

STCF双光子过程的零角度探测器 模拟和设计

中国地质大学（武汉）

王杰 康晓琳

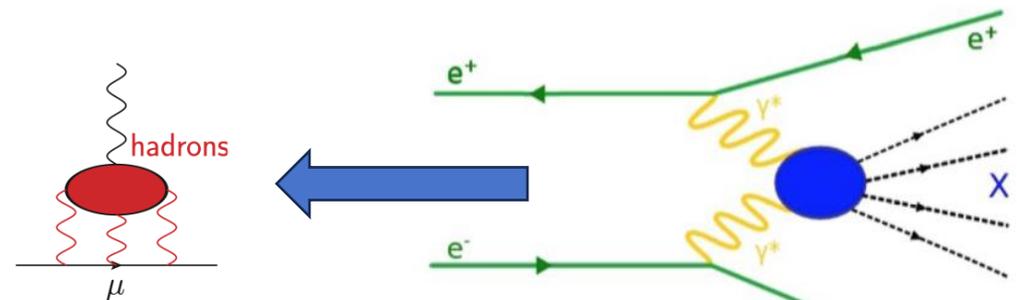
2025. 9. 20

双光子过程的零角度物理目标

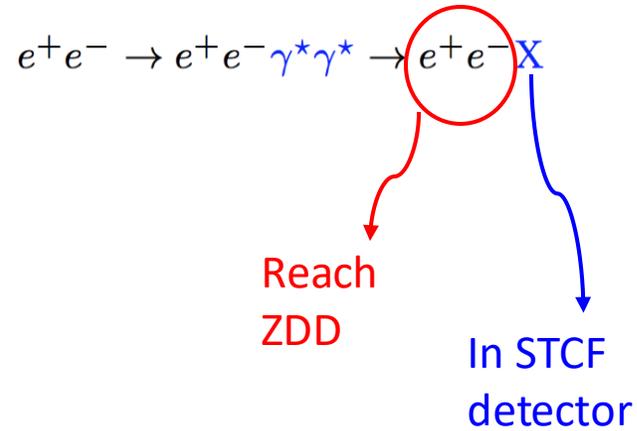
- 缪子反常磁矩 $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$ 的实验测量值和标准模型预言值之间存在长期的显著偏差，是寻找新物理的窗口
- 理论计算缪子反常磁矩最大的不确定性来源主要来自强子真空极化（HVP）和光子-光子强散射（HLbL）的贡献
- 由于强相互作用在低能区的非微扰性质，HVP和HLbL的贡献不能精确计算，依赖实验测量值
- 随着近年来各个实验组测量的强子化过程截面精度的提高，以及格点QCD对来自强子真空极化贡献方面取得的重大进展，**HLbL的贡献将主导理论计算的不确定性。**
- HLbL可以通过 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma^*\gamma^* \rightarrow e^+e^-X$ 的截面及形状因子计算，其中 X 包括 π^0 , $\pi\pi$, η 等

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)

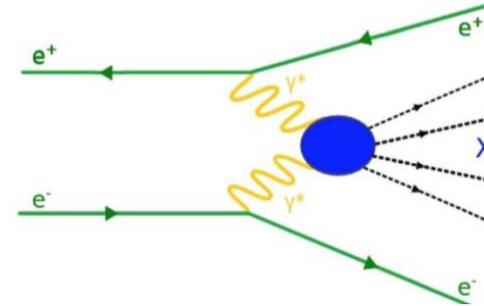
for quasi-real photons $J^{PC}(X) = \{0^{\pm,+}, 2^{\pm,+}\}$
 $\rightarrow X = \{\pi^0, \pi\pi, \eta\}$



双光子过程



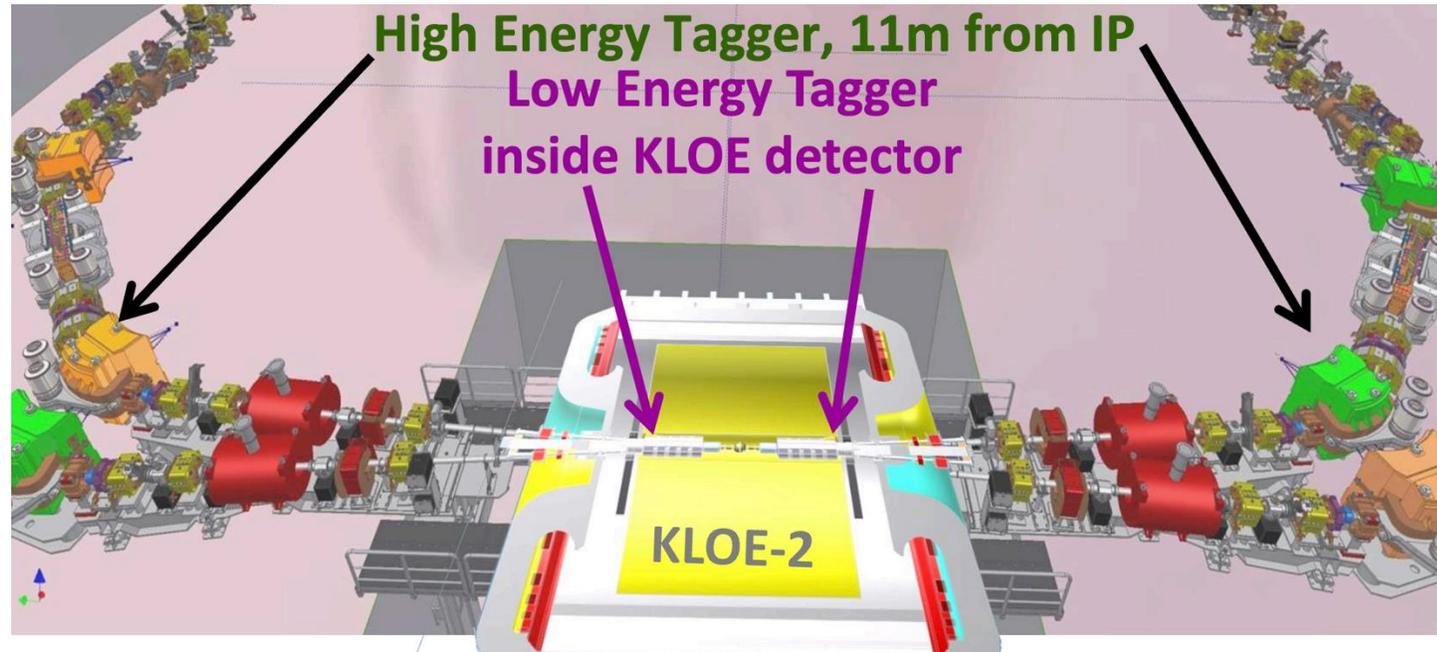
for quasi-real photons $J^{PC}(X) = \{0^{\pm,+}, 2^{\pm,+}\}$
 $\rightarrow X = \{\pi^0, \pi\pi, \eta\}$



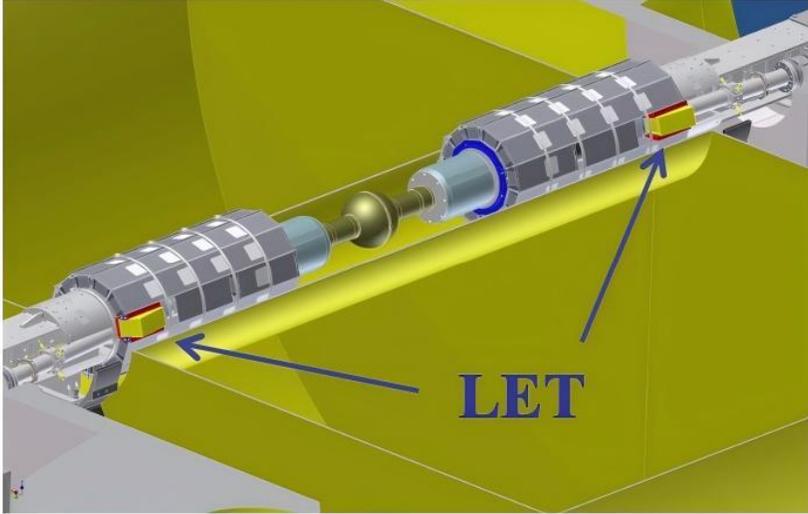
- 在正负电子对撞机中，双虚光子过程可以用来研究轻赝标量介子以及多介子系统的产生和衰变。该过程的X及其末态可以由主探测器记录，入射电子和正电子在辐射出虚光子后，出射的正负电子类似于亮度探测的辐射Bhabha过程，往往继续沿束流方向以小角度出射，携带高能但低横动量，这些粒子超出主探测器的接收范围。
- 零角度探测器可以有效的捕获低角度、高能量的出射 e^+e^- ，用来标记双光子过程。

KLOE实验中的ZDD

- KLOE-2实验在对撞点附近1m和11m处来分别标记低能量（150-400MeV）和高能量（>400MeV）的正负散射电子
- Low Energy Tagger (LET) 探测器：标记150 - 350 MeV的正负电子。主要用于捕获从束流管中逸出、以极小角度出射的低能电子。
- High Energy Tagger (HET)：精确标记在双光子物理过程 ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-X$) 中散射出的高能电子，在对撞点约11米处，主要用于探测能量范围在 420 - 495 MeV 之间、沿近束流管方向出射的电子/正电子。

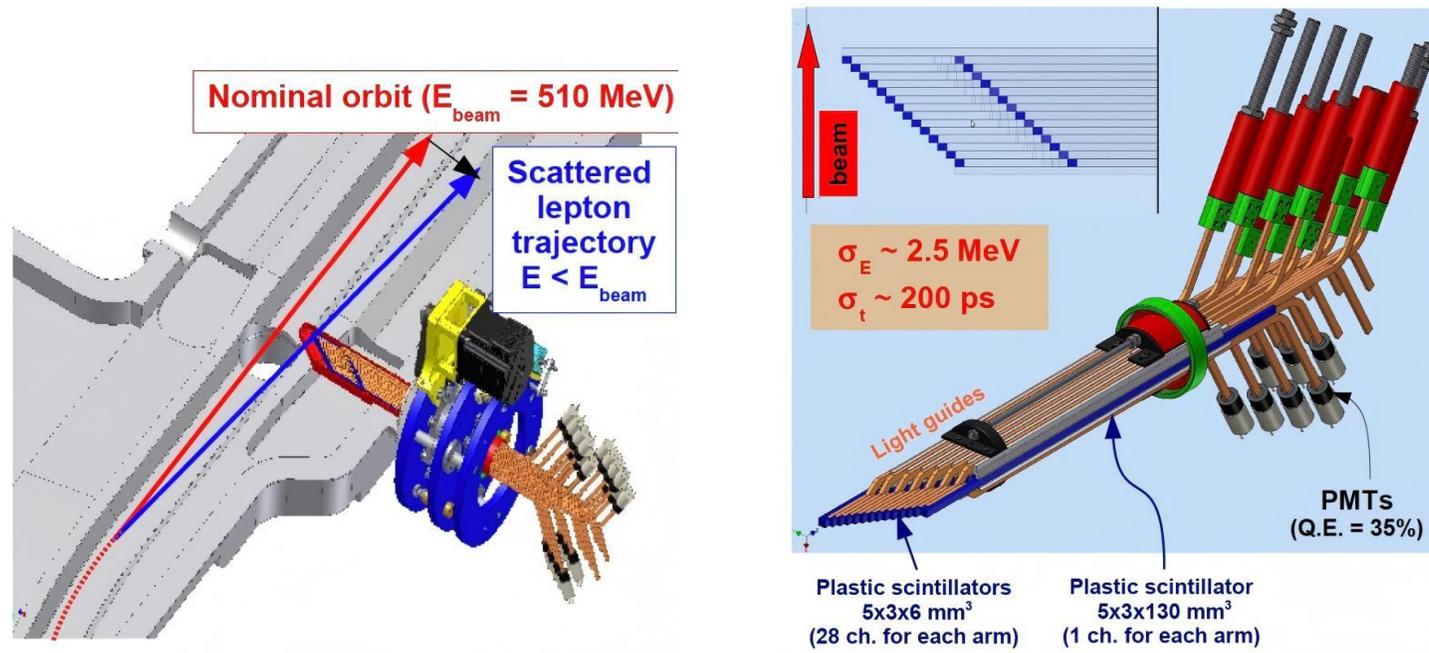


KLOE实验中的LET



- LET选用高时间和能量分辨率的LYSO晶体阵列（ 20×2 ）作为探测介质，配合SiPM（硅光电倍增管）进行读出，以保证高效率探测。
- 这些晶体模块安装在距离对撞点约1.5米处，可以覆盖低角度的出射区域。能量分辨率达到 $\sigma_E/E < 10\%$ ($E > 150 \text{ MeV}$)。
- 在近端，电子能量与散射角之间的相关性较弱
- LET系统通过宇宙线进行能量刻度和系统校准
- 右下角显示了LET与邻近探测系统（如QCALT）集成安装的情况。

KLOE实验中的HET



- HET利用储存环的第一个偏转磁铁，借助磁场将能量不同的散射电子在空间上展开，实现电子能量与轨迹位置之间的强相关性。
- HET探测器由一组塑料闪烁体+光电倍增管（PMT）组成，空间分辨率达 5 mm，能量分辨率 $\sigma_E \sim 2.5 \text{ MeV}$ ，时间分辨率优于200 ps。
- 该系统对于研究双光子过程中的高能末态粒子提供了关键支撑，是KLOE进行 $\gamma\gamma$ 物理研究的重要组成部分。

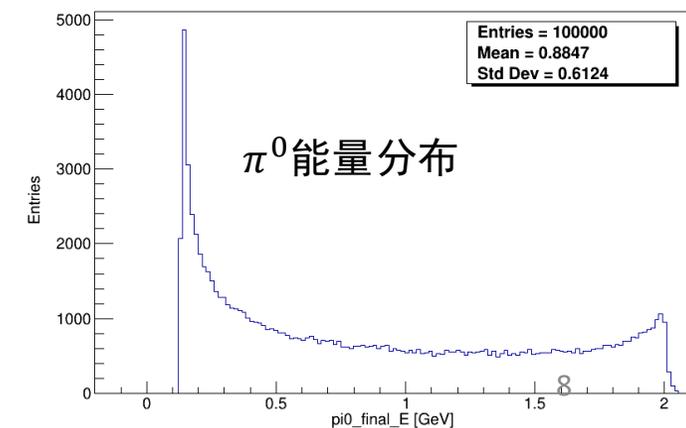
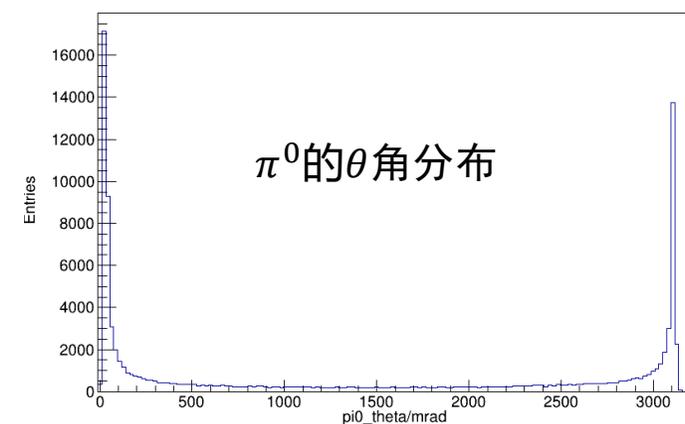
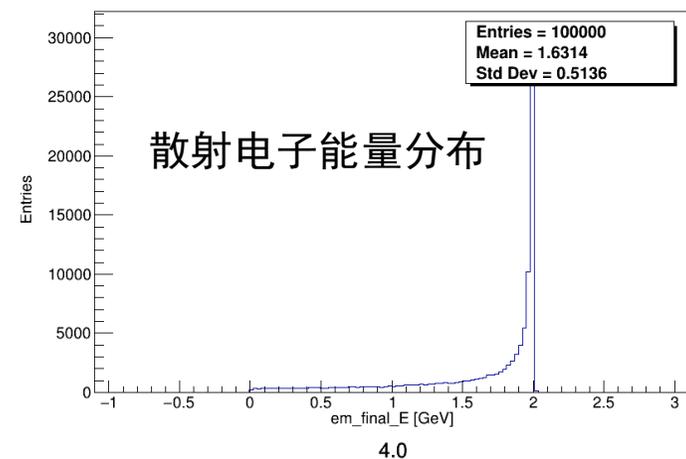
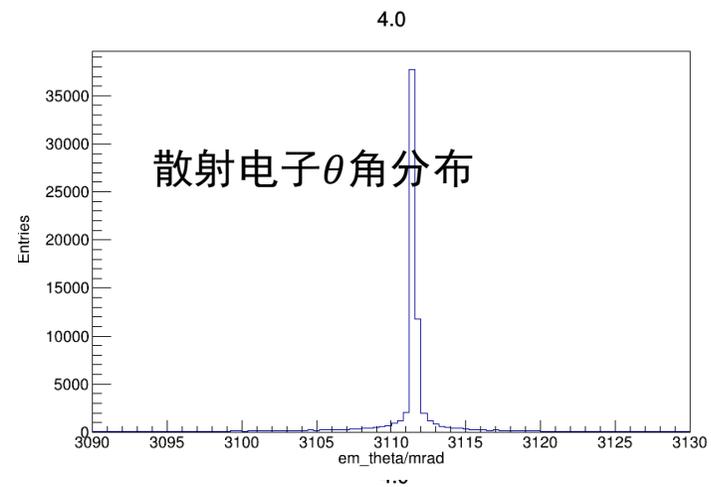
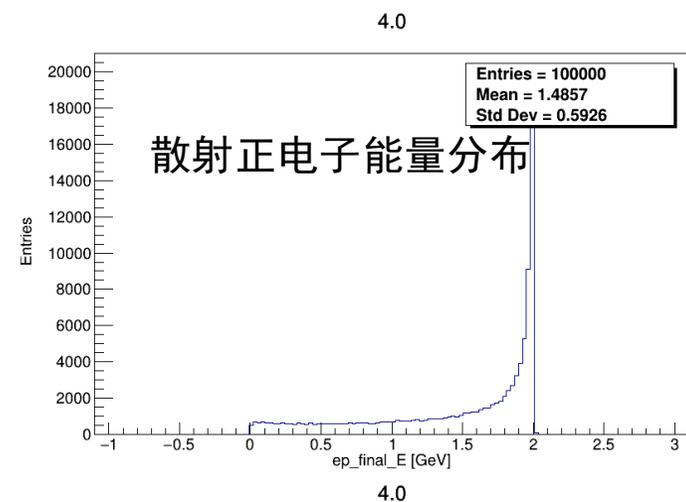
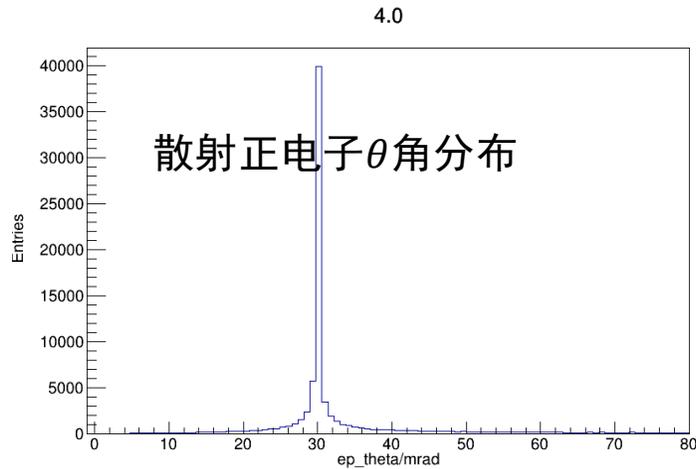
模拟时Ekhara产生子及探测器设置

- 在OSCAR环境下将Ekhara产生子移植进来，该产生子主要负责双光子过程 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-X$ 的产生
- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0$ @ 4 GeV，共模拟100000个事例，来研究双光子过程
- Ekhara产生子是在质心系下产生的，Boost至实验系（~30 mrad）
- 使用了最新的束流管几何，去掉了谱仪磁场，添加了偏转磁场，当作理想性环境进行模拟
- 结果包含MCTruth和Geant4两种信息，区别在于MC记录所有正负电子信息，Geant4只记录了出射束流管的信息

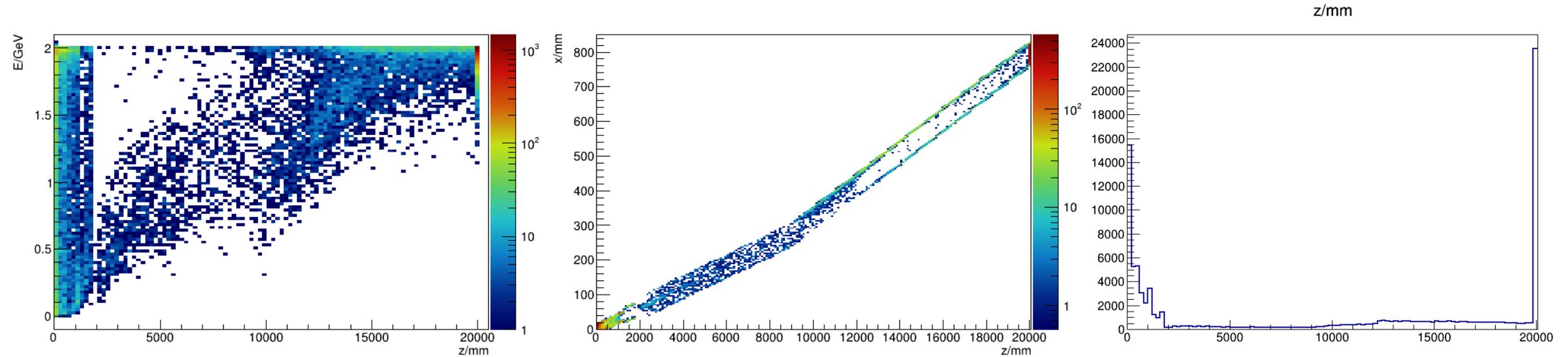
```
#***** Ekhara
import Ekhara
detalg = task.createAlg("Ekhara")
detalg.property("Channel").set(2)#1: pi+pi; 2: pi0; 3: eta; 4: eta'
detalg.property("Formfactor").set(5)#5: model for pi0 8: model for eta 9:model for etap(if channel = 1, don't use formfactor)
detalg.property("sw_1pi").set(2)#1 = s; 2 = t; 3 = s+t(for (channel = 2/3/4))
detalg.property("sw_2pi").set(1)#1 = s; 2 = t; 3 = s+t(only (channel = 1) to use)
detalg.property("Ecm").set(4.00)#GeV
detalg.property("InitialEvents").set(10000)
detalg.property("Thetaminpositron").set(0.0)#degree
detalg.property("Thetamaxpositron").set(180.0)#degree
detalg.property("Energyminpositron").set(0.0)#GeV
detalg.property("Energymaxpositron").set(110.0)#GeV
detalg.property("Thetaminelectron").set(0.0)#degree
detalg.property("Thetamaxelectron").set(180.0)#degree
detalg.property("Energyminelectron").set(0.0)#GeV
detalg.property("Energymaxelectron").set(110.0)#GeV
detalg.property("Thetaminpion").set(0.0)#degree
detalg.property("Thetamaxpion").set(180.0)#degree
detalg.property("Eminpion").set(0.0)#GeV
detalg.property("Emaxpion").set(100.0)#GeV
```

MCTruth信息

- ▶ 左侧三幅图展示了双光子过程末态正电子、负电子以及 π^0 的 θ 角分布。结果表明，末态正负电子的分布集中在接近束流管方向的区域，而 π^0 的分布则相对更宽。
- ▶ 右侧三幅图给出了对应的能量分布。末态正负电子主要集中在高能区（接近束流能量），而 π^0 的能量分布则较低且分散。

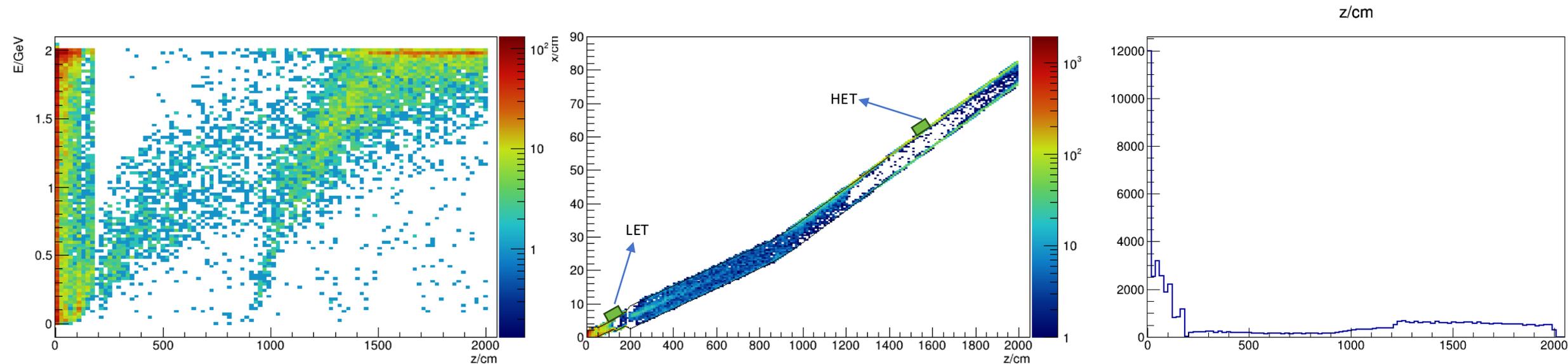


MCTruth信息：不考虑束流管物质的影响



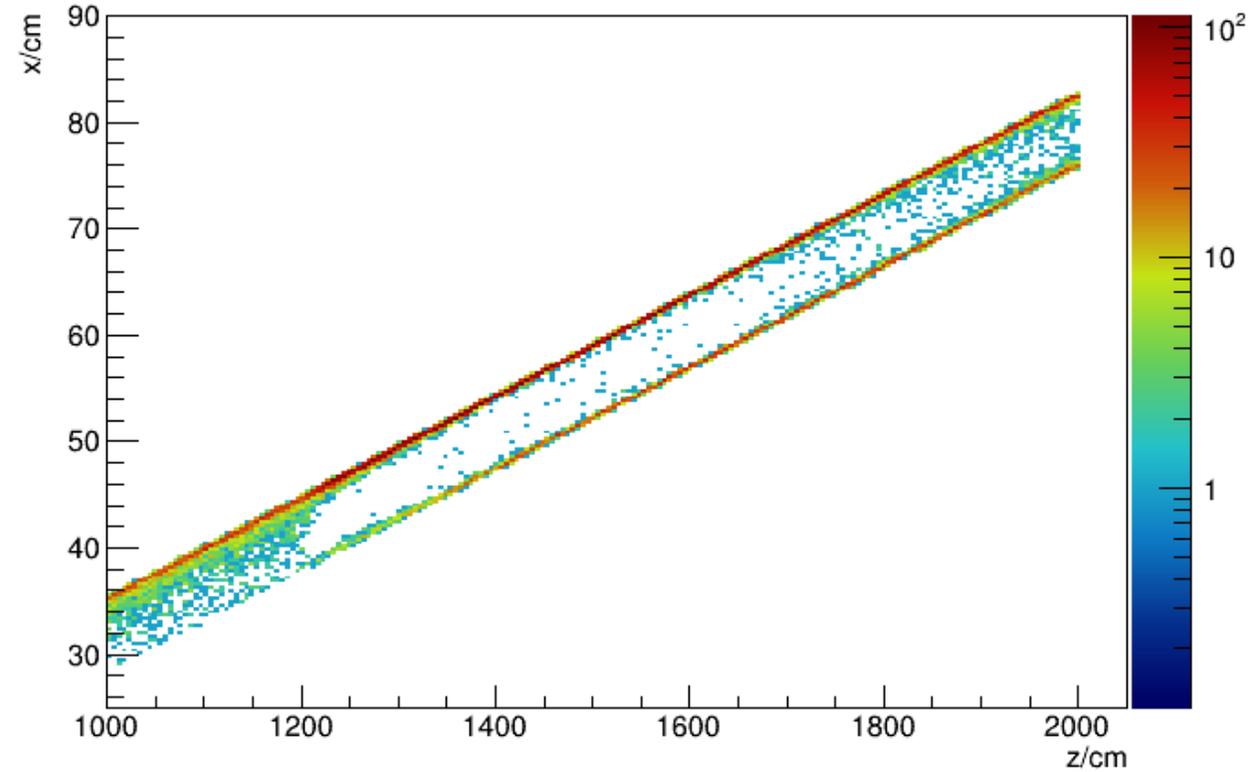
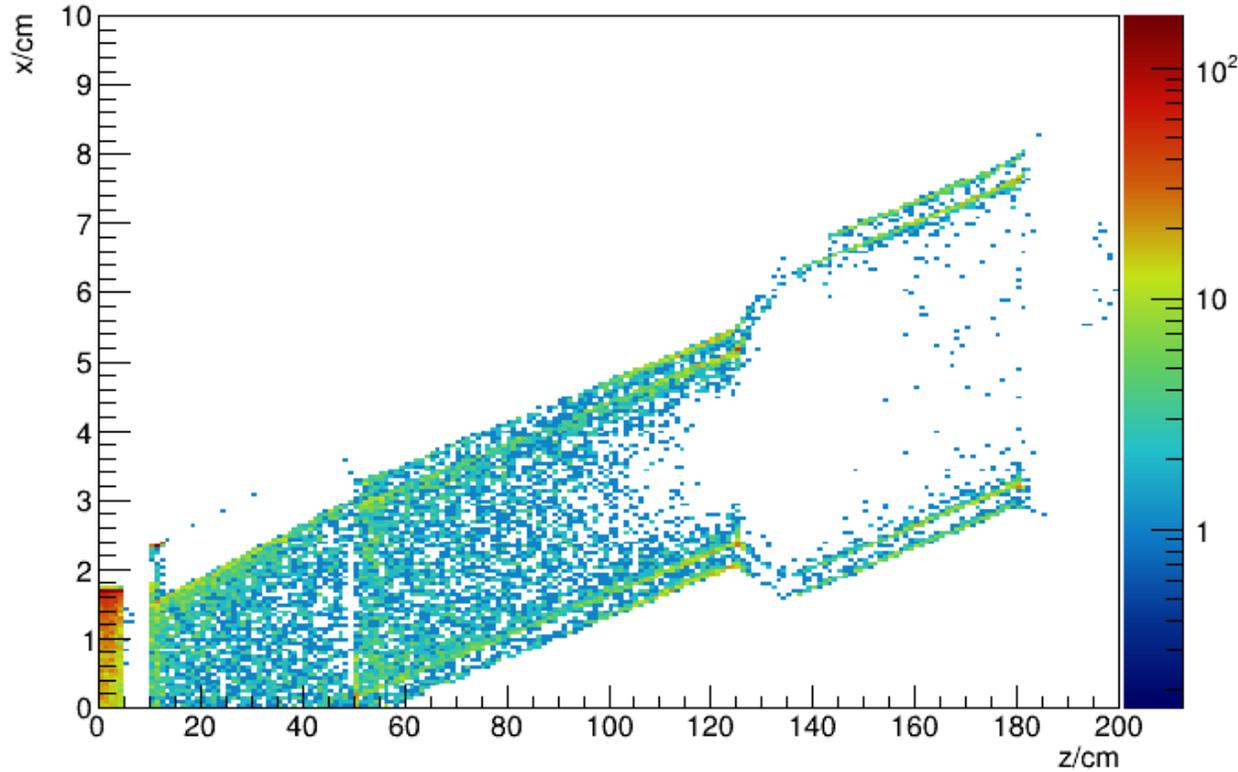
- 左图：末态正电子的初始能量 E 与 z 方向击中位置的二维分布。可以看到，低能电子主要集中在靠近 IP 的区域，而高能电子则可以传播到更远的 z 位置；同时也有部分高能电子仍集中在 IP 附近。
- 中图：正电子在 $x - z$ 平面的击中分布。结果显示，正电子沿束流方向（ z 轴）传播过程中击中分布连续，反映出典型的前向特征。
- 右图：统计了正电子在 z 方向不同位置的击中次数。结果表明，在近端区域 $z < (200cm)$ 存在一段高频击中区，而在远端($1000\sim 2000cm$)也出现明显积累，说明存在较多高能电子能够向远端飞行。

Geant4模拟信息：考虑了束流管物质的影响



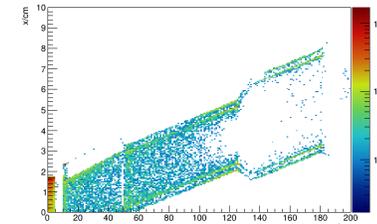
- 为了得到更接近实验真实的情况，我们同时使用了Geant4的信息，在该模拟中，我们追踪了辐射双光子后的正负电子从束流管内出射至束流管外的粒子的信息，得到了和MC近乎一致的信息。
- 左图为粒子的初始能量 E 与 Z 的分布图，中图为 x - z 平面粒子的出射图，右图为 z 方向出射位置统计。
- 与 MCTruth 的结果对比可以看到，整体趋势一致，但 远端高能电子显著缺失。初步判断是这些电子能量接近束流能量，受到磁场偏转影响较小，因此继续沿束流管前进，而未真正出射。

Geant4模拟信息：考虑了束流管物质的影响

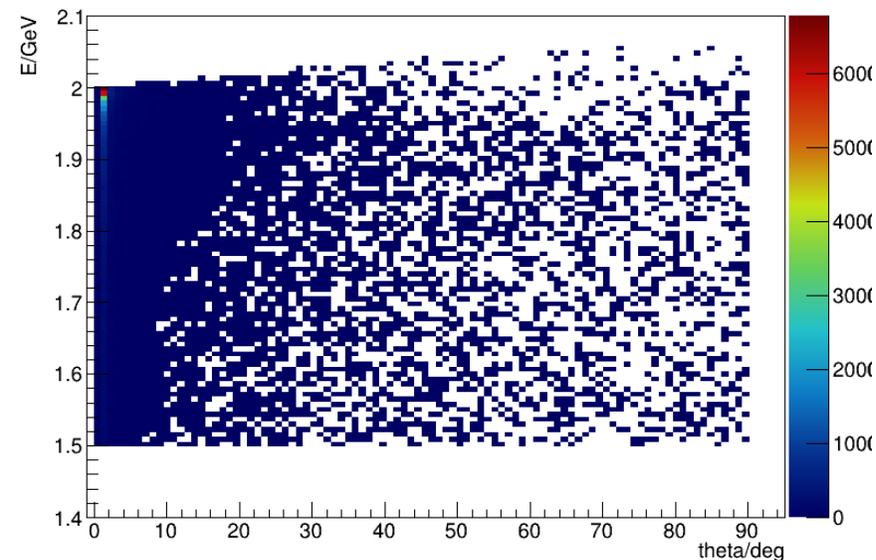


- 本页重点展示了正电子在 x - z 平面的出射分布。
- 左图：在近端 $z < (200\text{cm})$ 粒子分布相对局限。
- 右图：在远端($1000 < z < 2000\text{cm}$)范围内，粒子击中较为均匀，呈现连续分布特征。

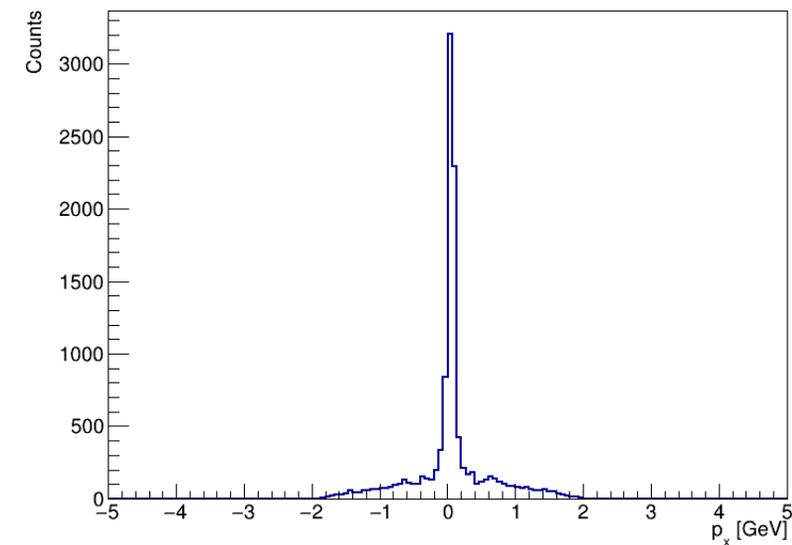
Geant4模拟信息：考虑束流管物质的影响



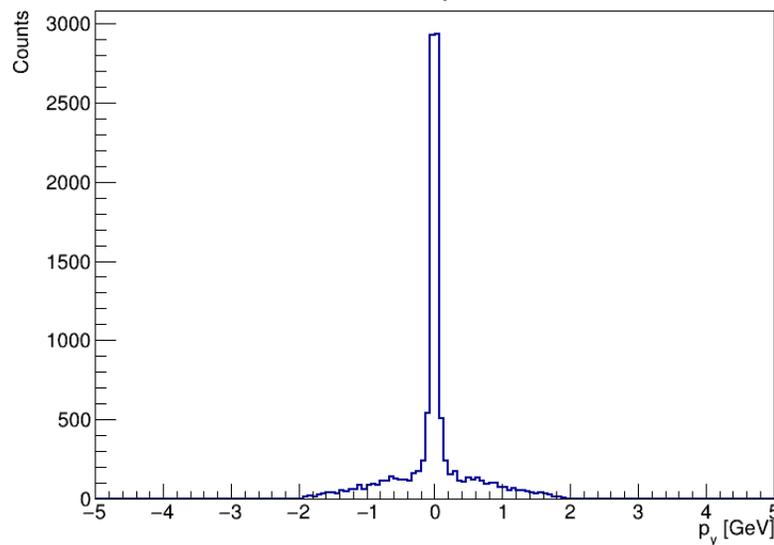
- 近端高能出射粒子（选择： $z < 200\text{cm}$ 且 $E > 1.5\text{GeV}$ ）
- 动量分布（下排）： p_x, p_y 均在0附近尖锐聚集，表明横向动量很小； p_z 在2GeV处显著峰化，指向强烈的前向运动特征（接近束流动量）。
- 能量-角分布（上图）：在 $E > 1.5\text{GeV}$ 的约束下， E 与 θ 未呈现明显相关性；存在一部分高能粒子伴随相对更大的 θ 出现，从而更早与束流管相交并在近端出射。
- 这些“高能但近端出射”的粒子本质上仍是前向高能电子/正电子，只需少量横向分量（或适度散射角/磁场偏转）即可在前 200cm 内与束流管相交→高能并不必然对应远端出射。



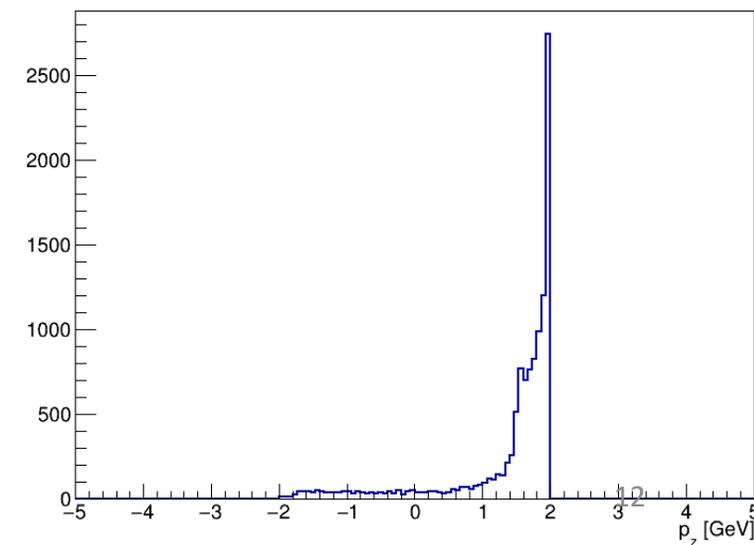
Selected p_x (type=0)



Selected p_y (type=0)

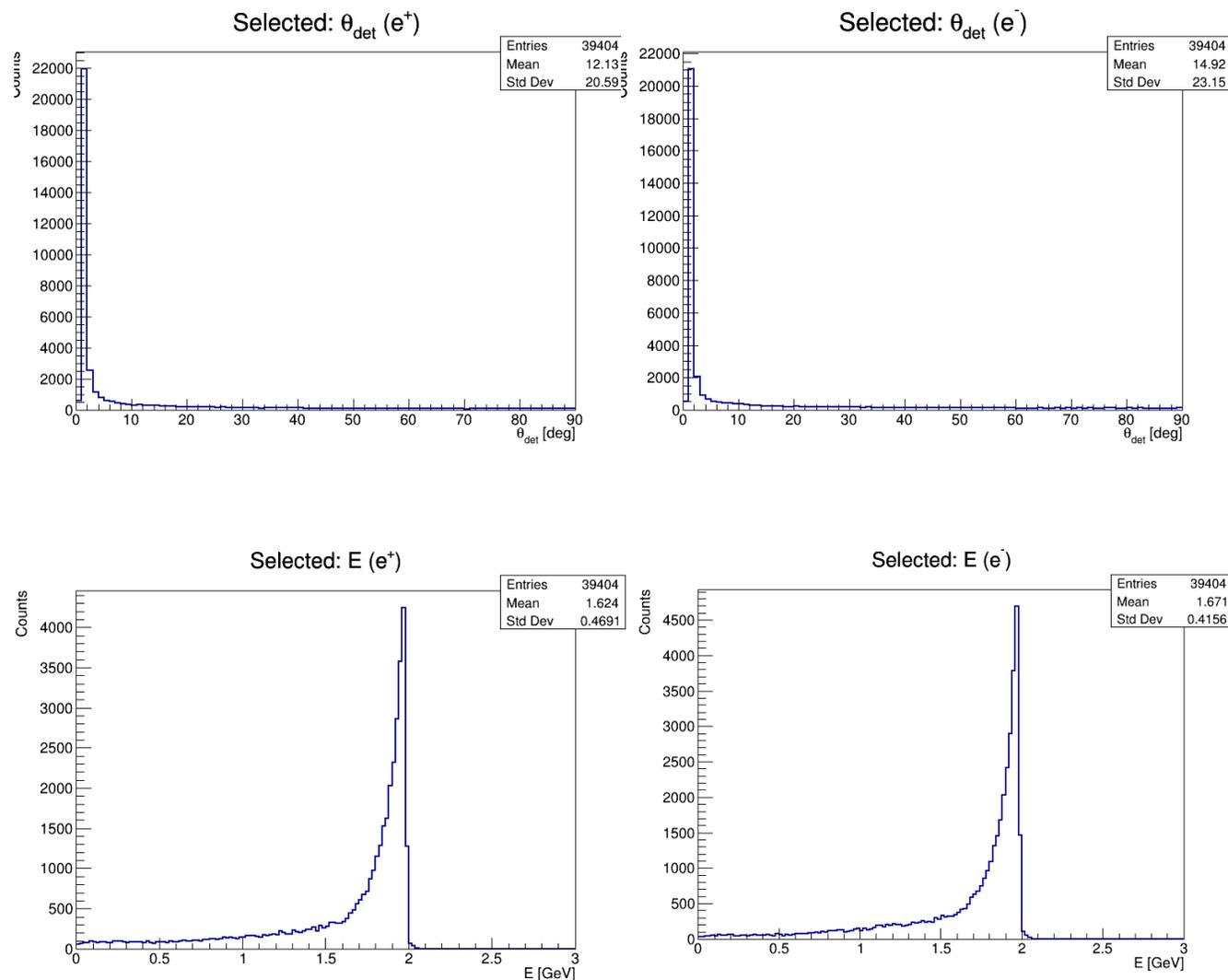


Selected p_z (type=0)



符合双光子过程物理分析情况的事例——基于MCTruth信息观察

- $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\pi^0 @ 4 \text{ GeV}$, 要求末态 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 的双光子需落入主探测器的探测范围。
- 选取的筛选条件为：末态光子散射角 $\theta > 20^\circ$ 。
- 经过筛选，全部事例中有39.4%的模拟事例满足要求（假设ZDD全部探测到）。右侧图分别展示了被选中事例中末态 e^+e^- 的纵向动量 p_z 与能量 E 的分布。
- 若没有ZDD，以现有的方法对双光子过程就行挑选，只有14.56%的事例满足条件（相对于全部事例）
- 说明探测器几何覆盖与事例效率紧密相关。
- ZDD在提升双光子过程总体效率上具有关键作用。



初步模拟结果

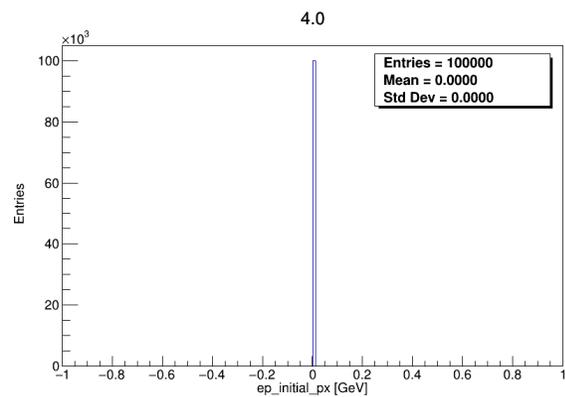
- 空间分布特征：目前基于Ekhara产生子与 Geant4 的模拟结果表明，辐射双光子后的末态 e^+ 、 e^- 在近端 $z < (200cm)$ 和远端($1000 < z < 2000cm$)均存在显著击中
- 在远端，由于第一个偏转磁铁作为色散装置，电子能量与轨迹位置之间具有强相关性，而在近端，电子的能量与散射角之间的相关性较弱。
- 预期在2m内和16m附近分别放置LET以及HET
- ZDD的放置，对双光子过程的探测效率提升接近两倍，探测纯度也会有很大的提升

后续模拟计划

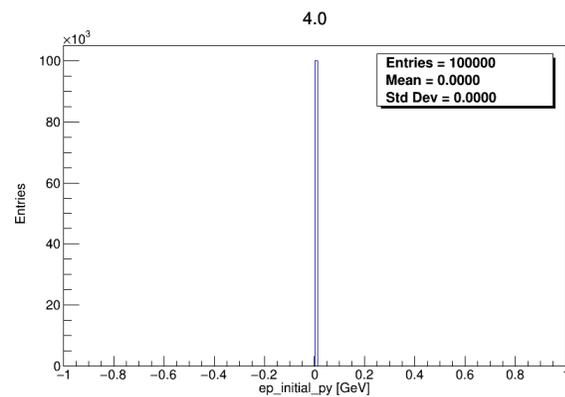
- 目前对于低端模拟仍存在很大问题，可能是因为低端束流管结构较为复杂，以及束流本底较多，后续将单独对此部分进行分析
- 对于远端初步模拟结果与预期近似，后续将建立ZDD模型，测试不同位置和尺寸响应
- 研究不同能量点下的分布，进一步验证设计合理性

Back up

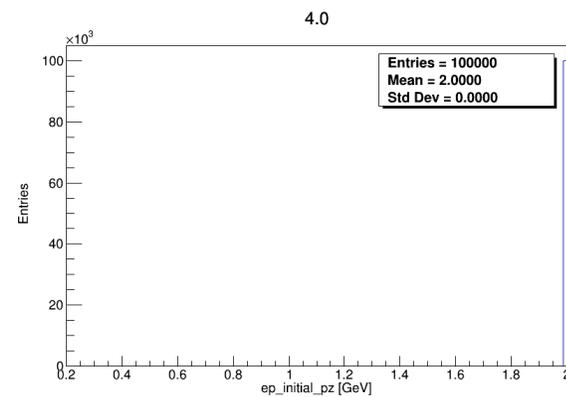
初态正负电子信息



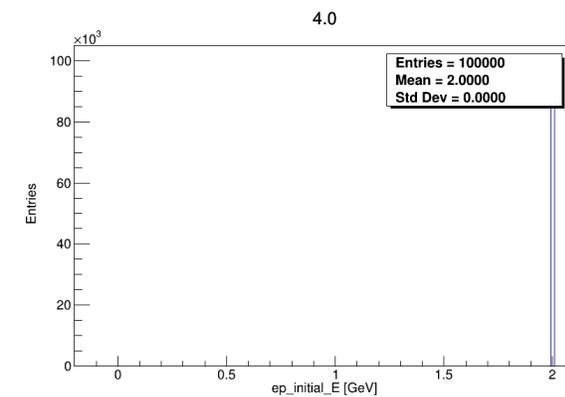
e+ px



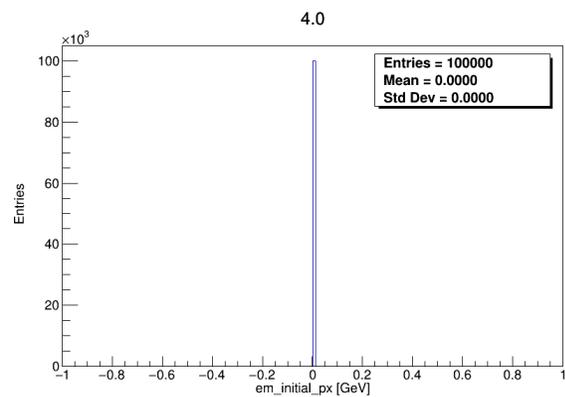
e+ py



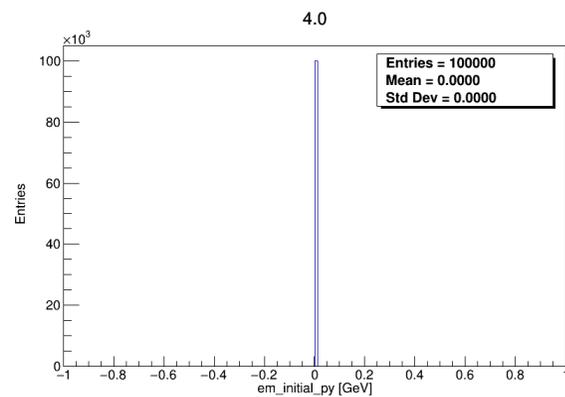
e+ pz



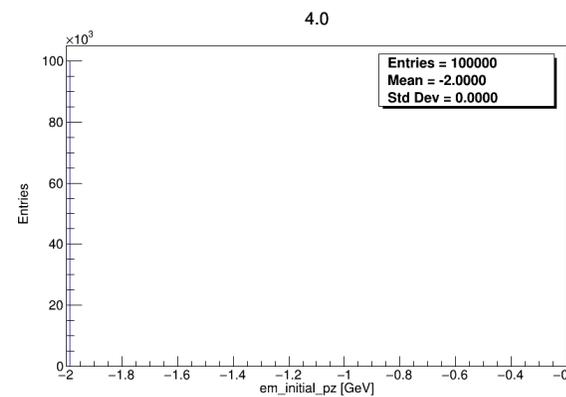
e+ E



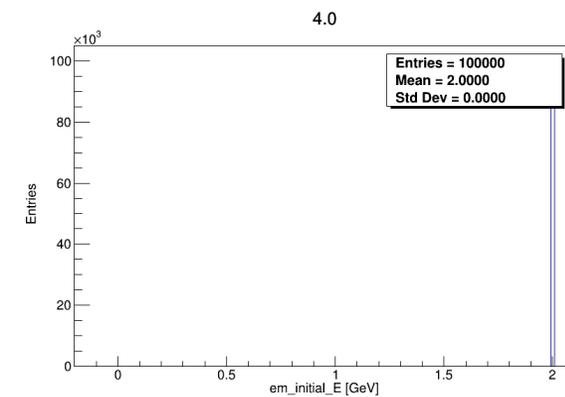
e- px



e- py

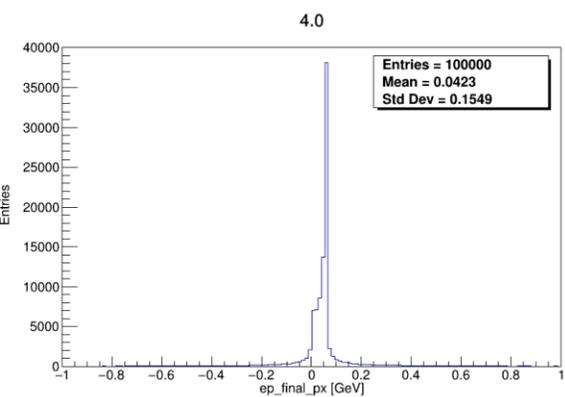


e- pz

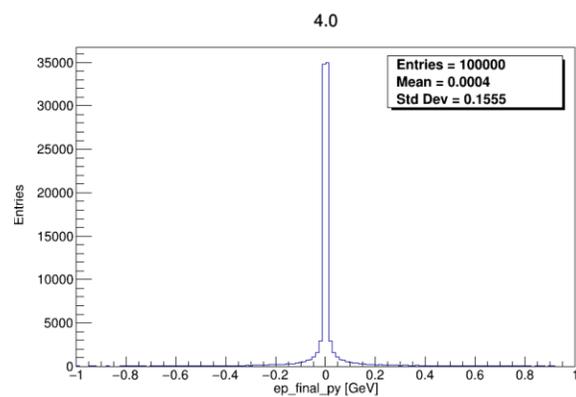


e- E

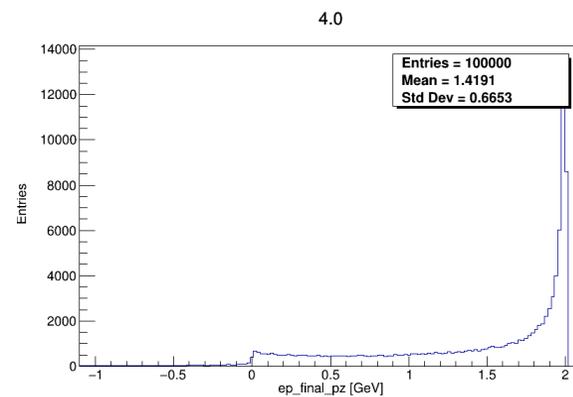
MC生成的辐射光子后正负电子信息



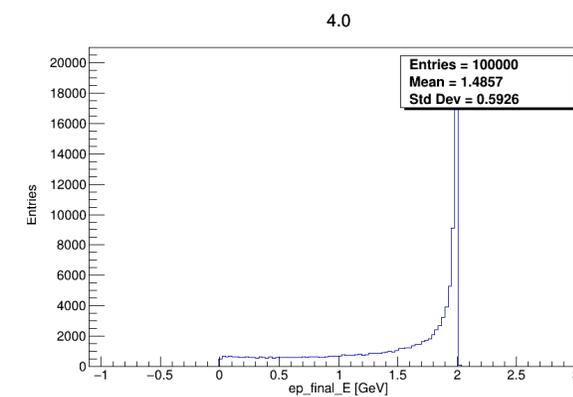
e+ px



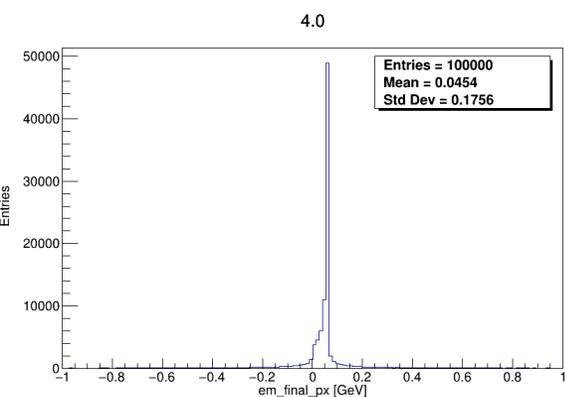
e+ py



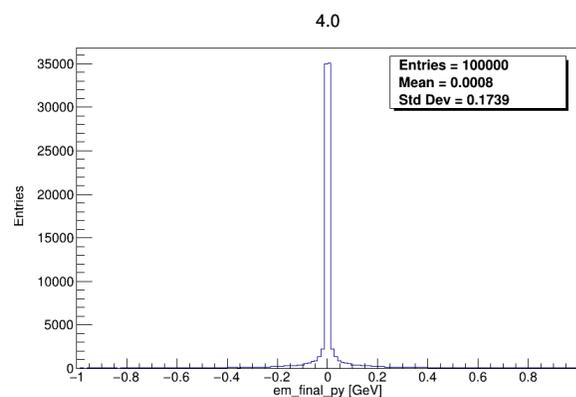
e+ pz



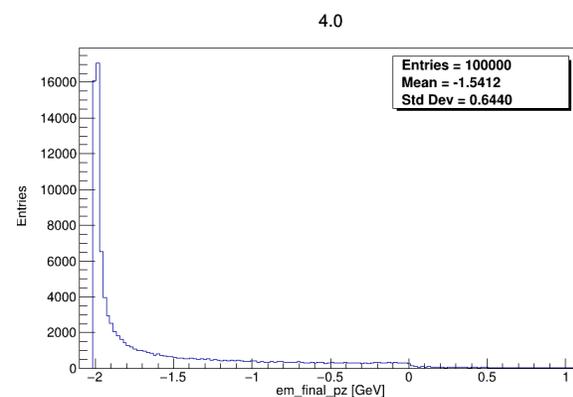
e+ E



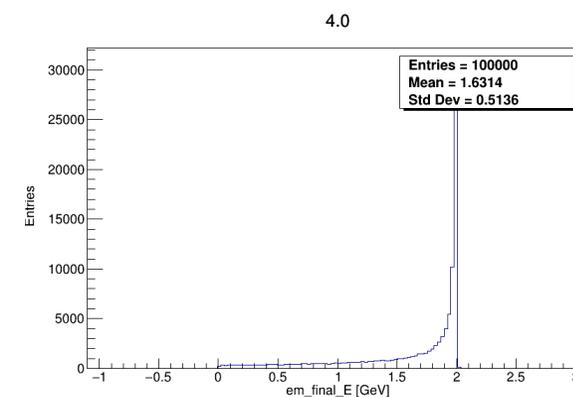
e- px



e- py

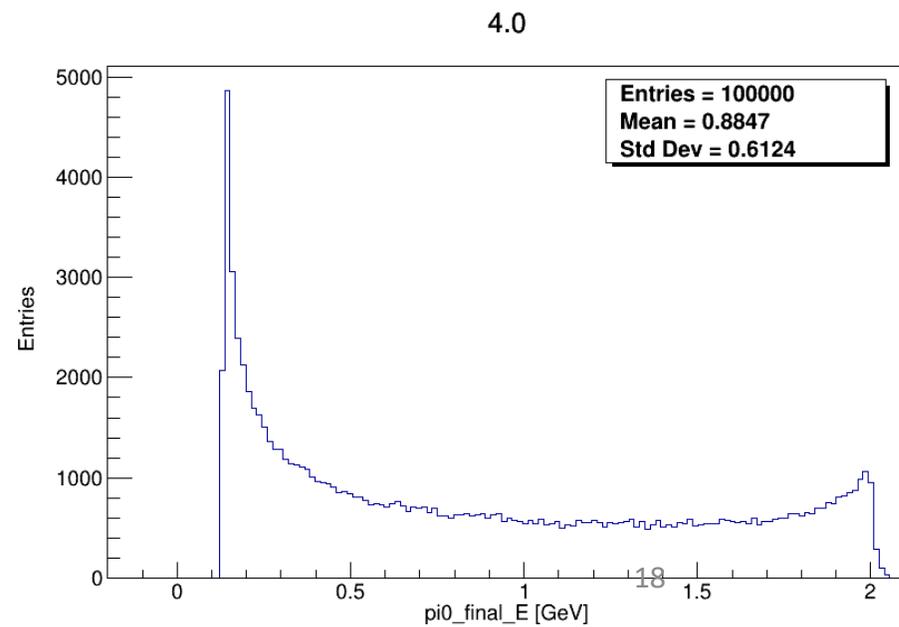
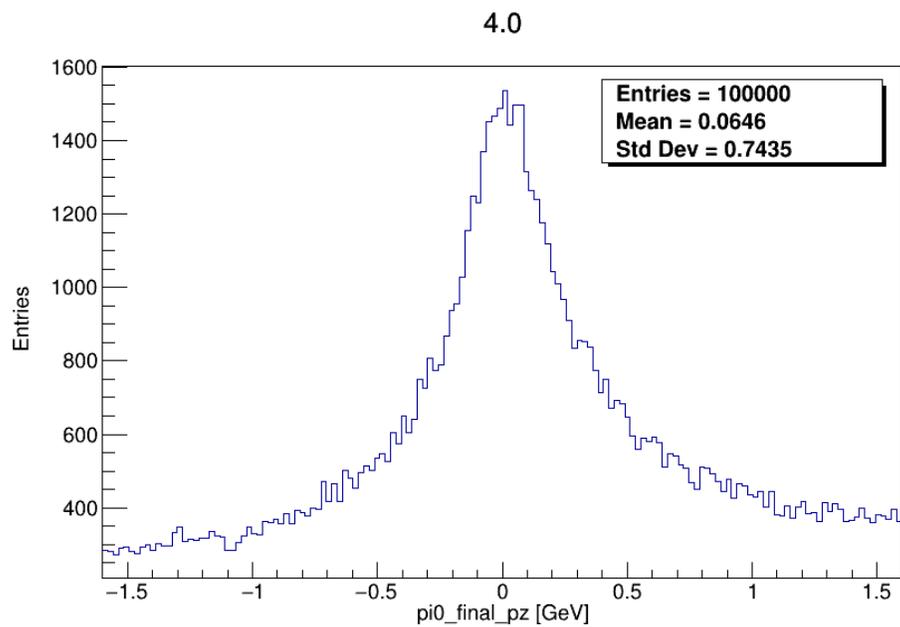
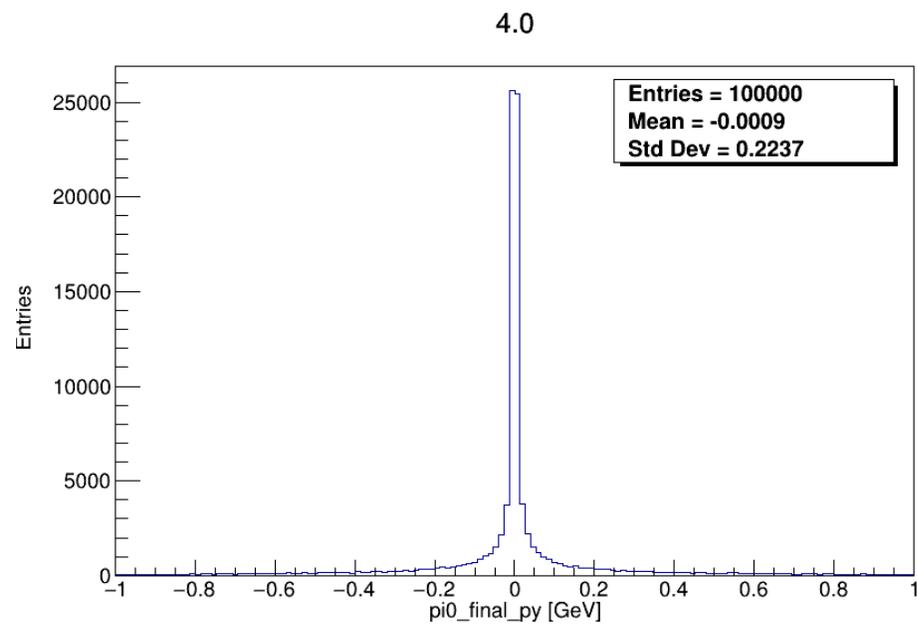
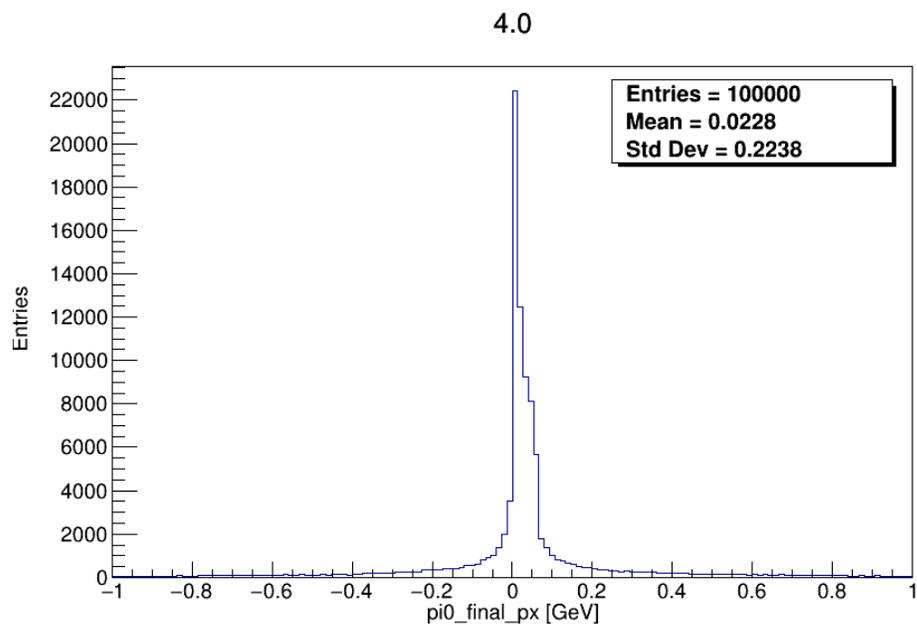


e- pz



e- E

MC生成的辐射光子后 π^0 信息



符合双光子过程物理分析情况的事例

