



CEPC TPC机械设计与探测器研究进展

祁辉荣

余信, 常悦, 张锦闲, 邓智, 纪全, 张俊嵩, 张建

代表CEPC TPC探测器研究小组

中国科学院高能物理研究所

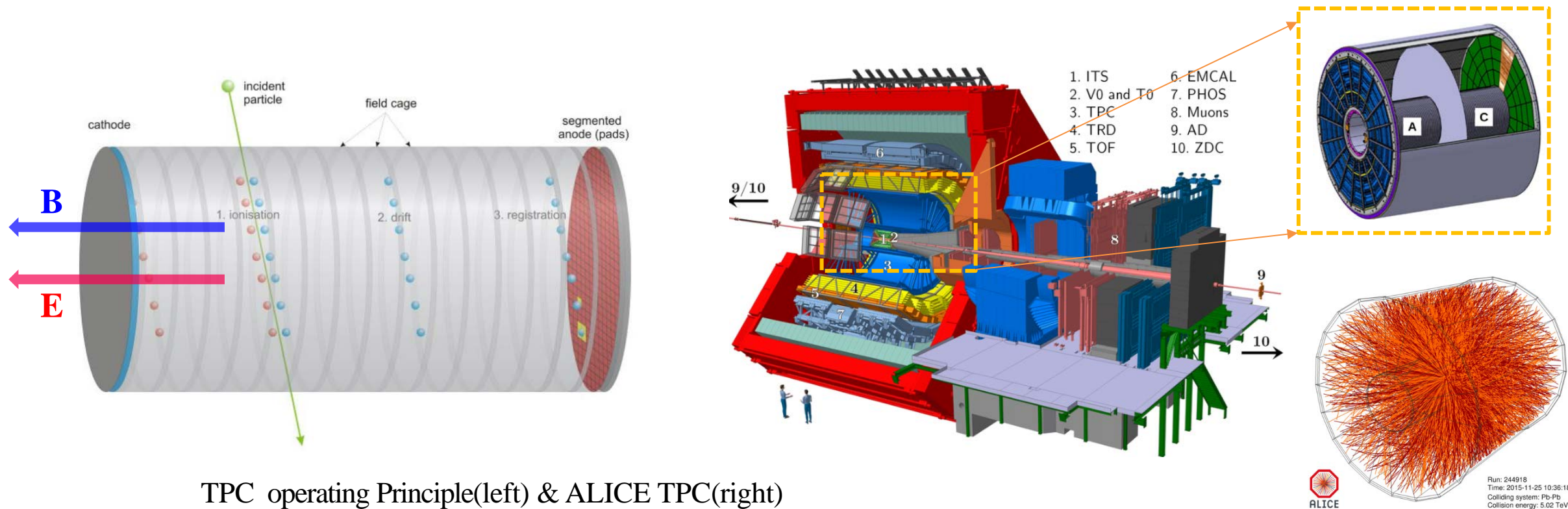
CEPC机械及MDI研讨会 洛阳, 河南, 8月, 2024

- **时间投影室技术-TPC**
- **CEPC TPC机械结构设计及分析**
- **CEPC TPC研究进展现状**
- **小结**

时间投影室技术

时间投影室技术优势:

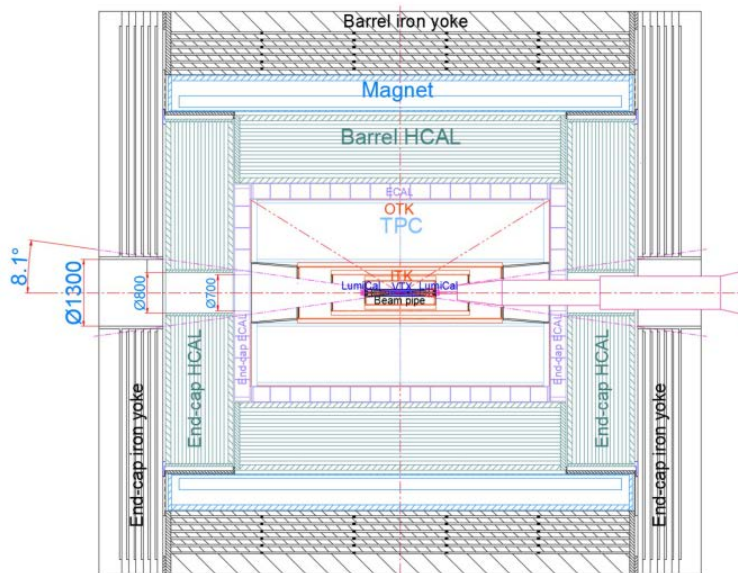
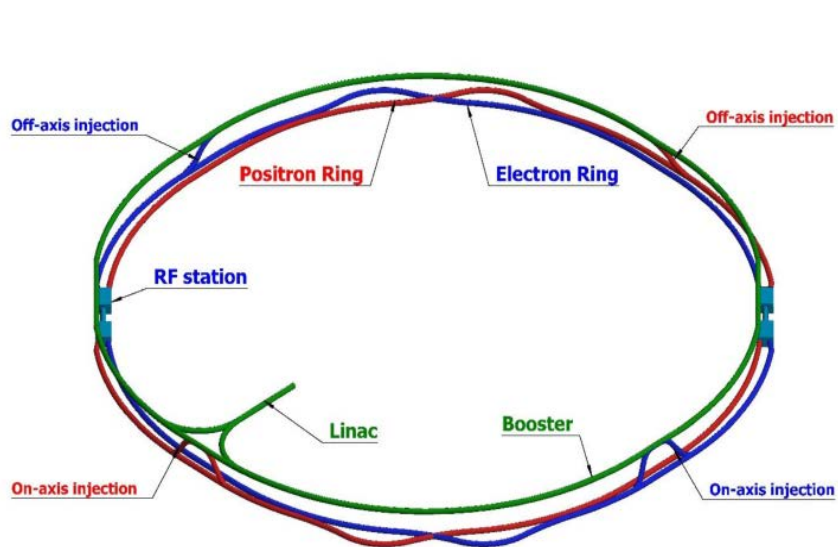
- **性能优势:** 极低物质质量($\sim 0.1X_0$), 精确位置测量($\sim 100\mu\text{m}$), 动量分辨高, 优异模式识别能力(Pattern Recognition)
- **粒子鉴别能力:** 提供带电粒子能损 dE/dx 或原初电离簇团 dN/dx 信息, 提供粒子鉴别(Particle Identification)
- **应用研究:** 许多大型粒子物理实验(ALICE, STAR, PEP4)为主径迹探测器, 中微子探测领域也有广泛应用



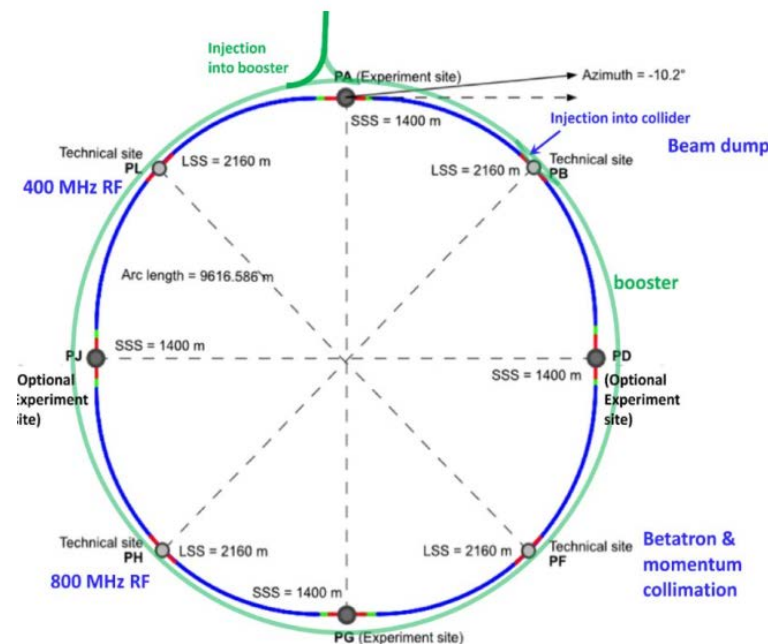
TPC operating Principle(left) & ALICE TPC(right)

时间投影室应用于环形正负电子对撞机

- 时间投影室TPC探测技术，为未来正负电子对撞机（CEPC, FCCee）的主径迹探测器**重要选型**
- CEPC物理和探测器技术设计报告(Phys.&Det. TDR)中，硅+气体探测器作为**径迹探测(Tracker)**以及提供**粒子鉴别(PID)**
- 时间投影室已作为CEPC物理和探测器技术设计报告中**主径迹探测器基准选型**



Circular Electron Positron Collider (CEPC) & Detector layout in CEPC ref-TDR



Future Circular Collider (FCCee)

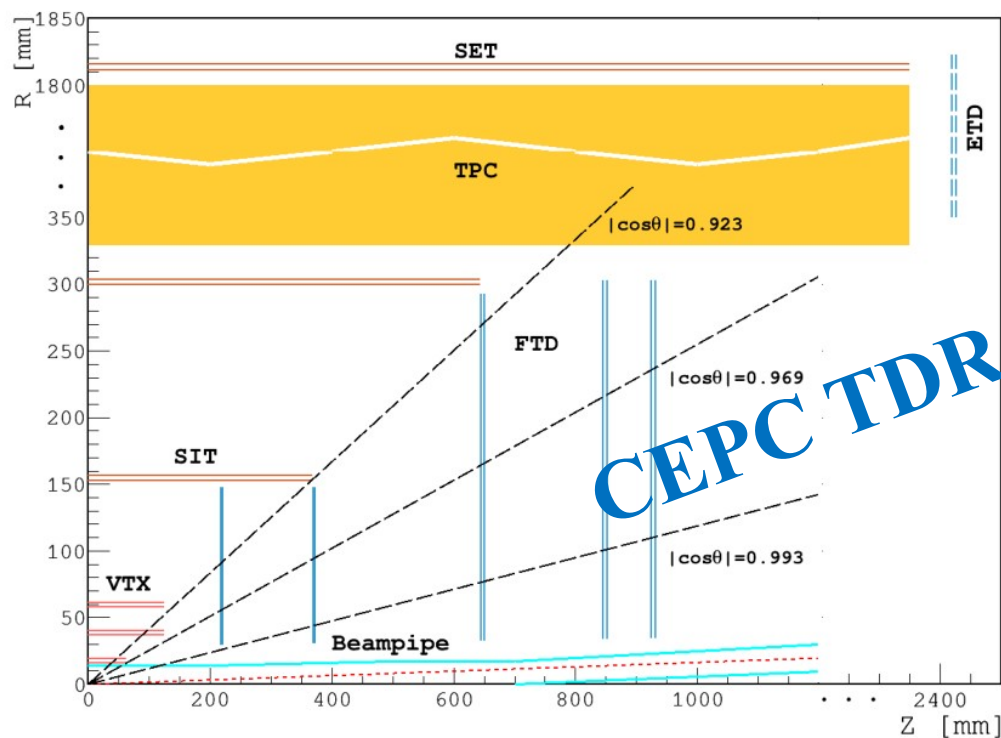
<https://arxiv.org/abs/2203.08310>

<https://arxiv.org/abs/1811.10545>

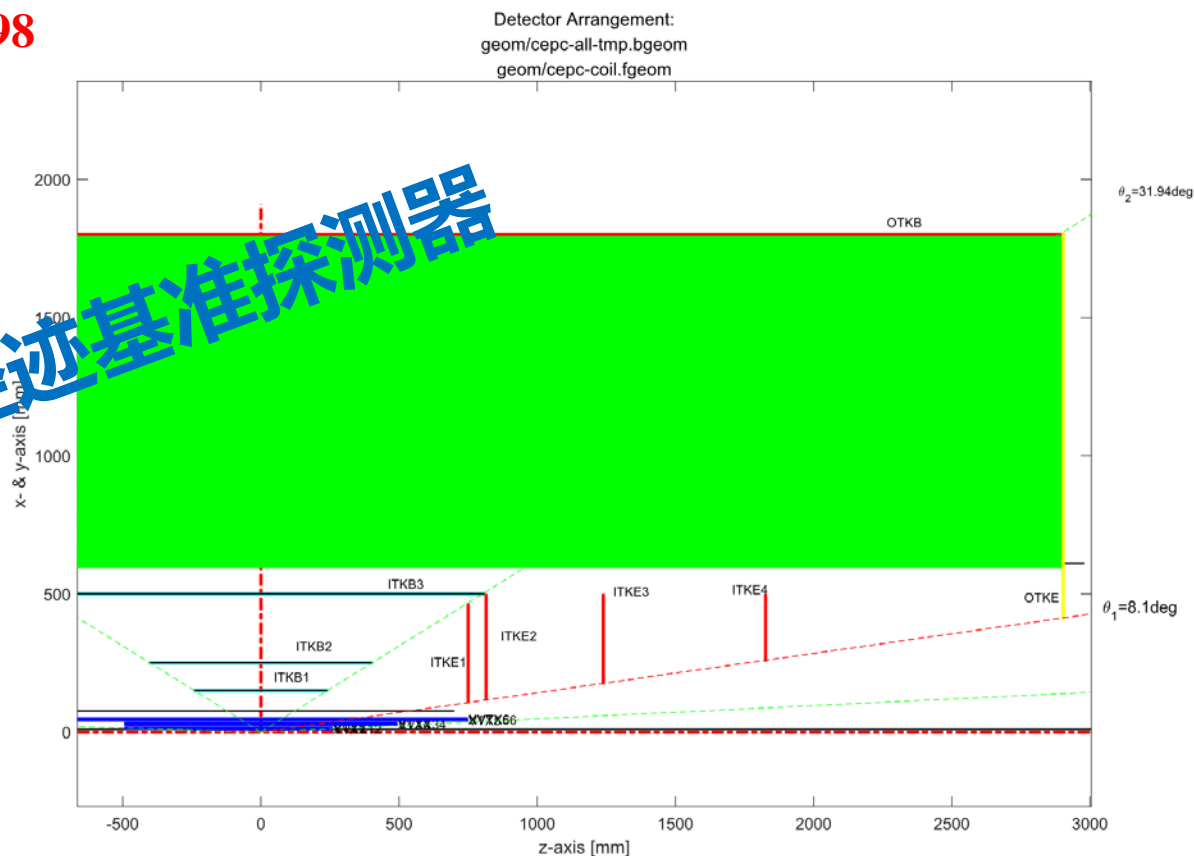
CEPC ref-TDR中TPC主要参数

CEPC探测器概念设计报告(CDR)与技术设计报告(TDR)中TPC几何参数对比

- 内径:0.30m (CDR) → **0.60m (TDR)**
- 外径:1.80m (CDR) → 1.80m (TDR)
- 最大漂移距离:2.35m (CDR) → **2.90m (TDR)**, $\cos\theta\sim 0.98$



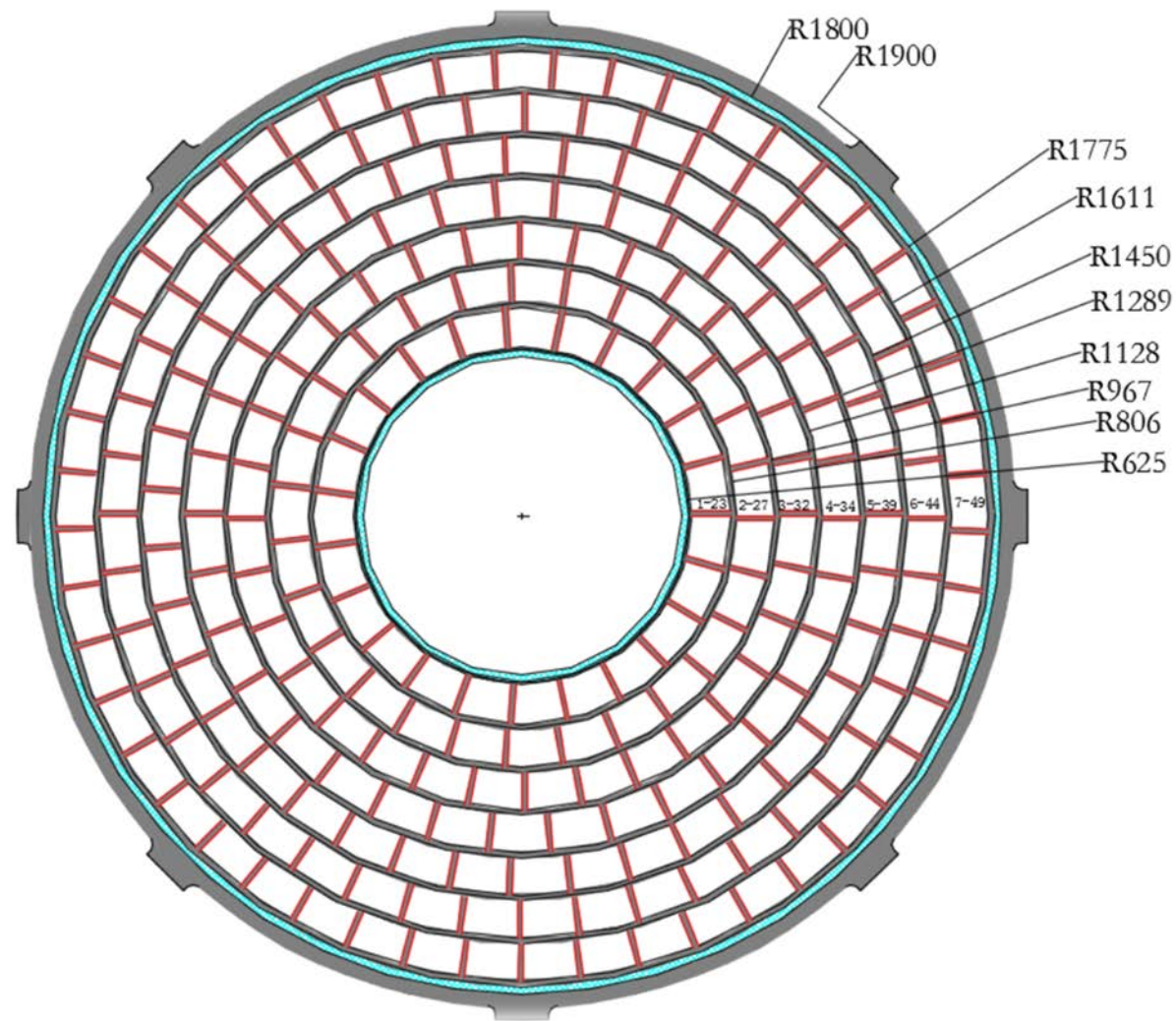
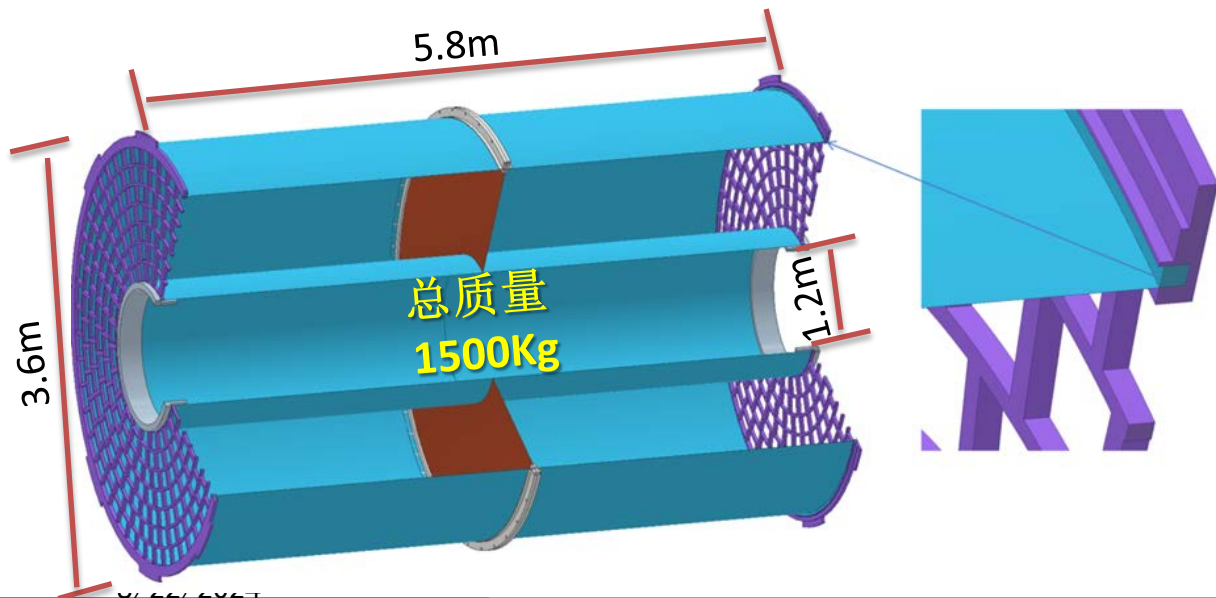
CEPC TDR 主径迹基准探测器



CEPC TPC layout in CDR(left) & CEPC TPC layout in ref-TDR(right)

CEPC ref-TDR中TPC主要设计参数

CEPC TPC探测器	主要参数
读出模块数量/单端盖	248个/单端盖
单读出模块尺寸	206mm × 224mm × 161mm
外形尺寸	内径: 1.2m 外径: 3.6m 探测器长度: 5.9m
阴极高压	- 62,000 V
工作气体	T2K: Ar/CF ₄ /iC ₄ H ₁₀ =95/3/2
腔体内漂移时间	34μs @ 2.75m
读出模块类型	像素型读出Micromegas



TDR中时间投影室径迹探测器端盖设计

CEPC ref-TDR中TPC主要设计参数

- 低物质质量桶部设计 (蜂窝板结构 → 低物质碳纤维桶部设计) ($\sim 2\% X_0$)

- 超轻物质质量桶部设计 (材料: QM55 碳纤维): $0.59\% X_0$

- 端盖部的低物质质量设计及机械优化设计 (此次会议讨论的重点)

- 有限元计算分析: 对于承重外部径迹探测器(100kg)的形变量 $\sim 0.2\text{mm}$, 结果确认

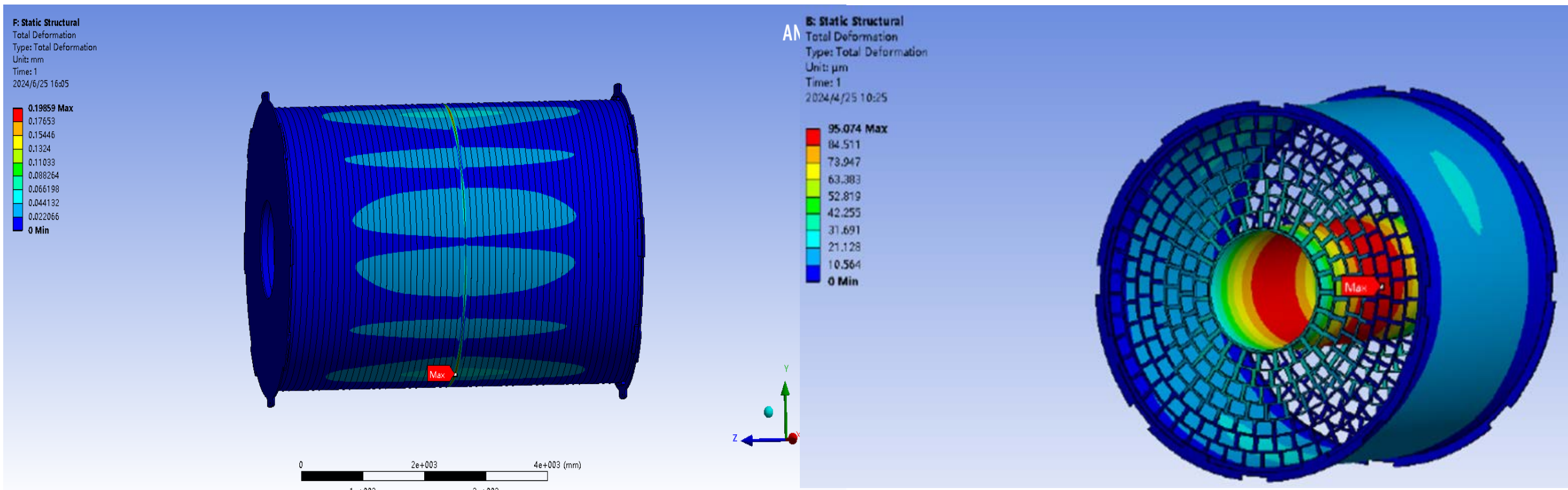
- Low material of the TPC endcap

15% X_0 in total, including

Readout plane, front-end-electronics 4%

Cooling 2%

Power cables 9%

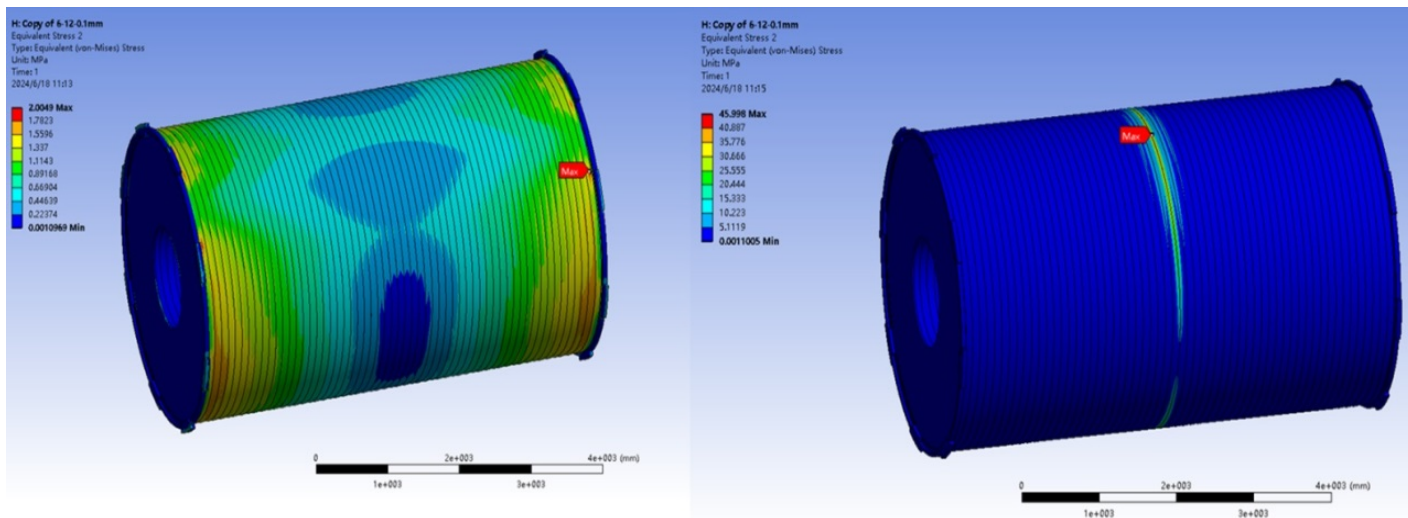
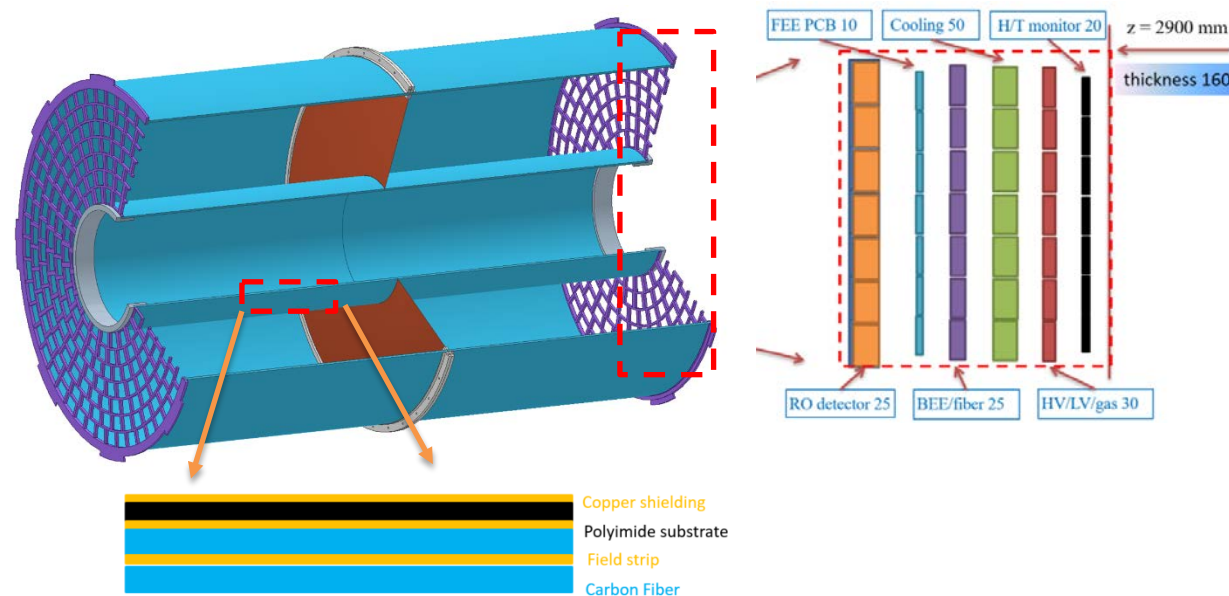


■ TPC应用于正负电子对撞机研究进展

- TPC设计及超轻物质
- TPC击中率及占空比
- 空间电荷效应及径迹畸变
- 正离子反馈IBF控制
- TPC原型机研制成果

CEPC TPC机械结构及超轻物质质量

- TPC结构应力分析结果满足**安装运行需求**:
 - 桶部最大形变**177.6 μm** , 端盖最大形变**34.3 μm**
- CEPC TPC桶部采用**300 μm 超轻碳纤维**支撑材料
 - 桶部物质质量 **$\sim 0.6\% X_0$** , 端盖**15% X_0**

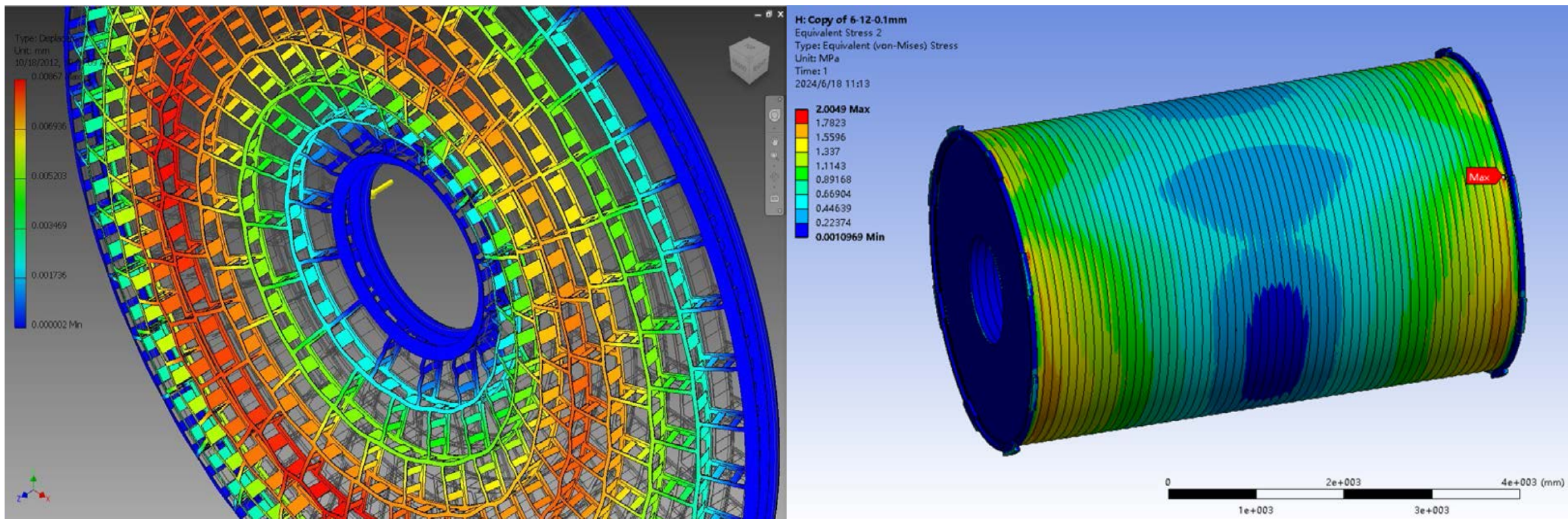


Material budget of TPC barrel

Layer of the barrels	D[cm]	X_0 [cm]	d/X_0 [%]
Copper shielding	0.001	1.45	0.07
CF outer barrel	0.020	25.28	0.08
Mirror strips	0.003	1.35	0.19
Polyimide substrate	0.005	32.65	0.02
Field strips	0.003	1.35	0.19
CF inner barrel	0.010	25.28	0.04
Sum of the material budget			0.59

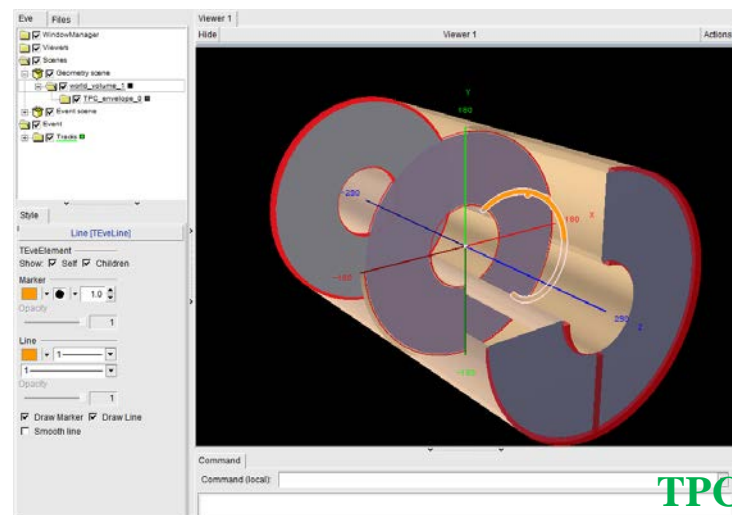
CEPC TPC机械有限元分析结果

- 筒部和端盖处的应力计算→端盖和筒部的进一步优化
 - 端盖：2.1毫巴(2190N)下的挠度为 0.19mm，满足端盖设计要求
 - 桶部：均匀载荷时最大应力2MPa，满足剪切应力形变的安全量

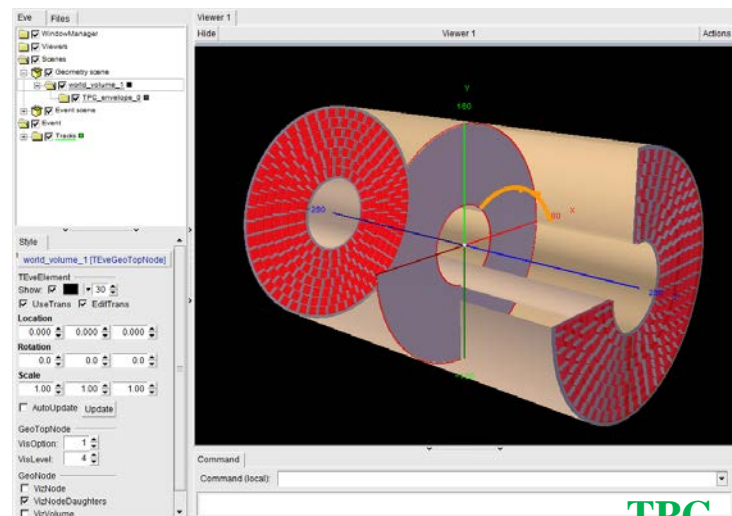


TPC设计参数已更新至CEPCSW

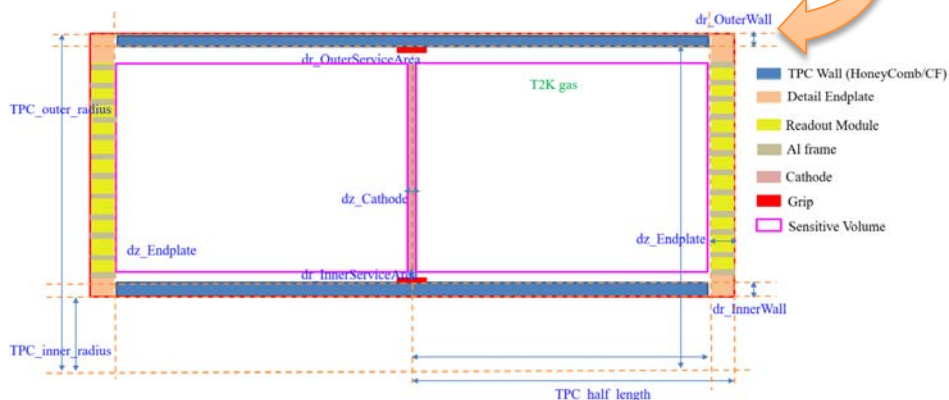
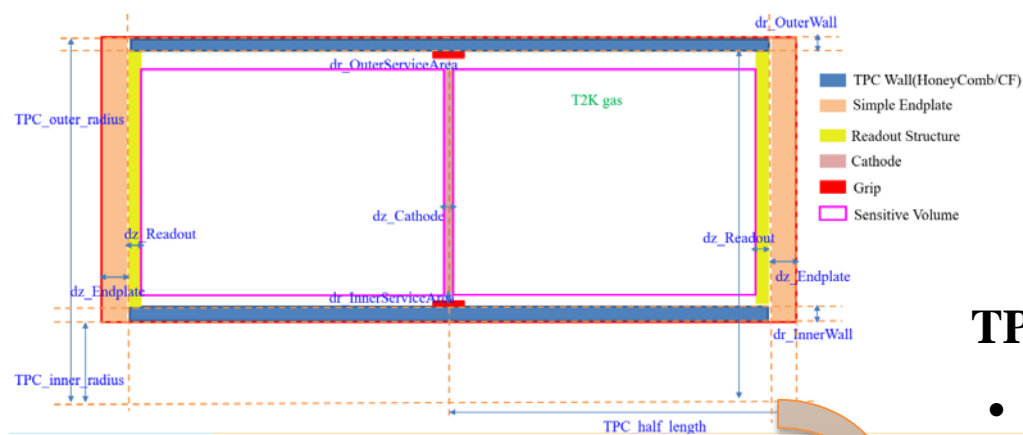
- 所有最新的TPC参数已全部更新至CEPCSW软件模拟框架。
 - 更新的MDI与background数据可用于分析探测器性能参数



TPC_Simple_TDR_o1-v01



TPC_ModularEndcap_TDR_o1-v01



TPC parameters updated to CEPCSW

- Gas Volume: T2K mixture gases
- MPGD Readout: Micromegas detector
- Barrel: Honey comb and CF options
- Endplate: optimization to the details design
- Mechanics: update geometry

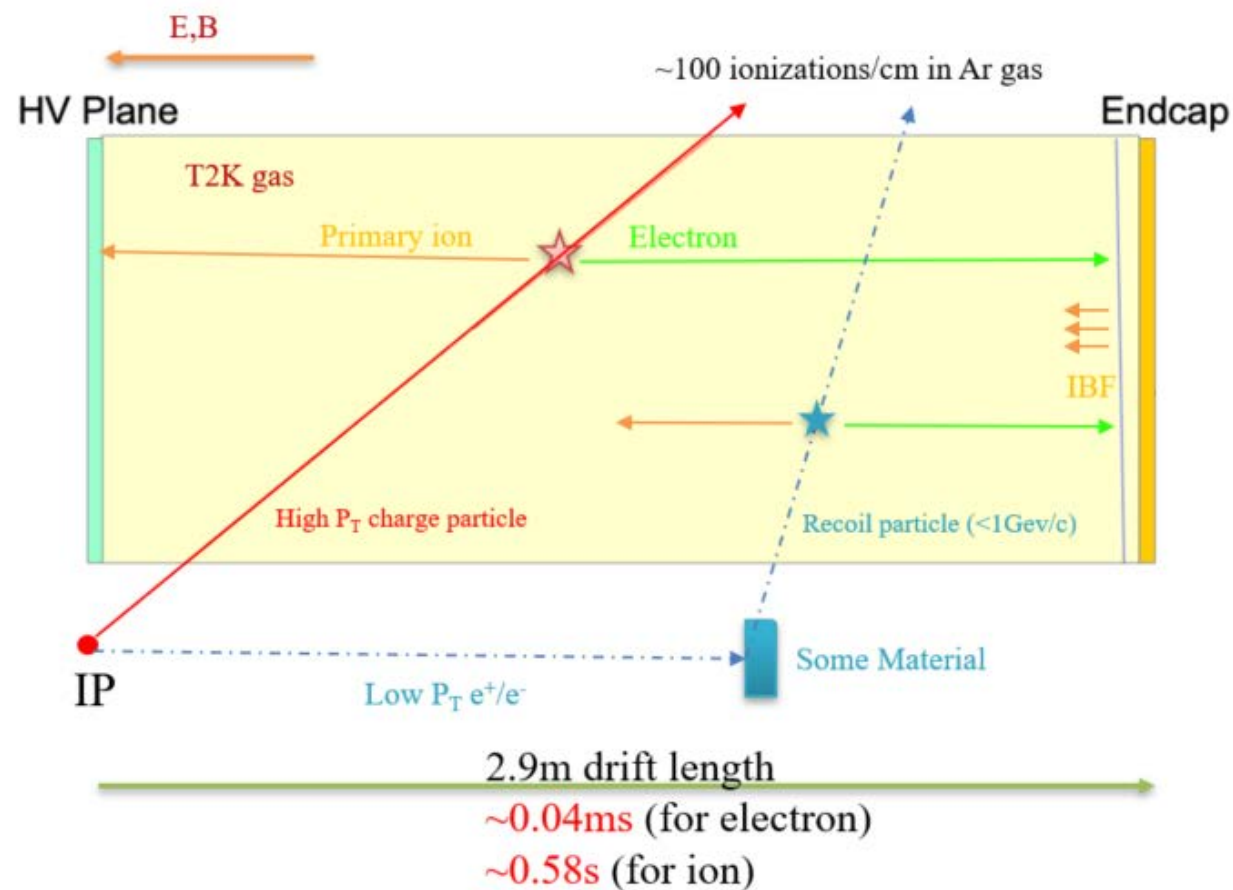
高亮度对撞中：TPC事例及空间电荷来源分析

■ 高对撞亮度下TPC中的hit以及空间电荷来源：

- 物理事例($Z \rightarrow qq$)直接产生
- 束流本底效应间接产生
 - **Beamstrahlung** (Luminosity related)
 - Beam-Gas, Beam Thermal Photon, SR...(Single Beam)
- 读出MPGD的正离子反馈

■ 对于Z-pole模式~40MHz对撞频率(23ns时间间隔)：

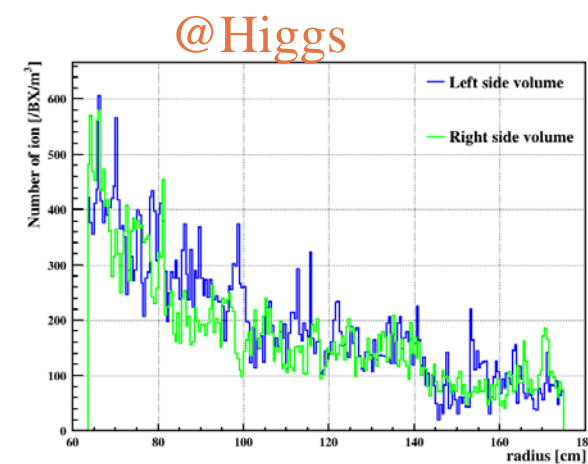
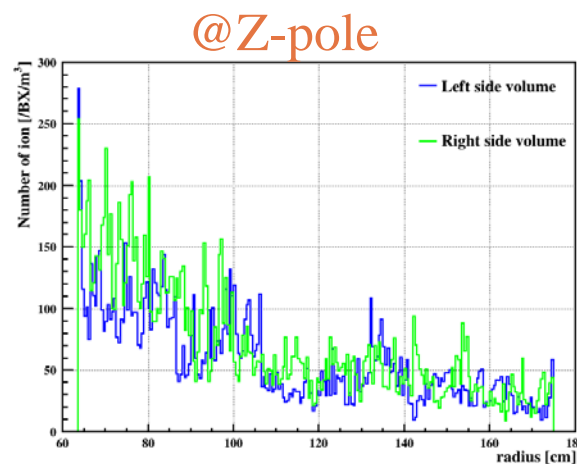
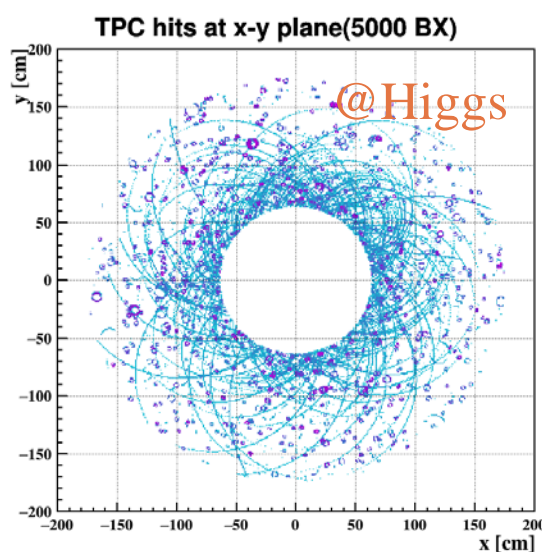
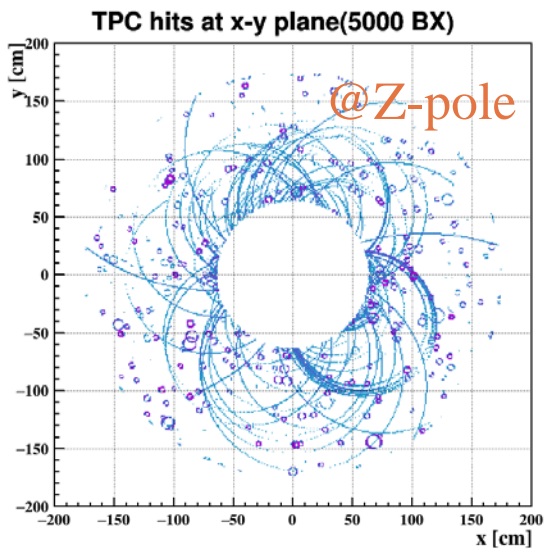
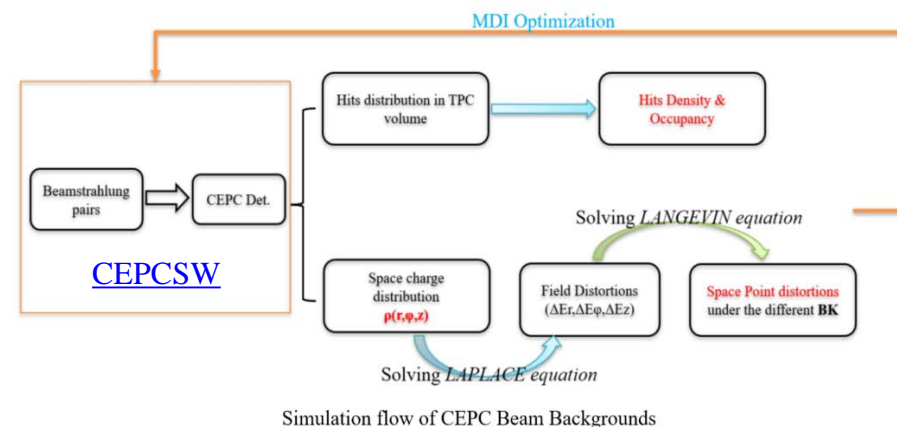
- 每次对撞，**Beamstrahlung**过程将产生~650 e^+/e^- pairs
- 束流本底效应是TPC灵敏体积内击中hit density，空间电荷产生的主要来源
- 研究高粒度读出TPC读出像素Hit density和空间畸变



高亮度环境下TPC不同事例来源

高亮度对撞中：束流本底导致TPC击中率研究

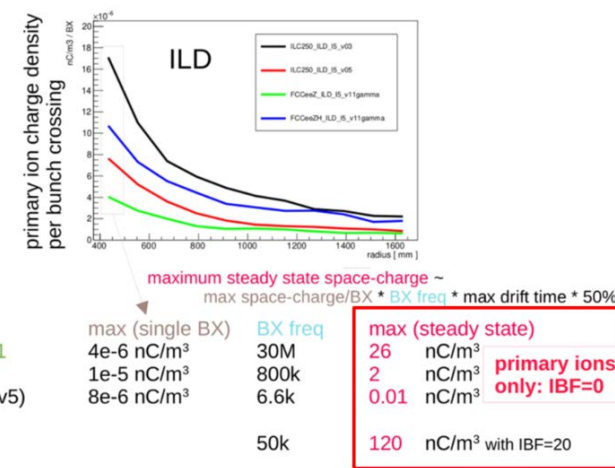
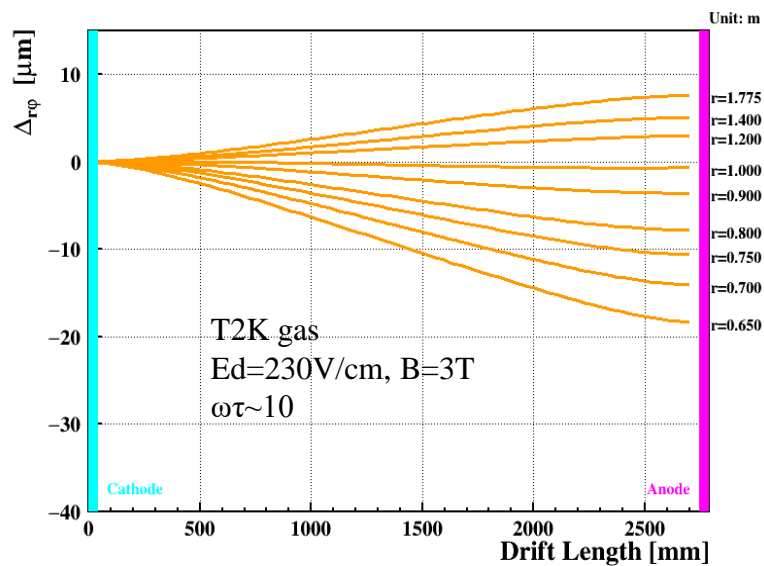
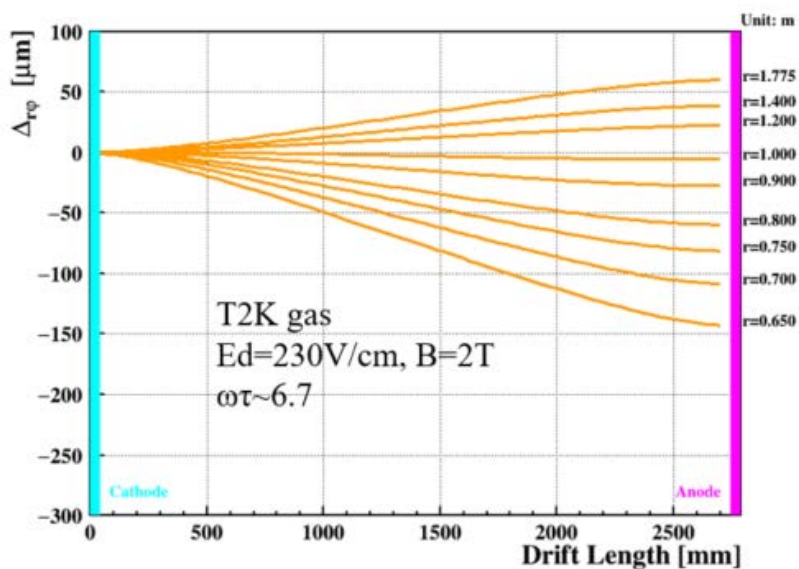
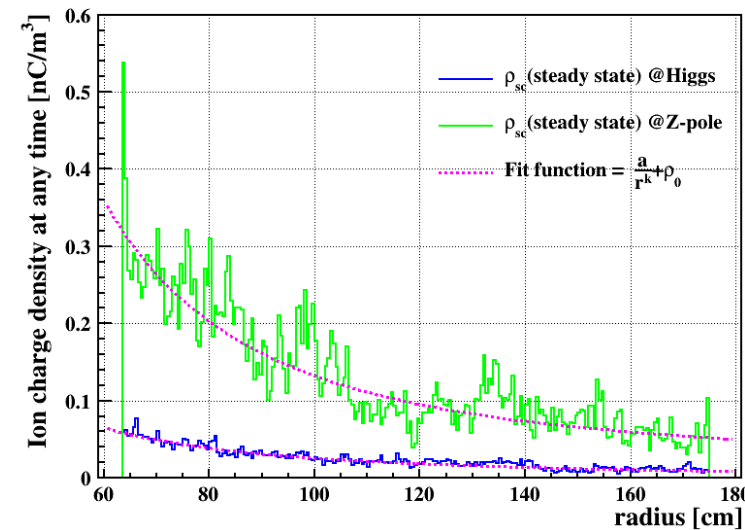
- 基于CEPCSW软件框架完成Higgs/Z-pole两种运行模式下束流本底效应导致原初电离的Hit density分布模拟
- 两种运行模式下TPC读出像素击中率和占空比:
 - ~2.25k hits/sec/ch @Z-pole, ~0.35k hits/sec/ch @Higgs
 - 高亮度Z下读出像素占空比<1%
 - TPC读出单元击中率和占空比满足探测和物理需求



两种模式下束流本底在xy平面hit分布(左)和沿半径方向离子数密度 $\rho_{ion}(r)$ 分布

高亮度对撞中：TPC空间电荷效应及畸变研究

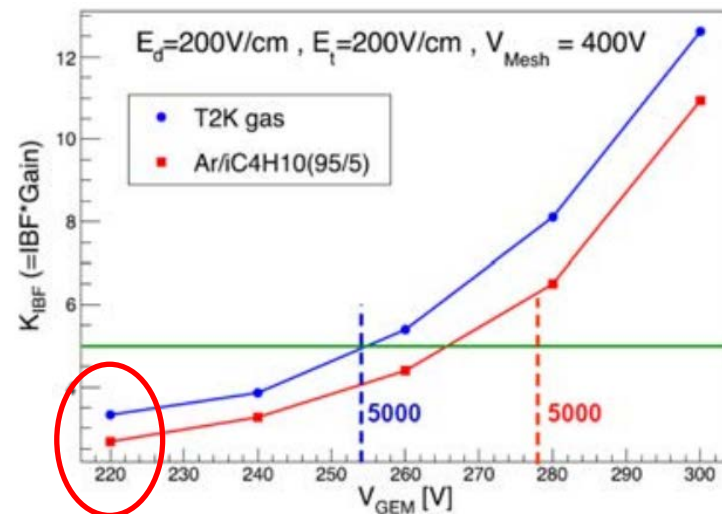
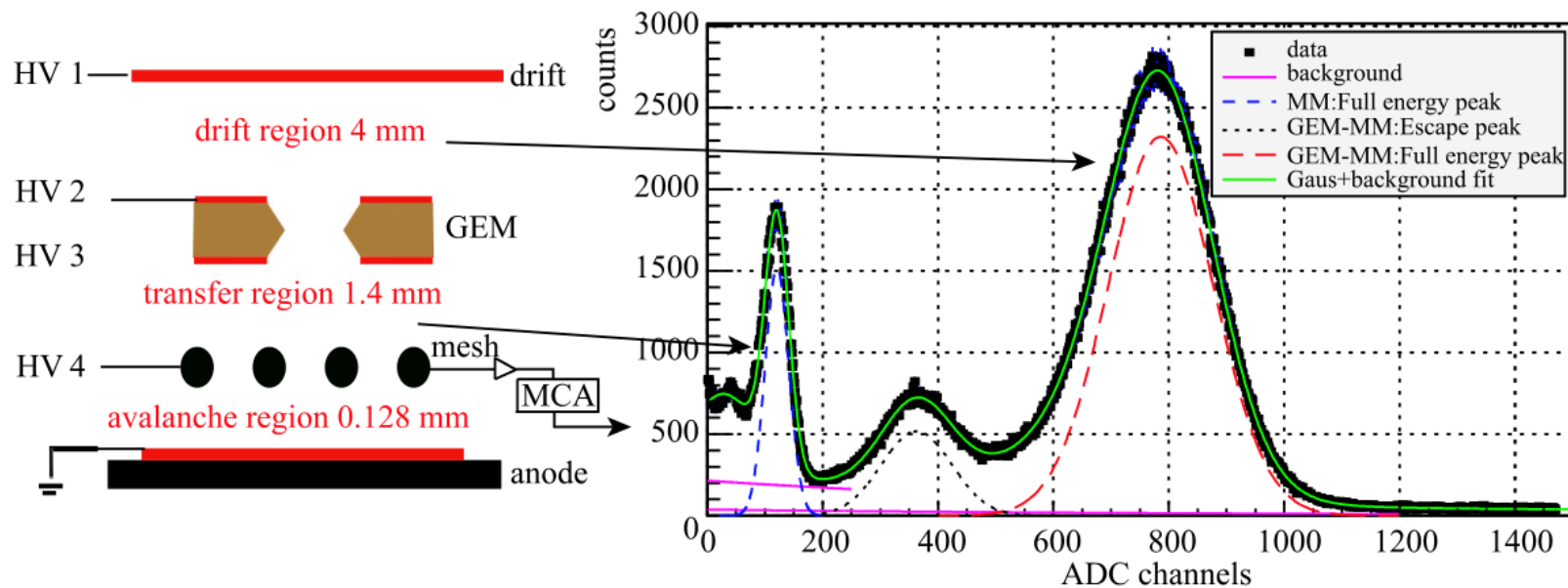
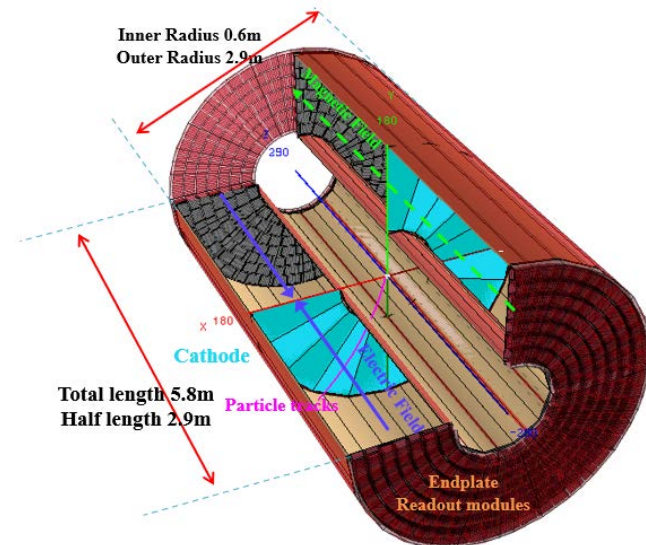
- ◆ 完成Z-pole和Higgs运行模式下TPC中束流本底效应导致空间电荷密度模拟
- ◆ 相比于KEK *Daniel Jeans* FCCee模拟结果，CEPC TPC中空间电荷密度小~50倍
- ◆ 基于Green's function, 求解电场畸变和空间畸变, 两种模式下最大畸变分别为 $150\mu\text{m}$ @Z-pole, $20\mu\text{m}$ @Higgs, 基本满足CEPC物理和探测需求



Beam background in a TPC at a circular collider

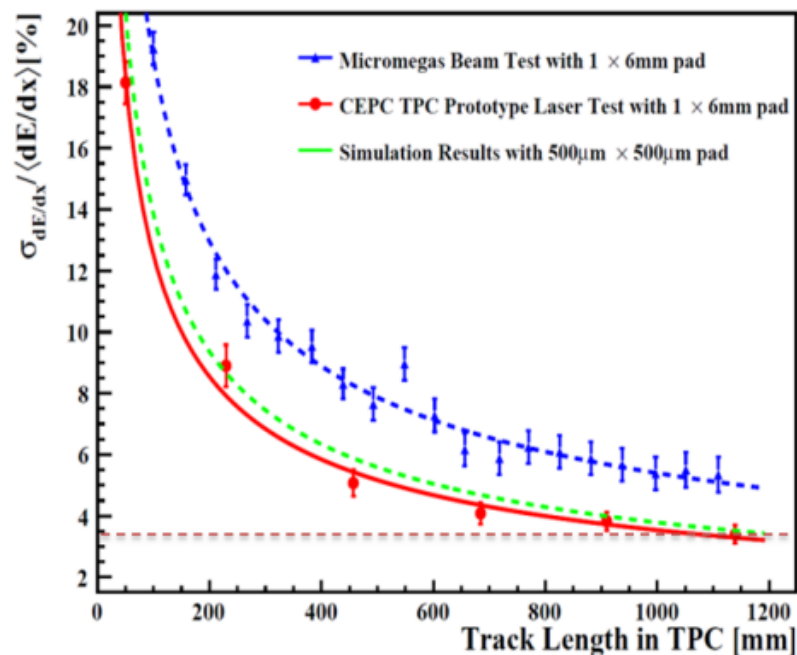
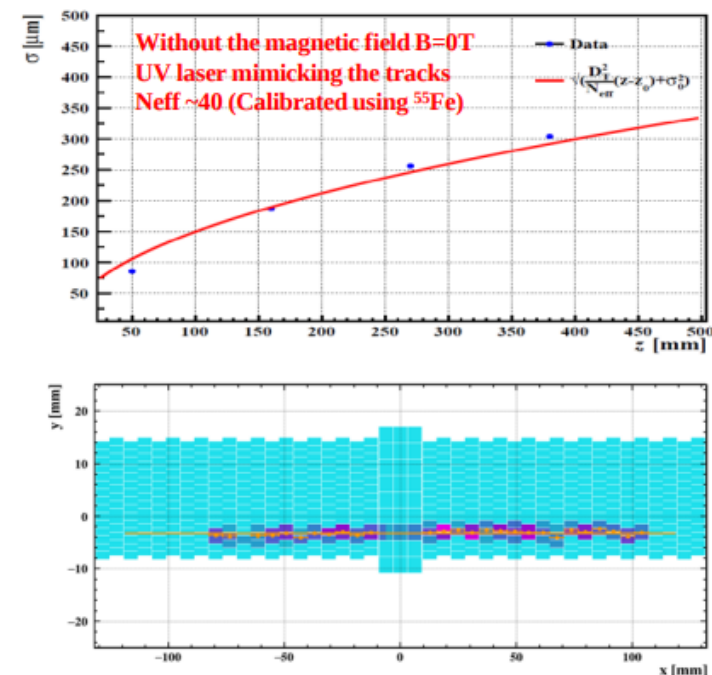
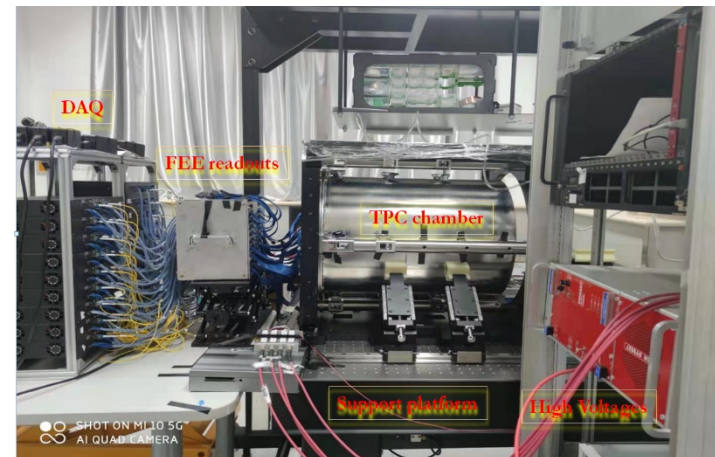
高亮度对撞中：正离子反馈IBF抑制实验研究

- CEPC TPC两端采用模块化微结构气体探测器(MPGDs)设计, 共7层 $248 \times 2 = 496$ 个读出模块, 灵敏区域覆盖~96%, 易于实际安装, 调试, 维护
- GEM+MicroMegas混合型读出模块成功研制:
 - $IBF \times Gain \sim 1$ @ $Gain = 2000$ (原初离子水平)
 - 实现对连续正离子反馈抑制到~0.1% (无门控)



研制现状：集成紫外激光径迹TPC原型机实验研究

- 传统pad型读出TPC→高颗粒度像素型读出TPC实验研究
 - 已完成集成266nm紫外激光径迹TPC原型机研制
 - 空间位置分辨： $\sigma_{r\phi} < 100\mu\text{m}$ @ 50mm漂移距离，满足CEPC Higgs运行模式
 - dE/dx分辨： $< 3.6\%$ @ 1.2 m径迹长度（与CEPC Ref-TDR一致）



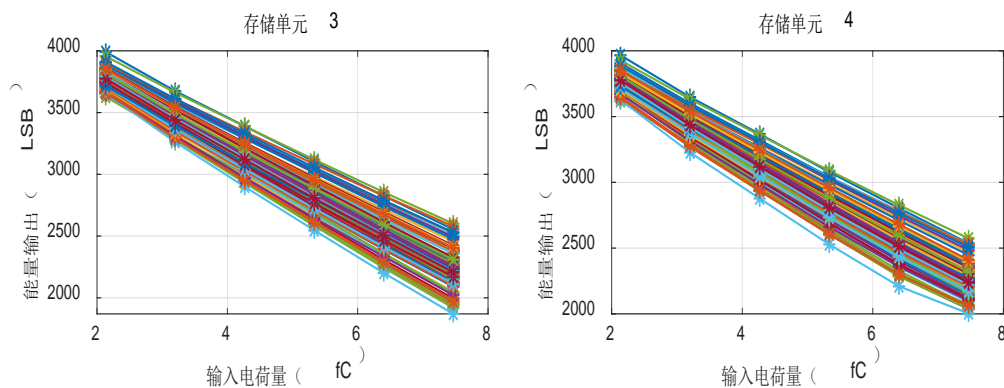
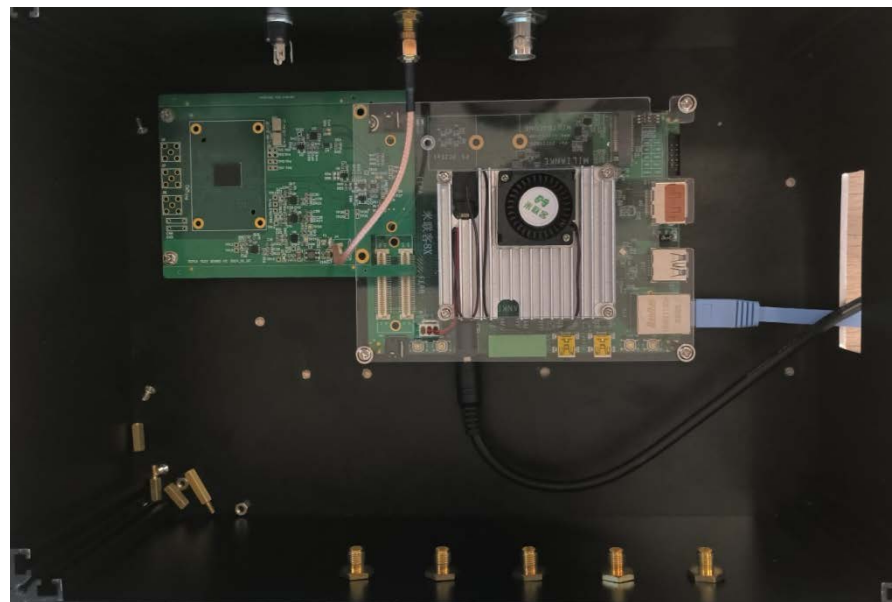
Publications by CEPC TPC group in 2018-2024:

- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/08/E08002>
- <https://doi.org/10.22323/1.449.0553>
- <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167241>
- <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC44867.2021.9875566>
- <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC44845.2022.10399097>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/09/C09065>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/P05005>
- <https://dx.doi.org/10.1142/S0217751X20410146>
- <https://doi.org/10.1088/1674-1137/41/5/056003>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/02/T02001>
- <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/07/P07005>

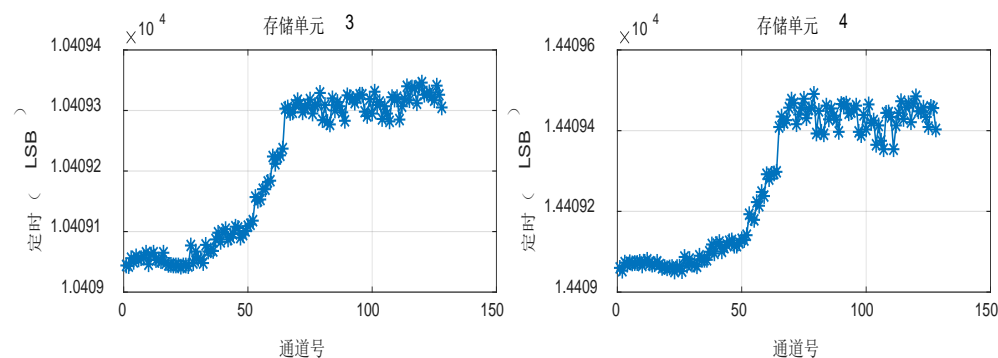
研制现状：像素型读出芯片的研究

■ 像素型TPC读出芯片研发进展

- 像素型 TPC ASIC 芯片研发
- 第二版wafer设计已经完成，正在测试中
- TOA+TOT模式
- 设计电子学噪声：100e
- 时间分辨：14bit(5 ns bin)
- 功耗：~100mW/cm²



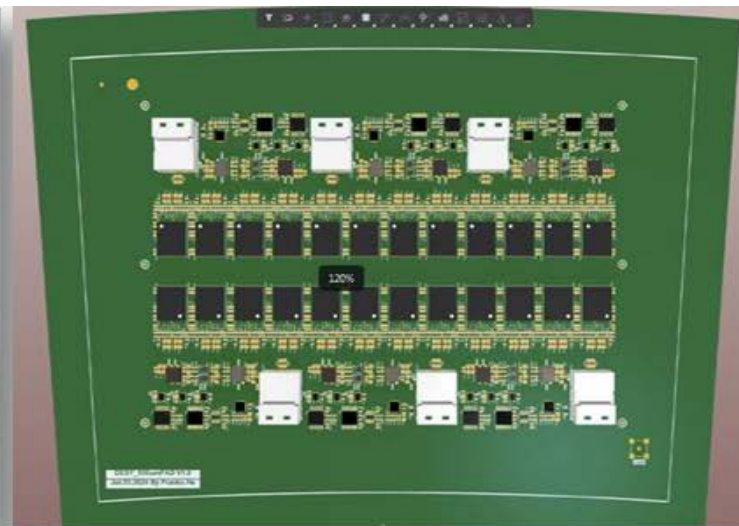
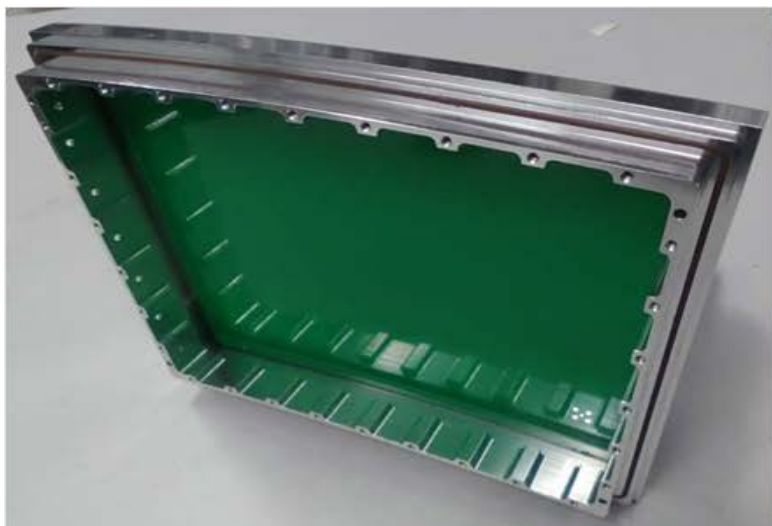
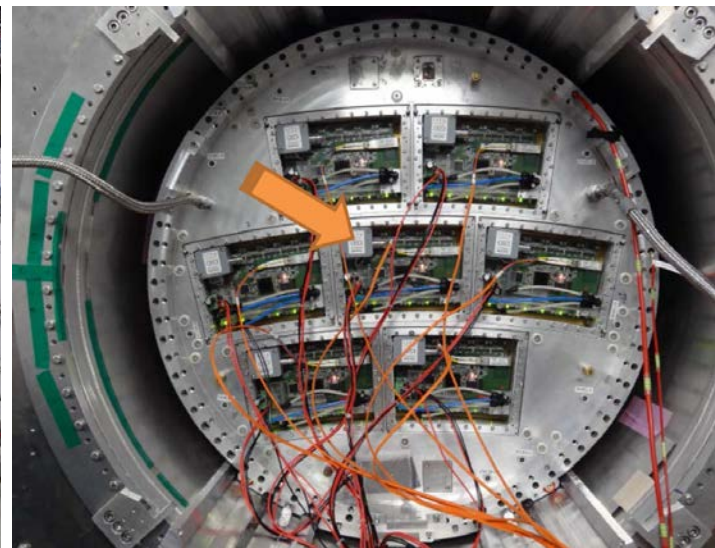
通道间不一致性-增益测试结果



不同通道定时情况——均值小于1LSB

研制现状：束流实验验证模块研制

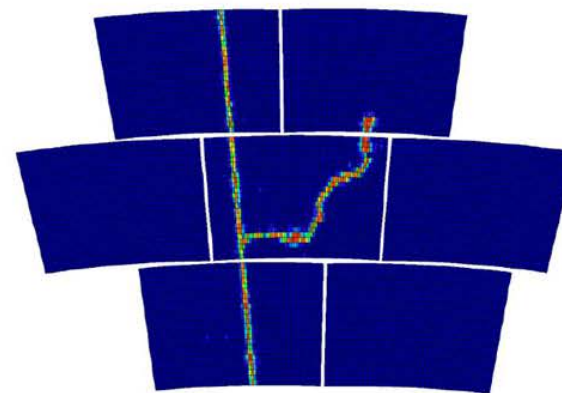
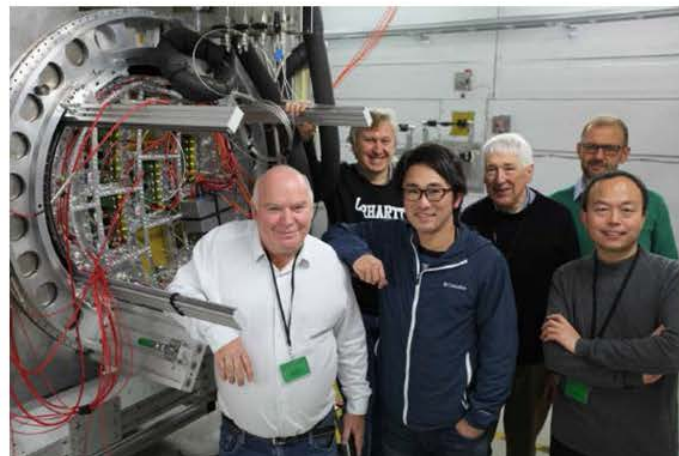
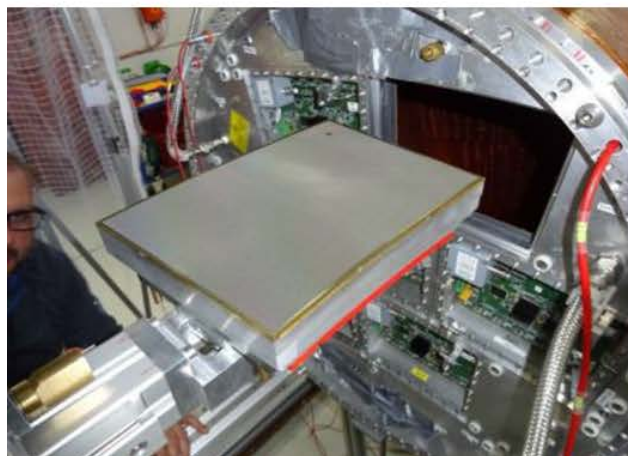
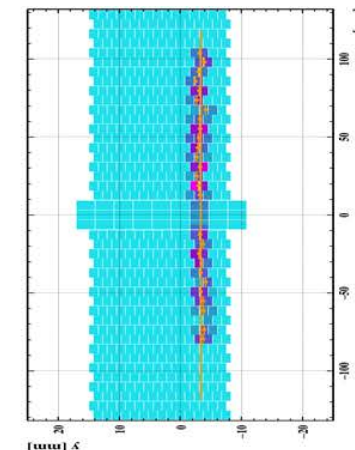
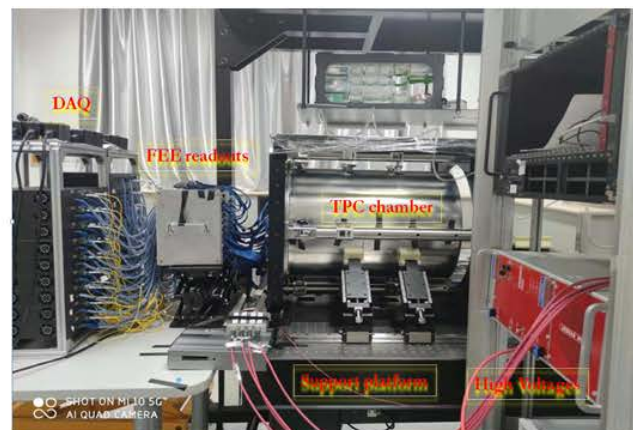
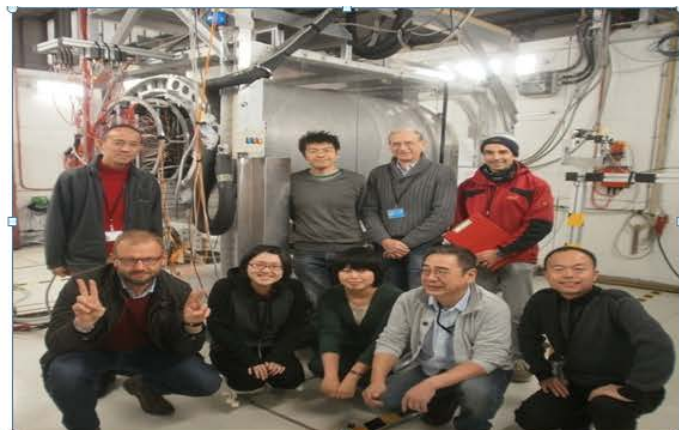
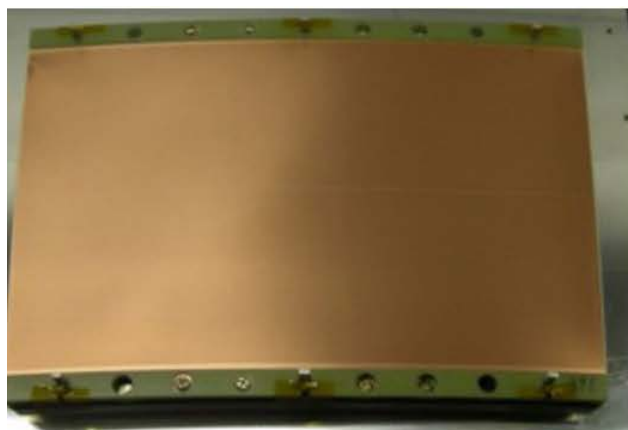
- 在DESY的大型原型TPC通用束流测试平台上进行实验测试
- 基于通用大型TPC测试凭条完成模块实验研究
- 单个Micromegas TPC模块+一个备用模块
 - 3000通道 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}/\text{channel}$



研制现状：积极良好的国际合作

- 与国际LCTPC合作组保持良好积极地合作
- 最新的原型机束流实验与原型机研制，积极合作（测试模块与此测试平台相同）
 - 研究生（余信、常悦、张锦闲）参与DRD1 MPGD School @2023年和2024年

ArXiv. (2023)2006.08562
NIM A (2022) 167241
ArXiv (2022)2006.085
JINST 16 (2021) P10023
JINST 5 (2010) P10011
NIM A608 (2009) 390-396



小结

■ CEPC TPC机械设计研究进展

- CEPC TDR的总体设计参数已确认，开始有限元FEA等分析工作。
- 借鉴已有大型TPC，开始优化设计TPC探测器的安装方案。

■ TPC应用于未来正负电子对撞机研究进展

- 基于CEPCSW软件框架，CEPC不同运行模式TPC读出像素击中率，占空比以及空间畸变基本满足探测和物理需求。
- 完成集成紫外激光标定系统TPC原型机研制，为CEPC Ref-TDR原型研制提供重要参考
- 研制像素型读出单元芯片和束流验证探测器模块。

谢谢！