



STCF亮度监测研究进展

鲍晨涛

浙江大学

代表STCF亮度监测器组

2024/07/09，超级陶浆装置研讨会，兰州

目录

1

背景介绍

2

辐射Bhabha过程的模拟研究

3

亮度监测系统的设计及模拟研究

4

总结和展望

目录

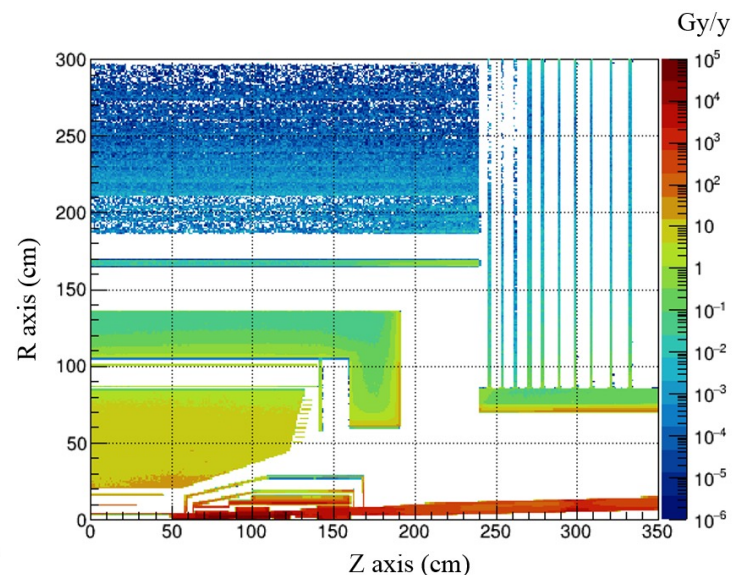
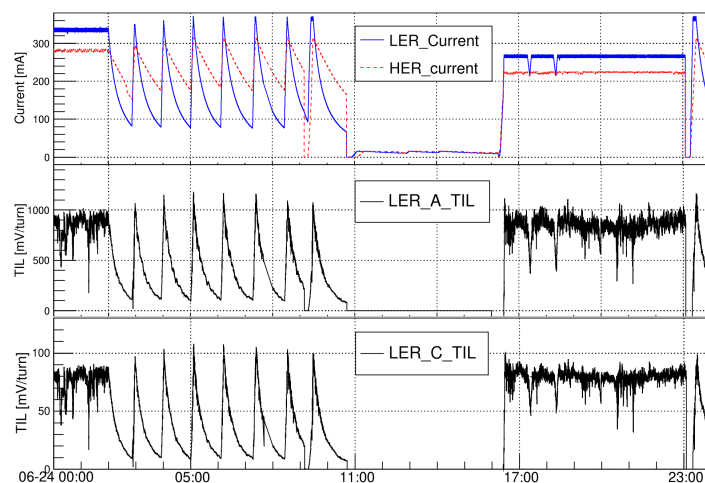
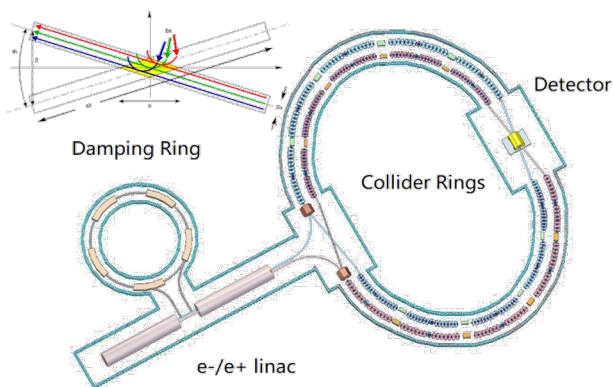
1

背景介绍

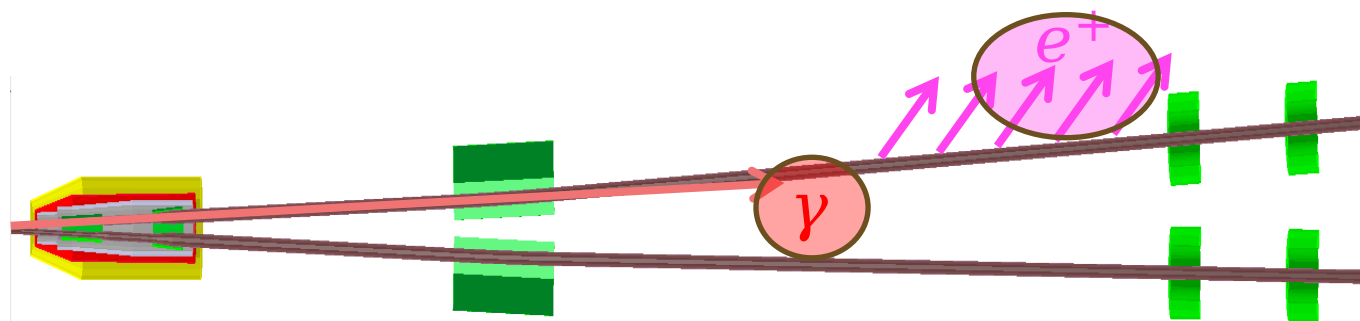
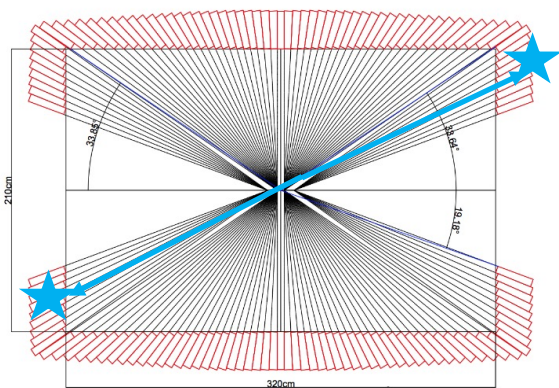
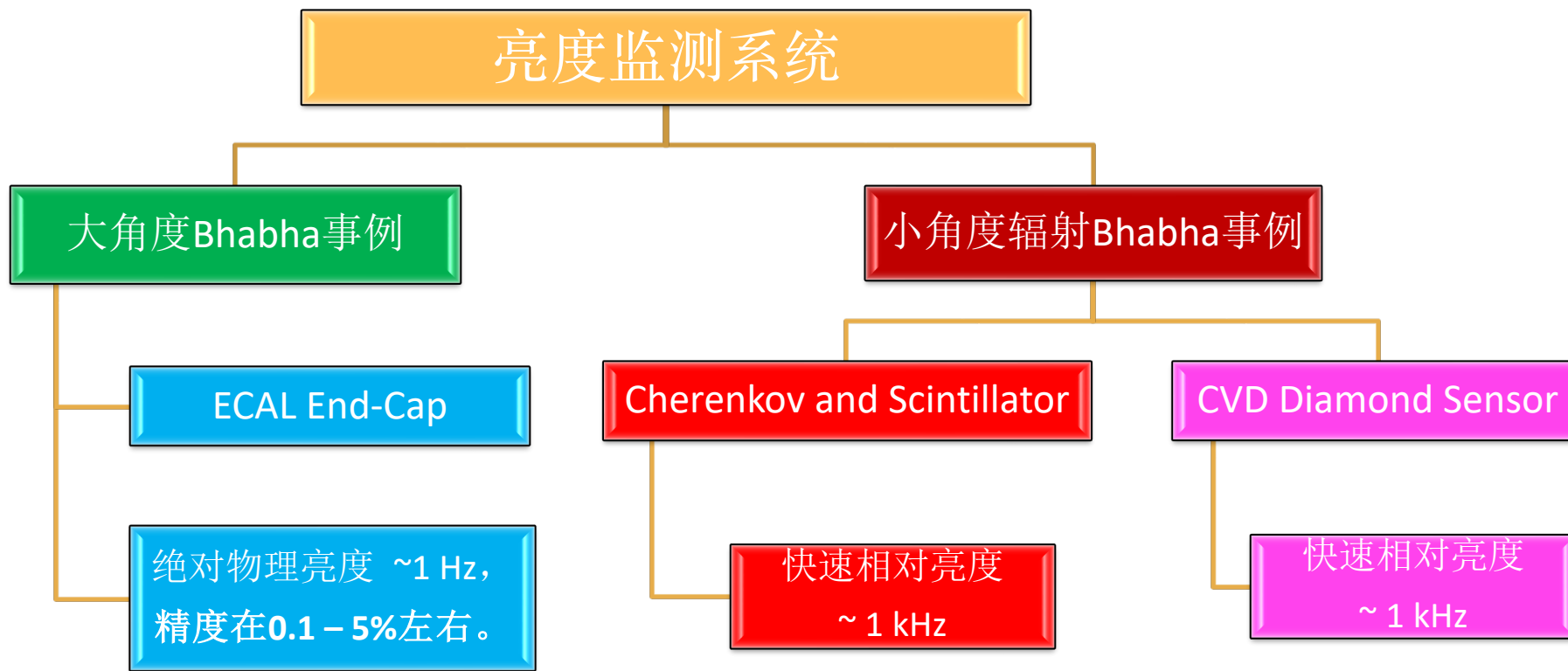
- STCF及其亮度监测
- 正负电子对撞机亮度监测方法
- BELLEII与BESIII的亮度监测方案
- STCF亮度监测系统的研发计划

STCF及其亮度监测

- 亮度（Luminosity）是表征对撞机在单位时间内产生物理反应事例多少的重要物理量, 是衡量对撞机性能的重要参数, 对物理过程截面的精确测量和本底估计等具有重要意义
- 超级陶粲装置（STCF）：质心能量 2 – 7 GeV, 峰值亮度 $0.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- 从调试到正式运行中, 在宽质心能量区间和大亮度范围下准确标定亮度
- 快速实时的亮度监测系统（Fast Online Luminosity Monitor）
 1. 束流的诊断和优化
 2. 维持对撞机亮度稳定
 3. 在高辐照（ $>1000 \text{Gy/y}$ ）环境下长期、稳定运行



正负电子对撞机亮度监测方法



(本次报告的重点)

BelleII与BESIII的亮度监测方案

BelleII

LumiBelle2

测量小角度辐射Bhabha过程中的光子和正负电子

- ❑ $4.5 \times 4.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 单晶金刚石探测器;
 - ❑ 抗辐照能力强,
 - ❑ 熔融石英的契伦科夫光探测器
 - ❑ LGSO晶体闪烁体探测器
- 提供1kHz的相对亮度测量, 精度在1%左右;
- 在很宽的亮度动态范围内($10^{30} - 10^{36} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)实现测量。

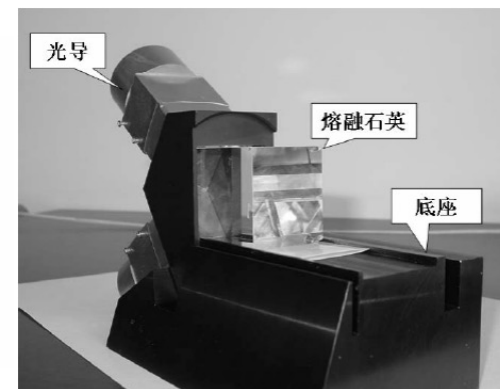
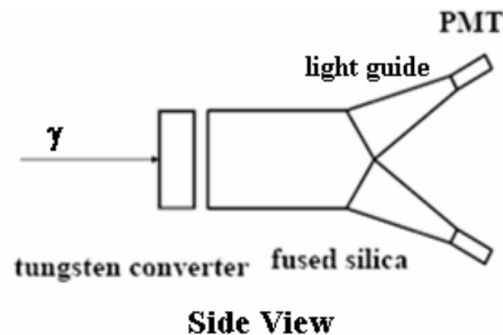
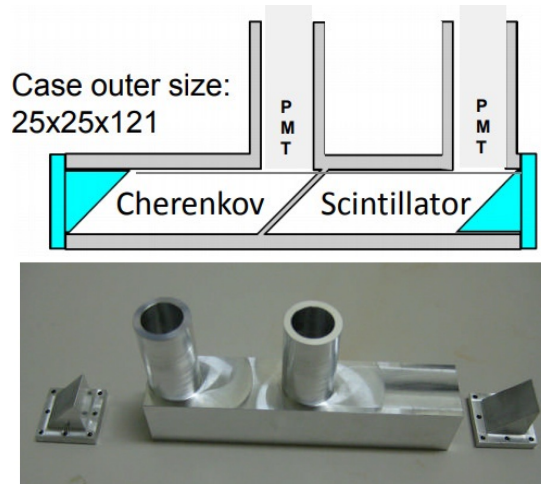
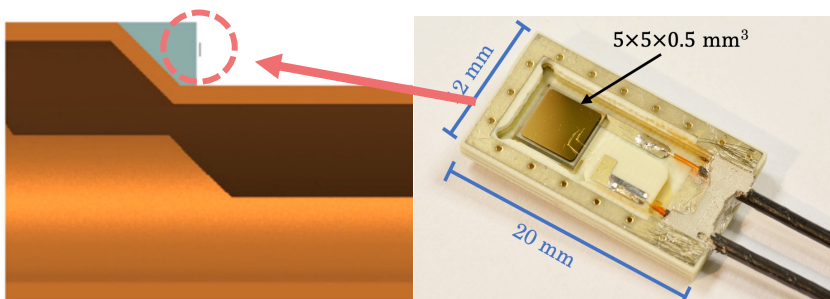
ZDLM

BESIII

BLM

测量小角度辐射Bhabha过程的光子

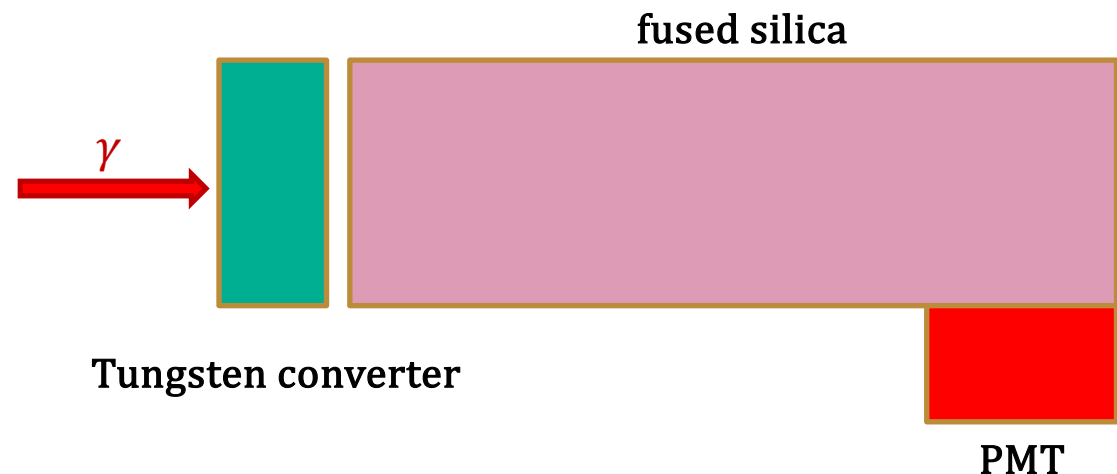
- ❑ 钨转换体、熔融石英和PMT
 - ❑ 束流参数的辅助测量
- 提供0.5Hz的相对亮度测量, 精度为0.8%。



STCF上的亮度监测系统研发计划

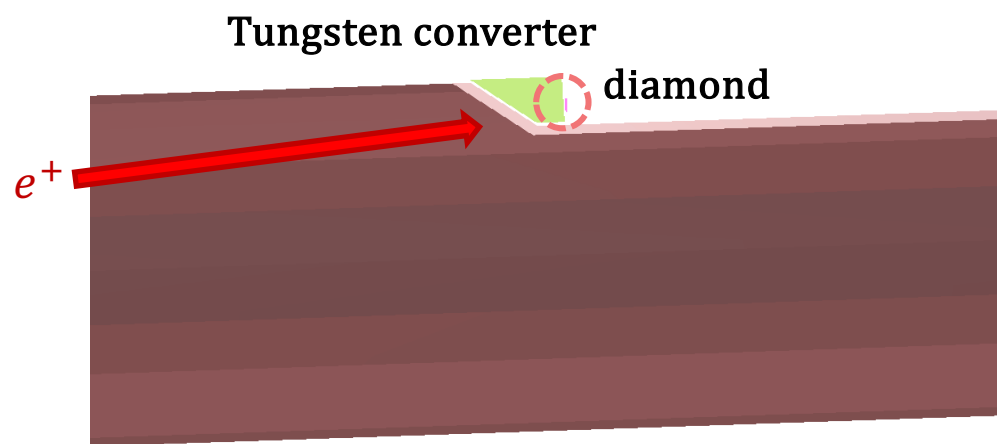
□ 模拟研究

1. 辐射Bhabha过程产生光子
2. 对撞区及磁场建模
3. 束团几何模拟
4. **探测位置优化**
5. 束流本底的模拟



□ 探测器研发

1. **束流管开窗设计**
2. 探测器设计与研发
 - ① **金刚石传感器**
 - ② **契伦科夫光探测器**



目录

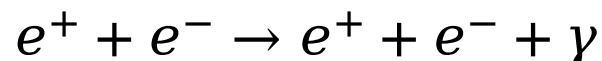
2

辐射Bhabha过程的模拟研究

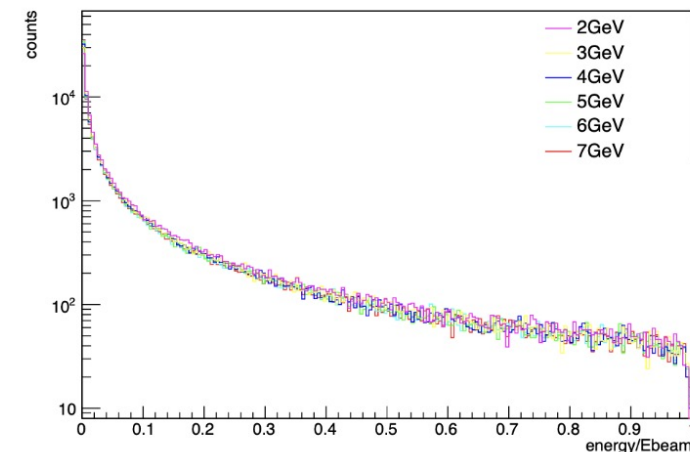
- 辐射Bhabha的物理背景
- OSCAR框架下的模拟配置
- 亮度监测的信号分布

辐射Bhabha的物理背景

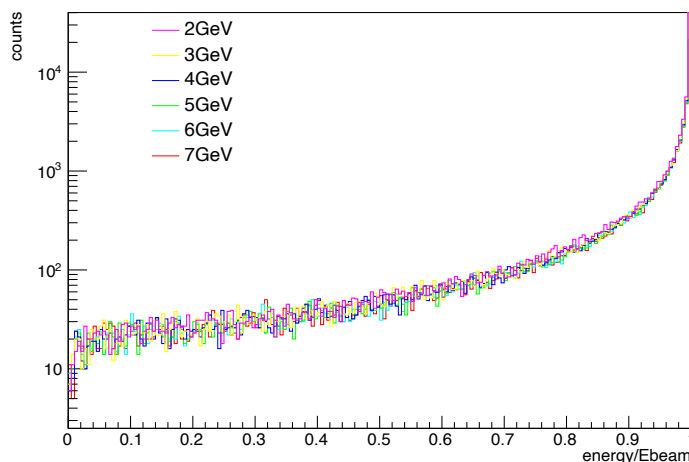
辐射Bhabha过程:



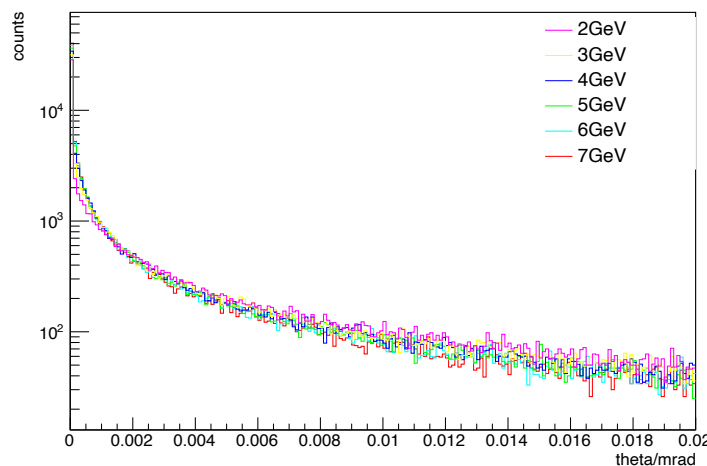
- ❑ 截面极高, 4GeV下截面值 $\cong 380\text{mb}$ (光子截断能量 1MeV)
- ❑ 亮度测量及物理本底的重要研究对象
- ❑ 平均光子能量: $\sim 260\text{MeV}$; 光子出射角集中于 $\sim 1\text{mrad}$ 以内



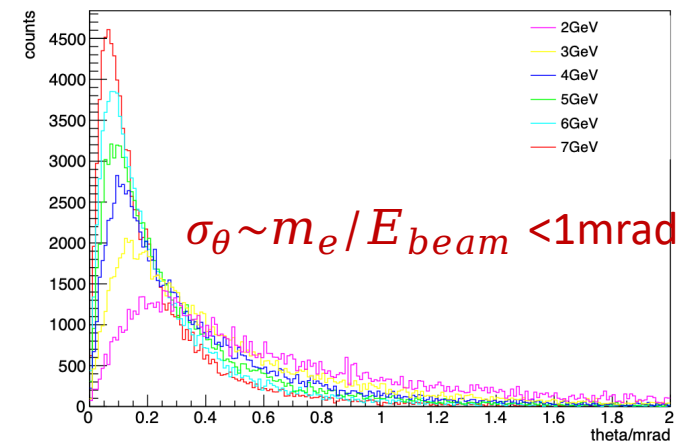
❖ 光子能谱分布



❖ 电子能谱分布



❖ 电子角分布



❖ 光子角分布

模拟配置：BBREM产生子与束团几何

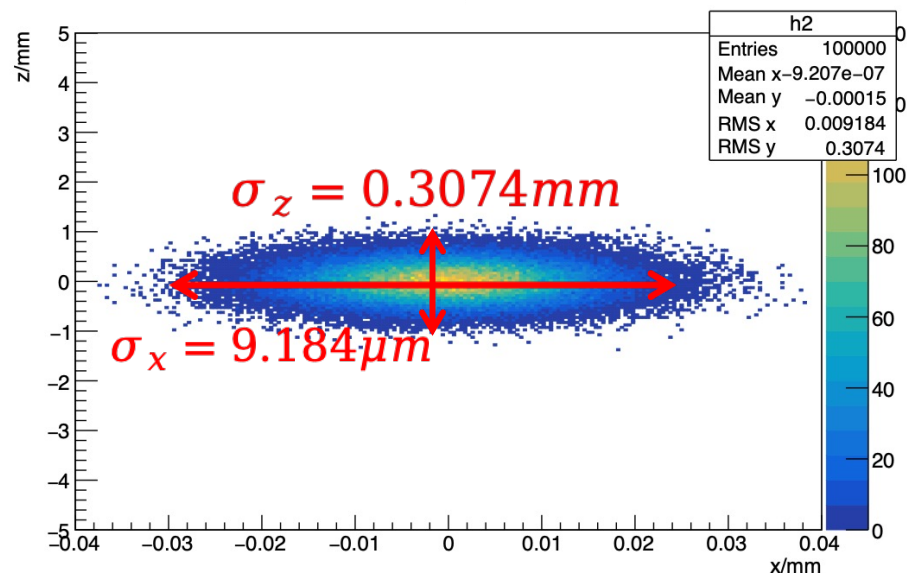
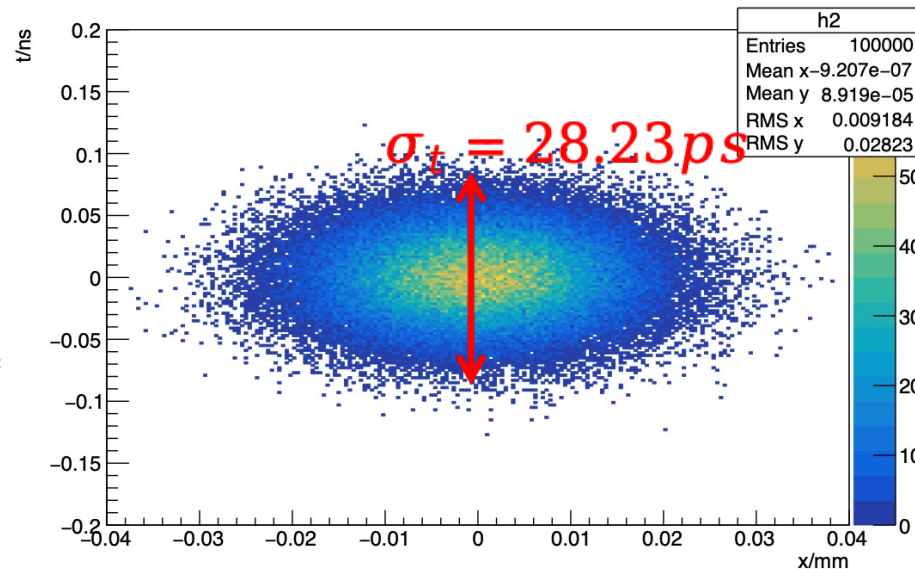
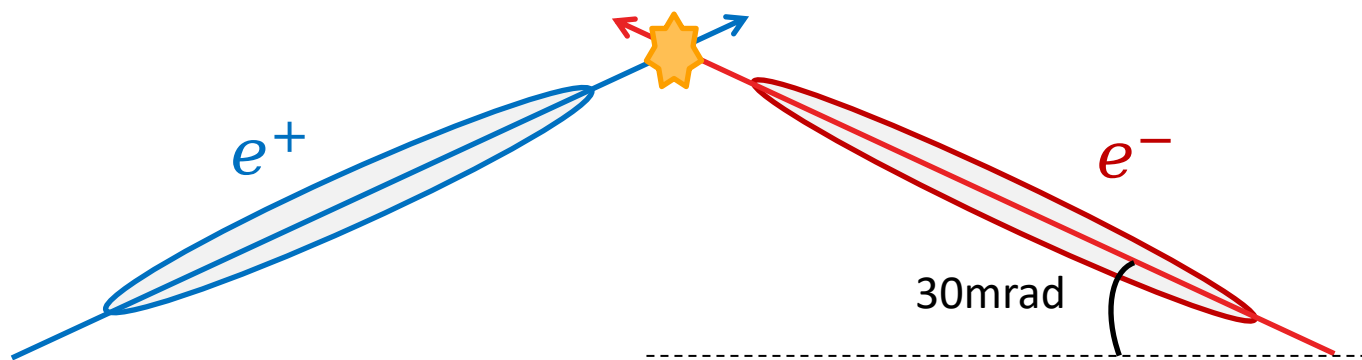
❑ 产生子:BBREM (arXiv: hep-ph/9401333)

- 广泛应用于小角度辐射Bhabha事例的模拟

❑ 束团几何的模拟:

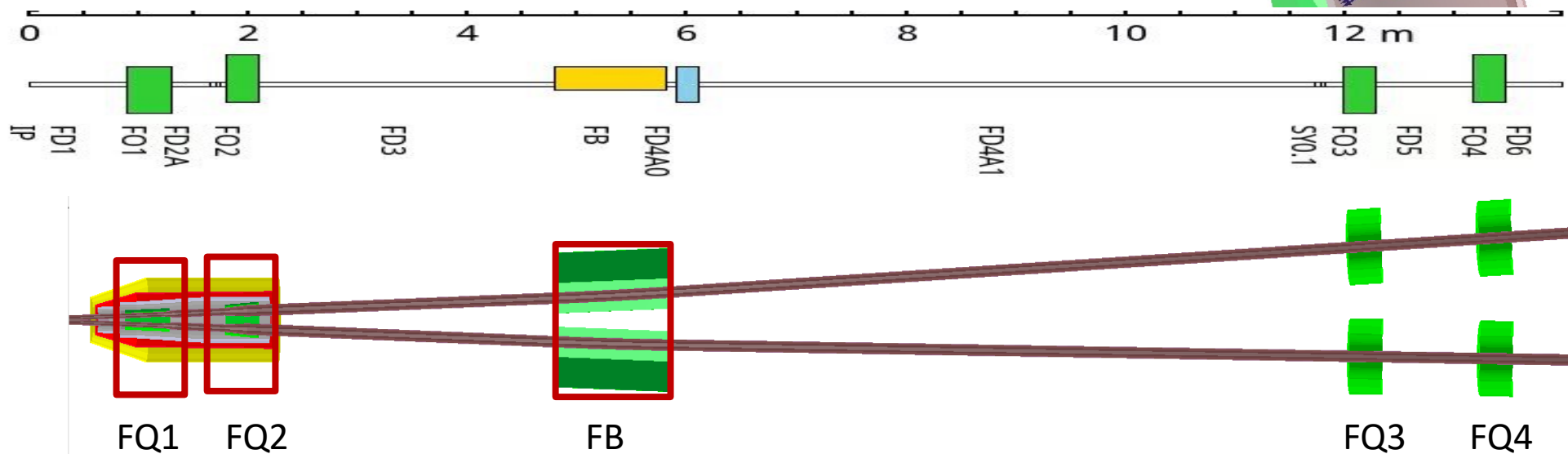
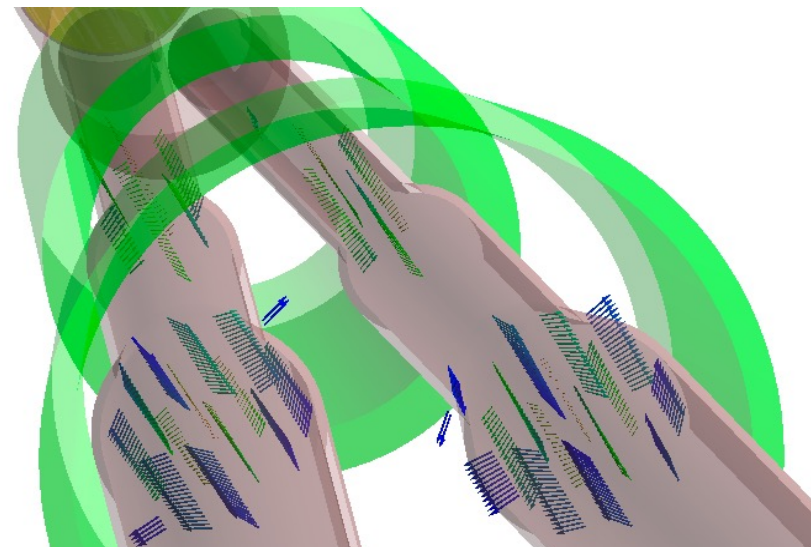
1. $\sigma_x = 13.37\mu m, \sigma_y = 0.116\mu m, \sigma_z = 12mm$ *
2. 对撞点交叉角60mrad
3. 对撞时间及位置涨落的模拟结果:

$$\sigma_t = 28.23 \text{ ps}, \sigma_x = 9.184 \mu m, \sigma_z = 0.3074 \text{ mm}$$



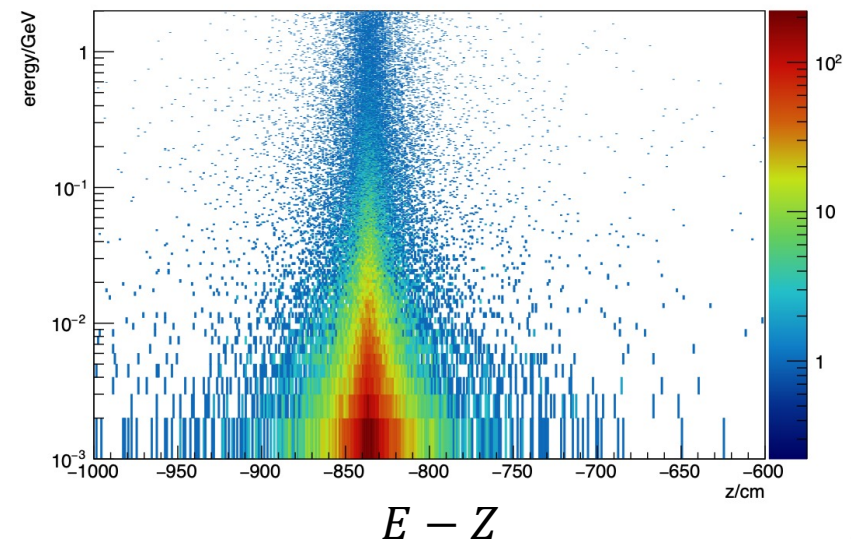
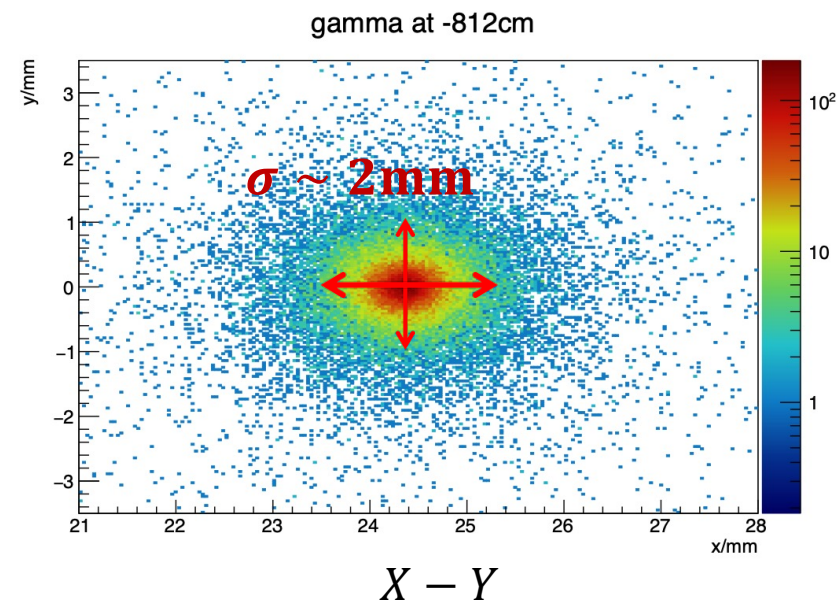
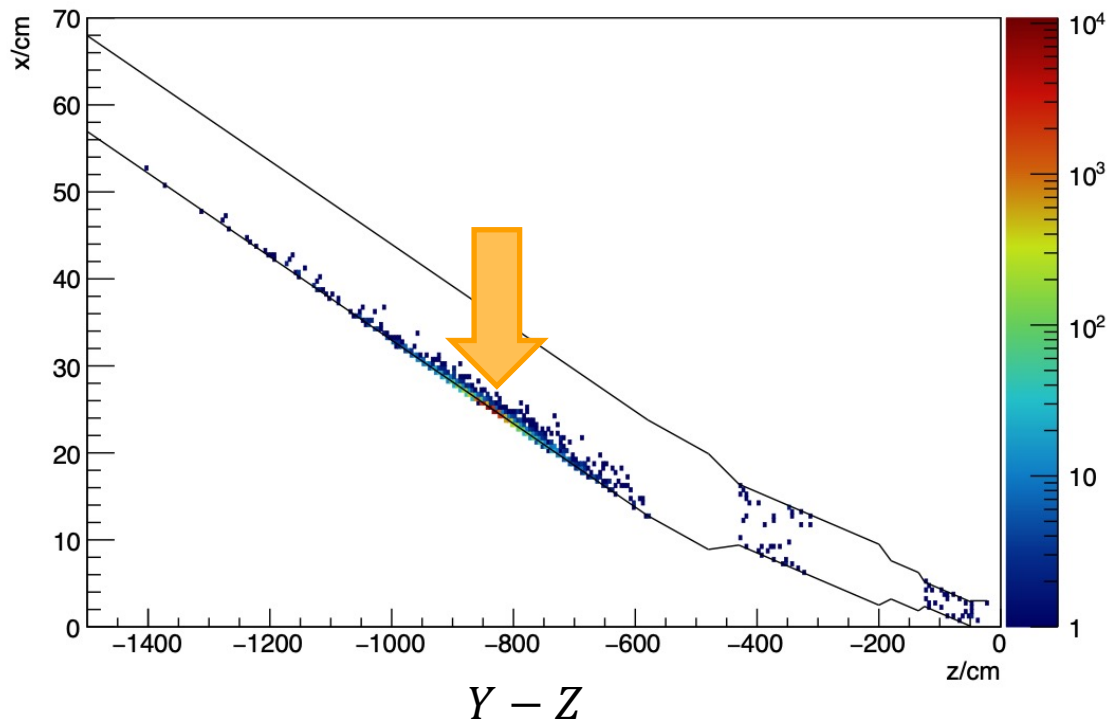
模拟配置：对撞区磁场物质设置

- 基于加速器的初步设计*，实现对撞区的**磁铁**、**磁场**和**束流管**建模
- **偏转**二级铁后束流管以匹配正负电子运动方向



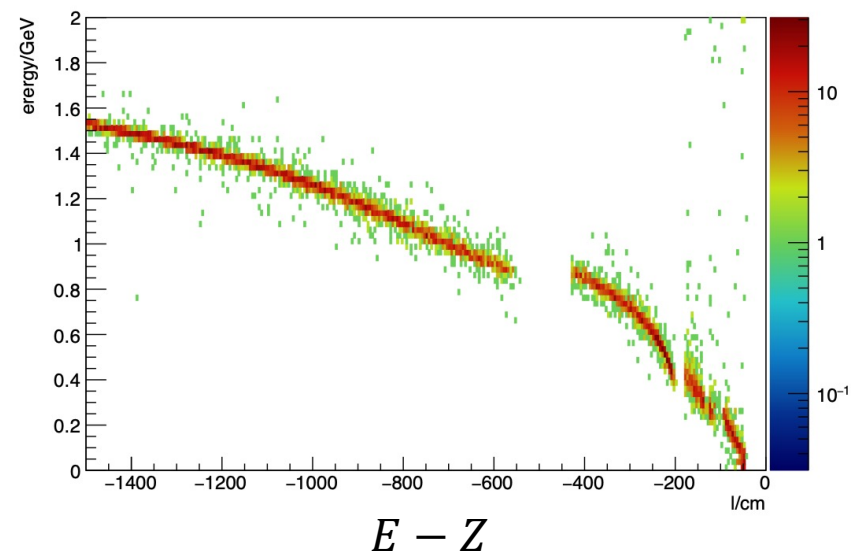
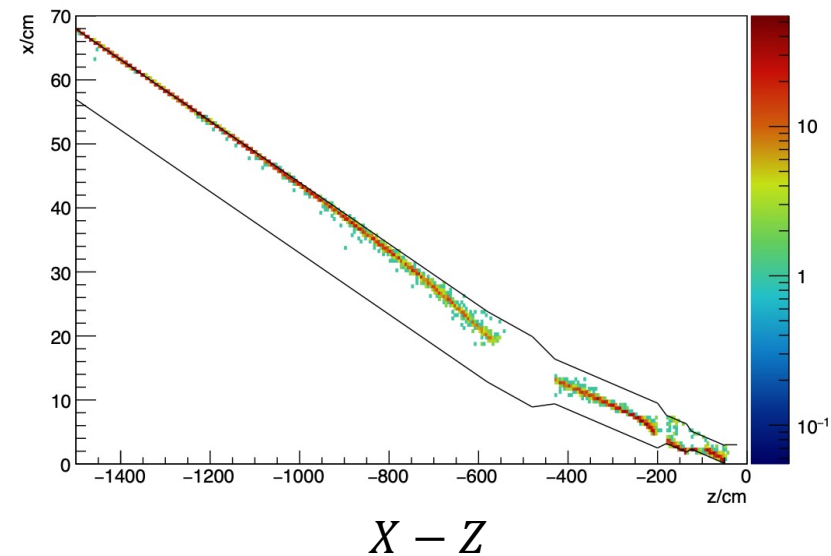
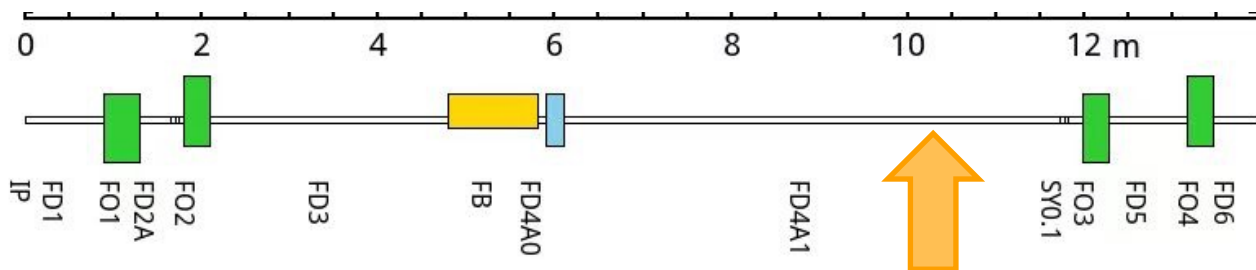
信号分布：辐射光子分布

- 光子的丢失位置在z方向上分布极广 ($\sigma_z \sim 10\text{cm}$)
 - 设置铜窗以提升光子的几何接收效率
- 低能光子探测效率低，
 - 使用高密度转换体提升探测效率



信号分布：正负电子分布

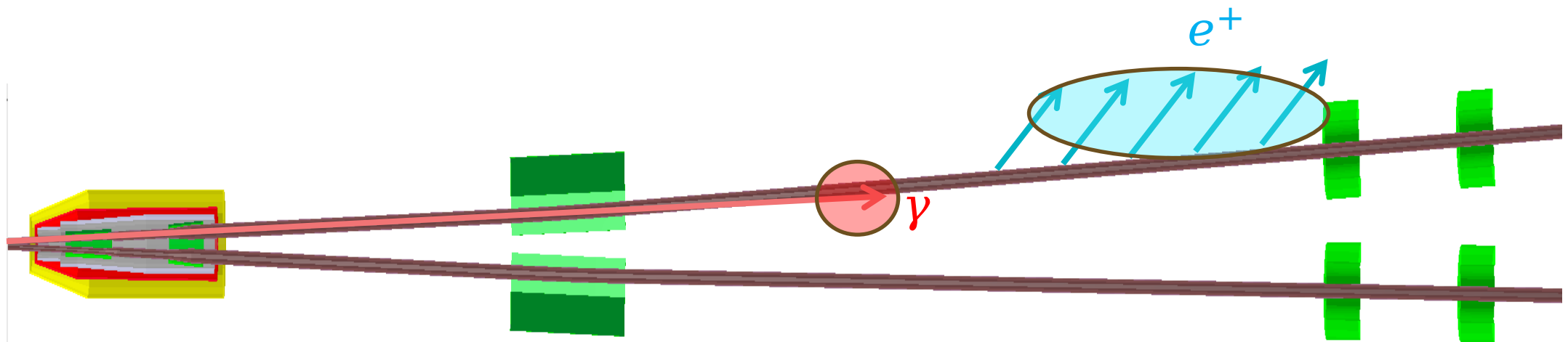
- ❑ 将 2.5-12m 范围作为正负电子探测的关注区。
- ❑ 该范围内内辐射 Bhabha 电子丢失率 $\sim 7\%$ 。
- ❑ 初步选择在 10-11m 的范围内收集正负电子
 1. 正负电子能量 ~ 1.3 GeV，探测器信号幅度更大
 2. 避免 12m 处四级铁对丢失粒子路径的影响



- 设计宗旨
- 开窗设计
- 两种技术路线的性能研究（初步结果）
 1. 基于辐射光子探测的契伦科夫光探测器
 2. 基于正电子探测的金刚石探测器

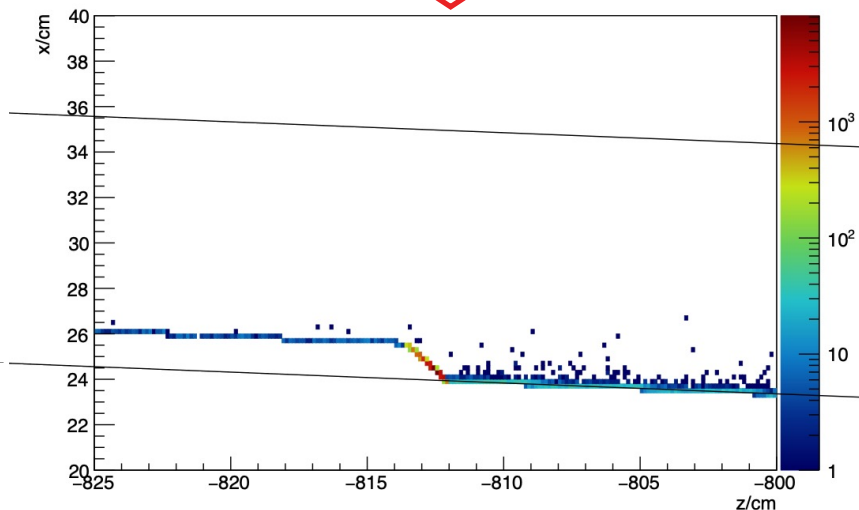
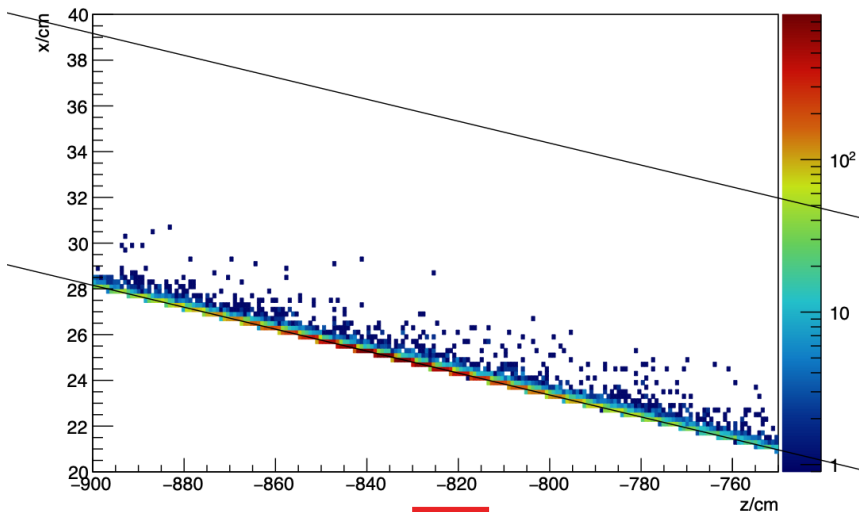
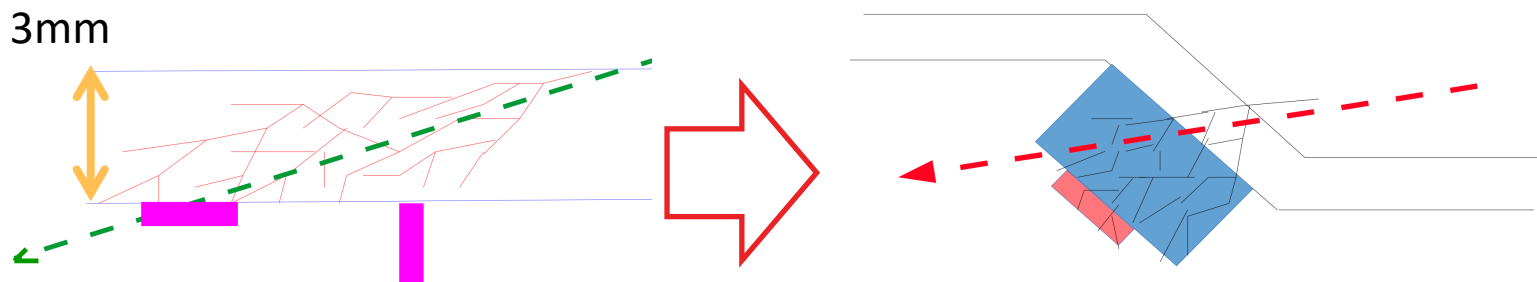
亮度监测系统的设计宗旨

- $>90\%$ 辐射光子沿着正负电子入射方向运动，在第一块二级铁后逃逸出束流管。
- 低能正负电子磁场偏转击中束流管
- 丢失粒子探测：
 1. 正负电子：束流管外侧10m
 2. 辐射Bhabha光子：束流管内侧8m



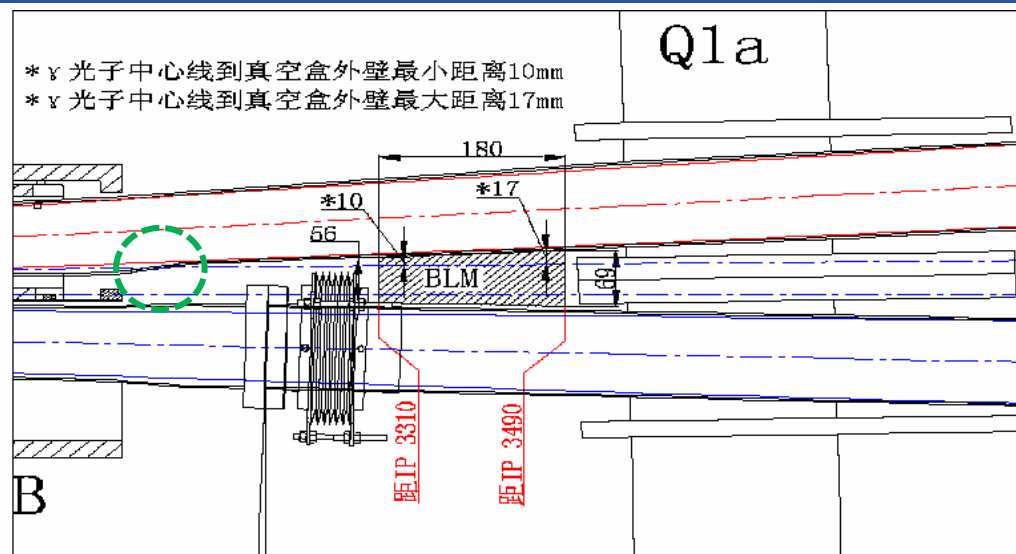
开窗设计：目的

- 光子在束流管内的有效路程 $\sim 160\text{mm} \rightarrow \sim 4\text{mm}$ 。
显著降低与束流管的相互作用。
- 2-7GeV质心能量下铜窗的接收率 $> 80\%$
- 在 $0.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} @ 2\text{GeV}$ 下，辐射光子在铜窗处的丢失率约为 $7 \times 10^9 \text{Hz}$

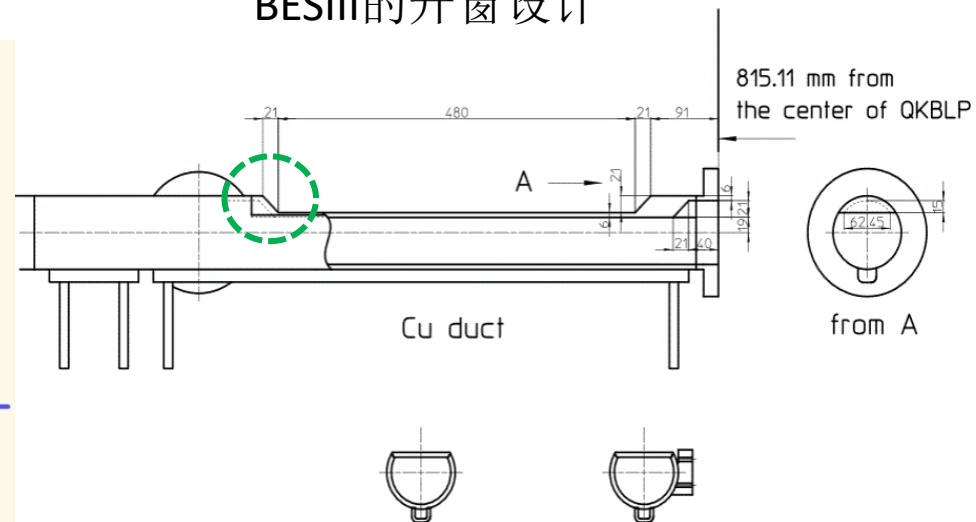
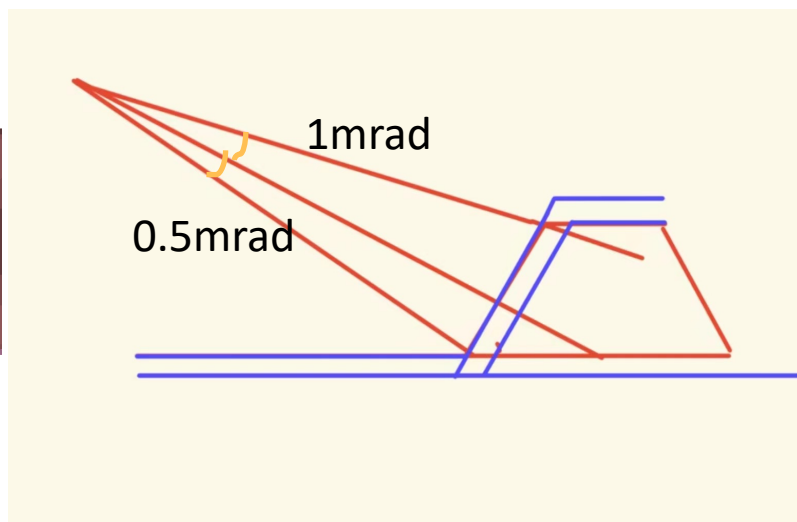
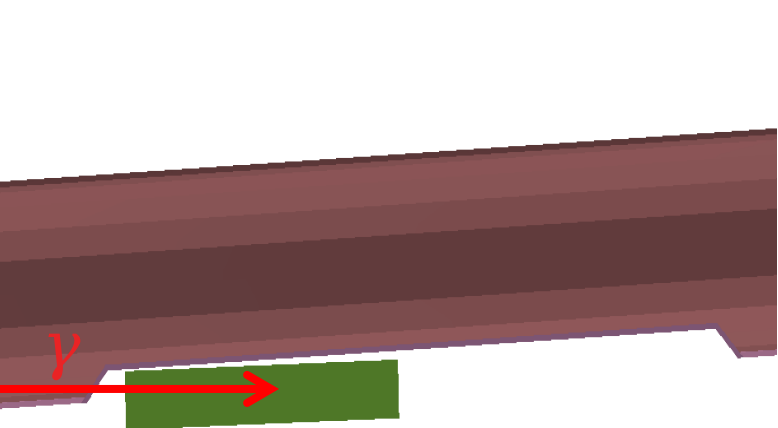


开窗设计：建模

- ❑ 辐射光子开窗位置： $z=836\text{cm}$ 。（内侧）
- ❑ 正负电子开窗位置： $z=1000\text{cm}$ 。（外侧）
- ❑ 铜窗倾角： 45° 深度： 19mm 。



BESIII的开窗设计



BELLEII的开窗设计

窗口处粒子事例率

□ 在峰值亮度的目标质心能量附近研究粒子事例率

辐射光子:

质心能量 (GeV)	4	5	6	7
探测效率	92.3%	94.7%	96.3%	97.1%
事例率 (Hz)	$\sim 9.9 \times 10^9$	$\sim 1.0 \times 10^{10}$	$\sim 1.1 \times 10^{10}$	$\sim 1.1 \times 10^{10}$

事例率高

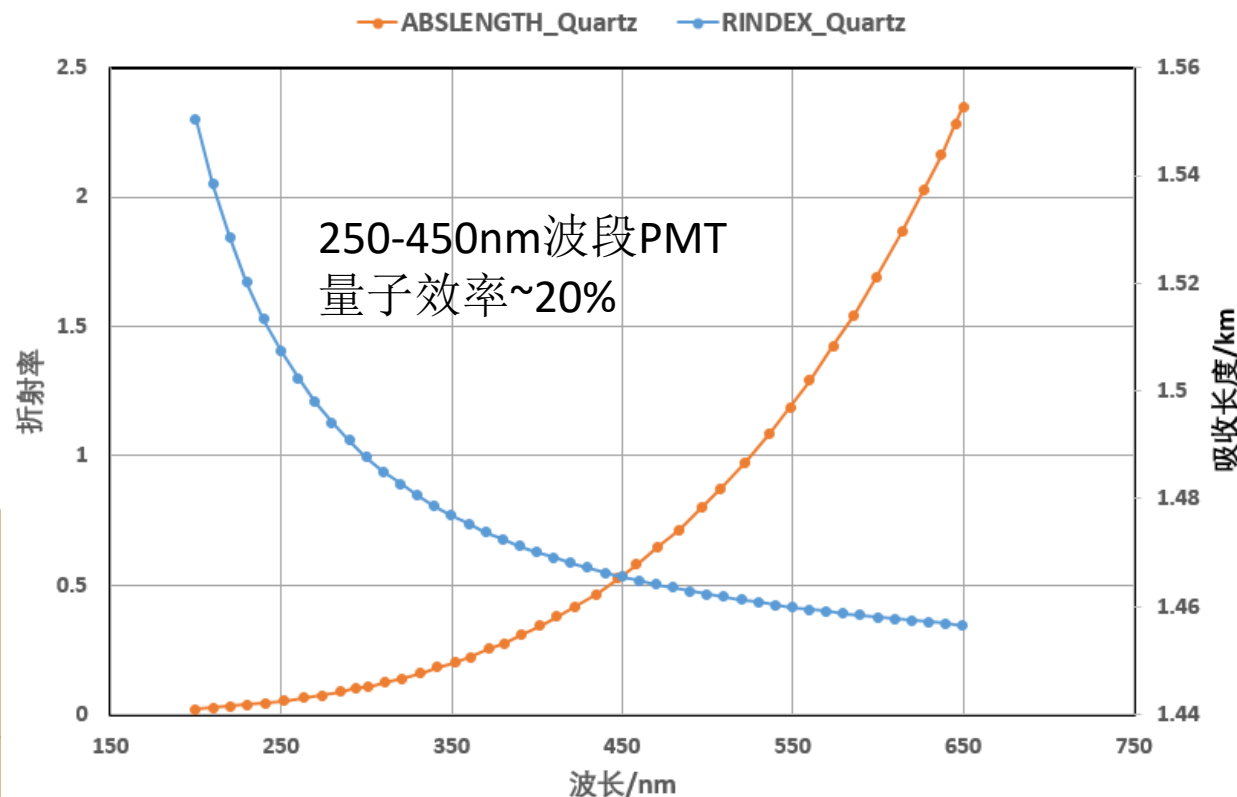
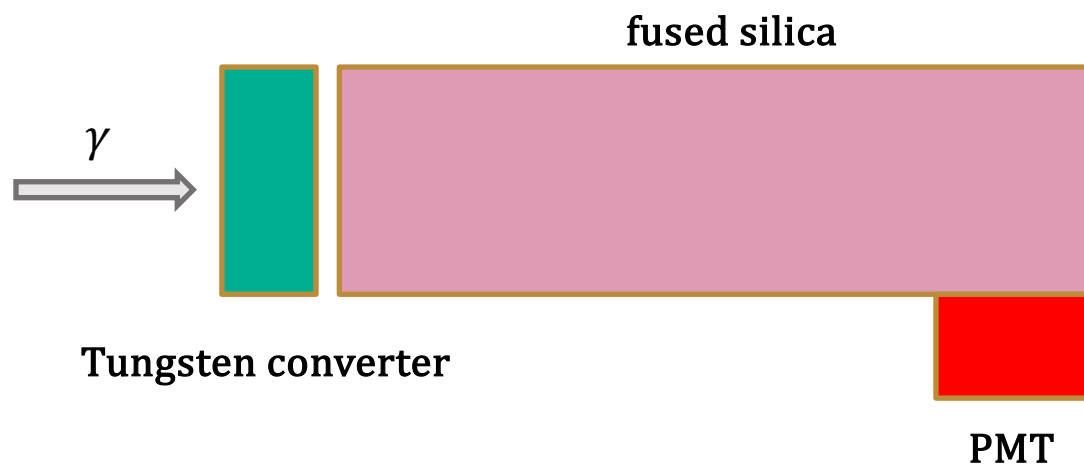
正负电子:

质心能量 (GeV)	4	5	6	7
探测效率	1.67%	1.79%	1.80%	1.86%
事例率 (Hz)	$\sim 3.6 \times 10^8$	$\sim 3.9 \times 10^8$	$\sim 4.0 \times 10^8$	$\sim 4.2 \times 10^8$
出射正电子能量 (GeV)	~ 1.3	~ 1.6	~ 2.0	~ 2.3

纯度高、
正电子能量大

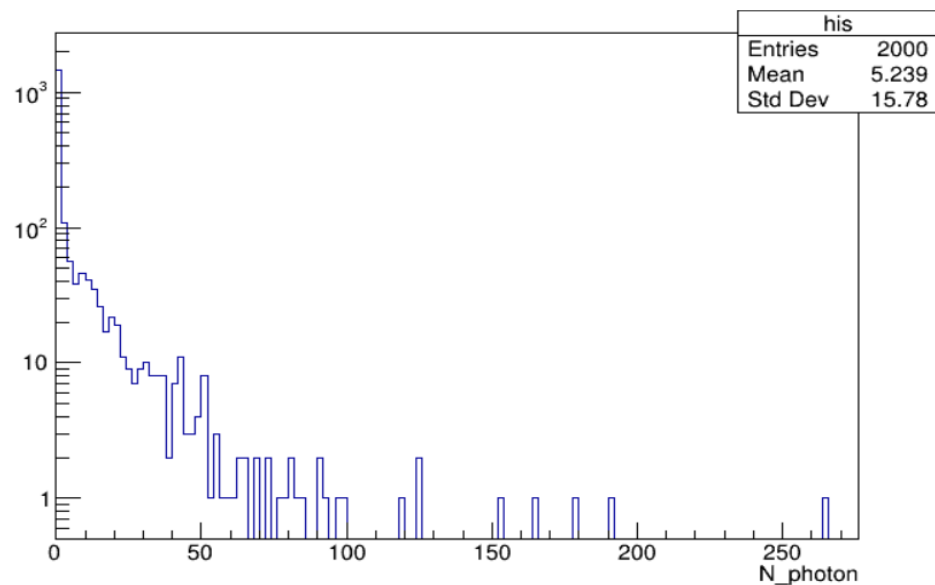
契伦科夫光探测器：设置

- ❑ 辐射光子探测：熔融石英+PMT的契伦科夫光探测器
 - 使用**大质量**的灵敏体以提升**低能光子探测效率**
- ❑ 钨转换体厚度： $3.5 X_0$ (参照BESIII实验)
- ❑ 熔融石英尺寸： $3 \times 7.8 \times 20 \text{ cm}^3$
- ❑ 200-650nm的契伦科夫光：
 - 吸收长度 $> 1.44 \text{ m}$, 量子效率 $> 20\%$
- ❑ 正负电子探测阈值： $\sim 0.6 \text{ MeV}$

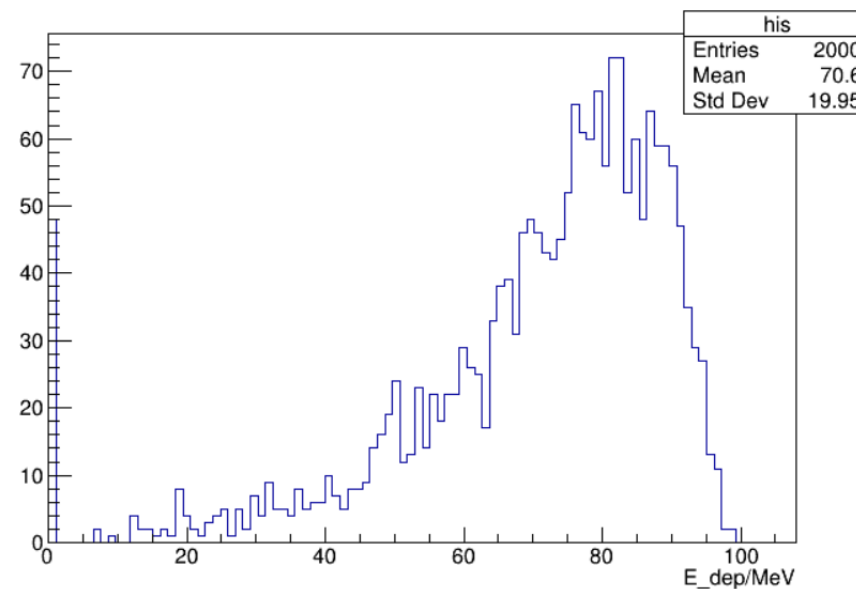
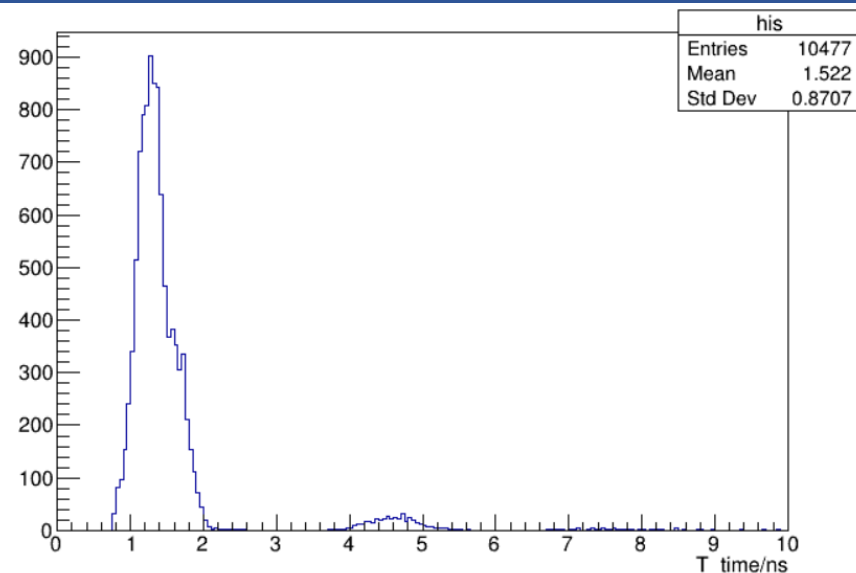


契伦科夫光探测器：初步模拟结果

- ❑ 探测器对100 MeV光子的响应
 - ❑ 平均沉积能量 70MeV
 - ❑ PMT探测的平均光电子数 ~5个
 - ❑ 1 ns内可收集 90%以上的契伦科夫光信号
- ❑ 需进一步评估光收集效率对测量精度的影响



入射事例的光电子谱

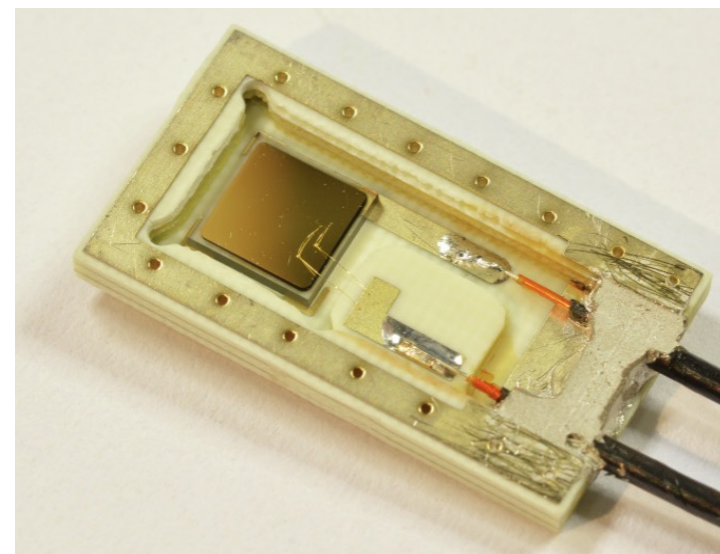


沉积能量

金刚石探测器：设置

□ 正负电子探测：金刚石传感器

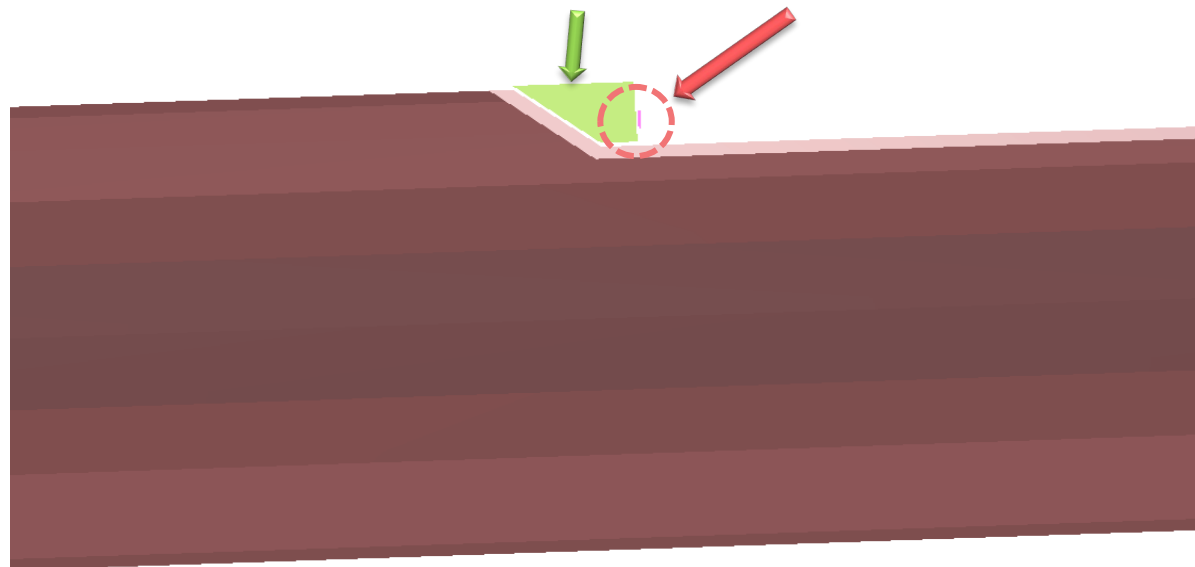
- 较强的抗辐照能力
- 平均电离能 **13eV**，可实现极低噪声水平
- 金刚石： $4.5 \times 4.5 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 钨转换体： $4 X_0$
- 可实现单个最小电离粒子的探测



SNR~**18** (LAL for ATF2)

Type:	Charge amplifier
Input coupling:	AC coupled
Input protection:	IEC61000-4-2 ($\pm 8 \text{ kV}$, 2 A for 1 μs)
Input polarity:	Negative, unipolar
Output polarity:	Inverting, positive
Linear output voltage:	+1 V
Output impedance:	50 Ω
Impulse response:	
Pulse shape:	Gaussian
Rise time:	3.5 ns
Pulse width at FWHM:	10 ns
Performance (4.3 pF load):	
ENC noise:	1000 electrons
Gain:	4 mV/fC
SNR:	6/fC

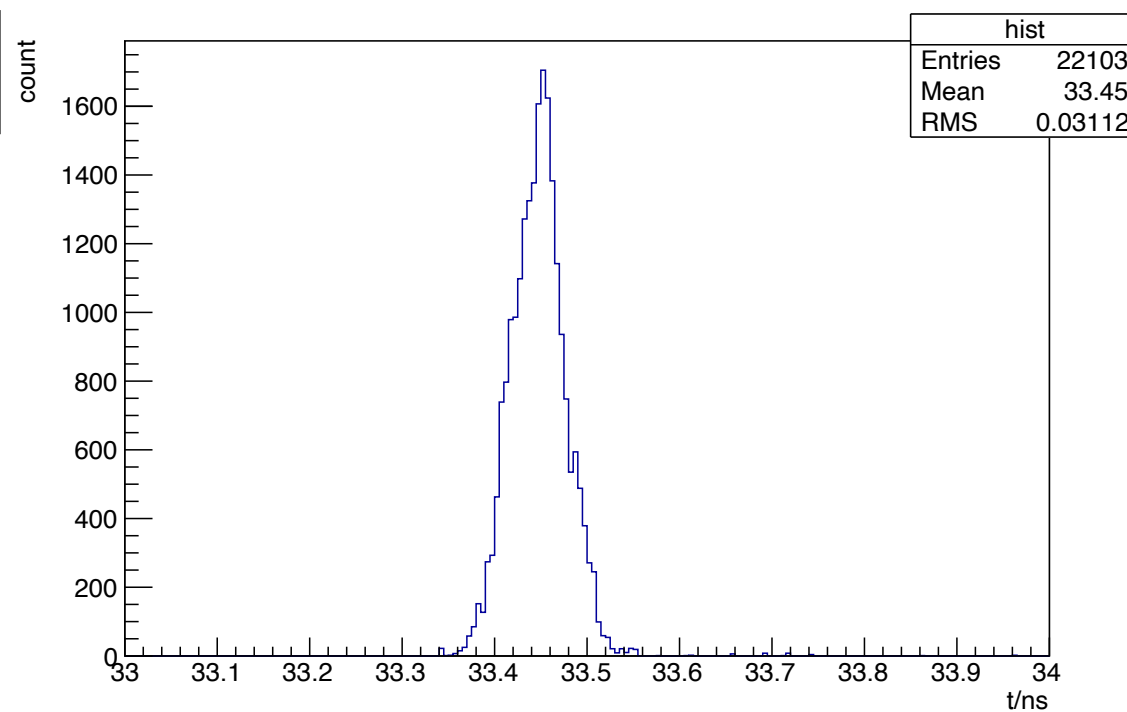
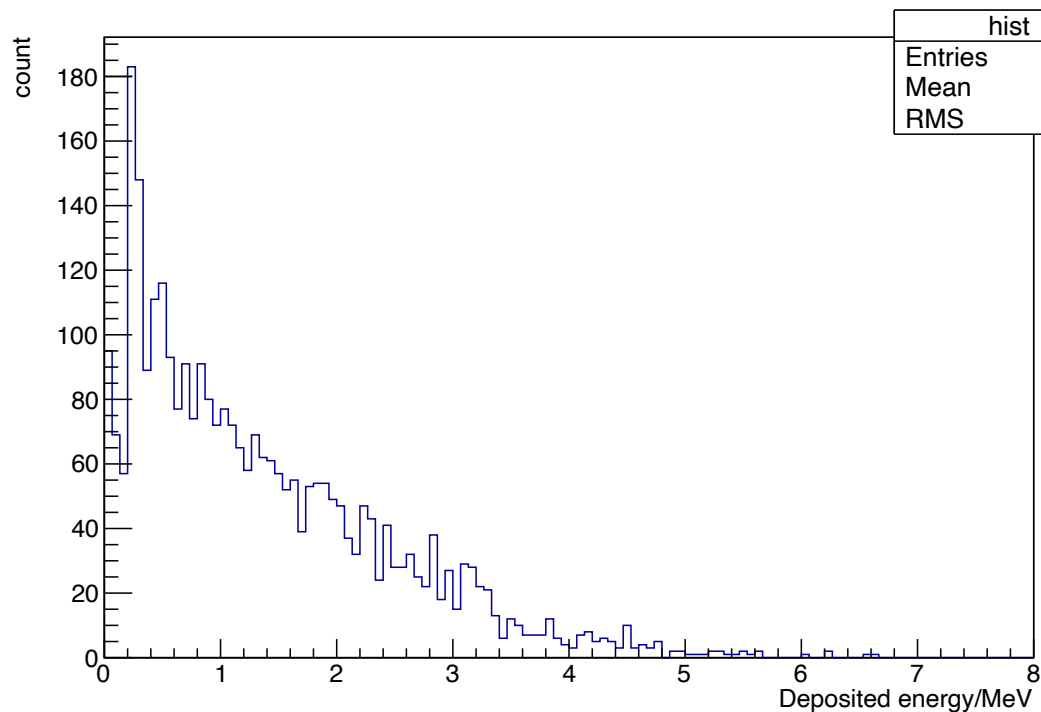
钨转换体 金刚石



金刚石探测器：能量沉积

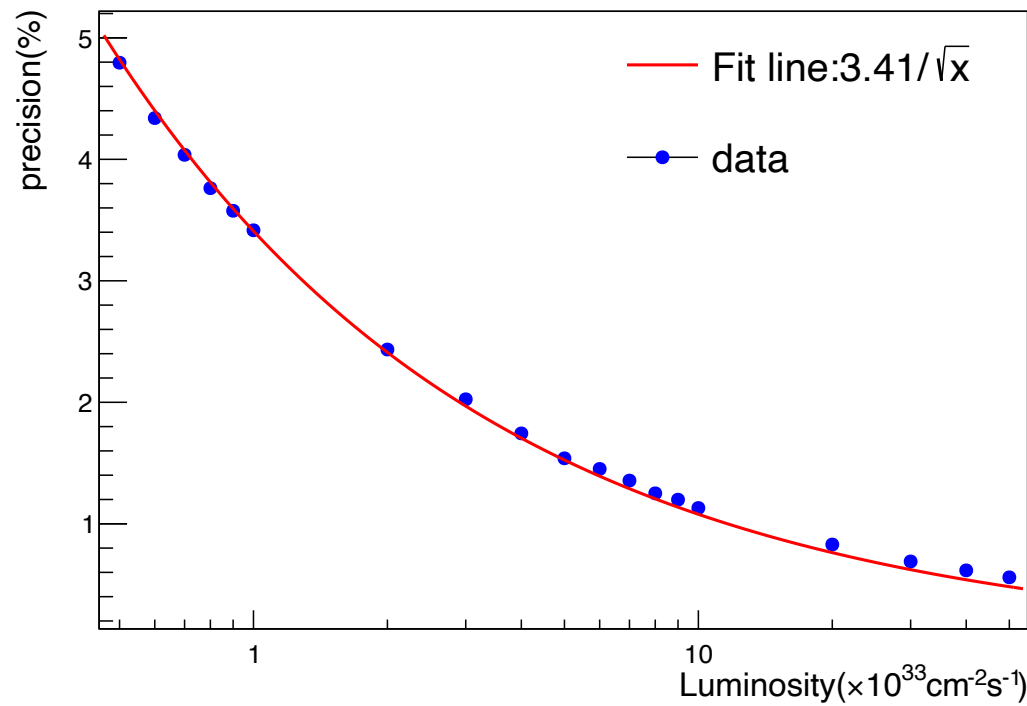
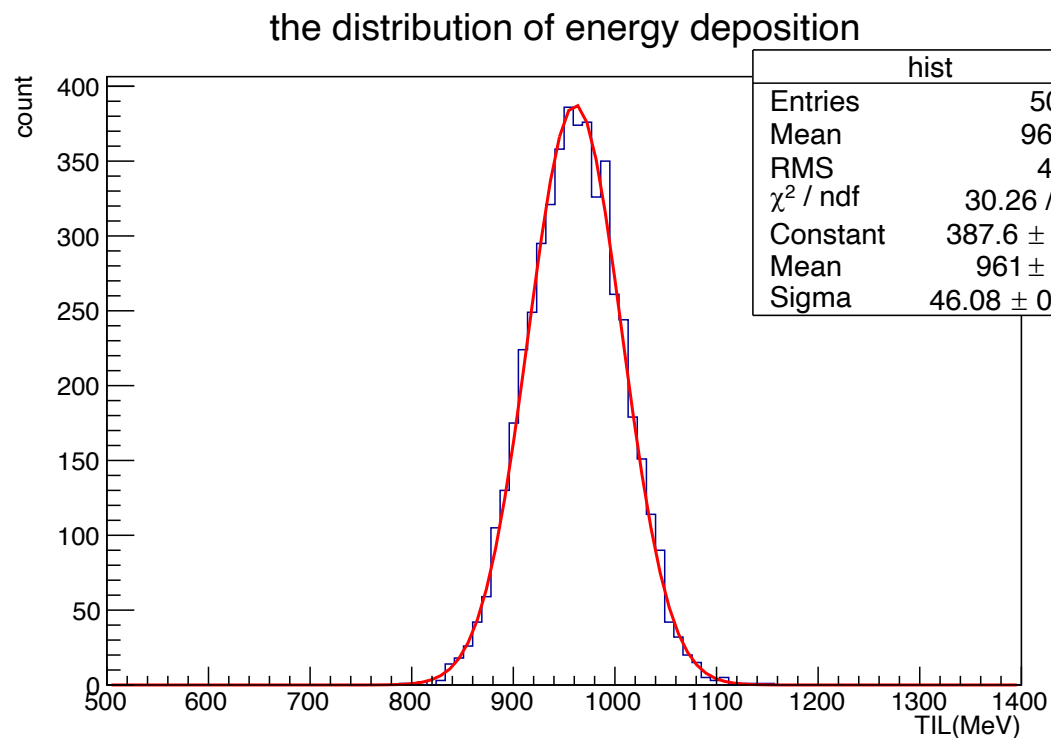
- ❑ 模拟设置质心能量：4GeV
- ❑ Bhabha正电子的探测效率约为**0.3%**。
- ❑ **0.2 ns**内可收集**90%**以上的信号
- ❑ 在 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 亮度下，金刚石处收集到的总事例率 **> 10^7 Hz**

Energy deposited of charge secondary particles per Bhabha positron



金刚石探测器：初步模拟结果

- 积分亮度信号：在 1 ms 时间窗口内所有辐射Bhabha信号的积分
- $0.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 亮度下的测量精度优于**1%**， $0.5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 亮度下的测量精度优于**5%**
- 整个亮度区间内均满足亮度监测的**精度需求**



总结和展望

➤ 总结

- 在OSCAR框架下完成了BBBREM产生子、束团几何、MDI区磁场与物质的设置；
- 束流管下游内侧8.3m处收集光子，外侧10m处收集正负电子；
- 束流管开窗设计：铜窗倾角 45° ，深度19mm；
- 完成契伦科夫光探测器和金刚石探测器技术路线的模拟及初步性能评估；
- 在 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ @4GeV下，亮度测量的精度好于1%，符合亮度监测的预期；在 $10^{33} - 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 全亮度范围内，亮度测量精度好于5%。

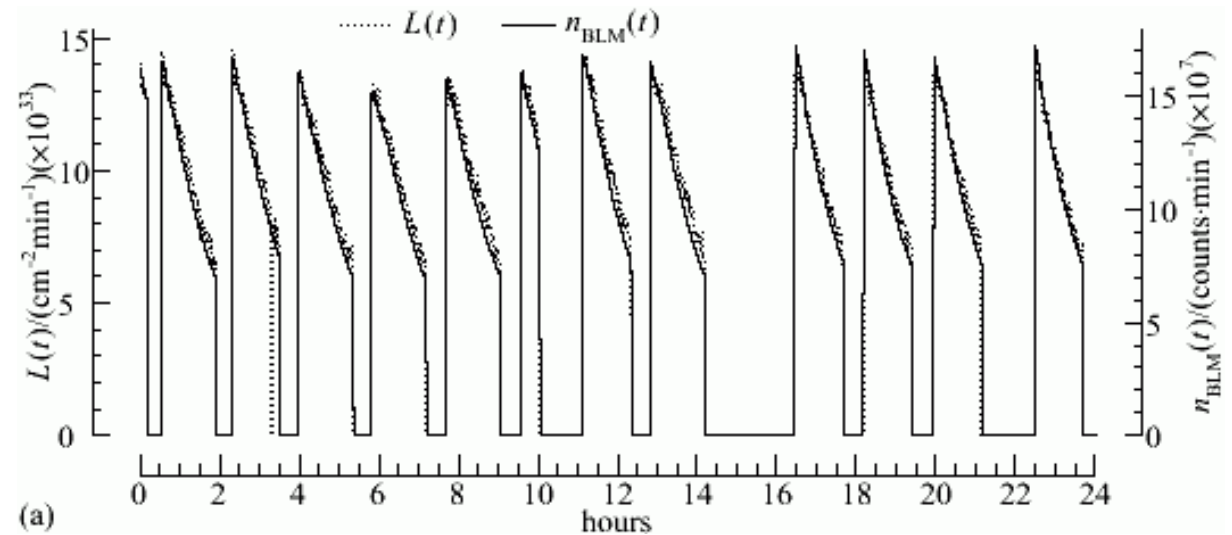
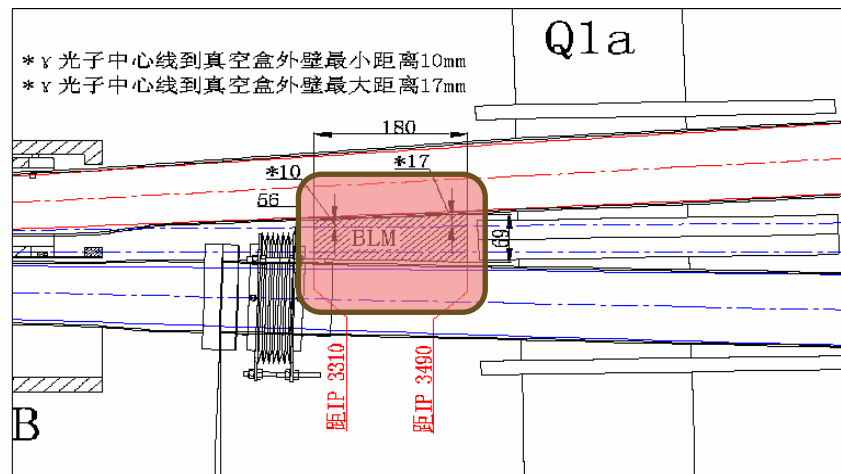
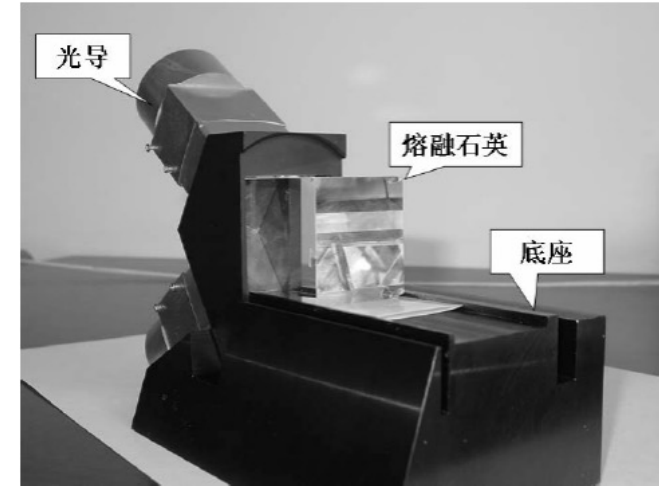
➤ 下一步计划

- 评估本底及辐照对亮度监测器的影响；
- 不同信号和不同探测器方案得到的事例率间的相互校准；
- 开展探测器原型机的研发；
- 跟进加速器设计方案，迭代更新探测器“选址”。

BACKUP

BEPCII的亮度监测

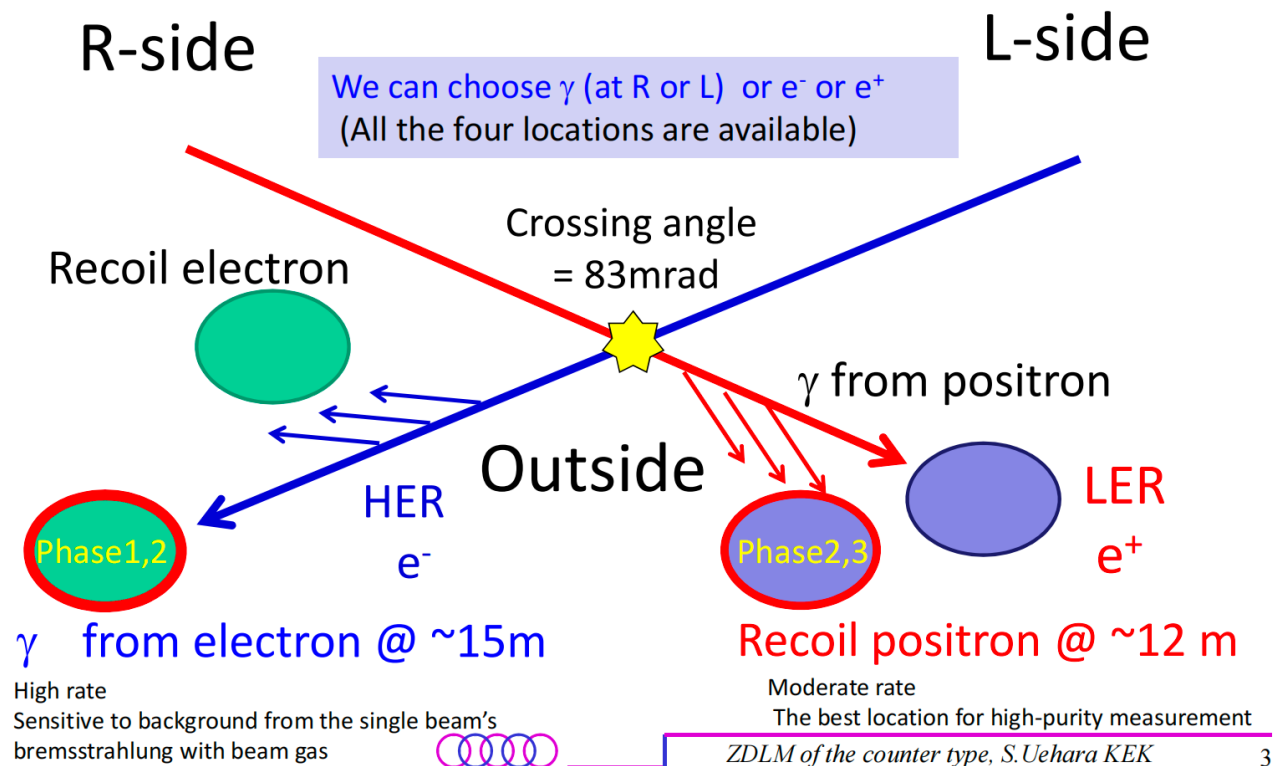
- BEPCII 的亮度监测器是利用零角度单轭致辐射过程发射的光子计数来监测正负电子对撞的亮度；
- 光子的计数器包括转换体和熔融石英 Cherenkov 辐射体组合的探测系统。



SuperKEKB的亮度监测方案 – 信号分布



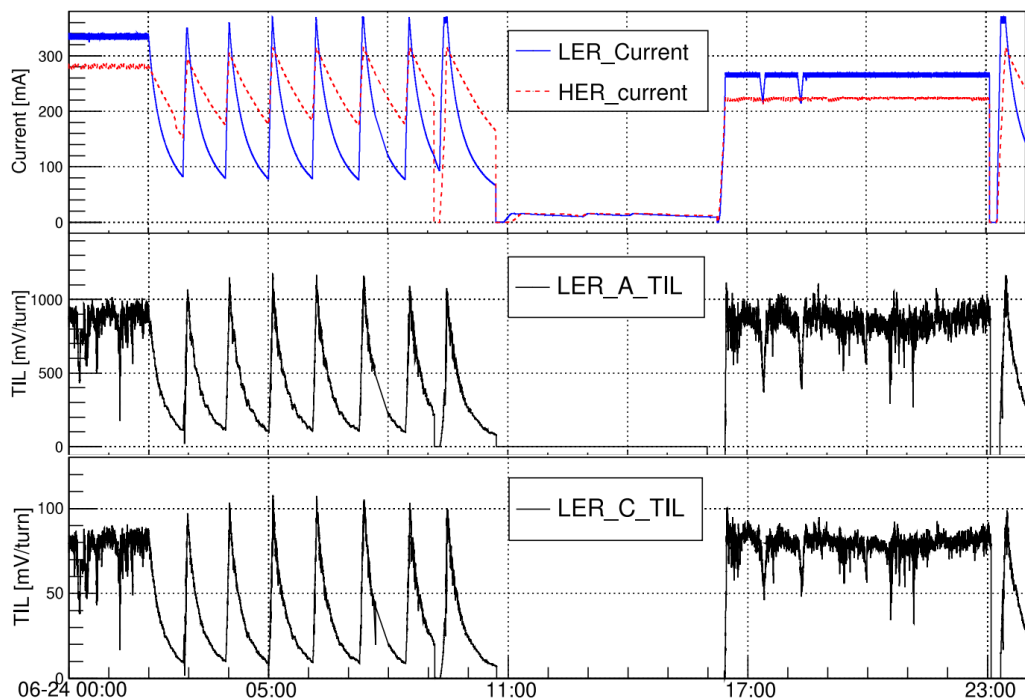
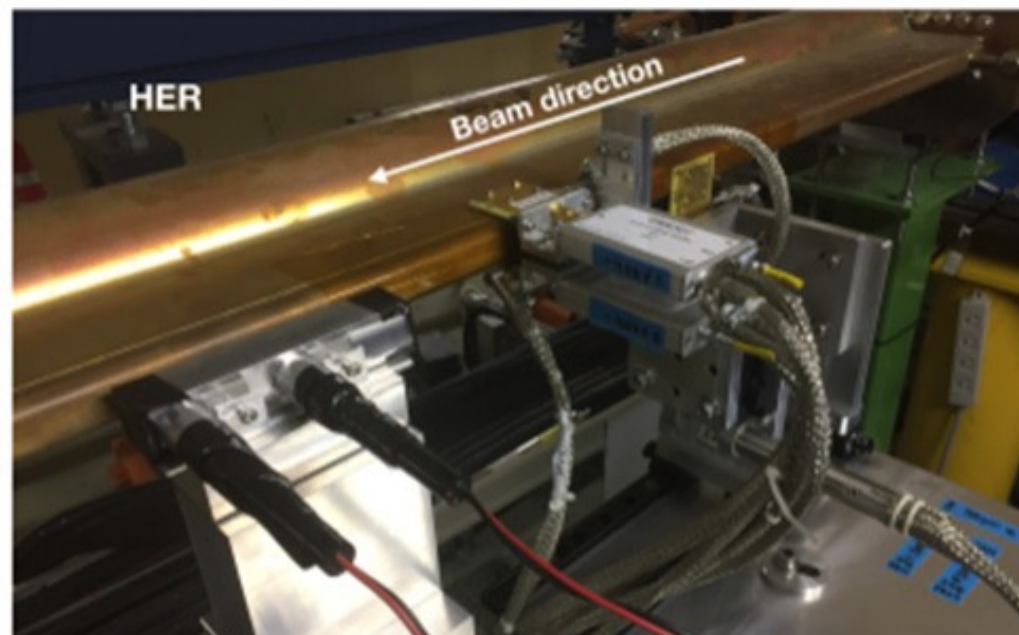
- 由于其非对称式的对撞能量设计，用于亮度监测的信号事例具有特殊的分布特征；
- 辐射Bhabha过程的电子由于损失能量，导致其比正常的束流电子更易脱离束流管束缚而击中内部；
- 而光子主要在正电子束流管附近，因此BELLEII中的亮度监测选择在束流管下游12米处进行探测。



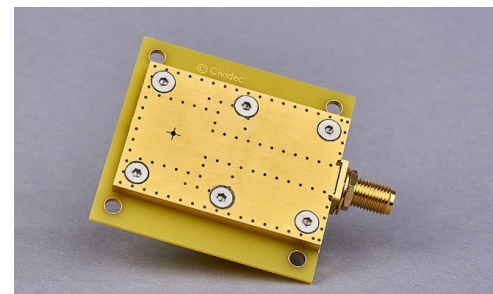
SuperKEKB的亮度监测 - 辐射光子探测



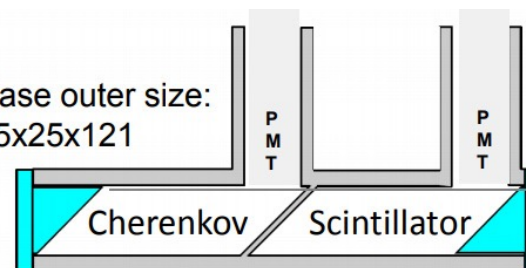
- 如图为SuperKEKB收集光子的设计（HER）
- 由三个金刚石传感器、契伦科夫探测器和闪烁体探测器组成。



Example of the measured luminosity signals (LER) together with beam currents in both rings, sampled every 1 s over a day.



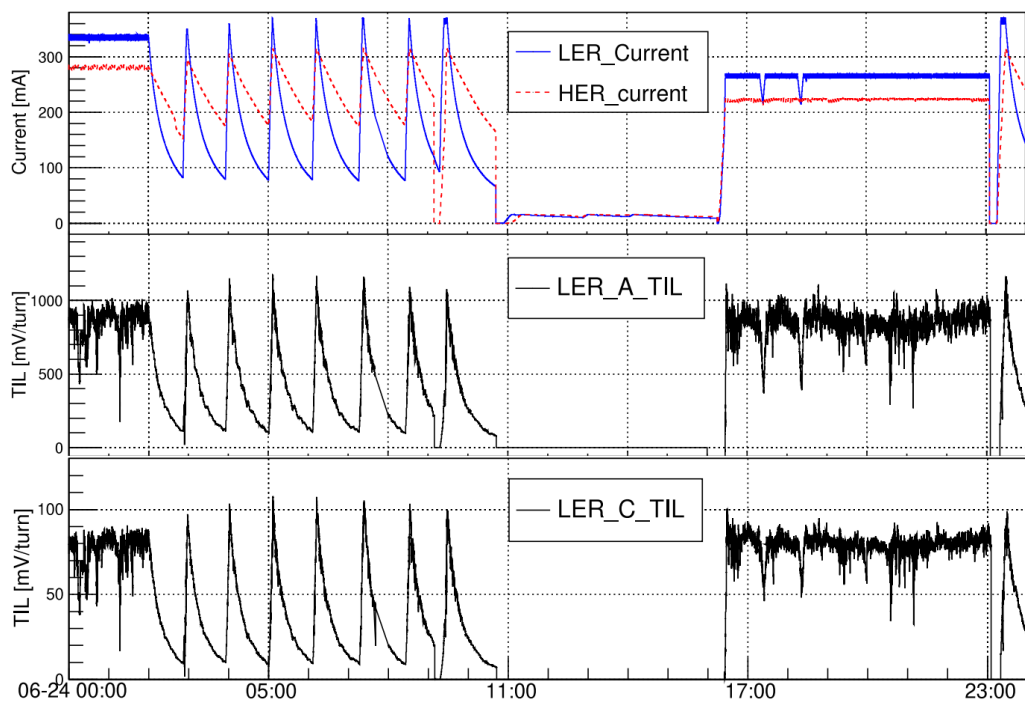
Case outer size:
25x25x121



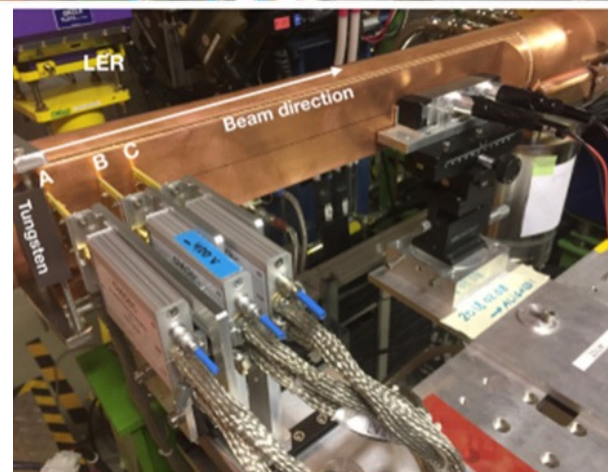
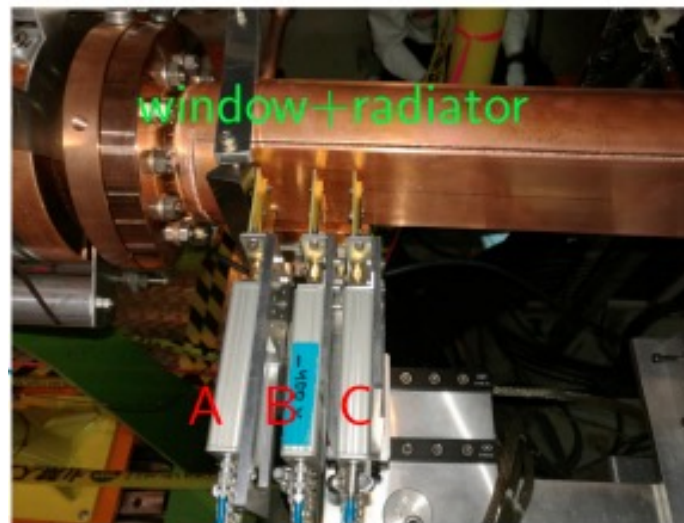
SuperKEKB亮度检测-正负电子探测



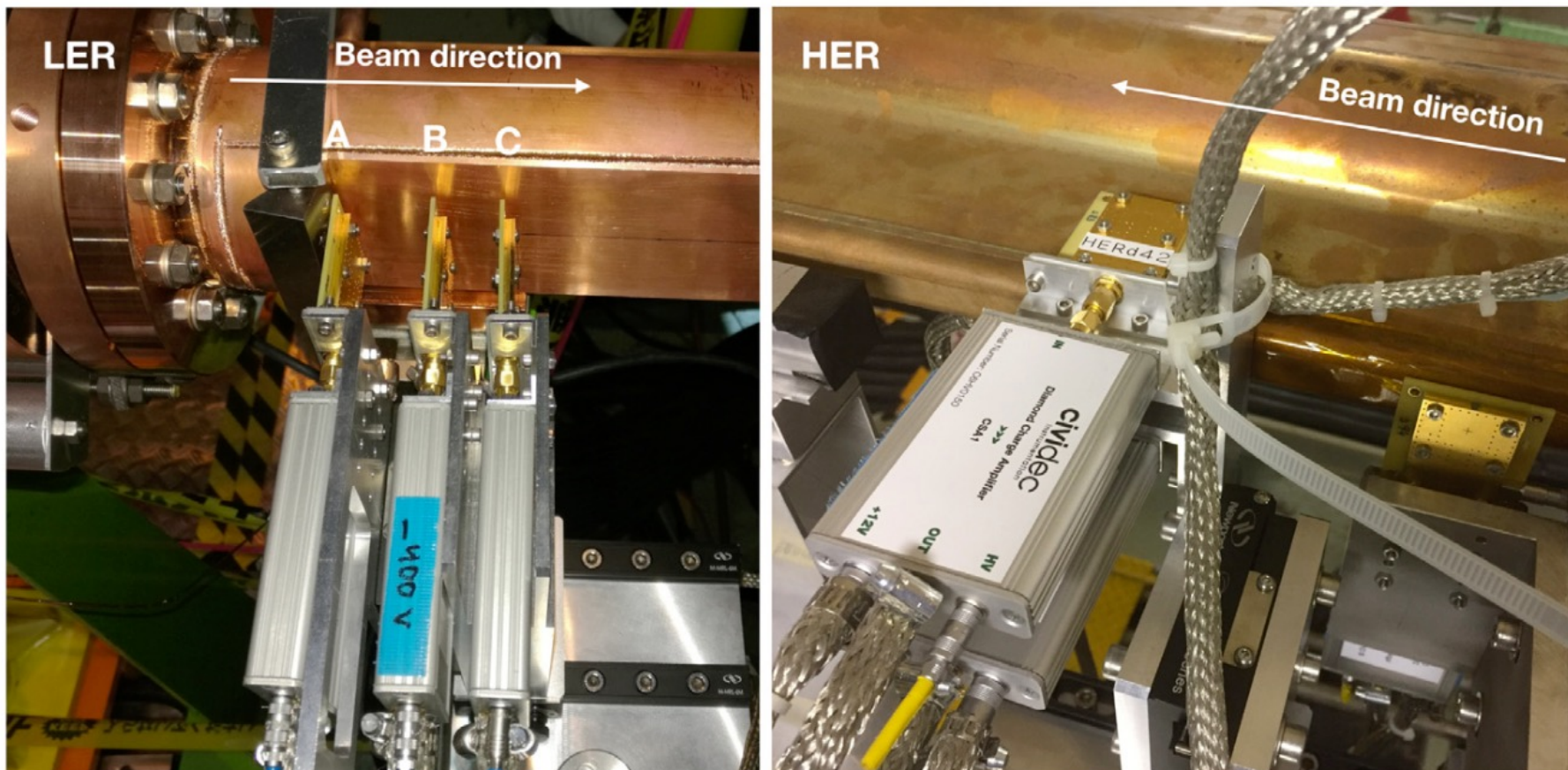
- 如图为SuperKEKB收集正电子的设计（LER）
- 由三个金刚石传感器、契伦科夫探测器和闪烁体探测器组成。



Example of the measured luminosity signals (LER) together with beam currents in both rings, sampled every 1 s over a day.



SuperKEKB的亮度监测 – 金刚石探测器安装



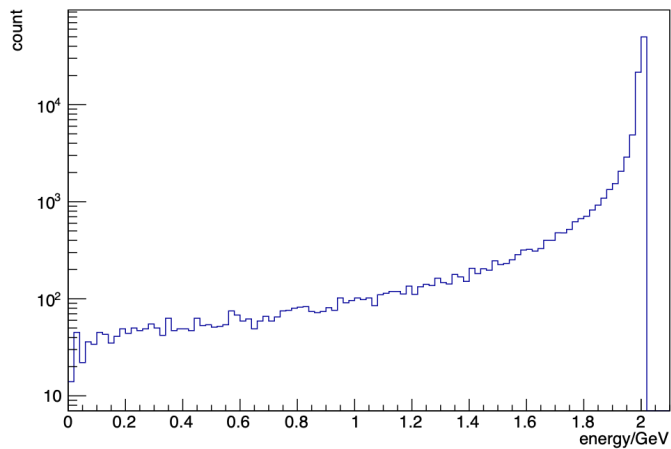
❖ BelleII上位于正负电子束流(HER和LER)下游的金刚石亮度监测系统

产生子设置

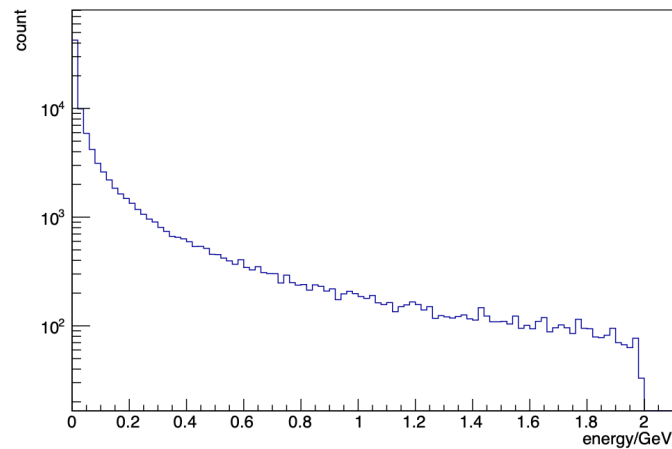
- 质心能量设置为4GeV，最小光子能量为1MeV。
- 电子最大出射角为87mrad，电子的最小能量和最小出射角不做限制。
- MaxWeight设置为2000， DensityParameter设置为 $3.89351824e-26$ 。
- 给出该情形下产生子输出的截面数值，并估计 $0.5e34 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 的亮度下对应的总事例率

```
import BBBrem
bbbremalg = task.createAlg("BBBrem")
# e+e-->e+e- gamma;
bbbremalg.property("CMSEnergy").set(4.0)#GeV
bbbremalg.property("MinPhotonEnergy").set(1e-3)#GeV
bbbremalg.property("Weighted").set(True)#Set to true to generate unweighted events
bbbremalg.property("MaxWeight").set(2000.0)#Only required in the case of weighted events.
bbbremalg.property("DensityMode").set(1)
bbbremalg.property("DensityParameter").set(3.89351824e-26)#(hbarc/sigma_y)^2
bbbremalg.property("MinAngle").set(0.0)#rad
bbbremalg.property("MaxAngle").set(0.087)#rad
bbbremalg.property("MinEnergy").set(0.0)#GeV
```

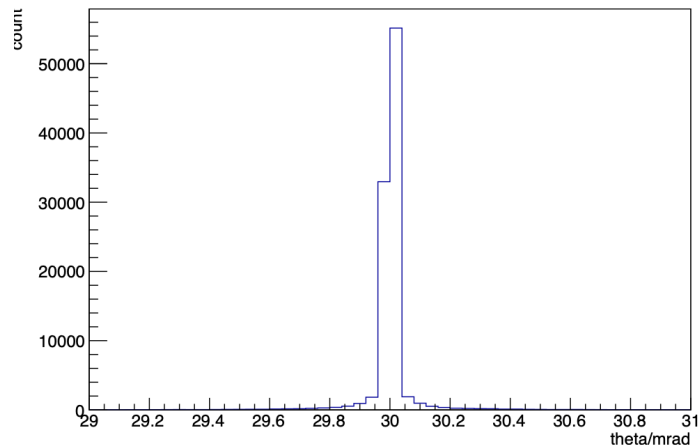
Boost后出射粒子的能量与角度



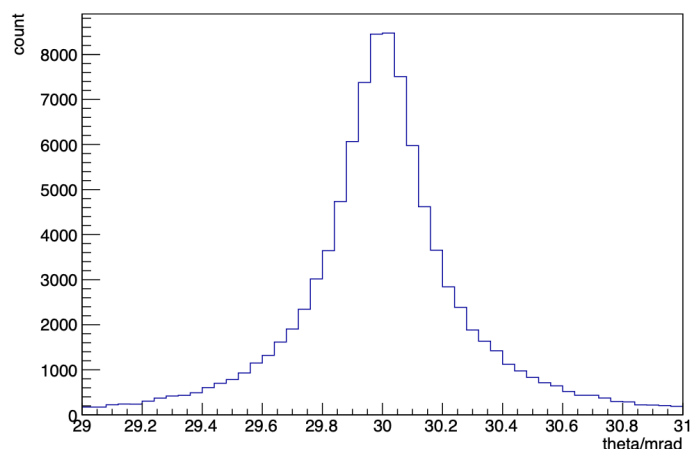
电子能量



光子能量

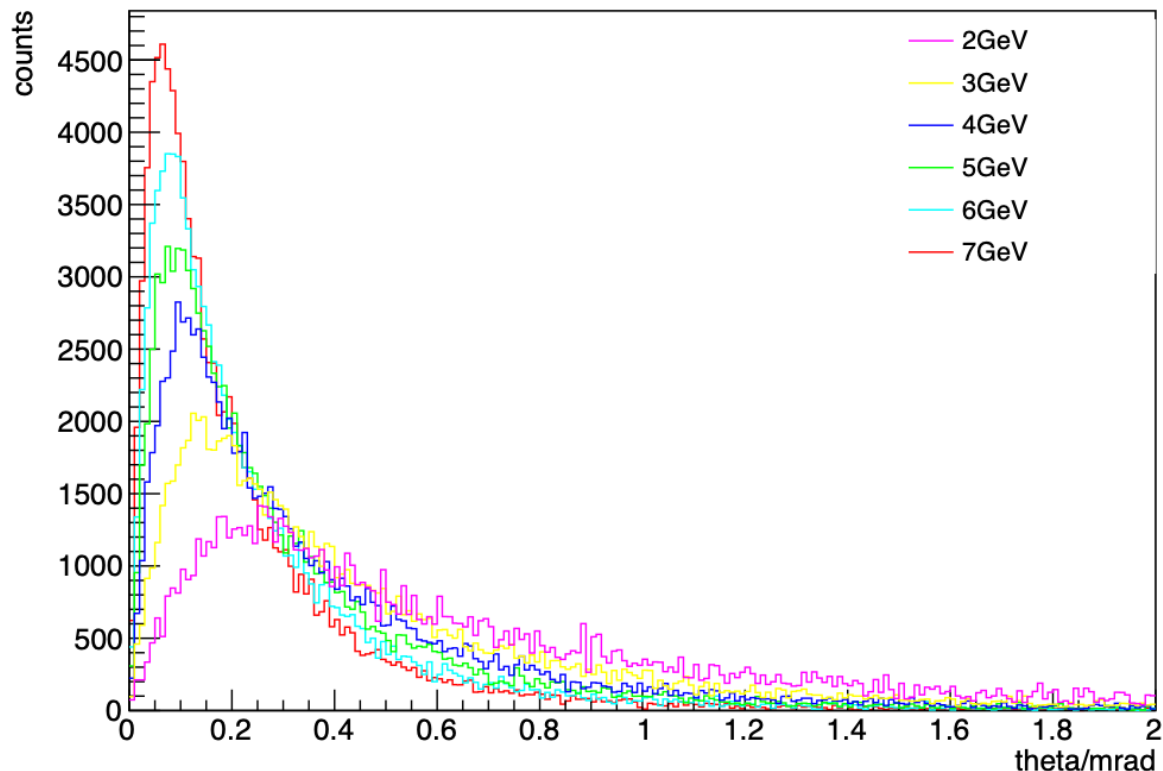


电子 θ



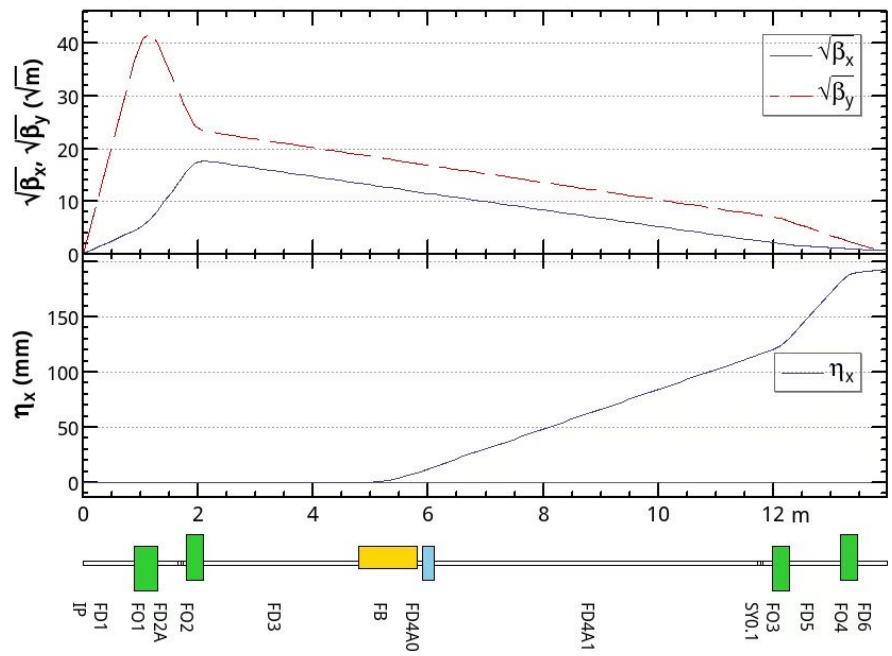
光子 θ

- 电子能量集中在1.8-2GeV，光子能量集中在0-0.2GeV。
- 电子的出射角集中在29.8-30.2mrad，光子出射角集中在29-31mrad。

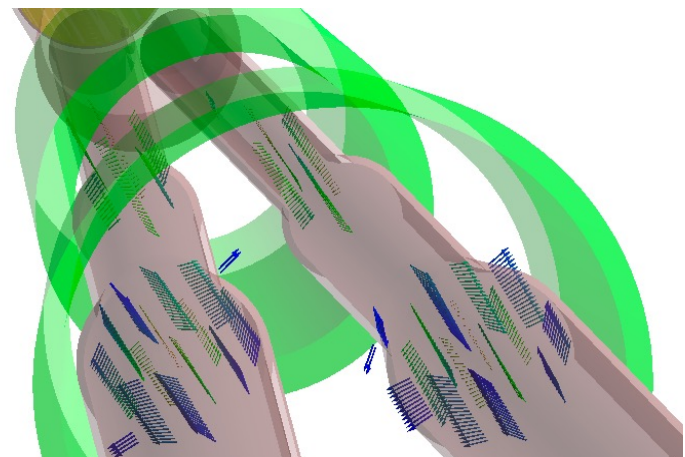
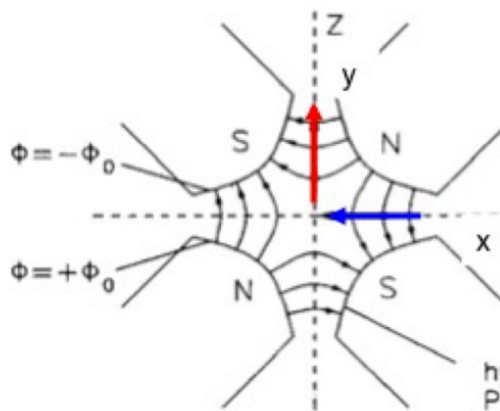
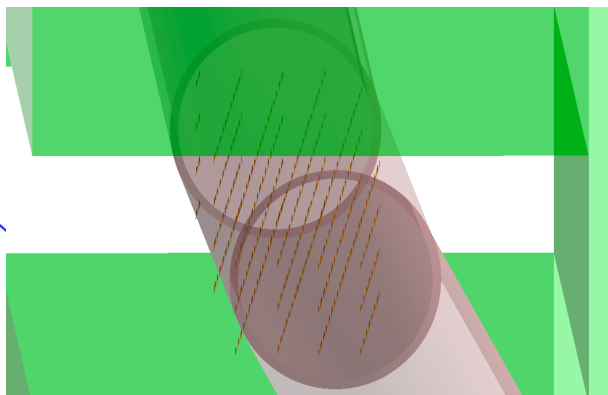
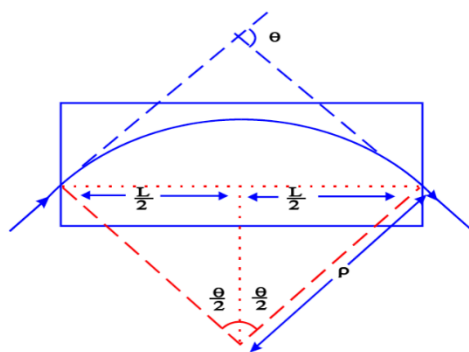


- 质心能量越低，光子张角越大，接受度越小。同时截面越小，在相同接受面积下的事例率越低。
- 根据2GeV质心能量做接受度的模拟，辐射Bhabha截面 $\sigma \approx 360\text{mbar}$ (截断能量 $k_t = 1\text{MeV}$)

对撞区磁铁设计



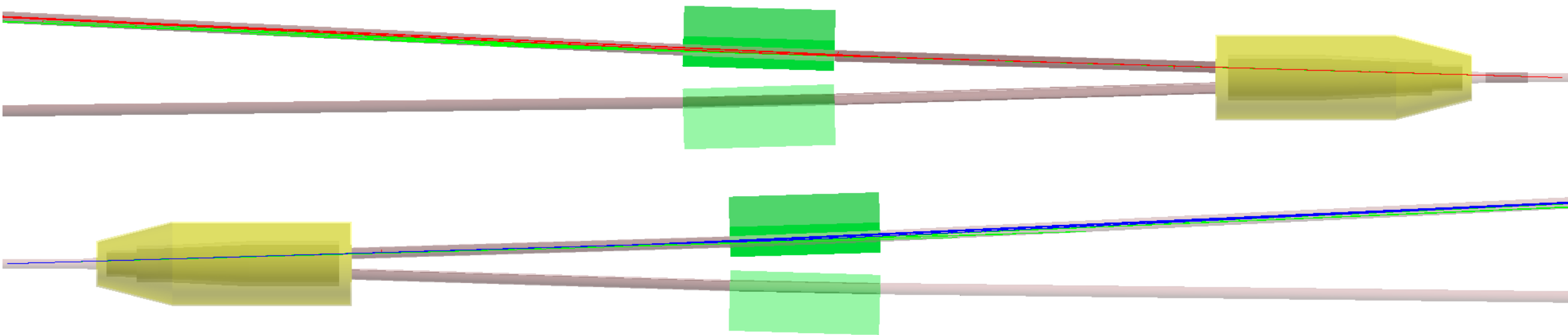
- 对撞区的设计主要由漂移区、二级铁、四级铁、六级铁等。这里我们使用的主要为二级铁和四级铁。
- 二级铁（BEND）的作用是提供整体的偏转
- 四级铁（QUAD）的作用是聚焦正负电子
- 已完成对这一区域的磁铁和磁场建模



二级铁磁场验证



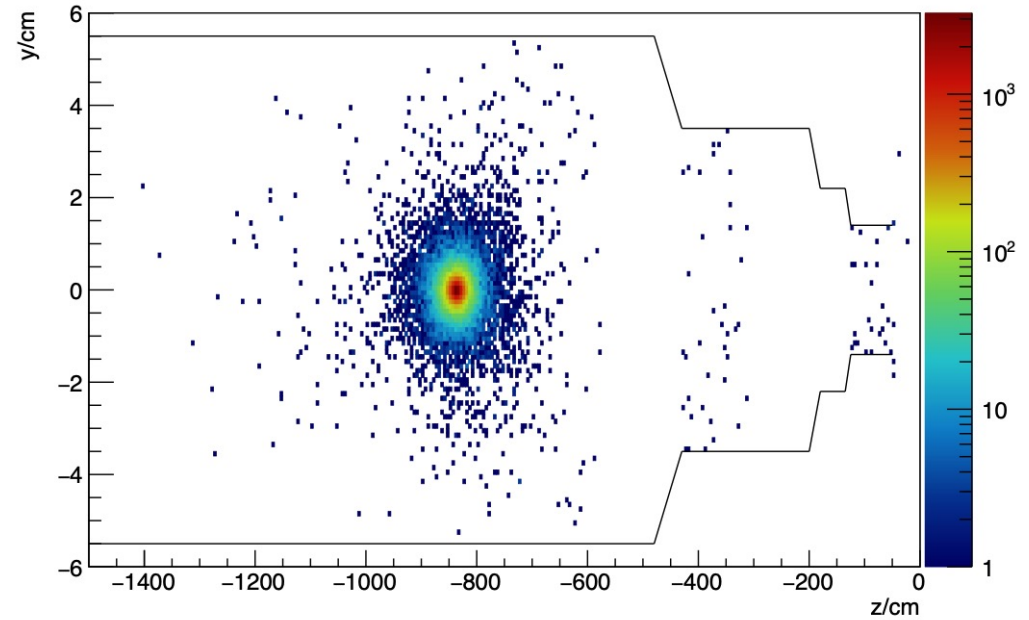
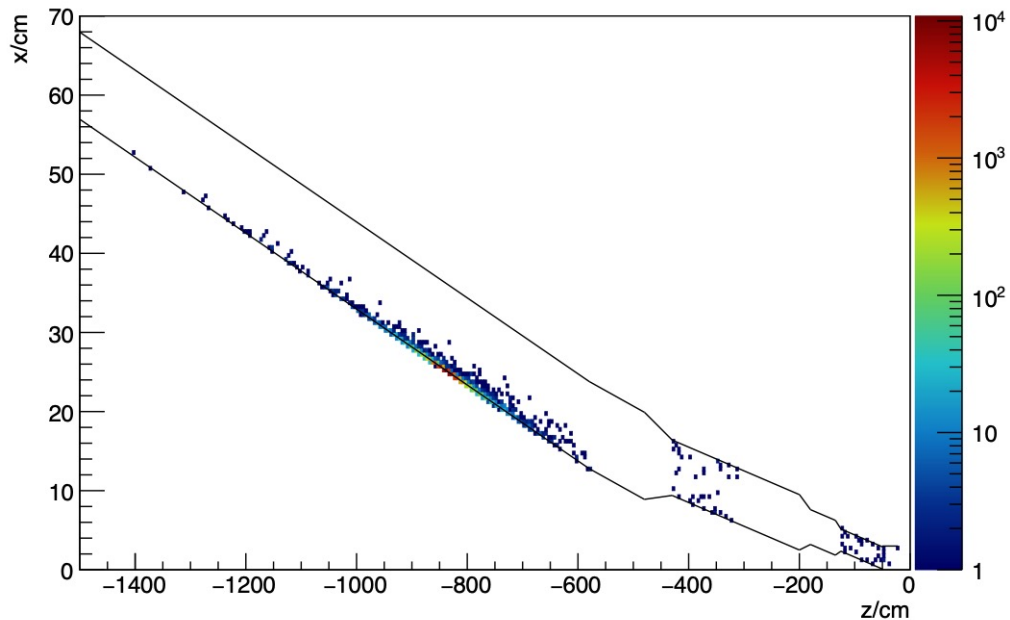
- 沿着正负电子束流管 ($\pm 30\text{mrad}$) 方向从IP点出射正负电子
- 如图红线为电子径迹, 蓝线为正电子径迹, 绿线为光子径迹。
- 其中, 光子为正负电子在探测器磁场和FB处同步辐射产生的。
- 束流正负电子均在束流管内运动, 表明束流管及磁场设置无误, 符合预期



光子的位置分布



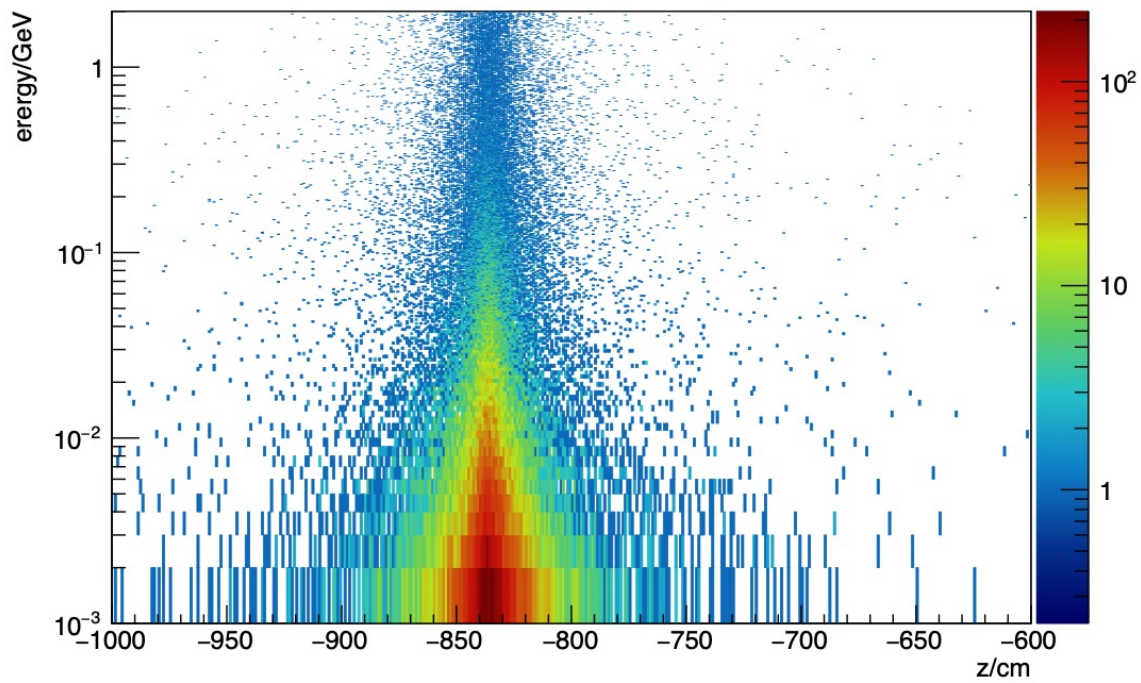
- ❑ 下图为辐射Bhabha光子在 zox 、 zoy 平面的空间分布；
- ❑ 与产生子给出的角度分布及理论预期相符合。
- ❑ 在当前的束流管设计下，理想的收集位置是 z 方向800-900cm处束流管内侧。



光子的能量分布



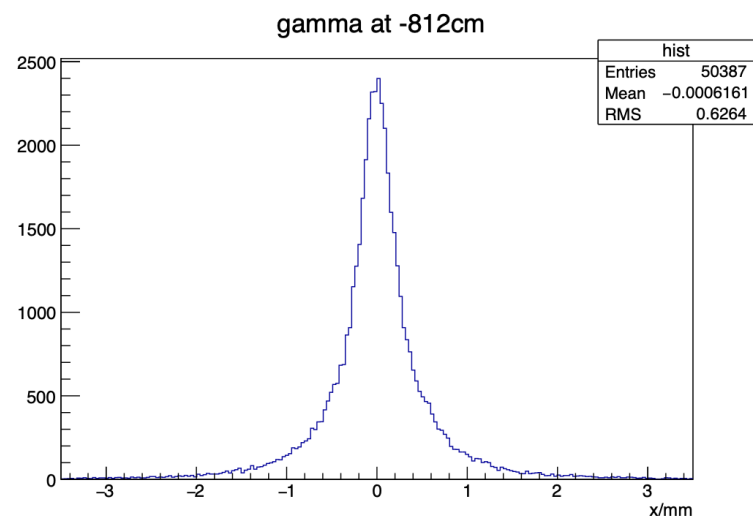
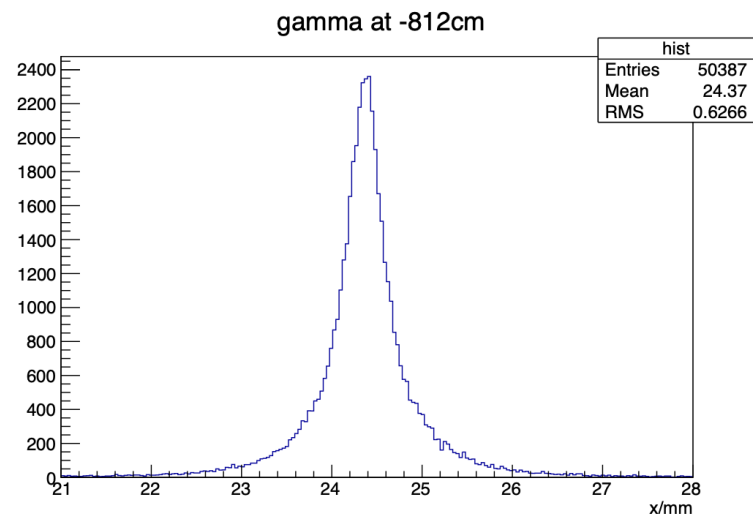
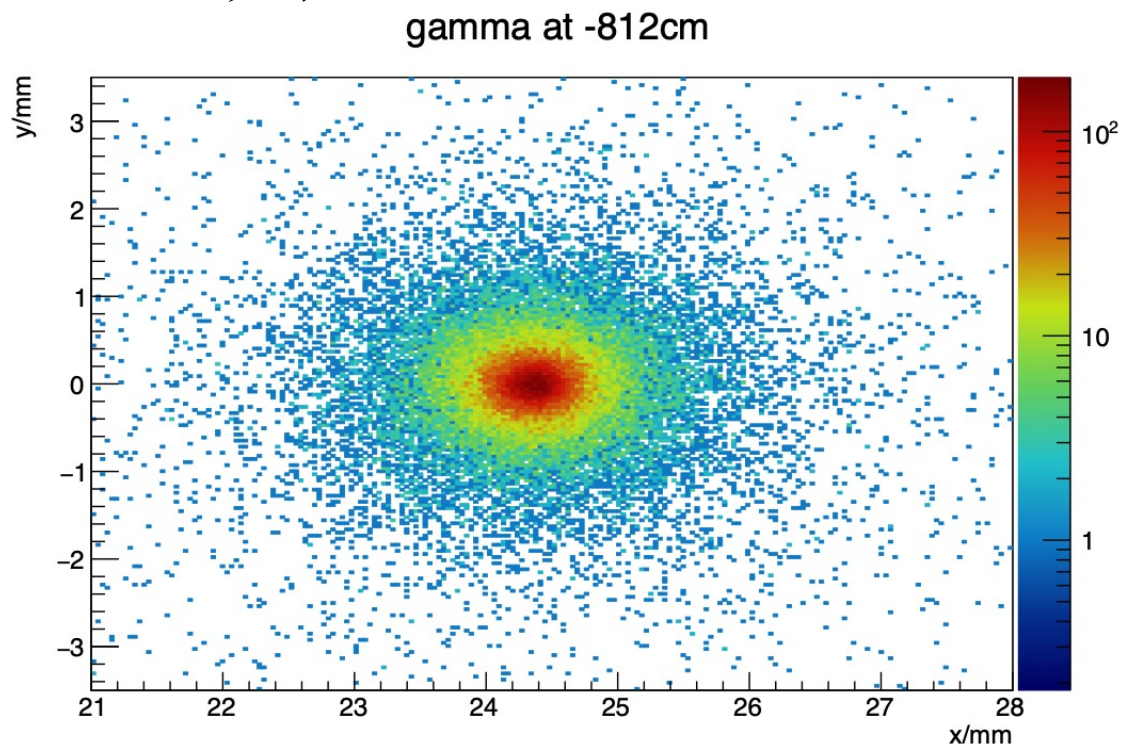
- 下图为光子的能量-位置分布
- 与产生子给出的能量分布及角度分布相符合。
 1. 辐射光子沿着入射粒子束流方向成柱对称，且集中在小角度（ $\sim m_e/E_{beam} = 1/\gamma$ ）范围内。
 2. 大部分辐射光子能量较低（能谱分布近似为 $1/k$ ）。



2GeV质心能量下光子束斑



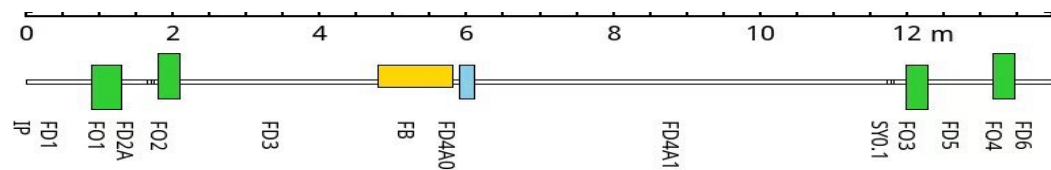
- 根据能量-位置分布，初步设计在800-900cm处收集光子
- 绘制出光子在 $z=-812\text{cm}$ 处的位置分布，根据束斑的大小，确定收集的面积
- 如右图，仅需几个 mm^2 的面积即可收集大部分辐射 Bhabha光子



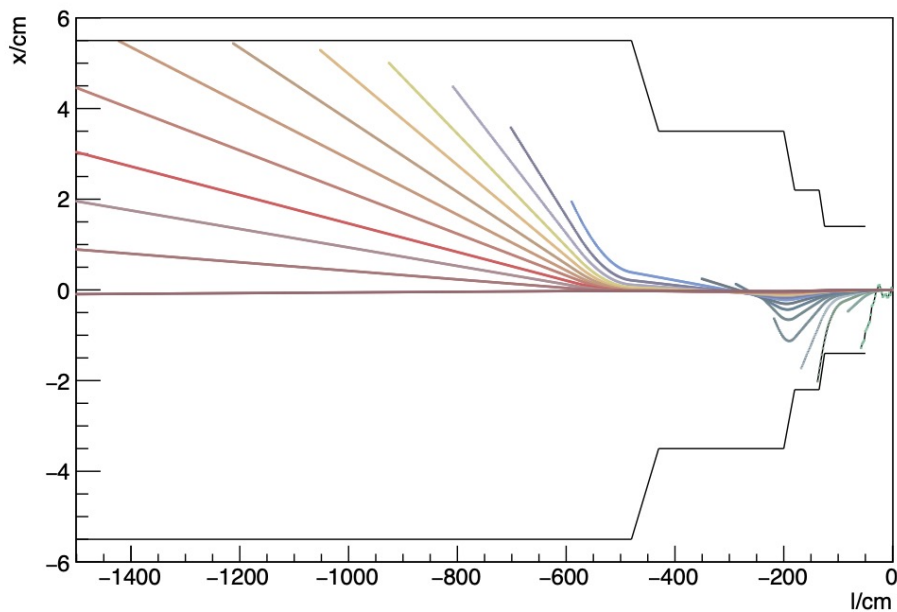
电子的径迹的模拟验证



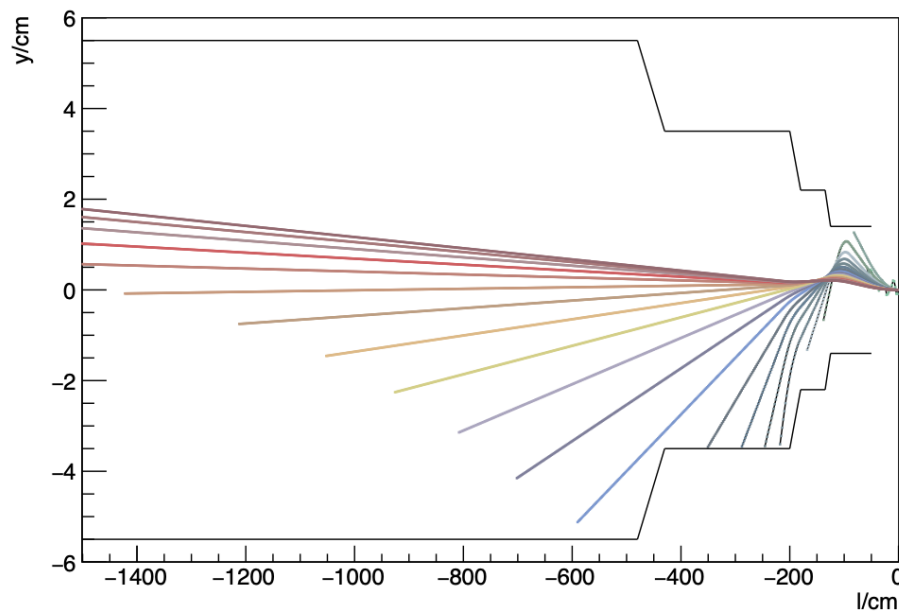
- ❑ 为了直观的分析出射电子的能量损失对其后续运动的影响，控制方向相同，沿着束流管方向，出射能量0.1-2.0GeV电子，间隔为0.1GeV，绘制出电子径迹。
- ❑ 下图为0.1-2.0GeV的电子径迹，FB位于4.8-5.8m处。对出射角度 $<5\text{degree}$ 的电子而言，能量大于1.6GeV的电子无法在15m内的束流管收集到。0.9-1.5GeV的电子经过二级铁偏转后击中束流管。



electron track(0.1GeV - 2.0GeV)



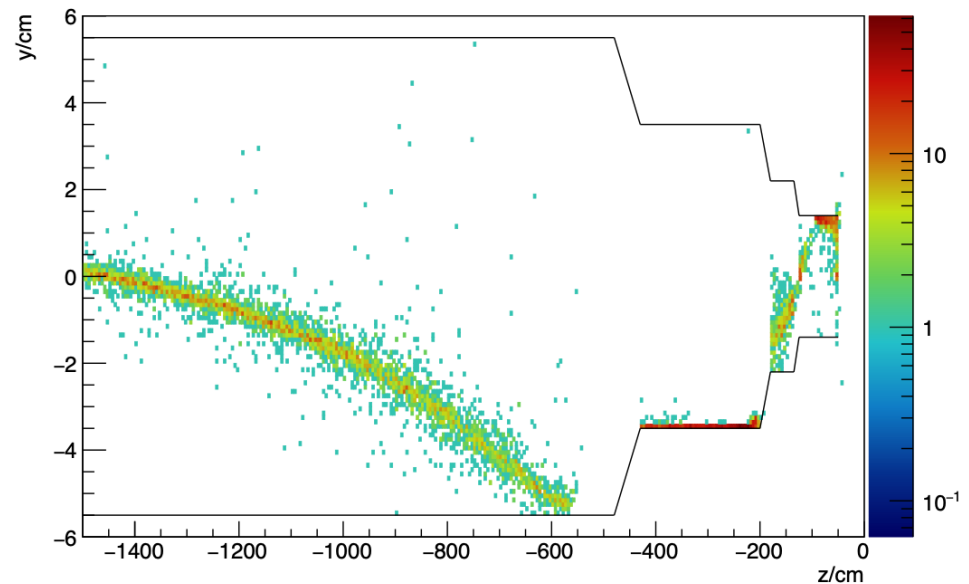
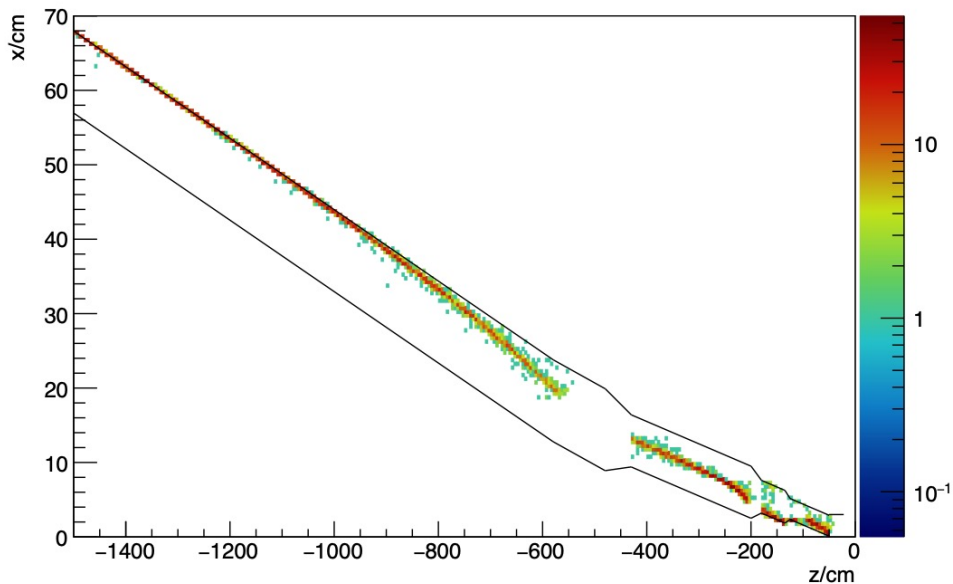
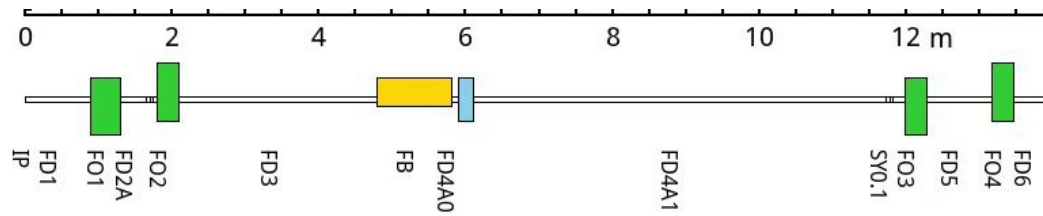
electron track(0.1GeV - 2.0GeV)



电子的位置分布

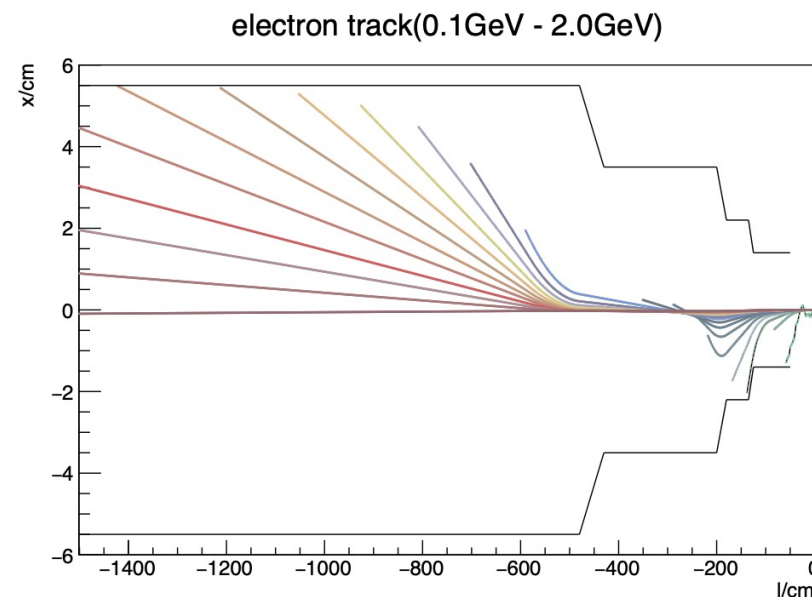
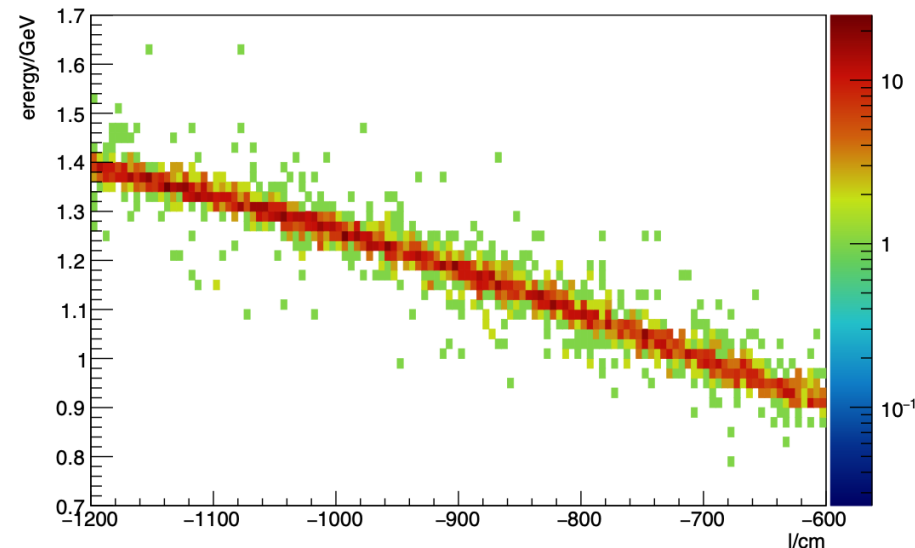
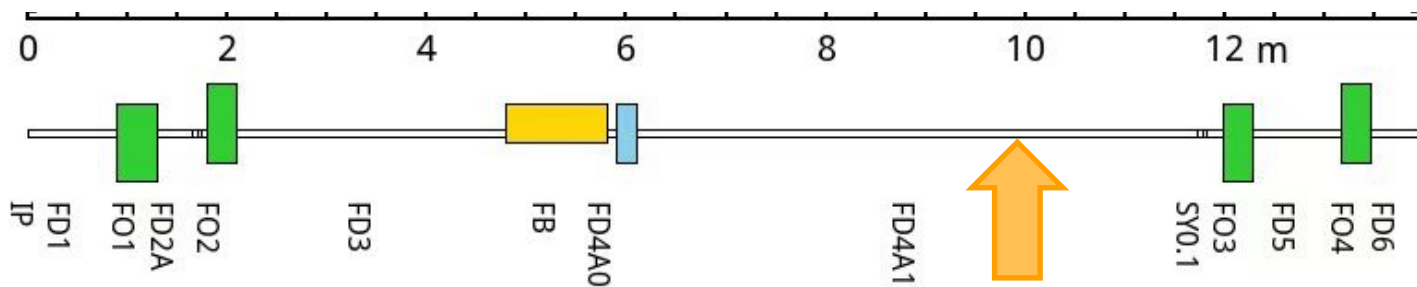


- ❑ 总事例数设置为10W，收集击中在outer_pipe(0.5m外的束流管)的正负电子与光子，记录其相关信息。
- ❑ 电子在zox、zoy平面的空间分布如下。丢失在15m内的电子总数目<7000。



亮度监测信号：电子信号收集

- ❑ 正负电子的丢失位置分布与能量存在强关联性，远端丢失的电子能量更高
- ❑ 初步选择在10-11m的范围内收集正负电子
 1. 能量较高的正负电子有利于探测器收集
 2. 12m处存在四级铁FQ3，应尽量避免四级铁的影响
- ❑ 4GeV质心能量下，信号事例的能量在1.2-1.4GeV之间
- ❑ 对比收集光子，收集正负电子的优势在于能量较大且纯度更高。但缺点是事例数较少。



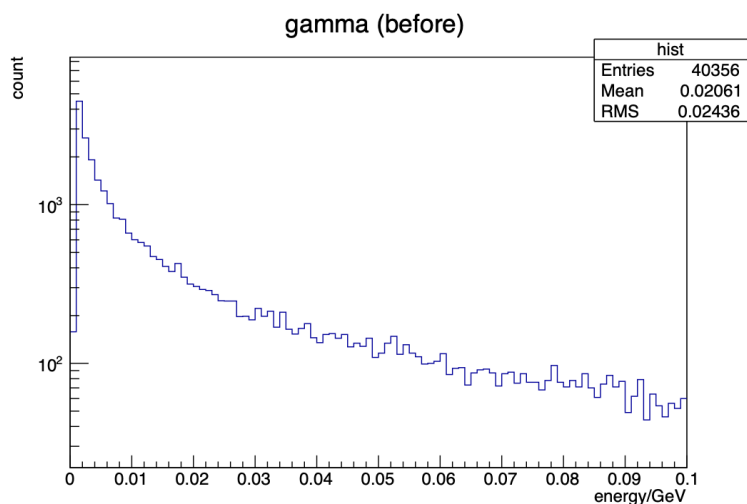


图1

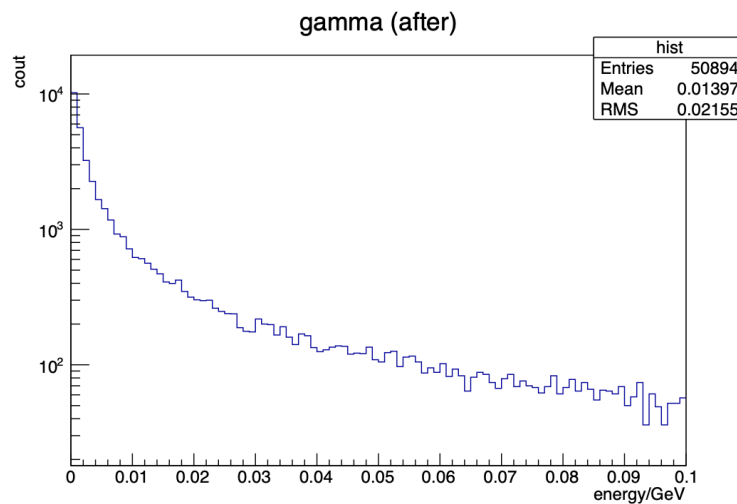


图2

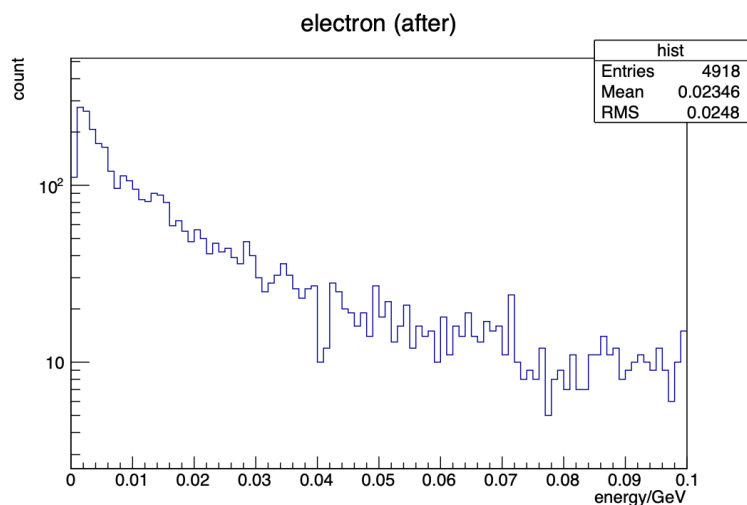


图3

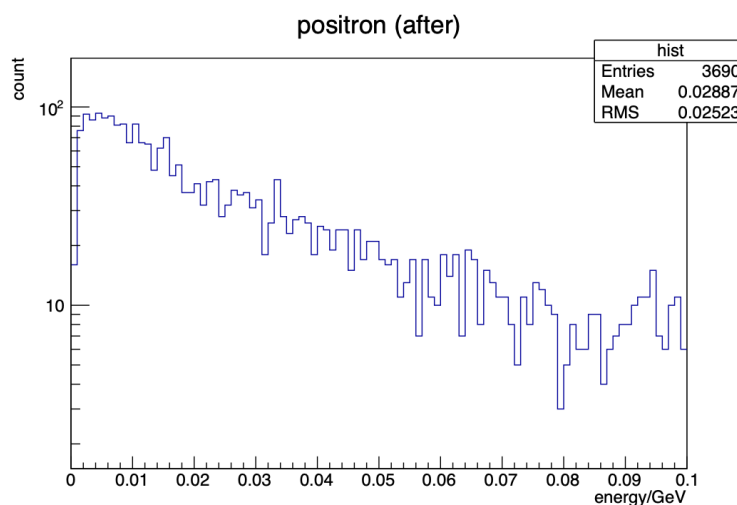
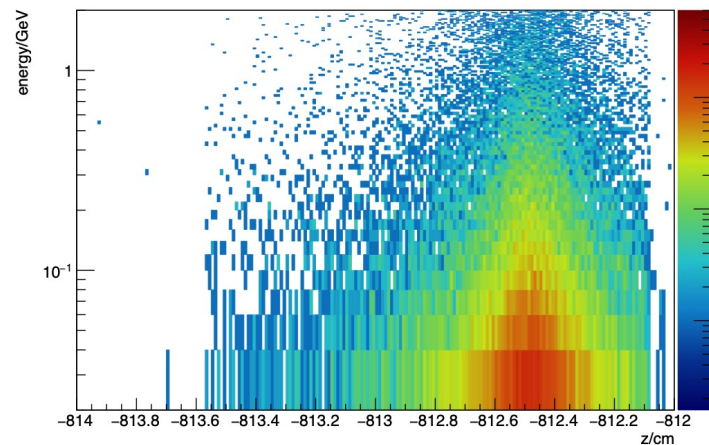


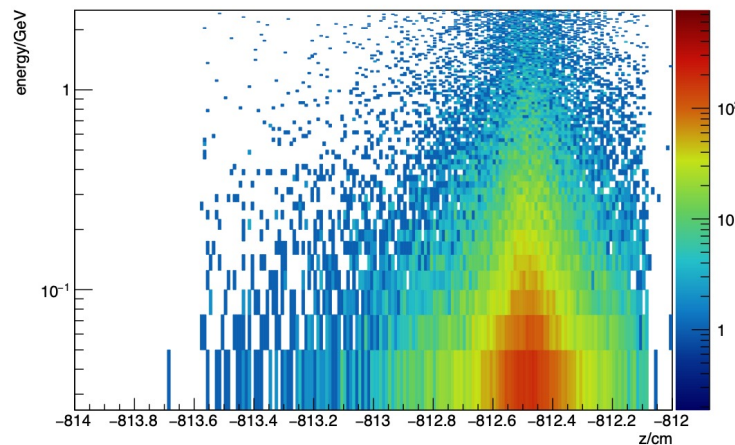
图4

- ❑ 图1、2分别为穿过束流管前后的光子能谱，图3、4分别为经过束流管产生的正负电子的能谱。
- ❑ 光子的数量及平均能量无显著变化
- ❑ 有少量事例发生电子对效应

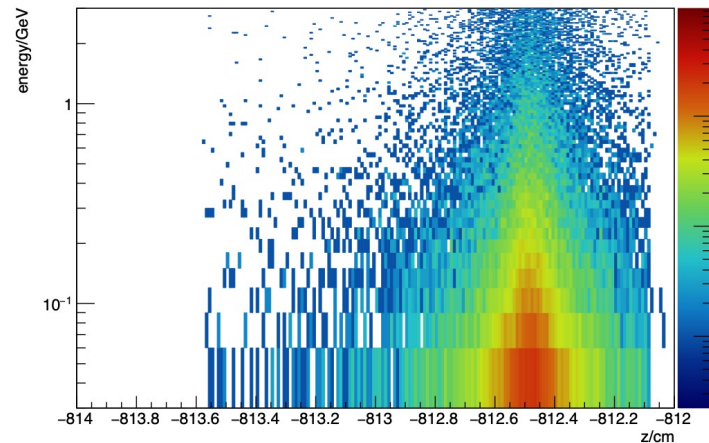
不同质心能量下光子分布



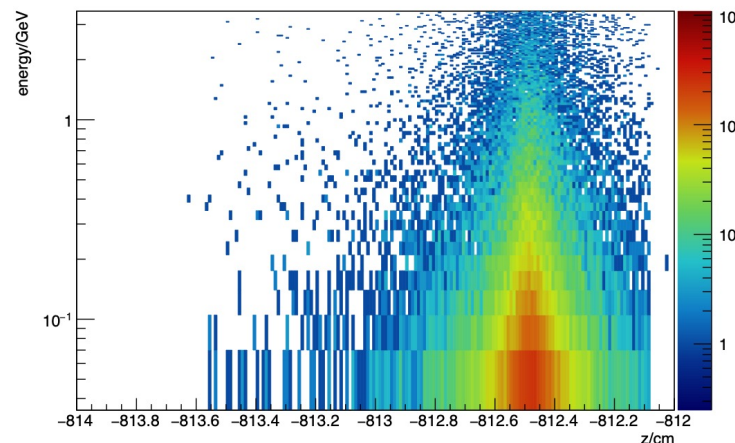
4GeV



5GeV



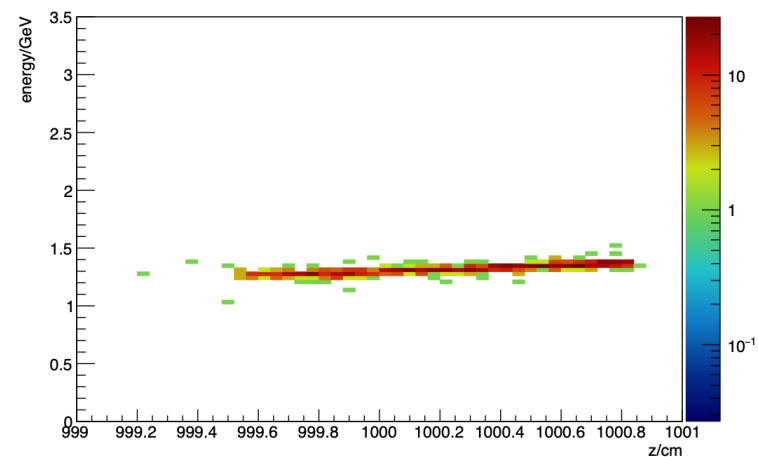
6GeV



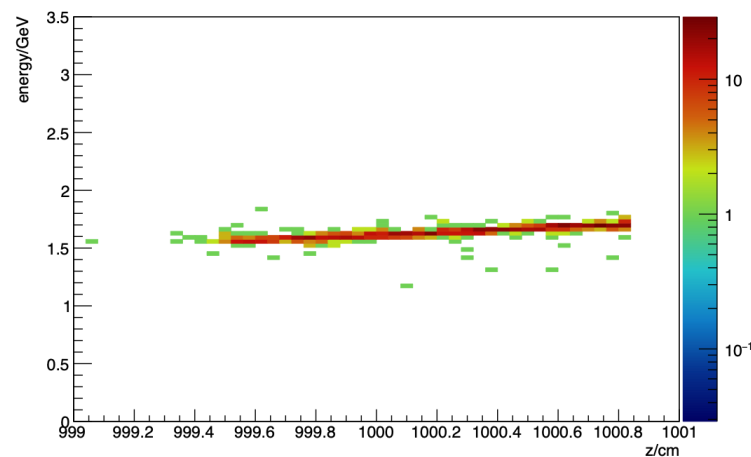
7GeV

- 模拟不同质心能量下，光子在束流管（铜窗）上的位置-能量分布
- 由于光子不受磁场影响，辐射光子在铜窗上的最似然位置相同，随着质心能量增加，光子分布更加紧致。
- 光子在铜窗的接收率分别为
4GeV: 92.3% 5GeV: 94.7%
6GeV: 96.3% 7GeV: 97.1%
- 在 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 亮度下，铜窗处收集到的总事例率 $\sim 8 \times 10^9 \text{ Hz}$

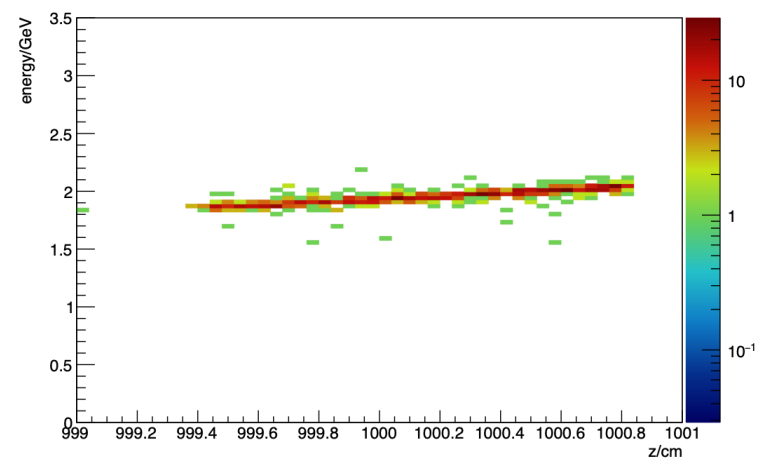
不同质心能量下正电子分布



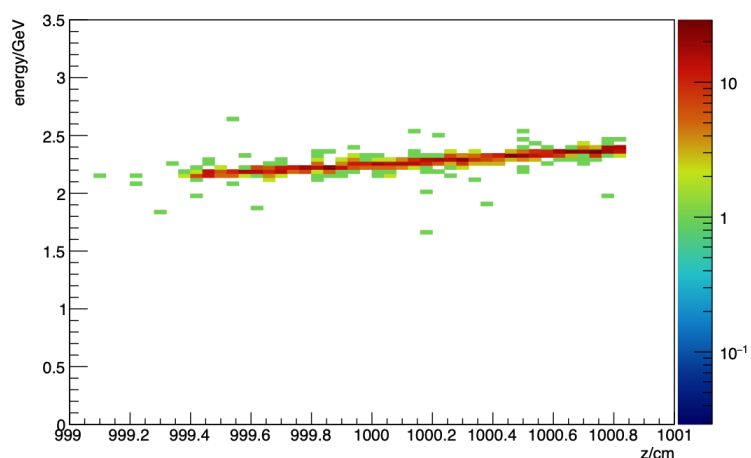
4GeV



5GeV



6GeV



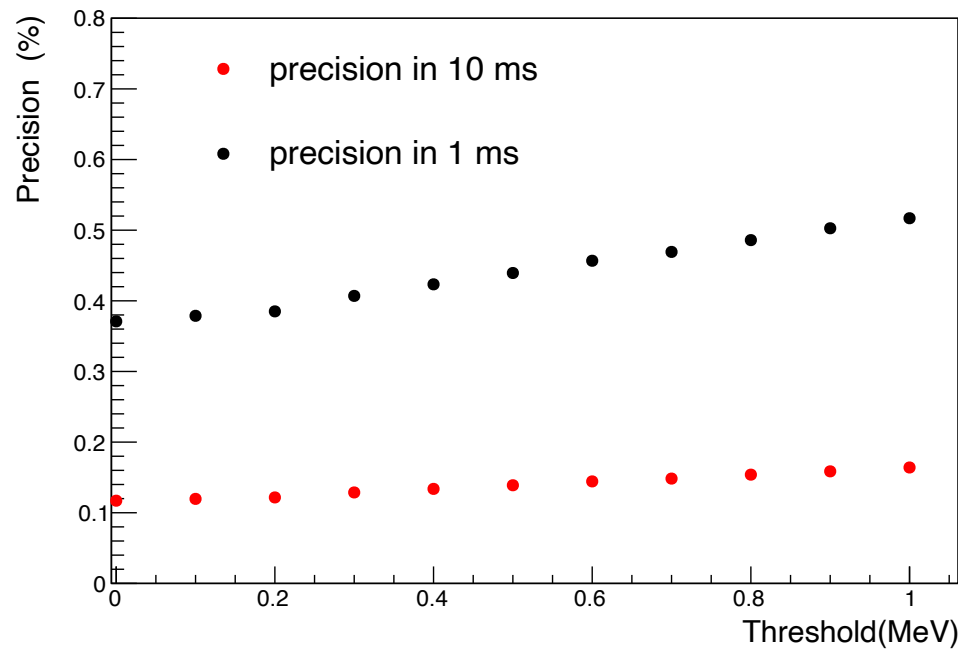
7GeV

- ❑ 模拟不同质心能量下，正电子在束流管（铜窗）上的位置-能量分布
- ❑ 小于10%的Bhabha正电子会在15m内的束流管逃逸。
- ❑ 正电子在铜窗的接受率分别为
4GeV: 1.67% 5GeV: 1.79%
6GeV: 1.80% 7GeV: 1.86%
- ❑ 在 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 亮度下，铜窗处收集到的总事例率 $\sim 10^8 \text{ Hz}$

不同沉积能量阈值下的相对精度



- 在目标亮度 $0.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 下，10ms和1ms时间窗口在不同沉积能量的阈值下的亮度测量精度。
- 阈值影响：随着沉积能量阈值的提高，精度下降。但在1MeV的阈值下，仍能满足我们对测量精度的需求。
- 后续需要根据具体的电子学噪声以及本底事例，确定合适的沉积能量阈值

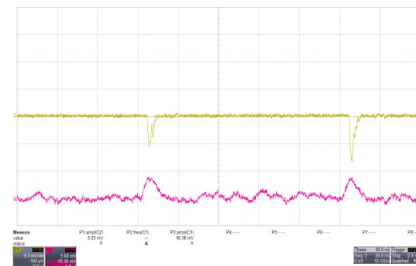
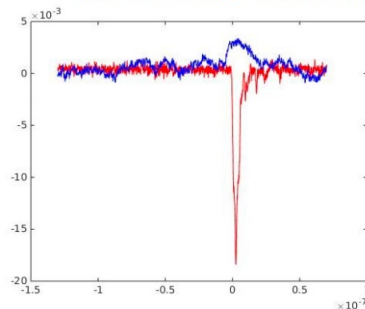


金刚石探测器应用LAL



Type:	Charge amplifier
Input coupling:	AC coupled
Input protection:	IEC61000-4-2 (± 8 kV, 2 A for 1 μ s)
Input polarity:	Negative, unipolar
Output polarity:	Inverting, positive
Linear output voltage:	+1 V
Output impedance:	50 Ω
Impulse response:	
Pulse shape:	Gaussian
Rise time:	3.5 ns
Pulse width at FWHM:	10 ns
Performance (4.3 pF load):	
ENC noise:	1000 electrons
Gain:	4 mV/fC
SNR:	6/fC

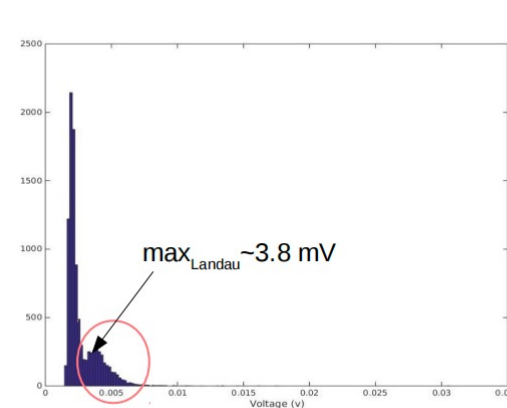
- High voltage applied : $V = -100$ Volts
- In a diamond, 1 MIP creates 36 e/h pairs per μ m
- For 140 μ m diamond , the charge produced per 1 MIP is :
Q~0.8 fC
- Gain of charge amplifier is $G = 4$ mV/fC \implies 1 MIP = 3.2 mV



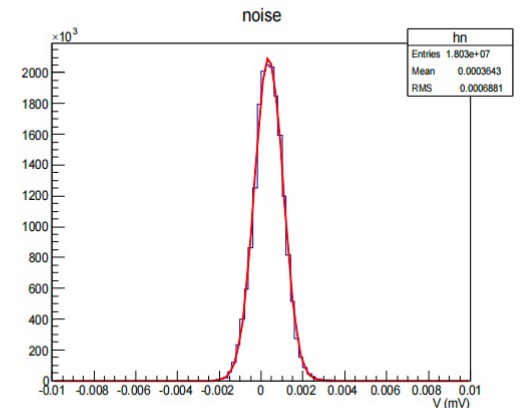
Screen shot from the oscilloscope: signal from scintillator , signal from diamond

Blue signal (diamond) , Red signal (scintillator)

Preliminary Data Analysis



Histogram of maximum of signals in the diamond



Gaussian fit of the noise from the amplifier

- 1 MIP creates a 5040 e/h pairs ~ 3.2 mV
- Noise from the amplifier is 1000 electrons = 0.16 fC= 0.64 mV
- For a 140 μ m diamond, noise is not well separated from the signal ..
- For a 500 μ m diamond, 1 MIP creates an 18000 e/h pairs ~11.5 mV , thus signal and noise are well separated ...

金刚石探测器应用ATLAS

