

$H \rightarrow \gamma\gamma$ 过程 $m_{\gamma\gamma}$ 分布

晶体量能器有着更好的本征能量分辨， H 重建不变质量分辨更小

$H \rightarrow gg$ 玻色子质量分辨(BMR)

CyberPFA 玻色子质量分辨接近 CRD 水平 (暂未考虑端盖量能器)



博士后研究计划



中国科学院高能物理研究所

Institute of High Energy Physics Chinese Academy of Sciences

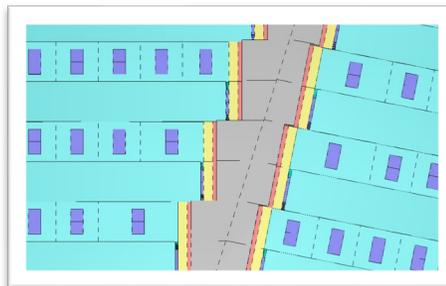
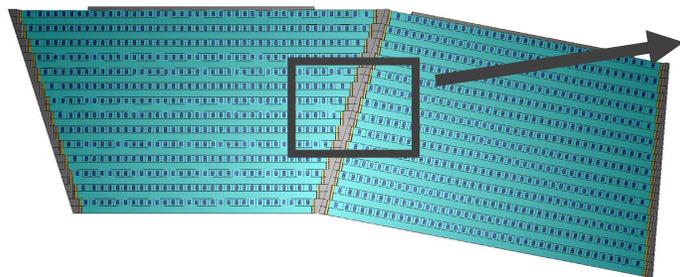
CyberPFA 进一步开发与优化

- CyberPFA已拥有优异的性能，但仍需进一步完善，并且有较大优化空间
- 算法的完善与优化方向
 - 端盖量能器的重建算法已初步完成，需要进一步优化以提高性能。
 - 强子簇射碎片的处理需进一步优化
 - 端盖量能器与桶部量能器簇射的连接
- 预期目标：
 - 完成CyberPFA对全探测器重建算法的开发与性能优化
 - 给出不同物理过程的重建性能

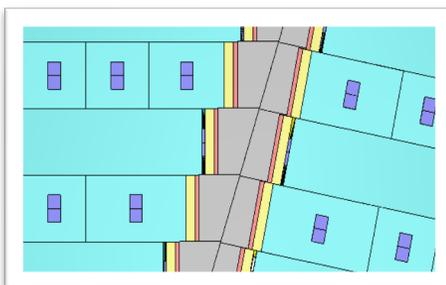
利用CyberPFA优化探测器设计

- 晶体尺寸对量能器设计与重建算法的影响(eg. 10mm→15mm)

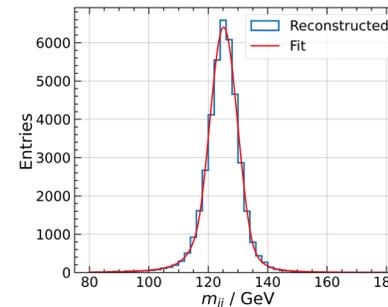
- 降低电子学通道数, 降低探测器造价
- 降低冷却系统与电子学等的设计压力
- 降低非灵敏区域的体积
- 重建算法更具挑战性



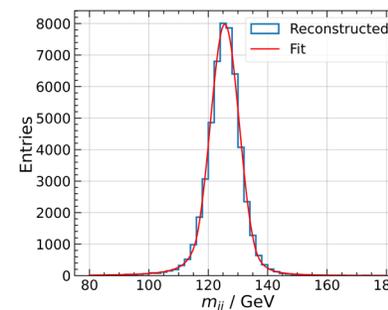
10mm×10mm



15mm×15mm



$$\text{BMR} = 3.82 \pm 0.03\%$$



$$\text{BMR} = 3.89 \pm 0.02\%$$

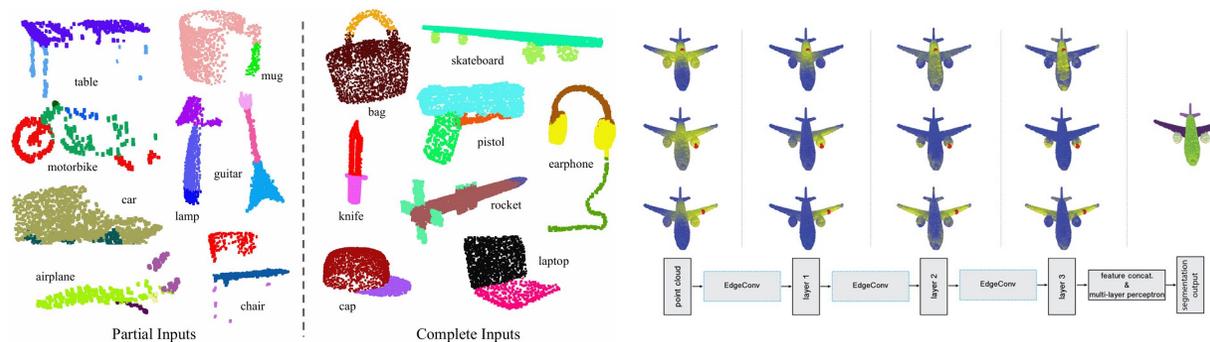
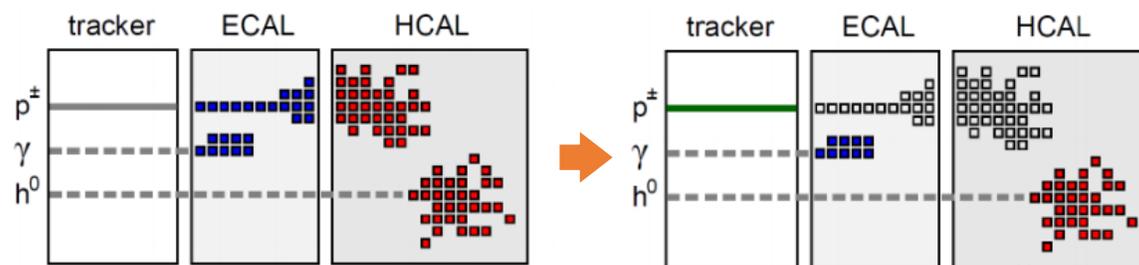
- 预期目标: 研究不同晶体尺寸下CyberPFA的性能, 优化量能器设计

开发基于机器学习的粒子流算法

- 为进一步发掘成像量能器的性能潜力，通过引入机器学习技术，提升粒子流重建算法性能
- 量能器的击中 \rightarrow 三维空间中的点云，粒子流重建算法 \rightarrow 点云的分类与分割
- 借鉴工业界成熟的机器学习模型，将其应用到粒子流算法中

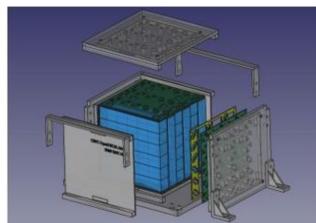
- [PointNet](#)
- [Dynamic Graph CNN](#)

- 预期目标：
 - 完成对简单物理对象（例如光子）和简单物理过程（如 $H \rightarrow \gamma\gamma$ ）的高效重建
 - 尝试将算法扩展到复杂物理过程（如喷注重建），进一步提升粒子流算法性能

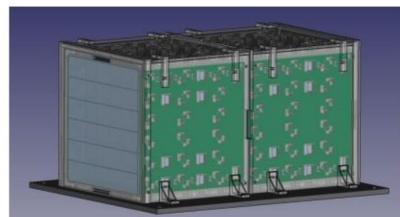


样机束流测试及数据分析

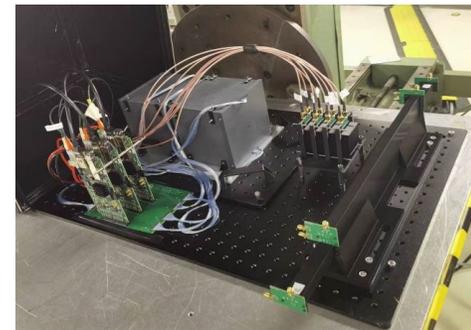
- BGO晶体量能器小型样机(12cm×12cm×12cm)已成功研制，并完成多次束流测试，取得重要成果



- First crystal module, 72 channels, $10.7X_0$
- First beamtest at CERN PS-T9(May, 2023)
- Main target: first module commissioning



- Second module, 144 channels, $21.4X_0$
- Beamtest at DESY TB22(Oct, 2023)
- Main goals: EM performance



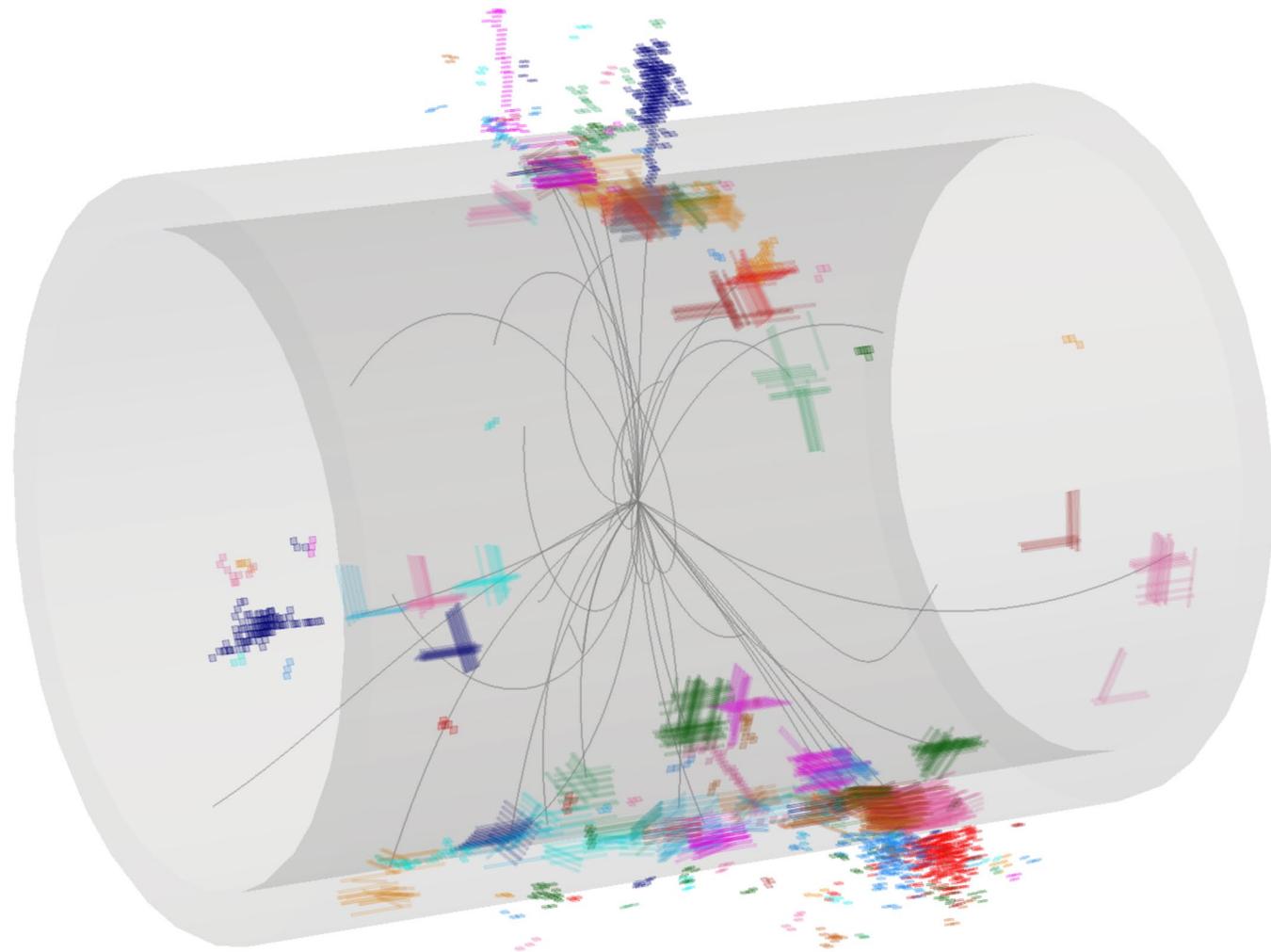
- 新样机的研制
 - BSO 晶体小尺寸样机
 - 全尺寸 (40*40*28cm) 的BGO晶体技术样机研制
- 束流测试及宇宙线测试，并对实验数据进行分析
- 预期目标：
 - 确定量能器的关键参数（例如能量分辨、能量线性与时间分辨）

时间安排

- **2025/07 - 2025/12:** 完成 CyberPFA 对全探测器的重建算法的开发，给出重建性能。
- **2026/01 - 2026/06:** 进一步优化CyberPFA，并提供针对不同物理过程的重建性能。
- **2026/01 - 2026/06:** 尝试将机器学习引入粒子流重建算法，并为简单物理对象提供重建性能。
- **2026/07 - 2027/06:** 深入研究机器学习在粒子流算法中的应用，并为喷注等复杂物体的重建提供初步结果。
- **2025/07 - 2026/12:** 参与晶体量能器的样机研制，束流测试及分析实验数据，确定量能器关键参数

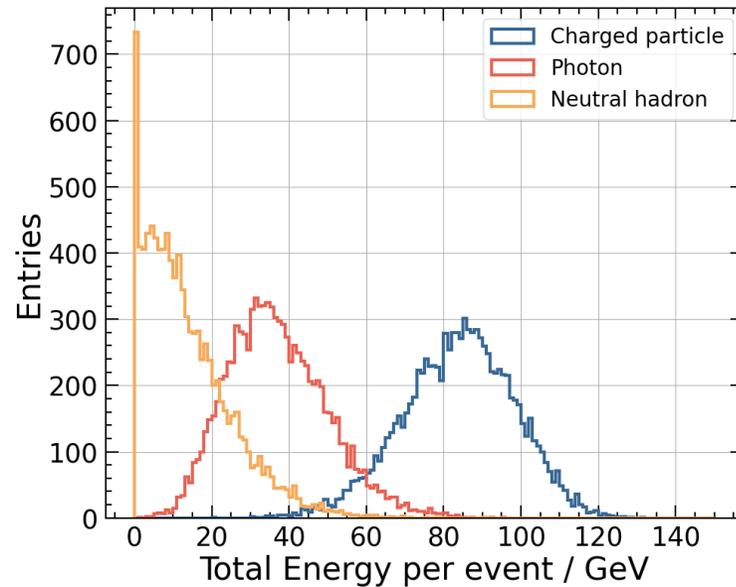
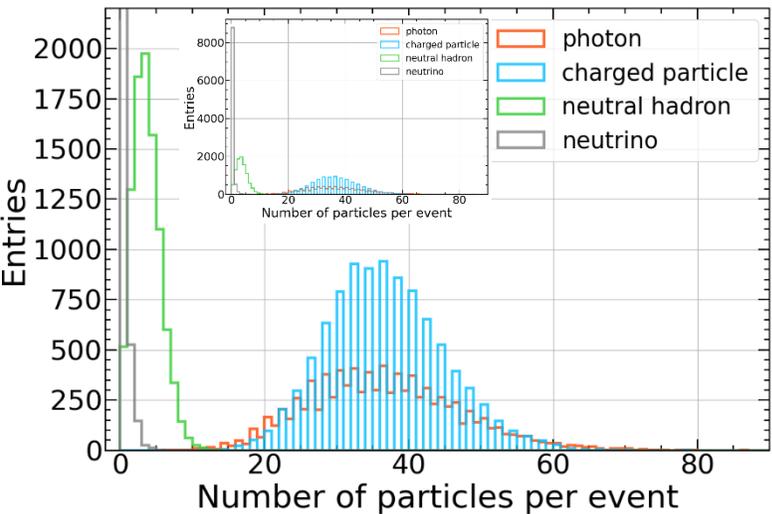
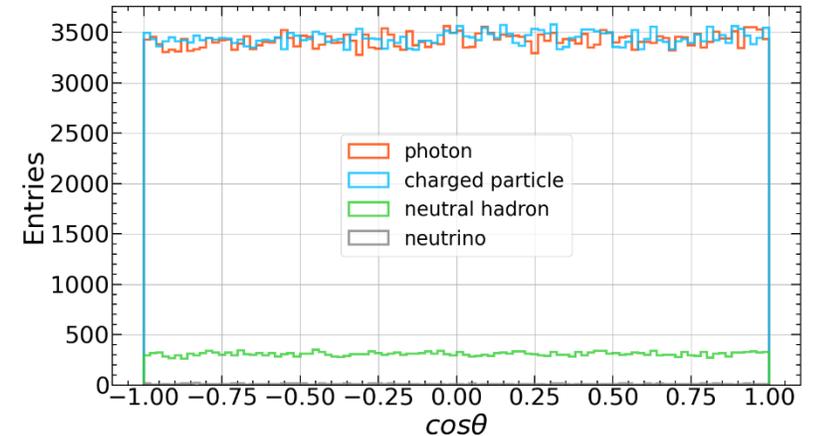
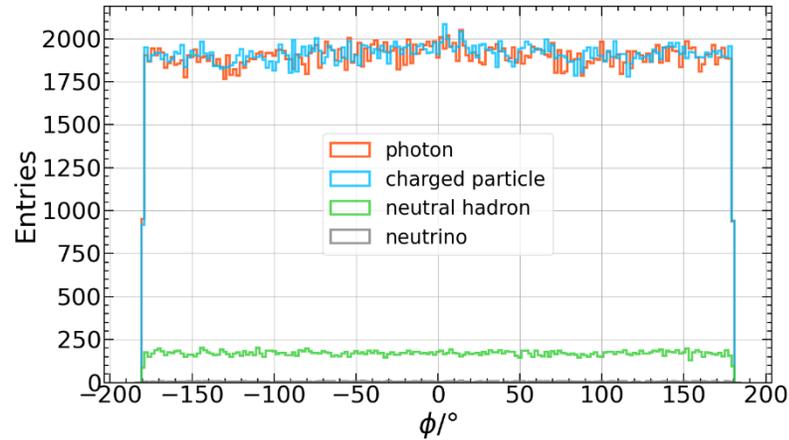
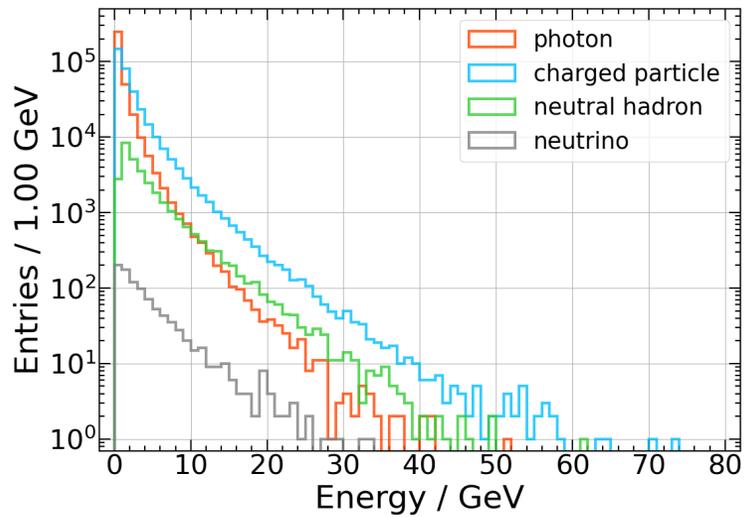


Backup

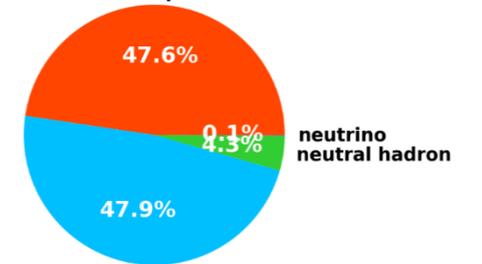


中国科学院高能物理研究所
Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

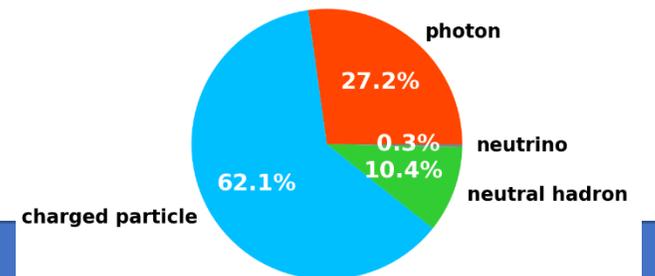
$H \rightarrow gg$ MC information



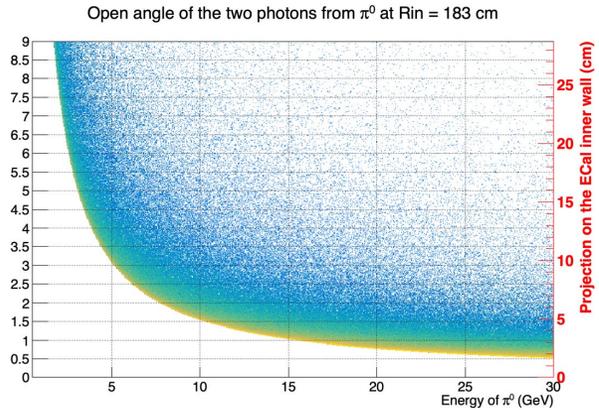
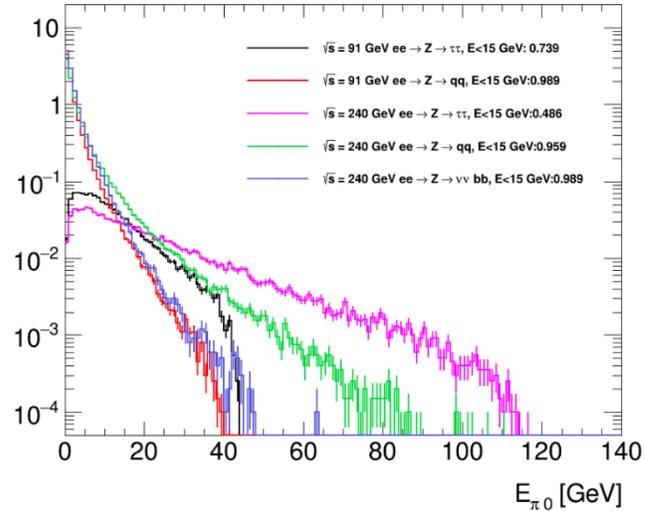
number of particles
photon



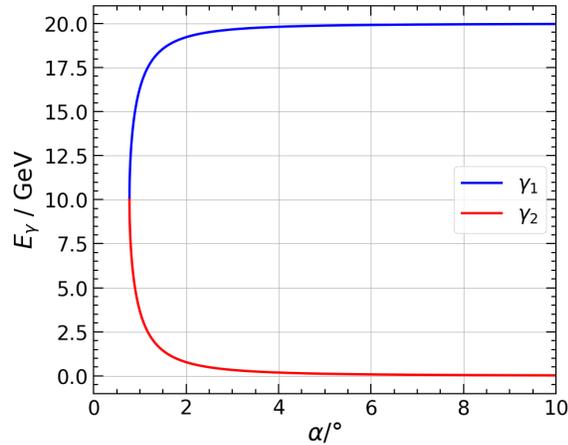
Energy of particles



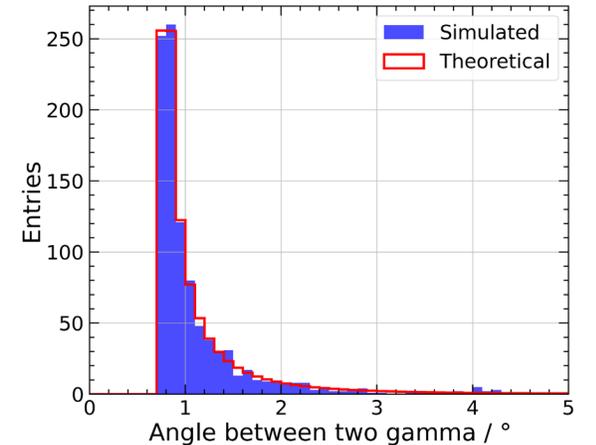
π^0 Dynamics



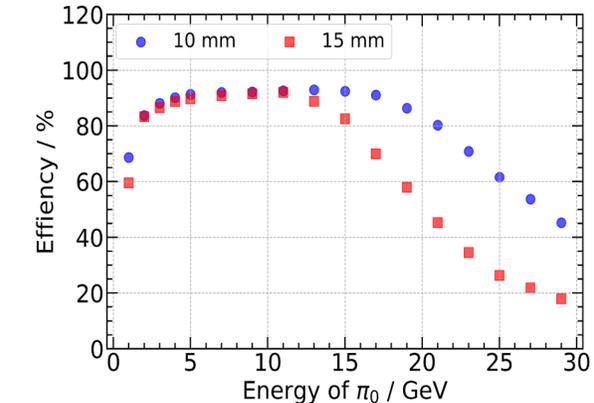
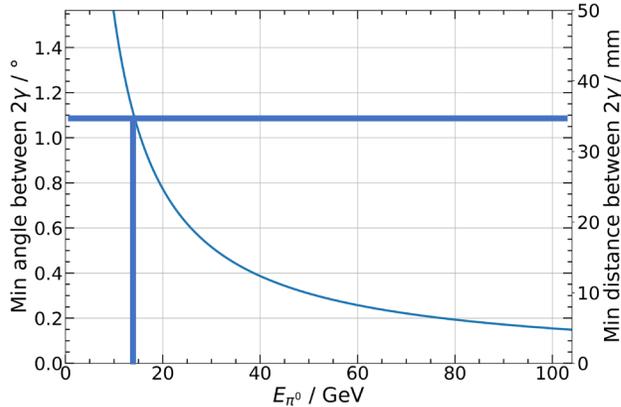
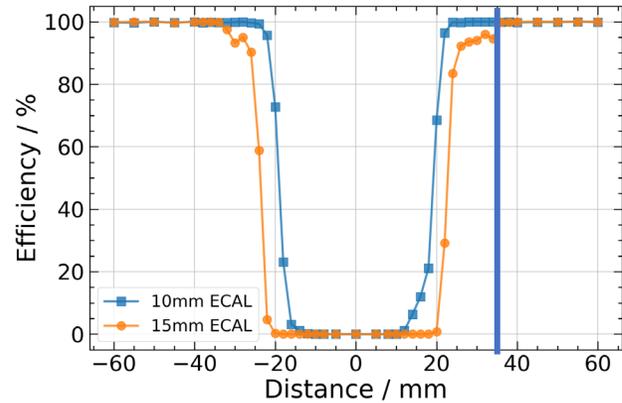
随着 E_{π^0} 增大，两光子夹角 α 减小



20 GeV π^0 两光子能量与夹角的关系



两光子的夹角主要分布在最小角度附近



对于15mm尺寸 ECAL，当两光子距离 $< 35\text{mm}$ 时，区分效率开始下降。

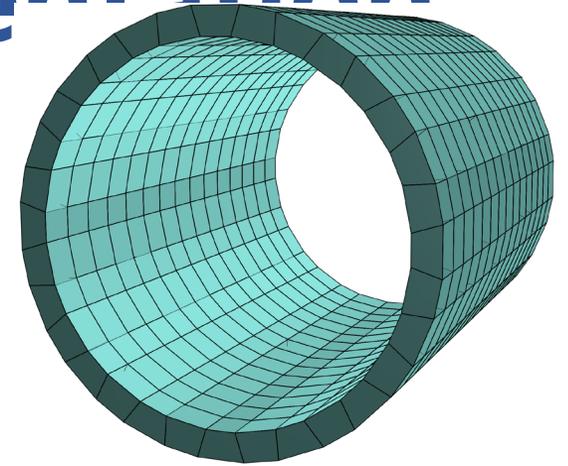
对应 $\sim 15\text{GeV}$ π^0 衰变的两光子的距离， π^0 效率从 $\sim 15\text{GeV}$ 开始下降，与双光子区分效率的结果一致

高能 π^0 衰变的两个光子距离过近，被重建成一个 cluster

高能 π^0 识别的核心问题：

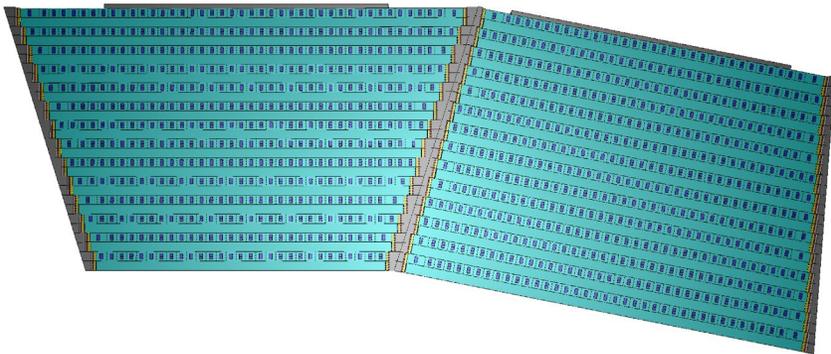
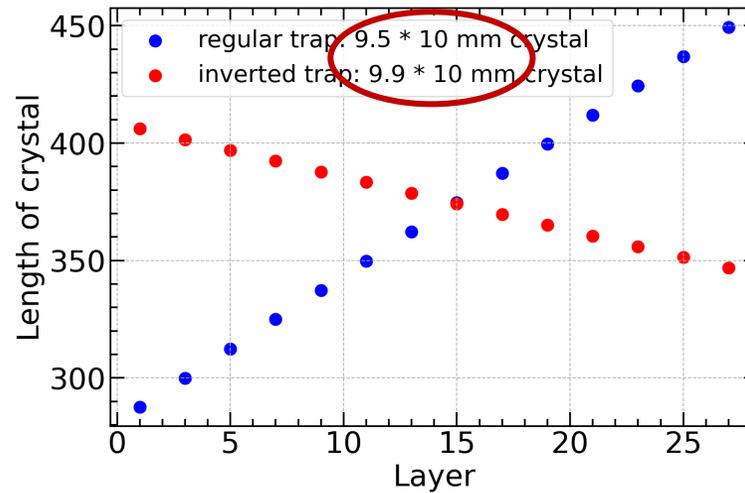
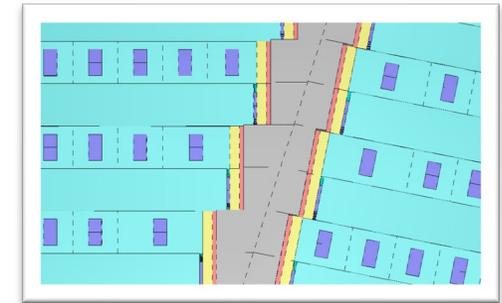
判断一个 cluster 是单光子簇射还是两个相邻光子的簇射

Crystal ECAL barrel implementation



- **Crystal ECAL barrel geometry is implemented in CEPCSW with DD4HEP**

- 23.7 & 24.8 X_0 for 2 types of module, 28 layers, 30 types of bars
- Realistic: wrapping, electronic boards, cooling and mechanical supporting.

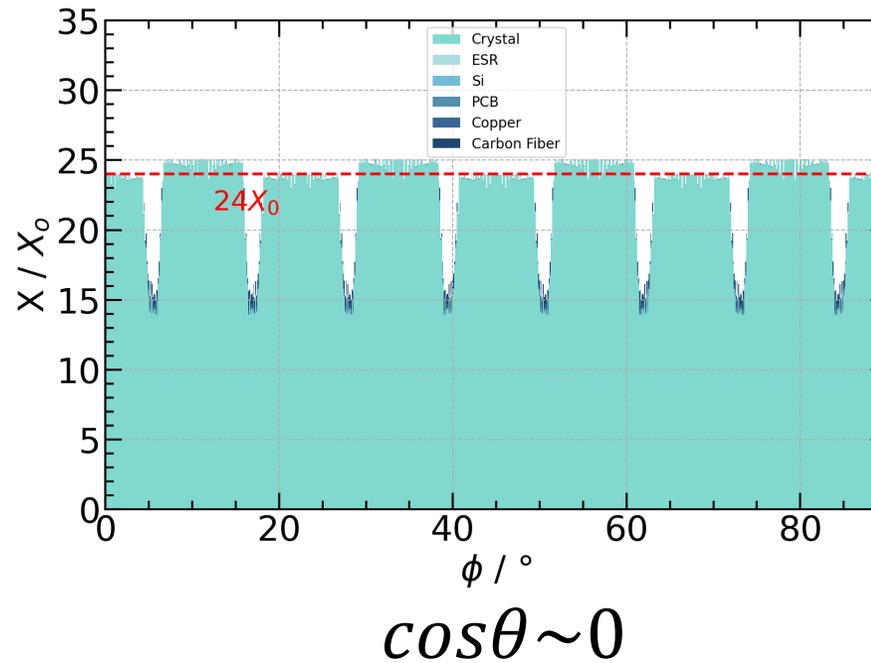
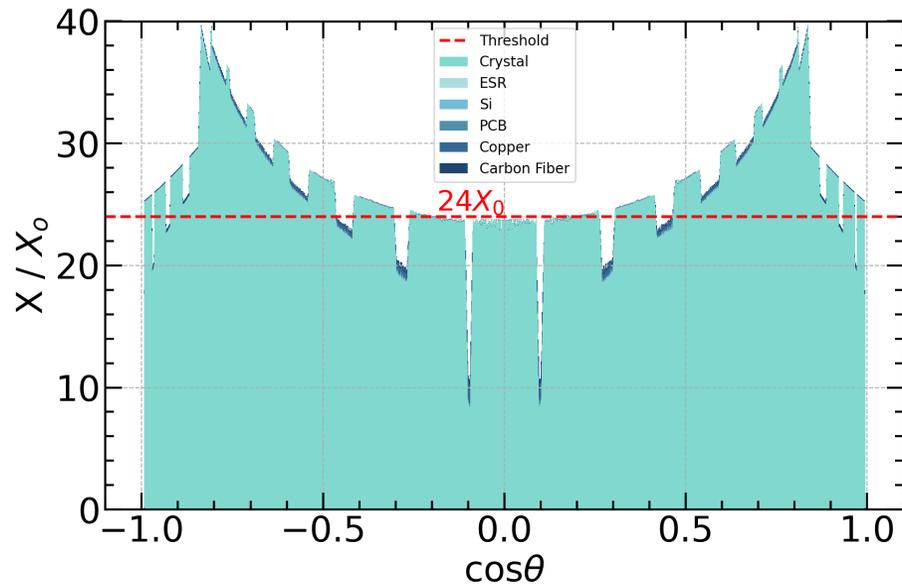
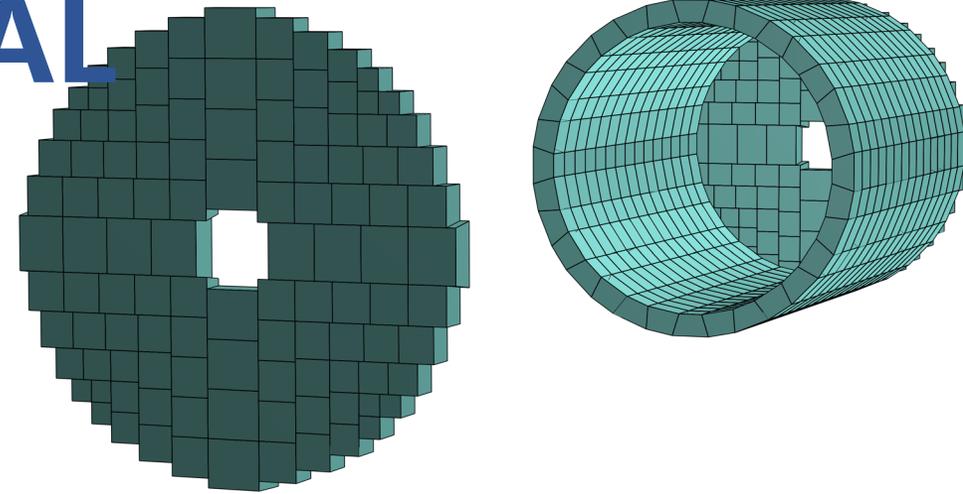


Mechanics is continuously optimized.
Dominant dead material included.

Geometry	Size / mm	Material
Supporting ¹	2.5	carbon fiber
Cooling ²	1	copper
Electronics front end ³	1.2+1	PCB+ASIC
Electronic back board ⁴	10	PCB
Electro-optical device ⁵	3*3*0.8	SiPM
Wrapping ⁶	0.1	ESR
Crystal ⁶	~10*10*400	BGO

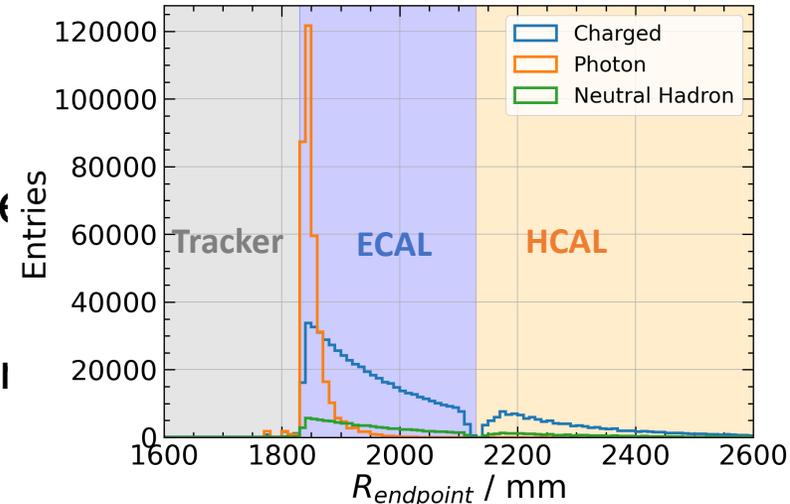
Material Budget of ECAL

Meets the requirement of $> 24X_0$ except at $\cos\theta \sim 0$

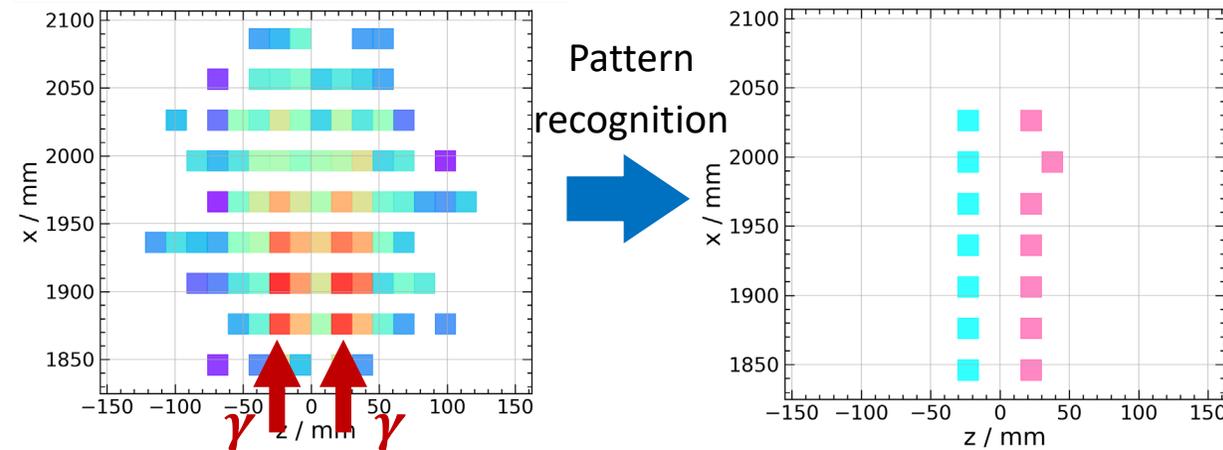


Shower overlap

- Confusion caused by shower overlap from nearby particles
- Pattern recognition
 - Photon shower: compact energy core \rightarrow Hough transformation
 - Charged particle: track matching
- Energy splitting using lateral profile of EM shower

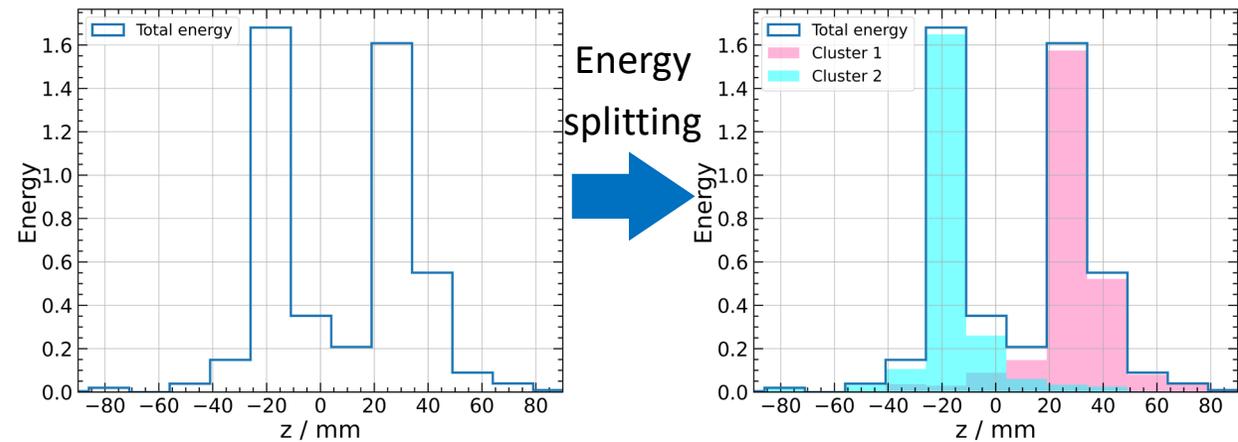


Radius of end-point of particles in jets
 $\sim 2/3$ hadrons shower in ECAL



Energy distribution of two overlapped photon

Energy cores of the two photon showers



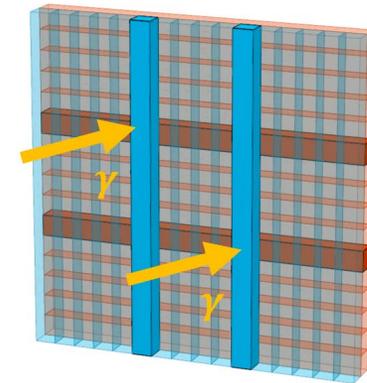
Lateral energy distribution of two overlapped photon

Lateral energy distribution after energy splitting

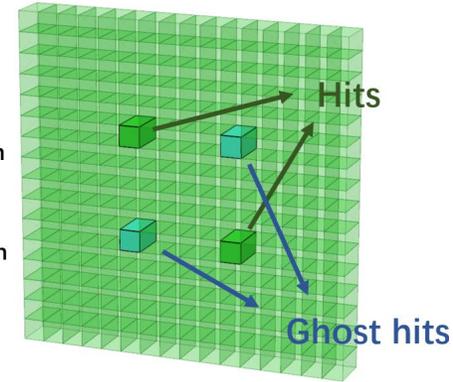
Ambiguity problem



- Multiple particles incident in one module arises the ambiguity problem
- Severe in jet events (~5 particles in one module per jet event)
- Matching horizontal and vertical clusters by utilizing energy & time information



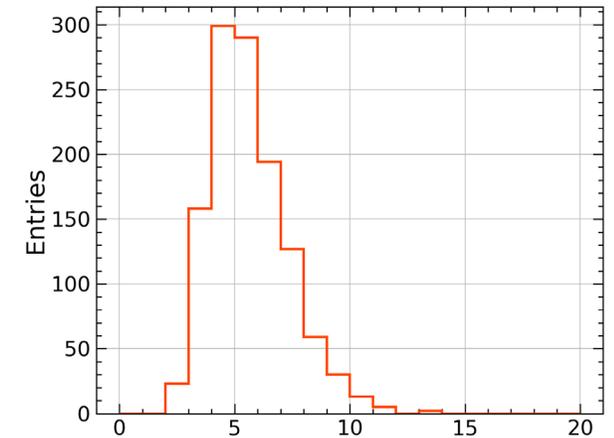
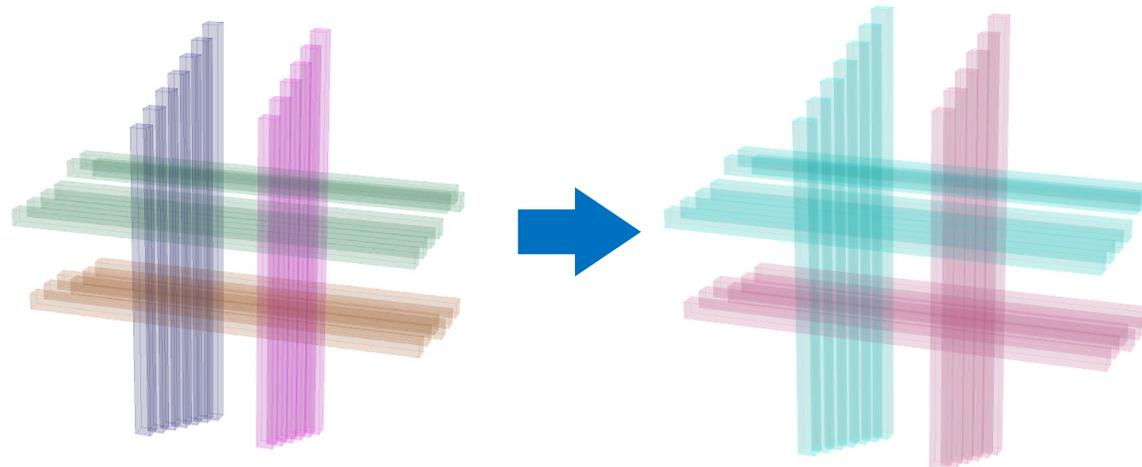
Reconstruction
 Cross-location



$$\chi_E^2 = \frac{(E_X - E_Y)^2}{\sigma_E^2}$$

$$\chi_T^2 = \frac{(Z_T - Z_Y)^2}{\sigma_S^2 + \sigma_{Z(t)}^2}$$

$$\chi_{point}^2 = \chi_E^2 + \frac{1}{2}(\chi_{Tx}^2 + \chi_{Ty}^2)$$



Number of particles in hottest module for $ee \rightarrow ZH \rightarrow qqg$ process