

# CEPC探测器几何的模拟实现

傅成栋代表几何工作组  
(中国科学院高能物理研究所)  
CEPC机械设计研讨会  
河南洛阳, 2024年8月24日

# 报告提纲

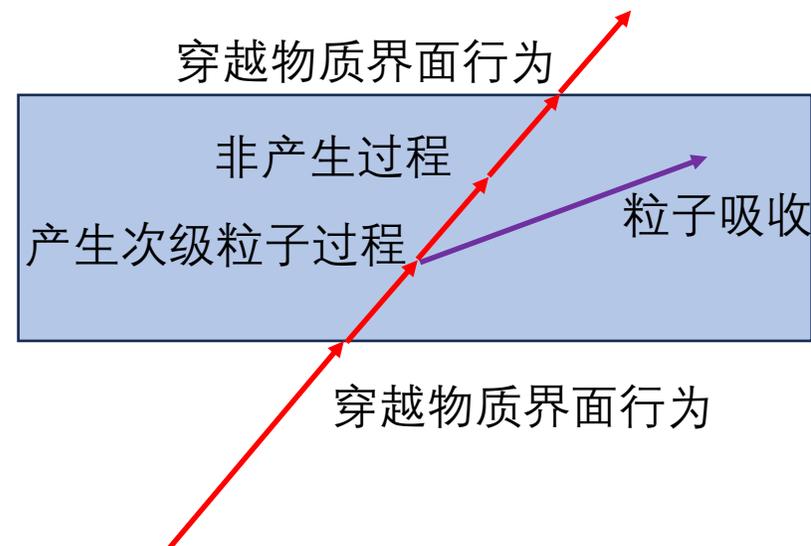
- 物理模拟简介
- CEPC探测器几何描述的进展
- CEPC探测器机械的物理模拟方案
- 小结

# 物理模拟

- 模拟是一种对真实事物或过程的虚拟（数字）表现，在多个领域中都有广泛的应用
  - 掷骰子：1-6的整型随机数抽样或者0-1随机数再均分6分
  - 粒子物理：不同物理类型反应的几率→反应类型→反应末态→粒子空间分布→探测器响应
- 通过模拟，预测和优化探测器的性能，减少实际测试实验的需求，从而降低成本和时间
- 在探测器建造完成后开展的对撞实验数据分析中，无论是物理过程反应截面的测量，还是对撞亮度的确定，仍然需要用到物理过程的模拟确定效率以及进行误差分析
  - $N = \bar{\epsilon}L\sigma = L \int \epsilon(\Omega) d\sigma(\Omega)$
  - $L = \frac{N}{\bar{\epsilon}\sigma}$

# 模拟工具Geant4

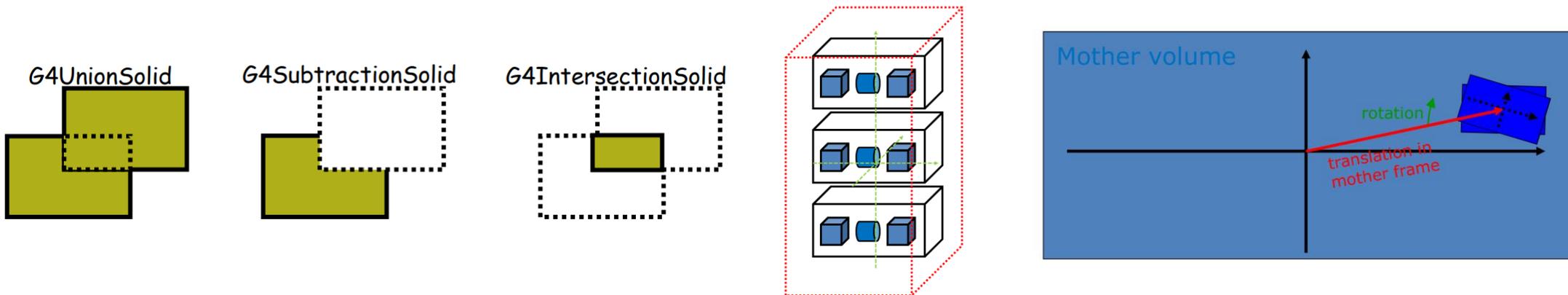
- Geant4 (Geometry and tracking: <https://geant4.web.cern.ch/>)作为模拟粒子穿越物质的工具广泛应用在多个领域
  - 高能物理
  - 核物理
  - 加速器物理
  - 医学
  - 空间科学
- 采用步进法依次计算粒子在物质中运输过程中的行为和结果
  - 物理过程：电离、衰变、吸收、散射等
  - 步长
  - 能损
  - 产生的次级粒子
- 对计算结果进行统计分析，可推测探测器响应，进一步预期探测器的性能
- 物质的描述决定了在预设模型下的对特定粒子的作用截面的计算
  - 一般地，设定物质的原子组份可以有效地计算粒子在物质中的行为
  - 预设模型由Geant4组通过大量实验数据提取并反复验证



# 模拟几何描述工具

## ■ Geant4自有几何描述接口可以满足通常的需要

- 实体Solid形状：构造实体几何表示法（Constructive Solid Geometry, CSG法）
  - ✓ 优点：与传统几何形状一致，复用、布尔操作构成复杂几何，子母操作构成递次结构
  - ✓ 缺点：与当前CAD的表面表示法无法直接引用



## ■ 多种Geant4模拟通用工具把经常使用的操作提取出来作为通用界面，方便用户修改探测器设置

- Mokka：CEPC概念设计报告研究采用
- DD4hep：当前采用

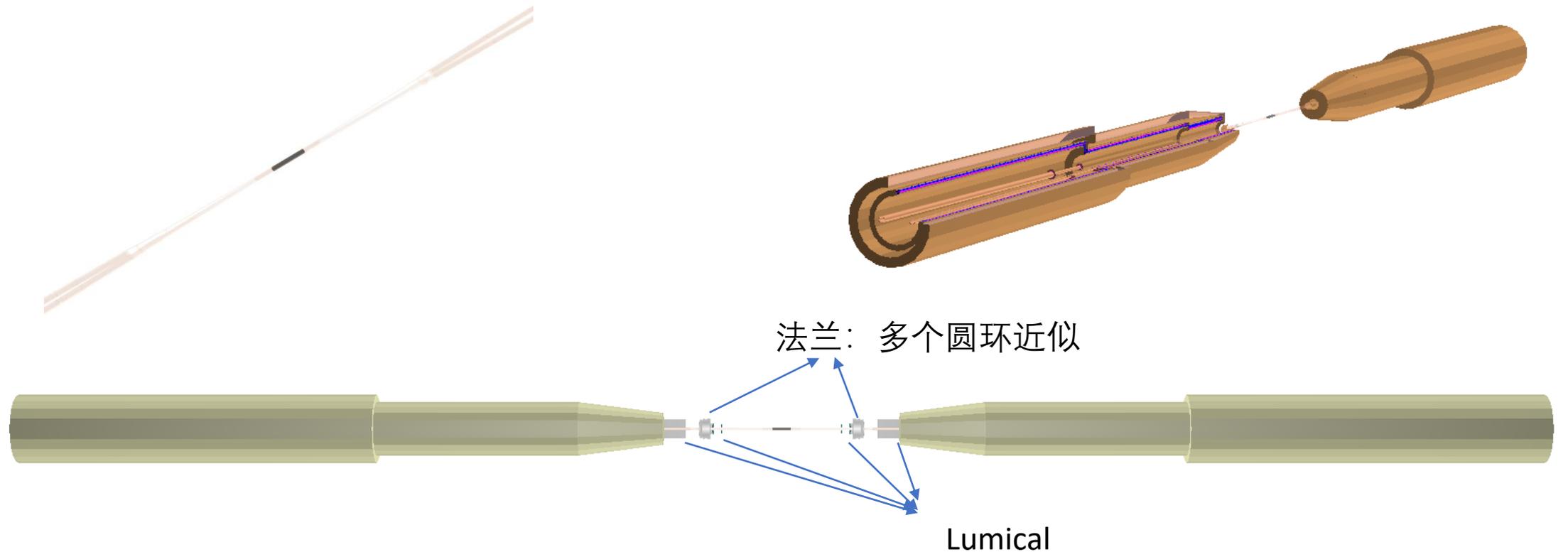
# 几何的显示

- Phoenix <https://cepcvis.ihep.ac.cn/#/> 开发中
- 当前可以采用ROOT对GDML文件的画图功能
  - DD4hep命令geoDisplay直接显示
  - DD4hep命令geoConverter转换成root文件再画图
  - 缺点：表面容易有阴影，细节太多会造成超时
  - 解决办法：根据展示需要对部分细节进行隐藏、对过薄的结构进行加厚显示
- 颜色的调配
  - DD4hep的c++构造函数中预设颜色参数
  - 在xml配置文件里根据相邻结构进行调配



# 束流管、加速器磁体和亮度探测器

- 加速器TDR的束流管和磁铁方案
- Si-晶体复合亮度探测器几何：南京大学、中央研究院物理研究所
- 现有几何的本底模拟研究表明对本底影响较大，需要紧密跟踪方案的变化

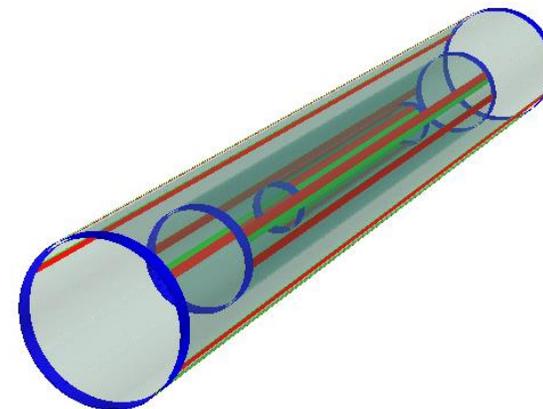
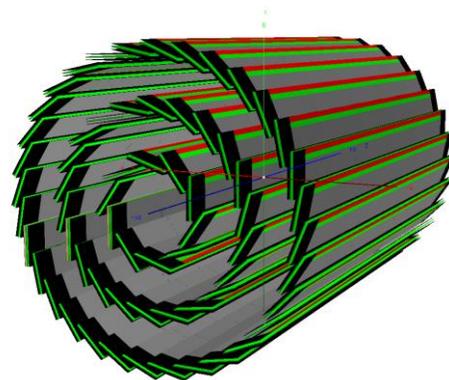


# 顶点探测器 (VTX)

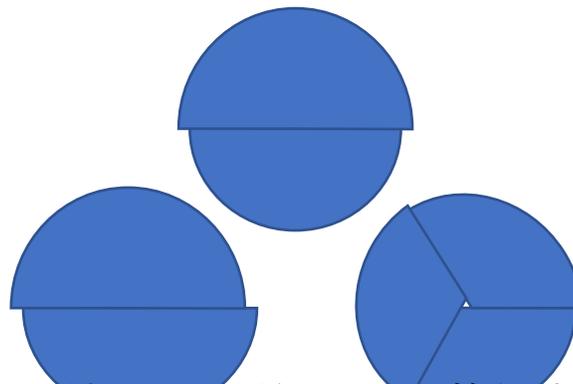
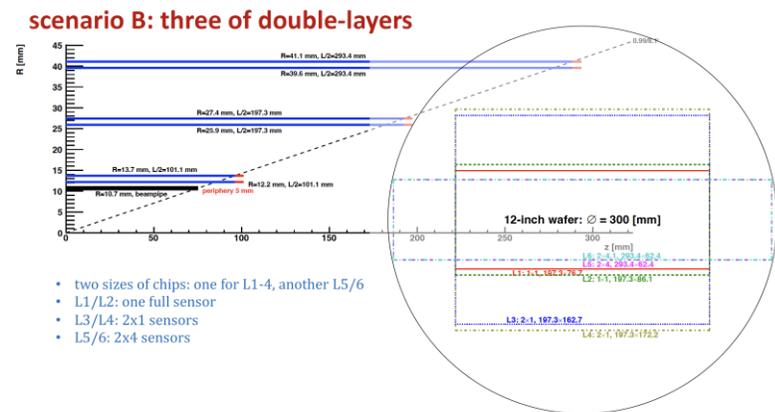
- 从概念设计报告时的类ILD顶点探测器几何到MOST2再到stitching技术方案的演变



CDR vertex



- 完成stitching几何的构建，后期需要形成复合构型



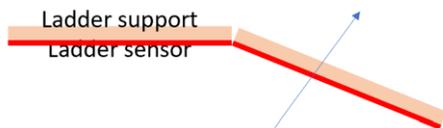
基于配置的几何调整能力

TL	Electronics	Electronics	Electronics	TR
L-drive	$r$ by $s$ PIXELS	$r$ by $s$ PIXELS	$r$ by $s$ PIXELS	R-drive
L-drive	$r$ by $s$ PIXELS	$r$ by $s$ PIXELS	$r$ by $s$ PIXELS	R-drive
BL	Readout	Readout	Readout	BR

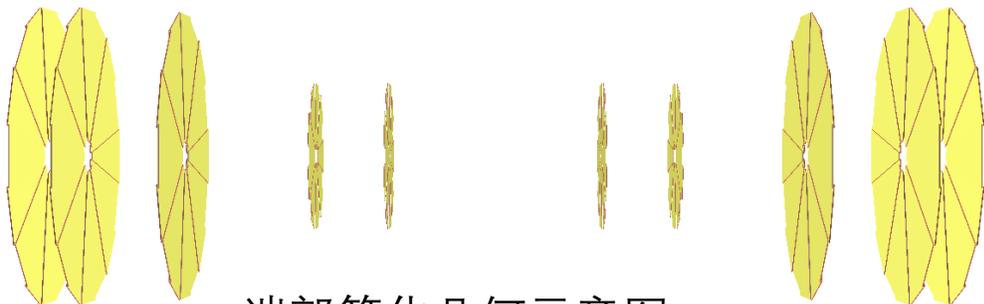
# 内部径迹探测器 (ITK)

## 从简化几何到精细结构的演化

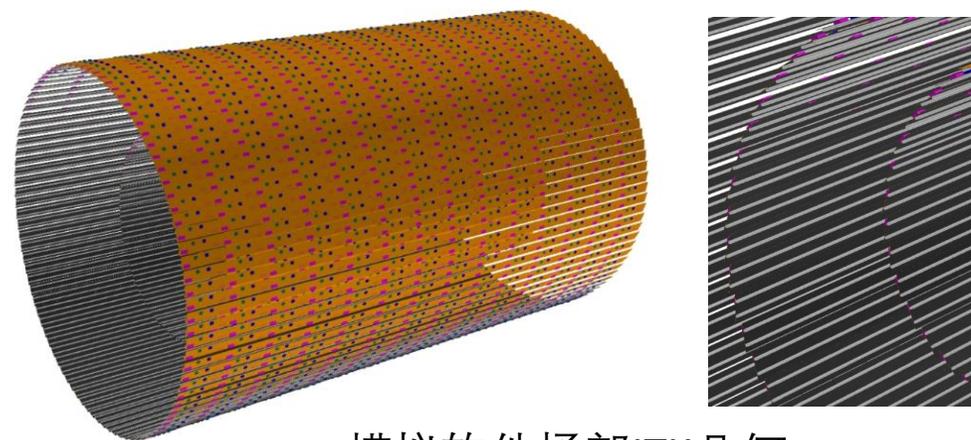
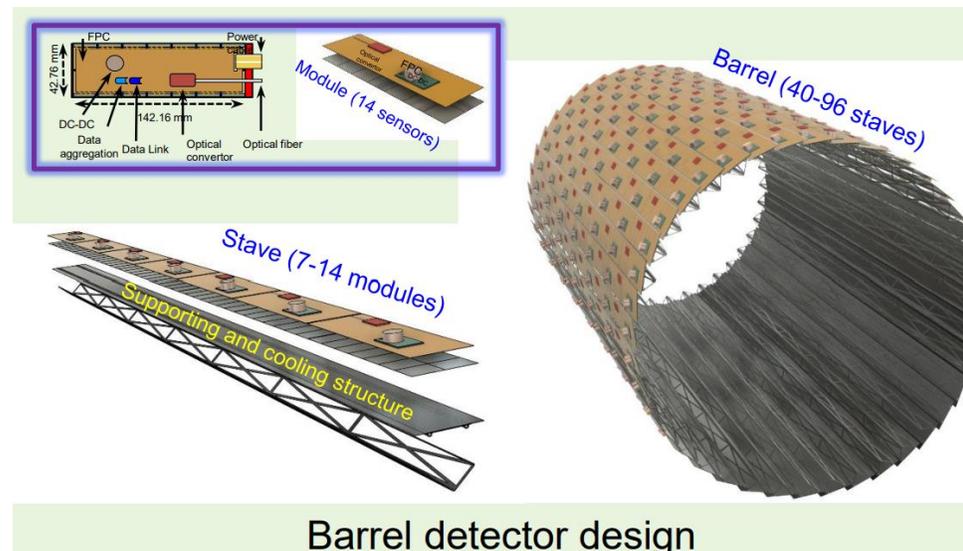
- 桶部：完成模组、冷却
- 端部：进行中



早期简化几何局部示意图



端部简化几何示意图

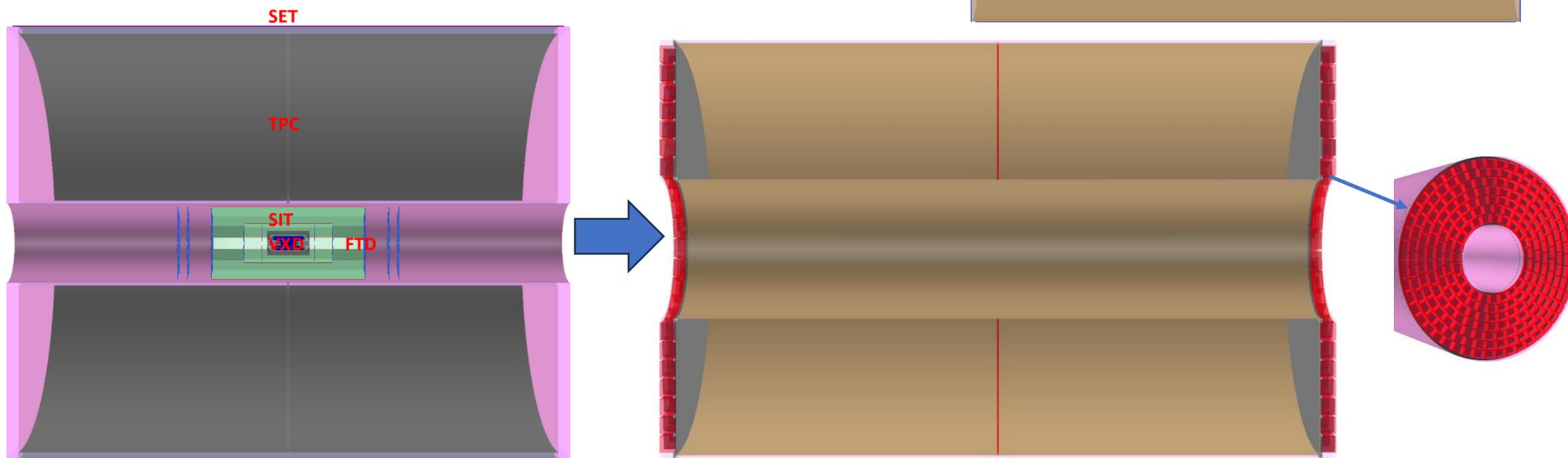


# 气体探测器 (TPC和DC)

■ DC

■ TPC

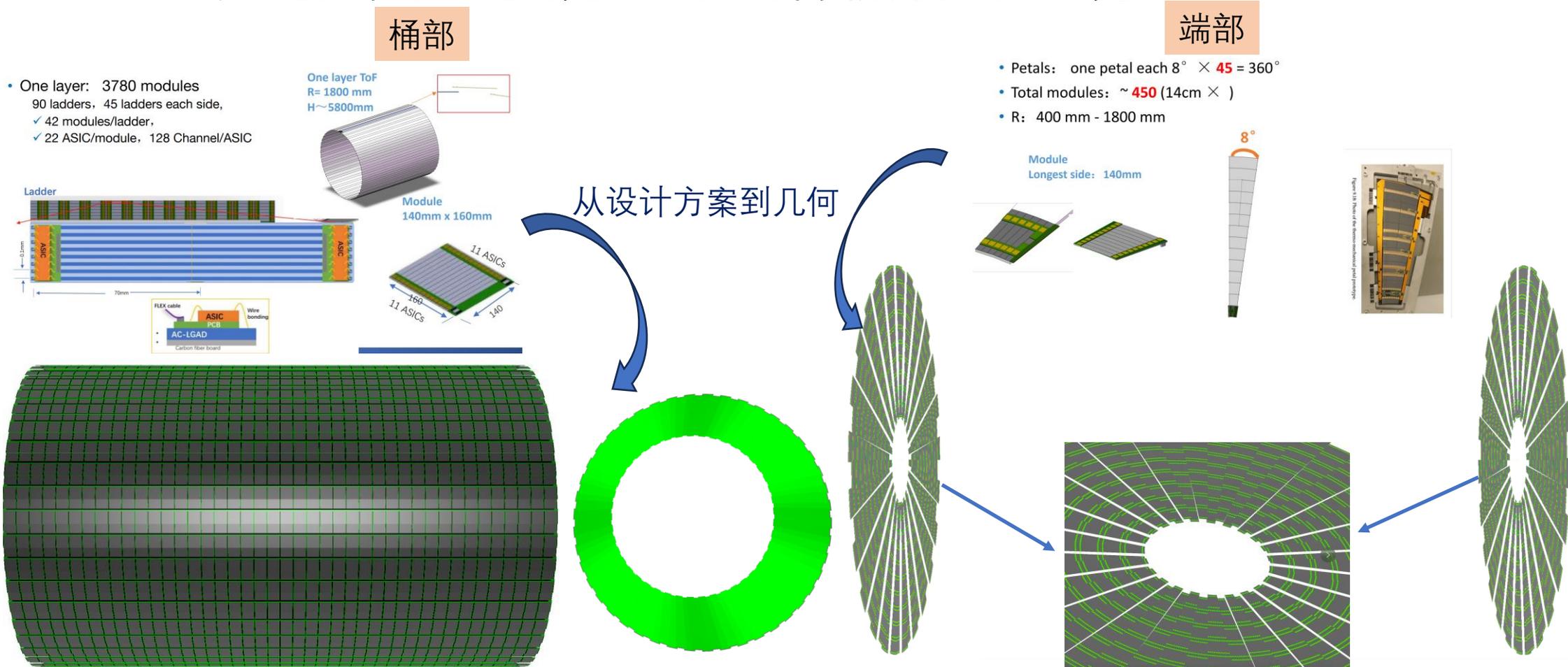
● 均化端板和框架结构端板



# 外部时间径迹探测器

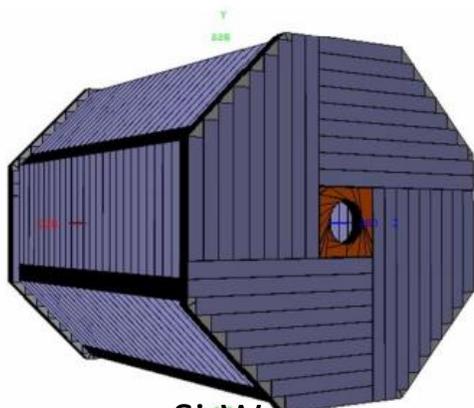
## ■ 从简化结构到AC-LGAD时间径迹探测器的演变

● 上海交通大学李政道研究所、中国科学院高能物理研究所

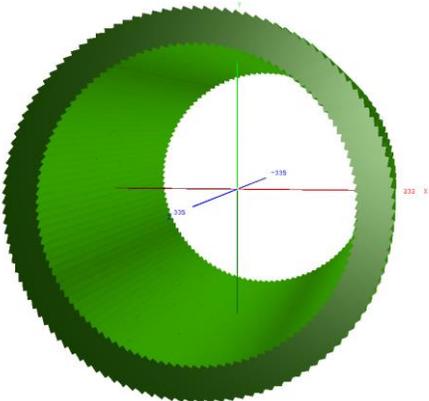


# 电磁量能器

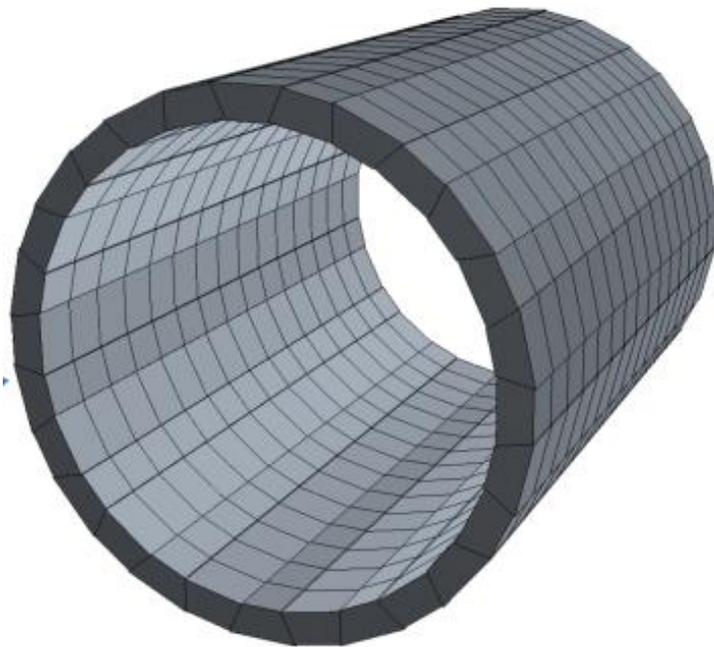
- 从Si-W电磁量能器演化到现在的垂直晶体条4D电磁量能器和Stereo晶体电磁量能器
  - 几何包括吸收体、探测单元组件、内部模组间支撑件（简化）



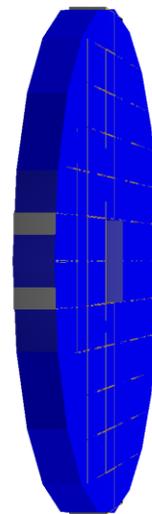
Si-W



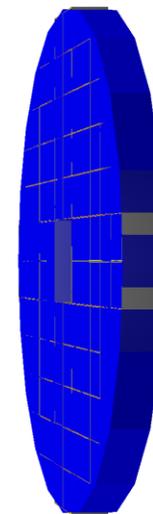
Stereo



4D(桶部)

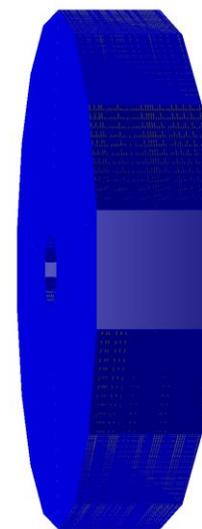
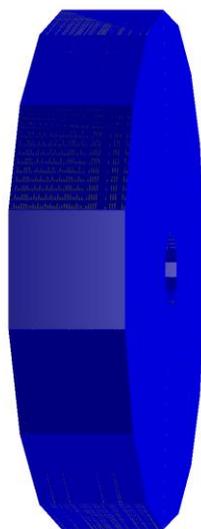
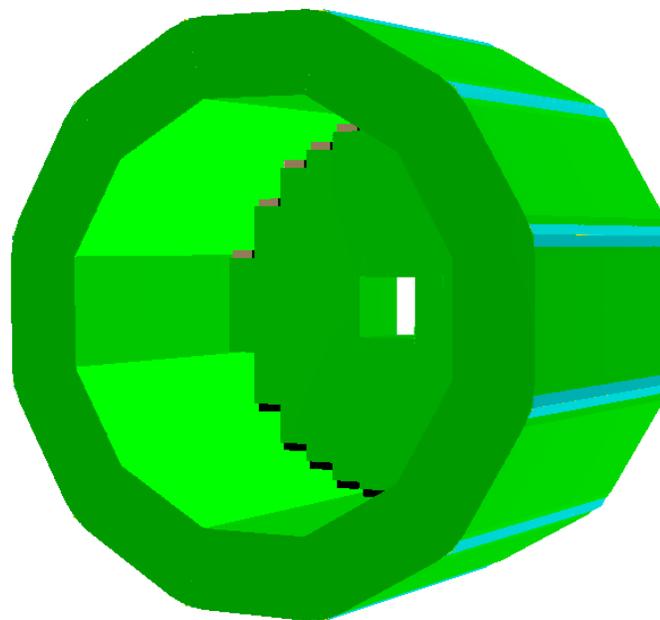
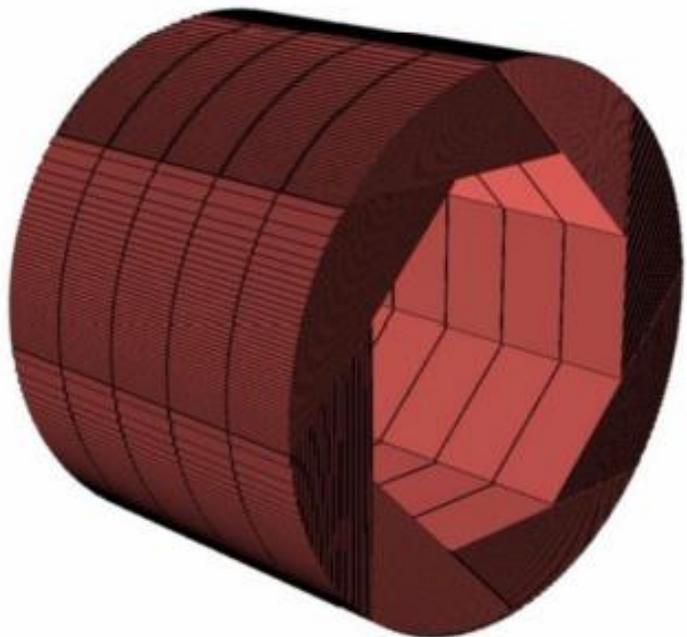


4D(端盖)



# 强子量能器

- 构型演化：旋转型→扇区均分型
- 从RPC到闪烁玻璃
  - 16区、48层



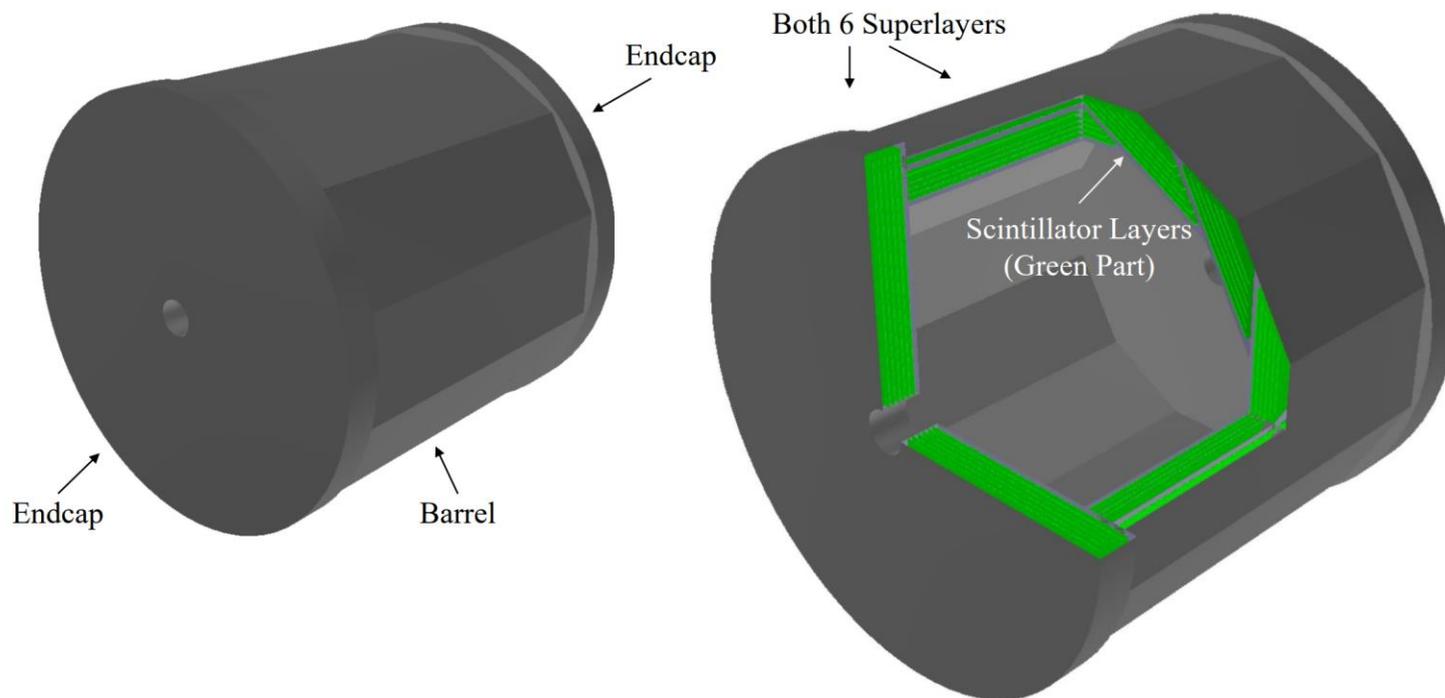
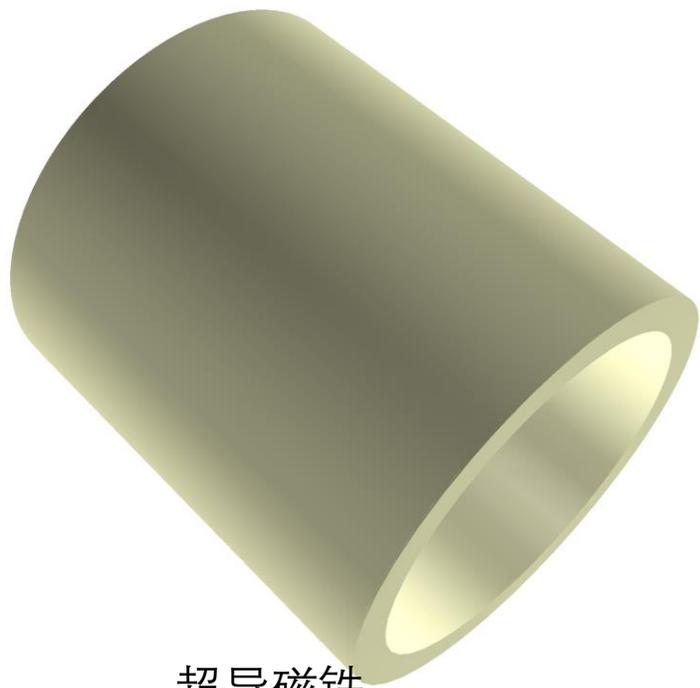
# 磁铁、 轆铁和缪子探测器

## ■ 超导磁铁

- 低温恒温器简化为圆筒， 内置线圈也简化为圆筒

## ■ 塑闪方案的缪子探测器和轆铁几何

- 华南师范大学、 复旦大学



# 机械结构的几何

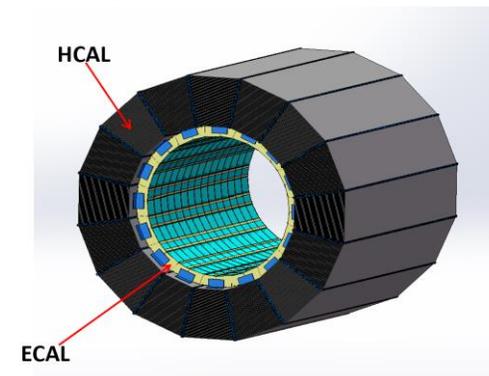
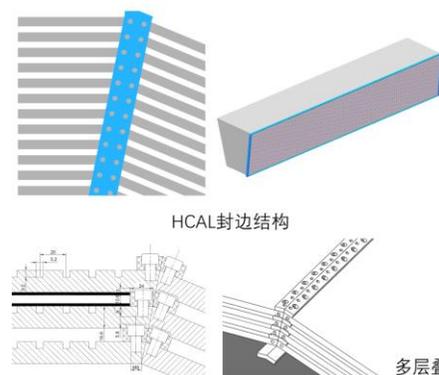
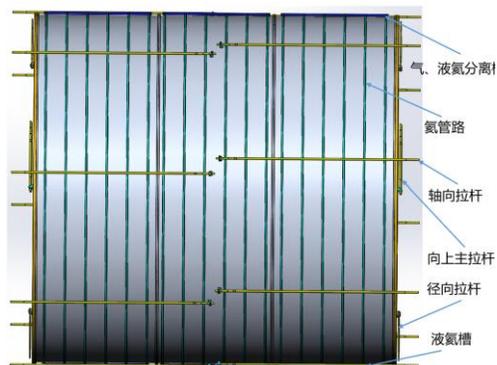
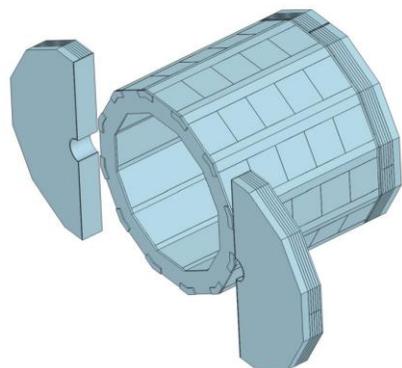
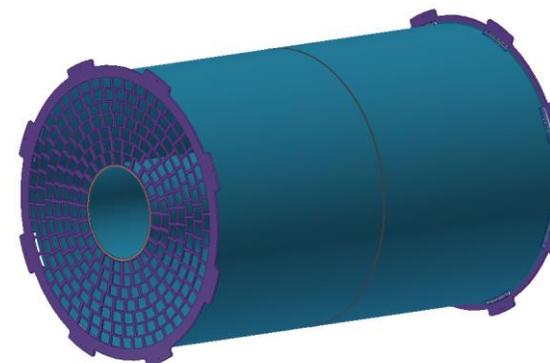
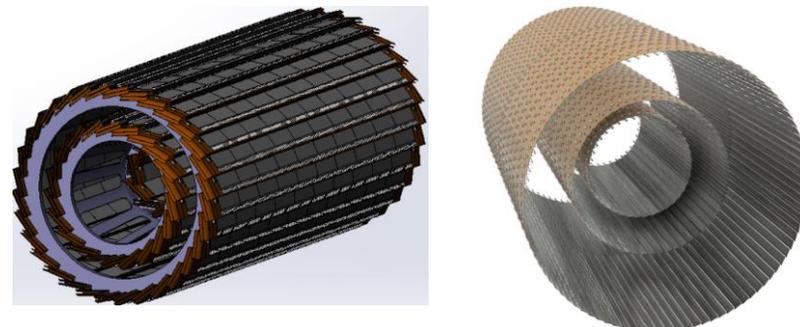
■ 当前的探测器几何处在悬空状态，欠缺机械及电缆结构

- 吊挂件
- 螺栓
- 外部电缆
- 外部冷却管路

■ BESIII的经验表明主漂移室的电缆等物质会明显影响端盖电磁量能器的性能

■ 从对撞点越往外，对物理性能的影响减弱

- 特定探测器的性能模拟的偏差跟区域内欠缺物质量与区域内的总物质量相关
- 对电磁量能器前面要求相对细致



研讨会机械设计摘录

# 几何实现的技术路线

## ■ 与探测器模组一样采用DD4hep工具描述

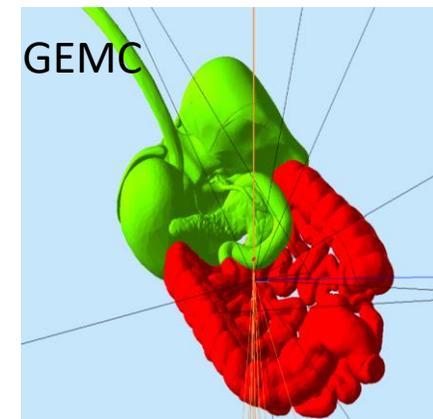
- DD4hep作为几何描述工具开始被多个高能物理实验所采用
  - ✓ CEPC、CLICdp、CMS、FCC、ILD、STCF、SiD
- 优点：统一管理；适用于对称性好、复用多的组件；易于在相同构型下修改尺寸
- 缺点：手工代码构建，对于异性大的数量多的组件耗费人力大

## ■ CAD转换为GDML导入

- 转换工具
  - ✓ CAD-GDML on FreeCAD <http://cad-gdml.in2p3.fr/>
  - ✓ CADMesh、Mesh2gdml
  - ✓ 更多CAD插件能把三角网格CAD文件转换成GDML
- 优点：在已有CAD设计方案前提下更为快捷
- 缺点：不便几何统一管理；不利于修改；出现问题不容易发现

## ■ GEMC (GEant4 Monte-Carlo) <https://gemc.jlab.org/gemc/html/index.html>

- 直接CAD支持：STL、PLY、OBJ



CAD对复杂的不重复的结构更友好，适合生物等领域

# 外部几何的导入规划

- 对于CAD转GDML方案，难点在于需要分离CAD中已有的探测器模组，确保与DD4hep描述的探测器模型没有重叠，最好紧密契合
- 根据机械结构的设计的复杂度确定导入办法
  - 基本几何形状构型：立方体、圆筒、圆锥
    - ✓ 需要尺寸、位置、方向
  - 复杂构型：通过由点到线到面简化为平板，例如桶部ITK的衍架支撑、电缆
    - ✓ 需要确定位置并计算物质总量
    - ✓ 对于电缆，根据走线方向可近似为圆板、圆筒、圆锥或多面体

可以对不同走线方向的方案进行性能模拟对比，进行迭代方案

- 在简化基础上研究CAD到GDML的可行性

## ■ 时间表

- 首先完善MDI区域
- 按重要性由内向外

# 小结

- 探测器几何描述是探测器模拟的基础，需要通过细致、准确的工作把包括机械在内的探测器几何在模拟软件中进行构建
- 通过DD4hep工具，已完成了大部分探测器组件的构建，随着设计方案的深入，还需要不断地完善，包括机械结构、电缆等等
- 借助本次研讨会，了解机械结构情况，确立下一步几何导入工作的方向，建立机械设计专家的联系，为今后工作打下基础

谢谢！