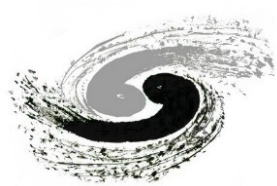


CEPC晶体电磁量能器

刘勇(高能所), 代表CEPC电磁量能器团队
2025年7月21日



CEPC探测器技术设计报告(TDR)：量能器技术方案

- 高颗粒度量能器技术

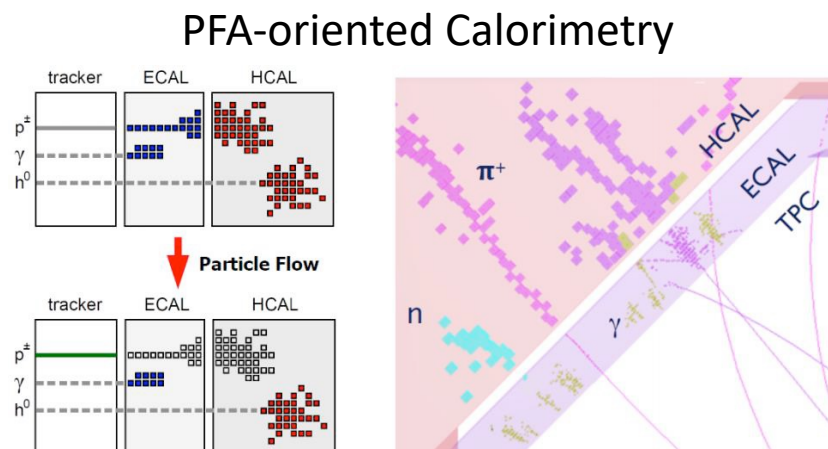
- 玻色子能量分辨(BMR): 3 – 4 %
- 围绕CEPC TDR，采用了量能器的全新方案
- 显著提升电磁、强子能量分辨

- 电磁量能器

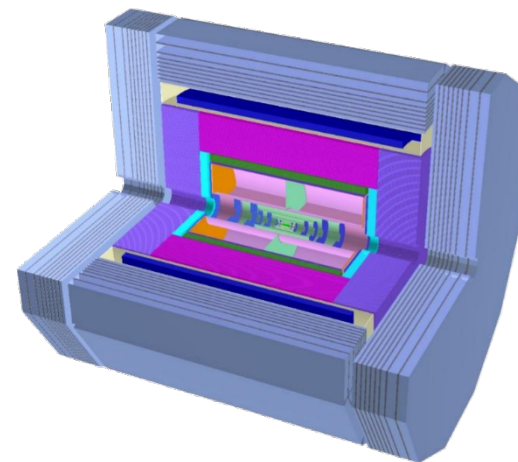
- 闪烁晶体方案: 3D空间位置分辨、时间分辨
- 电磁能量分辨: 由 $\sim 16\%/\sqrt{E}$ (CEPC-CDR)提升至 $\sim 3\%/\sqrt{E}$

- 强子量能器

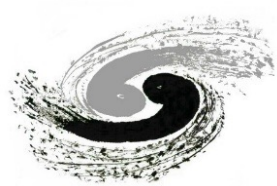
- 闪烁玻璃方案: 取样型量能器
- 强子能量分辨: 由 $\sim 60\%/\sqrt{E}$ (CEPC-CDR)提升至 $30\% \sim 40\%/\sqrt{E}$



CEPC Reference Detector



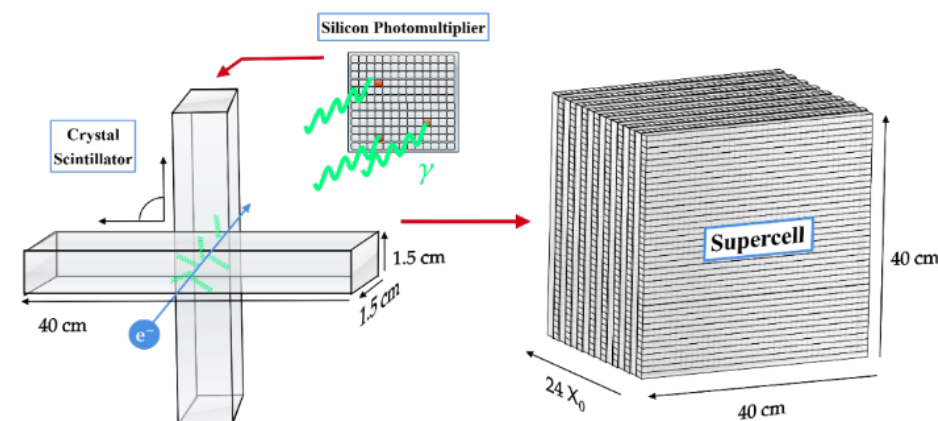
Calorimeters: crystal ECAL and ScintGlass HCAL



CEPC 晶体电磁量能器

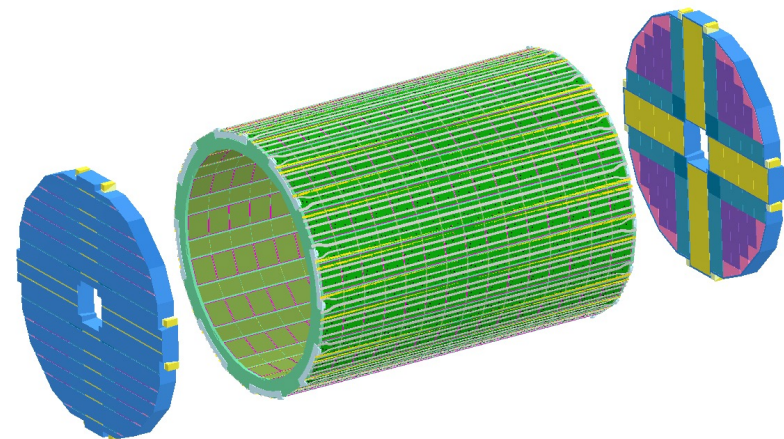
□全吸收型量能器：基于闪烁晶体

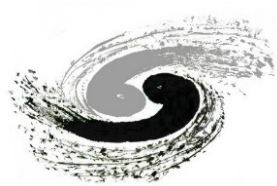
- 世界上首个高颗粒度的晶体电磁量能器（全吸收型）
- 最优的电磁能量分辨: $\sigma_E/E < 3\%/\sqrt{E}$
- 适用于粒子流算法，玻色子能量分辨(BMR): 3 – 4 %



□共需24m³ BGO晶体

- 典型晶体尺寸: 15×15×~400 mm
- 桶部: 480 个模块 (41万个读出通道, ~17.9 m³ 闪烁晶体)
- 端盖: 224 个模块 (16万个读出通道, ~6.3 m³ 闪烁晶体)





CEPC 晶体电磁量能器：闪烁晶体

□ 闪烁晶体

- 本征光产额: ≥ 2000 photons/MeV
- 密度: ≥ 6 g/cm³
- 晶体生长和机械加工：30–60 cm 长条
- 闪烁发光的时间常数: ≤ 300 ns

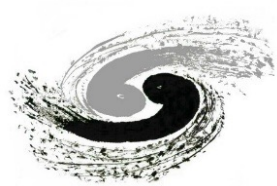
Crystal	Density (gcm ⁻³)	Radiation length (mm)	Decay constant (ns)	Peak emission (nm)	Refractive index n	Relative light output
BSO	6.80	11.5	~ 100	480	2.06	0.04
BGO	7.13	11.2	~ 300	480	2.15	0.15

□ CEPC ECAL闪烁晶体的基准方案：BGO

- 成熟的量产技术: L3实验BGO量能器(1980年代)，医学成像PET应用等
- 成功验证的长条晶体生长工艺：DAMPE卫星的BGO晶体量能器

□ 备选方案：BSO

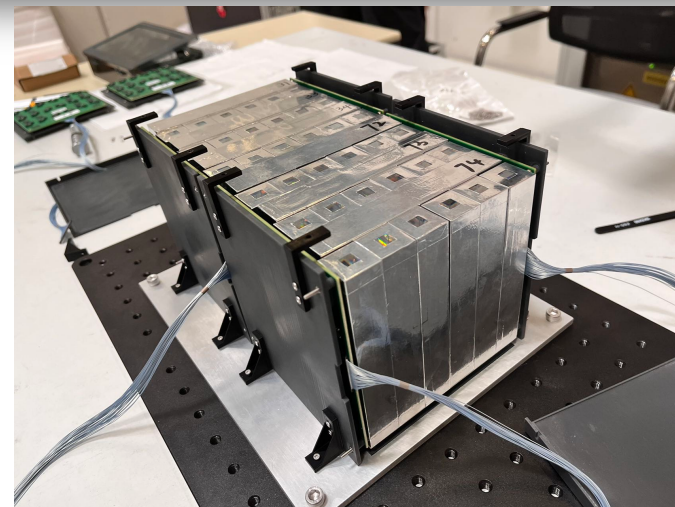
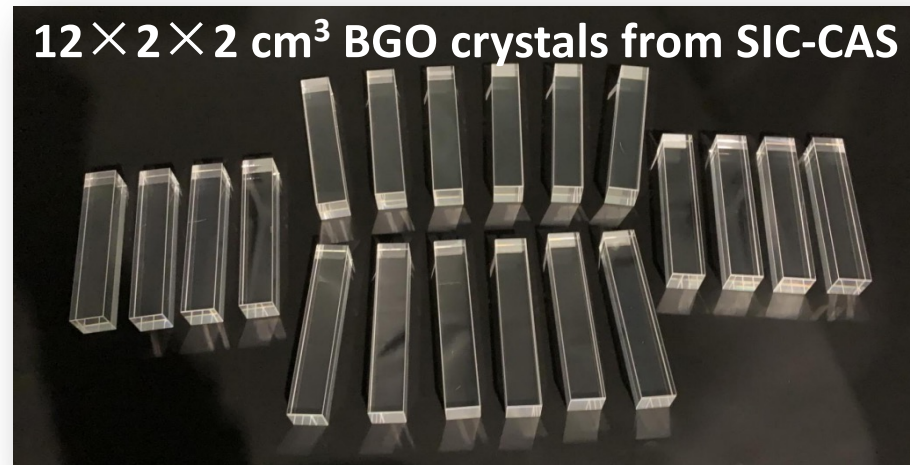
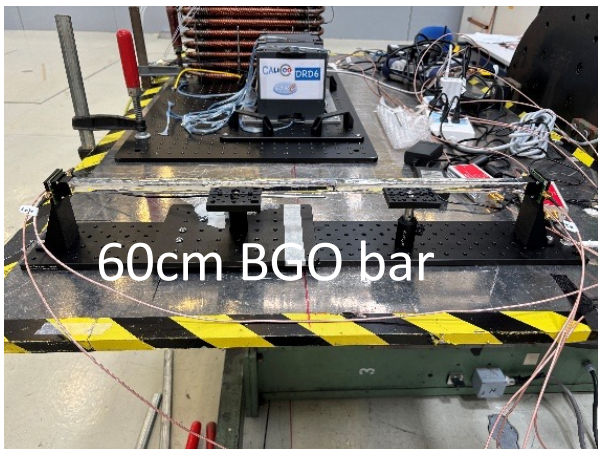
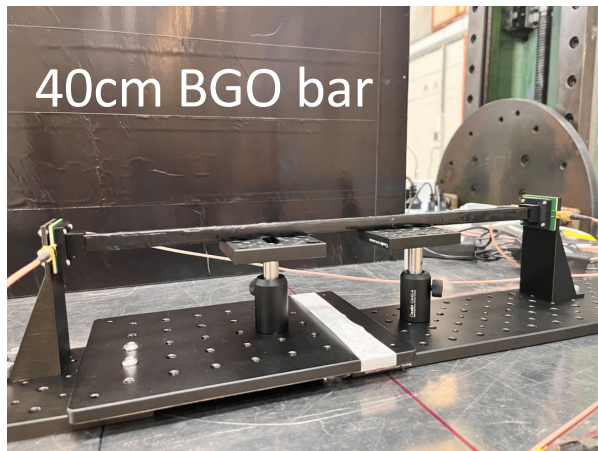
- 有潜在的成本优势，但面临生长工艺、量产技术等多方面技术挑战

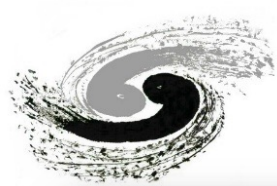


CEPC 晶体电磁量能器：样机和束流测试

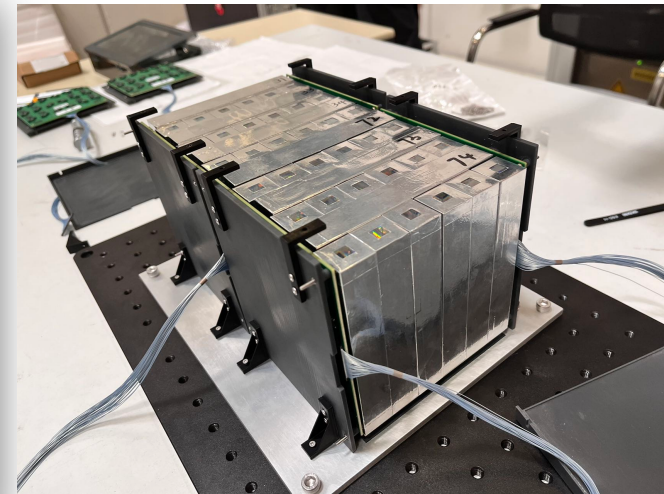
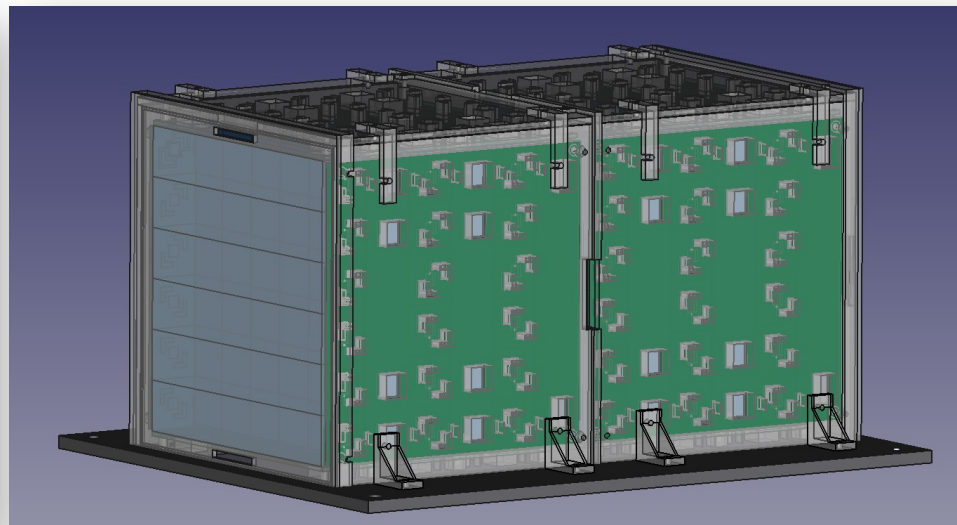
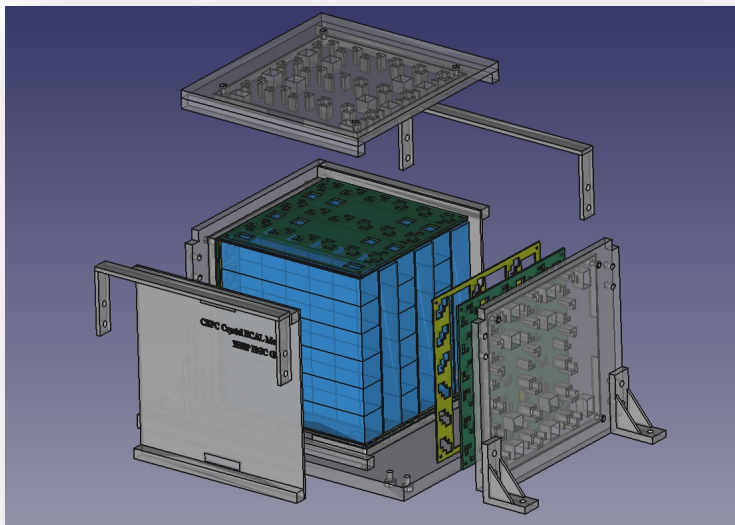
□ 基于BGO晶体，完成物理样机的建造和多次束流实验

CERN beamtest in Jul. 2024



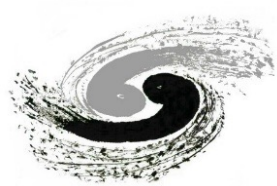


晶体电磁量能器：样机的机械设计



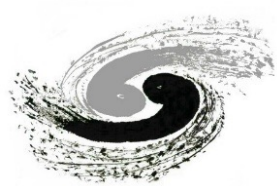
Observed significant deformation in 3D-printed structures in the long run

- 晶体量能器样机：机械设计上的一些考虑
 - 晶体重量(密度 $\sim 7\text{g/cm}^3$) 不能加载在电子学读出板上
 - 电子学读出板上设计的孔洞：为晶体的支撑结构预留
 - 机械支撑结构(晶体、读出板)需要同时实现低物质质量和高强度
 - 晶体模块安装/集成：需考虑各部分的公差累计(晶体加工、包装，读出板等)
- 晶体量能器的全尺寸模块：集成度更高、更复杂
 - 更大尺寸的晶体（典型长度40厘米），电子学芯片/读出板、冷却系统的集成（空间有限）



晶体量能器：技术挑战

- 高颗粒度量能器
 - 读出通道多，设计紧凑：用于系统集成（支撑、线缆、冷却）的空间极其有限
- 闪烁晶体
 - 密度高、易碎：需要保护以确保安装期间的安全性和安装后的长期稳定性
- 优异的能量分辨率
 - 对非灵敏物质质量极为敏感：机械支撑材料需要保证低物质量、高机械强度
 - 对温度控制较为敏感：散热系统需要实现较低的温度梯度和较高的温度稳定性



晶体电磁量能器：工作计划

- 围绕TDR时间线，电磁量能器的工作计划
 - 探测器设计/优化：重建算法优化，样机束流测试的数据分析
 - 本底模拟：估计事例率、辐照本底（重点：桶部/端盖量能器的设计 $\leftrightarrow$ 模拟的几何）
 - 机械及冷却系统
 - 电磁量能器的整体结构：工程设计，模块的安装/集成
 - 电磁量能器机械支撑：机械强度和安全余量；建造的可行性、造价（相关调研）
 - 电磁量能器冷却系统：温度梯度、稳定性（需要与电子学配合）
 - 电磁量能器与其他子探测器的对接：外部径迹探测器(OTK), 强子量能器(HCAL)
 - ECAL/HCAL之间的连接和安装间隙: 线缆数量估计和排布，整体机械强度/形变等