

STCF 束流能量测量模拟

陈海，鲍晨涛

2025/09/20，STCF物理模拟和探测器联合研讨会

束流能量精度的重要性

正负电子束流能量的精确测量，对于**粒子质量和宽度的精确测量**以及**散射截面的精确测量**具有至关重要的作用；特别的，在STCF实验陶粲能区下的物理目标中体现在多个方面，例如：

□ τ 质量是标准模型中最基本的参数之一，相较于 e 和 μ 的质量精度 ($\delta m/m = 10^{-8}$)，其实验精度目前只达到了 10^{-4} 量级。

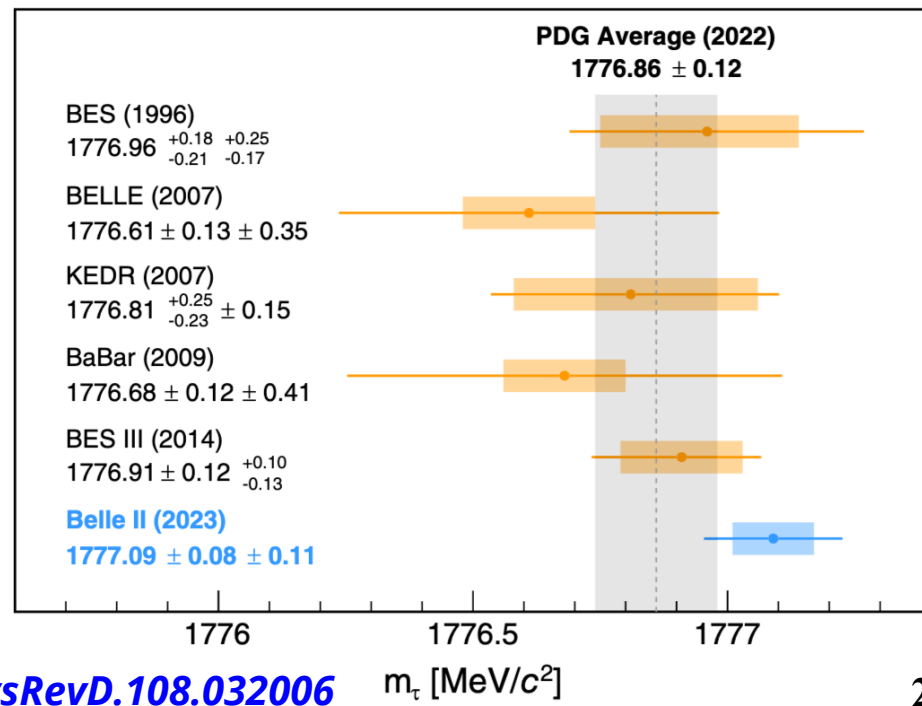
□ 束流能量的不确定性是 BESIII 和 Belle II 实验对于 τ 质量测量的主要系统误差来源。

□ τ 质量的精度直接反映在 (μ/τ) 轻子普适性的检验（反比于 $(m_\mu/m_\tau)^5$ ，并且影响对 τ 中微子质量的限制：

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{\tau_\mu}{\tau_\tau} \left(\frac{m_\mu}{m_\tau}\right)^5 \frac{B(\tau \rightarrow e\nu\nu)}{B(\mu \rightarrow e\nu\nu)} (1 + \delta_W)(1 + \delta_\gamma).$$

TABLE II. Summary of systematic uncertainties in the τ -mass measurement.

Source	Uncertainty (MeV/ c^2)
Knowledge of the colliding beams:	
Beam-energy correction	0.07
Boost vector	< 0.01
Reconstruction of charged particles:	
Charged-particle momentum correction	0.06
Detector misalignment	0.03
Total	0.11



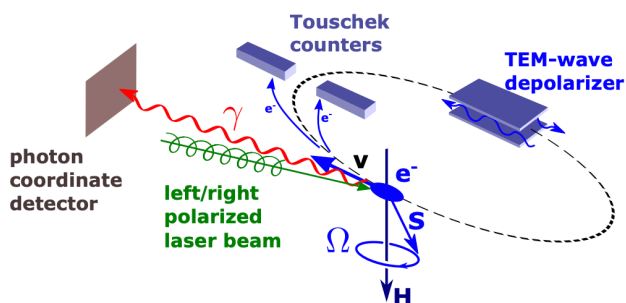
常见的束流能量测量方法

Resonant Depolarization

在加速器中实现高度极化的正负电子束流是共振去极化的前提。

能量精度: $10^{-5} \sim 10^{-6}$

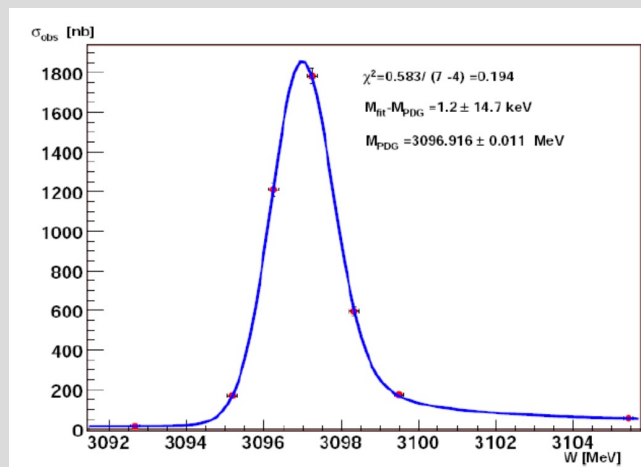
- VEPP-4M
- SOLEIL
- Diamond



Energy Scale Calibration of the J/ ψ and ψ' Resonances

依赖谱仪的重建精度，可以作为后续的物理分析检验，无法独立实时给出束流能量的测量。

能量精度: $10^{-4} \sim 10^{-5}$

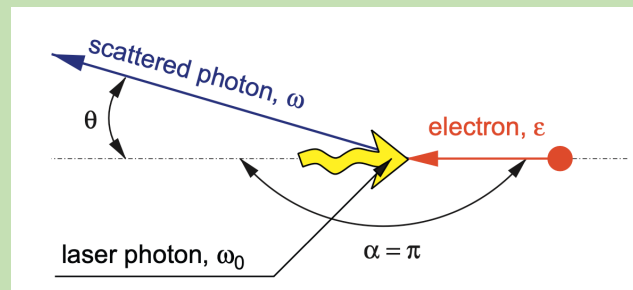


Compton Back-Scattering

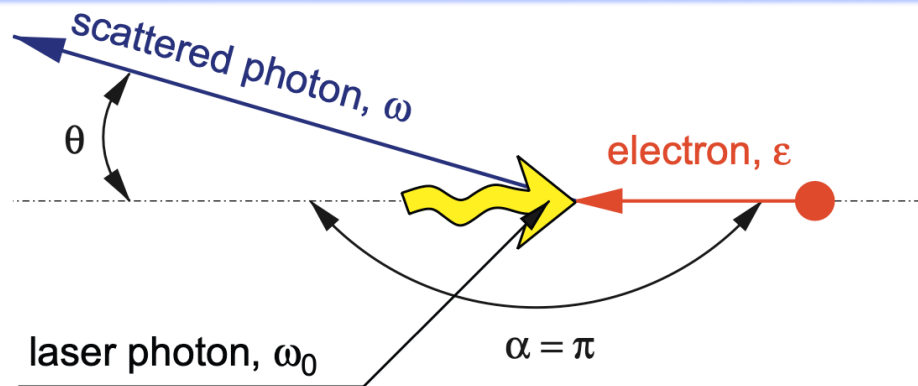
利用激光与正负电子束流间的逆康普顿散射，散射光子的能量和角分布测量束流能量

能量精度: $10^{-4} \sim 10^{-5}$

- VEPP-4M
- BESIII
- SPring-8



逆康普顿散射过程



- 正向对撞情况下，逆康普顿散射光子的最高能量为：

$$\omega_{max} = \frac{\epsilon^2}{\epsilon + m_e^2/4\omega_0}$$

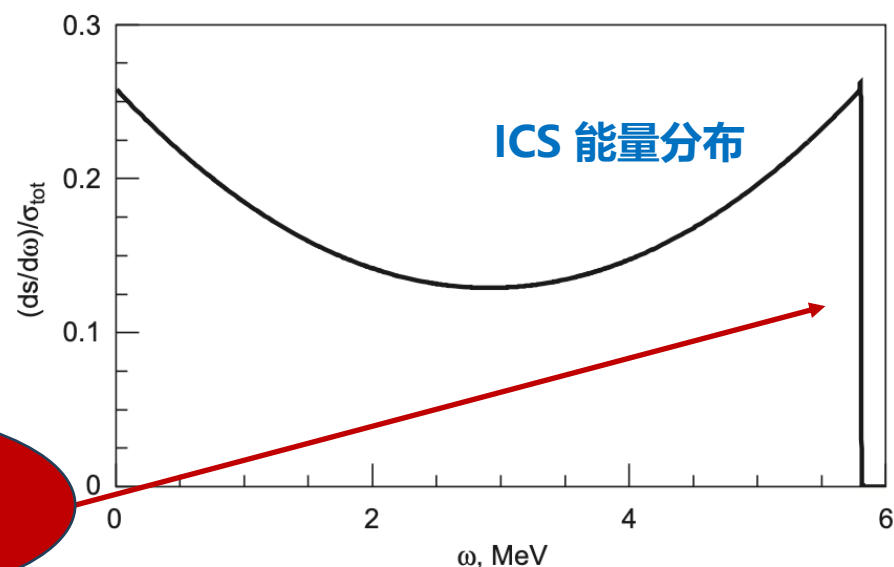
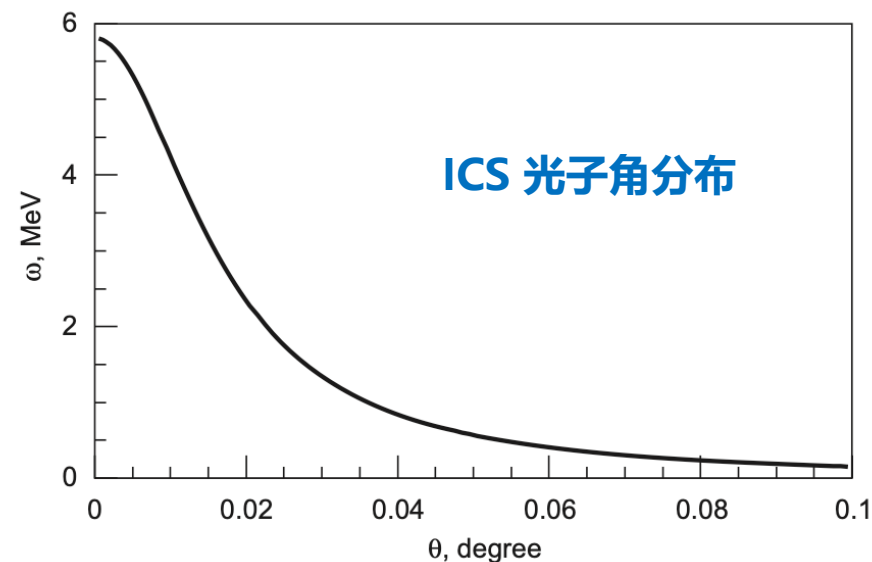
- 根据测得的 ω_{max} ，可以推断得到束流能量为：

$$\epsilon = \frac{\omega_{max}}{2} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{m_e^2}{\omega_0 \omega_{max}}} \right]$$

- 束流能量误差

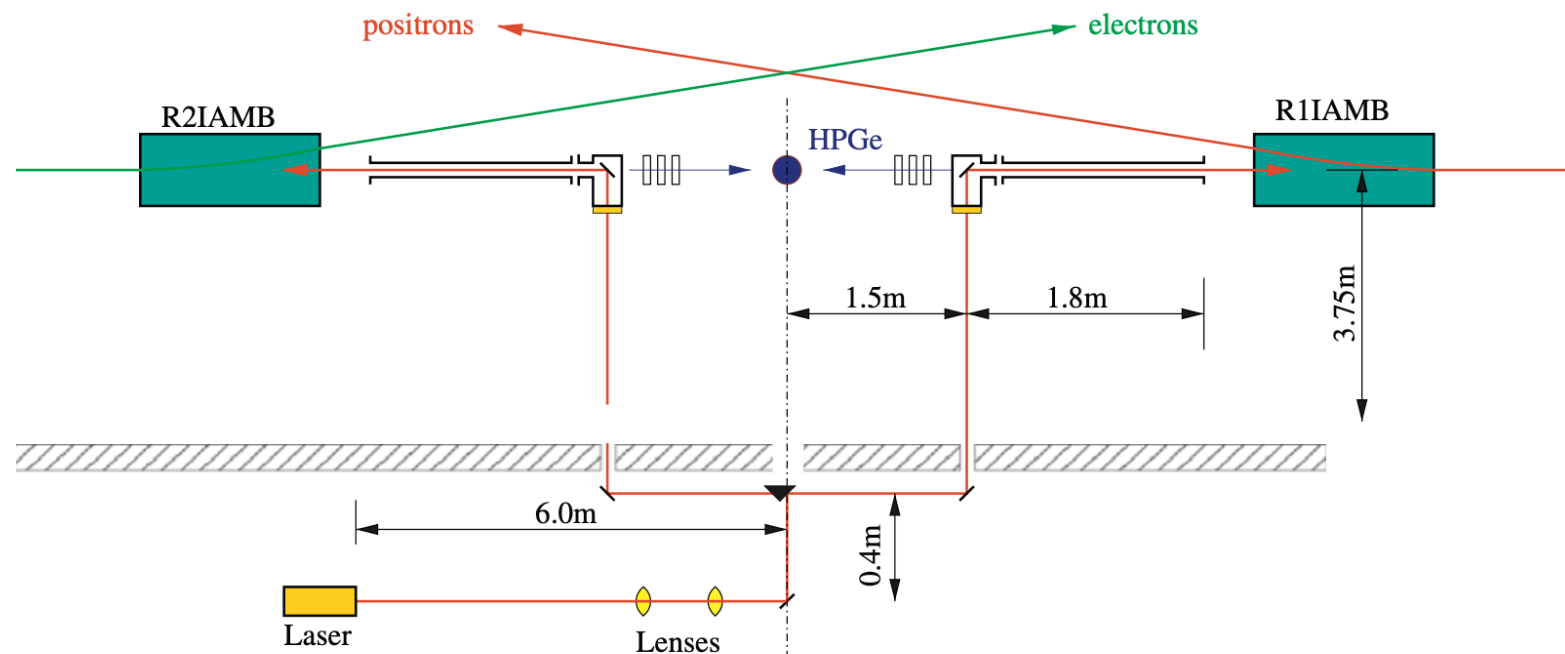
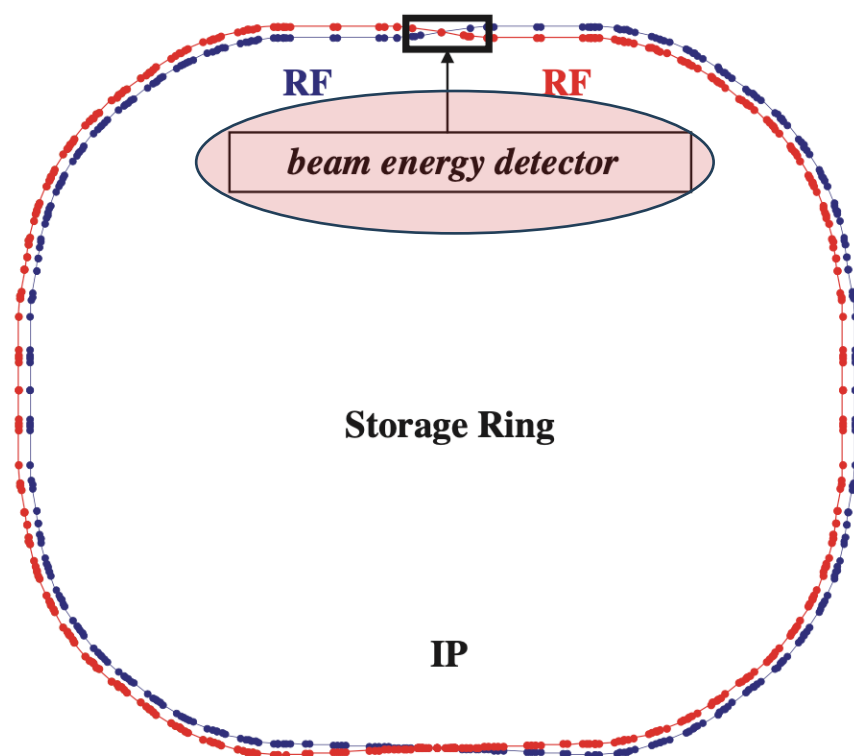
$$\sqrt{\left(\frac{1}{2} \frac{\Delta \omega_{max}}{\omega_{max}} \right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2}$$

光子能量下降沿
测量精度



BESIII 束流能量测量系统 (BEMS)

- BESIII实验的束流能量测量系统 (BEMS) 位于束流环的北侧交叉点
- BEMS系统由激光光源、光学系统和高纯锗 (HPGe) 探测器组成
- 在 1 mA 束流电流和 1 W的激光功率下, 逆康普顿散射的光子产额约为 17000 个/秒
- 验收时达到的束流能量精度为 3.5×10^{-5} (正电子) 和 4.29×10^{-5} (电子)

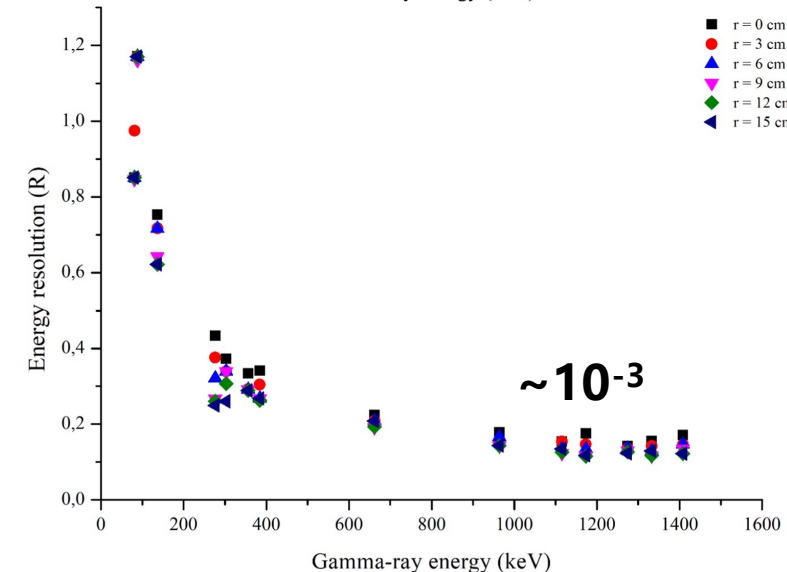
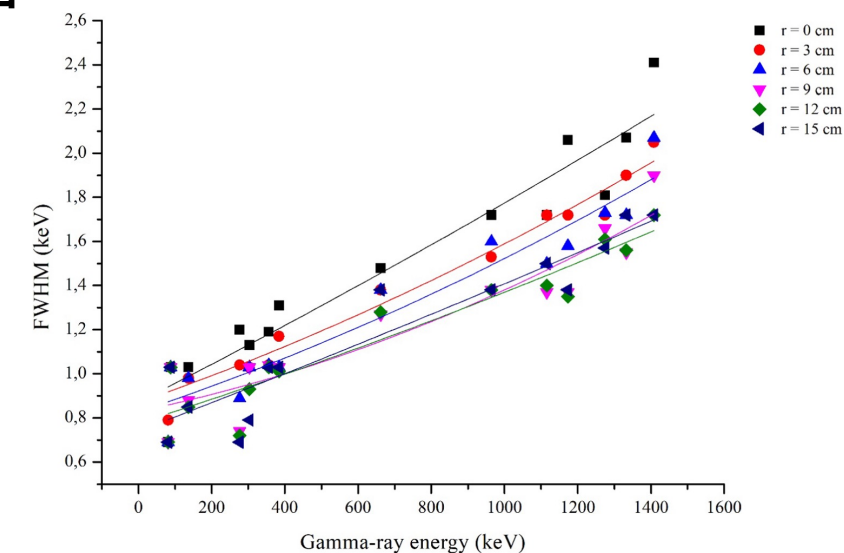
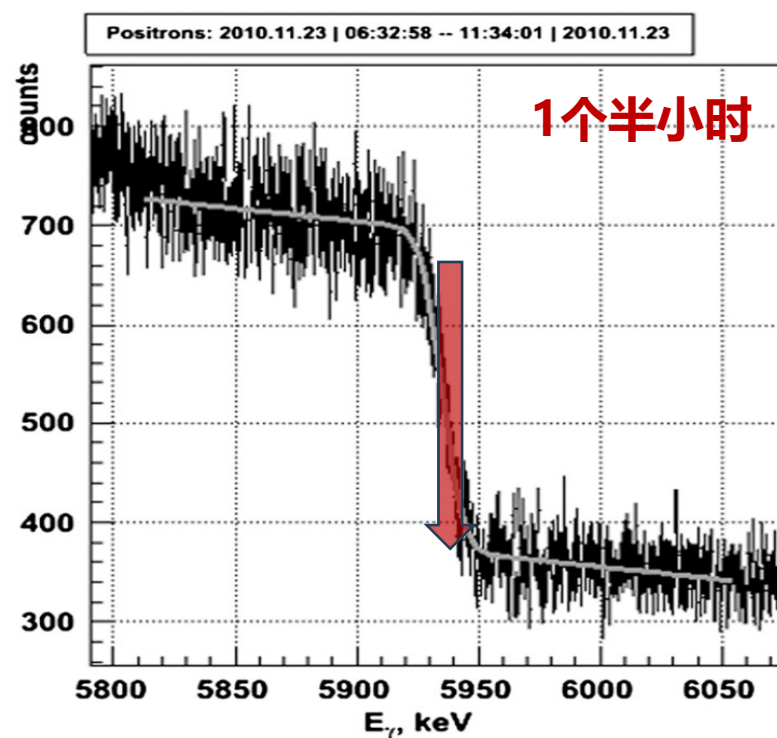


*The beam energy measurement system for the Beijing electron-positron collider
NIM A 659 (2011) 21-29*

高纯锗 (HPGe) 探测器

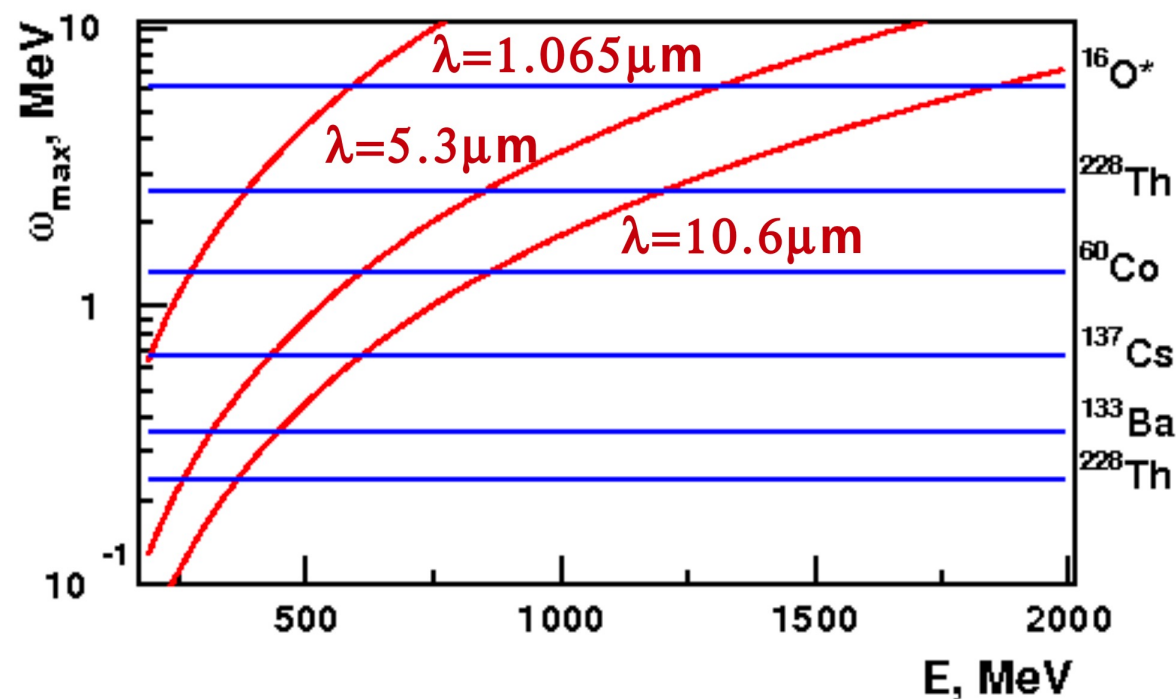
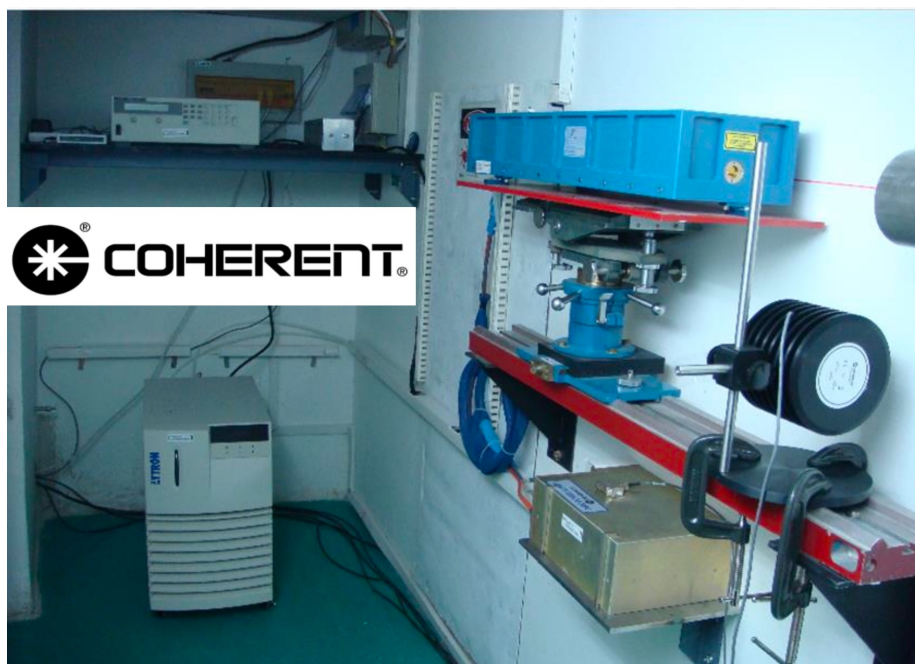
- 随着光子能量的升高, HPGe 探测器的能量测量的展宽会变大, 分辨率达到平台
- 同时探测效率变低, 需要更长时间累积测量

1.74 keV @ 1.33 MeV 60Co line



CO₂激光器

- CO₂激光器的波长为10.6μm，初始能量 ω_0 低，最高截断能量 $\omega_{\max}$ 也相应更低，有利于高精度测量



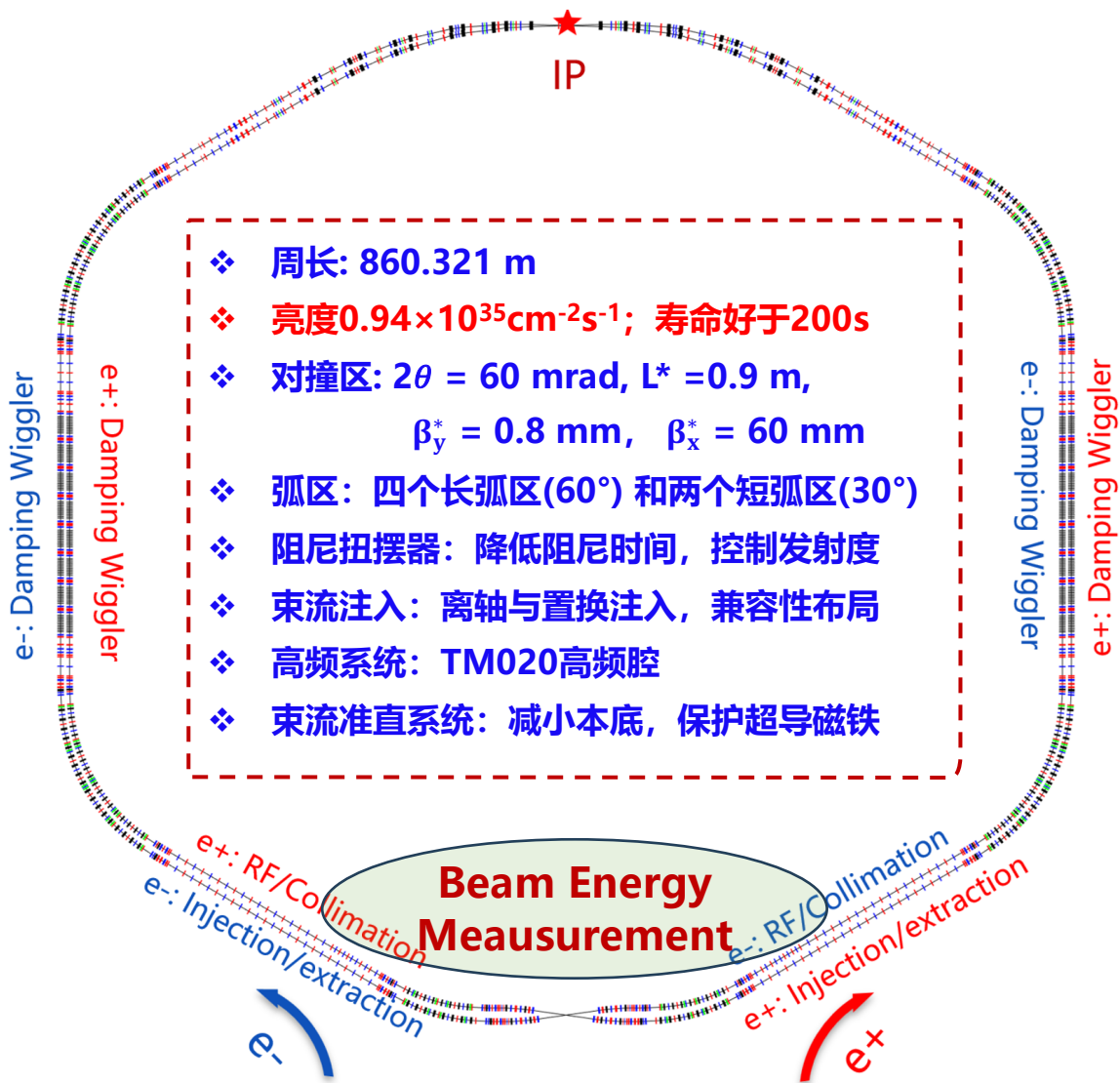
GEM-select50 型二氧化碳激光器

功率：45W，能量：0.12 eV (该型号已经停产)

束流能量 < 1GeV，可以用CO激光器

束流能量 > 2GeV，需要用CO₂激光器

STCF 加速器整体情况



* 罗箐, 2025/07

Parameters	Units	2 GeV
Circumference, C	m	860.321
Crossing angle, 2θ	mrad	60
Hor. /Ver. beta function at IP, β_x^*/β_y^*	mm	60/0.8
Hor./Ver. betatron tune		30.543/34.58
Beam current, I	A	2
Hor. Emittance (SR/DW+IBS)	nm	8.79/4.63
Ver. Emittance (SR/DW+IBS)	pm	87.9/46.3
Ratio, $\varepsilon_y/\varepsilon_x$	%	1
Momentum compaction factor, α_p	10^{-3}	1.35
Energy spread (DW+IBS)	10^{-4}	7.8
Energy loss per turn (SR+DW), U_0	keV	543
SR power per beam (SR+DW), P	MW	1.086
RF voltage	MV	2.5
Synchrotron tune, ν_s		0.0194
δ_{RF}	%	1.68
Bunch length (Nature/0.1Q+IBS)	mm	7.21/8.70
Hor./Ver. beam-beam parameter, ξ_x/ξ_y		0.005/0.095
Luminosity	$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	9.4E+34

束流情况下逆康普顿散射模拟

- 实际正负电子 – 光子的对撞过程需要考虑束团效应和能散等效应对散射光子的影响，无法直接使用理论计算
- 为了模拟STCF束流设计下的对撞情况，我们选用CERN开发的**RF_Track**程序对正负电子束流+激光对撞进行了逆康普顿散射的模拟，可以包括更多束流和激光信息。

What is RF-Track?

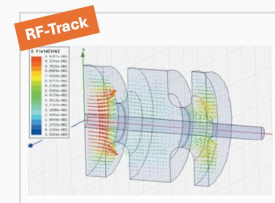
RF-Track Characteristics

- **RF-Track** is a CERN-developed particle tracking code
- Simulates **generation**, **acceleration**, and **transport** of **any** particle species
- Works with both **realistic 3D field maps** and **conventional beamline elements**

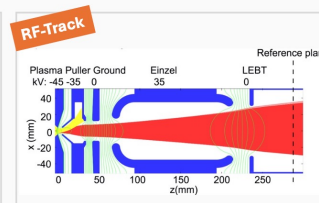
Applications

- **Photoinjectors** and **electron guns**
- **Positron sources**
- High-intensity **electron linacs**
- **RFQs** and high-intensity **proton and ion linacs**
- **Ion-electron cooling**
- **Inverse Compton scattering X-ray sources**
- **Ionisation cooling channel** of the **Muon Collider**

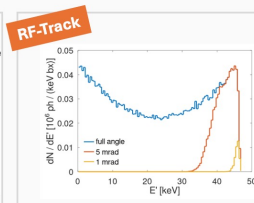
RF-Track Use Cases



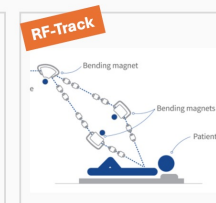
Photoinjectors and electron guns
(space-charge, IBS)



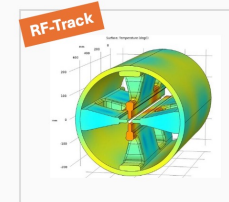
Positron, proton, and ion
sources & linacs



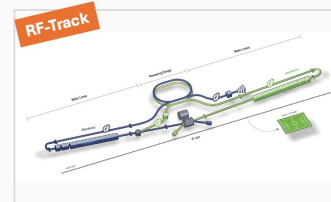
Inverse-Compton Scattering
Compact X-ray sources



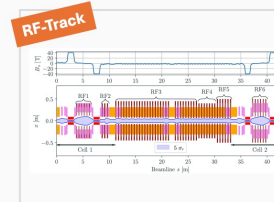
Medical e^- linacs for
Flash therapy



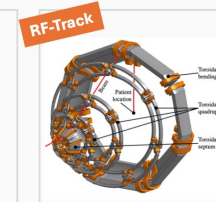
Radio-Frequency
Quadrupoles (RFQ)



Linear Colliders, Free-Electron Lasers
(Wakefields, beam loading, ...)



Muon Cooling
(Particle-matter interaction)

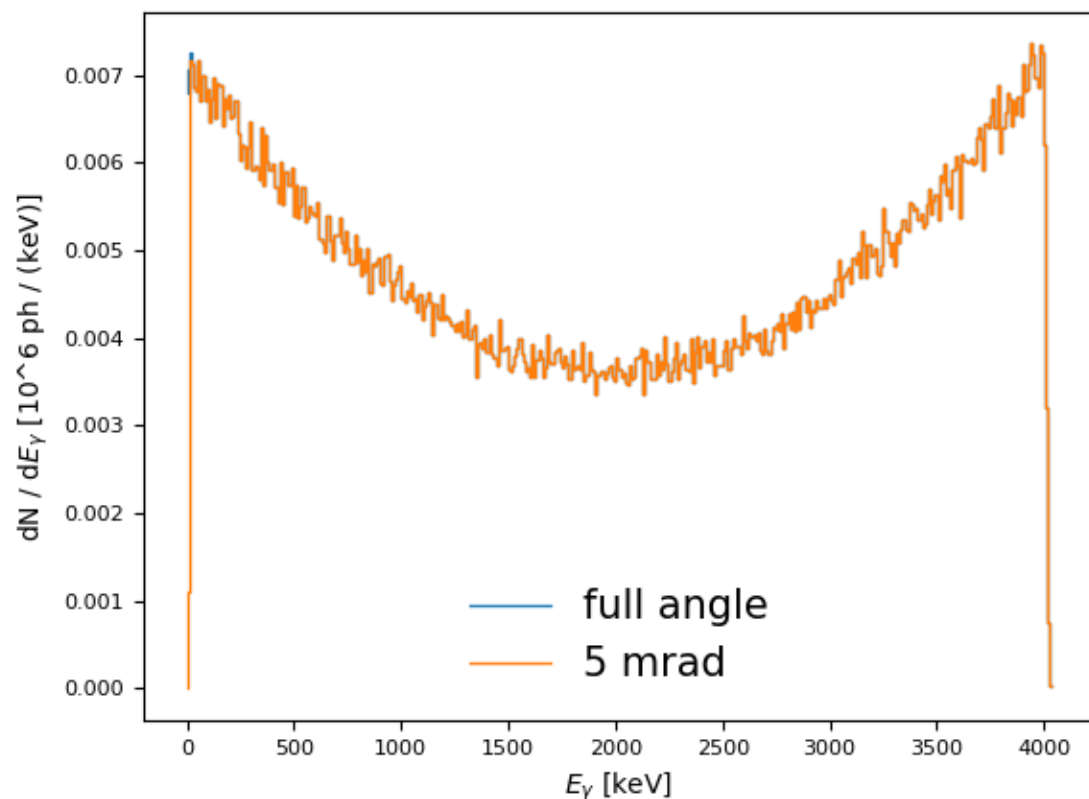


GaToroid
(Optics in complex fields)

RF_Track 模拟

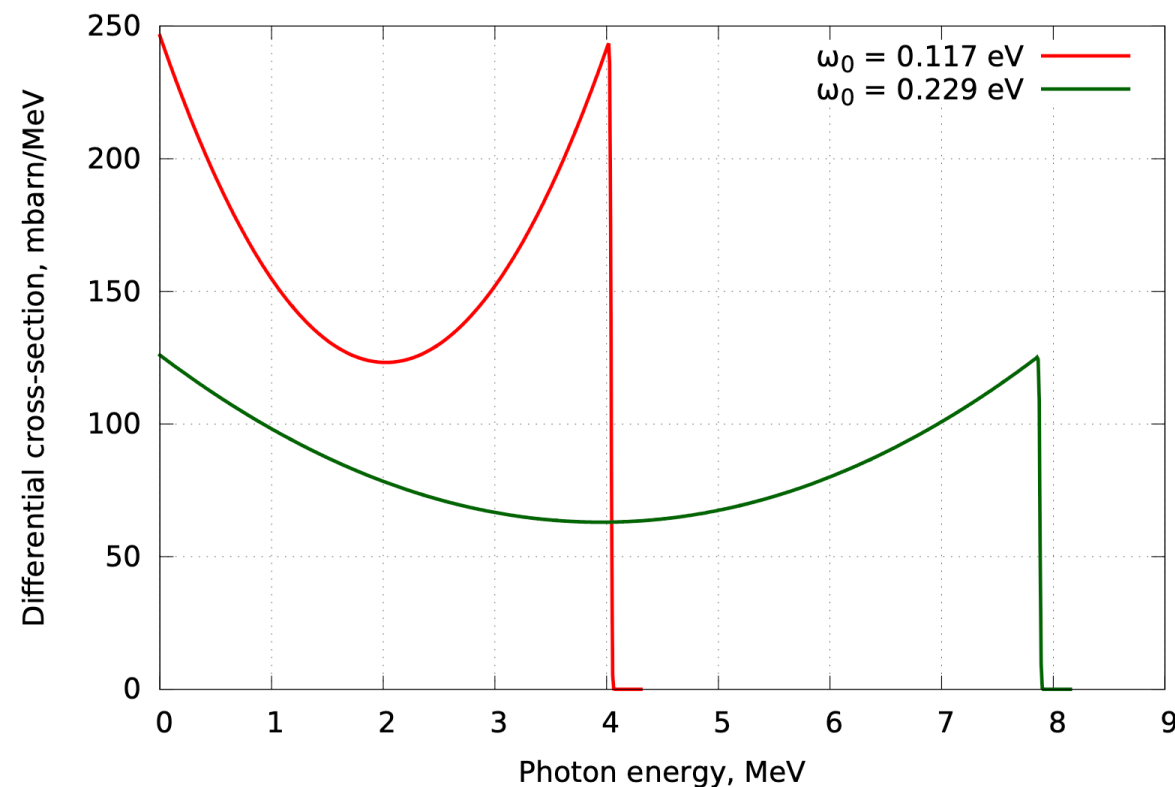
正负电子束流设置

- 能量 $E=1.5$ GeV, 能散 = 0.1 %
- $\beta_x^* = 60$ mm



激光光源设置

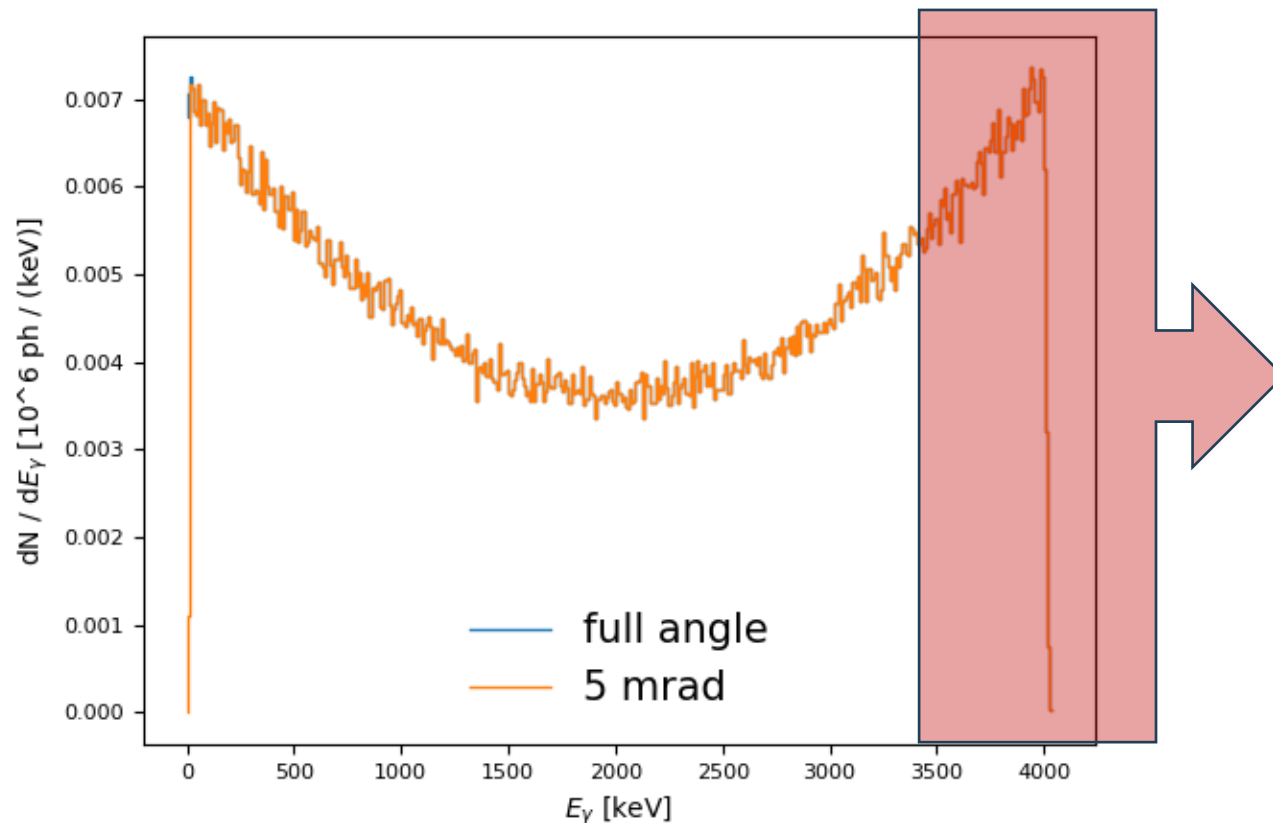
- 光子能量 $E_\gamma=0.117$ eV ($\lambda=10.6$ μm) CO₂激光器
- 脉冲能量 $E_{\text{laser}}= 28$ mJ, 光斑尺寸 $r=0.035$ mm



RF_Track 模拟

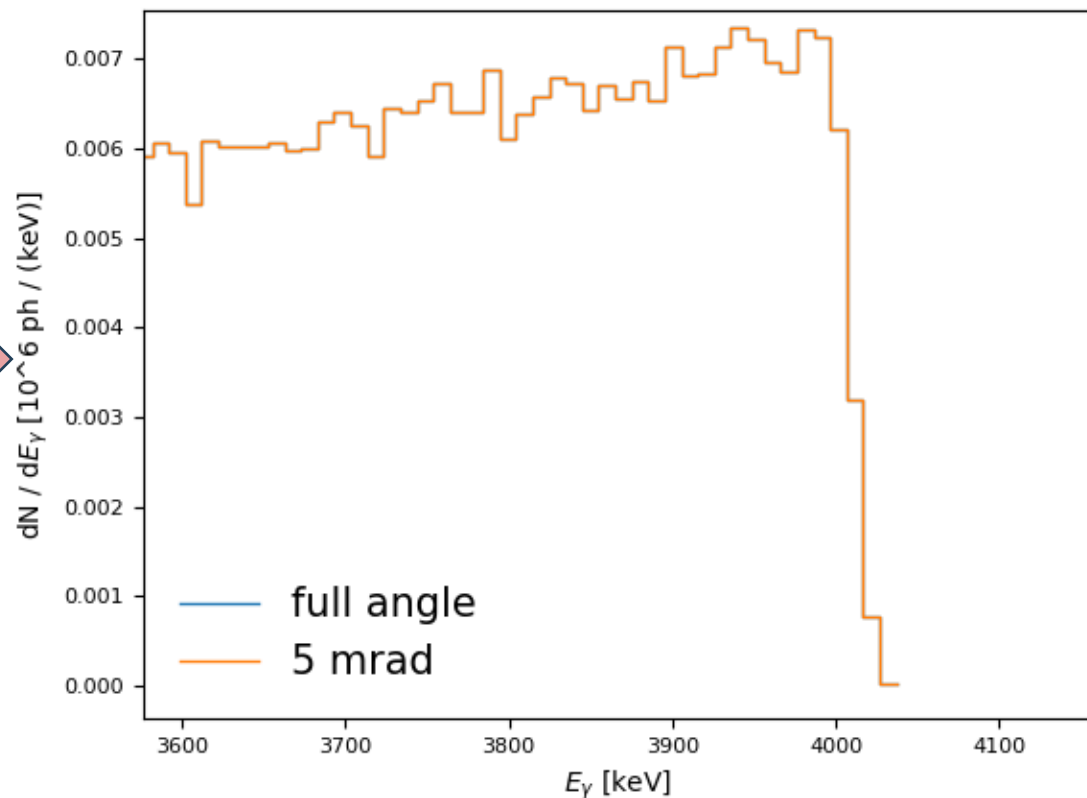
正负电子束流设置

- 能量 $E=1.5\text{ GeV}$, 能散 = 0.1 %
- $\beta_x^* = 60\text{ mm}$



激光光源设置

- 光子能量 $E_\gamma=0.117\text{ eV}$ ($\lambda=10.6\text{ }\mu\text{m}$) CO₂激光器
- 脉冲能量 $E_{\text{laser}}=28\text{ mJ}$, 光斑尺寸 $r=0.035\text{ mm}$

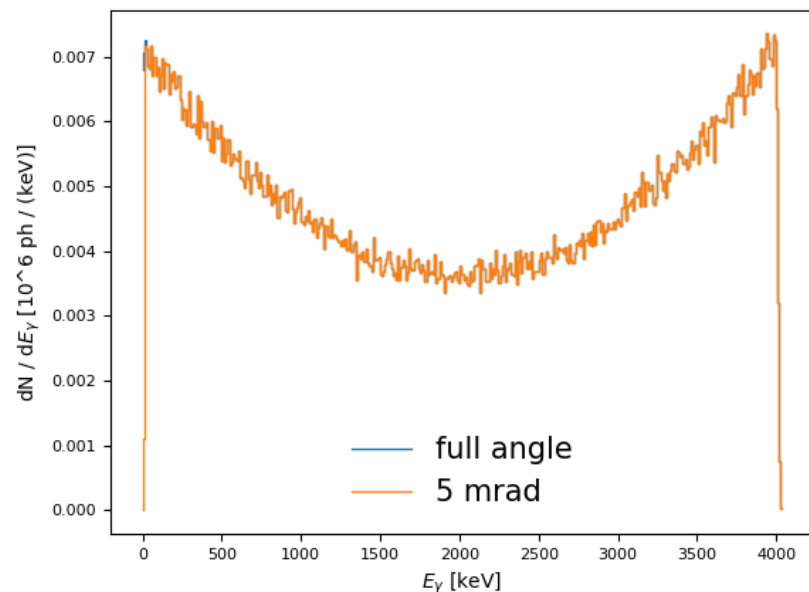


不同束流能量下的阈值

- 束流能散 = 0.3 %
- 光子能量 $E_\gamma = 0.117$ eV ($\lambda = 10597$ nm)
- 脉冲能量 $E_{\text{laser}} = 28$ mJ, 光斑尺寸 $r = 0.035$ mm

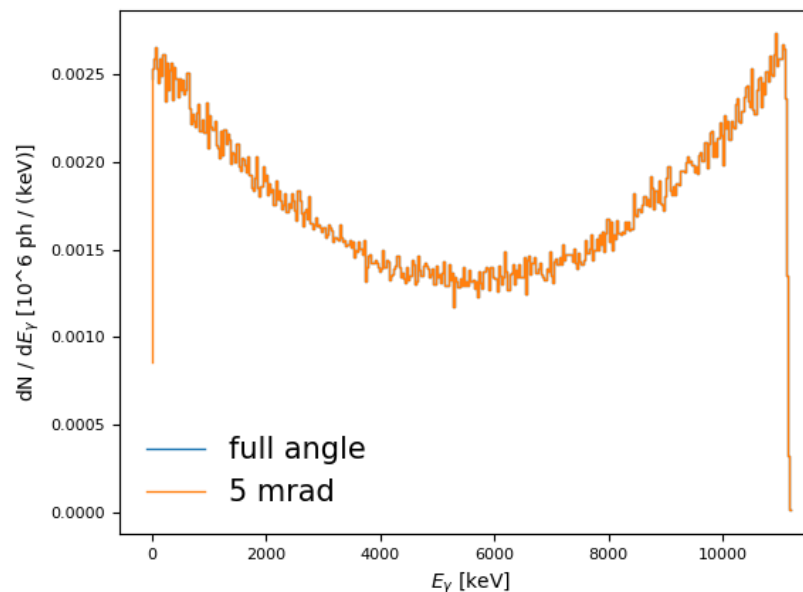
$$\omega_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{\varepsilon + m_e^2 / 4\omega_0} \sim 4\gamma^2 \omega_0$$

束流能量 $E = 1.5$ GeV



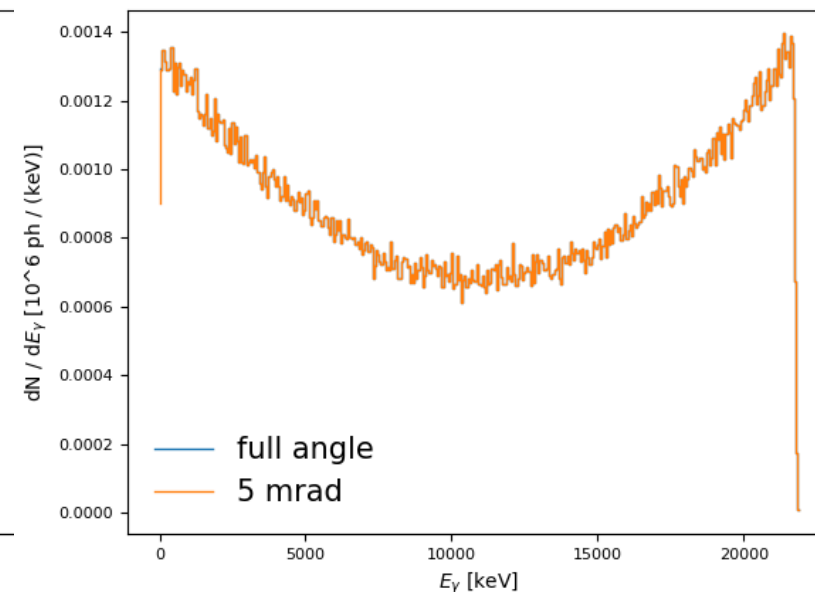
▪ $E_{\text{cutoff}} \sim 4.0$ MeV

束流能量 $E = 2.5$ GeV



▪ $E_{\text{cutoff}} \sim 11.1$ MeV

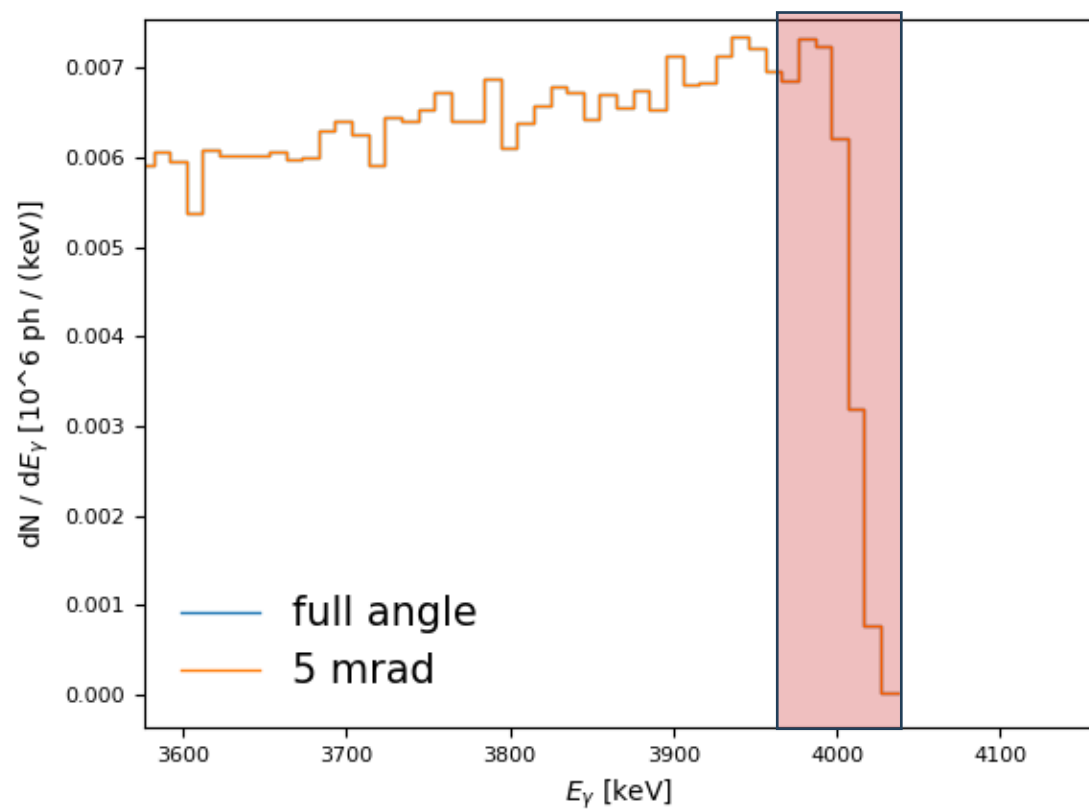
束流能量 $E = 3.5$ GeV



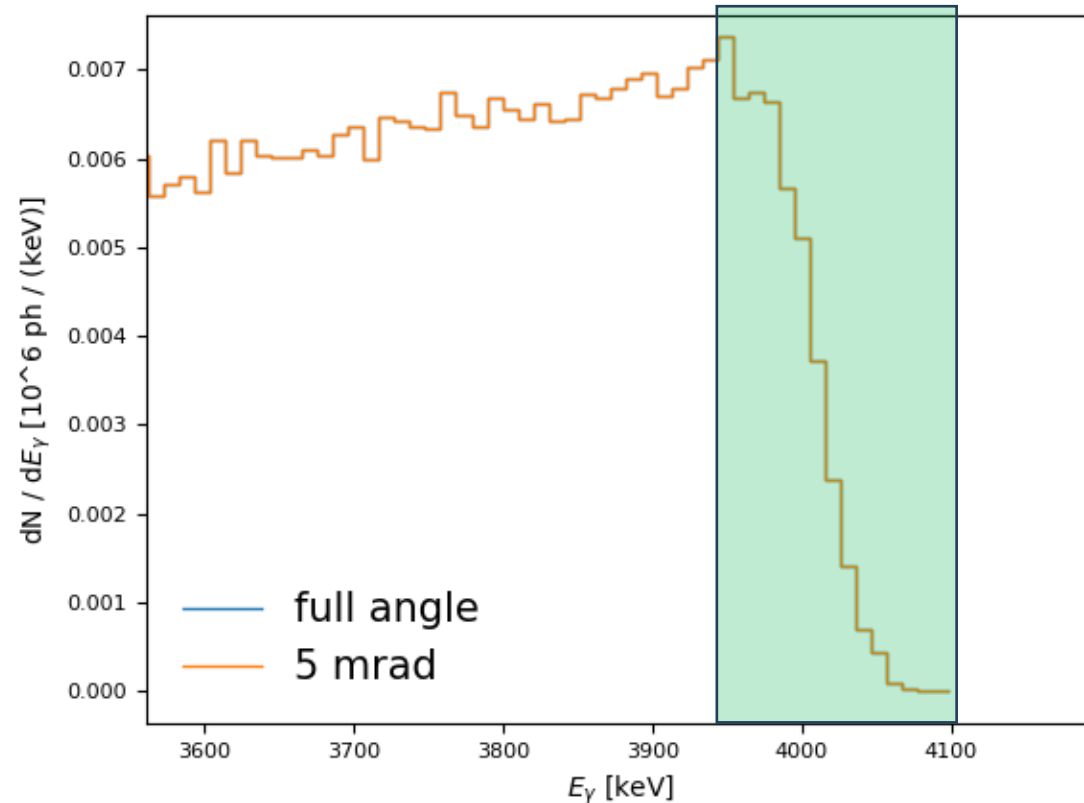
▪ $E_{\text{cutoff}} \sim 21.8$ MeV

不同能散下的下降沿

- 束流能量 $E=1.5$ GeV,
- 束流能散 = 0.1 %

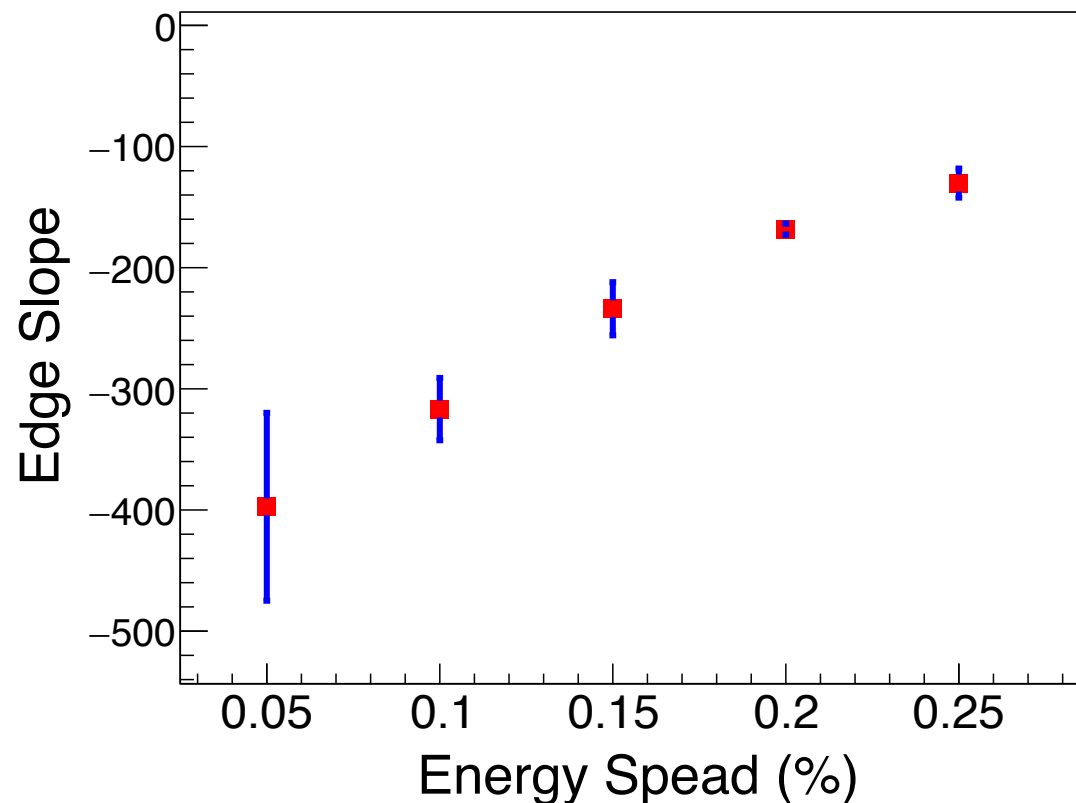
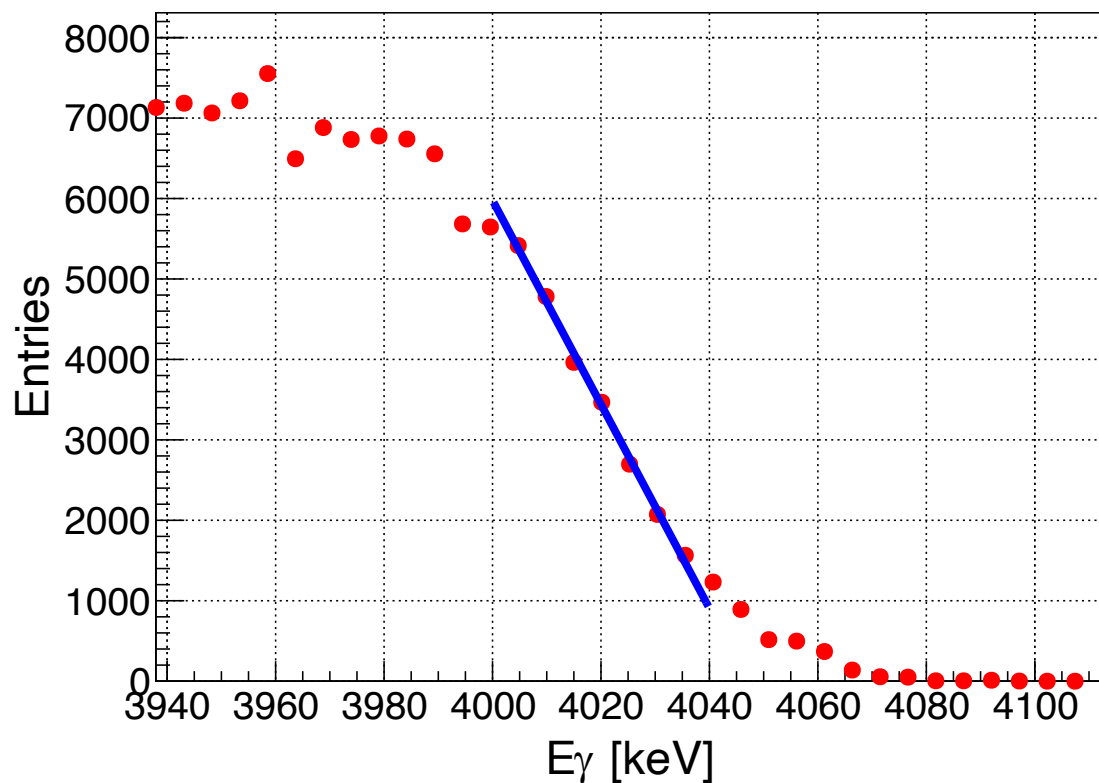


- 束流能量 $E=1.5$ GeV,
- 束流能散 = 0.3 %



不同能散下的下降沿

- 利用最简单的线性模型拟合下降沿的斜率，可以评估下降沿形状对于能散测量的敏感度。
- 在0.05-0.2%的能散范围，具有很强的相关性，后续还需考虑探测器分辨函数的影响。



下一步计划

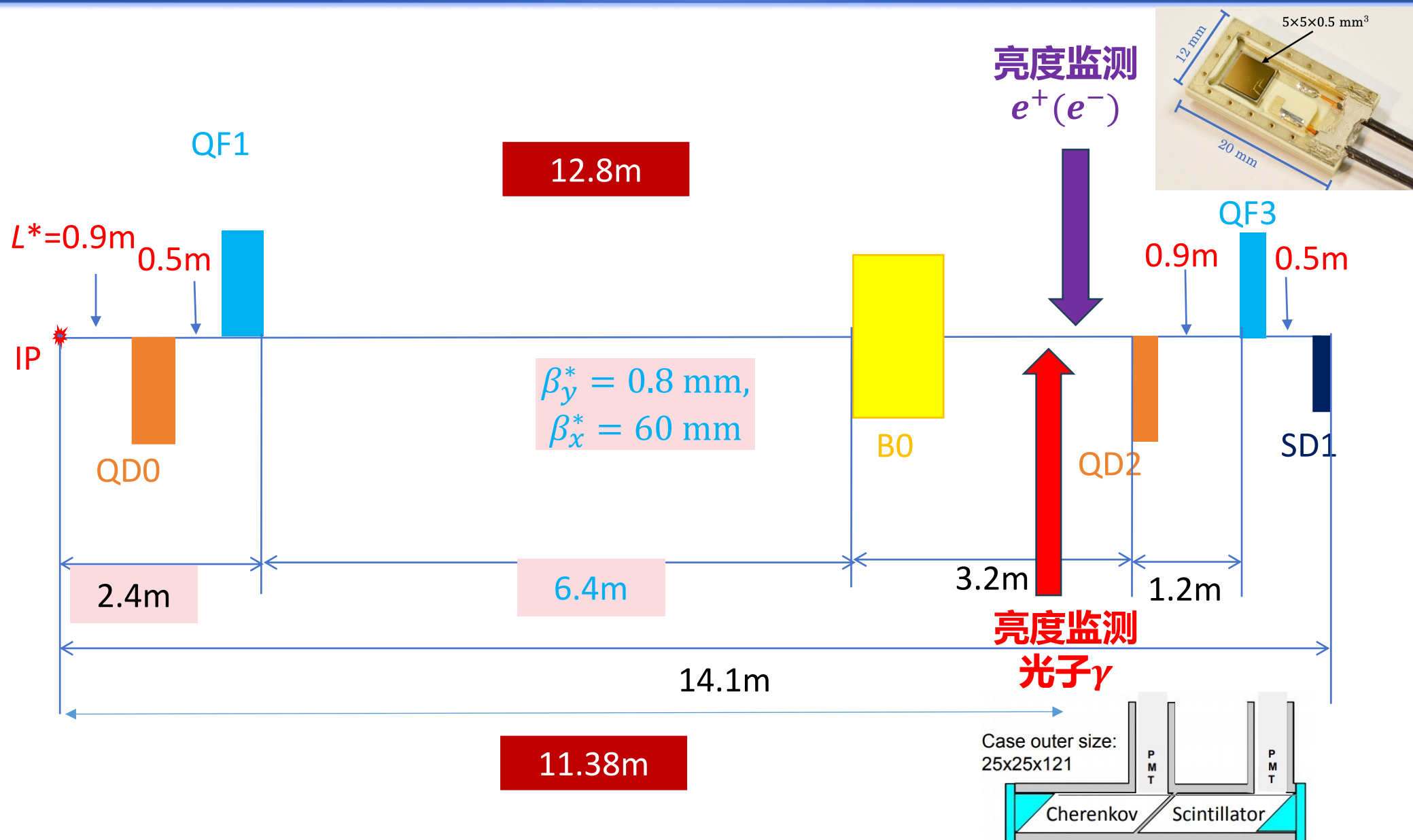
当前进度:

- 基本模拟验证了逆康普顿散射对于能量和能散测量的可行性

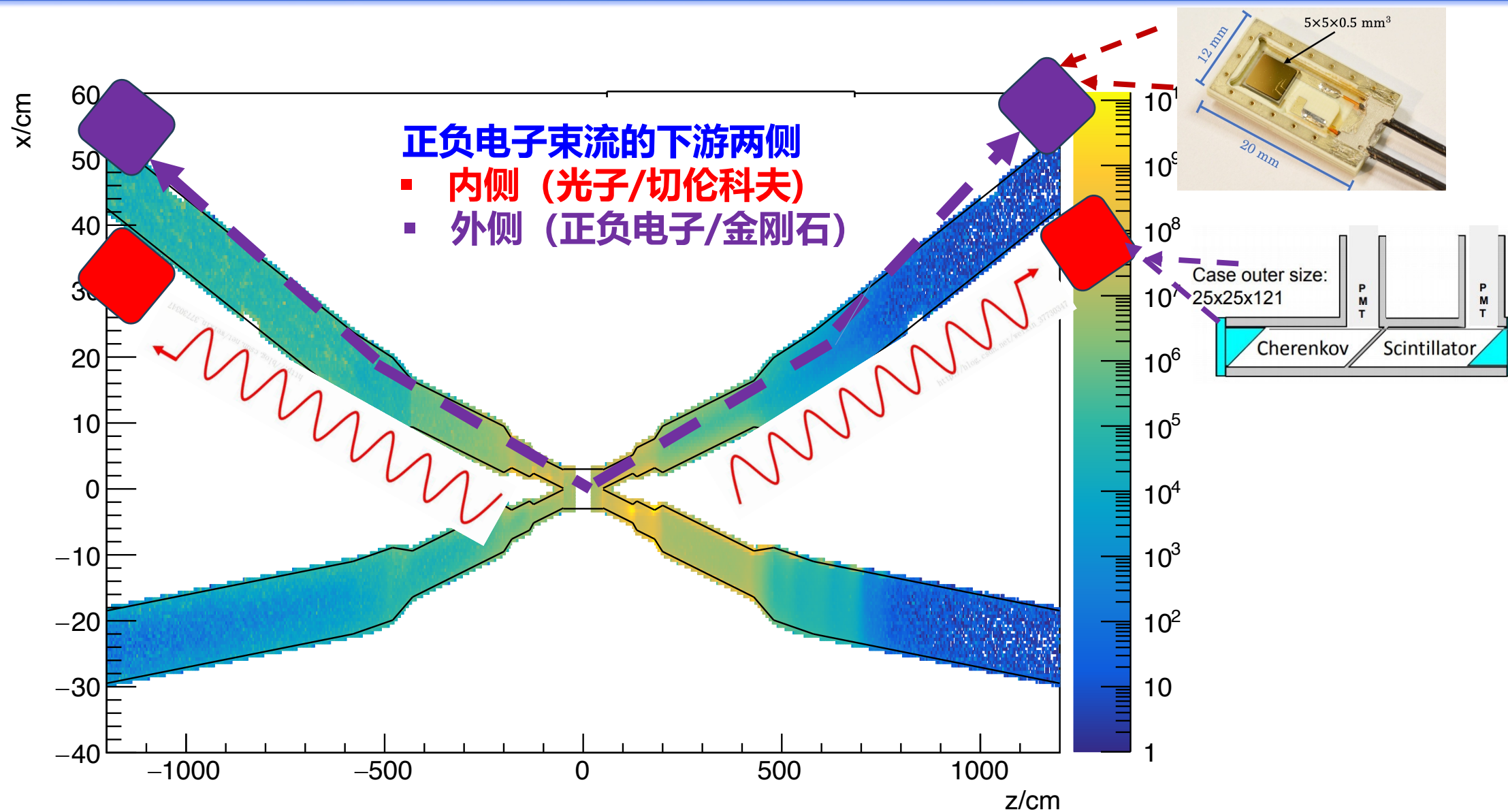
下一步主要需要考虑:

- 对于束流能量在 2.5 – 3.5 GeV, 选择什么样的探测方案 ??
- CO₂激光器的以及 HPGe 探测器的选择
- 考虑卷积上 HPGe 探测器的能量分辨函数来进行束流能量和能散的分析

亮度监测器预期位置



亮度监测器预期位置





Backup

高能量束流下的可能方案

