



正负电子对撞机上高粒度读出时间投影室 束流本底与原型机研究进展

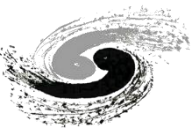
郑建波, 祁辉荣, 余信

- 1、中国科学院高能物理研究所
- 2、中国科学院大学

第二十三届全国核电子学与核探测技术学术年会(NED2026), 登封
2026年8月12日

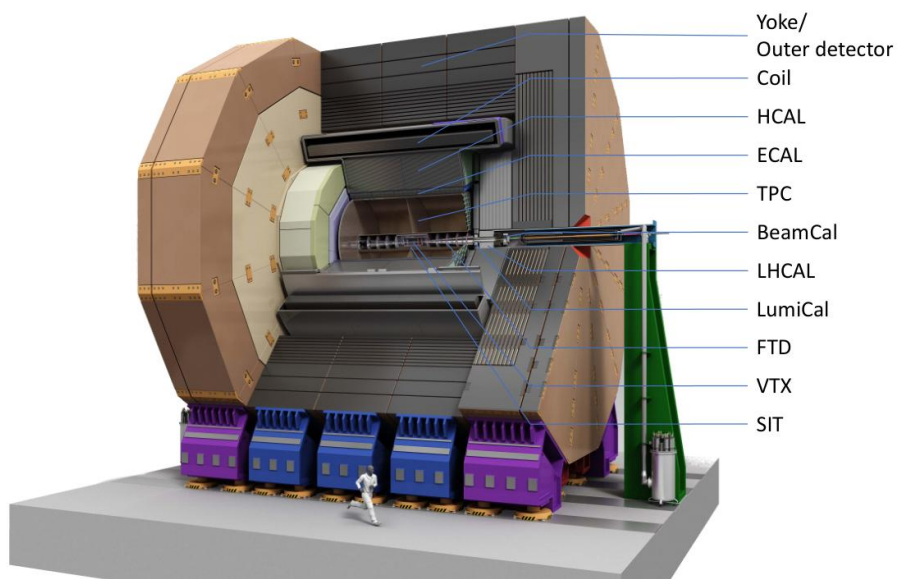
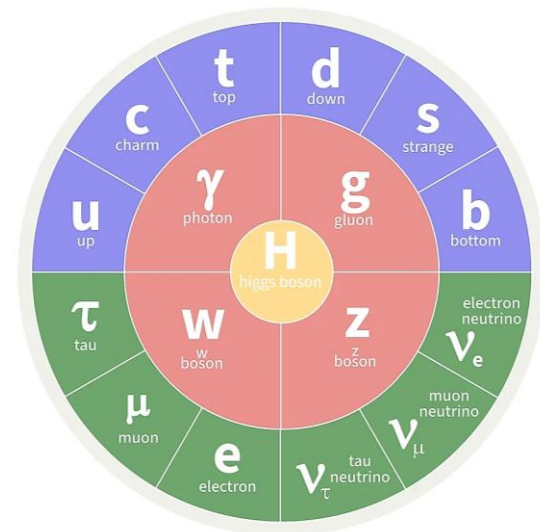


- 研究背景
- 时间投影室中束流本底研究
- 空间电荷效应与束流本底优化
- 总结

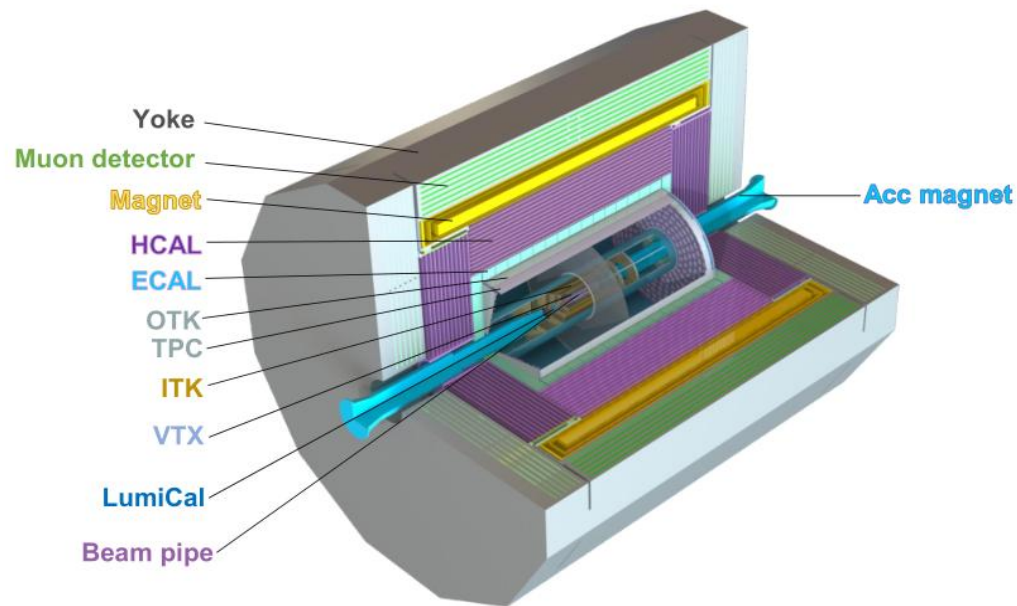


研究背景-TPC的优势

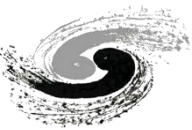
- 希格斯粒子的发现揭示了基本粒子质量的起源之谜，但其物理规律仍需大型探测器来完善
 - 电弱对称性破缺、正反物质不对称、宇宙早期演化、探索暗物质 → 正负电子对撞希格斯工厂
- TPC具有质量极低、精确三维径迹重建以及优异的粒子鉴别性能等技术优势
 - 正负电子对撞实验 (PEP, ALEPH)
 - 重核对撞实验 (ALICE, STAR)
 - 中微子与暗物质探测实验 (PANDA X, T2K)
 - 作为未来多个正负电子对撞机的基准主径迹探测器选型 (AGORA、FCC-ee、ILD)



ILD, [Arxiv:1306.6327](https://arxiv.org/abs/1306.6327)



AGORA, [Arxiv:2510.05260](https://arxiv.org/abs/2510.05260)

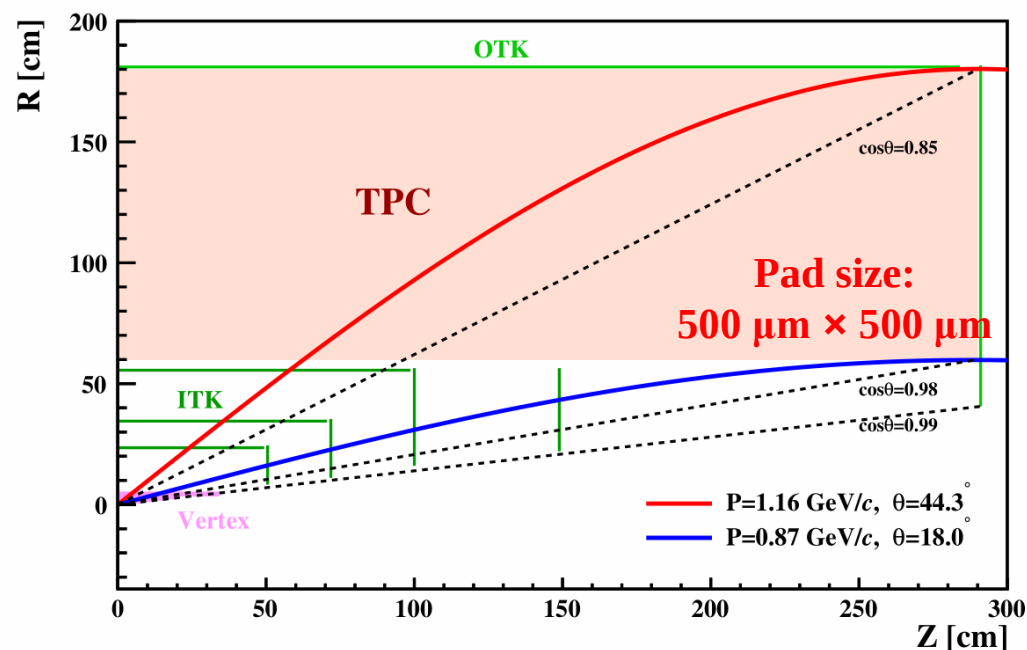


研究背景-CEPC的需求

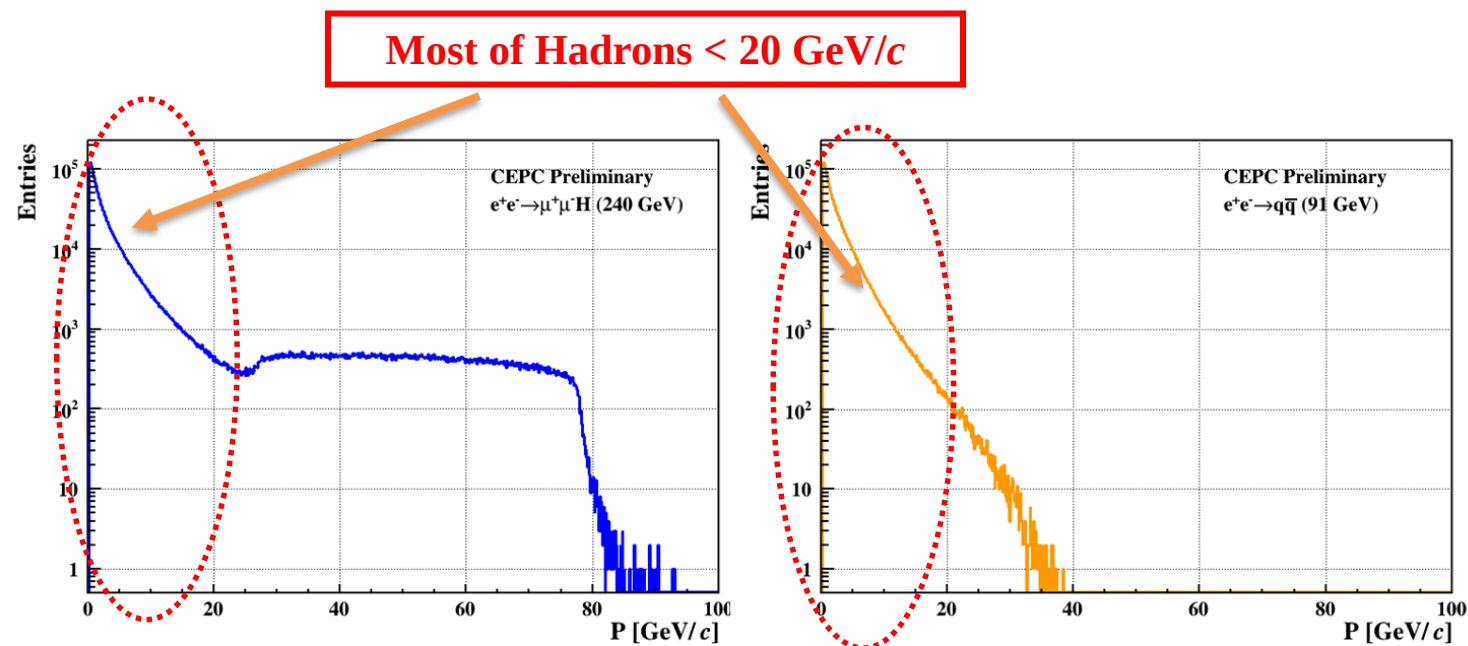
■ **CEPC基准径迹探测系统**: 高粒度读出气体时间投影室(TPC) + 多种硅探测器(VTX、ITK以及OTK)

■ **径迹探测在未来对撞机实验中具有核心地位**:

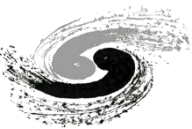
- 实现带电粒子径迹探测, 整体径迹探测系统动量分辨: $\sigma_{PT}/P_T \sim 0.3\%$ ($P_T < 100 \text{ GeV}/c$)
- TPC自身动量分辨 $\sigma_{PT}/P_T \sim 0.5\text{—}1\%$ → 气体极低的物质质量 → **提升对低动量粒子动量分辨**
- 带电粒子鉴别性能: 3σ 的 π/K 区分能力 ($1\text{—}20 \text{ GeV}/c$) → TPC ($dN/dx \sim 3\%$) + OTK ($\sim 50 \text{ ps}$)



CEPC 径迹系统 (Tracker system) R-Z平面布局



CEPC 不同物理过程末态带电粒子动量分布, (左) $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-H$, (右) $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$



研究背景-TPC关键问题

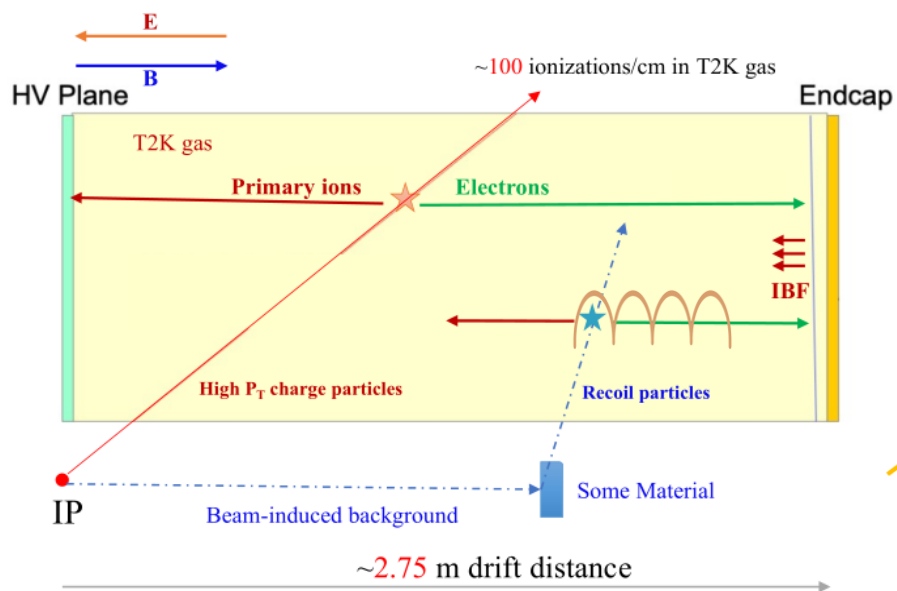
■ AGORA探测器设计主要面向未来希格斯 (H) 和低亮度 Z 模式运行

- 峰值亮度分别达到 10^{34} 和 $10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 探测器磁场均为 3T

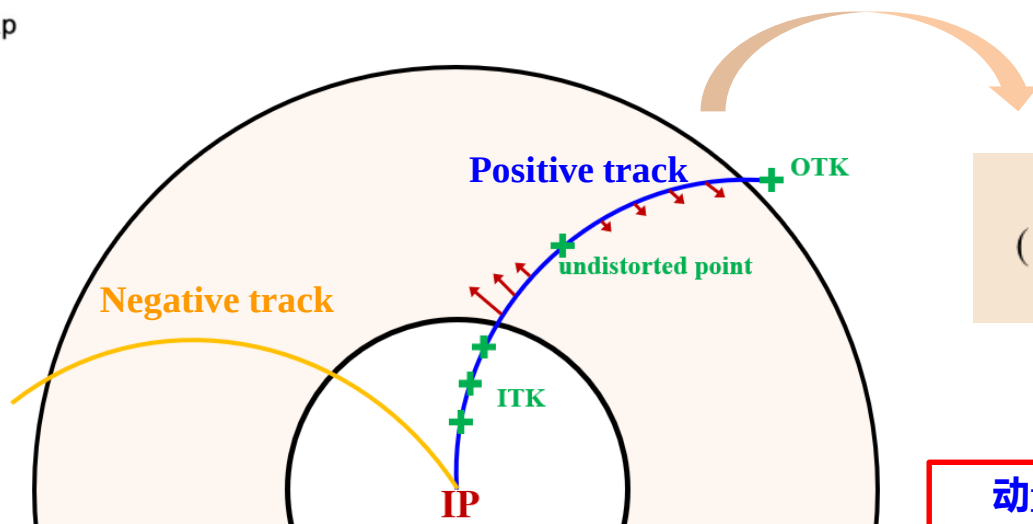
■ TPC作为主径迹探测器具有相当的挑战性:

- 高亮度运行时束流本底 → 正离子主要源项
- 腔体内正离子堆积 → 空间电荷效应

亟待解决的研究热点和共性问题



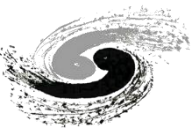
TPC中空间电荷来源示意图



空间电荷效应带来的测量点畸变示意图

$$\left(\frac{\sigma_{P_T}}{P_T^2}\right)_{meas.} = \frac{\sigma_{r\varphi}}{0.3BL_0^2} \sqrt{\frac{720}{N+4}}$$

动量测量精度下降并引入系统效应



TPC中束流本底研究-束流本底种类简介

■ 束流本底种类:

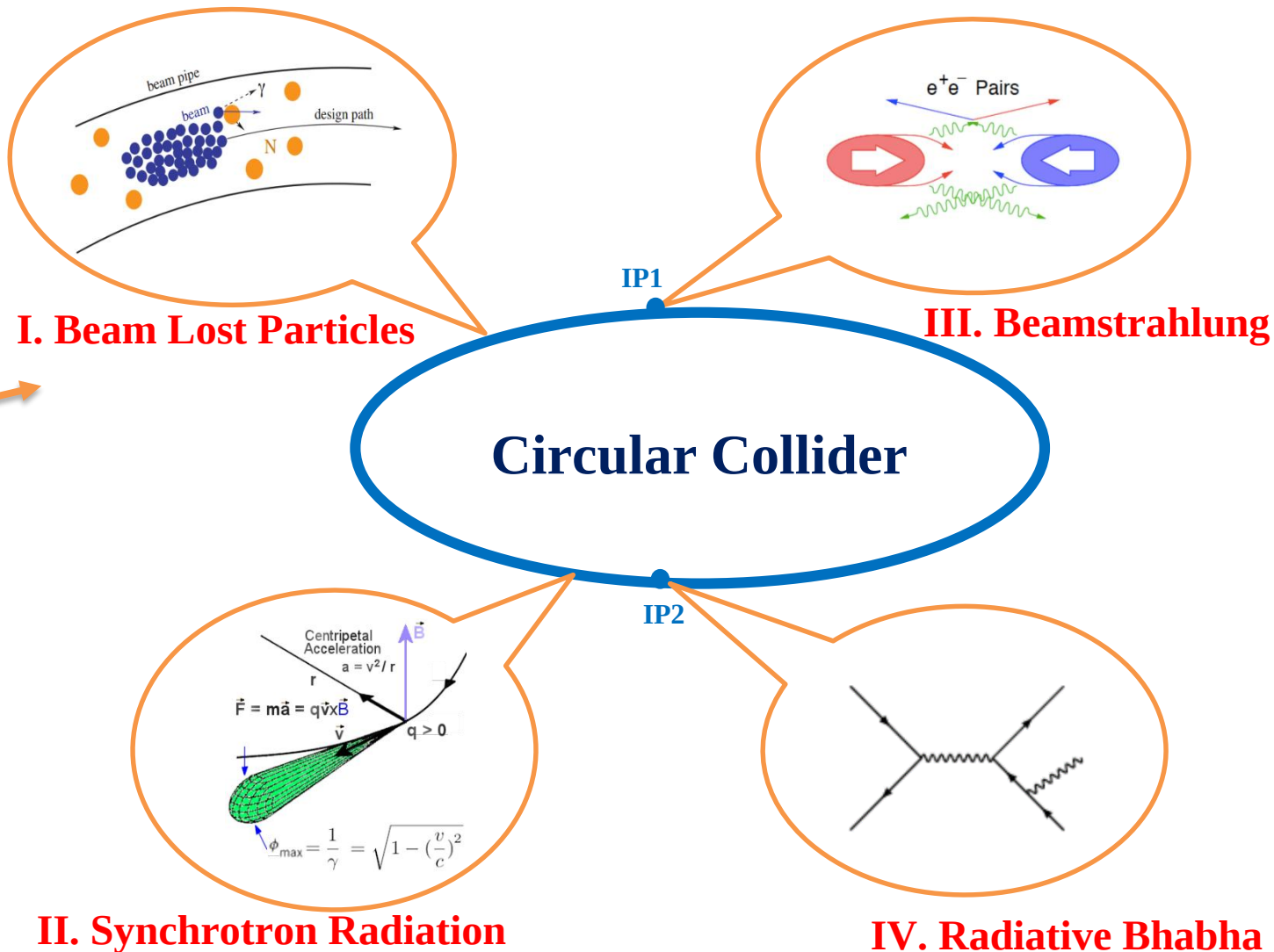
- 单束团本底 (Single Beam)
- 亮度相关本底 (Luminosity-related)

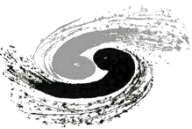
■ 单束团本底 (全环分布)

- 束-气散射 (BGS)
- 束流热光子散射 (BTH)
- 托歇克散射 (TSK)
- 同步辐射 (SR)

■ 亮度相关本底 (对撞点附近)

- 辐射巴巴 (RBB)
- 束致辐射 (Beamstrahlung)





TPC中束流本底研究-束流本底模拟框架

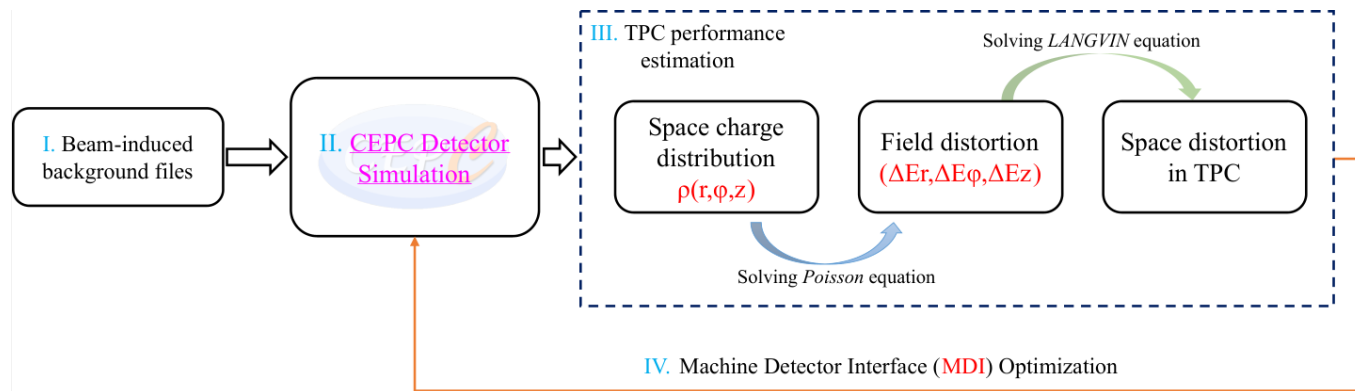
■ 针对MDI区域产生的主要本底过程，建立完整束流本底模拟研究流程，开展详细模拟

- 亮度相关本底: **Beamstrahlung**
- 单束团本底: **BGC, BGB, BTH 以及 TSK**

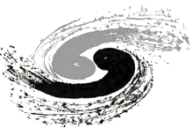
已在CEPC Ref-TDR中给出
详细研究进展及结果

■ 综合评估空间电荷效应对TPC径迹探测性能影响，并开展优化研究，抑制本底

Backgrounds	Generation	Tracking	
Beamstrahlung/ Pair production	Guinea-Pig++	SAD	Luminosity related (BS files)
Beam-Gas Coulomb (BGC)	BGC in SAD		Single-Beam (Lost maps)
Beam-Gas Bremsstrahlung (BGB)	PyBGB		
Beam-Thermal Photon (BTH)	PyBTH		
Touschek Scattering (TSK)	TSK in SAD		



TPC束流本底模拟流程

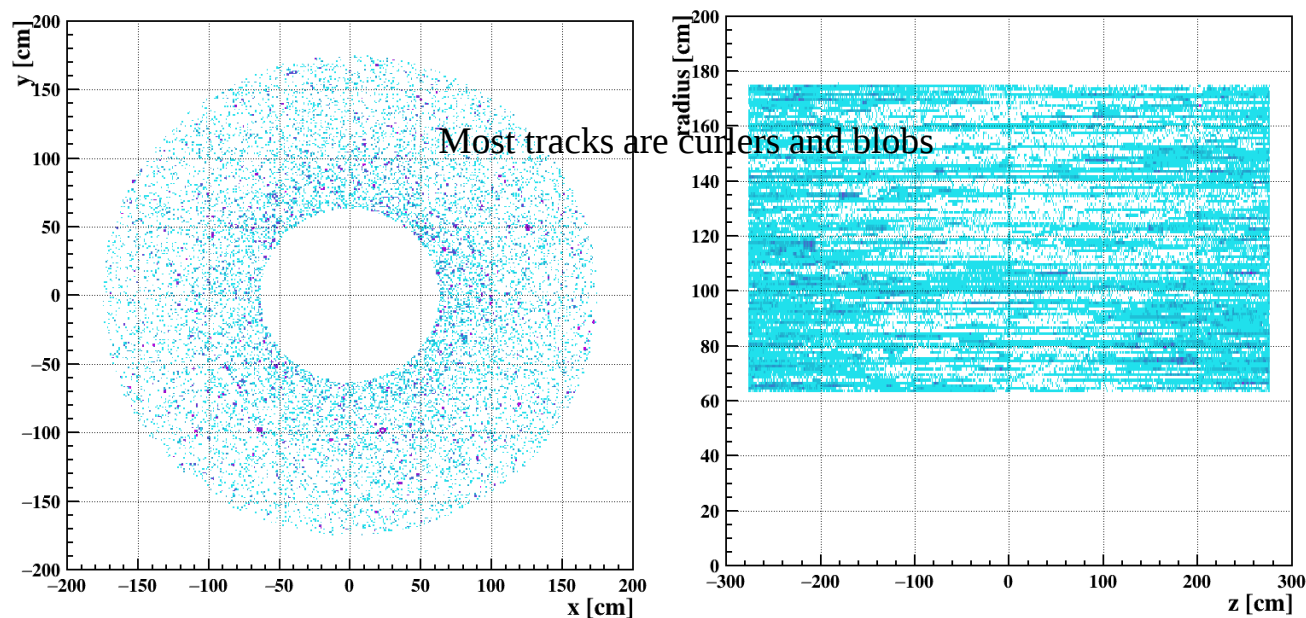


TPC中束流本底研究-典型本底事例显示

■ 不同于物理事例，TPC本底击中主要表现为微小打圈和斑点状径迹

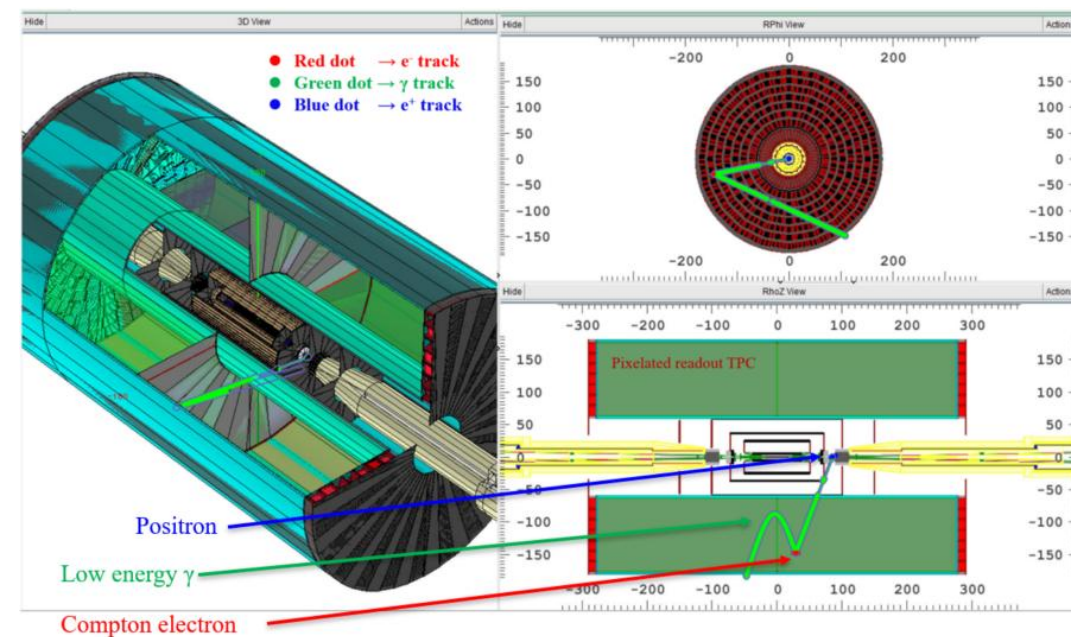
- 成因：由**极低能电子**造成(< 1 MeV)
- 来源：**光子**与TPC工作气体相互作用

■ 极少量动量较高径迹可穿出TPC外桶

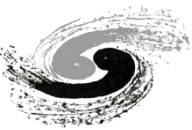


50 MW 希格斯模式100 次束团对撞, TPC本底击中位置显示

$background\ e^+annihilation \rightarrow \gamma(0.511MeV) \rightarrow Compton\ e^-$



TPC中极低能本底电子产生过程事例显示



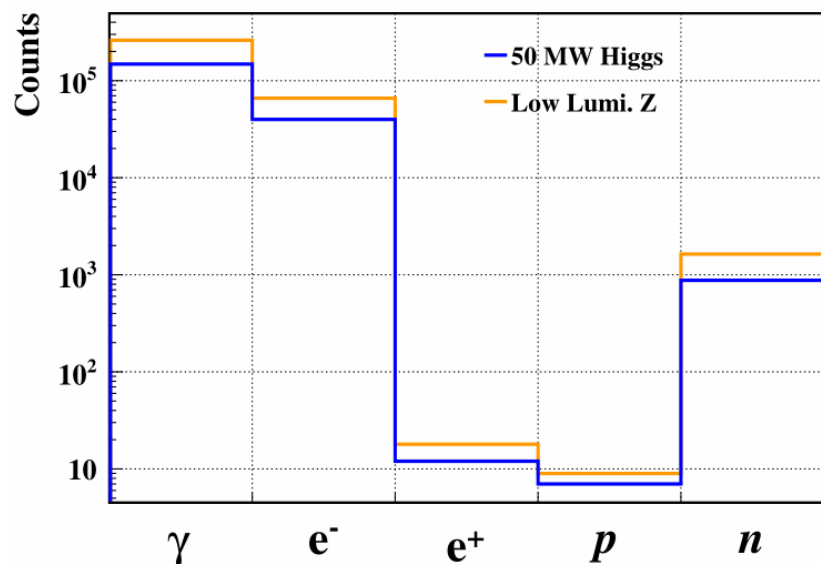
TPC中束流本底研究-本底粒子性质分析

■ 进入TPC灵敏体积的主要本底粒子组成——光子与电子：

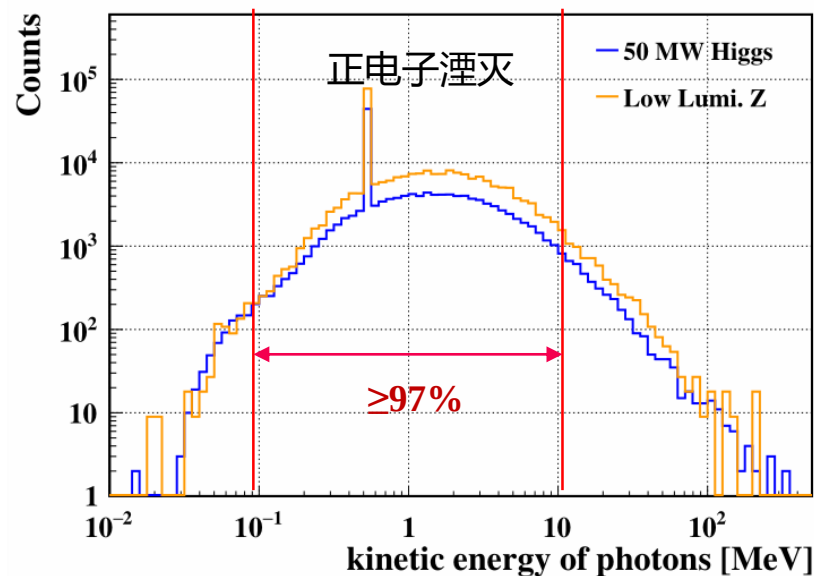
- 数量远高于其他种类粒子（正电子，质子以及中子）

■ 明确 10 MeV 以下低能光子为TPC为空间电荷主要来源

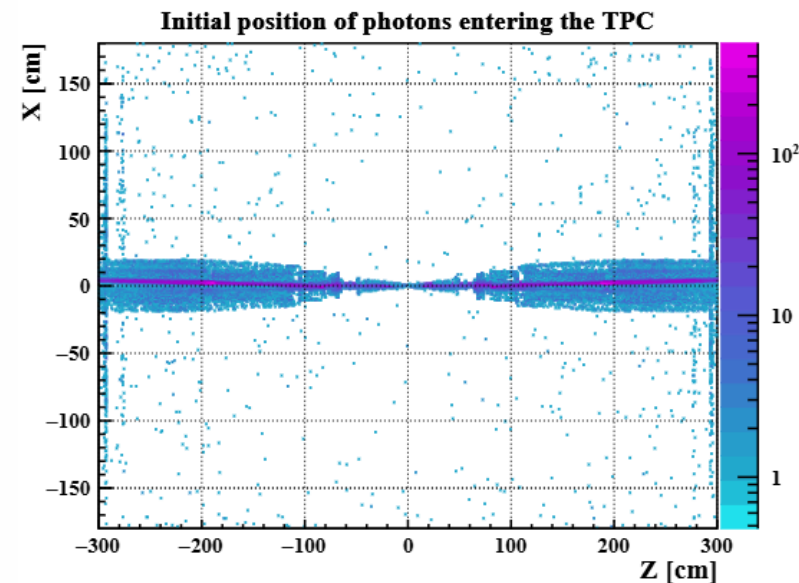
- TPC中空间电荷主要由MDI下游区域产生的次级低能光子导致
- 光子主要产生过程为：**韧致辐射**和**正电子湮灭**



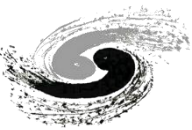
单位时间内进入TPC束流本底粒子种类分布



束流本底粒子中低能光子能量分布



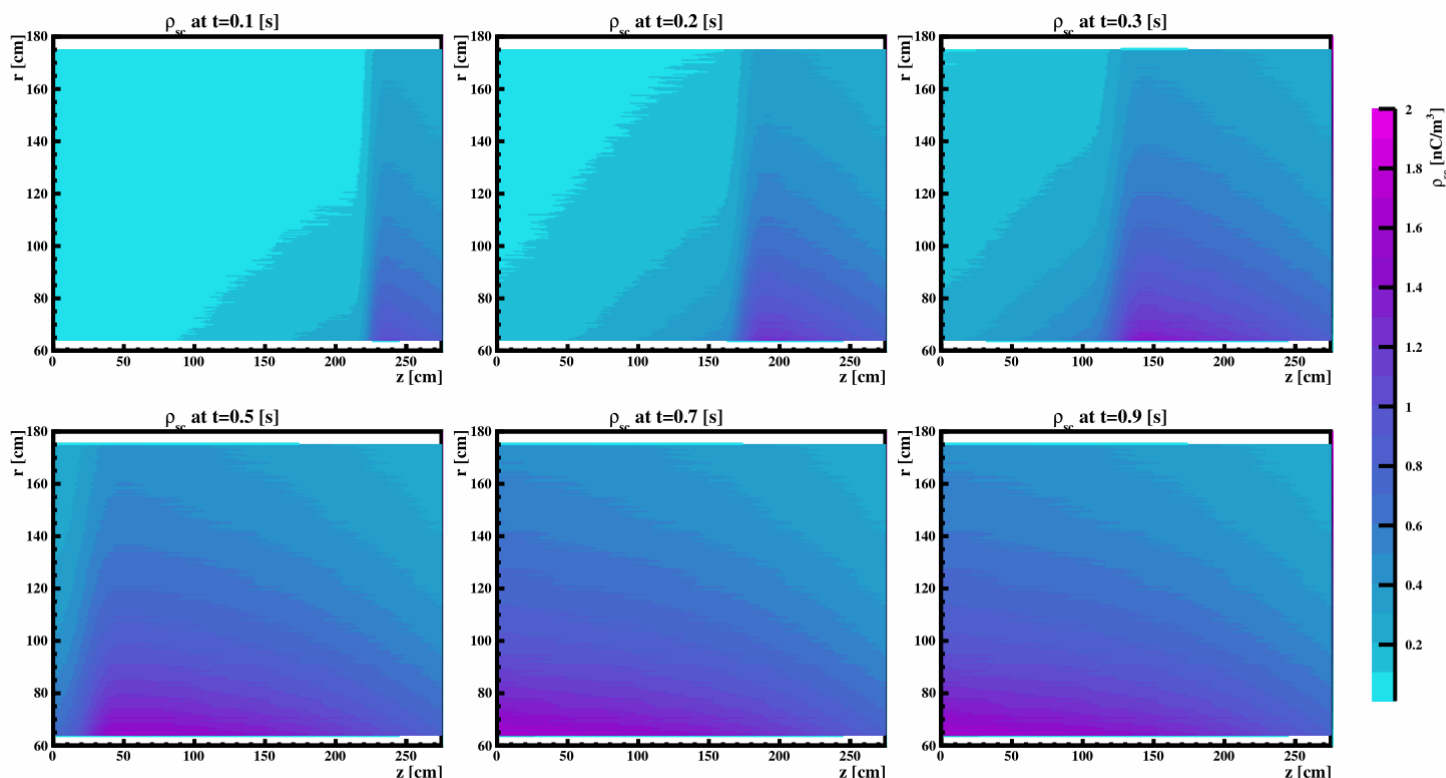
低能光子产生区域



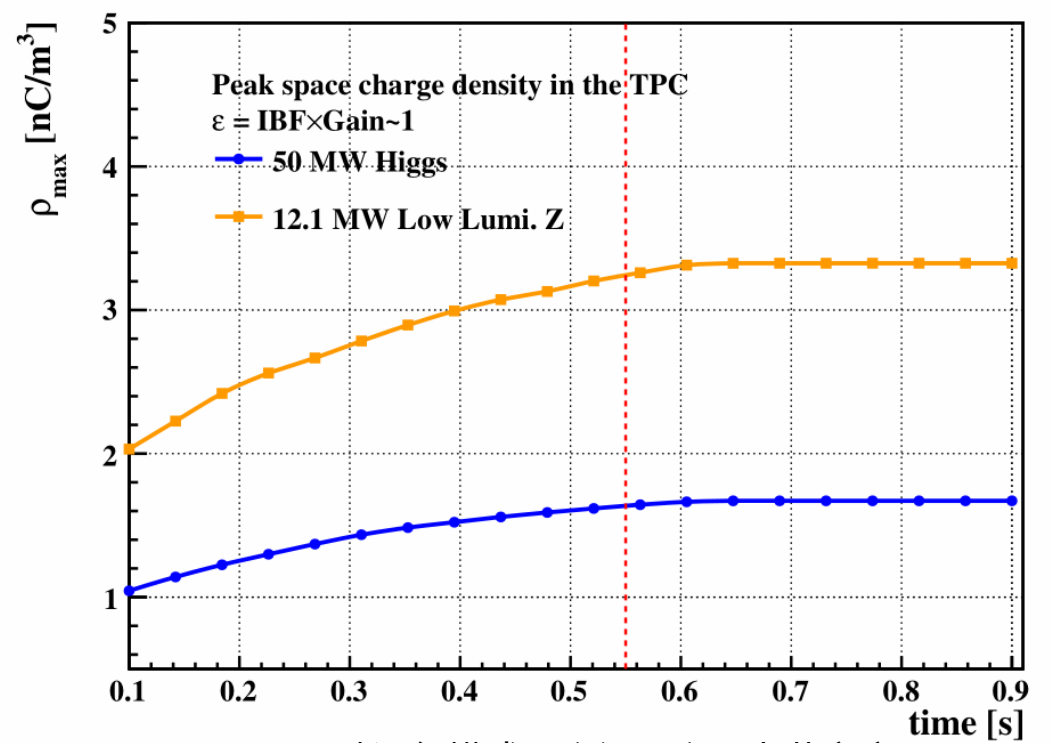
TPC中束流本底研究-TPC空间电荷密度

- 综合考虑束流本底源项，正离子反馈以及离子漂移扩散运动，求解得到空间正离子密度随时间演化
- 两种运行模式下最大空间电荷密度约 1.7 和 3.3 nC/m³
 - Time > 0.55s 后，TPC离子密度达到平衡
 - 介于直线轻子对撞实验ILC与重核对撞实验ALICE之间

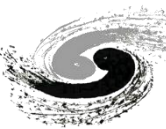
Experiment	Max. ρ_{sc}	IBF×Gain	Deviation level
ALICE	120 nC/m ³	20	$\mathcal{O}(\text{cm})$
ILD @ ILC	0.05 nC/m ³	1	< 10 μm



TPC空间正离子密度随时间演化



两种运行模式下空间正离子电荷密度



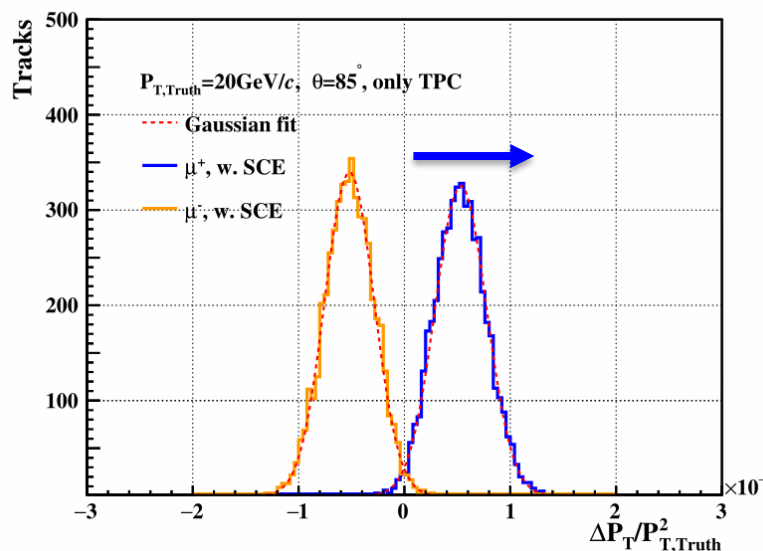
空间电荷效应与束流本底优化-空间电荷效应的影响(1):动量中心值

■ 结合束流本底模拟结果，在TPC径迹重建分析中加入空间电荷效应影响

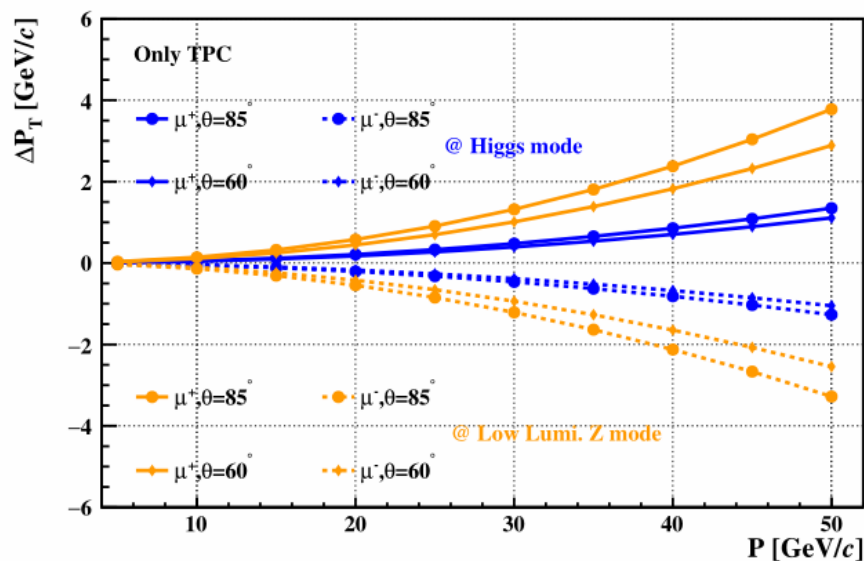
- 空间电荷效应引入额外的偏差，依赖于粒子电荷、入射角度与动量
- 正电粒子动量测量偏大，负电粒子动量测量偏小 → **系统误差**

■ 给出不同运行模式下，空间电荷效应对动量测量中心值的影响

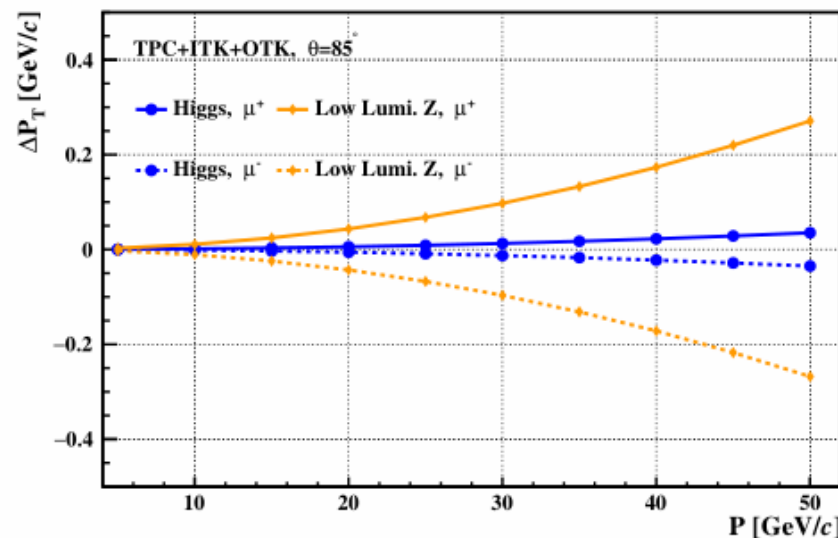
- 随动量呈类二次抛物线型增长趋势
- 联合ITK与OTK，**横动量偏移得到有效抑制**



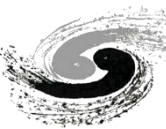
考虑空间效应后，20GeV/c μ 子重建动量分布



TPC自身重建动量偏移随动量、角度变化曲线



联合ITK，OTK后重建动量偏移随动量变化曲线



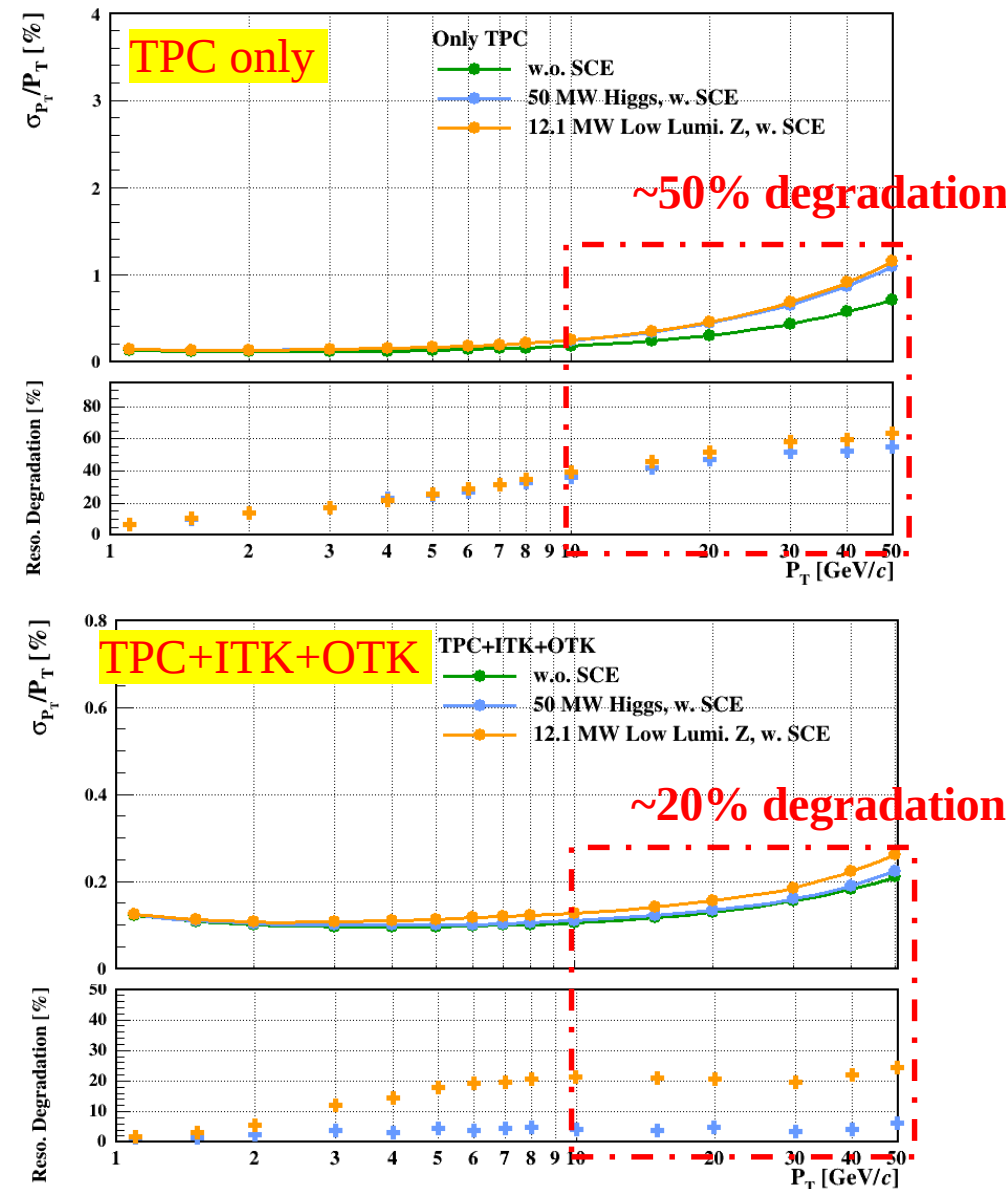
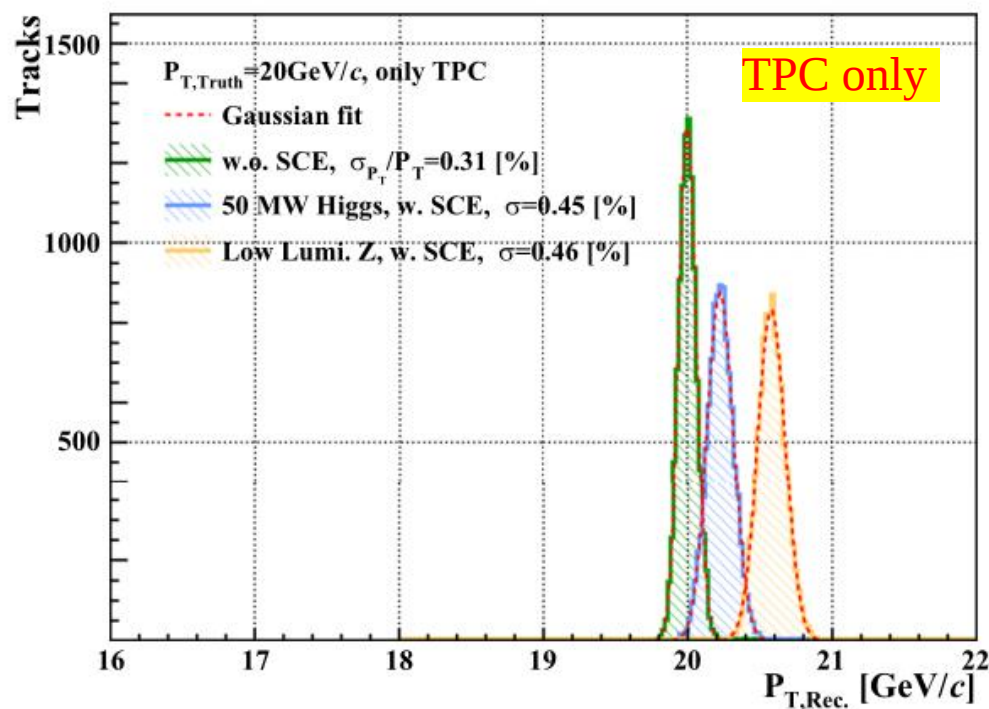
空间电荷效应与束流本底优化-空间电荷效应的影响(2):动量分辨率

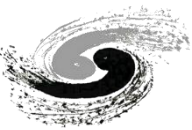
不同运行模式下，空间电荷效应对动量分辨率的影响

- 不同入射角随机入射，重建动量偏移不同 → 重建动量分辨整体下降

空间电荷效应主要影响 10 GeV/c 以上高动量粒子重建

- $P_T > 10$ GeV/c, TPC自身动量分辨下降超过 50%
- 联合ITK与OTK, Low Lumi. Z 下降超 20%, 50 MW H 模式 <10%





空间电荷效应与束流本底优化-对撞区(MDI region)设计优化

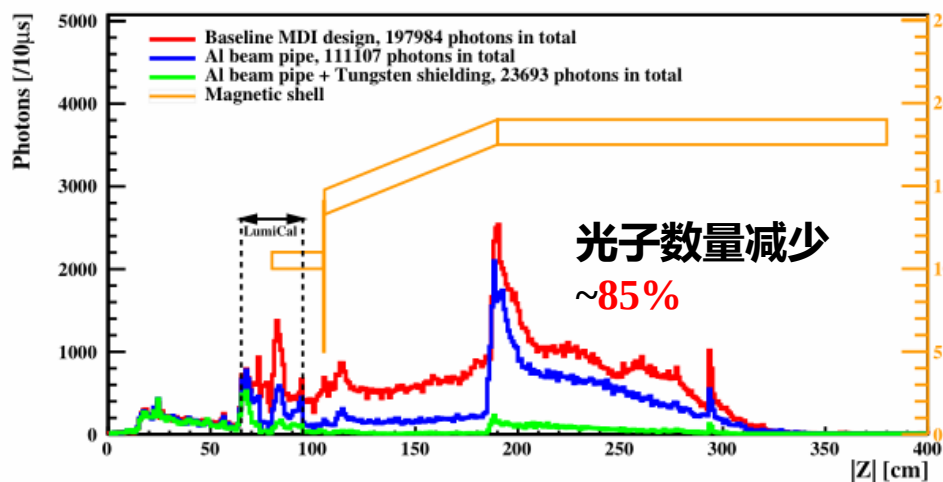
MDI区域的综合优化, 控制束流本底源项:

- 优化下游加速器组件: 束流管材料, 增加屏蔽
- 相同时间进入TPC低能光子数减少 $\sim 85\%$
- 优化后, 两种运行模式下最大空间电荷均 $< 1 \text{ nC/m}^3$

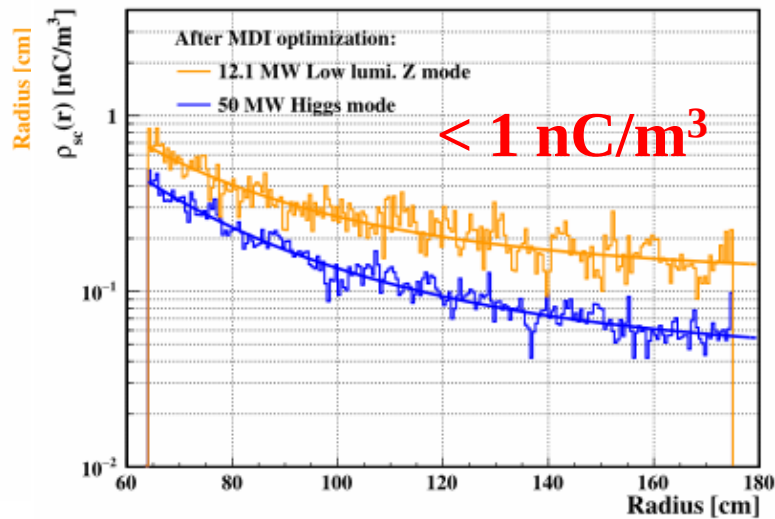


Al beam-pipe + Tungsten shielding

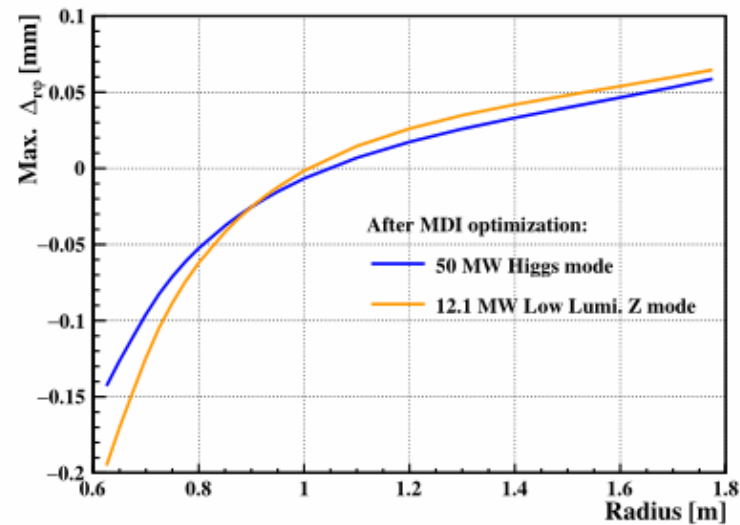
绝大部分区域 (radius > 0.7 m), $r\phi$ 方向电子漂移偏差 < 150 μm



MDI区域优化前后进入TPC低能光子数沿z轴分布



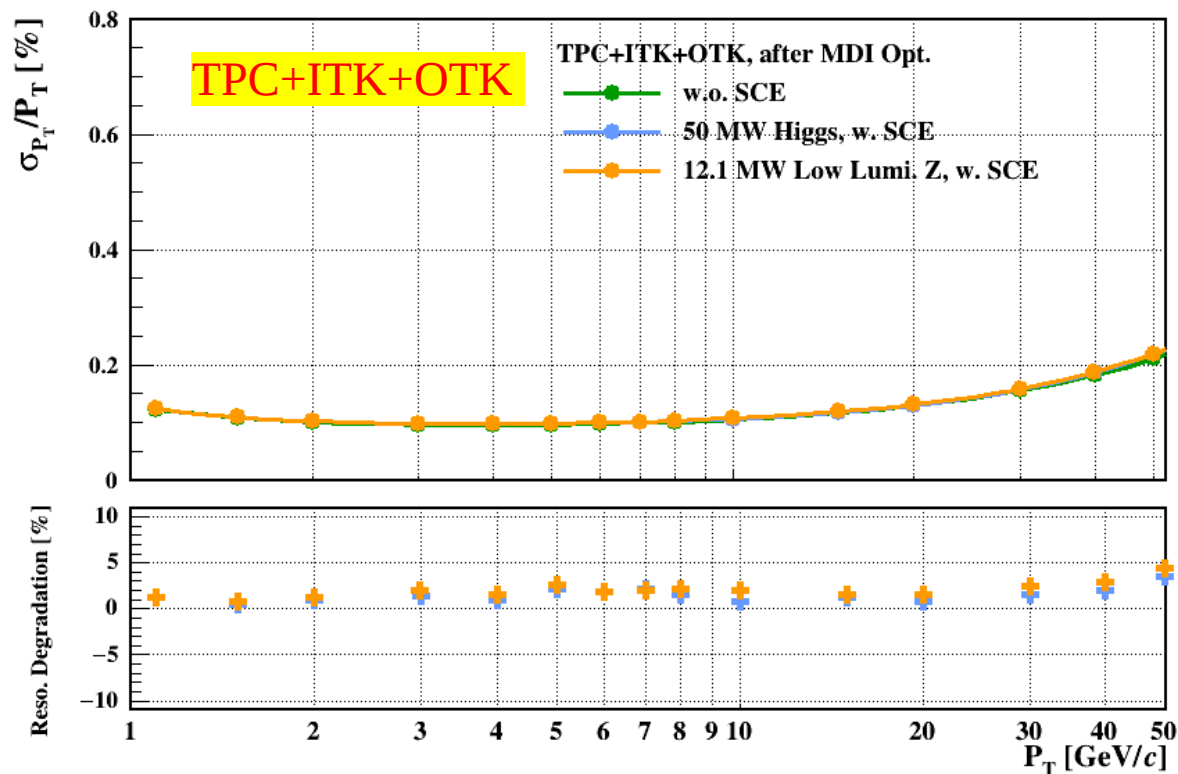
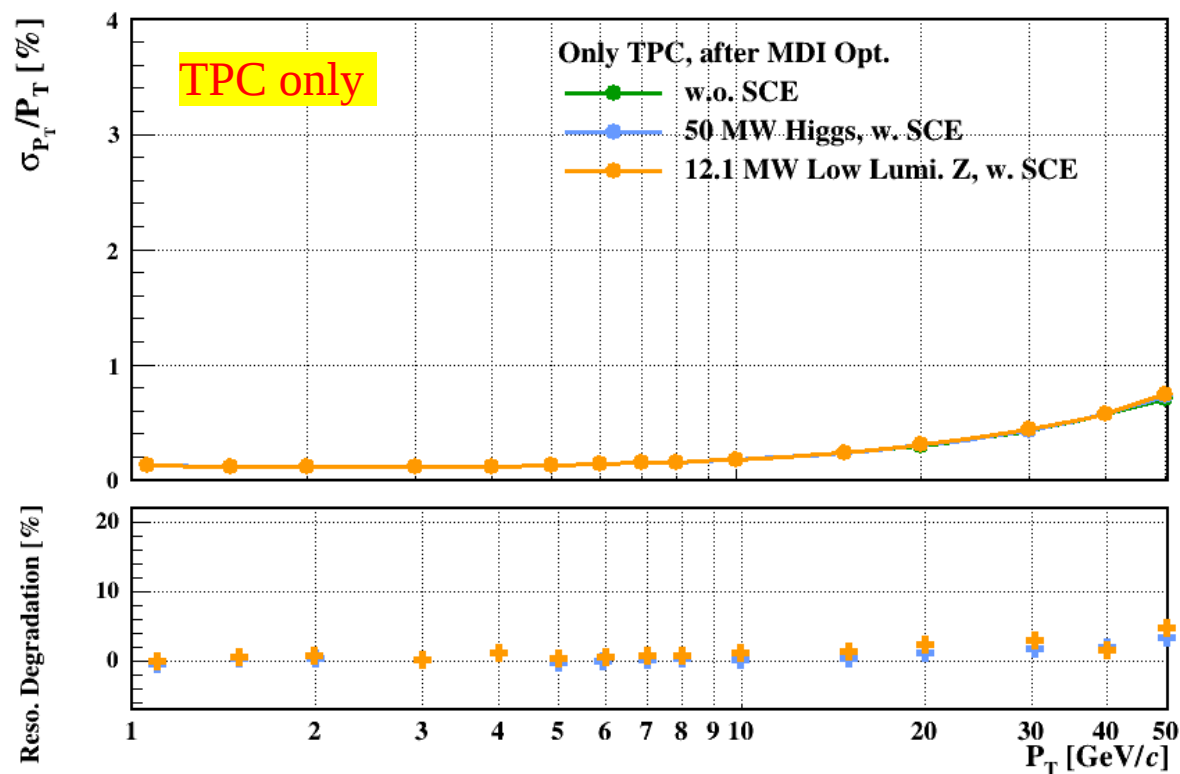
MDI区域优化后, TPC中空间电荷分布



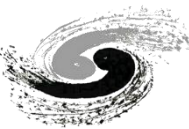
最大漂移偏差随TPC半径变化

空间电荷效应与束流本底优化-MDI区域优化后性能

- MDI区域优化后, TPC自身以及联合ITK, OTK的动量分辨显著提升
 - TPC自身动量分辨下降 $< 10\%$
 - 联合ITK与OTK, 动量分辨下降 $< 5\%$, 基本满足CEPC径迹探测需求
- 可为CEPC探测器, 实际工程建造以及国际同类型机器提供设计参考



MDI区域优化后TPC自身 (左), 联合TPC+ITK+OTK (右) 重建动量分辨性能



■ 高粒度读出TPC作为CEPC基准主径迹探测器

- 提出束流本底是影响TPC径迹探测的关键技术挑战
- 明确TPC中空间电荷的产生机制和来源
- 系统建立束流本底研究流程，评估CEPC实验环境下各类束流本底对TPC性能影响

■ 同步辐射本底对未来各种探测器方案带来巨大挑战

- 综合优化MDI设计，屏蔽低能光子
- 优化TPC工作气体，减少原初正离子产生
- 探索新型正离子反馈抑制实验研究

■ 开展高粒度读出TPC原型实验研究，进一步验证其PID与径迹探测性能



后续报告



感谢聆听

