

3rd 地下和空间粒子物理 与宇宙物理前沿问题研讨会

Conference on frontiers of underground and space particle physics and cosmophysics

2024年5月7-11日, 中国·西昌
7-11 May 2024, Xichang, China



四川大學
SICHUAN UNIVERSITY

点电极高纯锗探测器 超快体事例本底的研究与甄别

四川大学

李任明杰

2024.05.10

团队背景



Fig.1 CDEX合作组

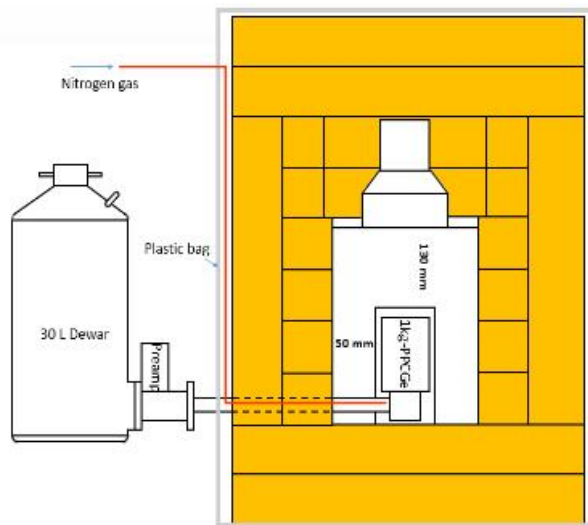
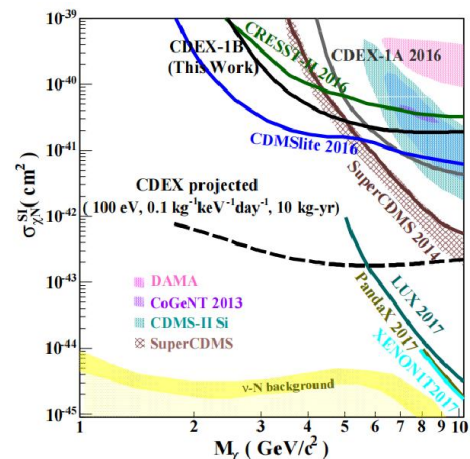
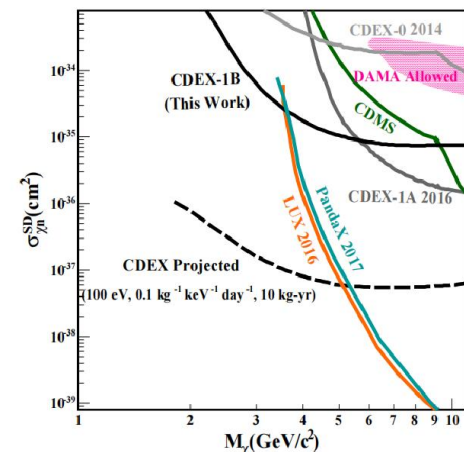


Fig.2 CDEX-1B实验



(a)



(b)

Fig.3 CDEX-1B实验WIMPs排除线结果

◎ P型点电极高纯锗(ρ PCGe)探测器具有**超低探测阈值**、**极低本征本底**以及**十分出色的能量分辨率**等特点

◎ 位于中国锦屏地下实验室的中国暗物质实验(CDEX)合作组致力于用**吨量级锗阵列探测器**实现对轻 WIMPs 和相关暗物质模型, 以及 ^{76}Ge 中的无中微子双贝塔衰变的研究

◎ 在CDEX-1B实验中, 使用公斤量级的单块 ρ PCGe 探测器首次实现了160 eVee的能量阈值

研究背景

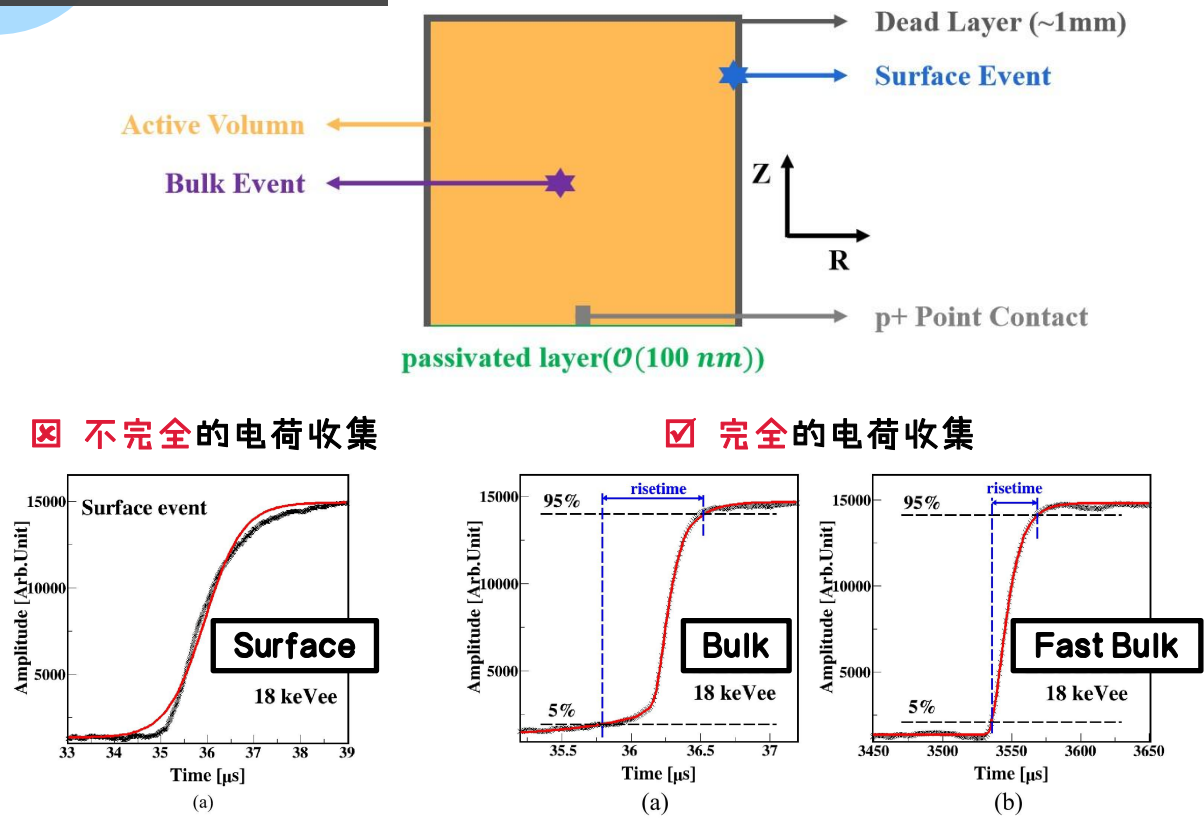


Fig.4 pPCGe探测器示意图及三类事例

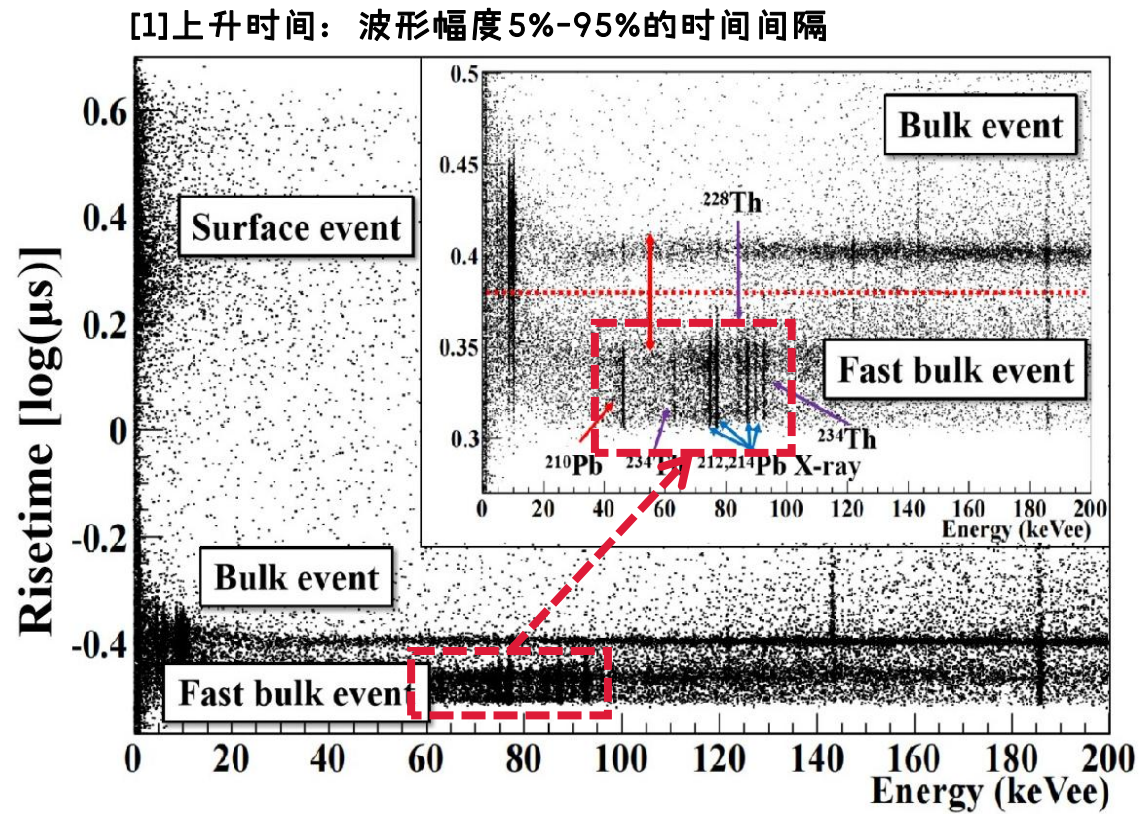


Fig.5 CDEX-1B探测器200keV内本底事例的上升时间^[1]-能量图

- ◎ 三类事例：体事例，表面事例，**超快体事例(Fast Bulk Events, FBEs)**
- ◎ 本底能谱中**铀钍子体**的射线峰多是FBEs(归咎于薄的惰性层)，**需扣除**
- ◎ 剔除FBEs能有效**降低**CDEX实验本底，**提高**暗物质探测灵敏度

放射源实验

聚焦单一源 \Rightarrow 事例响应特点 \Rightarrow 本底研究

基于 ^{60}Co 放射源实验展开超快体事例研究

模拟 \rightarrow

实验 \downarrow

Fig.6 ^{60}Co 放射源实验

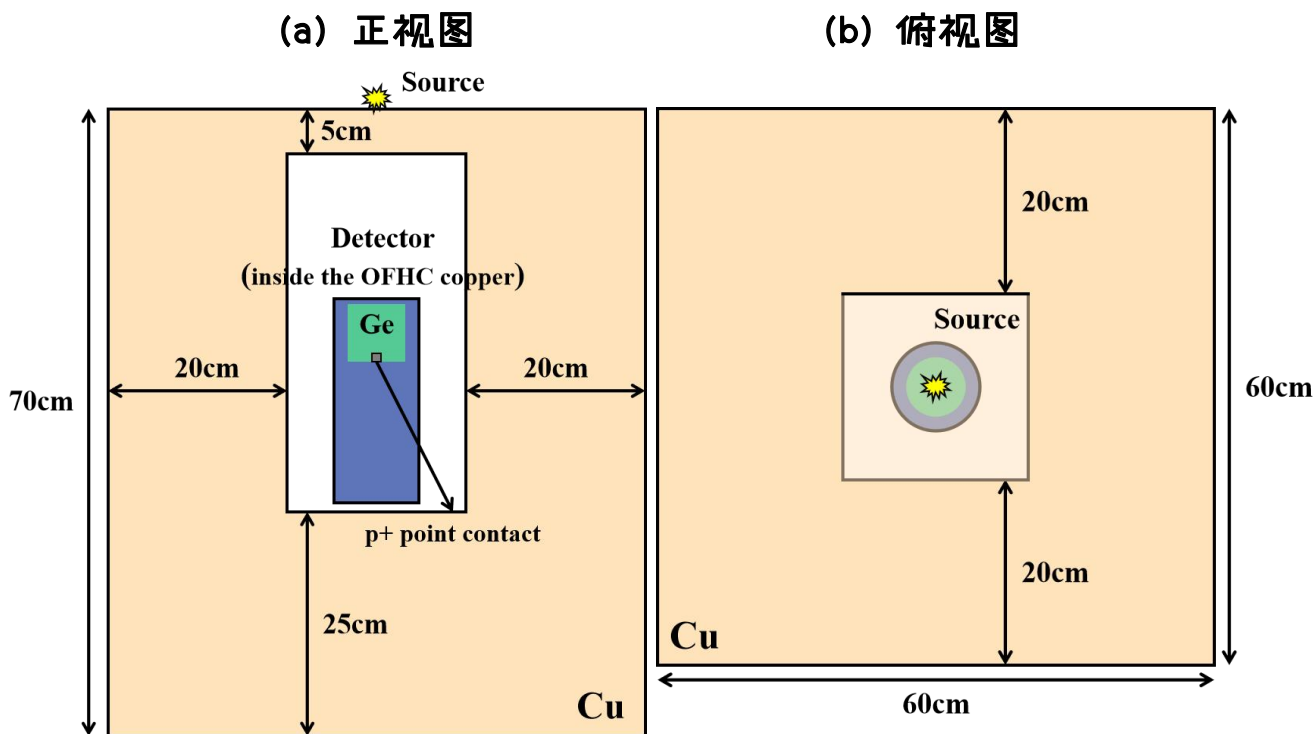
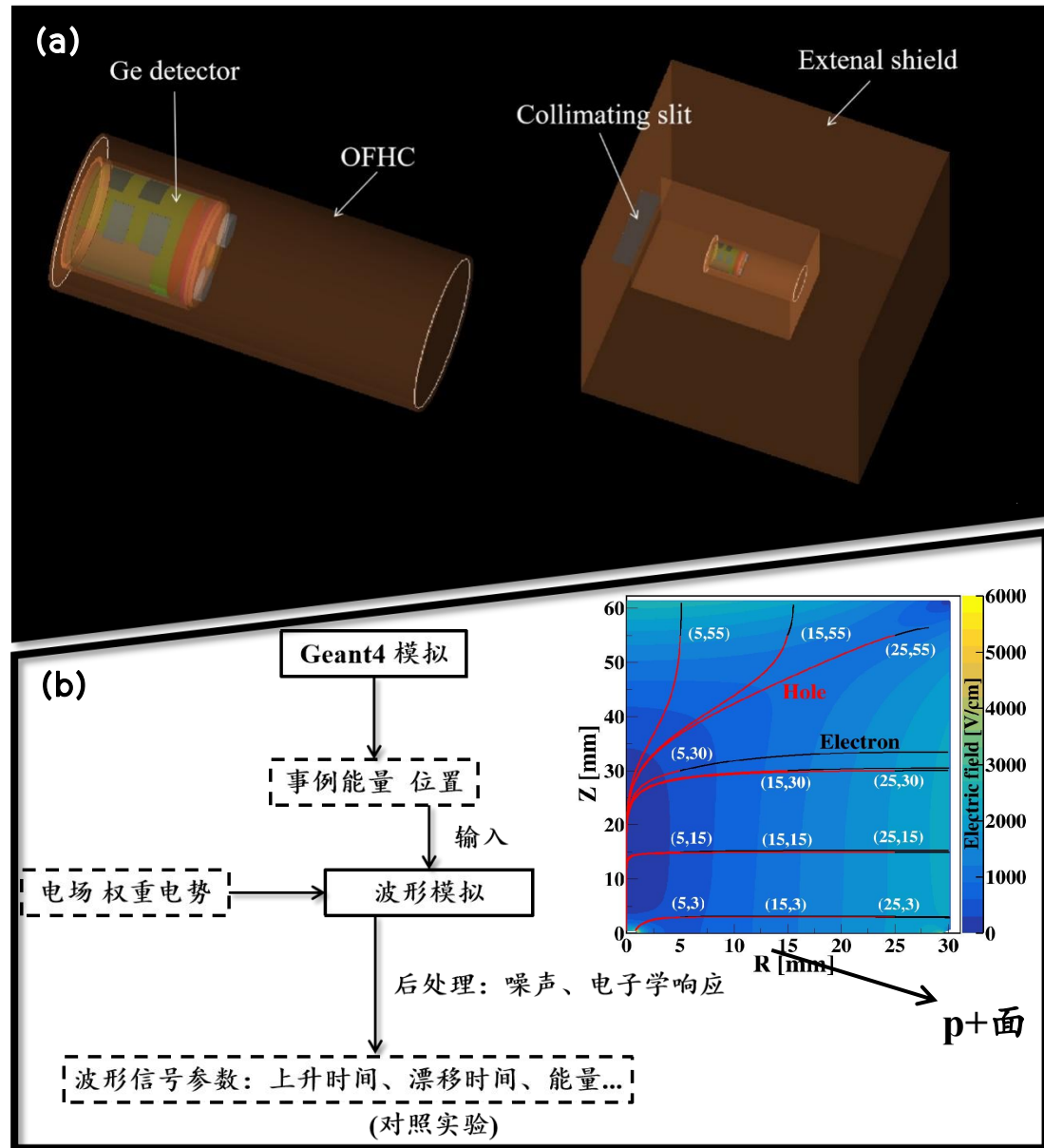


Fig.7 (a) Geant4模拟 + (b) 波形模拟



实验与模拟结果对比

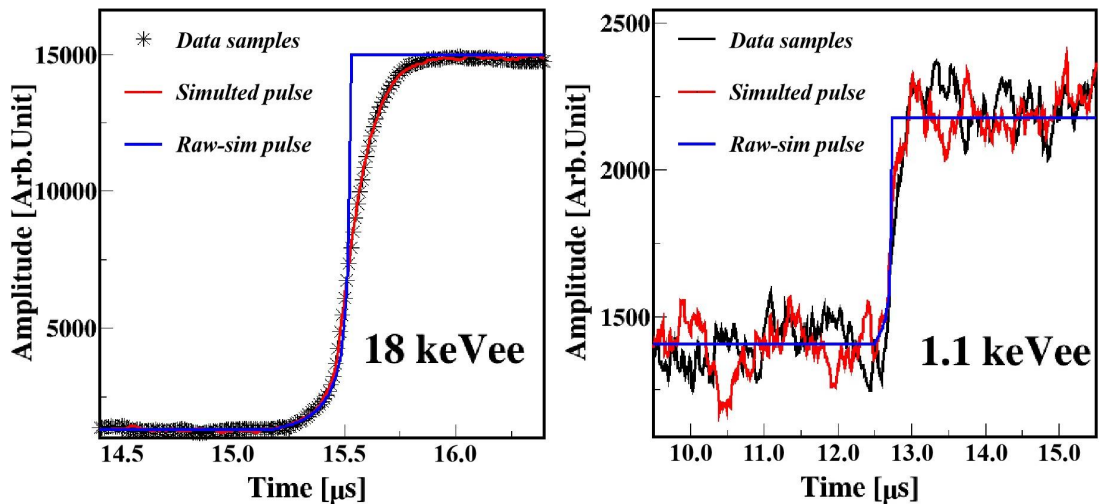


Fig.8 高低能区[实验]与[模拟]波形的对比

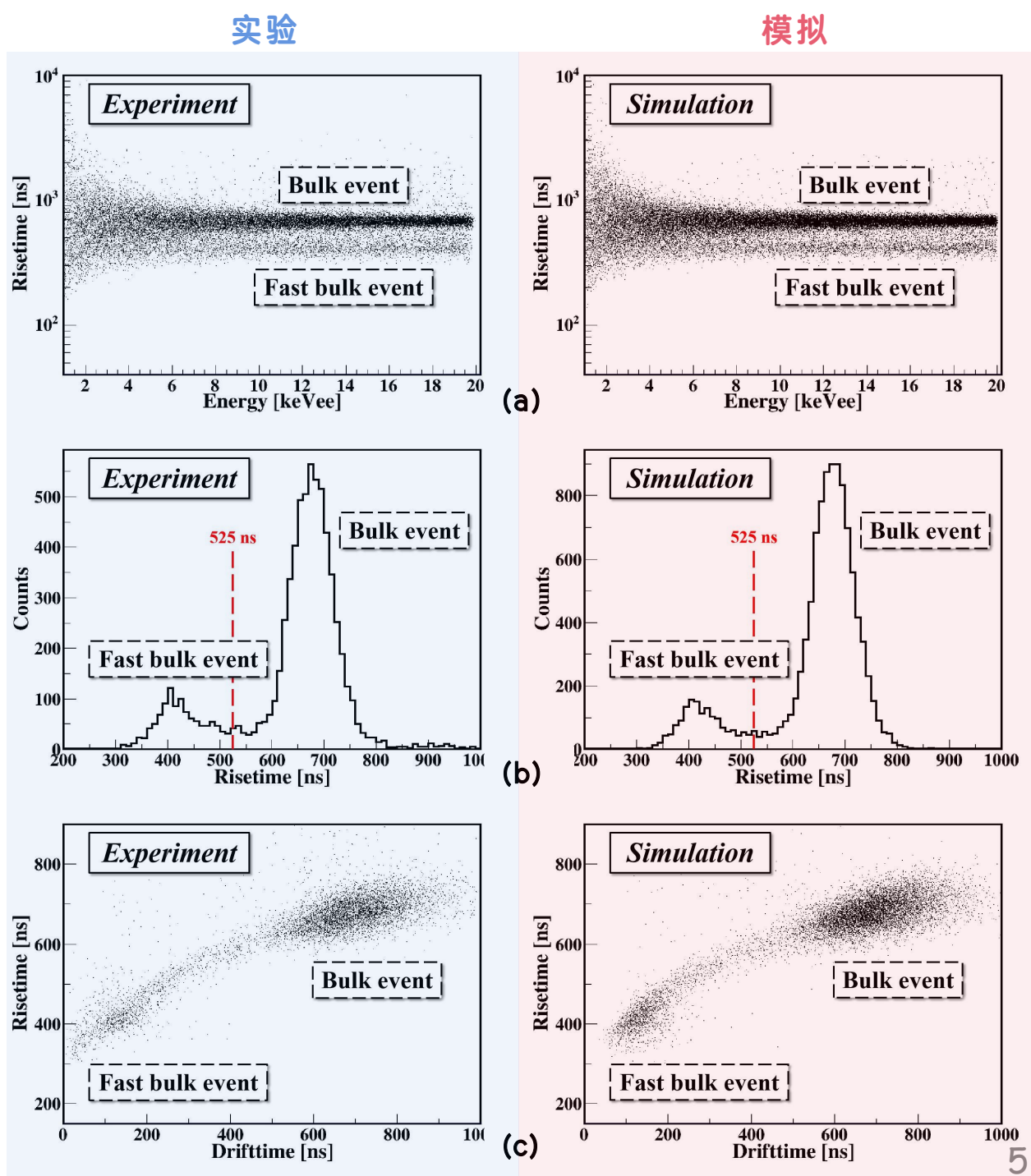
Fig.9 (a) 上升时间-能量二维图

(b) 上升时间分布(Above 15 keVee)

(c) 上升时间-漂移时间^[2]二维图(Above 15 keVee)

模拟和实验结果显示了

高 一 致 性



[2]漂移时间: 波形幅度5%-95%的时间间隔

体事例-超快体事例区域

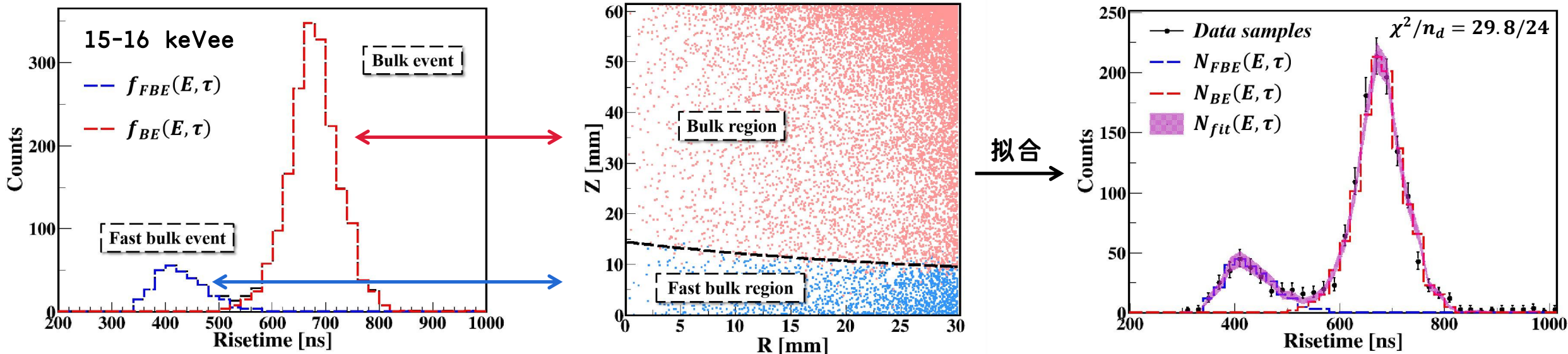
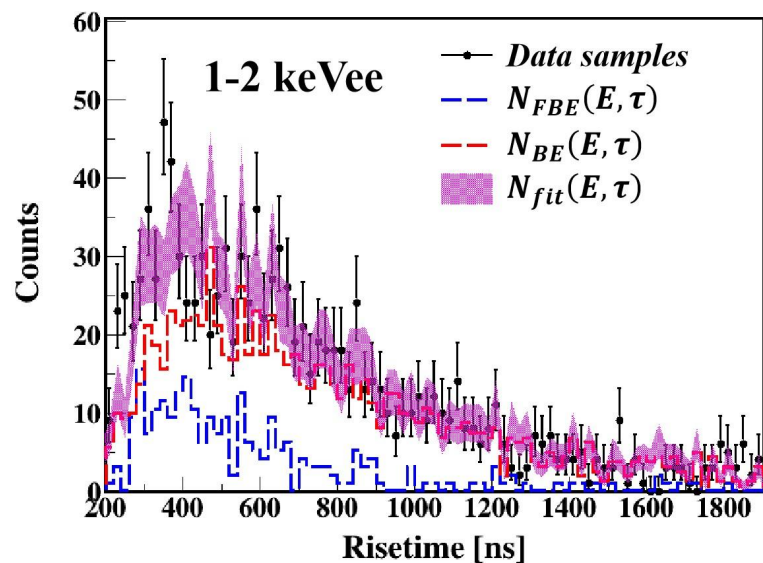


Fig.10 (左)模拟的两类事例的上升时间分布

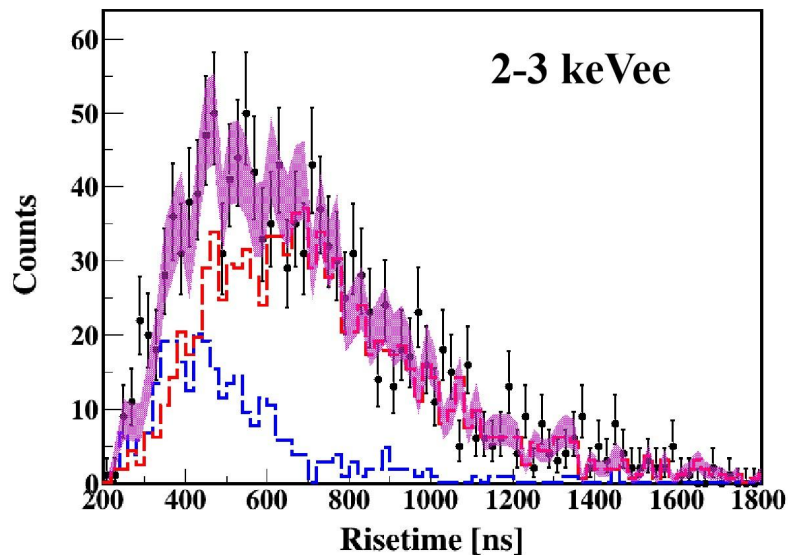
(中)C1B探测器体事例-超快体事例的分布

(右)拟合实验数据

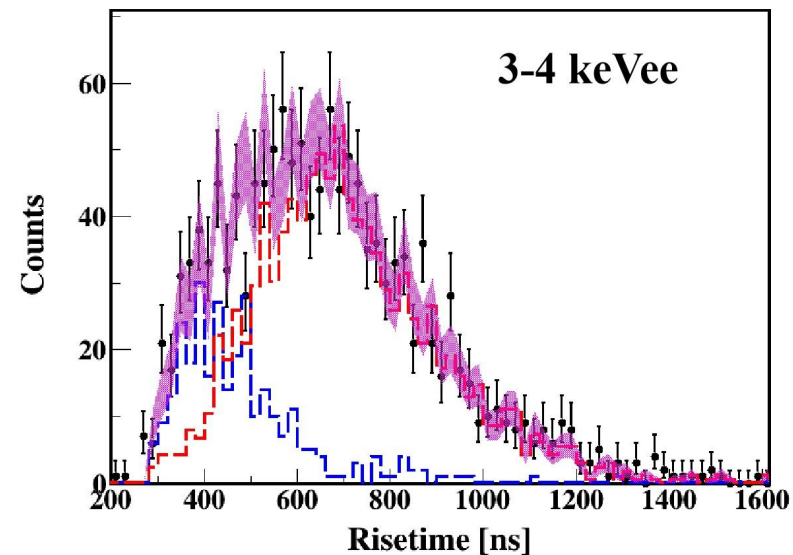
- ⊙ 由**模拟得到的事例位置**估计探测器内体事例-超快体事例的分布
- ⊙ 超快体事例区域占晶体总体积的约[**18.8%**]
- ⊙ 与视为均匀分布的宇生核素的超快体事例占比**一致**， $^{68}\text{Ge}(16.2\pm 3.0\%)$, $^{65}\text{Zn}(11.4\pm 5.2\%)$



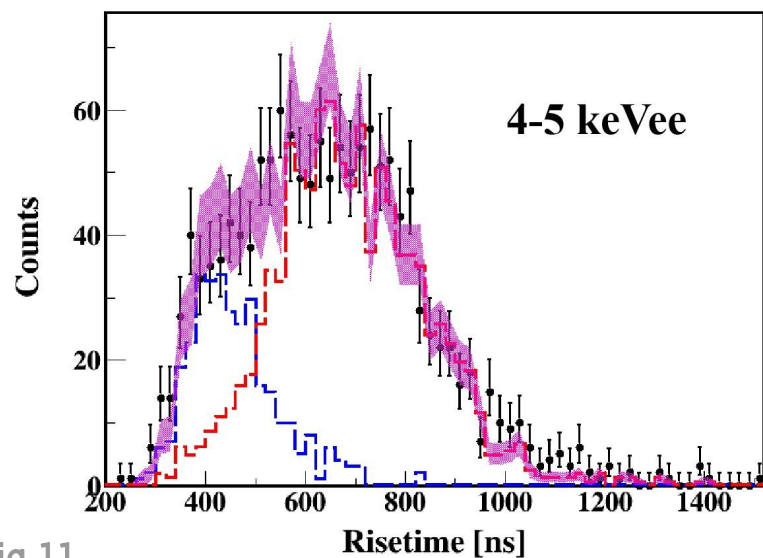
(a)



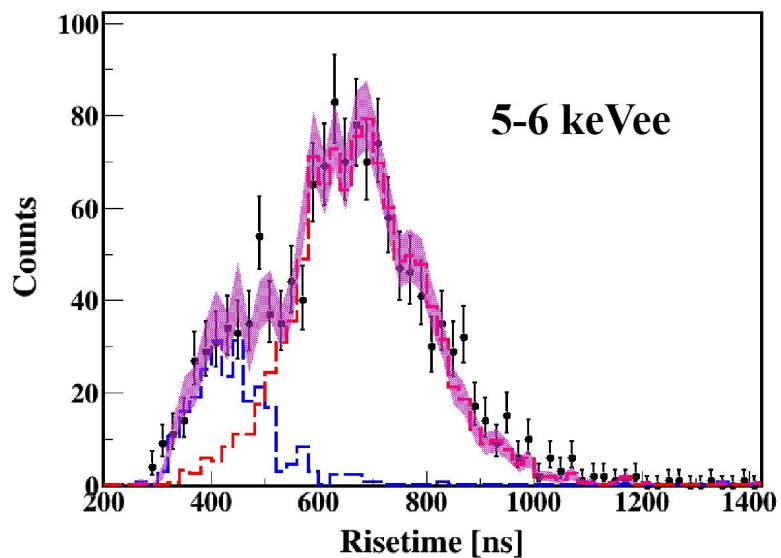
(b)



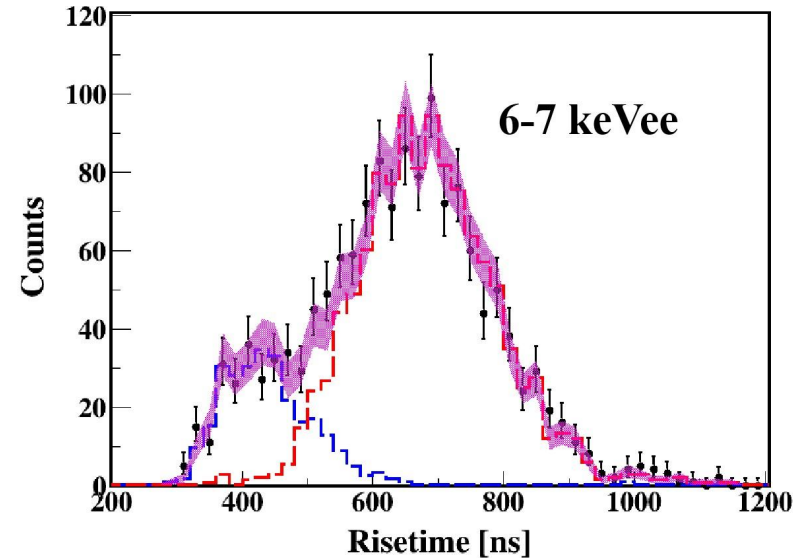
(c)



(d)



(e)

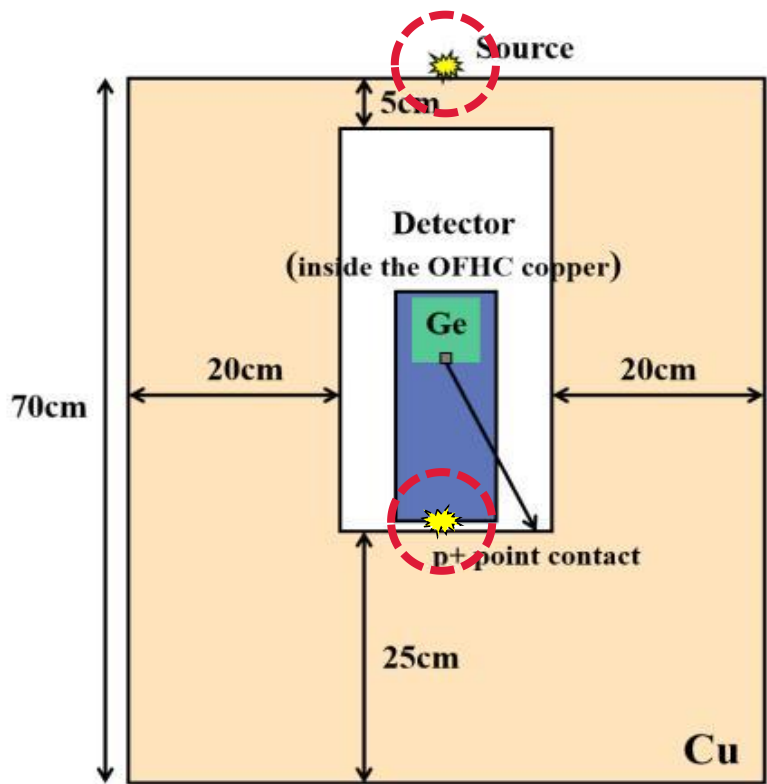


(f)

本底甄别问题

◎ **最终目的**：低能区本底能谱中体事例与超快体事例的甄别

◎ **面临的问题**：本底中包含有来源未知且位置复杂的放射源 ----- 分布能否近似？



- ◎ 改变放射源种类： ^{60}Co / ^{137}Cs
- ◎ 改变放射源位置：顶部 / 底部

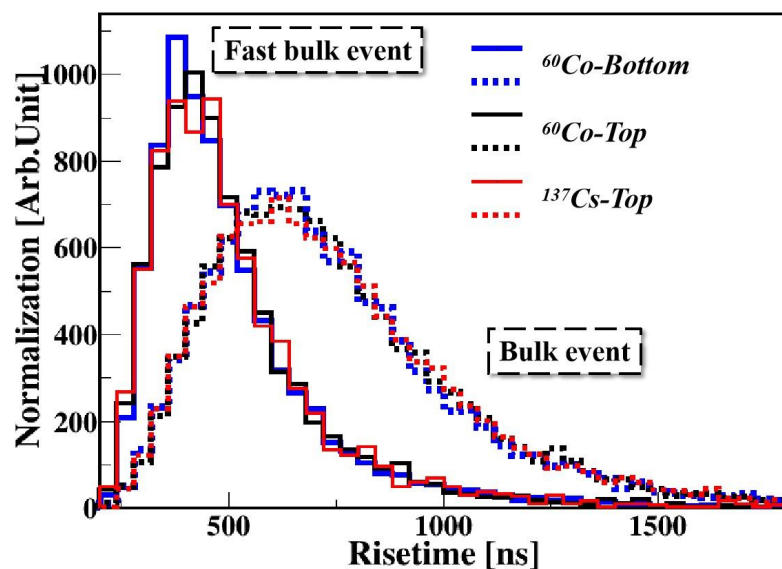
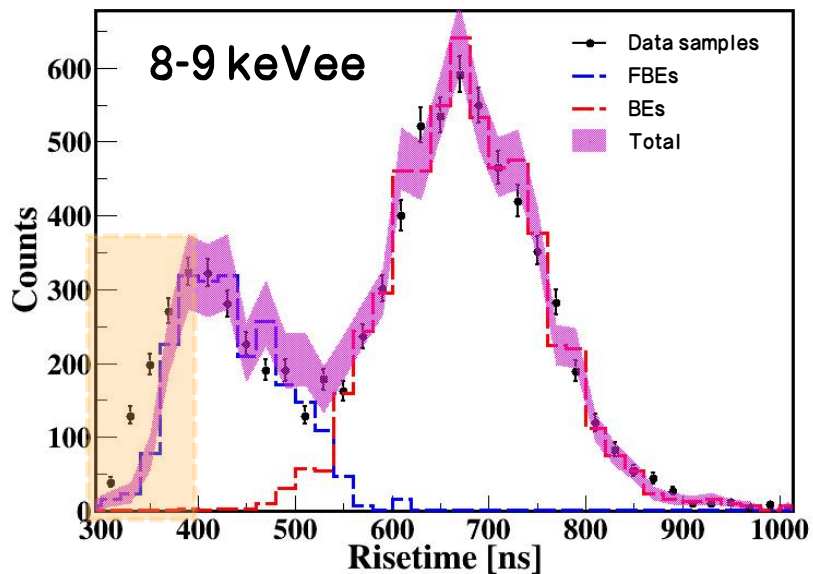


Fig.12 不同放射源种类及位置对2-3keVee能区上升时间分布的影响

判断：**外部放射源对ROI低能区两类事例上升时间分布几乎与其种类及位置无关**

本底事例甄别方法



- ⊙ 模拟的源上升时间分布在300~370ns存在缺失 --- FBEs中更快的部分
- ⊙ FBEs分布中更快的部分来自于更靠近P+面的区域
- ⊙ 本底甄别方法：
外部源的上升时间分布 + P+面附近上升时间分布 [属于FBEs]

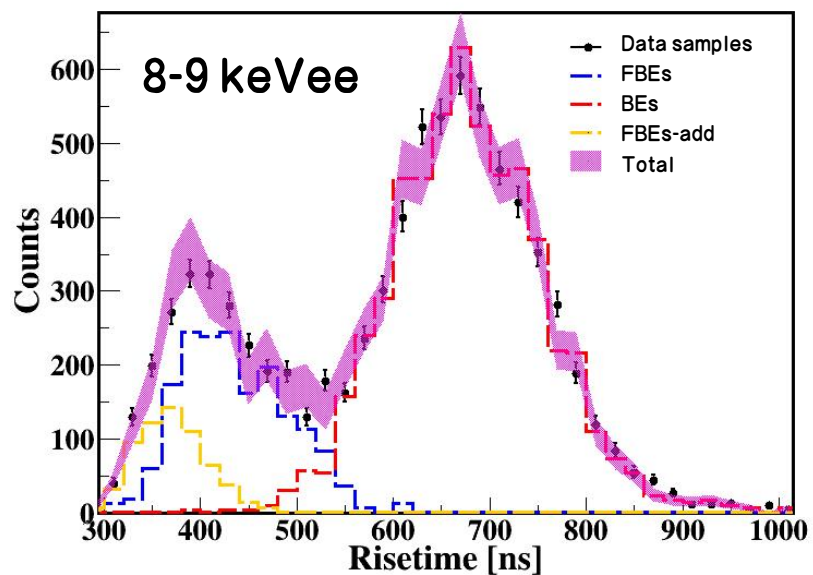


Fig.9 本底能谱拟合结果

模拟假设

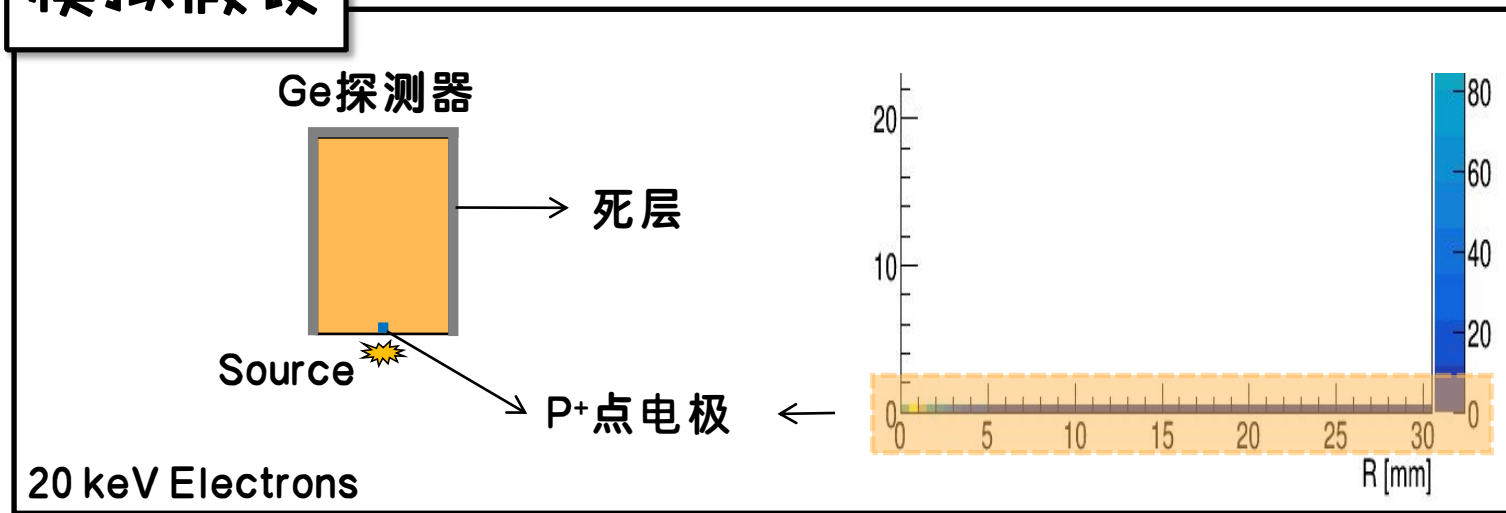


Fig.10 P+面附近低能量粒子的能量沉积模拟

极低能区的表面事例渗透

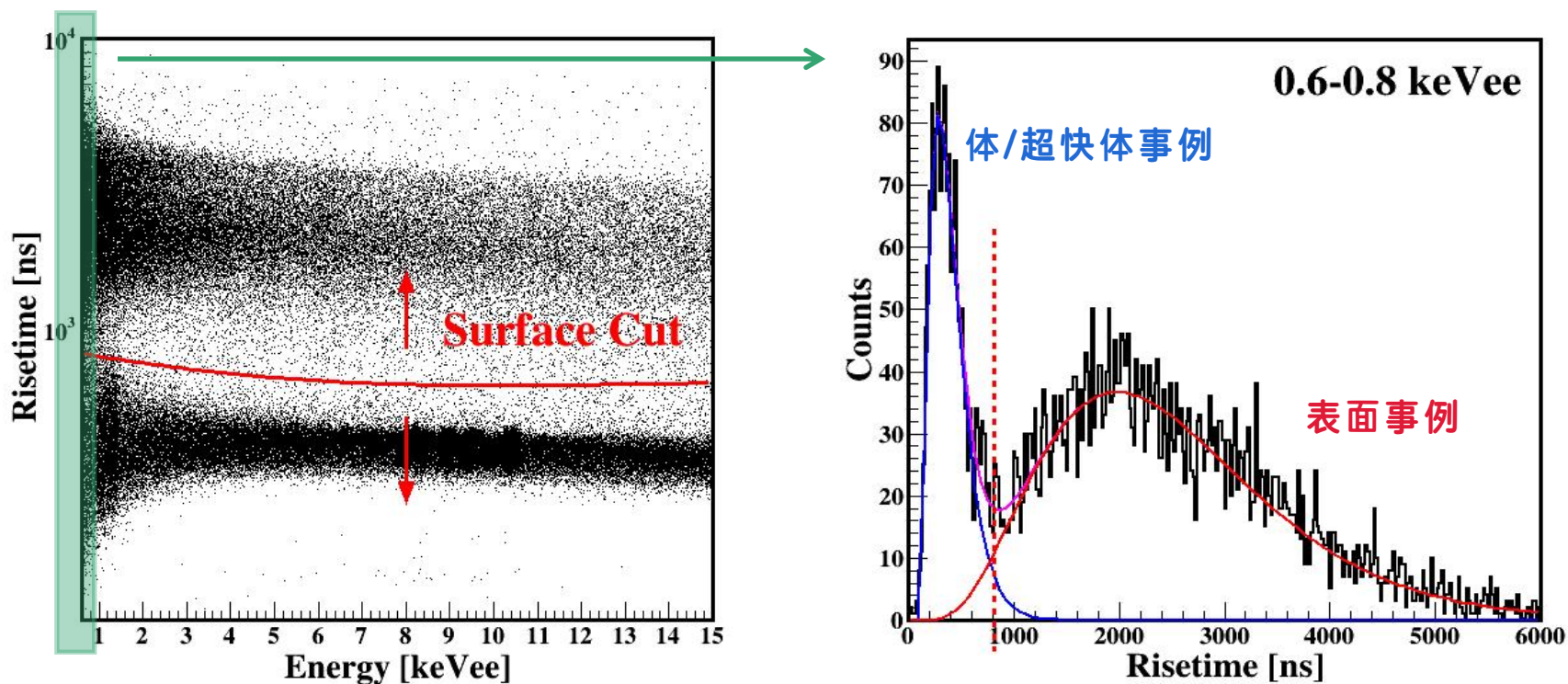


Fig.13 1keV能区以下表面事例的渗透

⊙ 1keVee以下**表面事例渗透**严重，影响体/超快体事例甄别

⊙ 应用前述方法实现1keVee以下体/超快体事例的甄别

⊙ 要求得到**扣除了**表面事例后的本底上升时间分布

机器学习实现体表事例甄别

机器学习方法优势：◎ 可以识别人类可能遗漏的数据趋势和模式

◎ 可以在动态、大容量和复杂的数据环境中处理各种数据格式

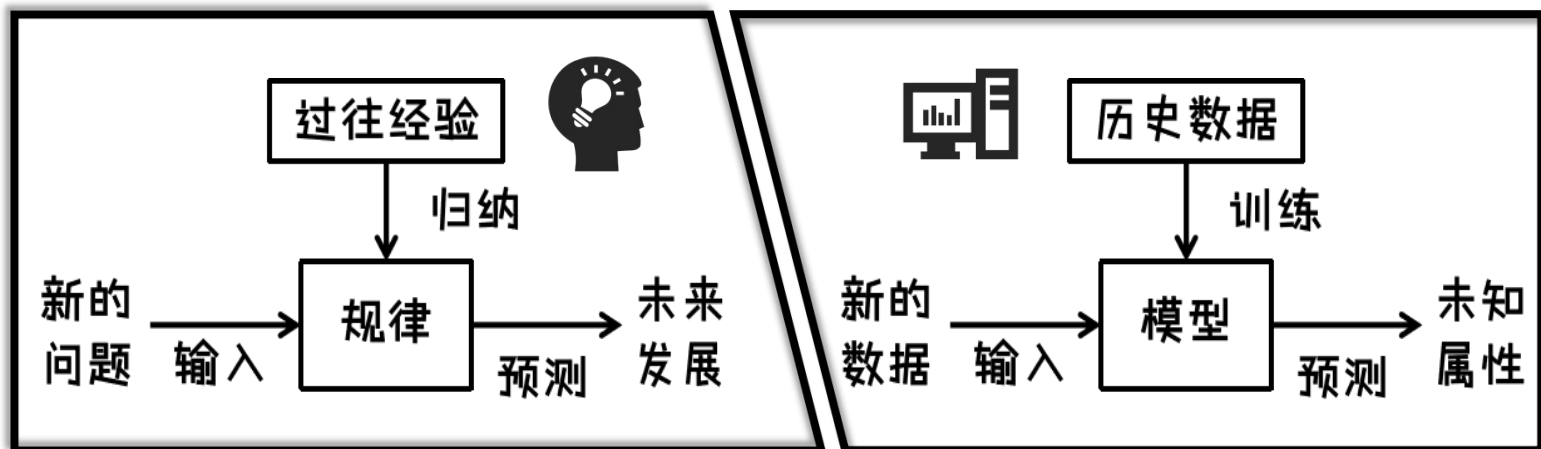


Fig.14 “机器学习”类比人类经验总结

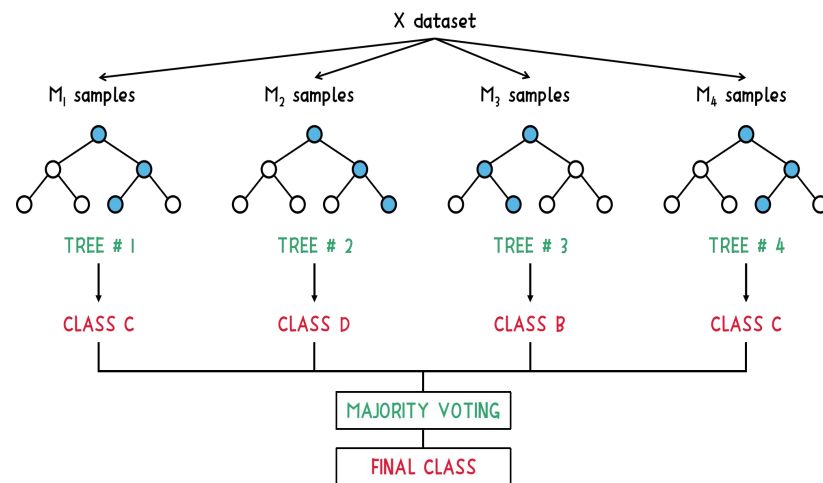


Fig.15 机器学习中的随机森林算法

◎ 应用于波形甄别：快速提取波形信息，结合多个重要特征点进行数据分析

◎ 机器学习模型：随机森林分类算法（决策树 + 集成学习思想）



机器学习--数据训练

◎ 方法：训练集(模型训练) + 修正集(效率修正) + 测试集(结果测试)

训练集是已知数据标签(分类)的数据集

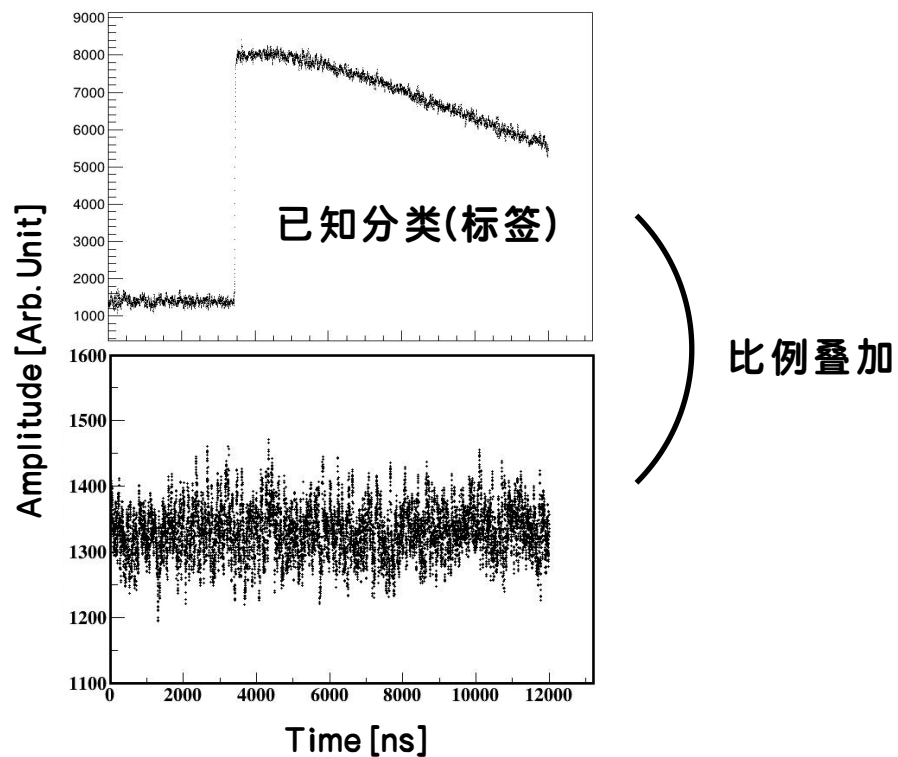


Fig.16 生成训练集数据

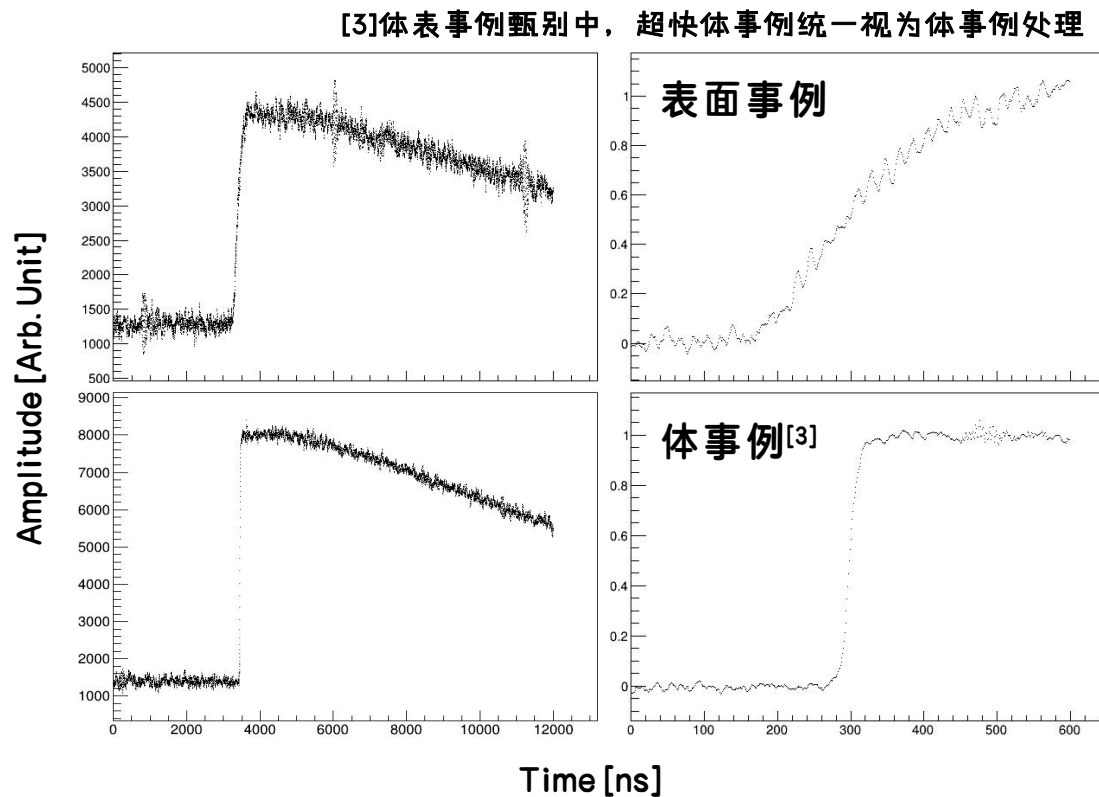


Fig.17 样本波形及特征选取

◎ 低能区训练集的数据来源：高能区事例（带标签）+ 噪声

来源：本底 + ^{60}Co + ^{137}Cs + ^{241}Am

◎ 数据预处理[样本特征工程]：特征选择、特征的标准化和归一化

机器学习--效率修正

◎ 方法：训练集(模型训练) + **修正集(效率修正)** + 测试集(结果测试)

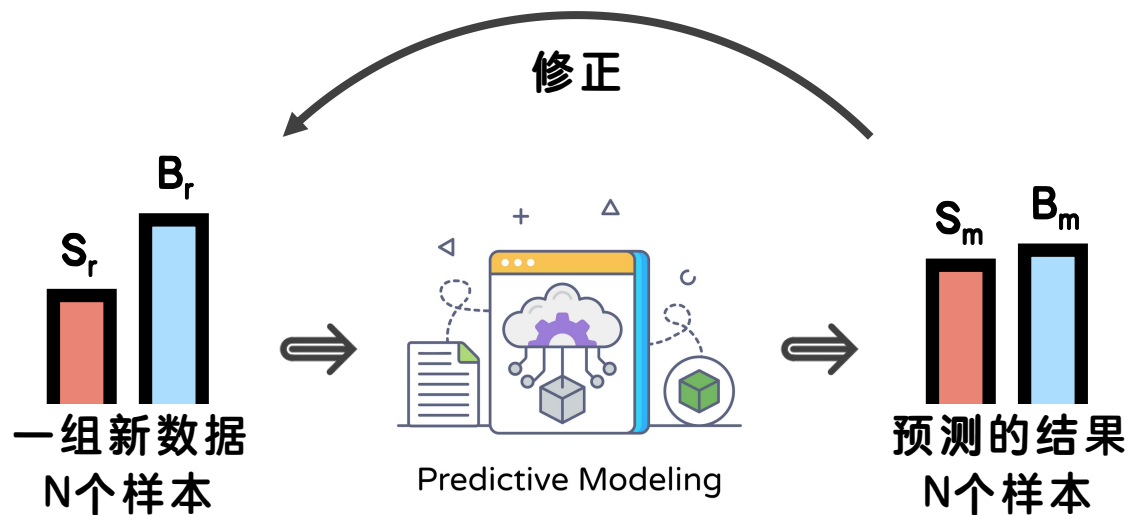


Fig.18 数据预测

混淆矩阵 confusion matrix		预测标签	
		B_m	S_m
真实标签	B_r	正确TB	误判FS
	S_r	误判FB	正确TS

Fig.19 数据预测结果-混淆矩阵

◎ 期望原数据表面/体事例的上升时间分布，**需要还原到真实的计数**，而非仅是预测的准确度

◎ 引入修正集：修正集也是已知数据标签(S_r, B_r)的数据集
 通过模型预测得到预测正确的事例数(TB, TS)
 利用效率修正公式修正未知新数据

$$\epsilon = \frac{TB}{B_r}$$

$$\lambda = \frac{TS}{S_r}$$

$$B_r = \frac{B_m - (1 - \lambda) \times N}{\epsilon + \lambda - 1}$$

$$S_r + B_r = S_m + B_m$$

机器学习--结果测试

◎ 方法：训练集(模型训练) + 修正集(效率修正) + 测试集(结果测试)

测试集也已知数据标签，一开始可从训练集分出，只在最后使用

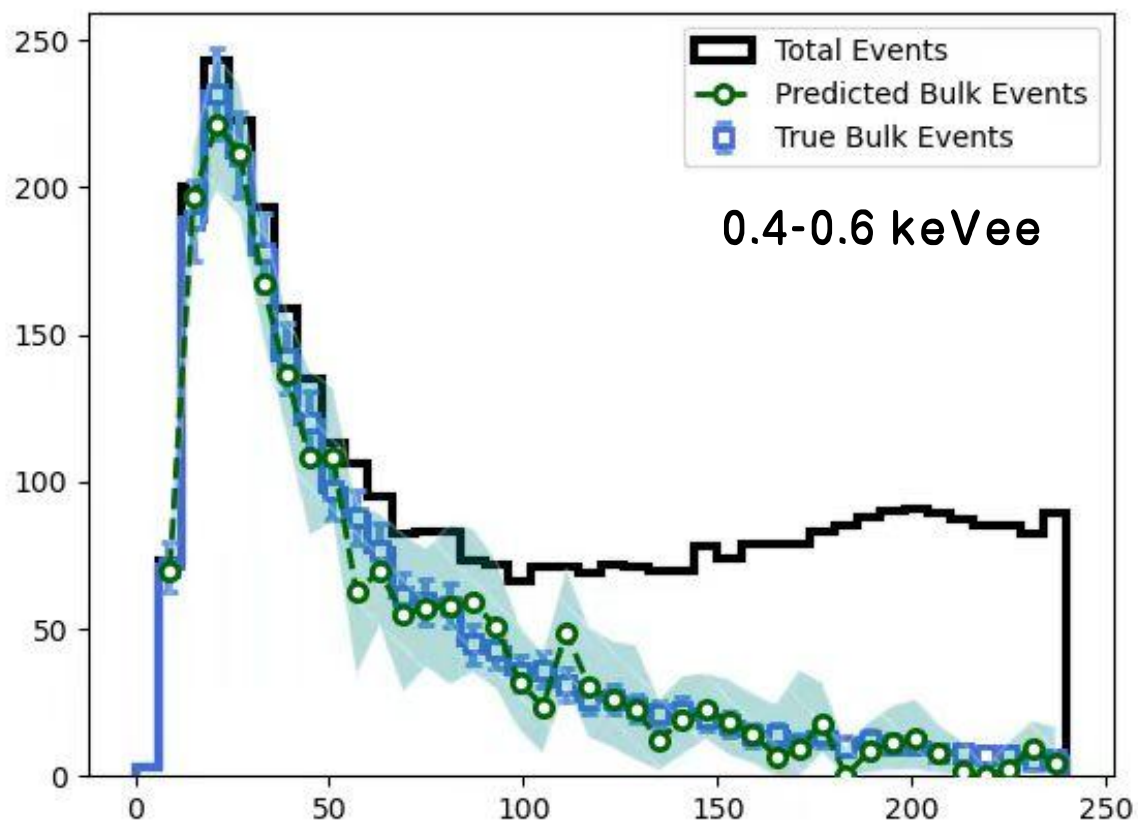


Fig.20 测试集0.4-0.6keV能区的总上升时间分布及体事例分布

◎ 基于效率分布**一致性**的假设

◎ 目前主要误差考虑：

◎ 来自 ϵ 和 λ 统计误差 ----- ϵ/λ 系统误差

◎ 标签概率阈值的选择

Preliminary

测试集修正结果与Br分布显示出

一致性

联合机器学习 & 波形模拟的三类事例甄别

- ① 利用机器学习获得修正的Bulk总能谱 - Br (包含超快体事例)
- ② 利用模拟的体事例与超快体事例的上升时间分布函数解Br总能谱

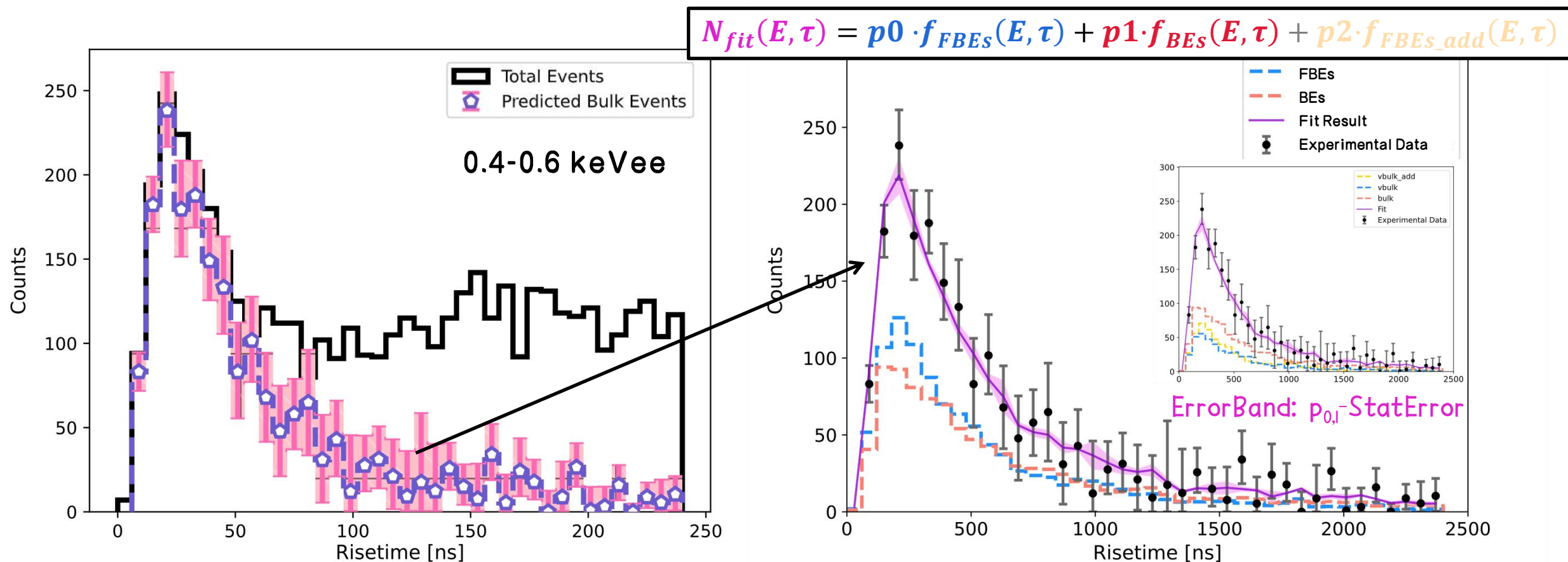


Fig.21 本底数据0.4-0.6keV能区三类事例的甄别结果

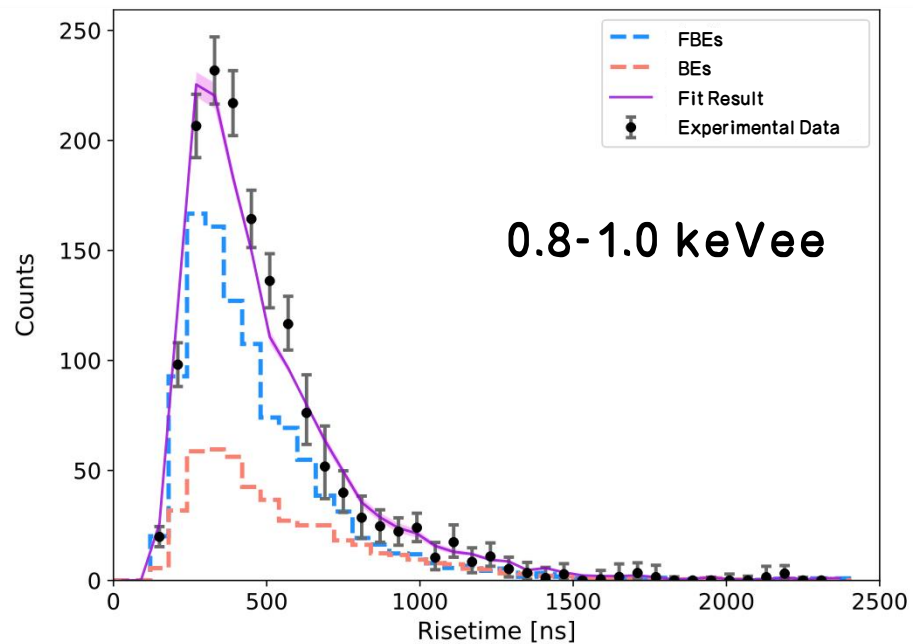
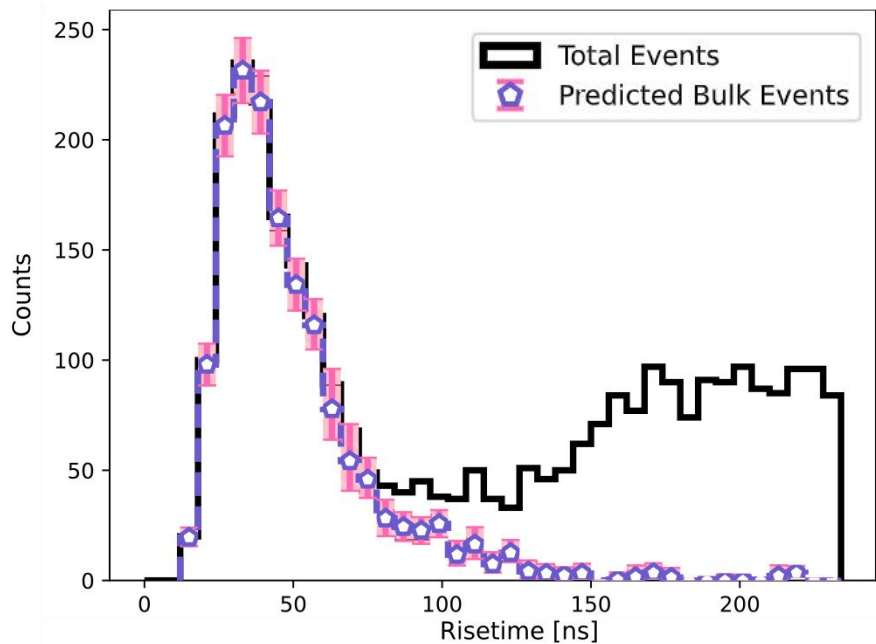
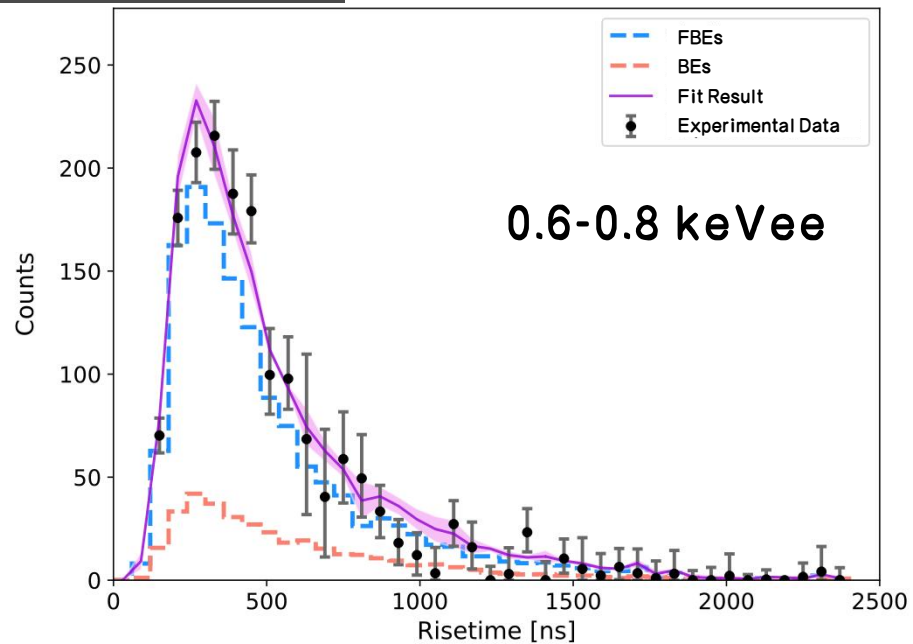
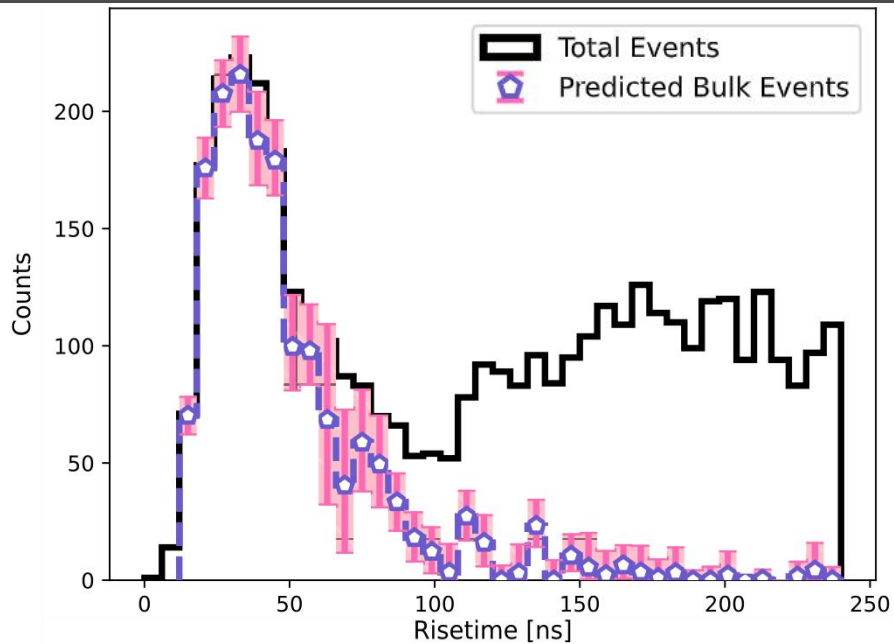
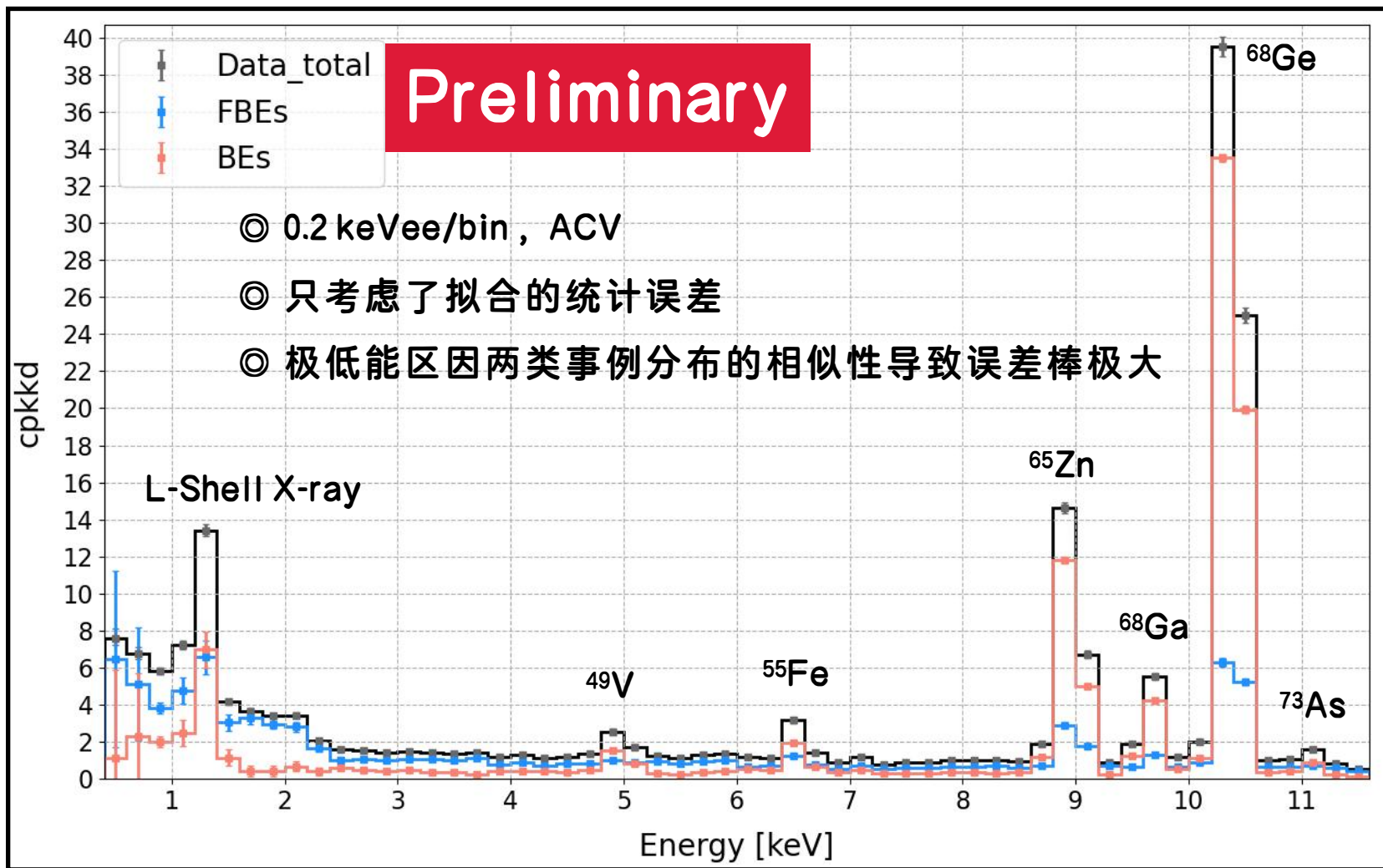


Fig.23 能谱甄别结果



◎ 完成0.4keVee以上本底能谱的事例甄别

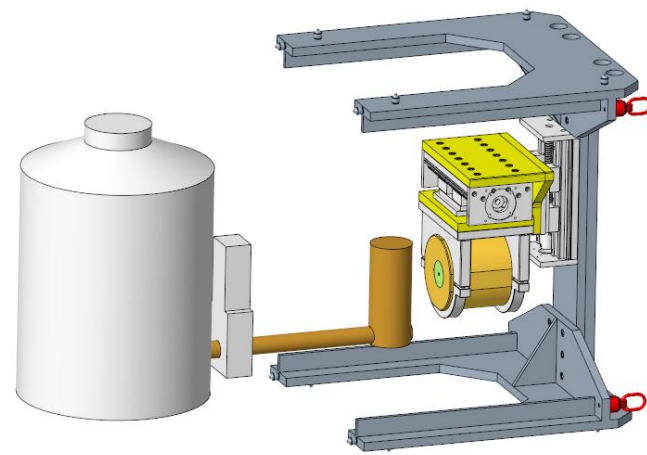
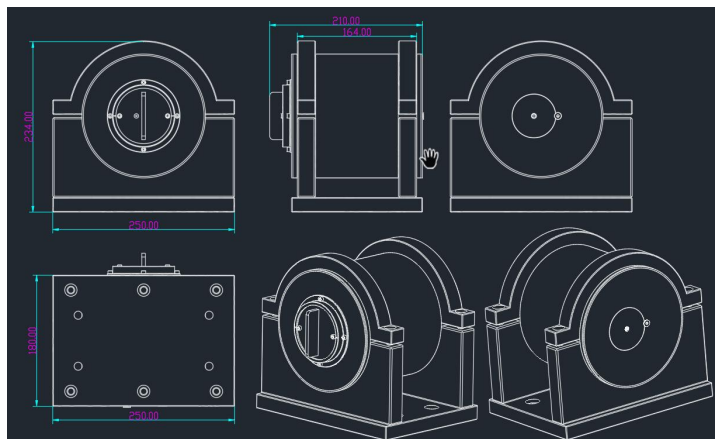
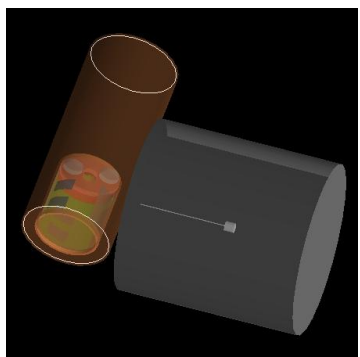
◎ 超快体事例本底在极低能区呈上升趋势，体事例能谱则趋于平坦

工作总结

- ◎ 观察到 p PCGe探测器具有一定的单点事例空间位置分辨能力，并提供了一种甄别[体/超快体]事例的方法
- ◎ 利用机器学习实现 $< 1\text{keV}$ [体表]事例甄别，并结合[体/超快体]概率密度分布函数，优化了极低能区三类事例的甄别方法
- ◎ 得到低能区(至 0.4keV)体事例与超快体事例能谱
若扣除超快体事例，可显著降低CDEX实验本底，提升探测灵敏度

未来计划

- ◎ 优化随机森林模型参数，深度剖析数据集特征，寻求更优参数服务事例甄别
- ◎ 完善事例甄别能谱结果：包括各种误差考虑、函数拟合细节优化...
- ◎ 得到基于C1B探测器一定的位置分辨能力，开展波形扫描实验。
(实验准备中...)

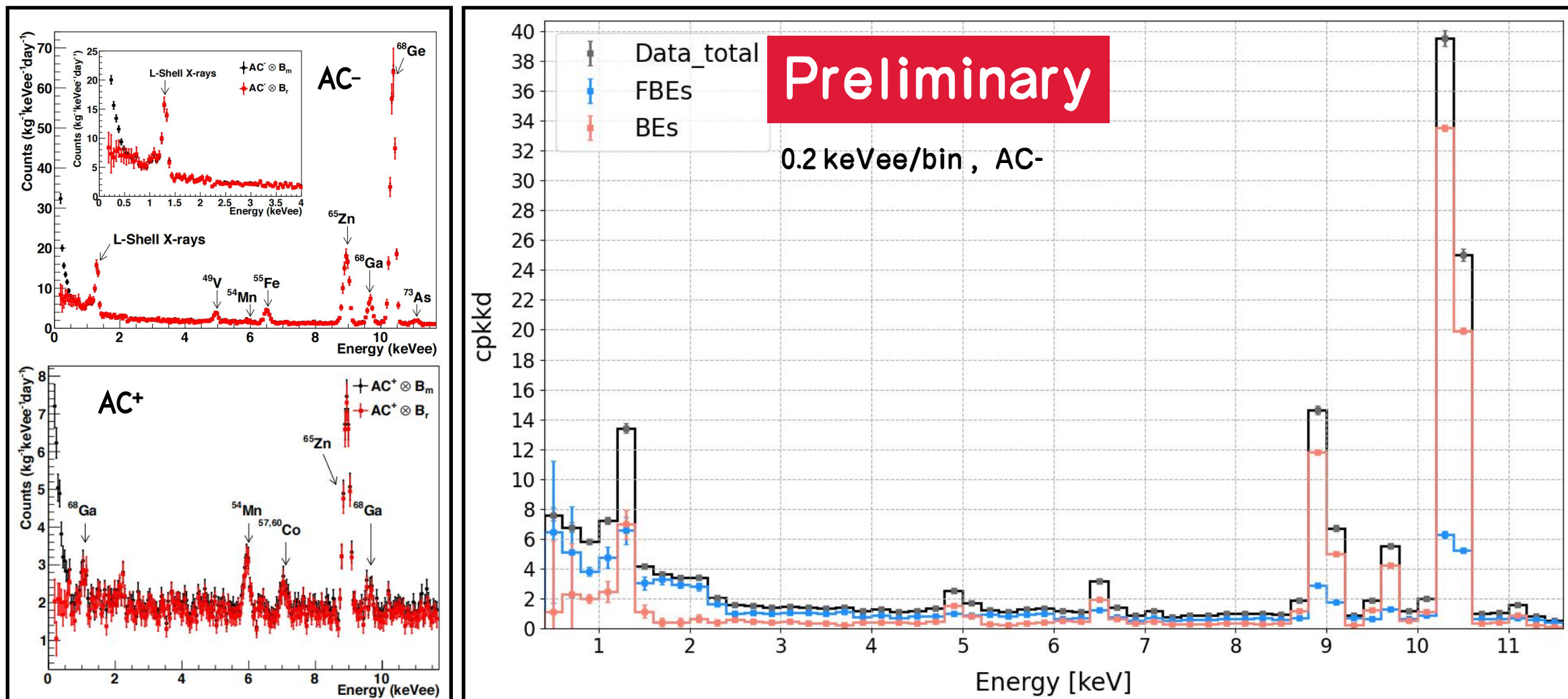


T H A N K S

汇报完毕 感谢

汇报人：李任明杰

备份



⊙ 完成0.4keVee以上本底能谱的事例甄别

⊙ 超快体事例本底在极低能区呈上升趋势，体事例能谱则趋于平坦

