



# 基于碲锌镉探测器和贝叶斯迭代Unfolding算法 还原环境 $\gamma$ 本底通量谱

刘泰员

2023/07/14

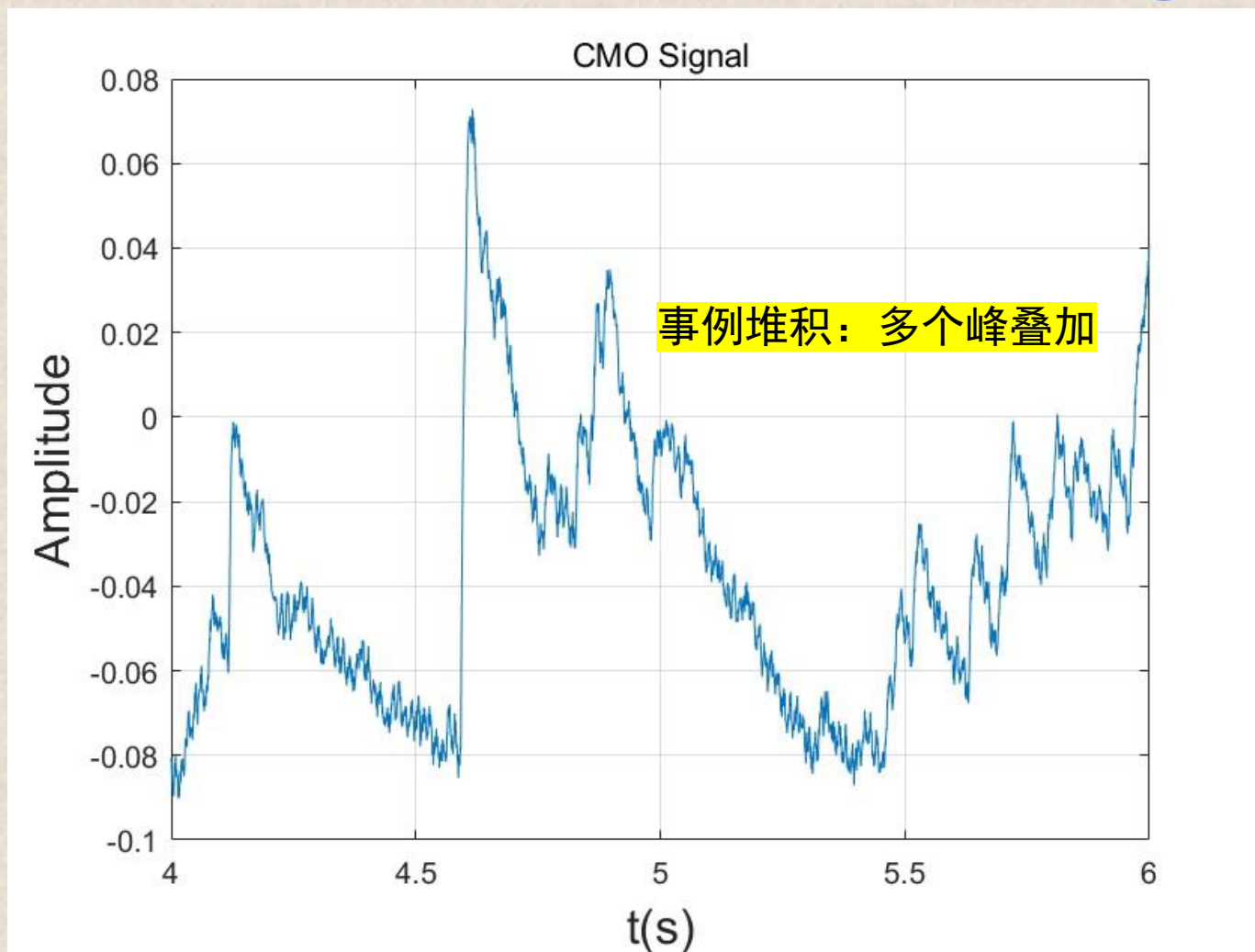
核探测与核电子学国家重点实验室

中国科学技术大学

# 研究背景

- CMO晶体声子信号衰减时间较长(100 ms量级)
- 地上实验，无屏蔽体时本底计数率高
- 信号偶然符合增多，造成事例堆积(pile-up)
  - 基线漂移
  - 干扰脉冲信号分析
- 初步估计得到本底信号主要来源是环境 $\gamma$ 粒子。宇宙线 $\mu$ 子等在计数率层面上占比较小。

本研究通过便携式碲锌镉探测器测量环境 $\gamma$ 能谱，  
贝叶斯迭代Unfolding算法还原环境 $\gamma$ 通量谱。辅助低温晶体量热器屏蔽体设计，减少事例堆积。

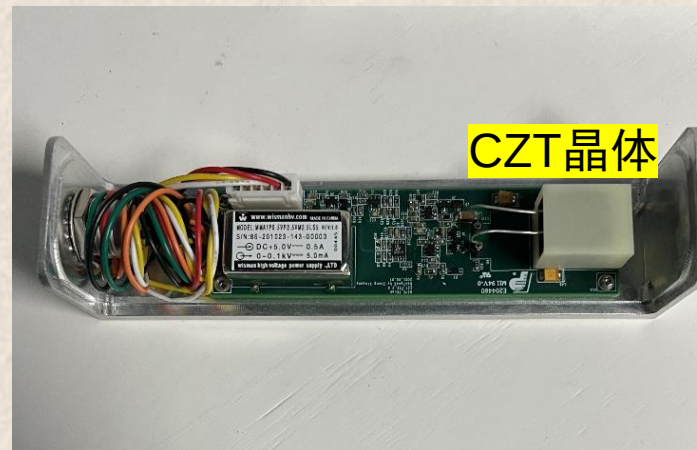




# 目录

- 碲锌镉探测器探测实验室环境 $\gamma$ 能谱
- 碲锌镉探测器建模
- 贝叶斯迭代Unfolding算法还原环境 $\gamma$ 本底通量谱
- 屏蔽体效果评估
- 总结与展望

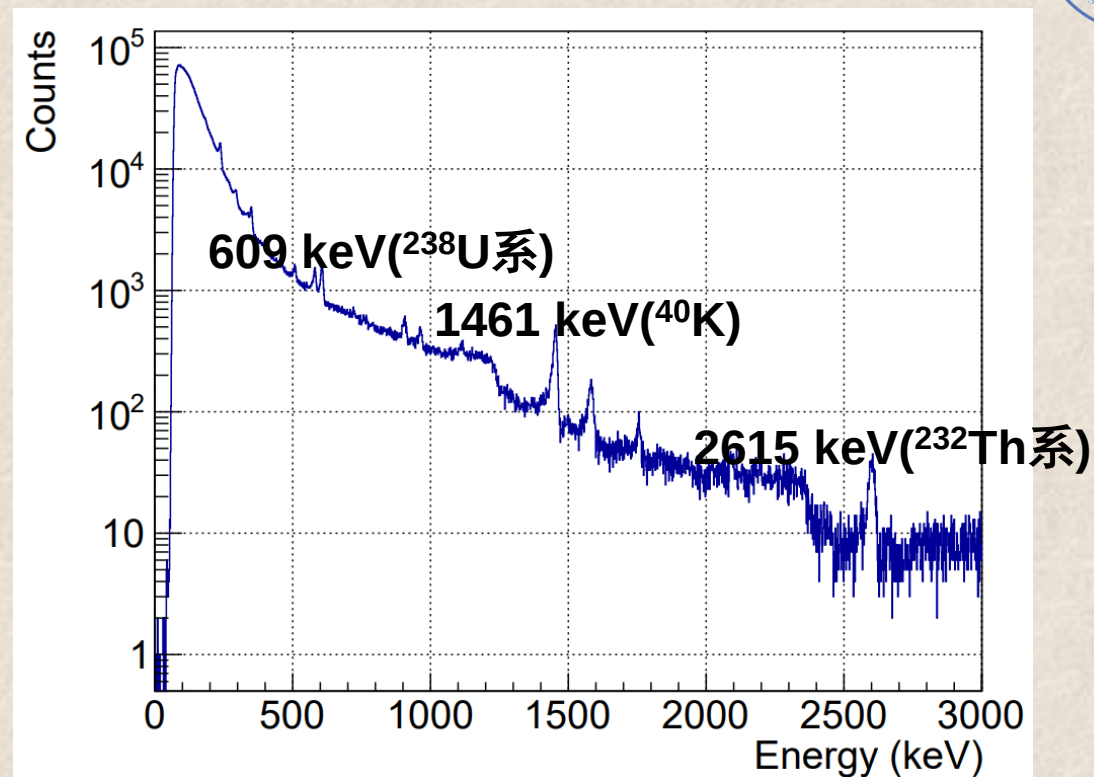
# 便携式碲锌镉(CdZnTe, CZT)探测器



- 便携
- 可在常温下工作
- 能量分辨率较好

可以非常方便地应用于 $\gamma$ 能谱测量

# CZT探测器测量本底谱



- 探头靠近制冷机，测量时间434 h
- 能谱上有清晰的峰，来源于某些元素的特征 $\gamma$ 谱线
- 测得的谱并非原始谱，受到光子与CZT探测器作用物理过程的影响。需要其他手段还原原始通量谱

# 测量能谱解谱步骤

## CZT探测器建模

\*模拟粒子能量沉积的物理过程

CZT探测器GEANT4建模

\*模拟能量沉积转化成信号过程的统计涨落

CZT全能峰形参数化

CZT探测器响应矩阵

Unfolding

测量计数谱

原始计数谱

计数时间、  
几何因子

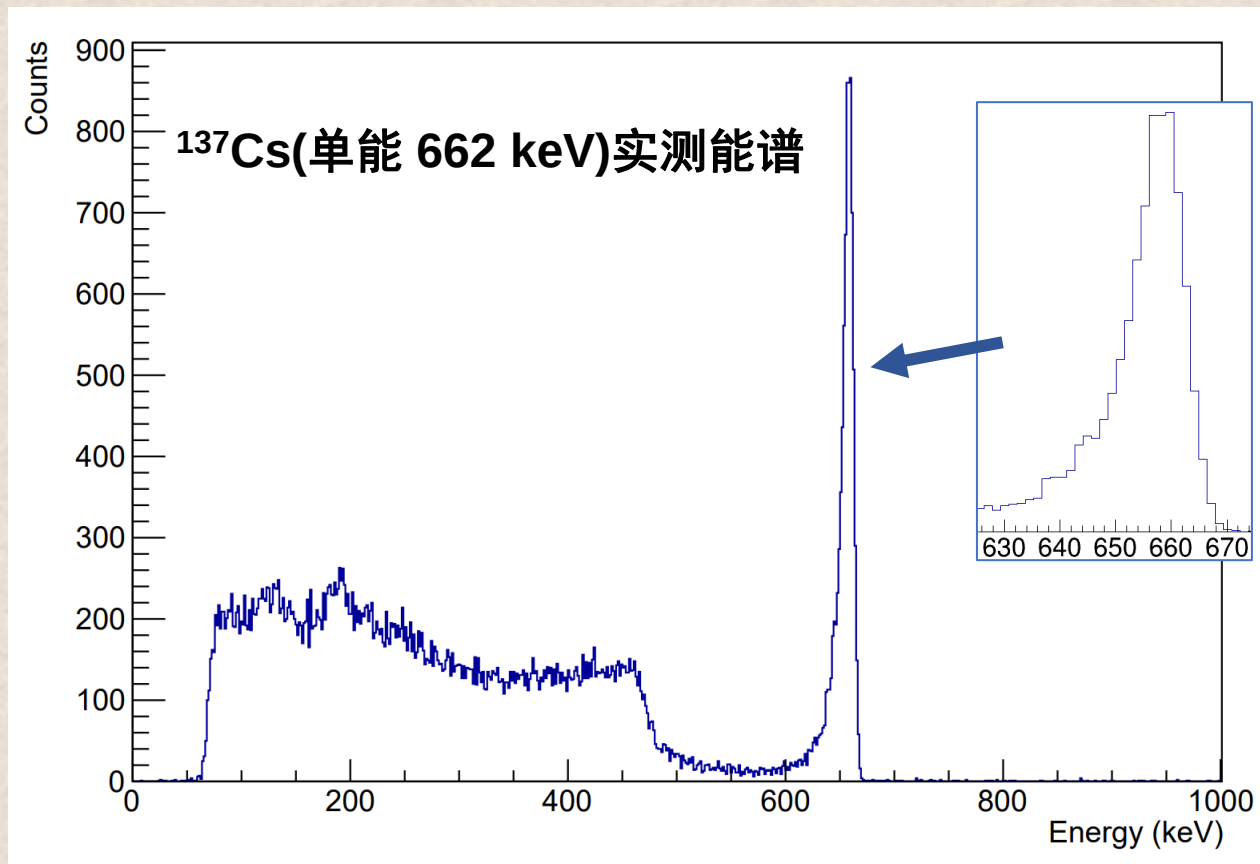
原始通量谱



# 目录

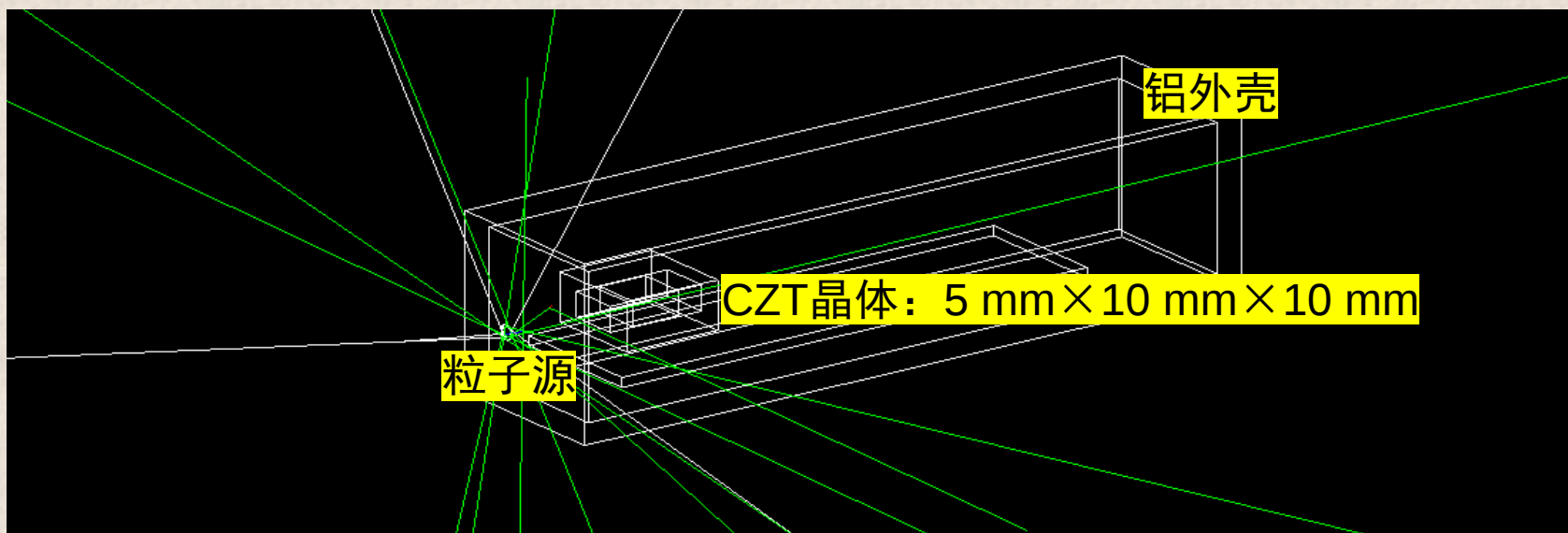
- 碲锌镉探测器探测实验室环境 $\gamma$ 能谱
- 碲锌镉探测器建模
- 贝叶斯迭代Unfolding算法还原环境 $\gamma$ 本底通量谱
- 屏蔽体效果评估
- 总结与展望

# CZT探测器 $\gamma$ 能谱特征

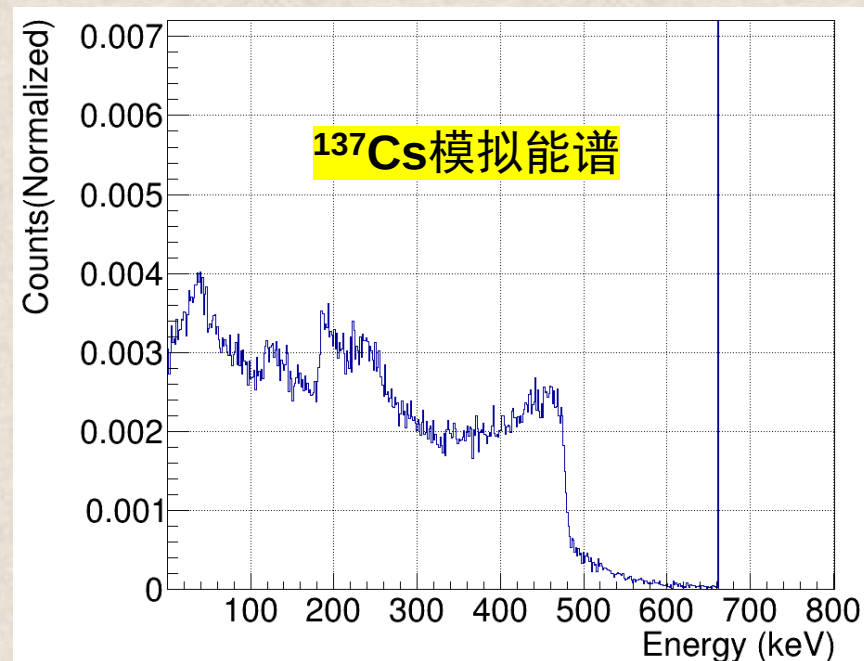


- 载流子复合导致全能峰不对称，有明显的低能拖尾，给解谱带来困难(不能直接使用高斯函数拟合)
- 除全能峰外的其他结构（康普顿连续谱、逃逸峰等）也需要在模拟中进行还原

# CZT探测器GEANT4建模



- 在GEANT4中，只统计 $\gamma$ 粒子穿过探测器的能量沉积
- 此处粒子源选用放射性核素 $^{137}\text{Cs}$ ，发出 662 keV的单能 $\gamma$ 射线
- GEANT4模拟可还原 $\gamma$ 能谱结构，但未考虑相同能量沉积下信号幅度的统计涨落，全能峰呈线状



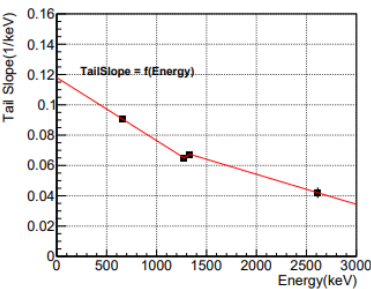
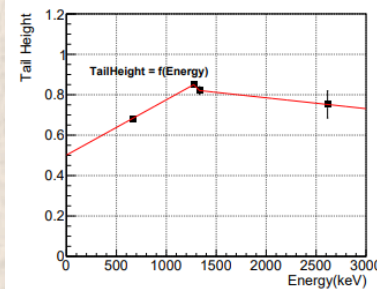
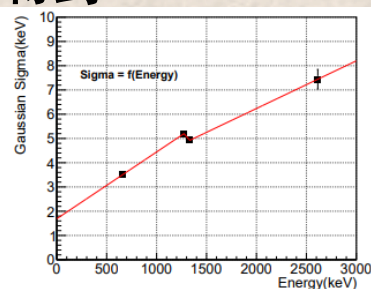
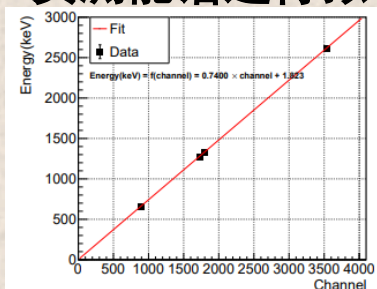
# CZT全能峰形参数化

- CZT晶体的载流子复合效应导致能量沉积->道址的统计涨落  
不仅有高斯分布展宽，还有明显的低能拖尾
- 使用经验公式描述峰形：

$$N_i = N_0 [e^{-(\epsilon_i - \epsilon_0)^2 / (\sqrt{2}\sigma)^2} + T(\epsilon_i)]$$

$$T(\epsilon_i) = Ae^{B(\epsilon_i - \epsilon_0)} [1 - e^{-(\epsilon_i - \epsilon_0)^2 / (\sqrt{2}\sigma)^2}] \delta$$

- 各个参数是能量沉积的函数，使用 $\gamma$ 放射源 ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{22}\text{Na}$ 等)  
实测能谱进行拟合得到

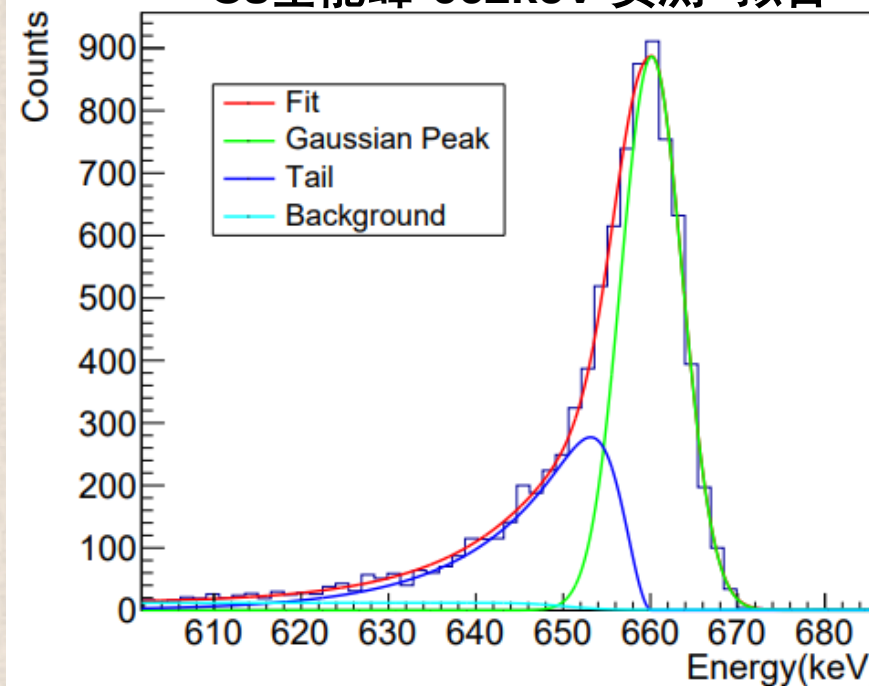


| 数据点               |         |
|-------------------|---------|
| 放射源               | 能量(keV) |
| $^{137}\text{Cs}$ | 661.7   |
| $^{22}\text{Na}$  | 1274.5  |
| $^{60}\text{Co}$  | 1332.5  |
| $^{208}\text{Tl}$ | 2614.5  |

\*部分源有多个能量的 $\gamma$ 射线，拟合时只取了最高能量对应的全能峰(本底较少)



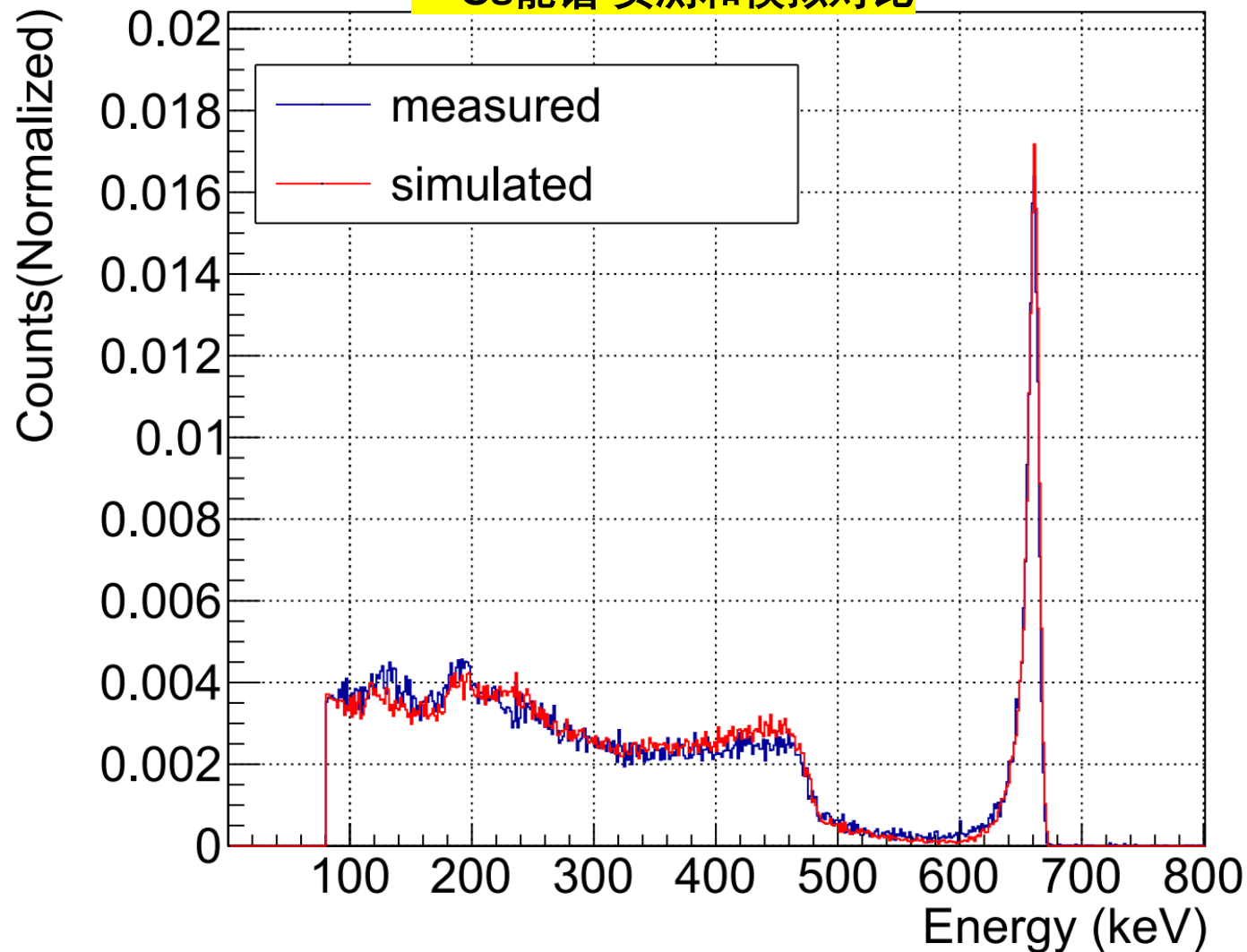
$^{137}\text{Cs}$ 全能峰-662keV 实测+拟合



- 在GEANT4模拟中，给每一个事例的能量沉积添加一个符合上述分布的随机数，即可模拟出统计涨落

# CZT探测器模型验证

$^{137}\text{Cs}$ 能谱 实测和模拟对比



- 使用前述建模方法得到一个较好CZT模型。可用于蒙特卡洛法求unfolding需要的响应矩阵



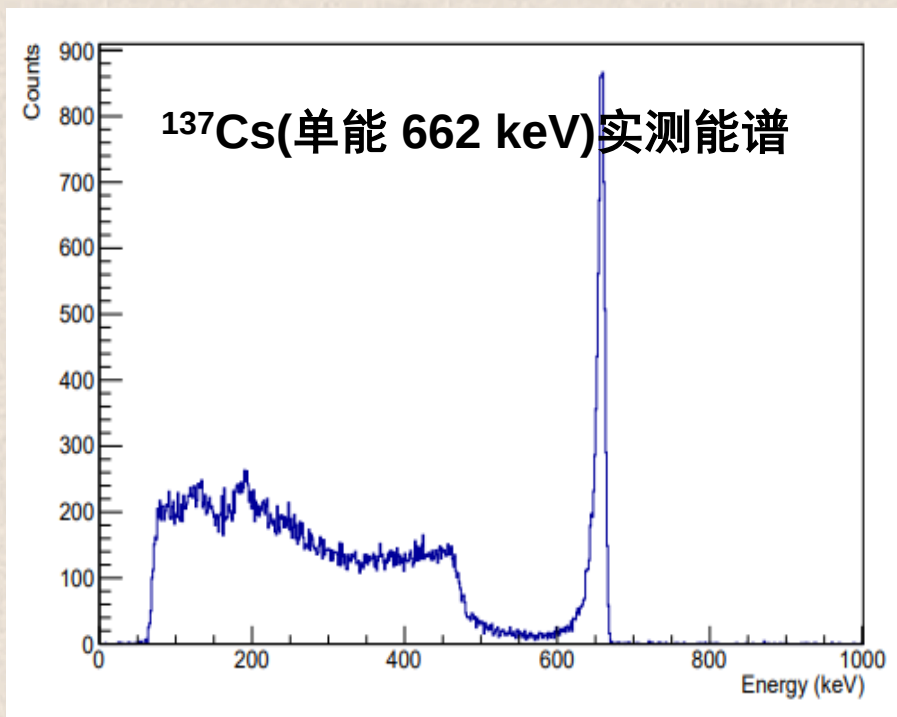
# 目录

- 碲锌镉探测器探测实验室环境 $\gamma$ 能谱
- 碲锌镉探测器建模
- 贝叶斯迭代Unfolding算法还原环境 $\gamma$ 本底通量谱
- 屏蔽体效果评估
- 总结与展望

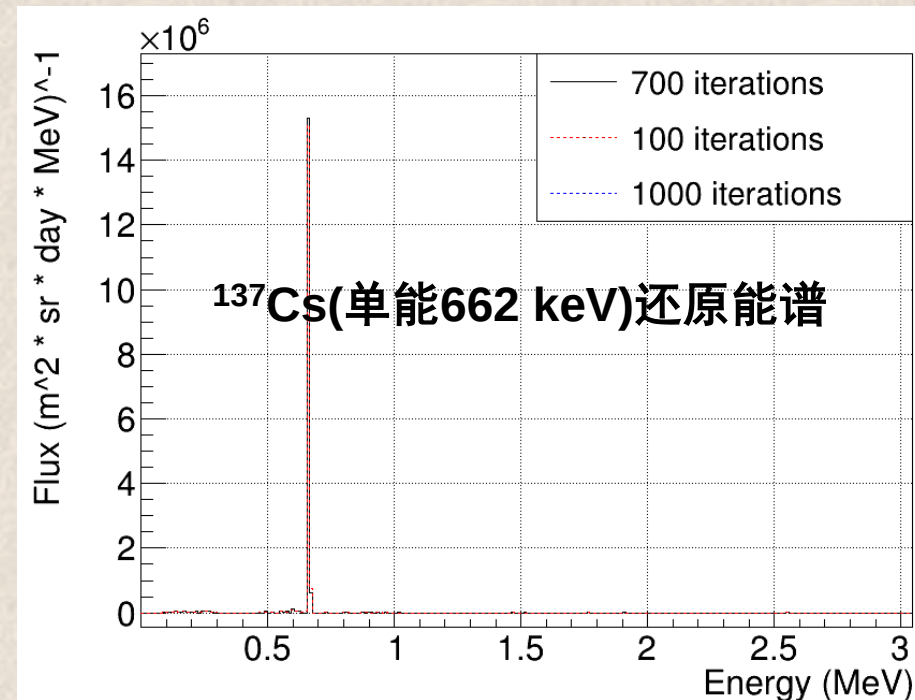
# Unfolding方法目标

- 即使是单能 $\gamma$ 射线入射，测量能谱也会出现康普顿连续谱等结构（部分能量沉积），以及统计涨落展宽。总计数率还需考虑探测器效率
- Unfolding方法的目的：从测量能谱还原出与探测器作用前 $\gamma$ 射线的原始能谱

## 例： $^{137}\text{Cs}$ 能谱



Unfolding



# 贝叶斯迭代Unfolding算法

- a) 通过蒙特卡洛方法估计 $P(E_{obs}^j|E_{true}^i)$ （条件概率：真实能量为 $E_{true}^i$ 区间的粒子在测量能谱中产生能量为 $E_{obs}^j$ 区间的事例的几率， $i, j$ 是直方图区间序号），以及探测器对能量为 $E_{true}^i$ 区间的粒子的探测效率 $\epsilon_i$
- b) 再通过贝叶斯公式逆向计算 $P(E_{true}^i|E_{obs}^j)$ （条件概率：测量能谱中能量为 $E_{obs}^j$ 区间的事例是由真实能量为 $E_{true}^i$ 区间的粒子产生的几率）

$$P(E_{true}^i|E_{obs}^j) = \frac{P(E_{obs}^j|E_{true}^i)P_o(E_{true}^i)}{\sum_{l=1}^{n_B} P(E_{obs}^j|E_{true}^l)P_o(E_{true}^l)}$$

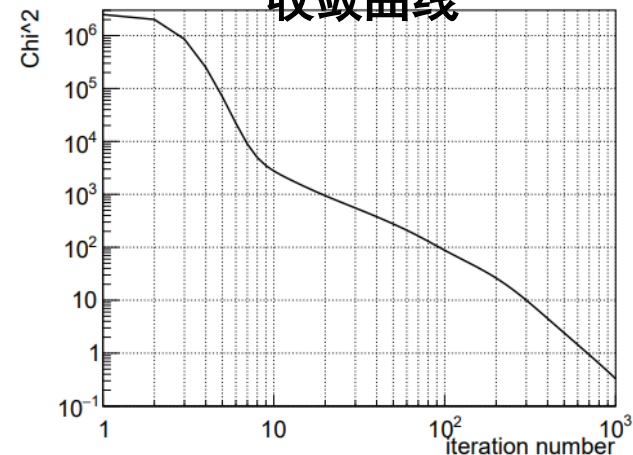
- c) 最后可由 $P(E_{true}^i|E_{obs}^j)$ 和测量能谱估计原始能谱

$$\hat{N}(E_{true}^i) = \frac{1}{\epsilon_i} \sum_{j=1}^{n_B} N(E_{obs}^j)P(E_{true}^i|E_{obs}^j)$$

- d) 在使用贝叶斯公式时， $P_o(E_{true}^i)$ 是以概率表示的粒子的原始能谱，是未知的（最终目标）。因此需人为设定起始 $P_o(E_{true}^i)$ ，然后 b) c)两步迭代进行，直至收敛。收敛条件是迭代第 $n$ 步时前后结果差距足够小（chi2）

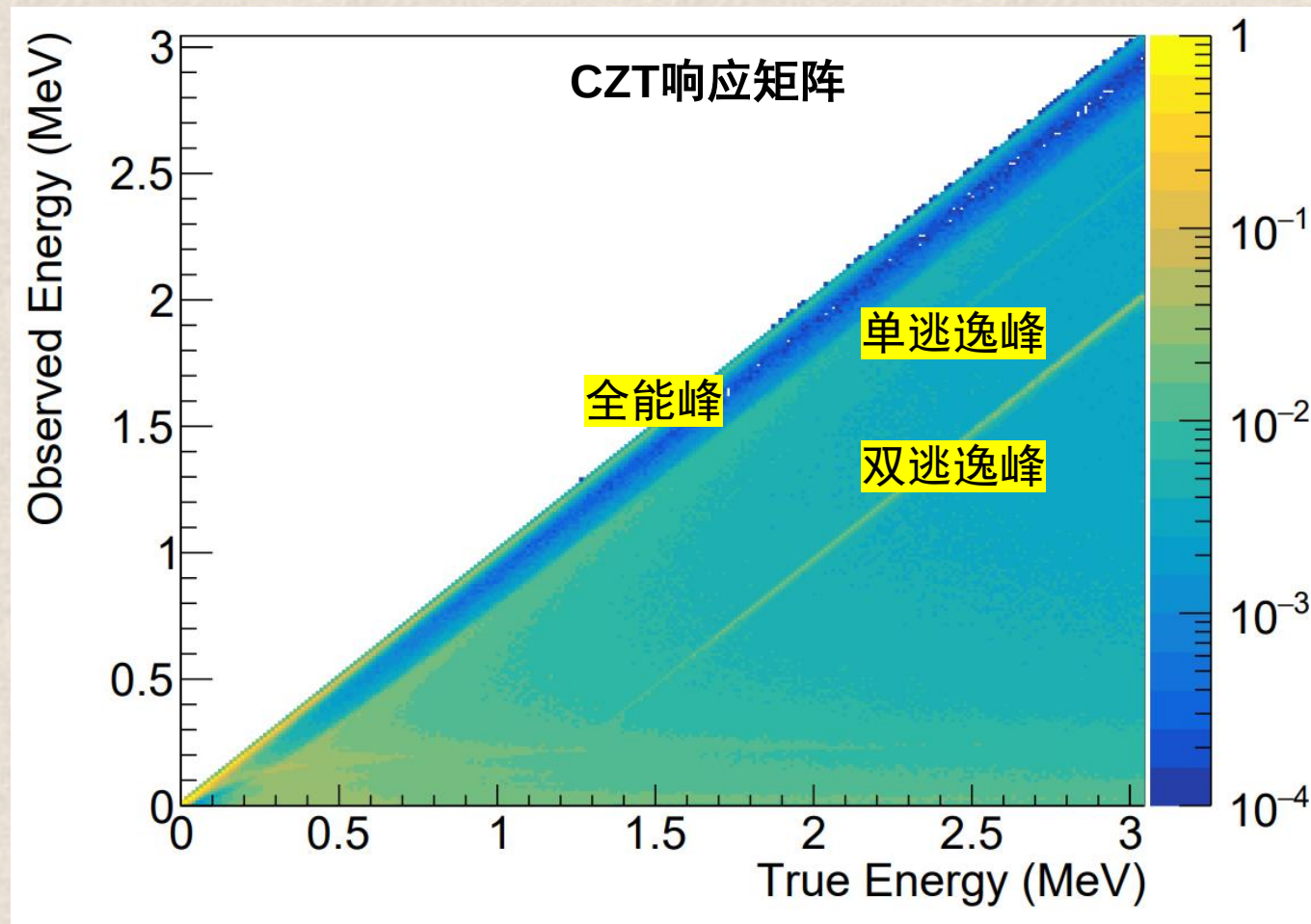
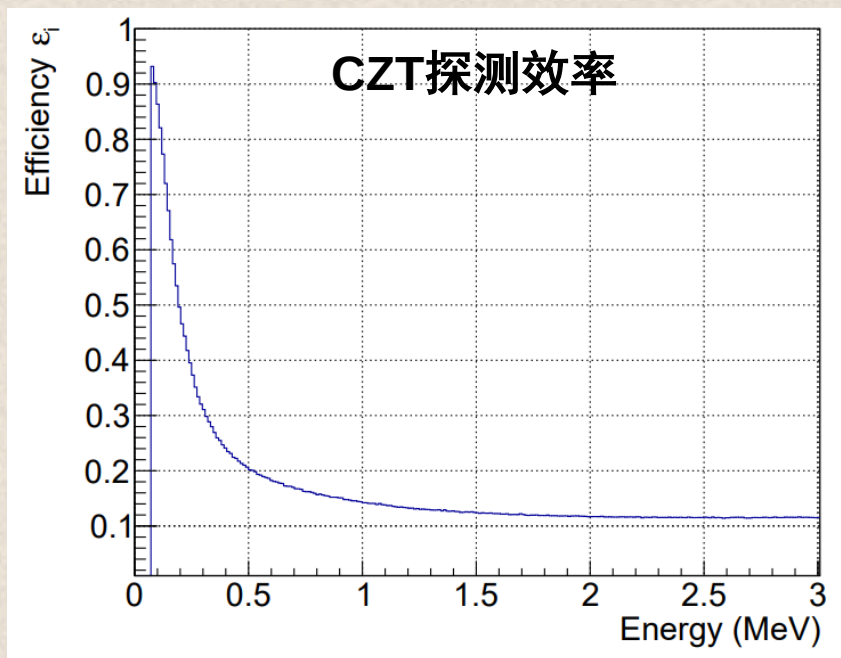
- 迭代初始分布不会影响最终结果，一般从均匀分布开始
- 算法非常稳定，输入能谱的小统计涨落不会引起结果的振荡

收敛曲线



# CZT探测器响应矩阵

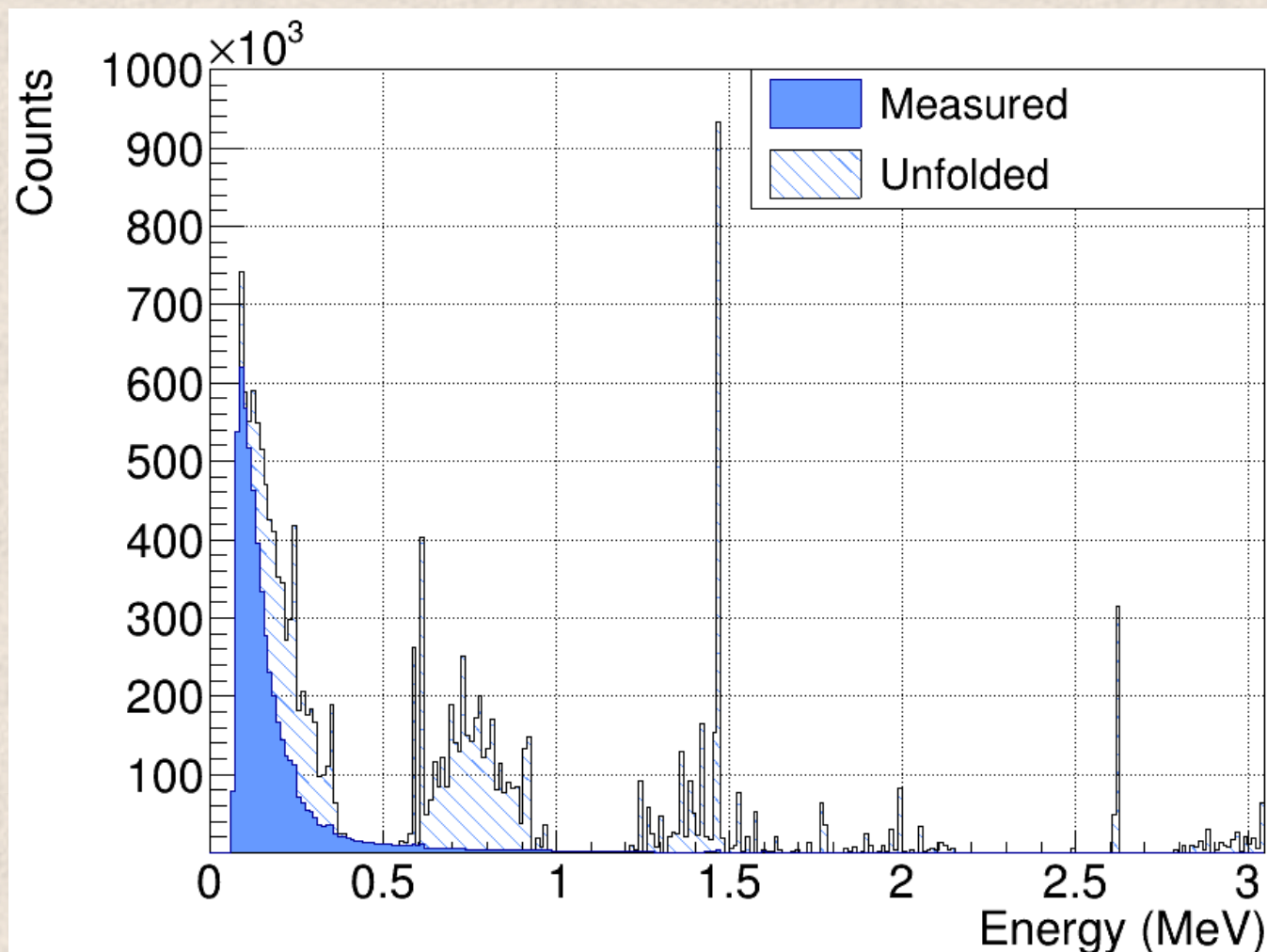
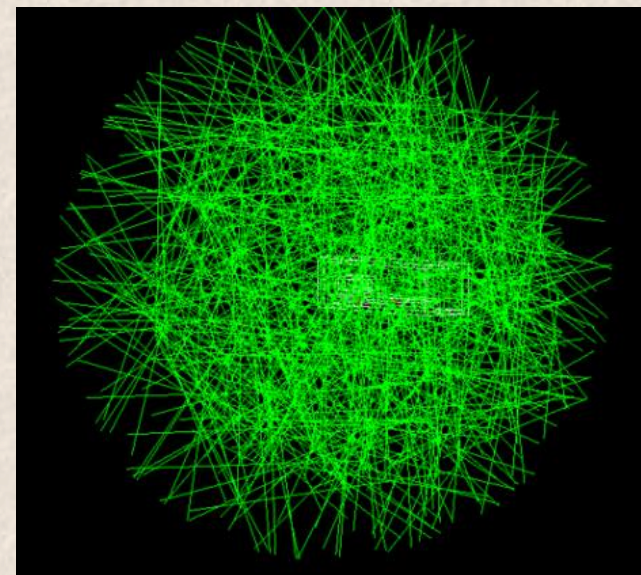
- 在GEANT4中建立CZT模型，蒙特卡洛方法求得
- 矩阵元 $R_{ij}$ ：条件概率 $P(E_{obs}^j | E_{true}^i)$
- 对角元：能量完全沉积，全能峰
- 非对角元：能量部分沉积，如康普顿连续谱，单逃逸峰等



# Unfolding计数谱

## 计数转化为通量

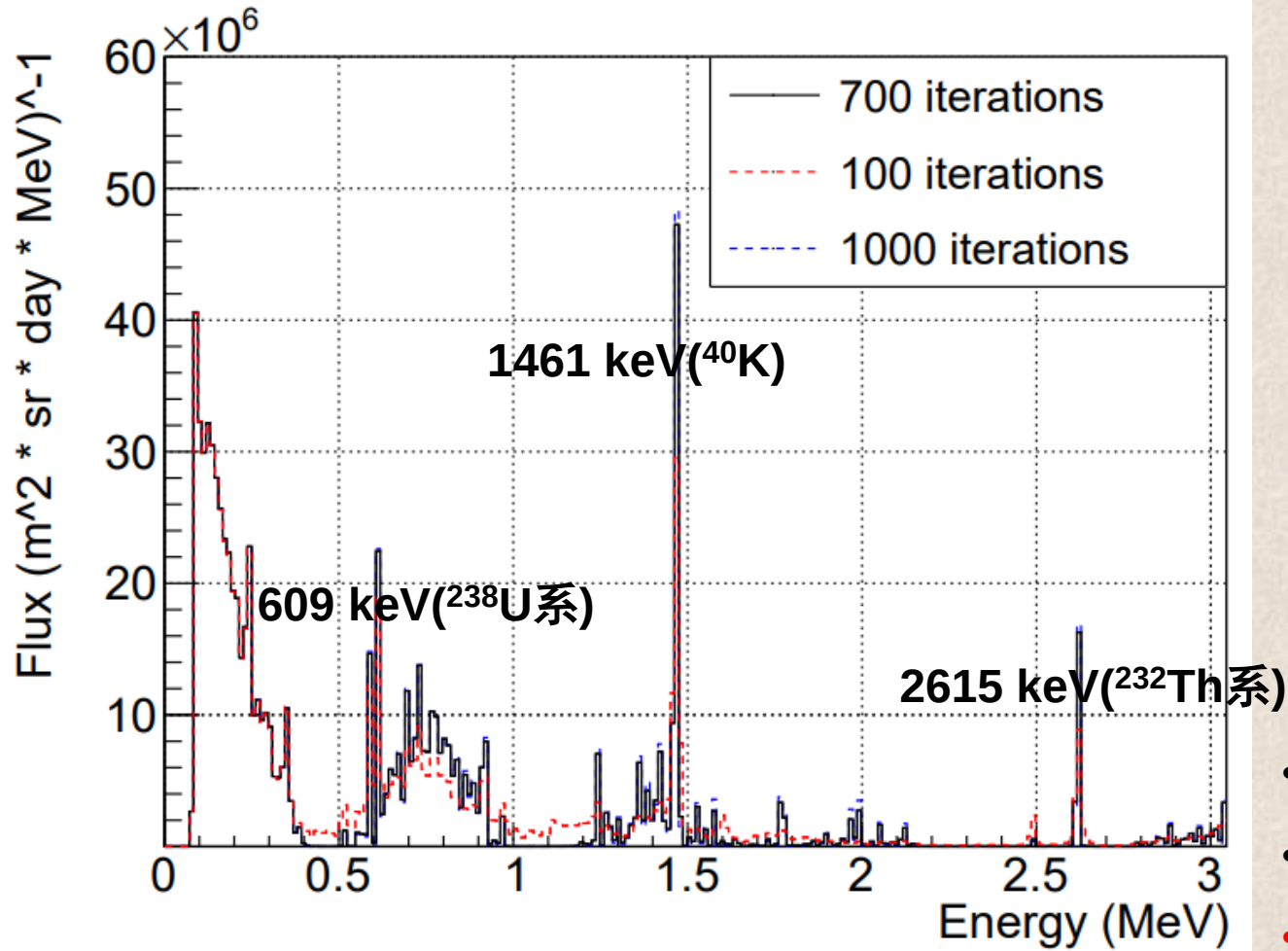
$$\hat{\Phi}(E_{true}^i) = \frac{\hat{N}(E_{true}^i)}{T \cdot A}$$



- 原始能谱和直接测量的能谱有显著差异

- 引入近似： $\gamma$ 本底通量空间各向同性(验证方法：CZT加准直孔测量不同方向的计数率)
- T是测量时间，A是CZT探测器的几何因子，可以通过蒙卡估计

# Unfolding结果



\*取迭代700次的结果

表 5.1  $^{232}\text{Th}$  放射性核素系主要  $\gamma$  射线。

| Isotope           | E (keV)  | Intensity (%) |
|-------------------|----------|---------------|
| $^{228}\text{Ac}$ | 338.320  | 11.27         |
| $^{228}\text{Ac}$ | 911.204  | 25.80         |
| $^{228}\text{Ac}$ | 968.971  | 15.80         |
| $^{212}\text{Pb}$ | 238.632  | 43.30         |
| $^{212}\text{Bi}$ | 727.330  | 6.58          |
| $^{208}\text{Tl}$ | 277.351  | 6.31          |
| $^{208}\text{Tl}$ | 510.770  | 22.60         |
| $^{208}\text{Tl}$ | 583.191  | 84.50         |
| $^{208}\text{Tl}$ | 860.564  | 12.42         |
| $^{208}\text{Tl}$ | 2614.533 | 99.00         |

表 5.2  $^{238}\text{U}$  放射性核素系主要  $\gamma$  射线。

| Isotope           | E (keV)  | Intensity (%) |
|-------------------|----------|---------------|
| $^{226}\text{Ra}$ | 186.211  | 3.59          |
| $^{214}\text{Pb}$ | 241.997  | 7.43          |
| $^{214}\text{Pb}$ | 295.224  | 19.30         |
| $^{214}\text{Pb}$ | 351.932  | 37.60         |
| $^{214}\text{Bi}$ | 609.312  | 46.10         |
| $^{214}\text{Bi}$ | 768.356  | 4.94          |
| $^{214}\text{Bi}$ | 934.061  | 3.03          |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1120.287 | 15.10         |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1238.110 | 5.79          |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1377.669 | 4.00          |
| $^{214}\text{Bi}$ | 1764.494 | 15.40         |
| $^{214}\text{Bi}$ | 2204.210 | 5.08          |

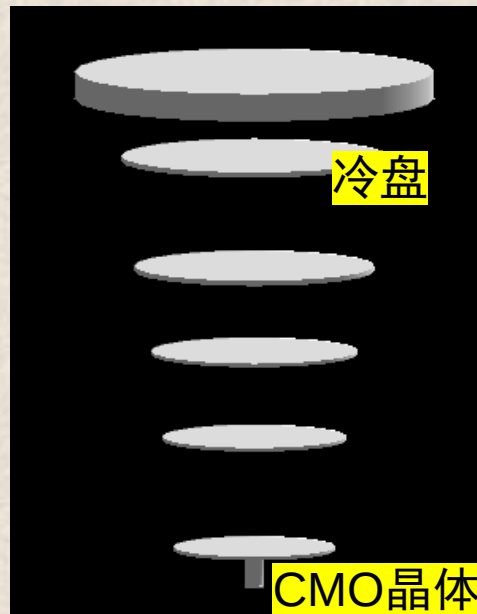
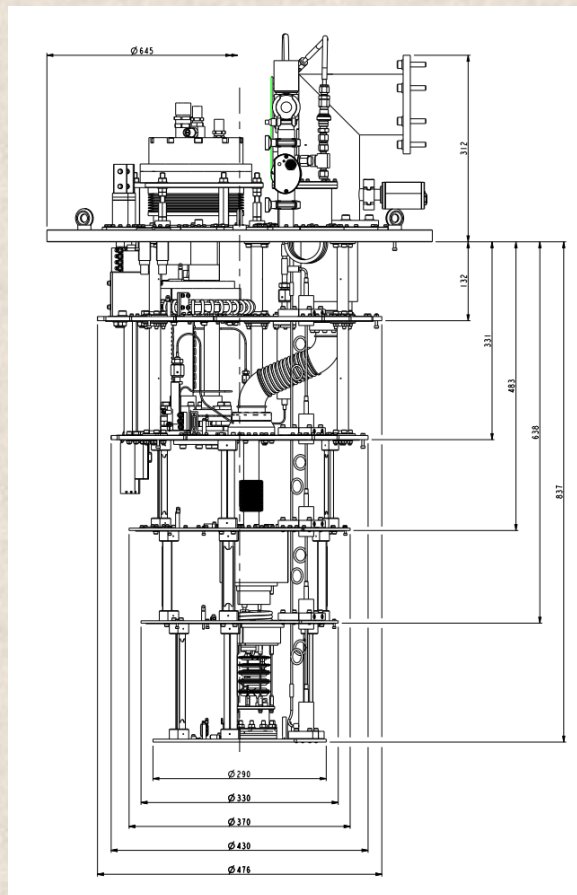
- 有明显的特征 $\gamma$ 谱线，来自 $^{40}\text{K}$ 以及 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 系衰变
- 0~3 MeV  $\gamma$ 本底通量，数量级大约  $10^8 \text{ (m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{day})^{-1}$
- 以unfolding结果作为模拟输入能谱，评估屏蔽体效果



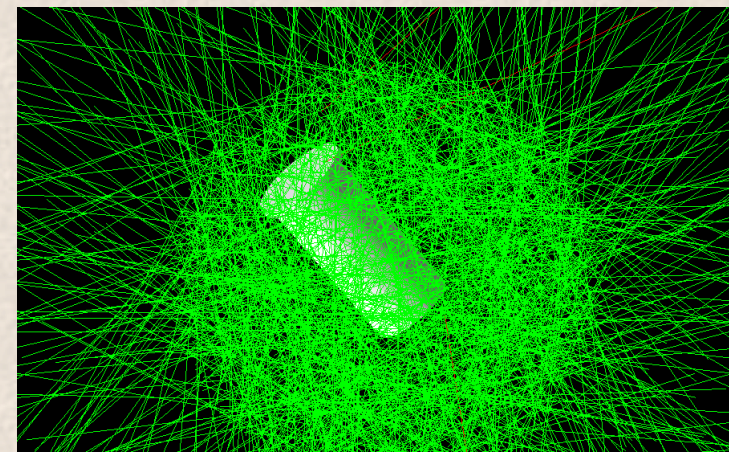
# 目录

- 碲锌镉探测器探测实验室环境 $\gamma$ 能谱
- 碲锌镉探测器建模
- 贝叶斯迭代Unfolding算法还原环境 $\gamma$ 本底通量谱
- 屏蔽体效果评估
- 总结与展望

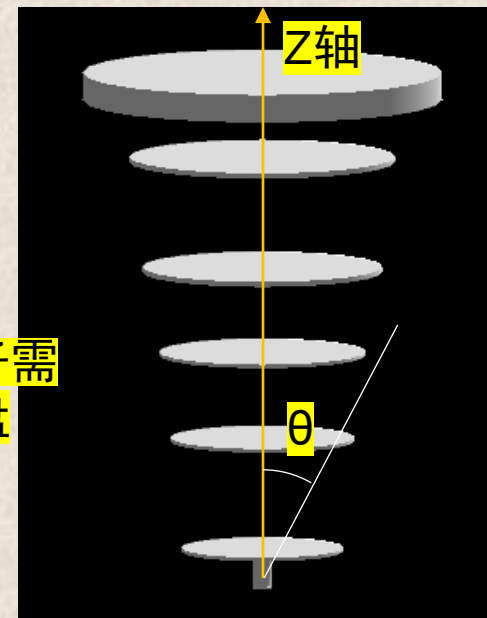
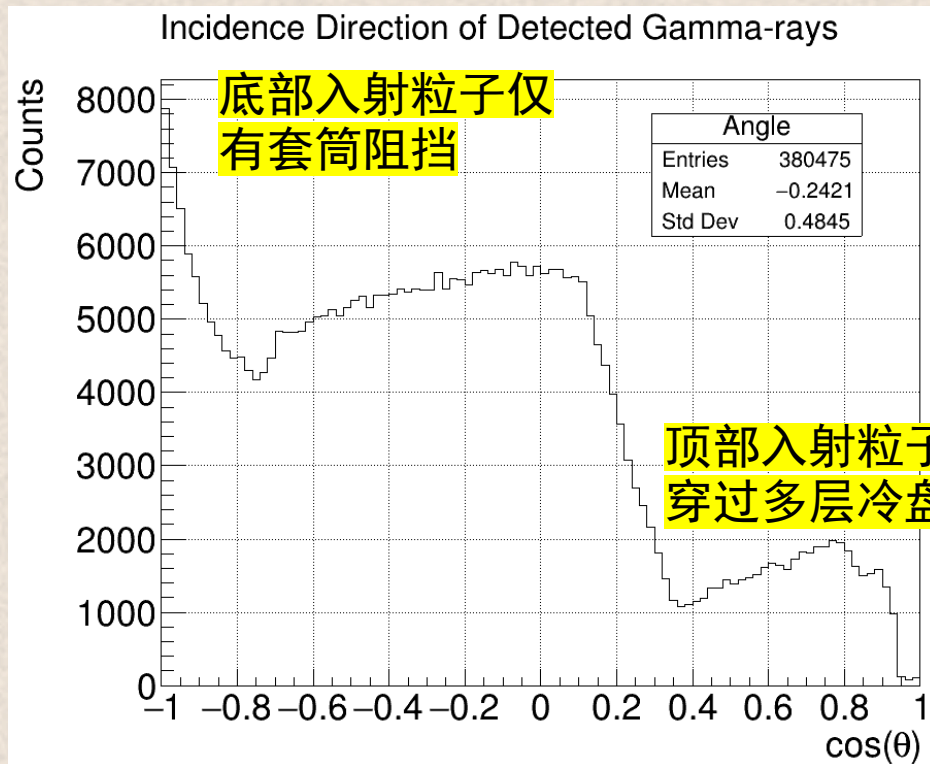
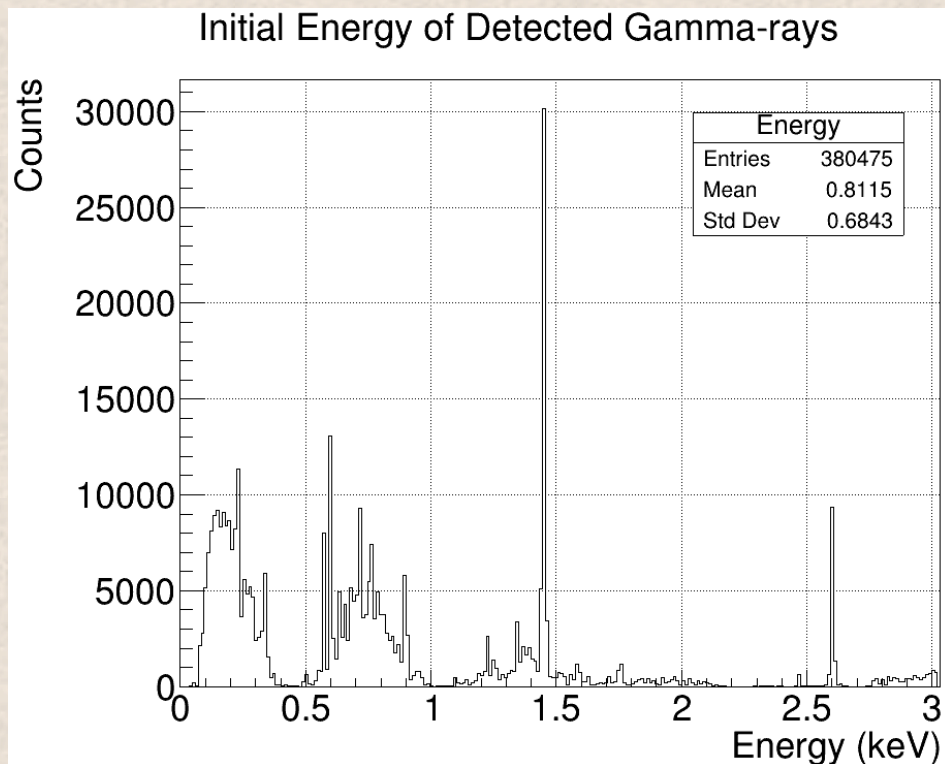
# 评估本底水平



- 在GEANT4中建立制冷机模型，包括冷盘、套筒、CMO晶体
- 顶部开口的铅屏蔽体，厚度10 cm, 高1.5 m
- $\gamma$ 粒子入射，能谱使用unfolding结果



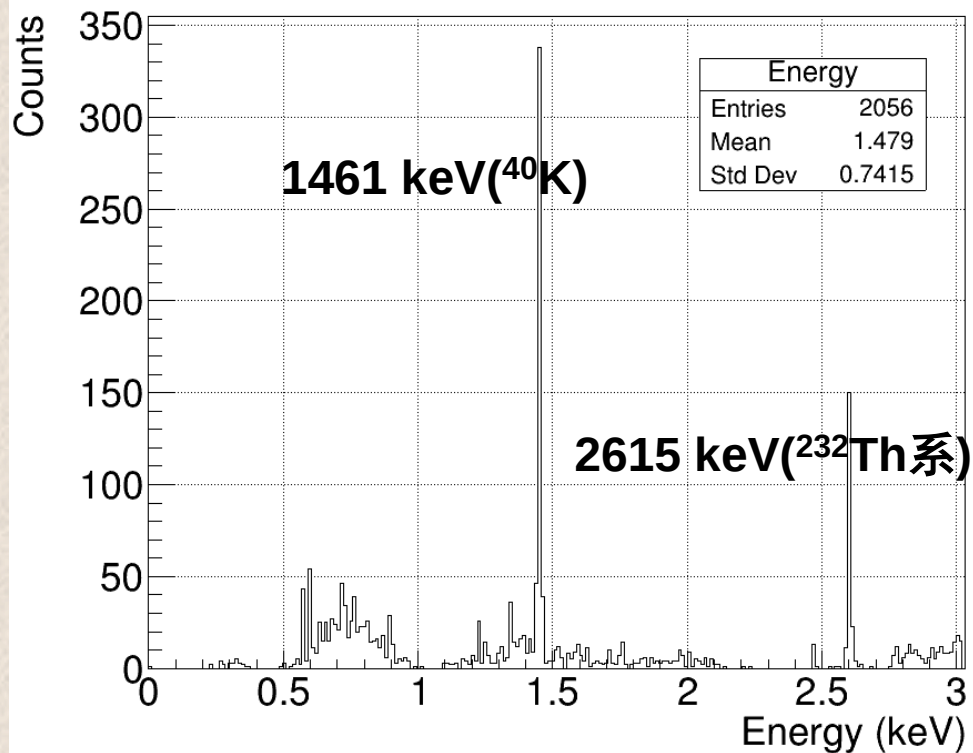
# 无屏蔽时的本底水平



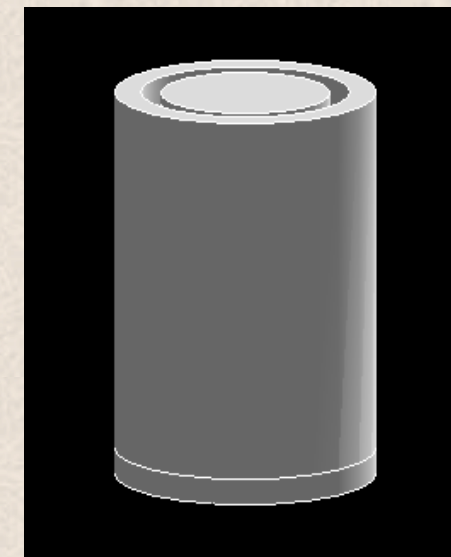
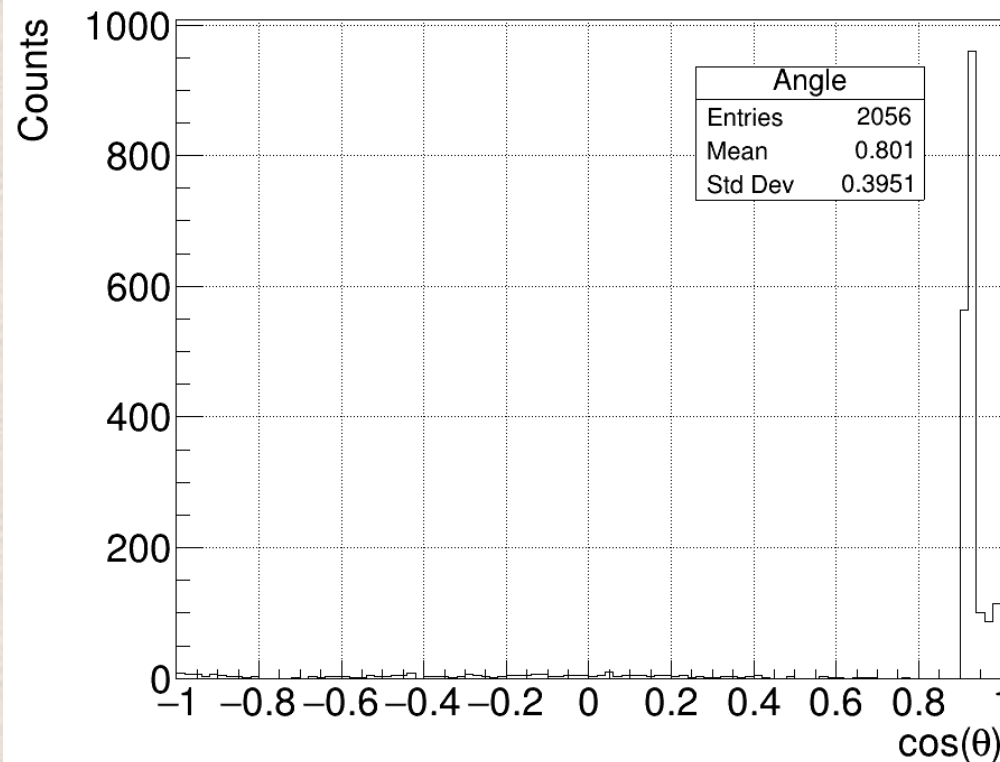
- 计算得本底计数率约37 Hz，和实测接近，可作为验证 $\gamma$ 本底谱正确性的手段
- 制冷机自屏蔽（主要是套筒和冷盘）可起到一定作用

# 10 cm铅屏蔽的效果

Initial Energy of Detected Gamma-rays

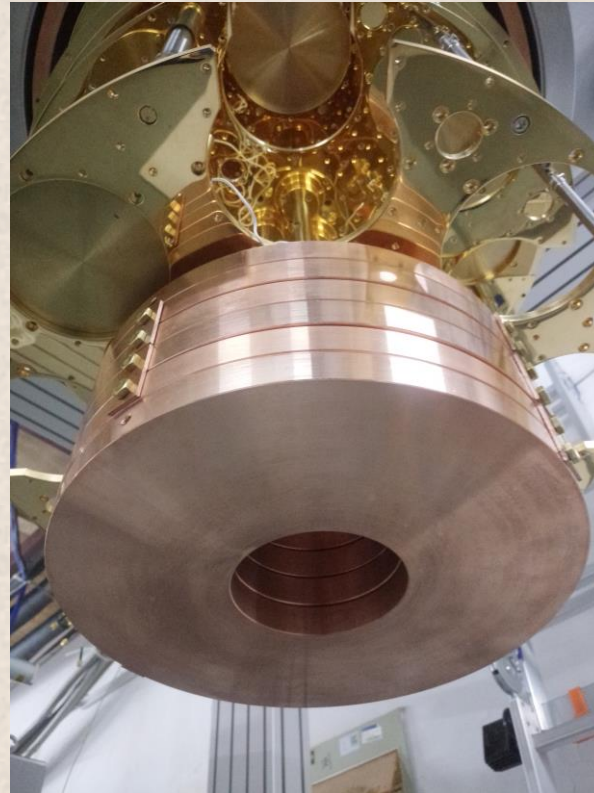


Incidence Direction of Detected Gamma-rays



- 10 cm厚铅屏蔽，模拟中环境本底事例率降低约2个数量级
- 穿过屏蔽的 $\gamma$ 射线主要来源：
  - 能量：高能 $\gamma$ 光子与物质作用截面偏小，穿透性更强
  - 角度：屏蔽体立体角非 $4\pi$ ，部分光子从没有屏蔽的角度射入（顶部）

# 展望



- 多种屏蔽体建设方案（水屏蔽、铅屏蔽、铜屏蔽等），可使用此方法进行效果评估，结合成本问题选择
- 还需要考虑屏蔽材料本身的放射性（如铅-210）；其他本底来源
- 减少事例堆积现象，稳定读出信号

# 总结

- 使用便携式碲锌镉探测器探测环境 $\gamma$ 能谱
- 通过碲锌镉探测器蒙特卡洛模拟，使用贝叶斯迭代unfolding方法从实测能谱还原环境 $\gamma$ 本底通量谱
- 使用本底通量谱评估屏蔽体效果
- 目标：解决事例堆积问题

实验所用仪器便携性好，软件包基本完成，  
可方便地应用于不同地点 $\gamma$ 本底的测量

## *Thanks !*

