

# 面向STCF实验MAPS内径迹探测器的快速模拟算法及其应用

张睿洋

中国科学技术大学

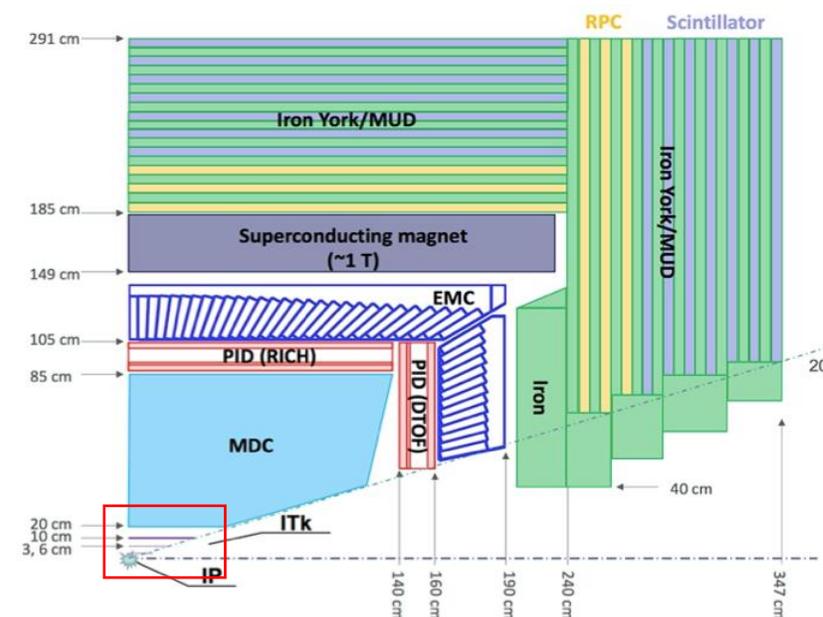
2025年4月18日 西安

- STCF: 我国下一代正负电子对撞机

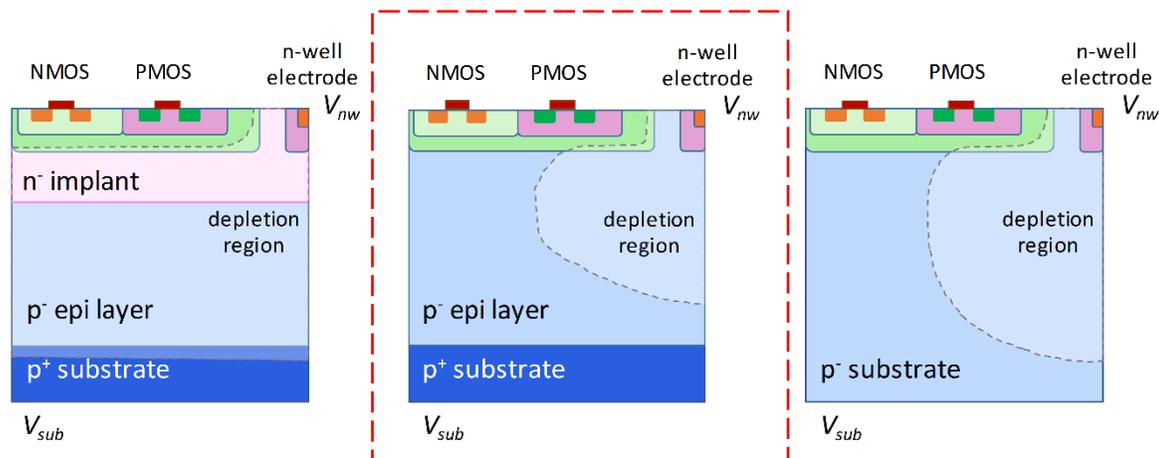
- $E_{cm} = 2\sim 7\text{GeV}$ , 峰值亮度  $> 0.5 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (@4GeV)
- 提供100倍于BESIII的实验数据, 针对宽领域物理目标

- STCF径迹探测系统

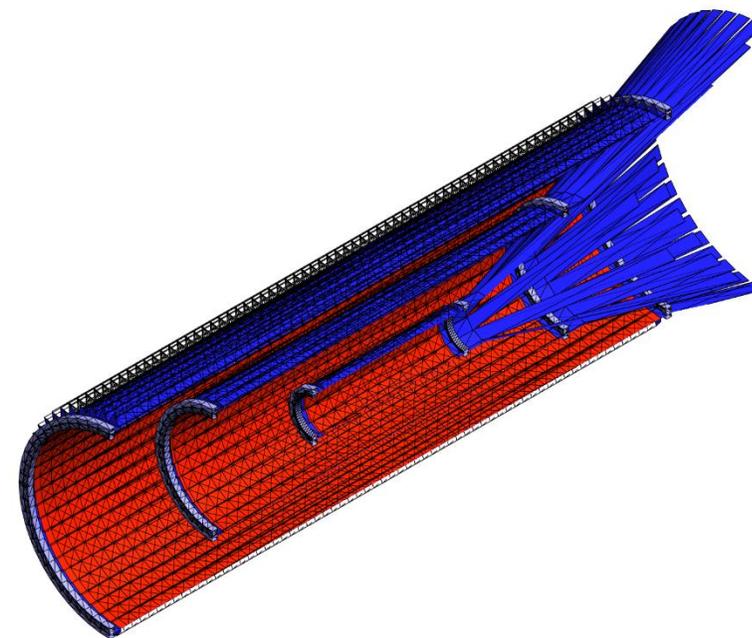
- 高计数率(400kHz) → 堆积事例区分
- 高本底水平 → 强辐照耐受
- 低动量粒子(100MeV)寻迹效率  $> 90\%$  → 本底去除
- 硅像素内径迹探测器(ITKM) → 减小末态粒子散射
- 单片型硅像素芯片(MAPS)
- $< 50\text{ns}$ 时间分辨
- $\sim 0.3\% X_0$ 每层极低物质的量



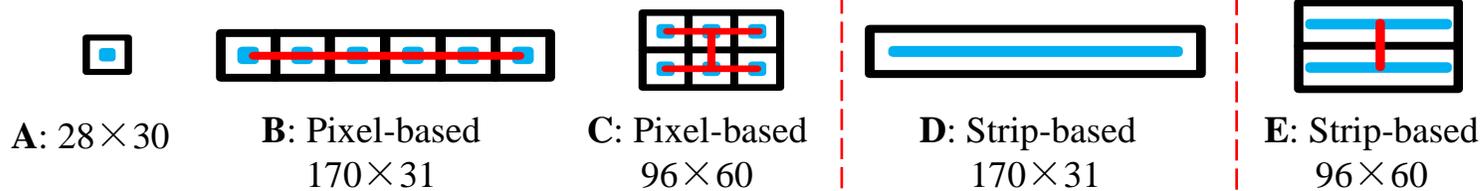
## ● 工艺选型



基准方案

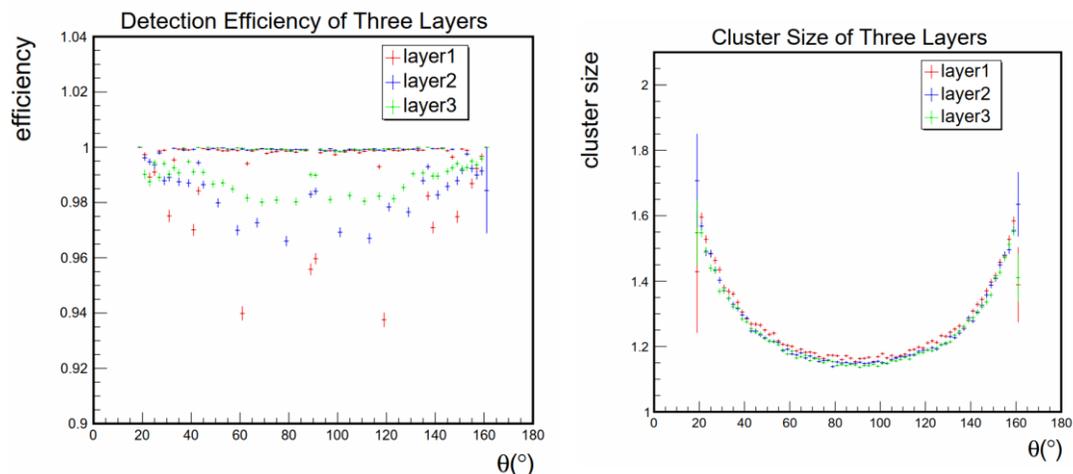


## ● 像素结构



- 探测器结构
  - 接收度  $20^\circ - 160^\circ$
  - 3层分别位于半径 36mm, 98mm, 160mm处

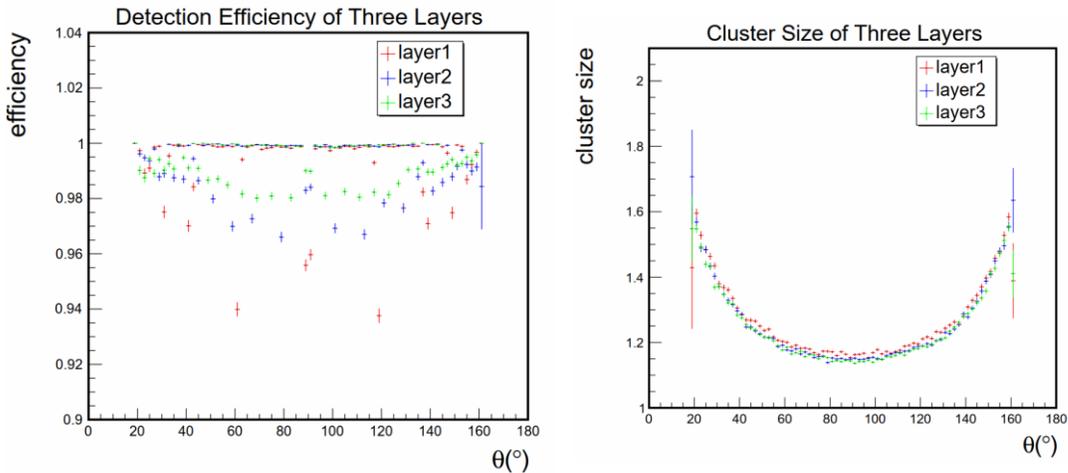
- OSCAR框架下已经实现了ITKM全模拟
- 能够详细模拟MAPS的信号产生过程，提供准确的击中信息



- 但是高精度的模拟内存和时间开销大
  - 加载场文件占用的内存达到1.1G，占STCF模拟平均内存占用的37%
  - 单事例模拟平均用时~5.7s，占STCF所有子探测器模拟总用时的~85%

亟需优化算法的计算性能  
以满足STCF模拟需求!

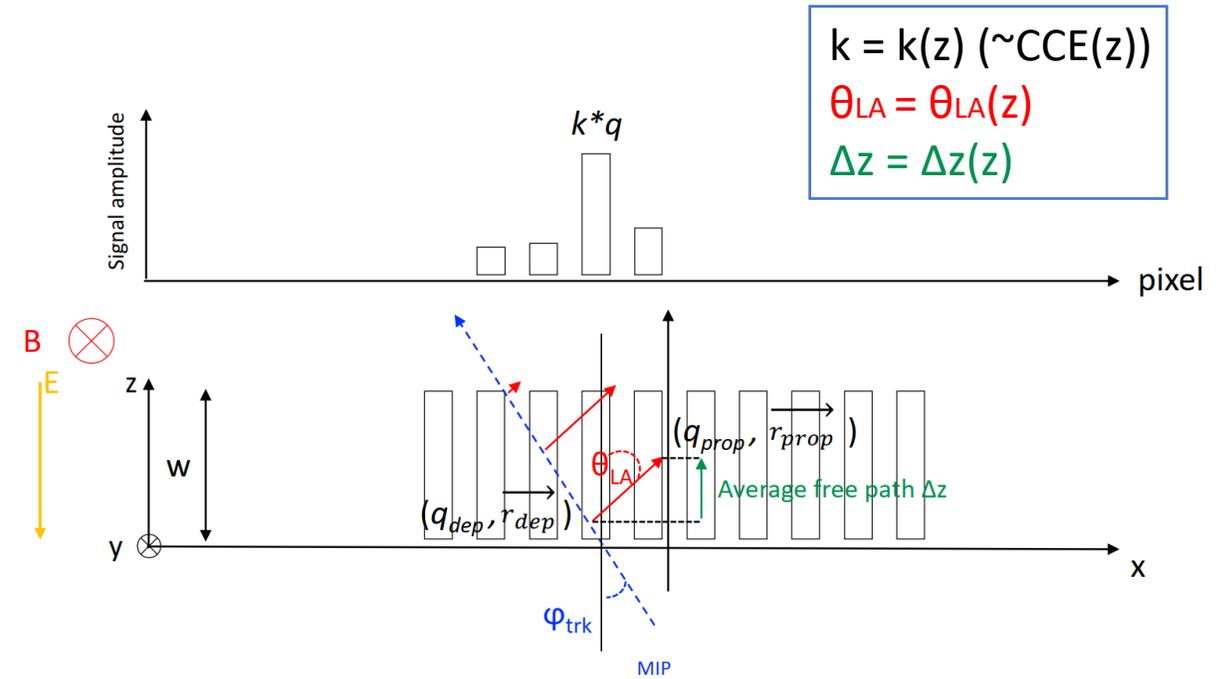
- OSCAR框架下已经实现了ITKM全模拟
- 能够详细模拟MAPS的信号产生过程，提供准确的击中信息



- 但是高精度的模拟内存和时间开销大
  - 加载场文件占用的内存达到1.1G，占STCF模拟平均内存占用的37%
  - 单事例模拟平均用时~5.7s，占STCF所有子探测器模拟总用时的~85%

亟需优化算法的计算性能以满足STCF模拟需求!

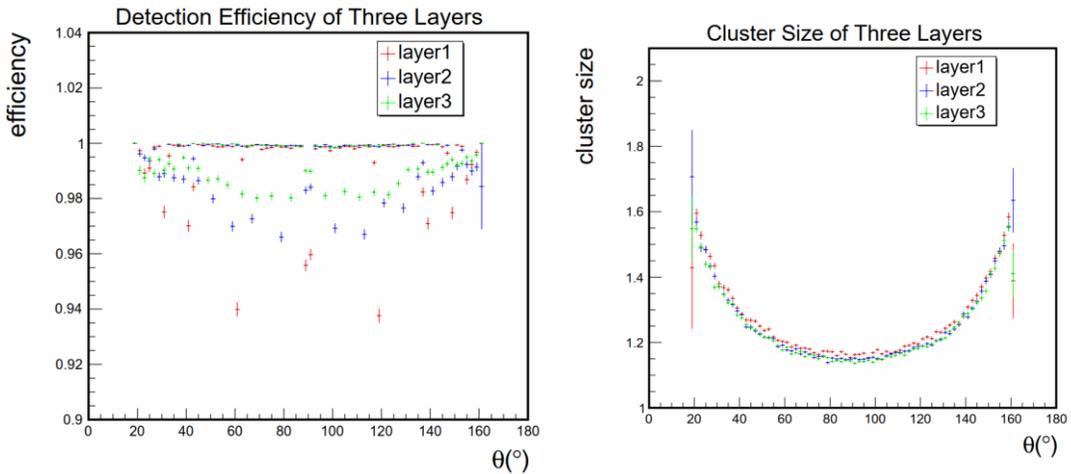
- 一种基于查找表(LUT)的硅像素探测器模拟方法:
- 应用于ATLAS上的混合型硅像素探测器
  - 在速度和结果上均展现出优异的性能



By **M. Bomben** et al.

- [Sensors 2024, 24\(12\), 3976](#)
- [PIXEL Conference 2024](#)
- [!MR1169 Allpix<sup>2</sup>](#)

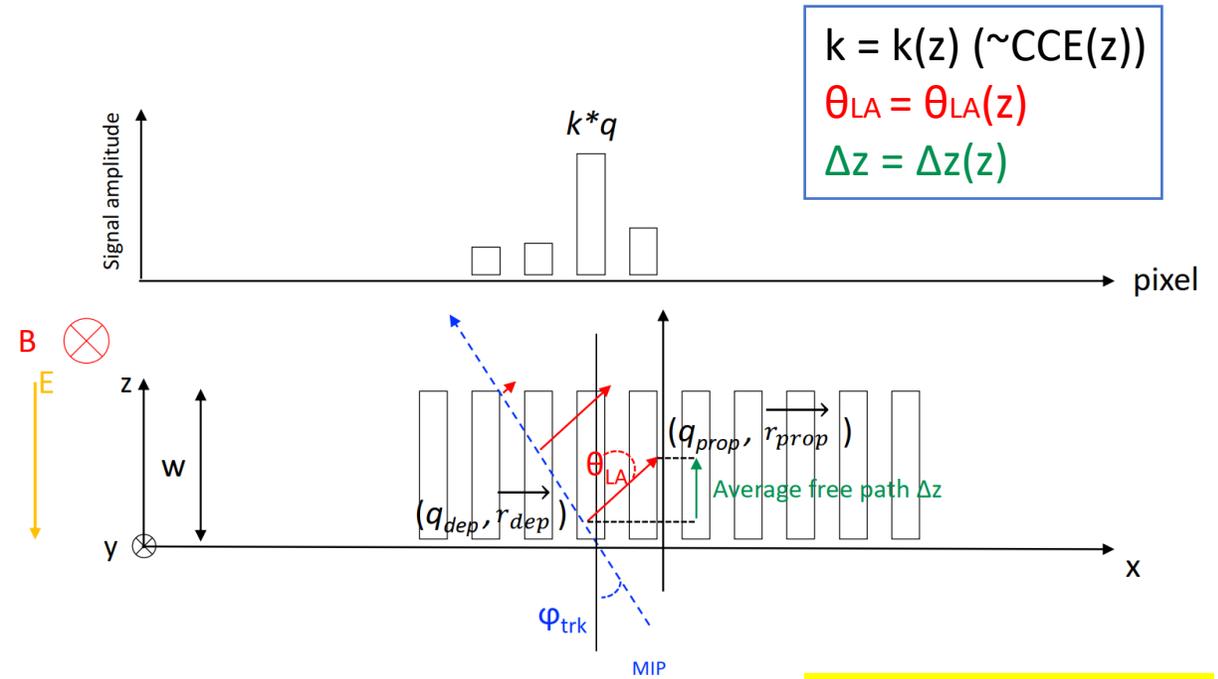
- OSCAR框架下已经实现了ITKM全模拟
- 能够详细模拟MAPS的信号产生过程，提供准确的击中信息



- 但是高精度的模拟内存和时间开销大
  - 加载场文件占用的内存达到1.1G，占STCF模拟平均内存占用的37%
  - 单事例模拟平均用时~5.7s，占STCF所有子探测器模拟总用时的~85%

亟需优化算法的计算性能以满足STCF模拟需求!

- 一种基于查找表(LUT)的硅像素探测器模拟方法：
  - 应用于ATLAS上的混合型硅像素探测器
  - 在速度和结果上均展现出优异的性能



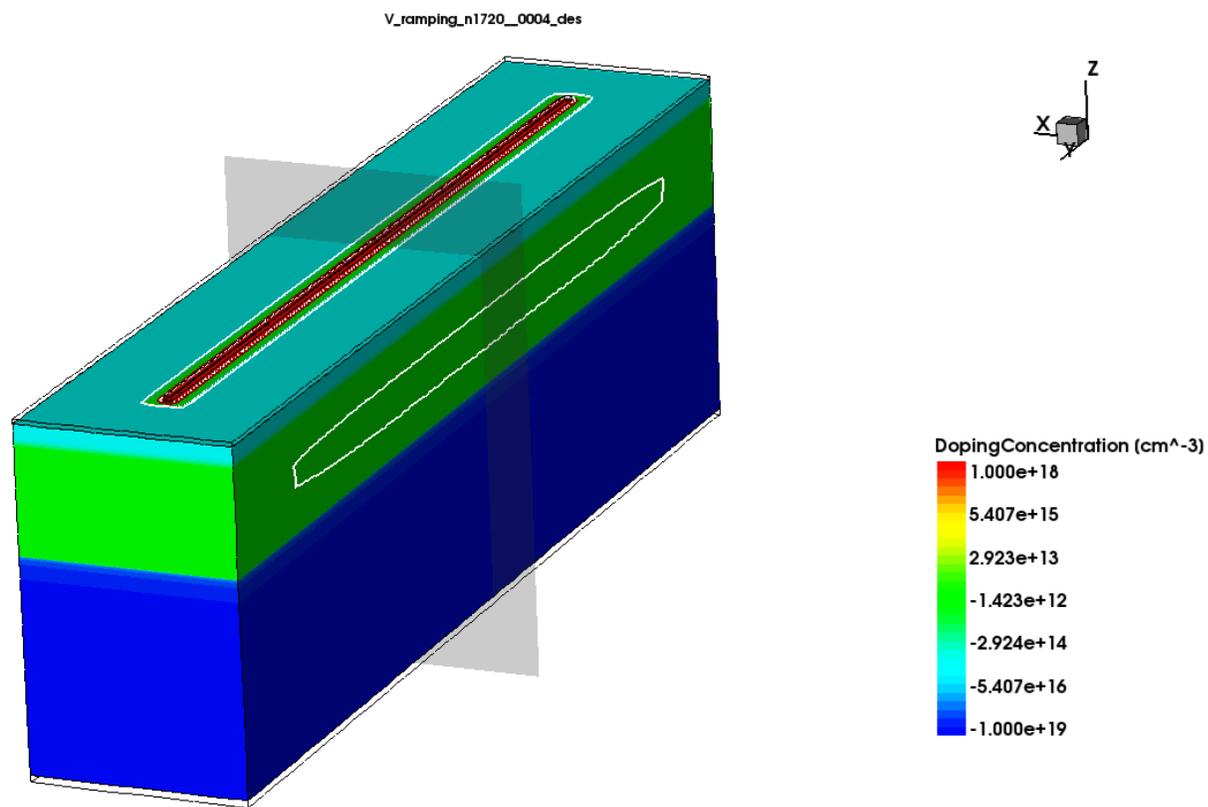
By **M. Bomben** et al.  
• [Sensors 2024, 24\(12\), 3976](#)  
• [PIXEL Conference 2024](#)  
• [!MR1169 Allpix<sup>2</sup>](#)

能否、如何将LUT算法应用到MAPS探测器上?

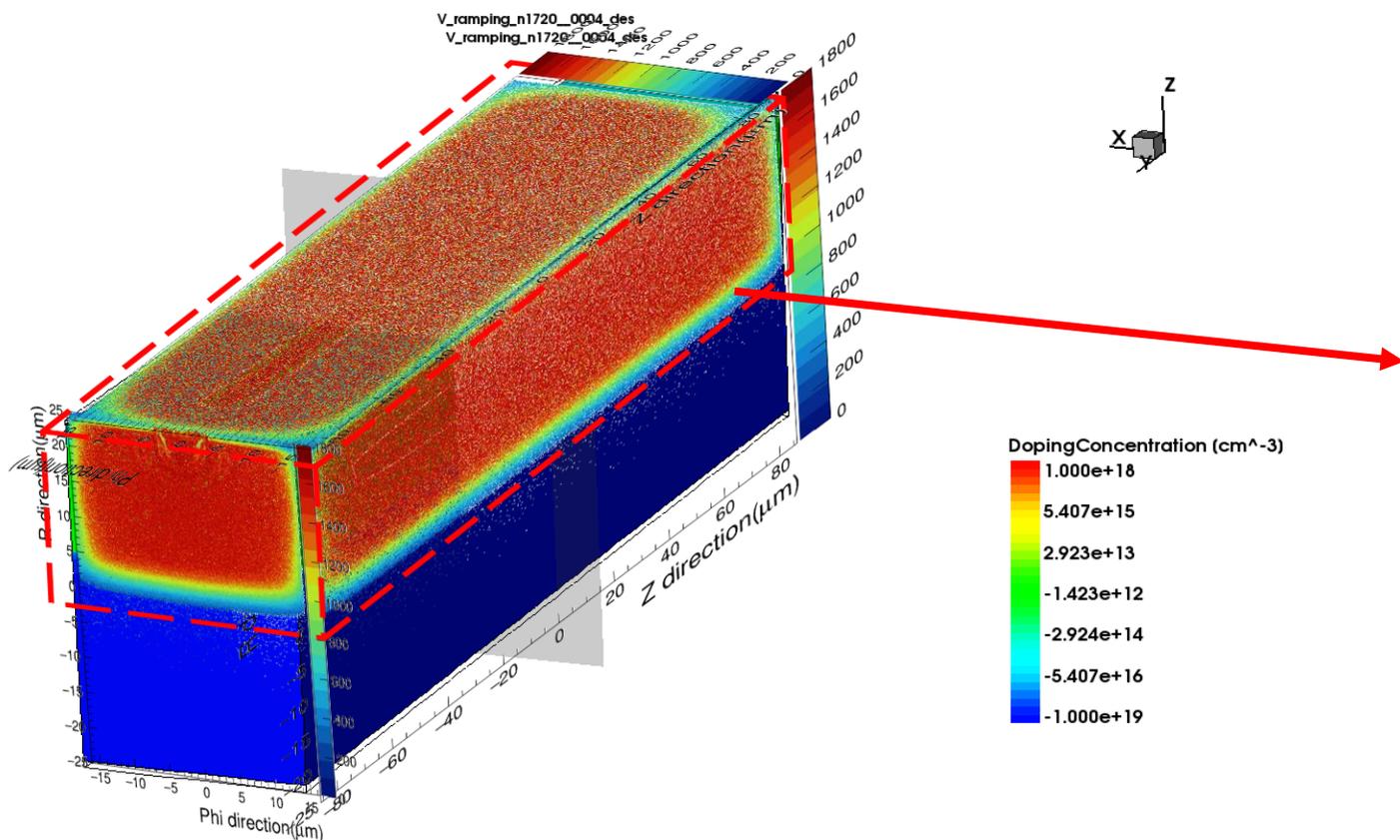
- MAPS的重要特点在于电荷收集的不充分
- 需要使用全部三个维度的坐标来刻画电荷收集情况，根据电荷沉积所在位置，直接计算收集电荷量

对于STCF基准像素方案：

- 像素大小 $170\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
- 厚度 $50\mu\text{m}$ ，包括 $20\mu\text{m}$ 高阻外延层



- MAPS的重要特点在于电荷收集的不充分
- 需要使用全部三个维度的坐标来刻画电荷收集情况，根据电荷沉积所在位置，直接计算收集电荷量



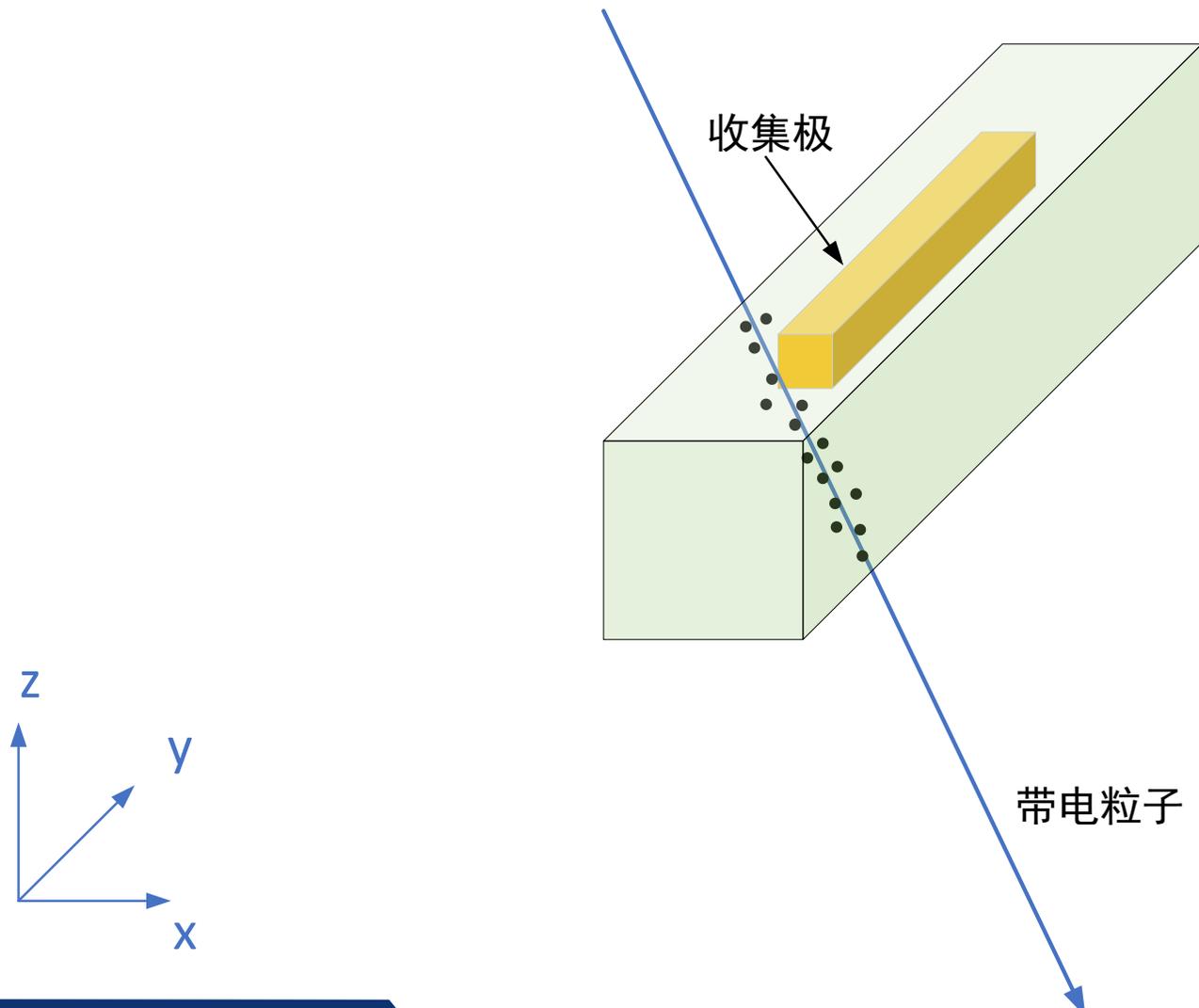
对于STCF基准像素方案:

- 像素大小170μm\*30μm
- 厚度50μm, 包括20μm高阻外延层

Fe-55模拟得到在像素内不同位置上的沉积电荷的收集量

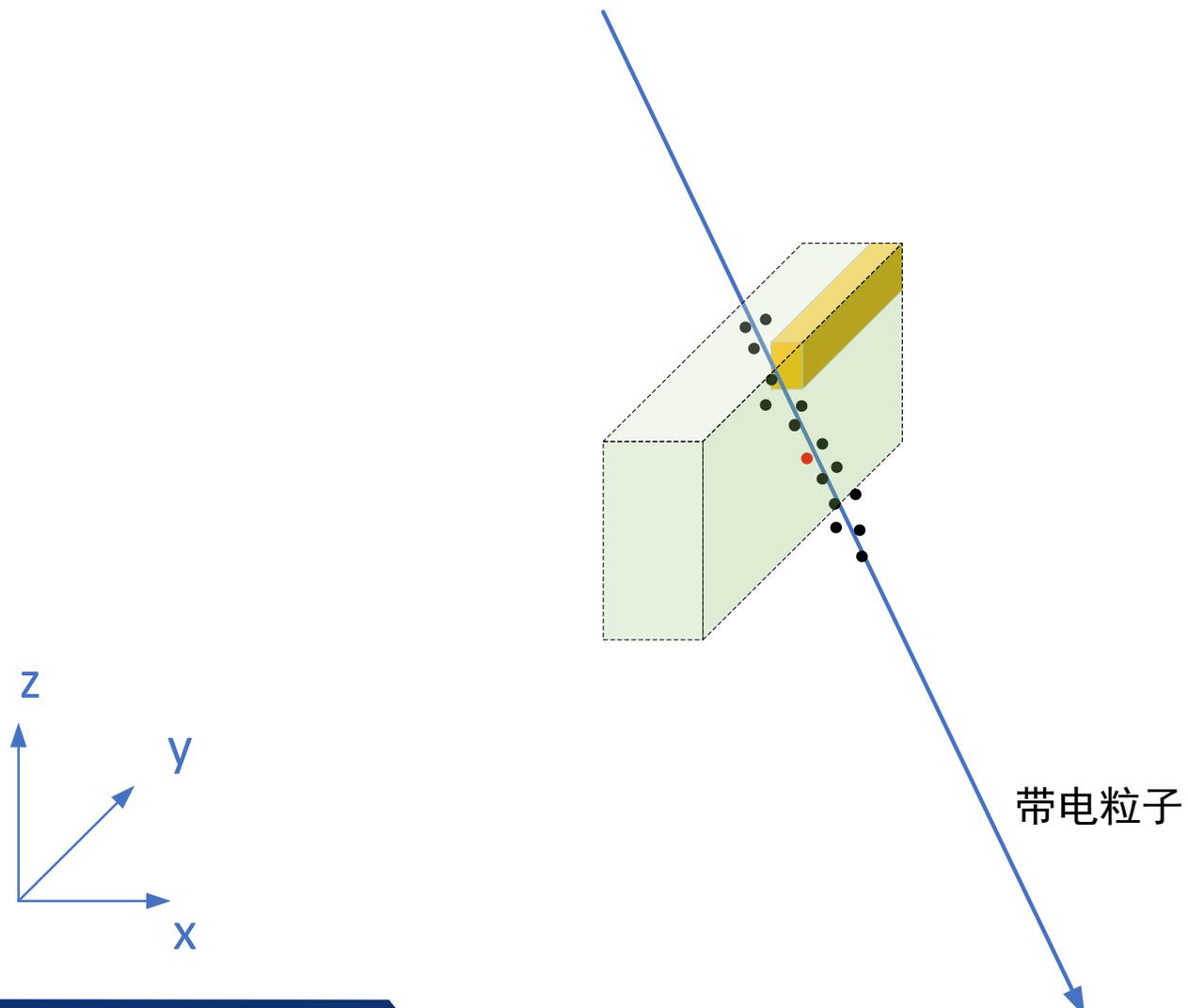
- 仅外延层-衬底边界以上部分的电荷可以被收集到
- **构建LUT时仅需考虑此范围内的电荷**

带电粒子在像素内电离沉积能量



带电粒子在像素内电离沉积能量

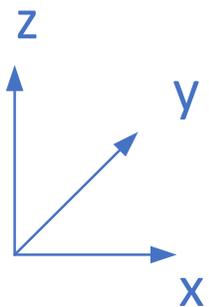
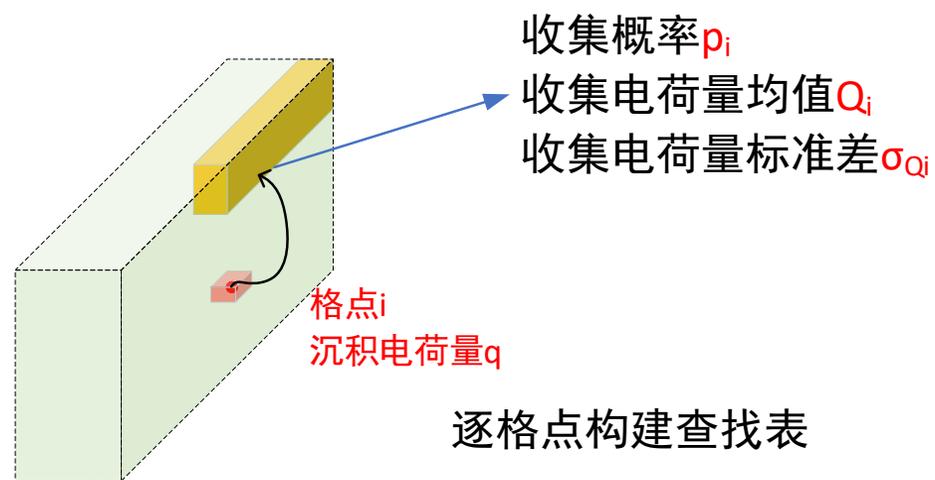
由于对称性，仅需考虑1/4个像素的情况



带电粒子在像素内电离沉积能量

由于对称性，仅需考虑1/4个像素的情况

将像素按照格点划分，对于产生于任意格点*i*内的**给定**电荷量 $q$ ，全模拟得到对应的电荷收集性能

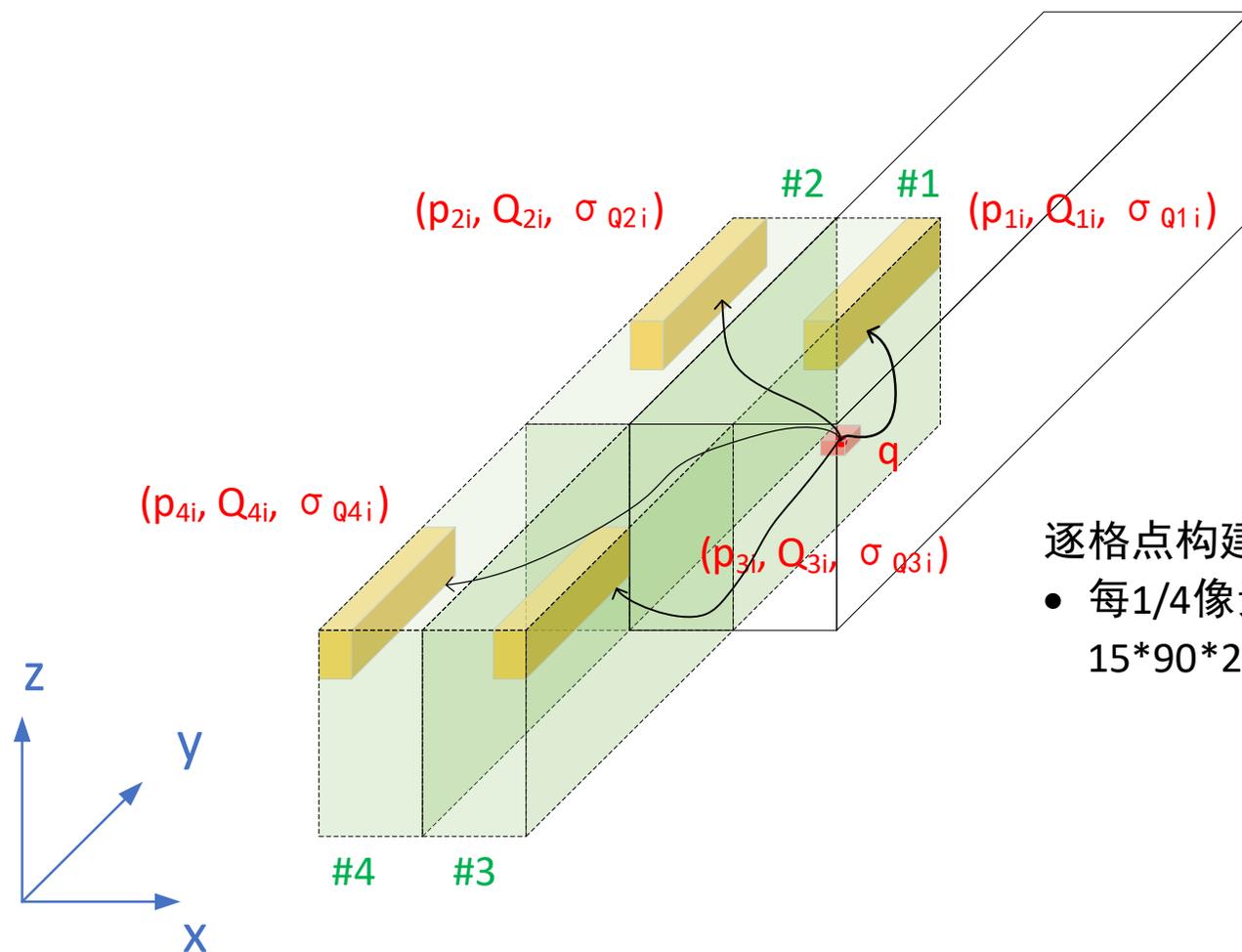


带电粒子在像素内电离沉积能量

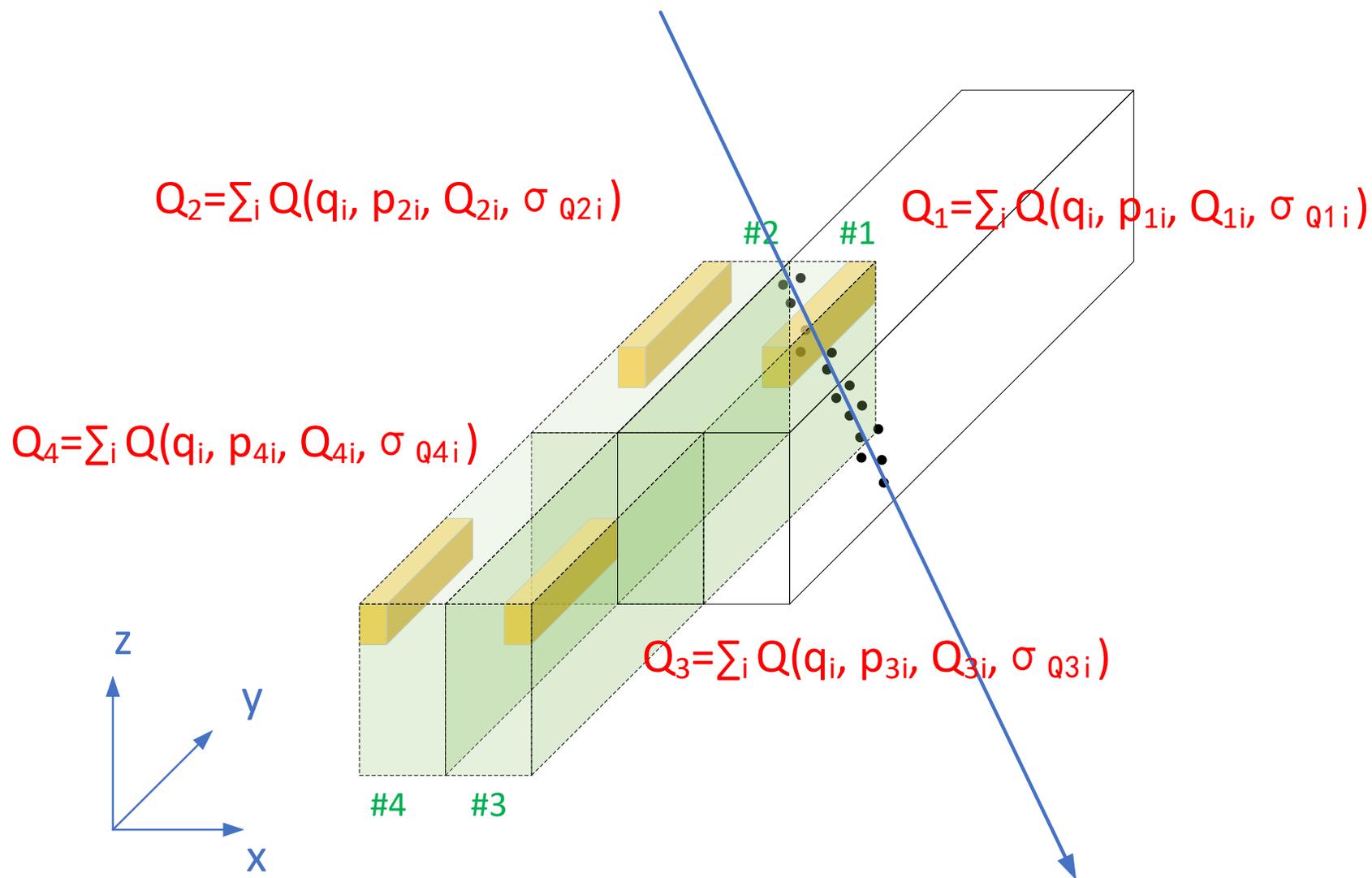
由于对称性，仅需考虑1/4个像素的情况

将像素按照格点划分，对于产生于任意格点*i*内的**给定**电荷量 $q$ ，全模拟得到对应的电荷收集性能

每个格点对于当前像素以及3个相邻像素进行模拟得到三参数



逐格点构建查找表  
• 每1/4像素划分为  
15\*90\*25格点



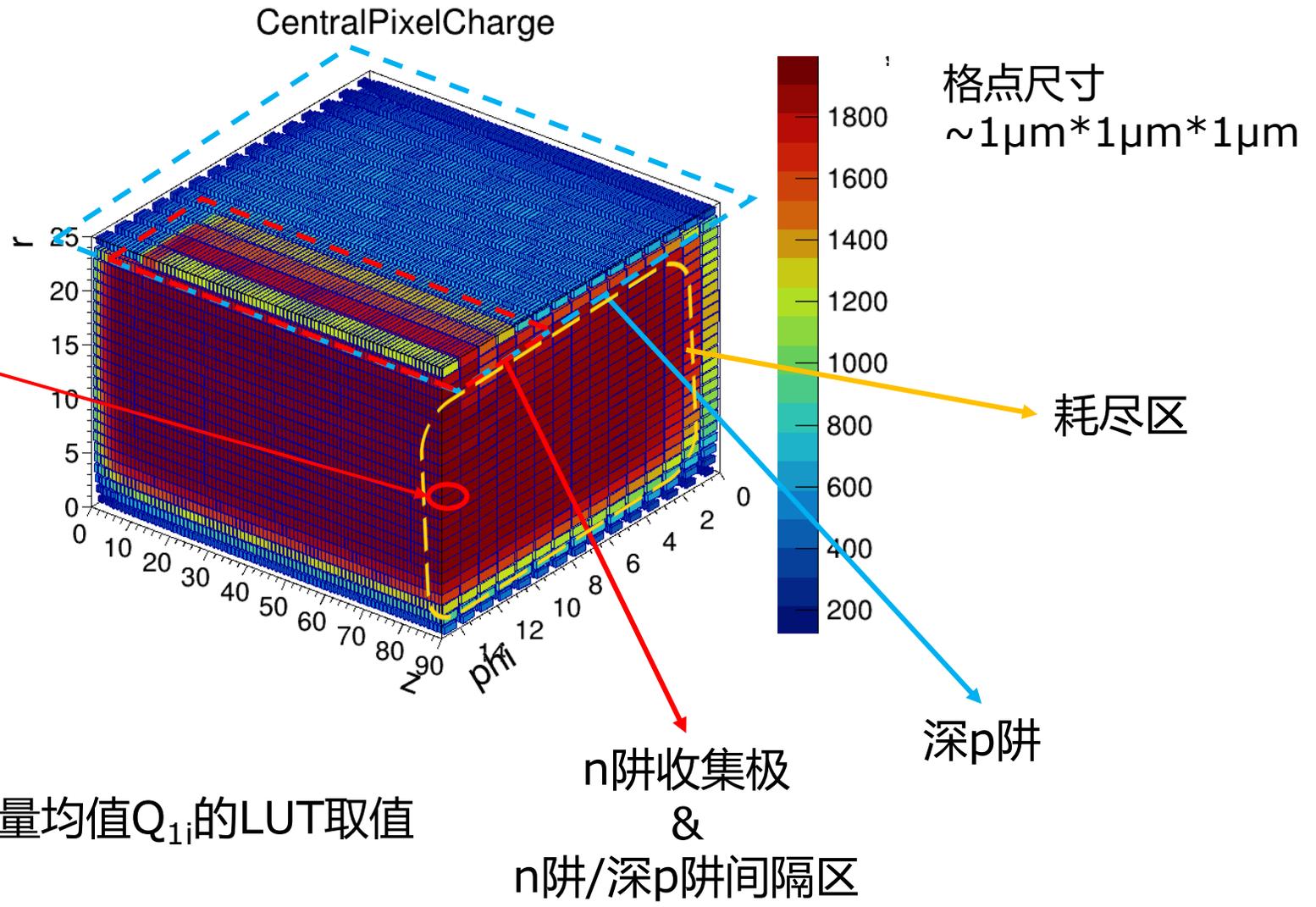
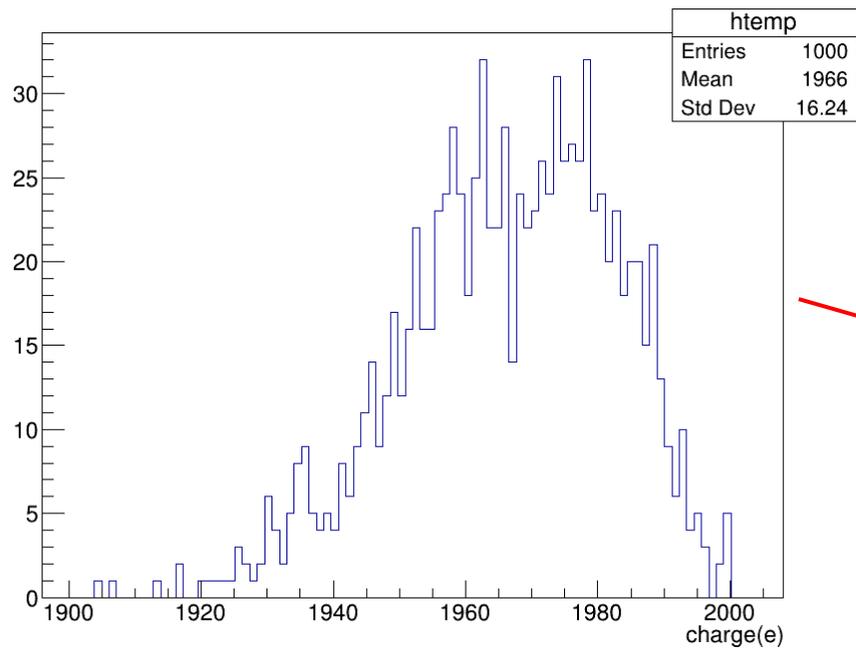
带电粒子在像素内电离沉积能量

由于对称性，仅需考虑1/4个像素的情况

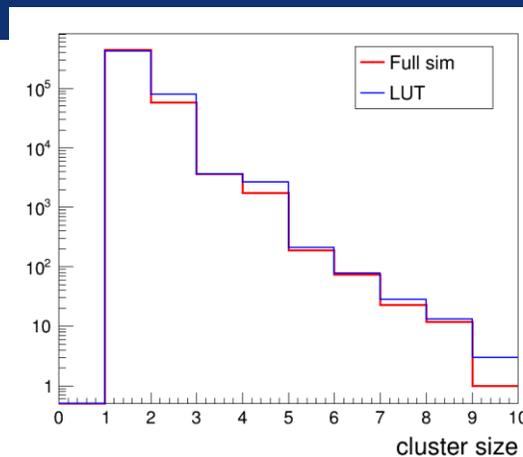
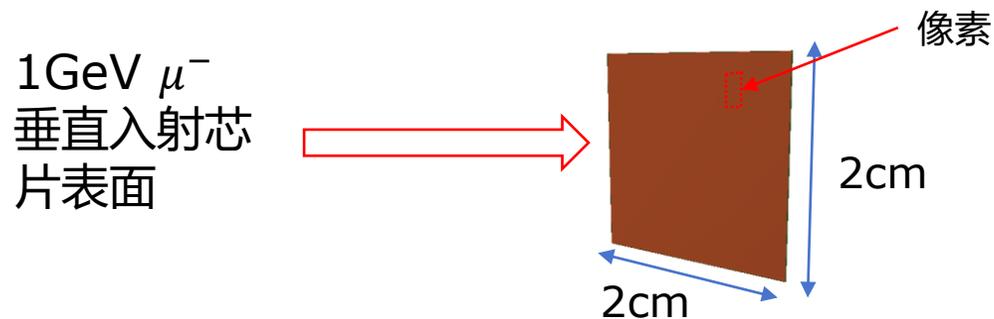
将像素按照格点划分，对于产生于任意格点*i*内的**给定**电荷量*q*，全模拟得到对应的电荷收集性能

每个格点对于当前像素以及3个相邻像素进行模拟得到三参数

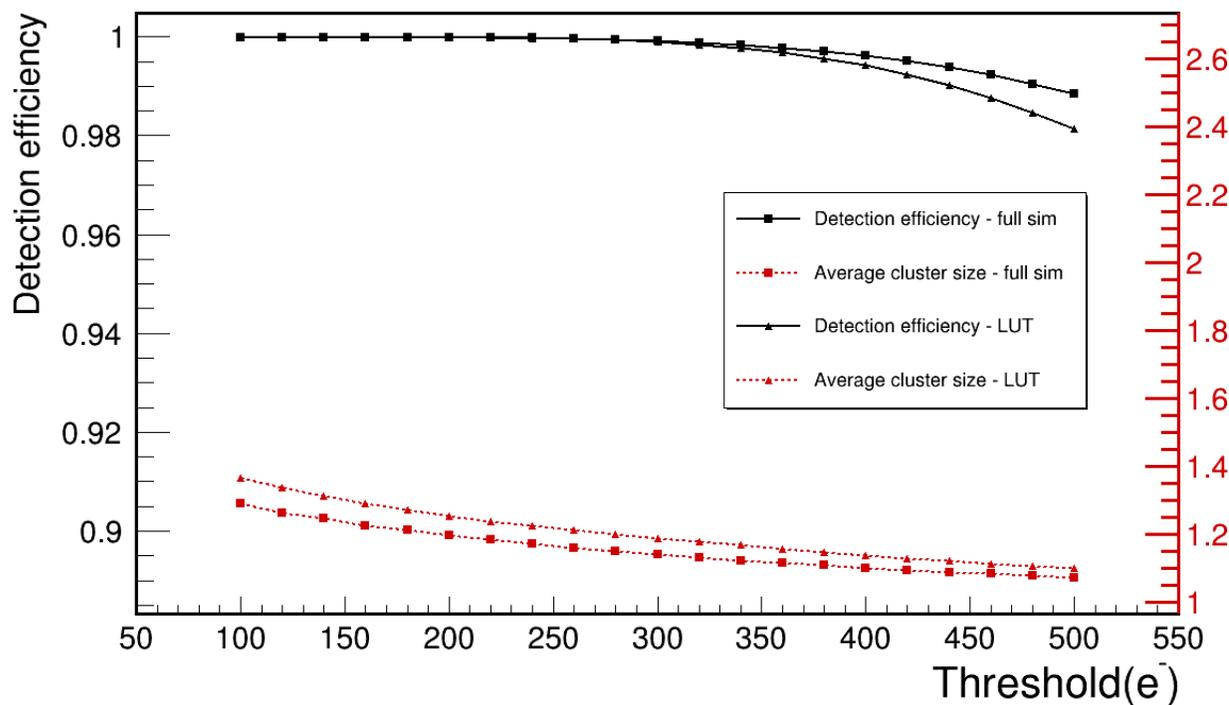
累加径迹上的所有电离团的响应，得到各个像素的收集电荷量



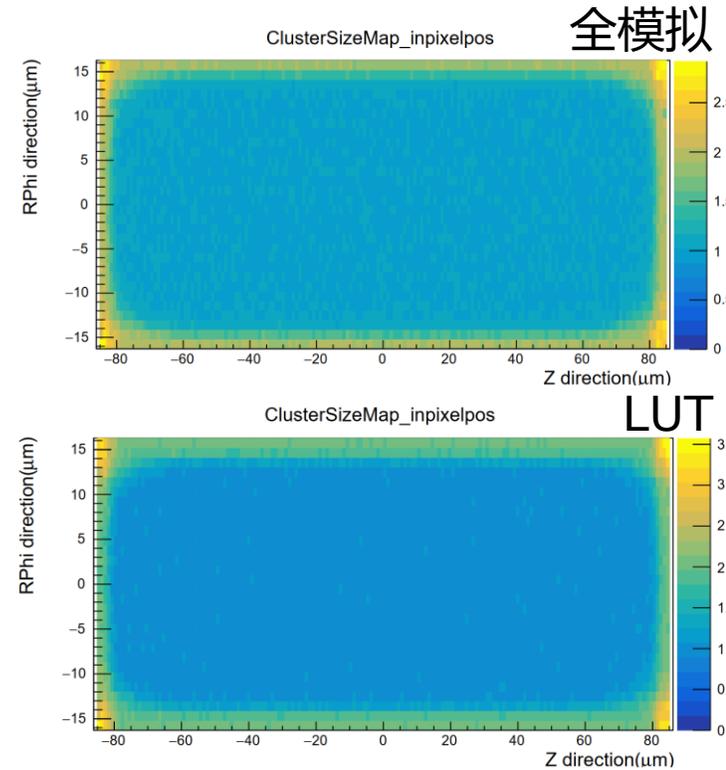
- 中心像素（像素#1）的收集电荷量均值 $Q_{1i}$ 的LUT取值
- 每格点注入的电荷量为 $2000e^-$



簇团大小分布



- 探测效率差异 < 1%
- 平均簇团大小差异 < 6%



像素内簇团大小

## 模拟结果 (单粒子1GeV $\mu^-$ 各向同性出射)

### 探测效率(簇团大小)

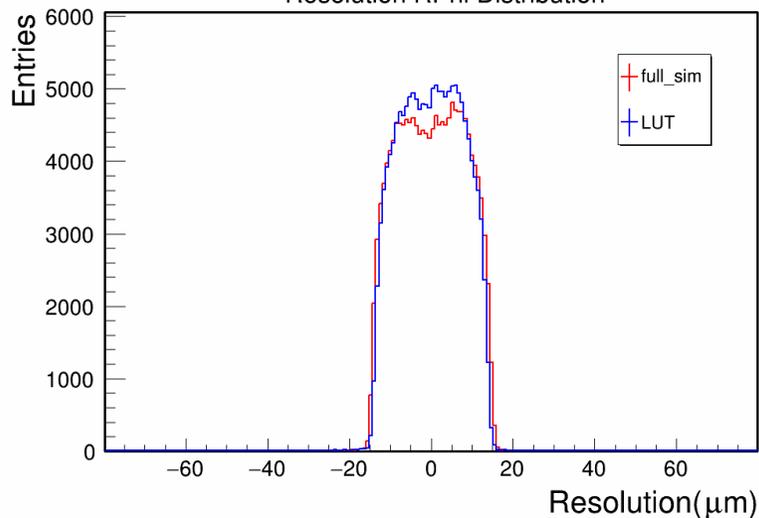
	Layer1	Layer2	Layer3
全模拟	99.32%(1.24)	99.33%(1.22)	99.36%(1.22)
LUT	99.30%(1.28)	99.33%(1.27)	99.35%(1.26)

## 计算性能 (psi(2S)->pipimumu物理事例)

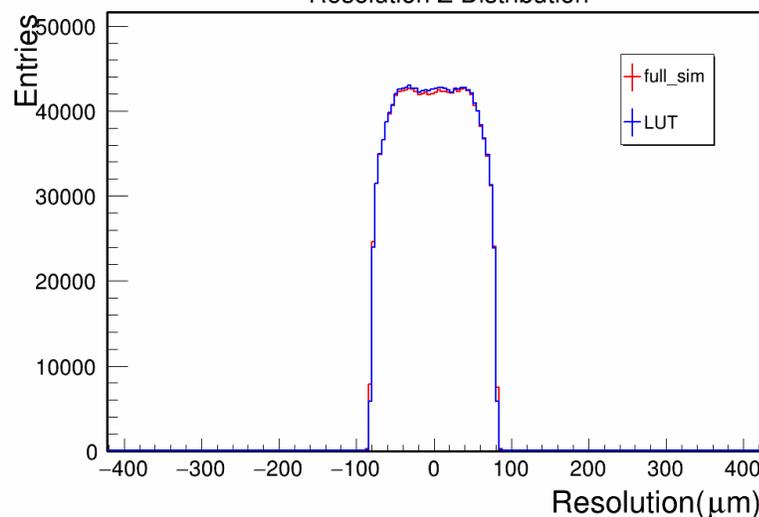
算法	耗时 (/event)	占用内存
全模拟	5.7s	1.1G
LUT	<b>2.5ms</b>	<b>40M</b>
LUT/全模拟	<b>0.044%</b>	<b>3.6%</b>

### 分辨性能

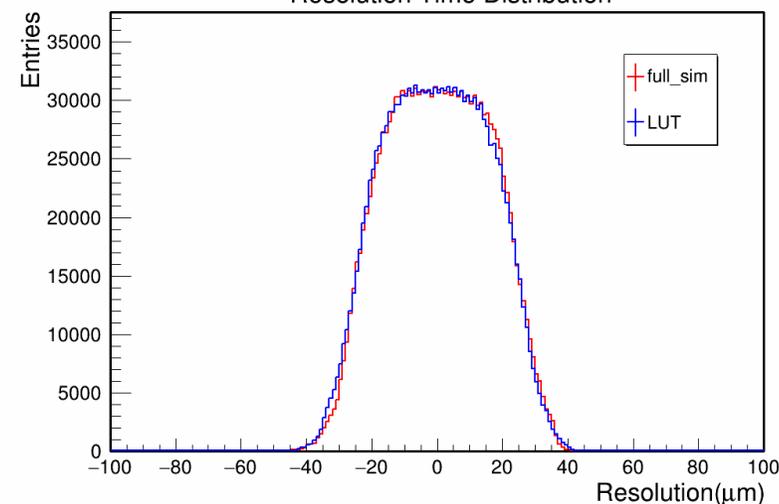
Resolution RPhi Distribution



Resolution Z Distribution



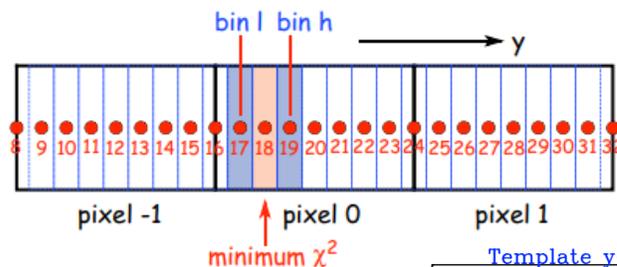
Resolution Time Distribution



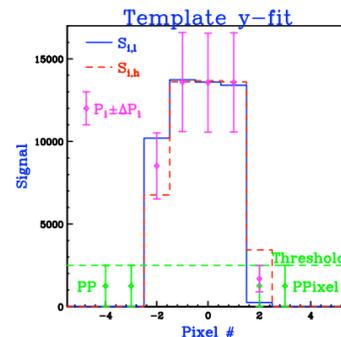
## 像素探测器常用的簇团重建方法

### 几何/电荷重心法

- 算法简单、稳定
- 对少击中cluster重建精度有限
- 对于电荷非完全收集型像素探测器 (如MAPS) 结果变差

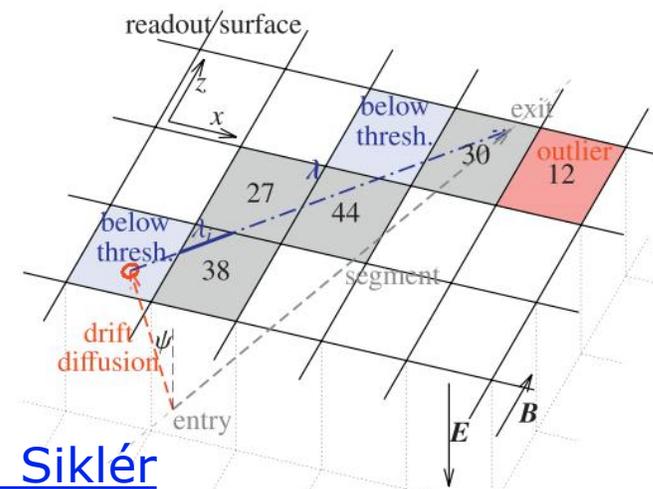


M. Swartz



### 模板匹配法

- 充分利用所有像素的测量信息
- 可以根据测试结果调整模板, 以实现更优的重建效果
- 算法较复杂, 精度取决于模板的数量
- 要求在像素XY方向的电荷分布独立, 难以适用于MAPS



F. Siklér

### 基于径迹段电离能损分布的最大似然法

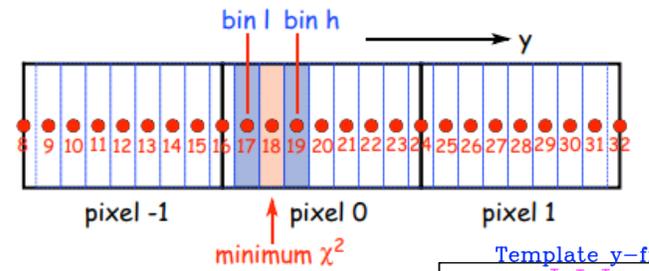
- 充分利用所有像素的测量信息
- 基于物理原理, 可以实现理论上的极限结果
- 算法复杂度高
- 性能依赖于对理论能量沉积分布的精确参数化
- 要求沉积电荷完全收集, 难以适用于MAPS

# LUT的其它用途?

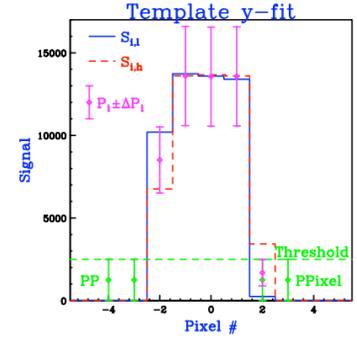
## 像素探测器常用的簇团重建方法

### 几何/电荷重心法

- 算法简单、稳定
- 对少击中cluster重建精度有限
- 对于电荷非完全收集型像素探测器 (如MAPS) 结果变差



M. Swartz

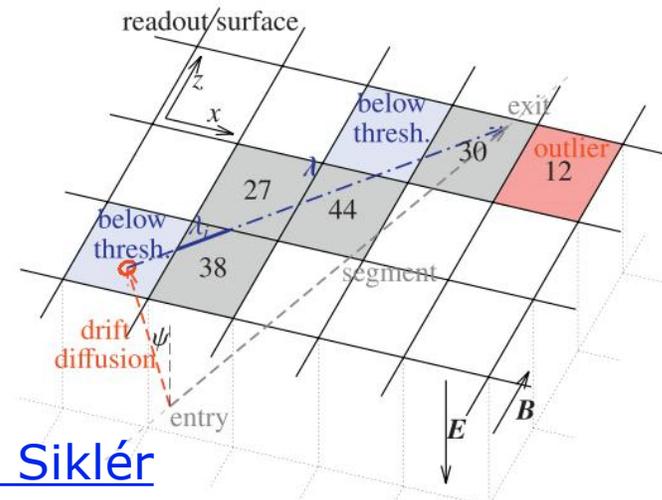


### 模板匹配法

- 充分利用所有像素的测量信息
- 可以根据测试结果调整模板, 以实现更优的重建效果
- 算法较复杂, 精度取决于模板的数量
- 要求在像素XY方向的电荷分布独立, 难以适用于MAPS



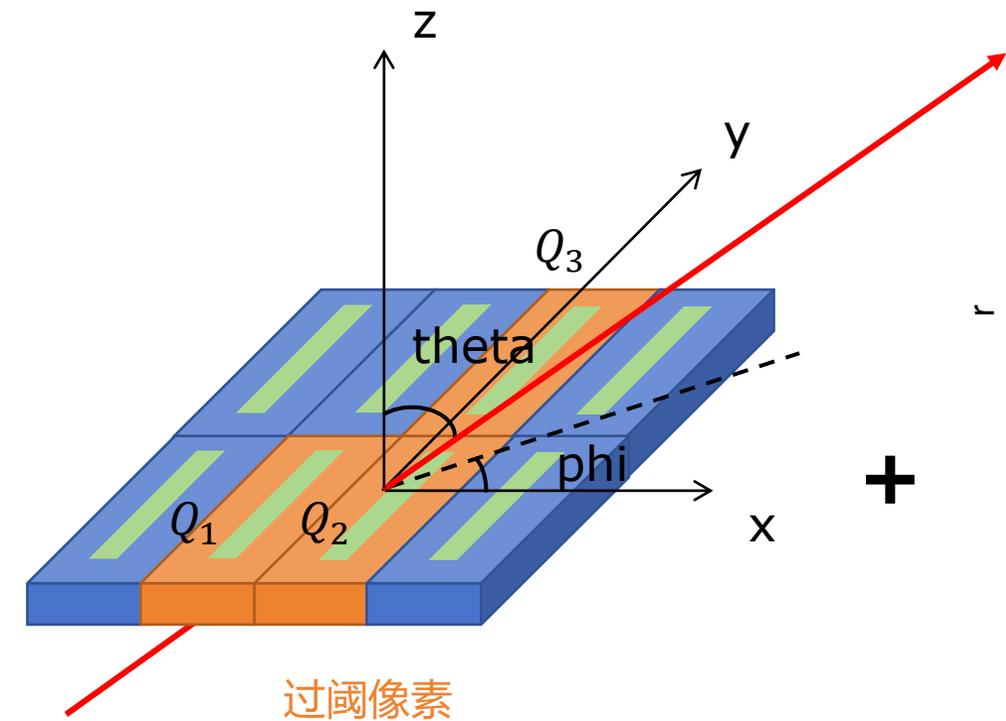
能否基于LUT实现适用于MAPS的简单高效的簇团重建方法?



F. Siklér

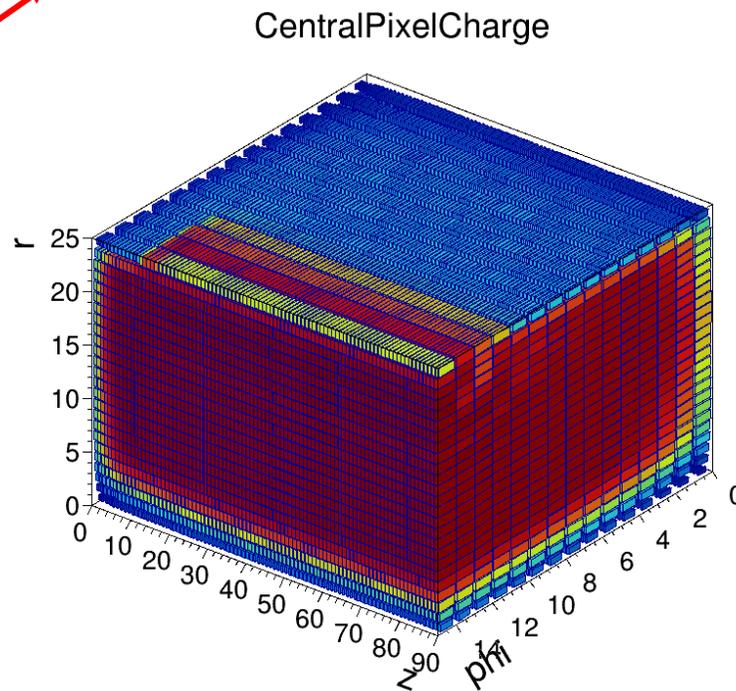
### 基于径迹段电离能损分布的最大似然法

- 充分利用所有像素的测量信息
- 基于物理原理, 可以实现理论上的极限结果
- 算法复杂度高
- 性能依赖于对理论能量沉积分布的精确参数化
- 要求沉积电荷完全收集, 难以适用于MAPS

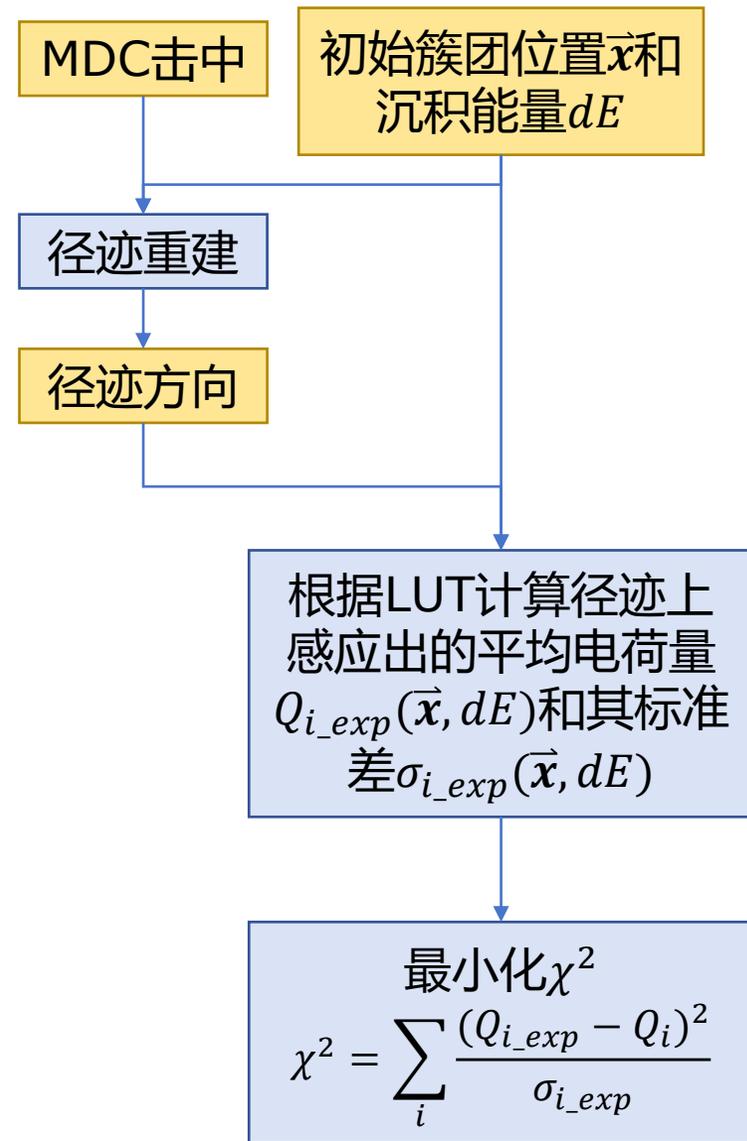


- 径迹方向
- 簇团位置
- 簇团沉积能量

+

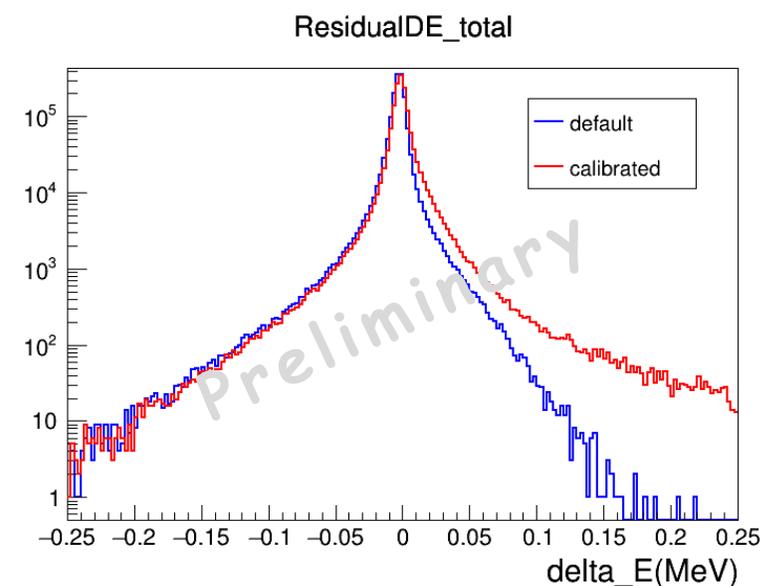
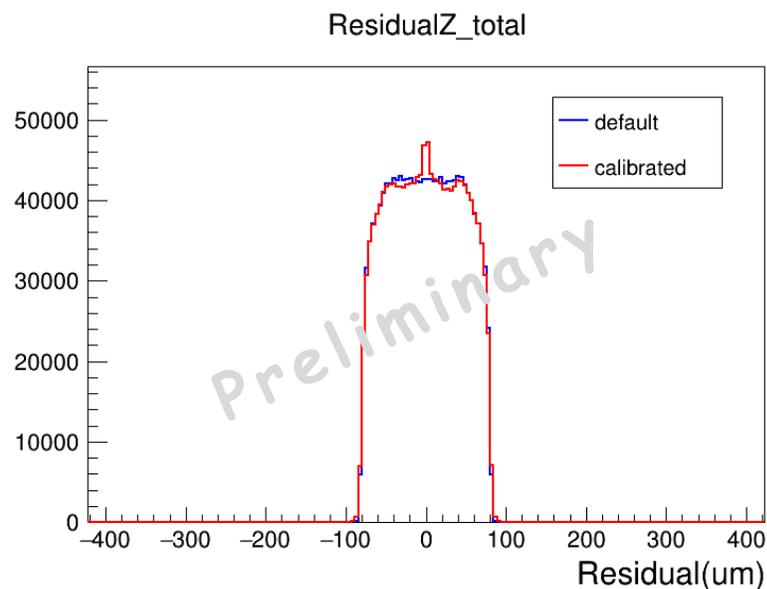
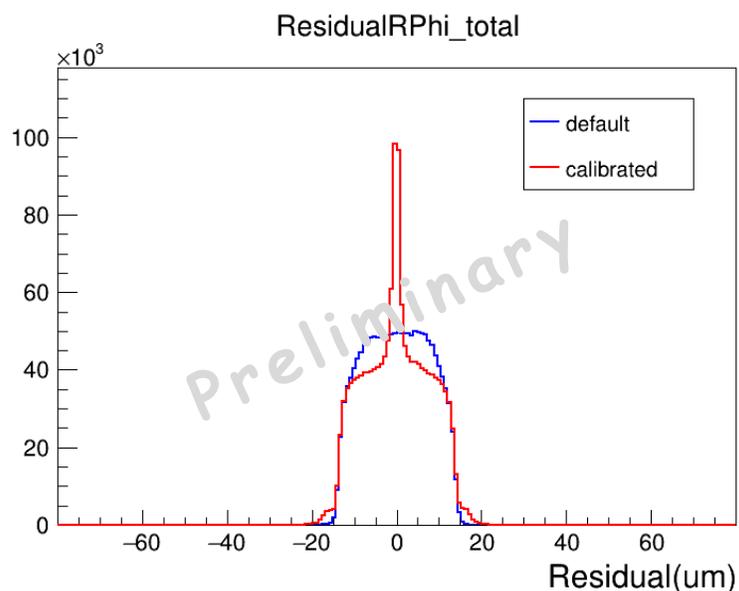


电荷收集LUT

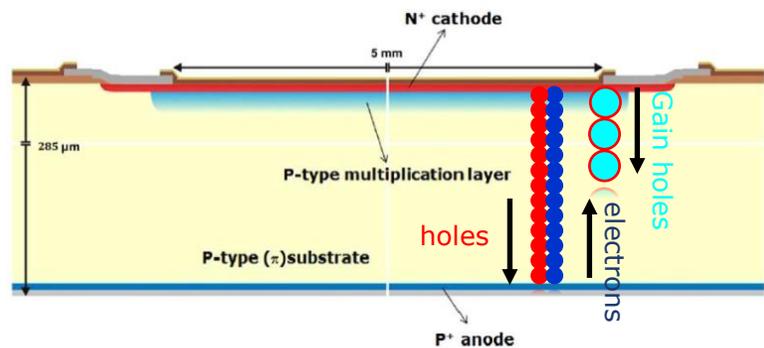


## 单粒子1GeV $\mu^-$

default=电荷重心法  
calibrated=电荷重心法+最小化算法

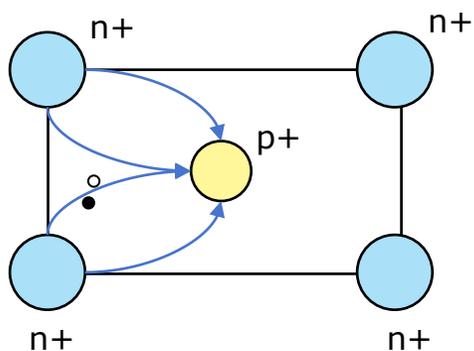
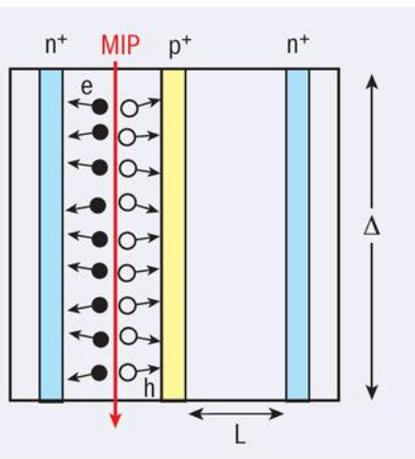
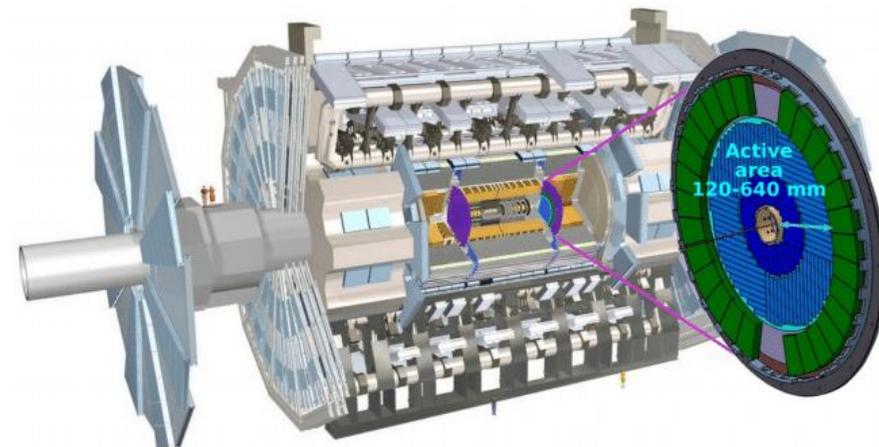


- ✓ 显著改善r-phi方向的重建残差
- ✓ 修正了能量沉积重建中心值的偏差
- ✓ 对多像素效果显著，应用于小像素预期有更大提升



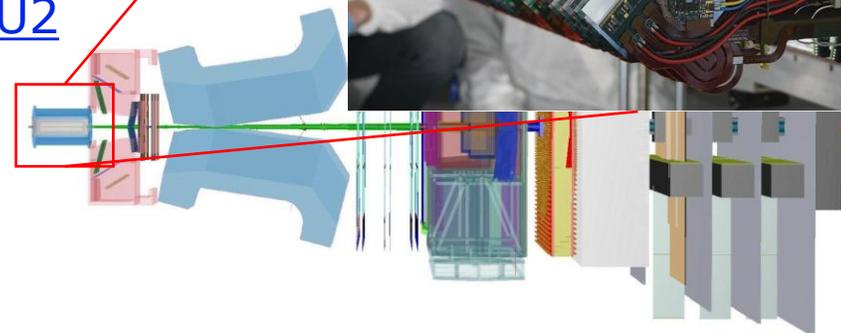
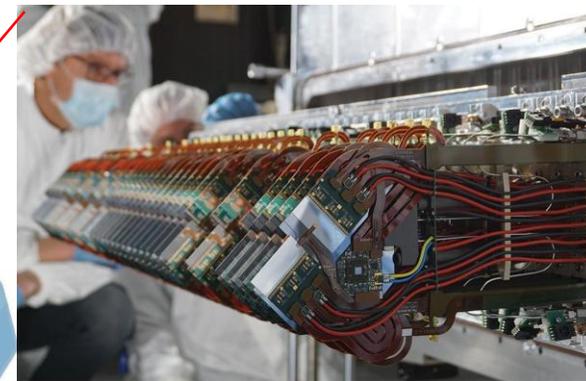
## LGAD?

- 一维 (z) / 三维 (xyz)
- LUT
- LUT参量: 电荷增益G, 到达时间t, ...
- 潜在应用: [ATLAS HGTD](#)



## 3D像素探测器?

- 二维 (xy) / 三维 (xyz)
- LUT
- LUT参量: 不同电极收集电荷量 $Q_i$ , 到达时间 $t_i$ , ...
- 潜在应用: [LHCb VELO-U2](#)



[W. Riegler 2019](#)

- STCF实验对离线探测器模拟的结果准确性和计算性能均提出了严格的要求
- OSCAR框架下实现了基于LUT的MAPS探测器快速模拟算法，在保证同等模拟精度的同时，计算速度提升三个量级以上
- 构造的LUT同时可以应用于对MAPS簇团位置和能量沉积的修正
- 此LUT方法有广泛的前景推广于众多其它半导体探测器，应用于大型物理实验的探测器快模拟

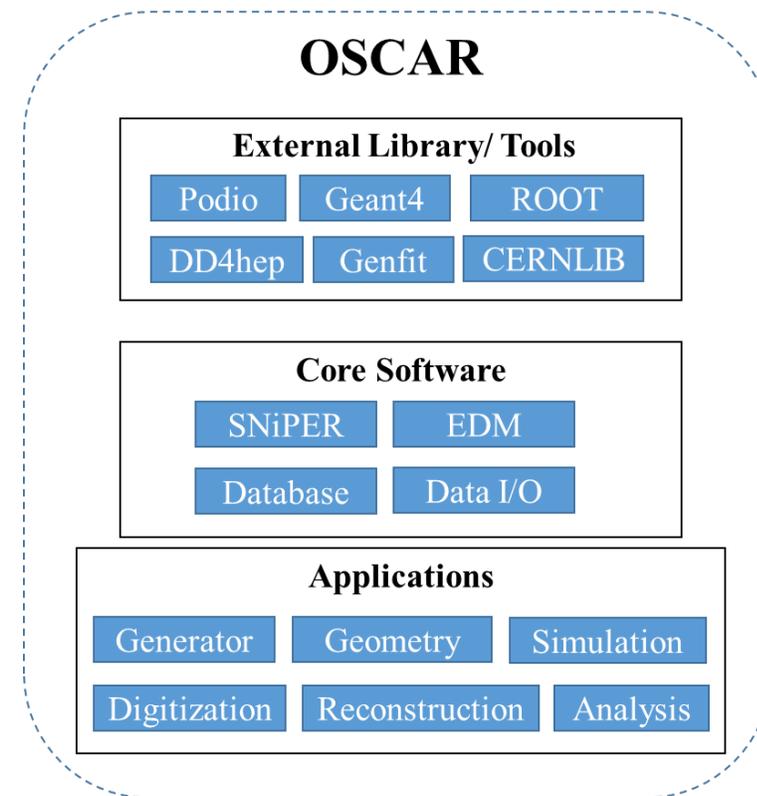
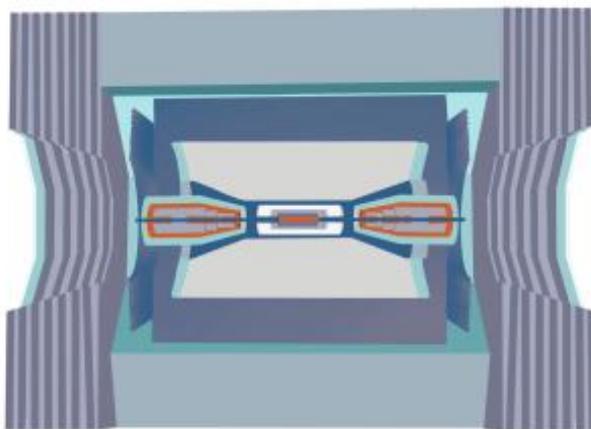
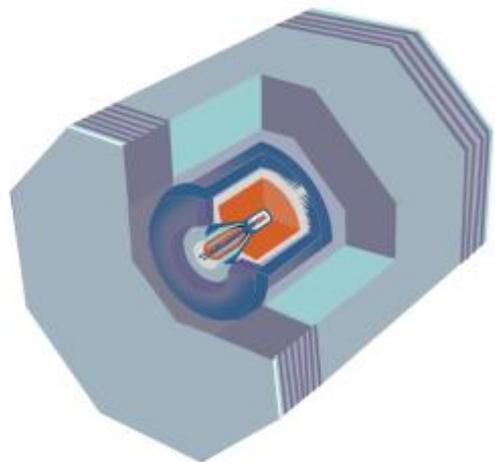
## 展望

- 结合MAPS测试，调整LUT模型
- 在束流实验中验证重建算法的性能
- 将LUT算法应用于其它尺寸、工艺的MAPS像素
- 作为模块集成到Allpix<sup>2</sup>中
- .....

**欢迎各位感兴趣的  
同行加入！**

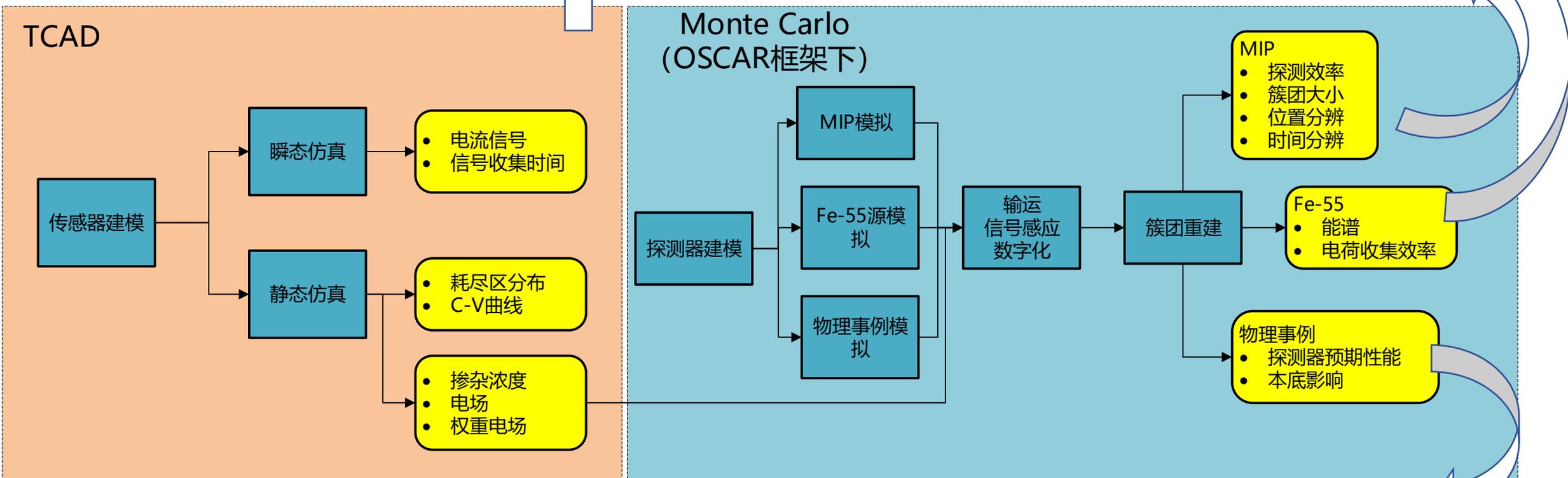
谢谢!

- OSCAR: STCF模拟&离线分析框架
- 基于SNiPER开发, 集成了Geant4, root, DD4hep等外部库
- 包含: 各子探测器的模拟、数字化、重建流程, 物理事例重建、分析



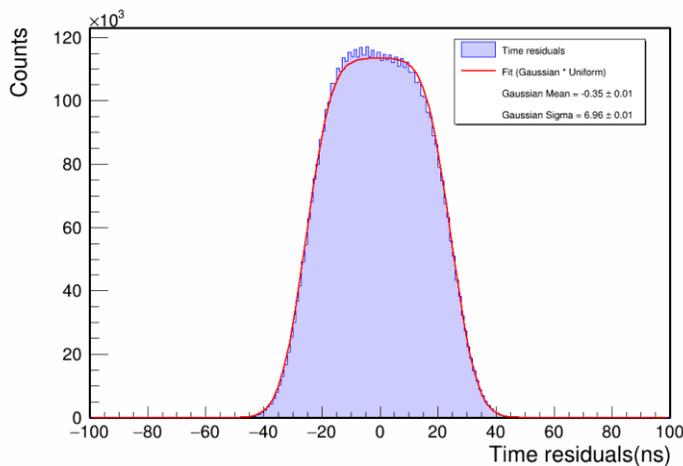
## 完整的模拟链条 (TCAD+MC)

- 传感器结构&工艺参数优化
- 模拟-实验对比

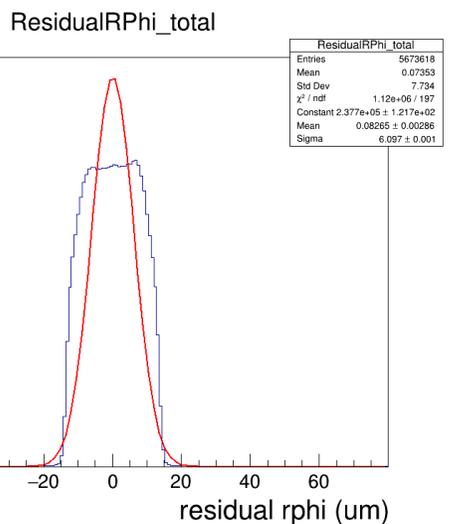


- 探测器结构优化
- 径迹重建
- 径迹dE/dx信息
- STCF探测器全模拟

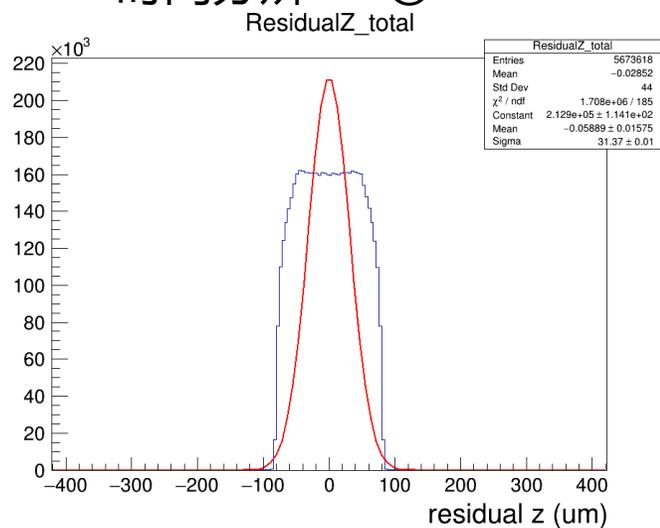
- psi(2S)->pipimumu事例
- 考虑预期束流、物理本底



时间分辨  $7.0 \times 25\text{ns}$

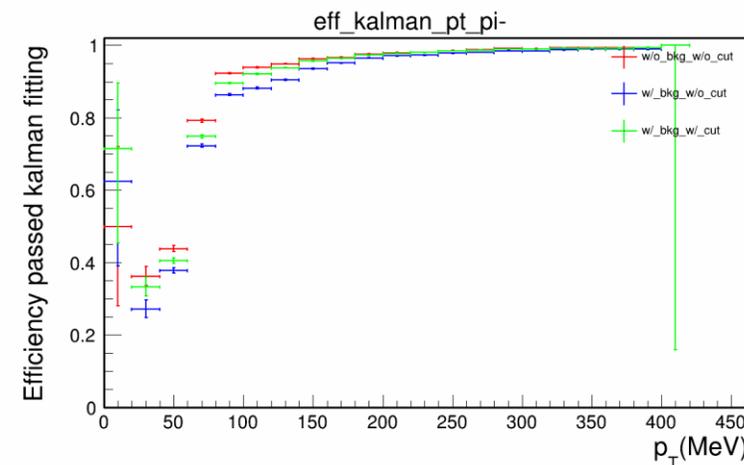
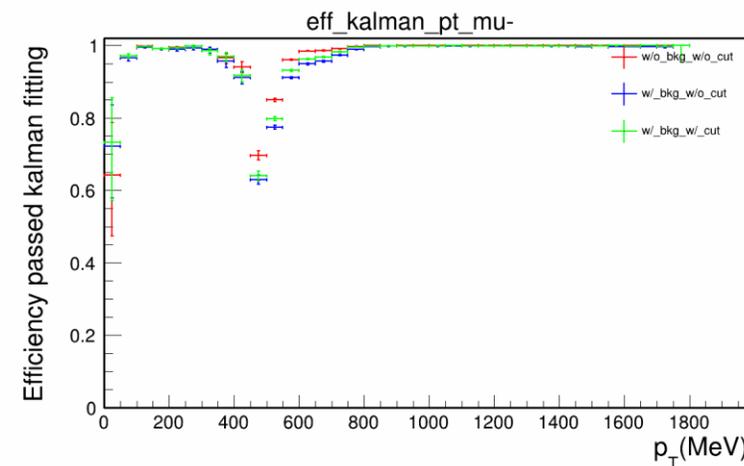


r-phi方向位置分辨  $6.1\mu\text{m}$



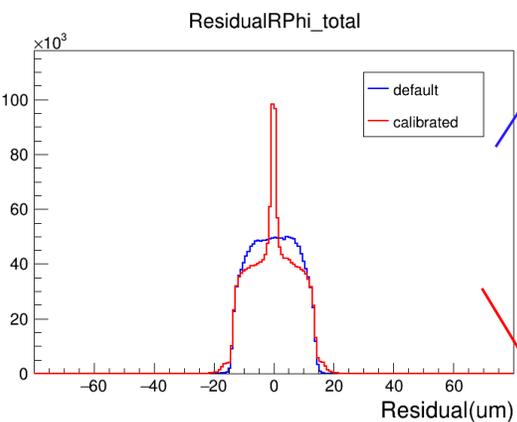
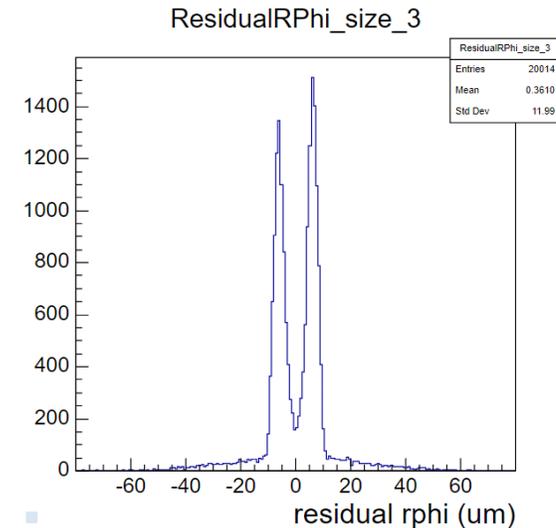
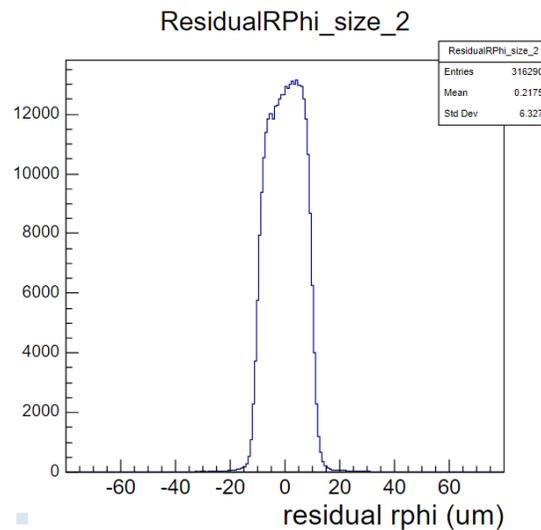
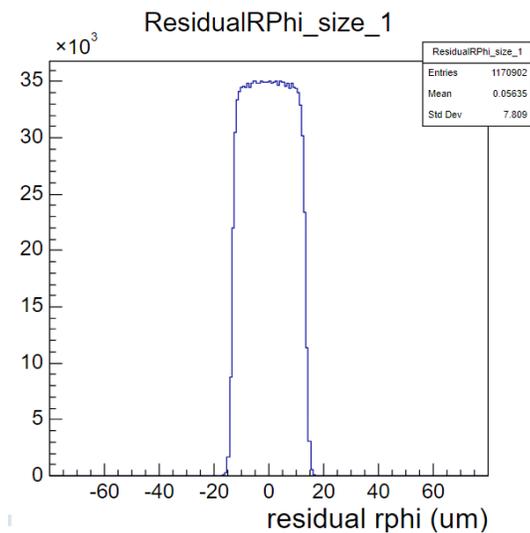
z方向位置分辨  $31.4\mu\text{m}$

## ITKM+MDC径迹拟合效率

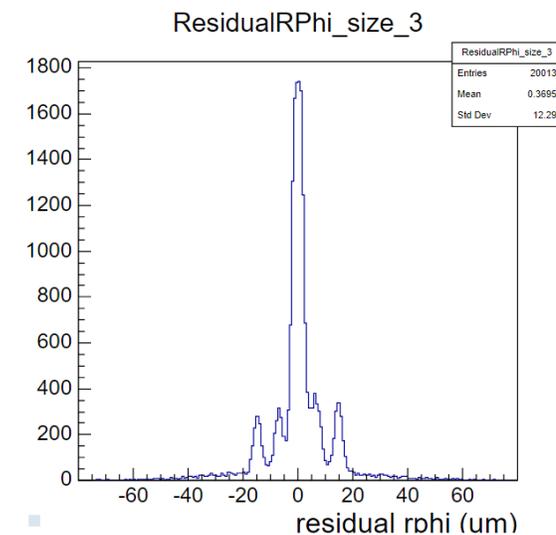
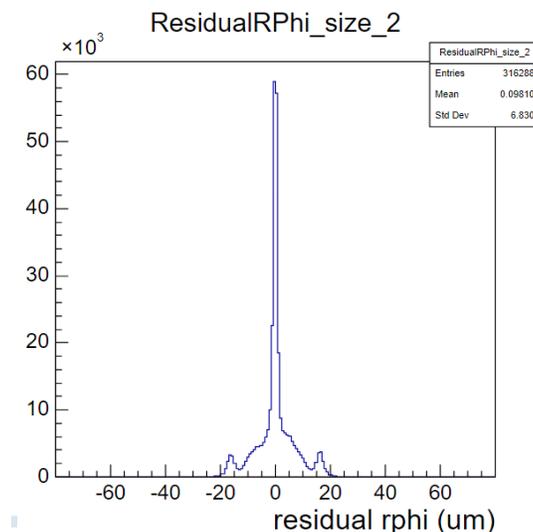
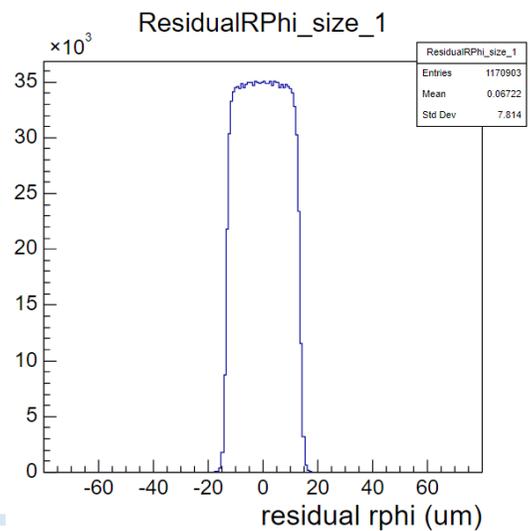


# R-Phi残差的解释

电荷重心法



电荷重心法  
+  
最小化算法



cluster size=1

cluster size=2

cluster size=3