



# STCF 前向区系统研究进展

王杰

(代表STCF前向区工作组)

中国地质大学 (武汉)

2026年超级陶浆装置研讨会, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 7月2日

# 目录

- STCF 前向区系统

- 亮度监测

  - 金刚石探测器

  - 切伦科夫探测器

- 前向探测器

  - 前向量能器

  - 零角度探测器

- MDI 和本底研究

- 总结

# 目录

- **STCF 前向区系统**

- 亮度监测

  - 金刚石探测器

  - 切伦科夫探测器

- 前向探测器

  - 前向量能器

  - 零角度探测器

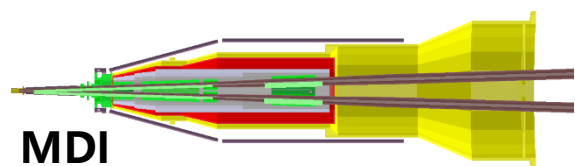
- MDI 和本底研究

- 总结

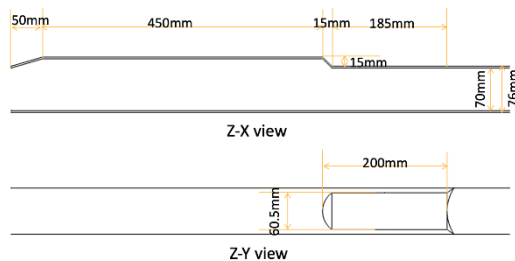
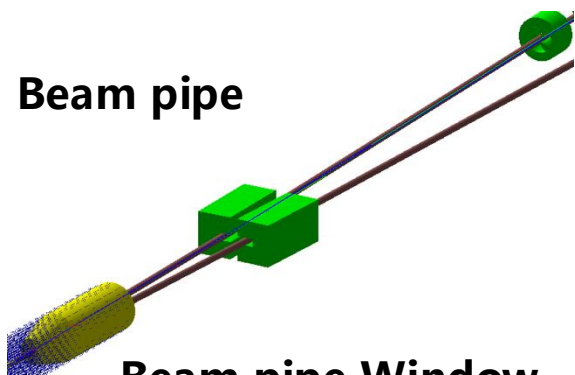


针对 STCF 前向探测器的设计，已构建了完整的全模拟（Full Simulation）框架。

## Geometry

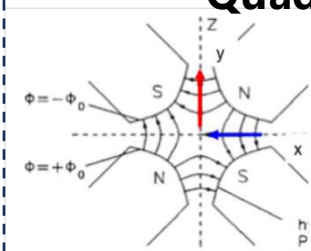


Beam pipe

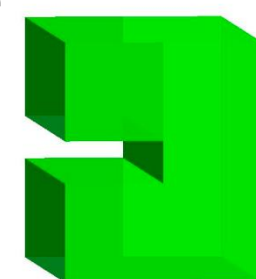
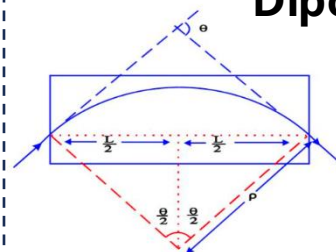


## Magnetic Field

### Quadrupole



### Dipole



## Event Generator

- Several specialized event generators focus on specific processes at STCF, including:

**BBBREM:** radiative Bhabha  
DOI: [10.1016/0010-4655\(94\)90085-X](https://doi.org/10.1016/0010-4655(94)90085-X)

**EKHARA:** hadrons with tagged photons  
DOI: [10.1016/j.cpc.2018.07.021](https://doi.org/10.1016/j.cpc.2018.07.021)

**BHWIDE:** small angle Bhabha scattering  
DOI: [10.1016/S0370-2693\(96\)01382-2](https://doi.org/10.1016/S0370-2693(96)01382-2)

# 前向区-磁场更新

## 近 IP 区束流管磁场更新

### 更新动机

- 谱仪轴向场  $B_z \approx 1$  T 会弯转近 IP 区低能/损失能量后的  $e^+/e^-$ 。
- 束流管附近磁场会影响前向出射粒子的 hit 位置、能量沉积和本底分布

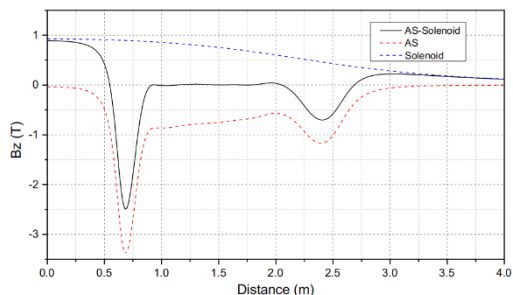
### 实现方法

- 在 DD4hep 中叠加主探测器磁场与反向补偿磁场
- 补偿线圈沿近 IP 束流管方向布置，近似匹配束流管几何
- 通过 GeometrySvc 注册三维磁场分量，并自动叠加形成补偿后的总磁场

### 当前状态

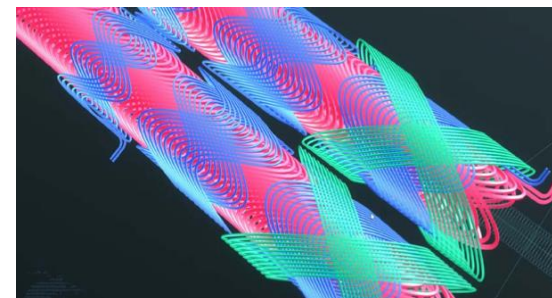
- Anti 场在 Z-axis 与 beam center 上完成匹配验证
- 在 xz 平面可观察到沿束流线分布的局部补偿场结构
- 后续将完善三维磁场图，并构建最终的补偿螺线管磁场模型

### 磁场结构: Detector + Anti 叠加



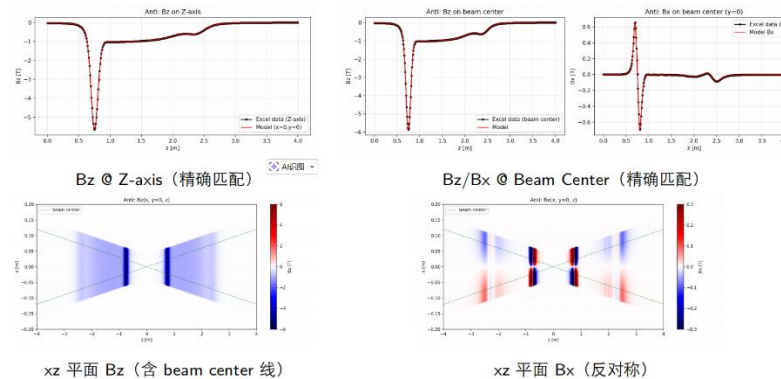
Bz 随距离变化: Anti-Solenoid 提供反向补偿分量

### Anti-Solenoid 几何假设



倾斜补偿线圈围绕近 IP 束流管布置，外场近似为零

### Anti 场验证: 轴线/束流线匹配与 xz 平面分布



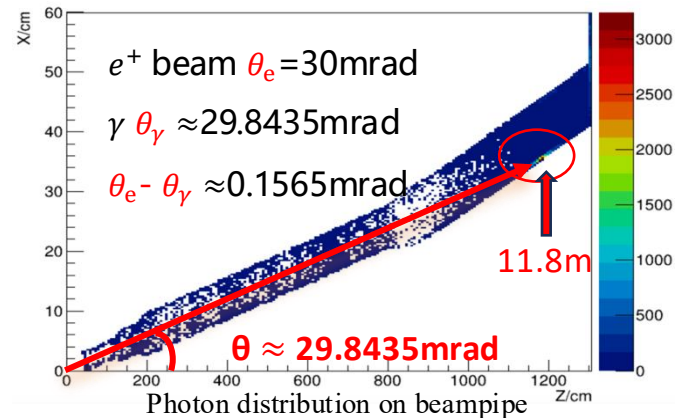
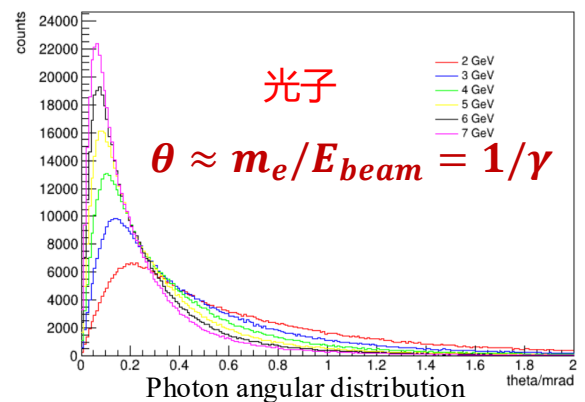
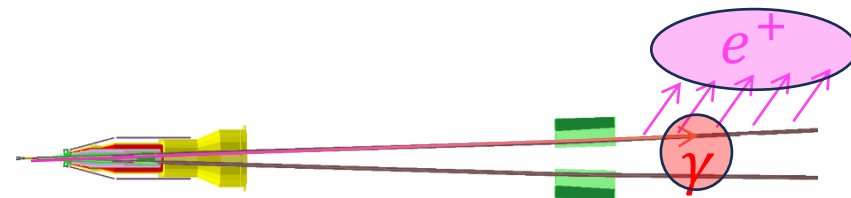
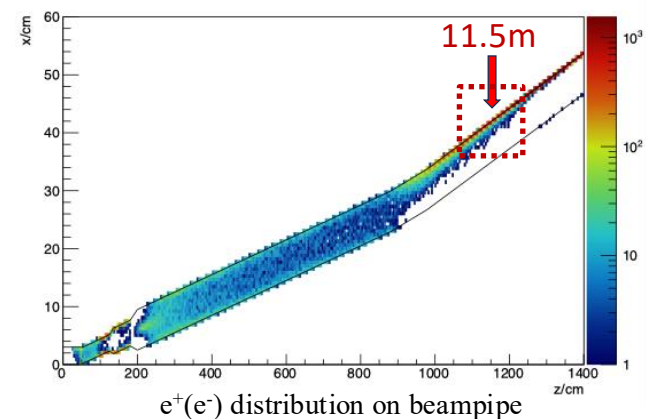
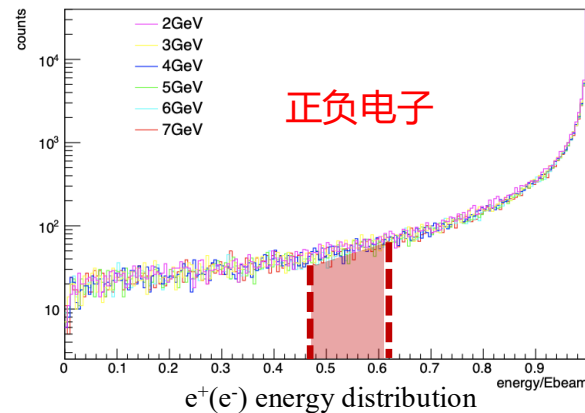
设计目标: 在不改变主谱仪磁场描述的前提下, 对近 IP 束流管区域进行局部补偿, 使丢能后的  $e^+/e^-$  更接近真实束流管约束下的运动

# 目录

- STCF 前向区系统
- **亮度监测**
  - 金刚石探测器
  - 切伦科夫探测器
- 前向探测器
  - 前向量能器
  - 零角度探测器
- MDI 和本底研究
- 总结

# 亮度监测 (FastLumi)

- 亮度：衡量对撞机性能的重要参数 ( $n = L * s$ )
- 超级陶粲装置(STCF):  $\sqrt{s} = 2 \sim 7 \text{ GeV}$  , 峰值亮度  $L = 0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- 束团亮度监测系统(FastLumi)采用**逐束团**(bunch-by-bunch)模式, 实时测量**4 ns**间隔内每对对撞束团之间的**相对亮度**
- 为对撞机的束流调试、诊断与优化提供关键依据, 对在**宽质心能量区间和大亮度范围**下实现并维持对撞机亮度的稳定、进而显著提高对撞机亮度具有重要意义
- FastLumi 通过探测**辐射 Bhabha 散射过程** ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma$ ) 中的光子( $\gamma$ )和散射电子/正电子( $e^\pm$ )信号, 提供对瞬时亮度的实时监测。



➤ sCVD (单晶化学气相沉积) 金刚石探测器因其独特的特性, 是 FastLumi 运行的理想选择。

特性(Property)	金刚石Diamond	硅Silicon
带隙 [eV]	5.5	1.12
击穿电场 [V/cm]	$10^7$	$3 \times 10^5$
电子迁移率 [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	1900	1350
空穴迁移率 [ $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ]	2300	480
位移能 [eV/atom]	43	13-20
热导率 [W/m.K]	~2000	150
产生电子-空穴对所需能量 [eV]	13	3.61
每 $100\mu\text{m}$ 平均产生的信号电荷数 [e0]	3602	8892

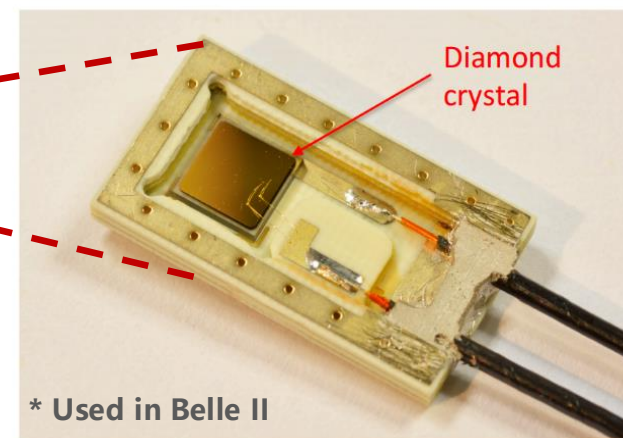
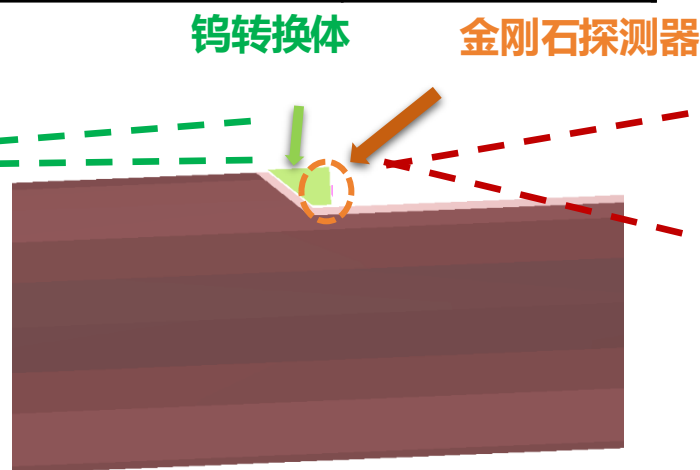
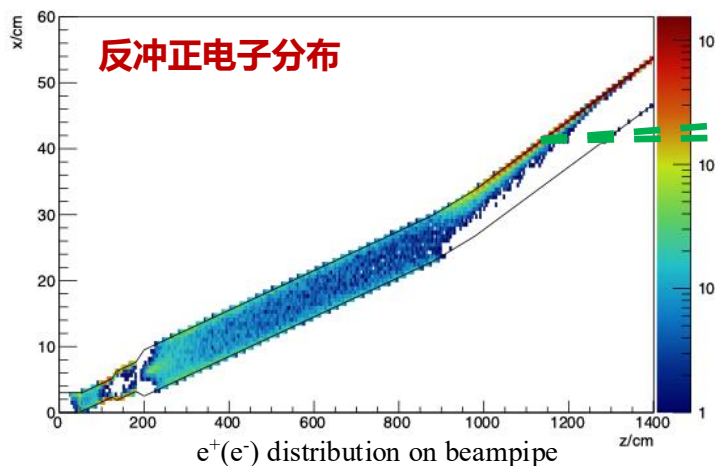
=> 低噪声

=> 快信号响应: (rise time  $< O(1\text{ns})$ )

=> 高耐辐照硬度: ~10 Mrad

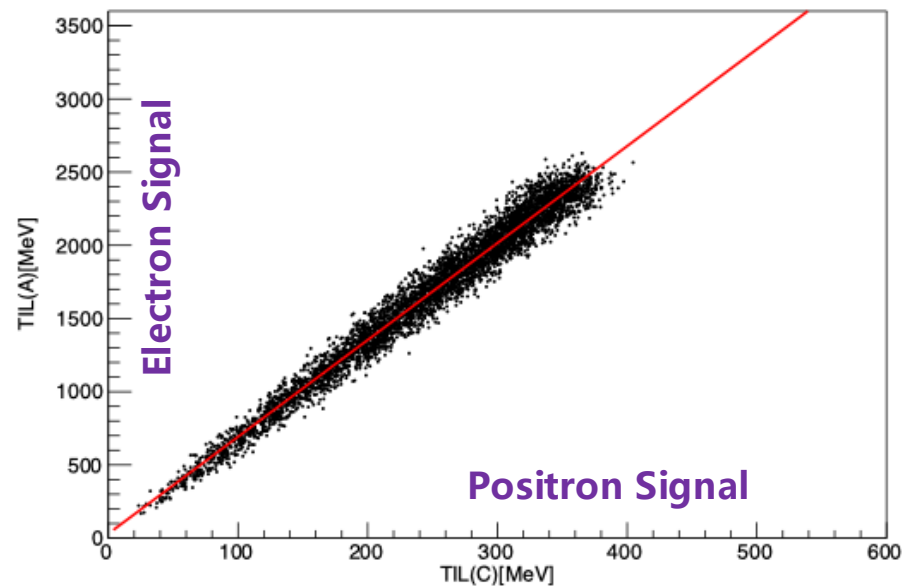
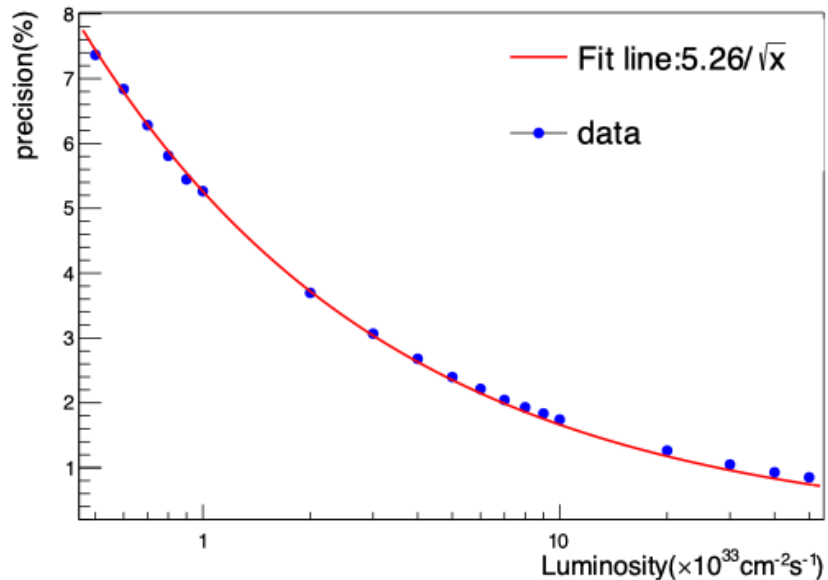
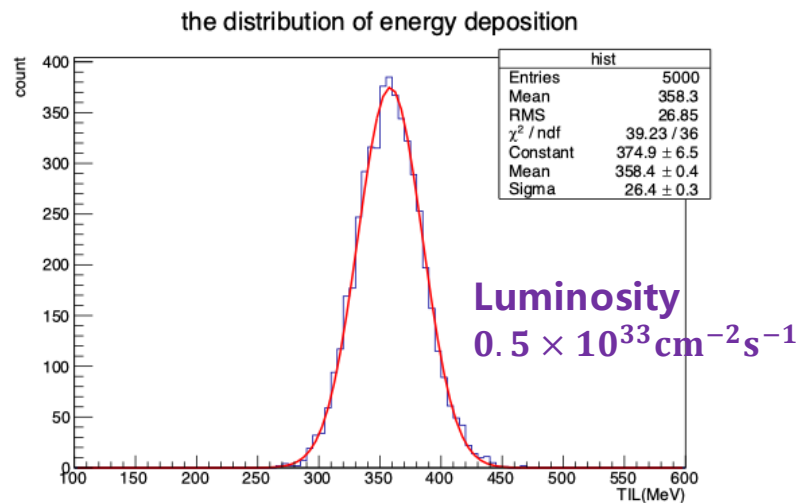
=> 高热导性: No cooling issue

=> 信号电荷量较低



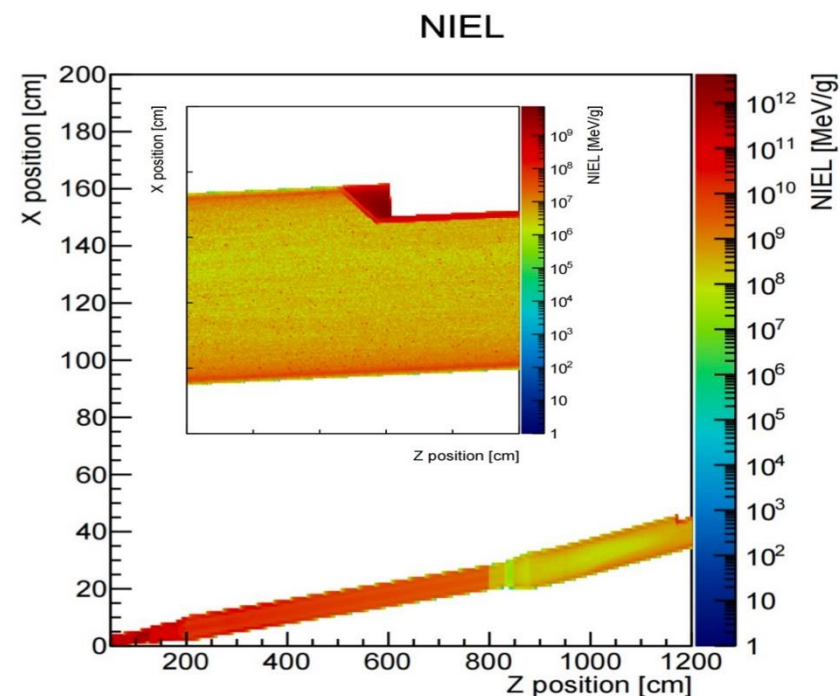
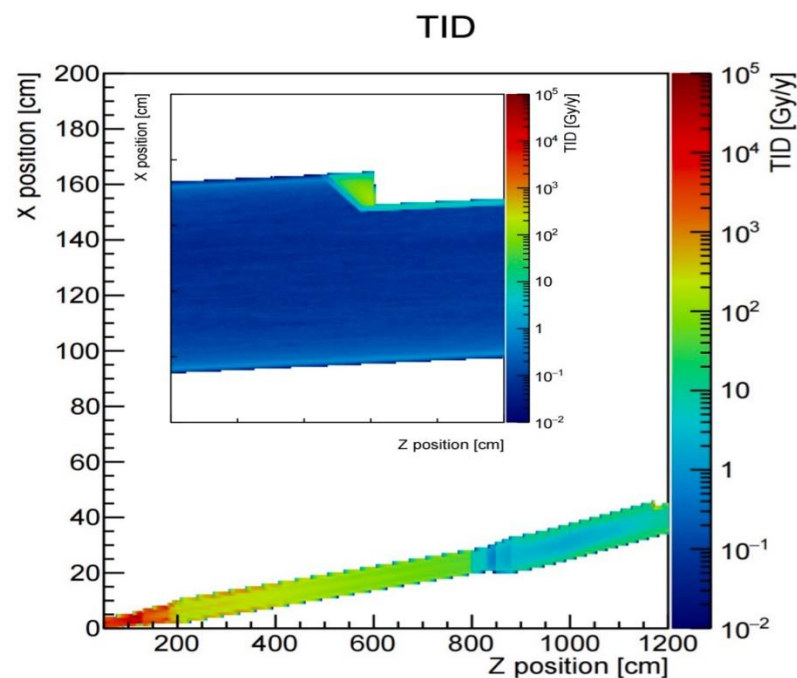
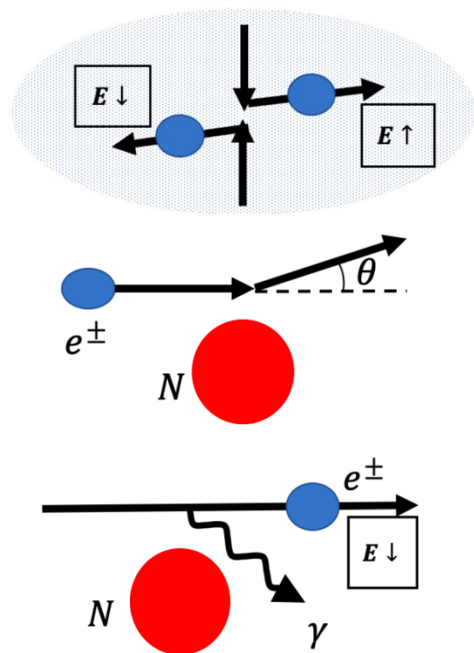
## 性能模拟

- 束团积分亮度评估: 在 1mm 时间窗内, 评估所有对撞束团的**累计积分亮度**
- 相对测量精度演化:
  - 在低亮度  $\mathcal{L} = 0.5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  条件下, 相对精度为 7%。
  - 当亮度达到 STCF 设计峰值  $\mathcal{L} = 0.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  时, 相对测量精度可精密达到 1%。
- 双侧探测器互校准: 两套金刚石探测器分别安放在电子束流和正电子束流的下游, 用于实现**交叉校准**, 模拟结果观测到了极强的线性正相关。



## 本底模拟

- 束流相关本底主要来源于Touschek effect 和 beam-gas effect
- 在1kHz的条件下, 金刚石上的能量沉积低于20 MeV, 信噪比**大于10**
- 辐射剂量评估边界: 总电离剂量(TID)  $\sim 457.1\text{Gy/y}$ , 非电离能损(NIEL)  $\sim 1.09 \times 10^{10}\text{n}_{\text{eq}}/\text{cm}^{-2}/\text{y}^{-1}$ , 均远低于材料的耐受极限

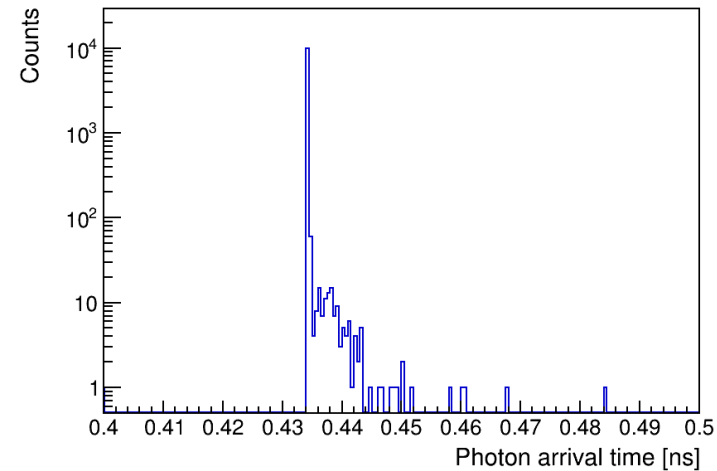
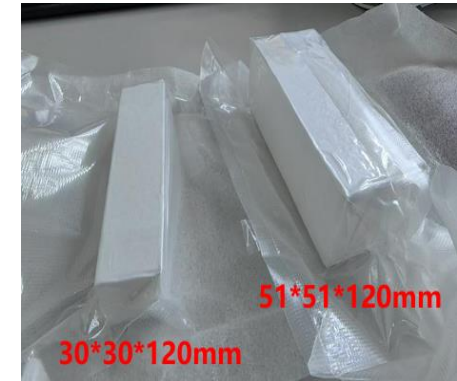
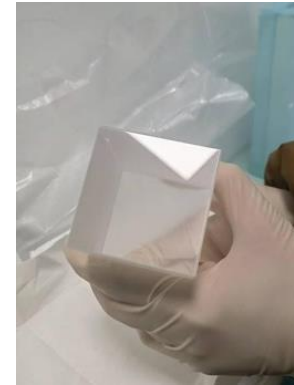


# 切伦科夫探测器

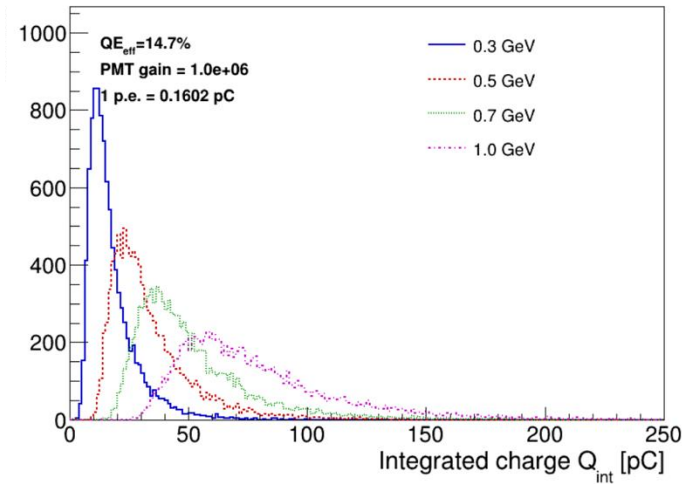
- 面向逐束团亮度监测需求，构建快响应、紧凑型切伦科夫探测器；
- 利用  $PbF_2$  晶体的快时间响应，切伦科夫光到达光阴极时间分布集中 ( $<1ns$ )，和辐射长度短 ( $X_0 \approx 0.93cm$ ) 特点，可实现小尺寸、高辐照环境下的稳定监测；
- 结合 HAMAMATSU 生产的 R2083 光电倍增管，上升时间约为 0.7ns、蓝紫光响应较好，完成切伦科夫光信号读出。

表 4.1  $PbF_2$  与一些较耐辐照闪烁体的性能比较

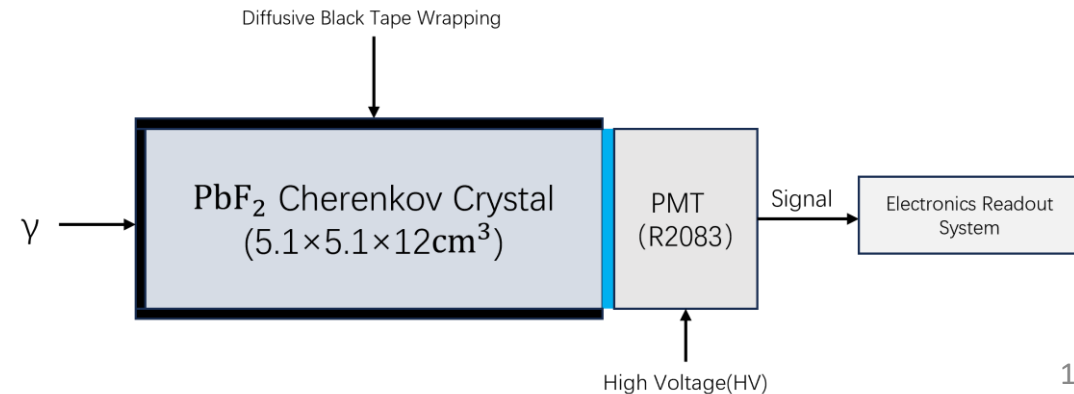
材料名称	$PbF_2$	BGO	LYSO	BaF2	GSO	PbWO4
辐射长度 (cm)	0.93	1.1	1.1	2.1	1.4	0.89
Moliere 半径 (cm)	2.2	2.7	1.9	4.4	2.2	2.2
折射率	1.82	2.15	1.82	1.47	1.8	2.16
发光衰减时间 (ns)	1	300	40-44	0.6,620	30	6,30



光子到达时间分布

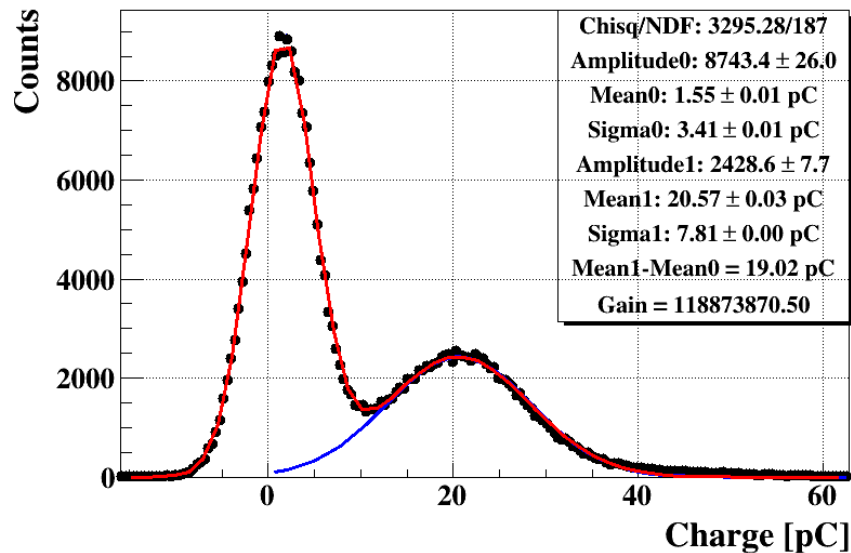


不同gamma能量的积分电荷



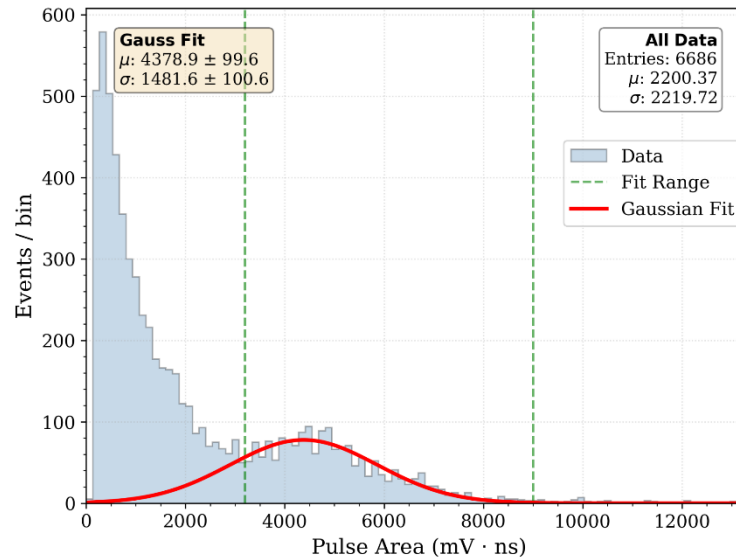
# 切伦科夫探测器

- 进行单光电子 (SPE) 实验。单光电子峰可分辨, PMT工作正常, 获取SPE响应并用于PMT增益标定;

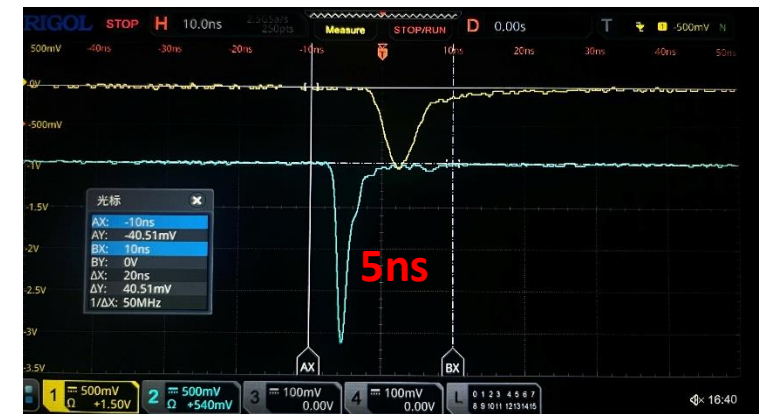
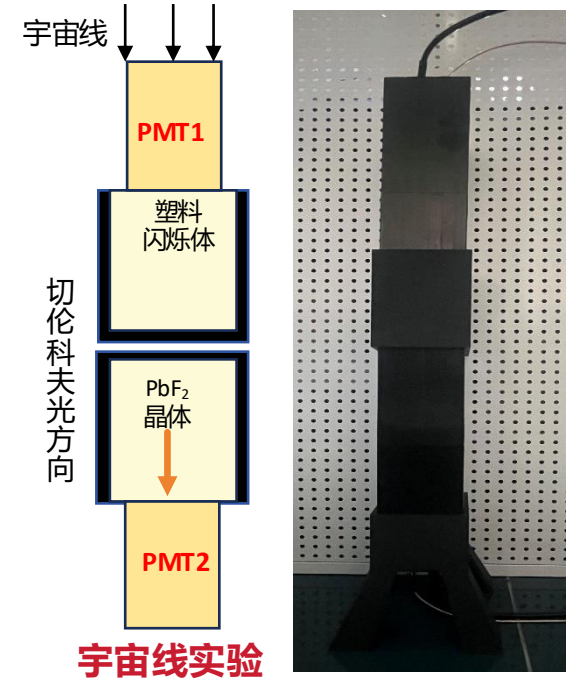


单光电子信号分布

- 利用塑料闪烁体与 $PbF_2$ 晶体搭建宇宙线测试平台, 宇宙线脉冲面积谱中可观察到明显信号分布,  $PbF_2$ 晶体与PMT的符合测试方案能够探测宇宙线事件, 初步验证了探测器读出可行性。



宇宙线信号分布



# 目录

- STCF 前向区系统

- 亮度监测

  - 金刚石探测器

  - 切伦科夫探测器

- **前向探测器**

  - 前向量能器**

  - 零角度探测器**

- MDI 和本底研究

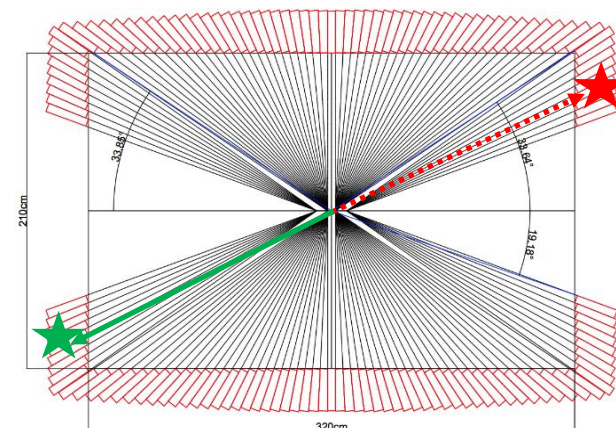
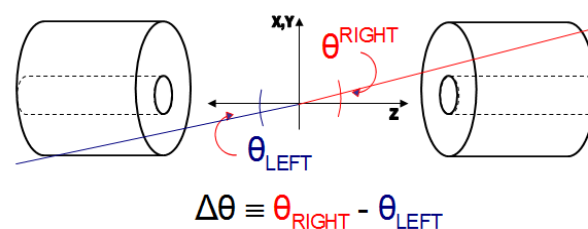
- 总结

## 前向小角度区域

- 精密 QED 物理与基准测量：在  $\sqrt{s} = 2 \sim 7 \text{ GeV}$  的质心能量区间内，小角度 Bhabha 散射由  $t$  道光子交换主导，具有截面大、峰值尖锐的特征，是对撞机最干净、最精确的标定过程
- 关键物理学意义：
  - 为对撞机的**绝对亮度提供了坚实支撑**
  - 在类空区间内精确测定电磁耦合常数  $\alpha$  的跑动效应——这直接影响到缪子反常磁矩  $g - 2$  和电弱精密测量的输入
  - 为更广泛的物理研究计划所必需的 **QED (量子电动力学) 和辐射修正工具提供了严格的检验**

## ➤ 端盖大角度区域：

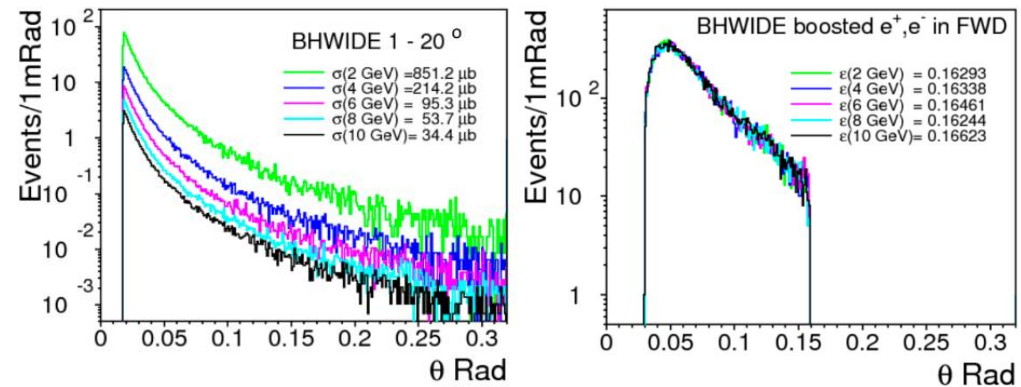
- 存在显著的  $s$  道与  $t$ - $s$  干涉
- 对初末态辐射高度敏感
- 理论不确定度通常显著**大于前向小角度区域**



# 前向量能器

## ➤ BHWIDE 模拟:

- 模拟范围:  $\sqrt{s} = 2 \sim 10 \text{ GeV}$ , 散射  $e^\pm > 0.1 \text{ GeV}$ ,  $e^+e^-$  back to back
- 几何接受:  $|z| = 500 \text{ mm}$ ; 避开直径为  $30 \text{ mm}$  的束流管; 径向覆盖至  $r < 80 \text{ mm}$  的前向区域
- 两端  $e^\pm$  同时进入前向区的接受度稳定在  $\epsilon \approx 16.3\% \sim 16.7\%$

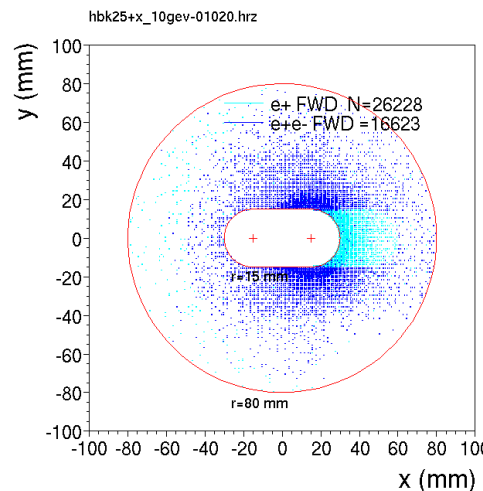
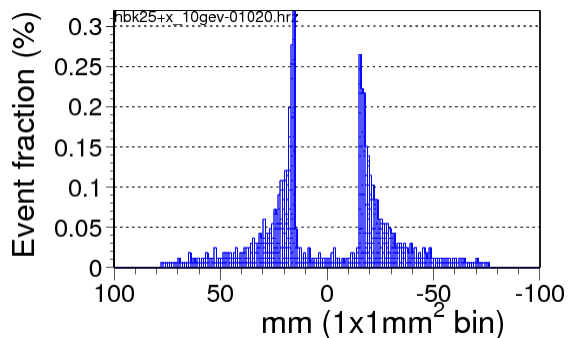


## 局部最高计数率估算

在 10 GeV 下, 最高计数率  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  单元约 0.86 kHz;

在 2 GeV 下约 21.2 kHz.

按 100 ns 时间窗估算, 2 GeV 下该最高计数率单元的平均占有率约  $2.1 \times 10^{-3}$ .

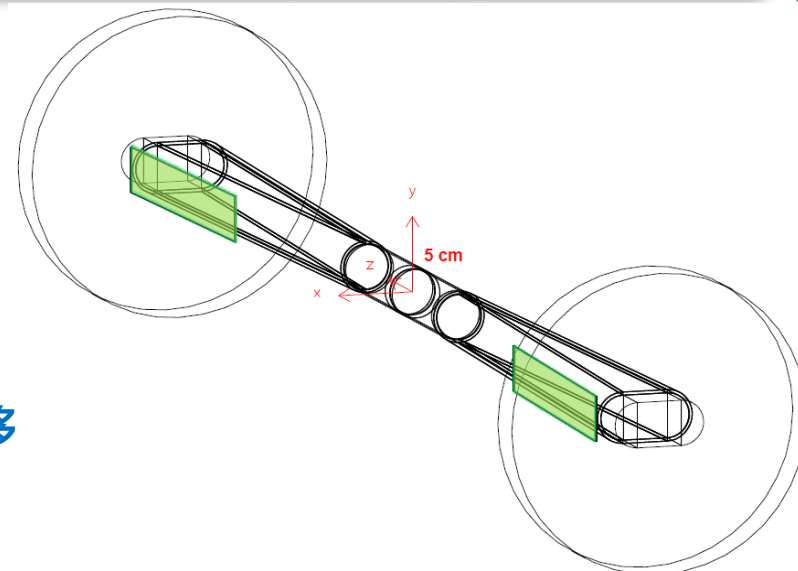


CMS cross section $\sigma$ ; scattered $e^\pm > 0.1 \text{ GeV}$ ; back-to-back $0-\pi$					
$\sqrt{s} \text{ GeV}$	2	4	6	8	10
1 - 20°	851k nb	214k nb	95k nb	54k nb	34.4k nb
both $e^\pm$ in FWD (off-pipe $\phi 30 \text{ mm}$ , $r < 80 \text{ mm}$ )					
FWD $\epsilon$	0.163	0.163	0.165	0.162	0.166
1x1 mm <sup>2</sup> hottest cell, electron hit rate					
Ev. /sec	21.2k	5.33k	2.37k	1.34k	0.86k

前向区接受度对质心能量的依赖性较弱(稳定在  $\sim 16.5\%$ ); 但在低质心能量运行模式下, 由于 Bhabha 截面显著增大, 最高单元计数率及时间窗占有率将成为前端读出系统设计与堆积(pile-up)效应抑制的关键约束条件

# 前向探测器-前向量能器

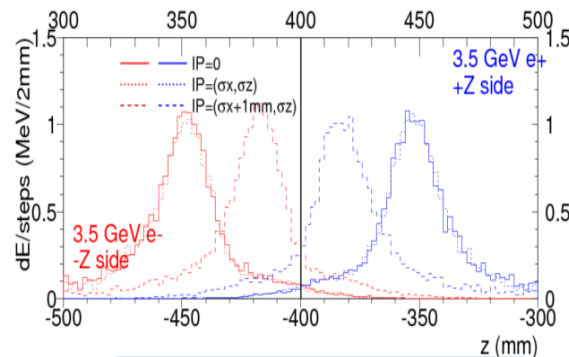
- **方案定位:** 采用近束流管的 Forward Monitor 方案
- **目标:** 用小角度 Bhabha  $e^\pm$  的能量沉积进行绝对亮度的测量
- **设计:** 在  $+z/-z$  两端布置薄层 Diamond/CSi 微条探测器
- **读出:**  $z$  方向 1 mm 条形分割; 利用双端峰位的相关性来区分  $dx$  与  $dz$  偏移
- **目标精度:**  $dx \approx 30 \mu\text{m}$ 、 $dz \approx 0.5 \text{ mm}$ , 需结合准直系统和束流反馈。



## 前向量能器示意



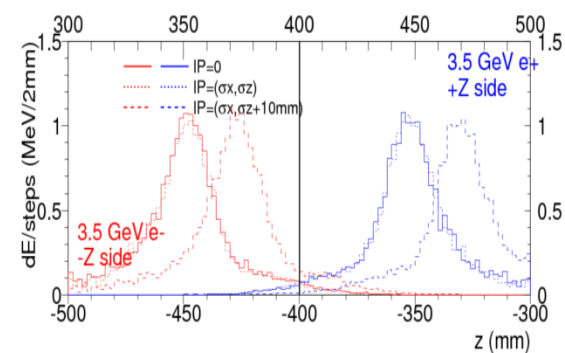
$dx = +1 \text{ mm}$ : Left/Right peaks moving towards IP



### 横向偏移 $dx$

两端峰位反向移动, 可用于横向束团位置诊断

$dz = +10 \text{ mm}$ : Left/Right peaks moving same distance left



### 纵向偏移 $dz$

两端峰位同向, 可用于区分  $z$  向偏移

# 前向探测器-前向量能器

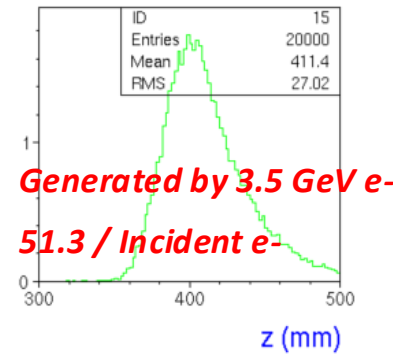
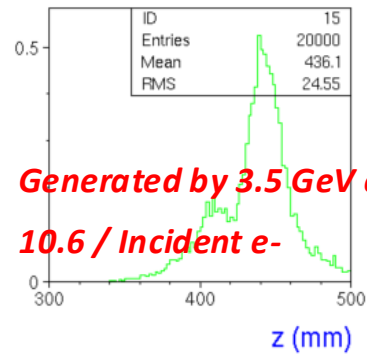
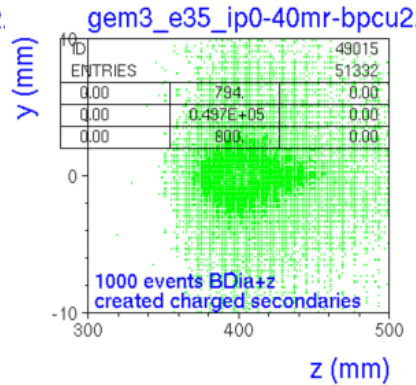
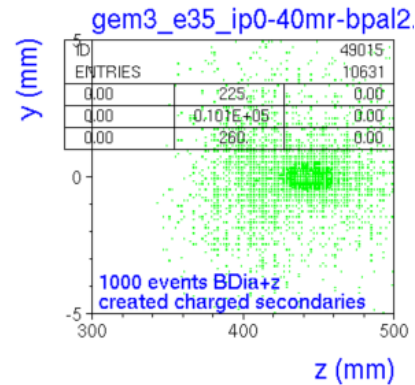
## ➤ Geant4 全模拟：70 mrad 前向 Bhabha $e^\pm$ 穿过 MDI 真空管

- 前向  $e^\pm$  到达监测器前会穿过束流管；管材辐射长度( $X_0$ )决定多重散射和前簇射强度。
- 2 mm Cu: 约  $4.3 X_0$ , 次级电磁簇射显著增强, 应避免作为候选方案。**
- 2 mm Al: 约  $0.7 X_0$ , 可明显降低前簇射和多重散射, 是当前更优选择。**

束流能量	真空管材质及厚度	横向展宽	纵向展宽	次级带电粒子多重度
1GeV	Be 2mm/ Al 2mm	0.20/0.38	5.44/8.85	仅有少量反冲本底
1GeV	Cu 2 mm	0.89	14.50	15.5/incident $e^-$
3.5GeV	Al 2 mm	0.12	3.18	10.6/incident $e^-$
3.5GeV	Cu 2 mm	0.29	7.71	51.3/incident $e^-$

## ➤ 后续优化方向

- 降低束流管、法兰及支撑结构的总  $X_0$ , 避免高 Z/厚材料进入前向接受区。
- 将管材、监测器位置、读出分割和机械准直作为整体优化问题。
- 进一步检查局部 hit rate、pile-up、辐射损伤和电子学单粒子效应(SEE)裕量。



**Al 2 mm**  
3.5 GeV: 约 10.6 / incident  $e^-$

**Cu 2 mm**  
3.5 GeV: 约 51.3 / incident  $e^-$

铜 (Cu) 材质束流管会产生不可接受的前簇射 (Preshower) 本底; 当前方案应优先采用低  $X_0$  材料 (如铝 Al 或铍 Be), 并结合双端微条监测器实现束团位置诊断

## 双光子物理

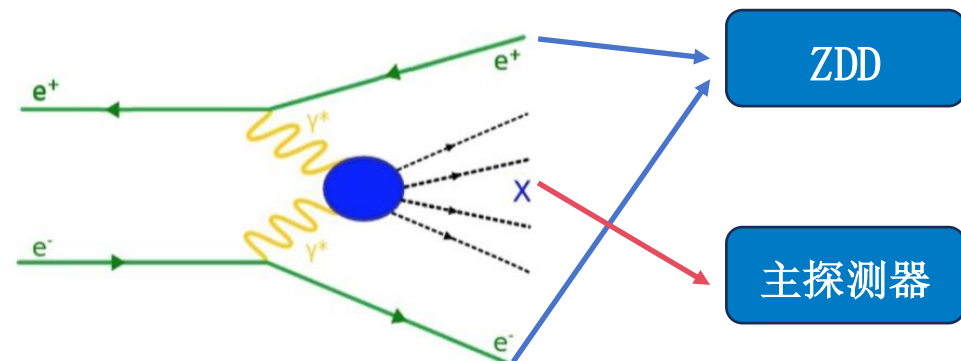
- 缪子反常磁矩  $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$  的实验测量值和标准模型预言值之间存在长期的显著偏差,  $g-2$ 的理论不确定性来源主要是光子-光子强散射 (HLbL) 的贡献
- HLbL的计算可以转换到

$$e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X$$

的截面计算, 其中  $X$  包括  $\pi^0, \pi\pi, \eta, K^+K^-$  等

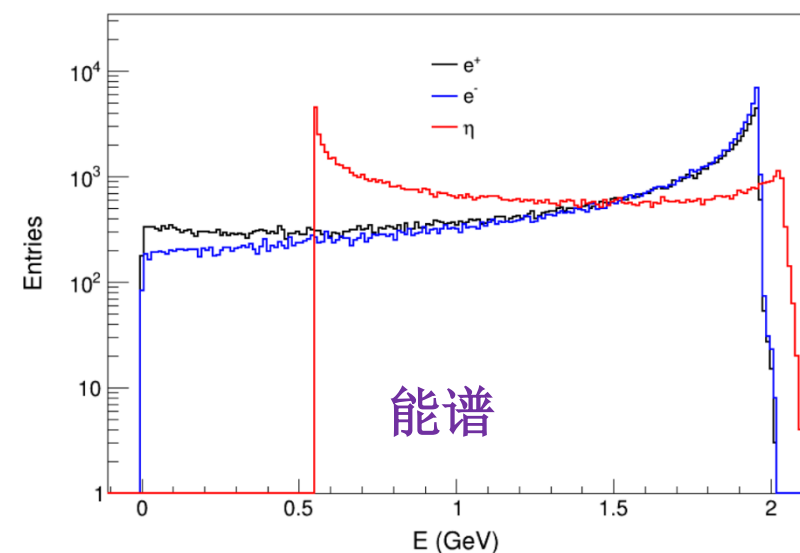
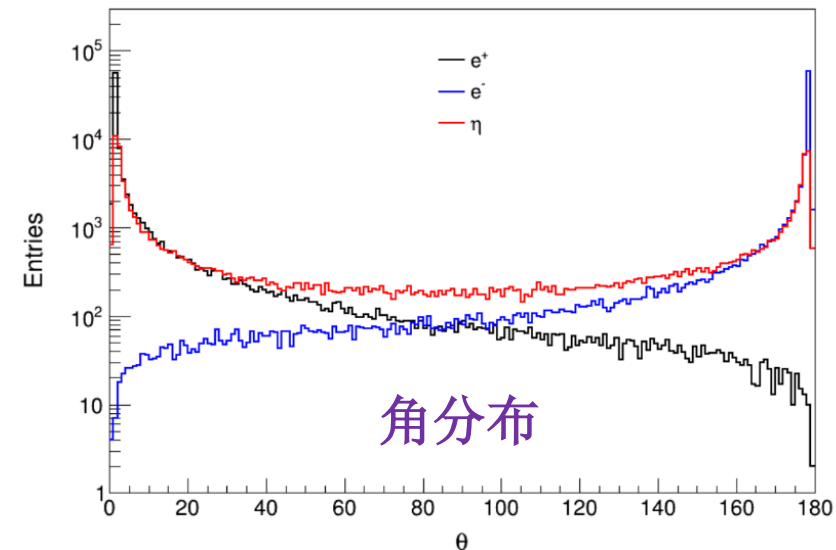
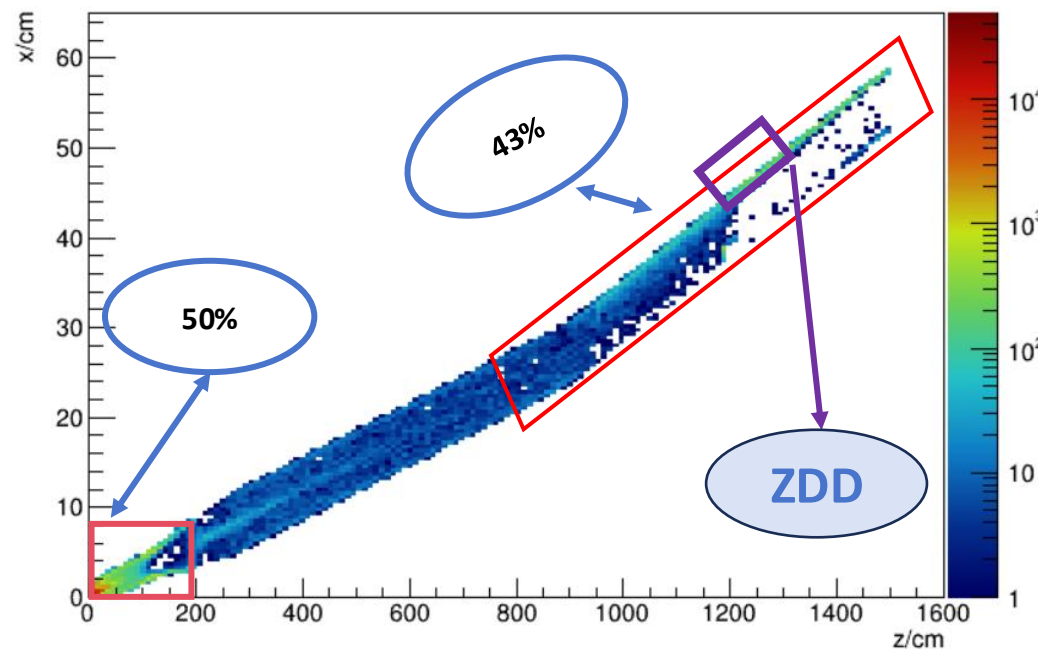
- 零度探测器(ZDD), 专门设计用于探测这些沿束流方向近零度出射的正负电子, 有助于提升事例选取的纯度和研究如  $J^{PC} = 0^{\pm+}, 2^{\pm+}$  等轻强子态以及多介子系统的产生和衰变
- ZDD 部署在前向区的近 IP 区和远端区域, 极大增强双光子物理过程的研究能力。

for quasi-real photons  $J^{PC}(X) = \{0^{\pm+}, 2^{\pm+}\}$   
 $\rightarrow X = \{\pi^0, \pi\pi, \eta\}$



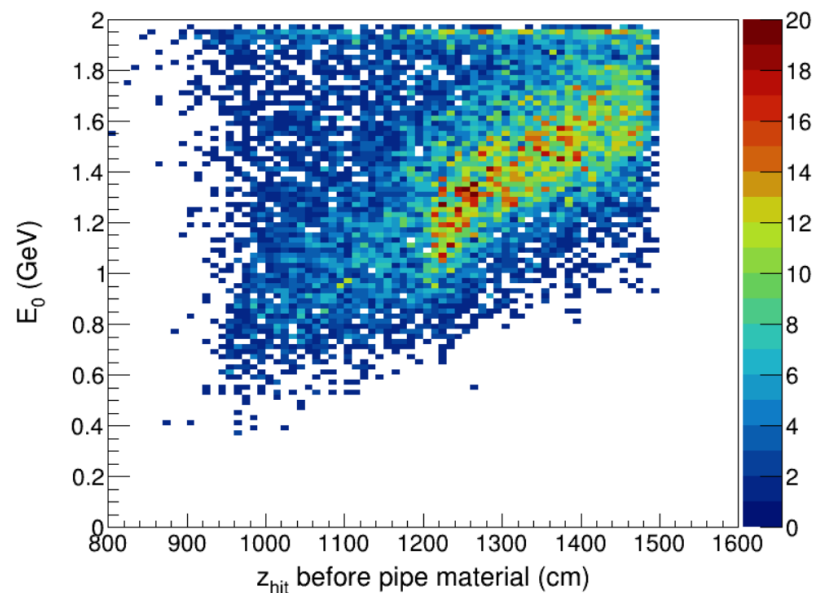
Contribution	Value $\times 10^{11}$
Experiment (E821 + E989)	116 592 061(41)
QED	116 584 718.931(104)
Electroweak	153.6(1.0)
HVP ( $e^+e^-$ , LO + NLO + NNLO)	6845(40)
HLbL (phenomenology + lattice + NLO)	92(18)
Total SM Value	116 591 810(43)
Difference: $\Delta a_\mu := a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}}$	251(59)

- 使用 Ekhara 产生子在OSCAR框架下全模拟 $\sqrt{s} = 4 \text{ GeV}$  下的双光子过程  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\eta$ 。
- 近相互作用点(IP)区域 ( $z < 200\text{cm}$ ) : 存在部分过早丢失的散射粒子 (占总事例份额约 **50%**) 。
- 束流管道远端区域 ( $z > 800\text{cm}$ ) : 约 **43%** 的粒子运动至此区域及以后, 其中有**17%**粒子在**10-15m**区域内穿透束流管壁

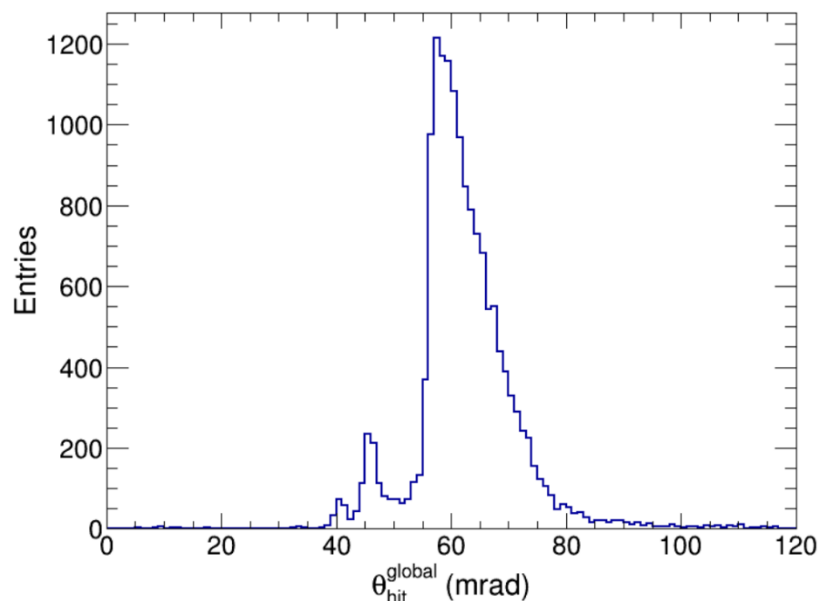


# 零角度探测器

- 模拟结果显示，末态  $e^\pm$  在近端和远端均存在出射。近端区域**几何结构复杂、本底较多、机械空间有限**，本阶段暂不展开详细设计。
  - 远端出射粒子方向性更强，主要沿束流管方向传播，空间分布相对清晰，是当前 ZDD 设计的重点区域。
  - 远端 first-hit 粒子在击中束流管材料前仍保持 GeV 量级能量，且**出射位置与初始能量存在明显正相关**，远端 ZDD 需要具备对 **GeV 量级  $e^\pm$**  的 EM shower 测量能力和极好的位置分辨。
  - 远端粒子集中在前向小角区域，因此探测器布置需考虑出射位置(**暂定12m附近**)、入射方向和几何覆盖。



远端粒子击中前位置与能量分布



远端粒子击中前方向分布

设计需求：  
位置测量 + 能量分辨 +  
快时间响应。

## 远端 ZDD 探测器方案与性能指标

- 基于远端出射粒子的特征，远端 ZDD 需要同时提供**位置、能量和时间信息**，用于小角度  $e^\pm$  tag、事例匹配和本底压制
- 初步方案采用  
**硅探测器+ SiPM读出的LYSO/LSO 晶体量能器**
  - 硅探测器：提供击中位置，提高**出射位置和几何覆盖判断能力**
  - LYSO/LSO 晶体阵列：测量 **GeV 量级  $e^\pm$  的电磁簇射**
  - SiPM 读出：提供**高光收集效率和快时间响应**
- LYSO/LSO 具有较短辐射长度( $X_0$ )、较小 Moliere 半径、较高光产额和快响应，适合远端 GeV 量级电子测量

材料名称	PbF2	BGO	LYSO	BaF2	GSO	PbWO4
辐射长度 (cm)	0.93	1.1	1.1	2.1	1.4	0.89
Moliere 半径 (cm)	2.2	2.7	1.9	4.4	2.2	2.2
折射率	1.82	2.15	1.82	1.47	1.8	2.16
发光衰减时间 (ns)	1	300	40-44	0.6,620	30	6,30

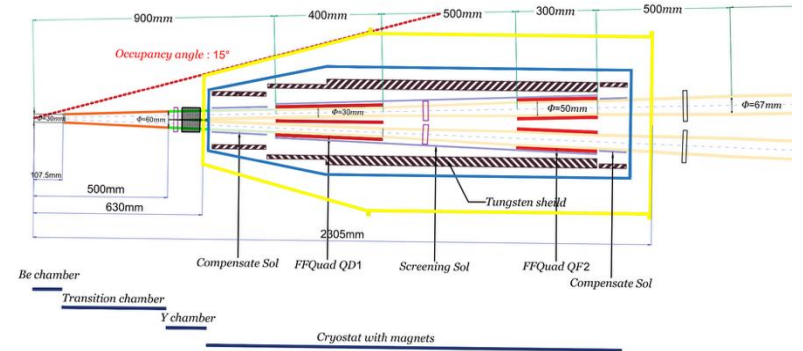
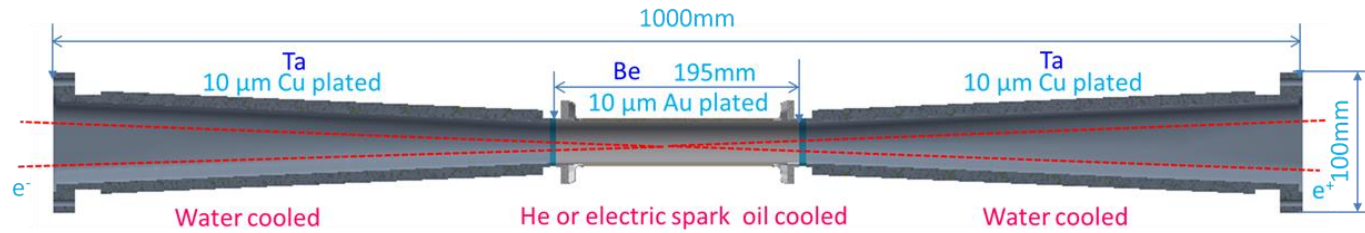
LYSO/LSO 在紧凑性、光产额和时间响应之间具有较好的综合性能

指标	设计目标
能量分辨	$\sigma_E/E \sim 5\% - 15\% @1 \text{ GeV}$
位置分辨	毫米量级空间分辨率，需考虑束流管出射窗的机械准直 (Alignment) 约束
时间分辨	$\leq 1 \text{ ns}$
材料要求	高有效原子序数、高光产额、快响应时间 (Fast timing)

# 目录

- STCF 前向区系统
- 亮度监测
  - 金刚石探测器
  - 切伦科夫探测器
- 前向探测器
  - 前向量能器
  - 零角度探测器
- **MDI 和本底研究**
- 总结

➤ 已实现最新版 STCF MDI 与内束流管布局，并作为本次束流本底模拟的几何输入

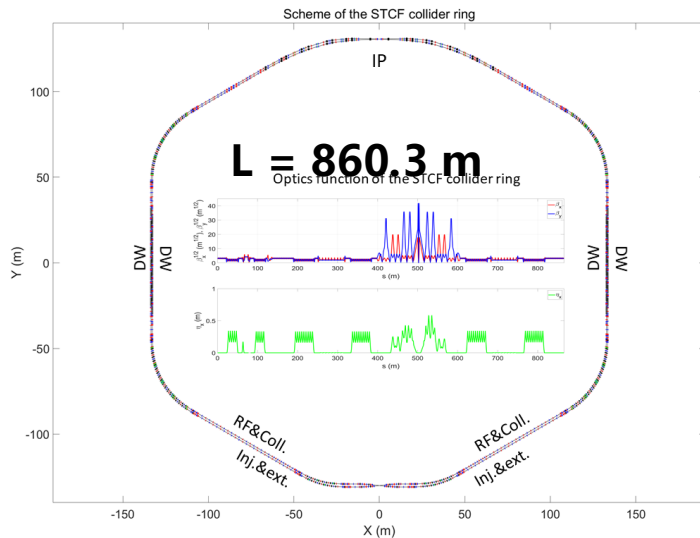


➤ 储存环参数

- IP 交叉角 = 30 mrad
- 束流能散  $7.85 \times 10^{-4}$  ,  $\beta_{x(y)}^{IP}$  (m) = 0.06 (0.0008) m

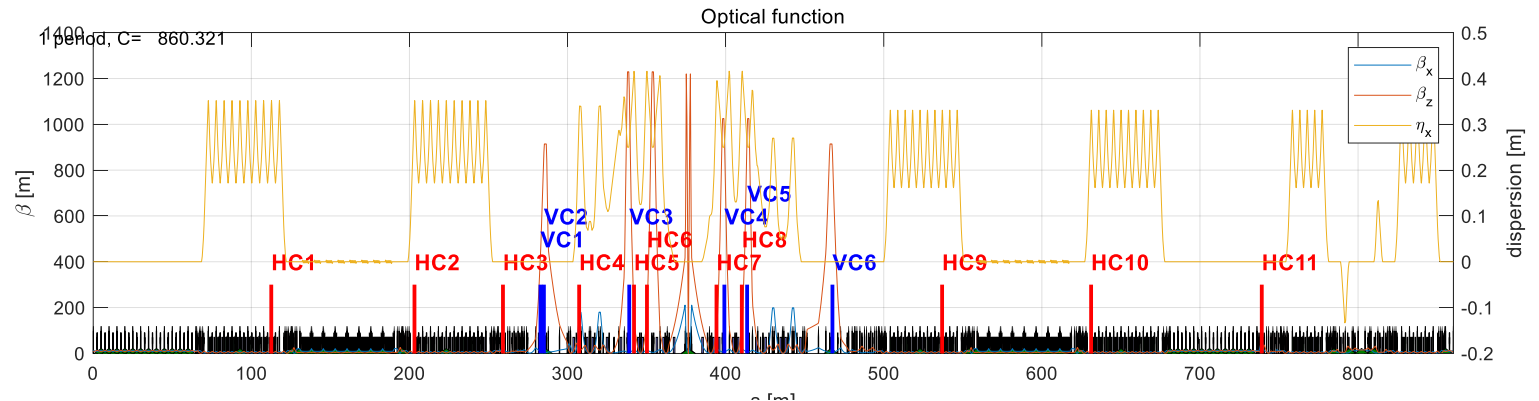
➤ 准直器设置

- 基于 AT 程序进行设计与优化
- 主要针对 Touschek and Beam-Gas 本底进行抑制

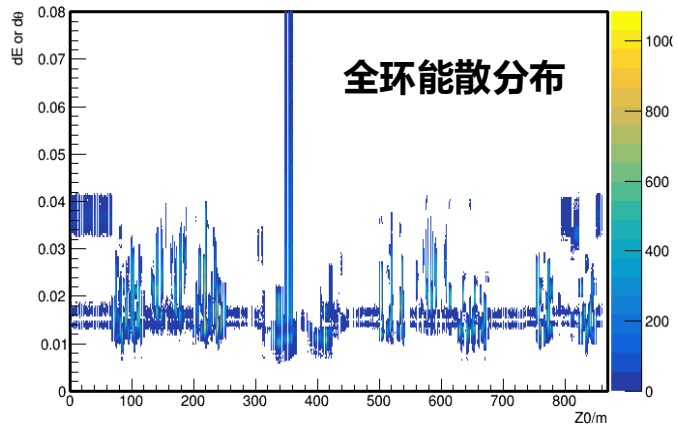


$\nu_x = 30.543$   
 $\nu_z = 34.579$

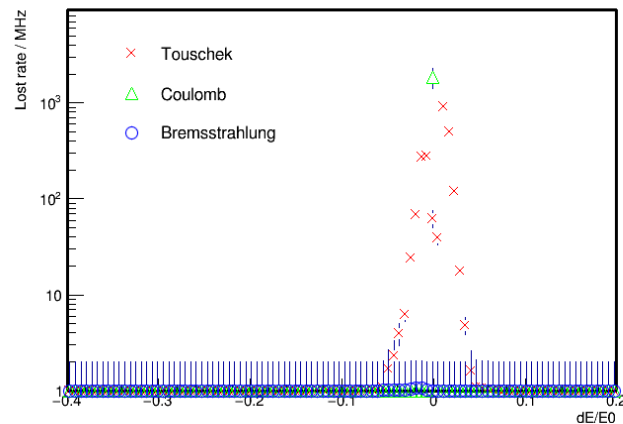
$1/\beta_{opt}, C = 860.321$



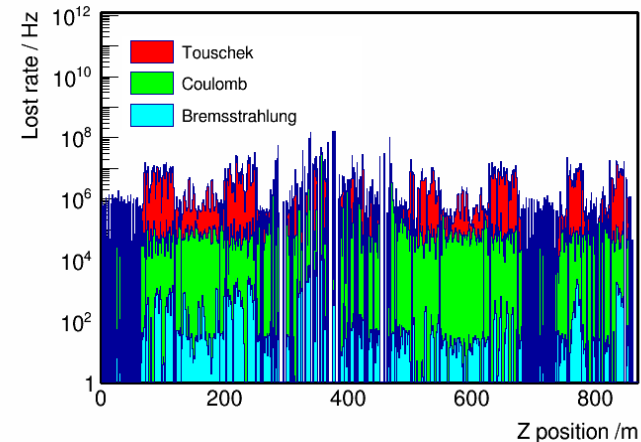
## ➤ 全环束流本底



## 不同本底源对能散的贡献



## 全环束流损失位置分布

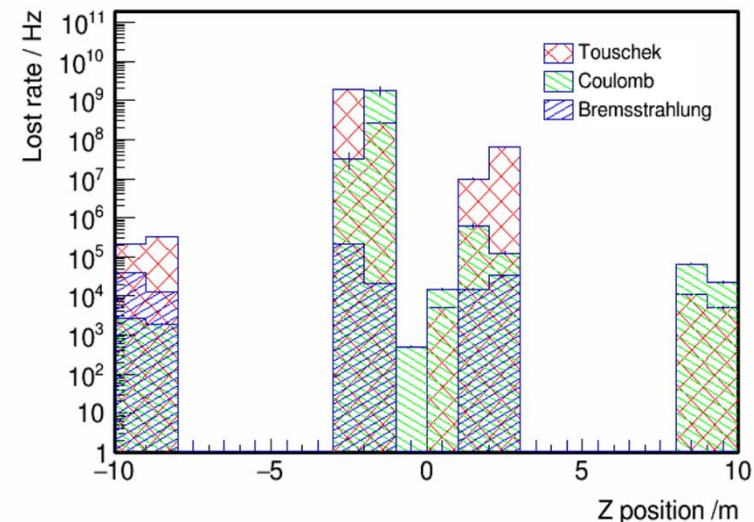


## ➤ IR 区束流损失率: IP ± 10m

- 该部分束流损失最直接影响 MDI、内径探测器和前向区探测器的辐射负荷

IR: IP ± 10 m	version: v12_c
Total Taus rate	$3.6 \times 10^{10}$ Hz
Taus rate in IR	$2.3 \times 10^9$ Hz ~ v7c3 background
Total Brem rate	$9.9 \times 10^6$ Hz
Brem rate in IR	$3.4 \times 10^5$ Hz
Total Coul rate	$6.6 \times 10^9$ Hz
Coul rate in IR	$1.9 \times 10^9$ Hz < v12_b
Lifetime	843.6 s

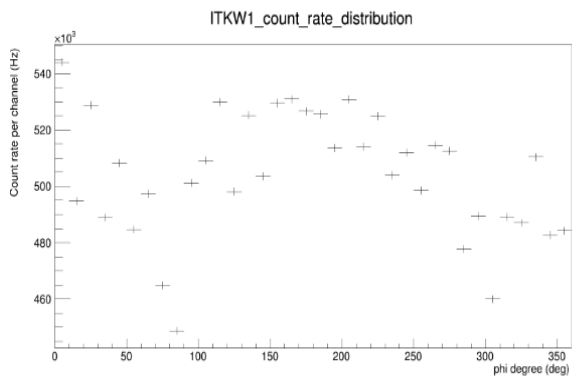
## IR 区微分束流损失率



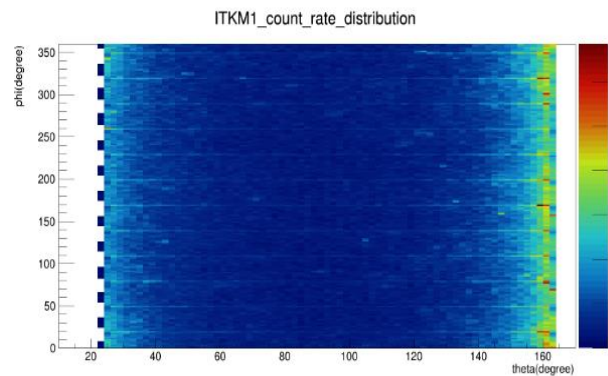
## ITKW 与 MAPS 内径探测器束流本底对比

比较对象：ITKW 方案与 MAPS/ITKM 方案

同一套 MDI / 内管 / 束流本底条件下，关注 TID、NIEL 与计数率。



ITKW-1: 按  $\phi$  的单通道计数率



MAPS/ITKM-1 :  $\theta$ - $\phi$  二维局域计数率

### 最内层变化

TID	$1.2 \times 10^4$	$1.1 \times 10^3$	↓91%
NIEL	$1.5 \times 10^{10}$	$4.4 \times 10^{10}$	↑2.9×
COUNT	$8.2 \times 10^8$	$2.2 \times 10^8$	↓73%

结论：MAPS 显著降低总电离剂量(TID)与探测器占空率 (occupancy)压力，但对最内层探测器的辐照损伤要求更严苛

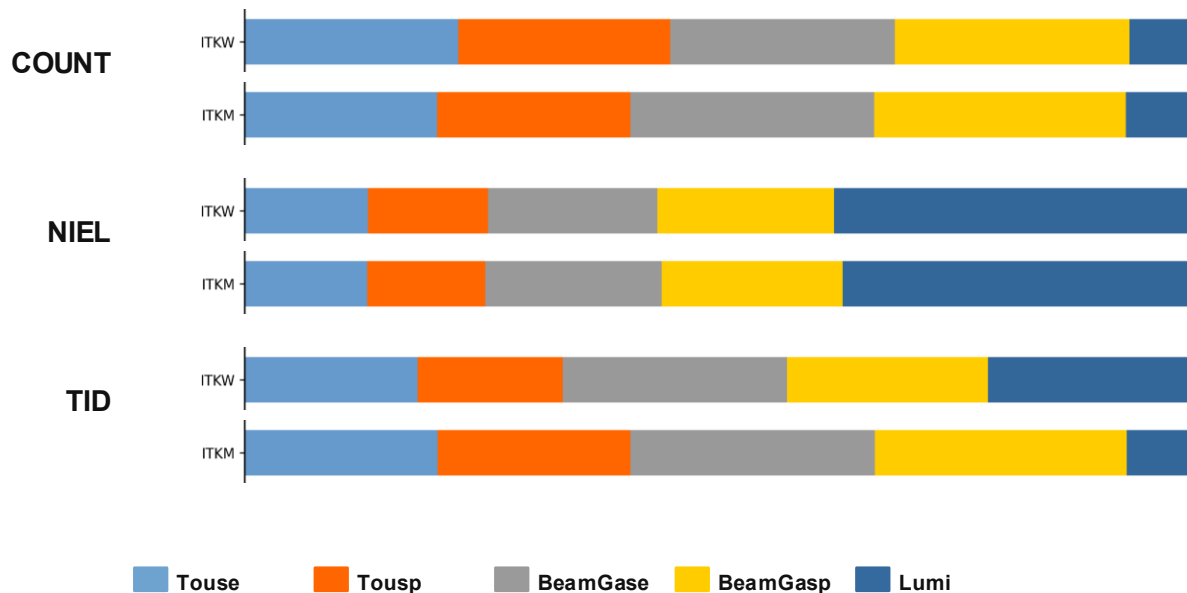
### 四层探测器本体指标对比(ITKW->MAPS/ITKM)

层	TID 变化 (Gy/y)	NIEL 变化 (1 MeV n/cm <sup>2</sup> /y)	总计数率变化 (Hz)
1	$1.2 \times 10^4 \rightarrow 1.1 \times 10^3$ ↓91%	$1.5 \times 10^{10} \rightarrow 4.4 \times 10^{10}$ ↑2.9×	$8.2 \times 10^8 \rightarrow 2.2 \times 10^8$ ↓73%
2	$4.6 \times 10^2 \rightarrow 1.4 \times 10^2$ ↓70%	$9.8 \times 10^9 \rightarrow 1.0 \times 10^{10} \approx$	$5.6 \times 10^8 \rightarrow 1.7 \times 10^8$ ↓70%
3	$2.3 \times 10^2 \rightarrow 5.1 \times 10^1$ ↓78%	$7.4 \times 10^9 \rightarrow 7.2 \times 10^9 \approx$	$5.1 \times 10^8 \rightarrow 1.4 \times 10^8$ ↓73%
4	$2.1 \times 10^2 \rightarrow 3.5 \times 10^1$ ↓83%	$6.7 \times 10^9 \rightarrow 6.8 \times 10^9 \approx$	$7.2 \times 10^8 \rightarrow 1.8 \times 10^8$ ↓75%

## 本底来源组成与电子学风险

本底组成基本相似，MAPS 的主要差异来自探测器本体与电子学

### 内径探测器行的来源贡献比例



Touschek、BeamGas 与 Lumi 均有贡献，优化不应只针对单一本底源

### MAPS 电子学 / RU 辐射负荷

系统	TID( Gy/y)	NIEL(1MeV neutron/cm <sup>2</sup> /y)	SEE(Hz/cm <sup>2</sup> )
ITKM-1	$1.1 \times 10^3$	$4.4 \times 10^{10}$	$3.2 \times 10^2$
ITKM-1-RU	$3.0 \times 10^2$	$3.8 \times 10^{10}$	$5.7 \times 10^2$
ITKM-2	$1.3 \times 10^2$	$9.8 \times 10^9$	$5.0 \times 10^2$
ITKM-3	$4.2 \times 10^1$	$7.1 \times 10^9$	$4.4 \times 10^2$
ITKM-4	$2.8 \times 10^1$	$6.3 \times 10^9$	$3.8 \times 10^2$

- **MAPS 优势：**最内层总电离剂量(TID)和总计数率显著降低
- **MAPS 风险：**最内层非电离能损(NIEL)增强，电子学单粒子效应(SEE)率达到  $10^2$  Hz/cm<sup>2</sup> 量级
- **下一步：**  
优化最内层非电离能损(NIEL)屏蔽、读出电子学(RU)布局和抗单粒子效应(SEE)设计

# 目录

- STCF 前向区系统
- 亮度监测
  - 金刚石探测器
  - 切伦科夫探测器
- 前向探测器
  - 前向量能器
  - 零角度探测器
- MDI 和本底研究
- **总结**

- 全模拟与磁场更新：建成前向区全模拟框架，完成近 IP 区束流管外部补偿磁场（主磁场+反向场）的叠加与匹配验证
- FastLumi 亮度监测：金刚石方案在高亮度下精度达 1% 且双侧强相关；PbF<sub>2</sub> 晶体切伦科夫方案通过宇宙线验证，实现 < 1 ns 快时间响应
- 前向量能器：建议低X<sub>0</sub>管材（如 2mm Al）以抑制前簇射本底；使用基于 Diamond/Si 微条的双端束团位置 (dx, dz) 诊断方案
- ZDD 零度探测器：基于远端 (10-15m) 出射粒子的分布特征，提出 Si 径迹探测器结合 LYSO/SiPM 的量能器方案
- MDI 与本底评估：全环本底模拟显示 MAPS 方案可使最内层 TID 降低 91%，但需应对 NIEL 及电子学单粒子效应 (SEE) 挑战

## Next to Do

- 前向量能器模拟：将模拟方案及工具移植在 OSCAR 环境下，进行更全面的模拟与探测器设计
- ZDD 远端工程与模拟：细化 Si+LYSO+SiPM 在复杂远端区域的空间布局，开展全阵列电磁簇射与本底定量模拟
- 内层辐射屏蔽与加固：针对 MAPS 方案高 NIEL 与高 SEE 率挑战，优化最内层屏蔽及抗单粒子效应的电子学设计