

# 高纯锗 (HPGe) $\gamma$ 射线谱仪

钱思天 2001112187

2021 年 4 月 14 日

## 摘要

本实验利用了高纯锗 (HPGe) 谱仪探测器, 对  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  源、环境本底以及矿渣样本进行测量。通过对  $^{152}\text{Eu}$  源的测量, 对探测系统进行了相对效率刻度, 而后, 通过对  $^{60}\text{Co}$  源的测量, 对实验测量系统做了绝对效率刻度。而后, 通过调节放大倍数并重新刻度, 让探测器能够探测矿渣中的  $\gamma$  射线, 进而判断出矿渣中所含有的元素。

关键词: 高纯锗  $\gamma$  射线谱仪、探测效率刻度、未知成分探测

## 1 背景简介

### 1.1 高纯锗 $\gamma$ 射线谱仪

$\gamma$  射线是原子核衰变或裂变时放出的辐射, 本质上它是一种能量比可见光和  $X$  射线高得多的电磁辐射。利用  $\gamma$  射线与物质相互作用的规律, 人们已设计出多种类型的  $\gamma$  射线的探测器。用于测量  $\gamma$  射线能量和强度的仪器称为  $\gamma$  能谱仪, 谱仪一般有射线探测器和电子学系统两大部分。最常用的有 NaI(Tl) 闪烁谱仪和高纯锗 (HPGe) 半导体谱仪。闪烁探测器是利用某些物质在射线作用下发光的特性来探测射线的仪器。HPGe 探测器是利用  $\gamma$  光子与探测介质原子发生相互作用产生次级电子, 通过次级电子在介质中的电离效应来探测射线的仪器。本实验介绍一种高分辨率的高纯锗  $\gamma$  谱仪。高纯锗探测器 (High-Purity Germanium 简称 HPGe 探测器) 实质上是利用纯度极高的锗制成的 P-N 探测器。由于锗的纯度极高, 也就是杂质浓度很低, 因而电阻率很大, 可得到较厚的耗尽层, 又由于锗的原子序数高, 适合于探测  $\gamma$  射线。HPGe 探测器具有能量分辨率极高的优点, 所以它被广泛应用于  $\gamma$  射线能谱的测量, 使  $\gamma$  谱学的面貌发生了根本的变化。近年来, 在核谱学、核反应、核工程和核技术应用等方面, HPGe 探测器已成为分析复杂  $\gamma$  能谱的不可缺少的工具。

### 1.2 实验目的

1. 了解高纯锗 (HPGe) 射线谱仪的原理、一般操作以及数据采集、处理的方法等;
2. 利用  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  做探测效率刻度;
3. 测定未知样品的种类、活度。

## 2 实验介绍

### 2.1 实验装置

本实验用到的实验装置比较简单, 有:

1. 高纯锗谱仪一套;

2. NIM 机箱、插件式高压电源、低压电源、主放大器各一个；
3. 多道数据采集以及微机系统一套。
4.  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  放射源各一个；
5. 未知矿渣样品及固定装置一套。

## 2.2 实验操作

鉴于上一位同学实验结束时的状况，实验步骤调整如下：

1. 连接电子学线路，检查无误后给高纯锗探头加高压至 3500V。并且沿用上一位同学成功的放大倍数 ( $50 \times 1.12$ )。
2. 测定环境本底与矿渣样品能谱，各 20 分钟。
3. 测量  $^{152}\text{Eu}$  十分钟，利用此数据及接下来测量的  $^{60}\text{Co}$  数据进行刻度。
4. 将主放大器的放大倍数调至两倍 ( $100 \times 1.12$ )，而后分别测量  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  及环境本底各 10 分钟，并利用他们进行刻度。

## 3 数据处理

### 3.1 利用 $^{60}\text{Co}$ 的测量结果，计算谱仪的相关性能参数

$^{60}\text{Co}$  的测量谱如图1，根据测量结果，可以计算出谱仪的相关性能参数，如谱仪分辨率，峰康比和相对探测效率。为

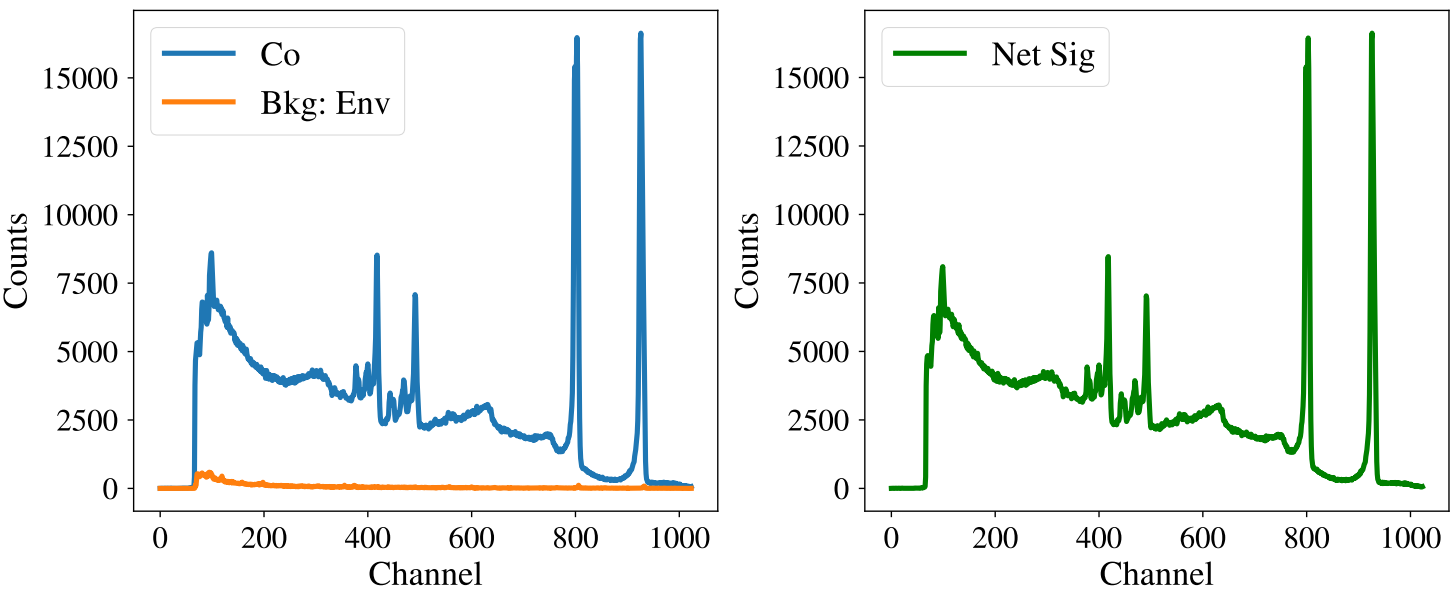


图 1:  $^{60}\text{Co}$  放射源的测量结果

了测算谱仪分辨率等，需要采用  $^{60}\text{Co}$  的两个特征峰，如图2。利用 PHA18 软件进行寻峰操作，可得结果如表1，易知峰 No.2 为 1.33MeV 全能峰。其他的测量结果为

1. 康普顿平台平均计数：4459.5；

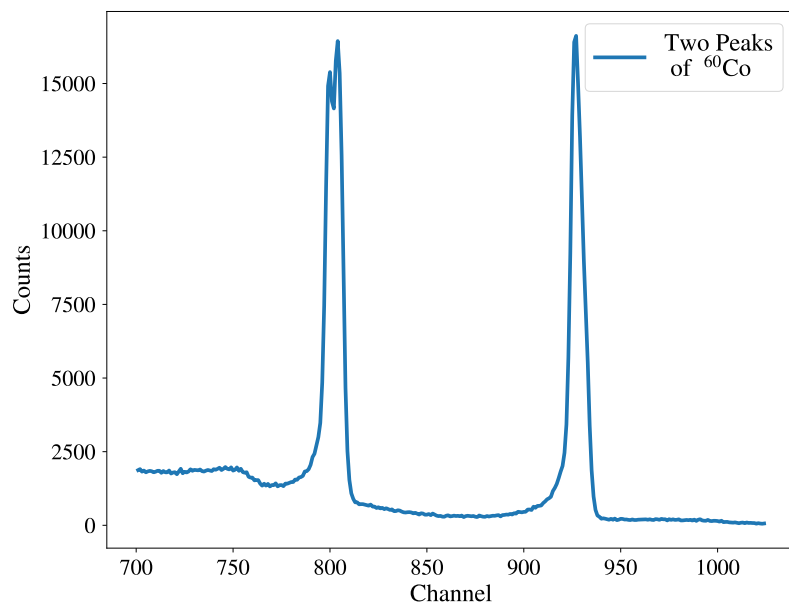


图 2:  $^{60}\text{Co}$  的两个特征峰

2. 活时 528s。

表 1:  $^{60}\text{Co}$  的两个峰的测量结果

Peak	Channel	FWHM	Peak Counts	Peak Area	$E[\text{KeV}]$
No.1	803	9.9	16472	193183	1173.2
No.2	926	7.7	16633	149863	1332.5

计算可得：

1. 谱仪的能量分辨

$$\text{FWHM} * \frac{1332.5 - 1173.2}{926 - 803} = 9.97\text{KeV} \quad (1)$$

2. 峰康比：3.73；

3. 相对探测效率：

$$\varepsilon_{ref} = \frac{S}{Dt} = 0.3\% \quad (2)$$

### 3.2 刻度

原则上说，既然道址和能量存在线性正比关系，那么最少利用两个点就可以进行刻度。仅利用  $^{60}\text{Co}$  刻度的结果为：

$$E = 1.2591 * \text{Ch} + 133.22 \quad (3)$$

但是，仅仅利用  $^{60}\text{Co}$  能谱的两个峰进行刻度，结果难免会有测量误差导致的偏差。

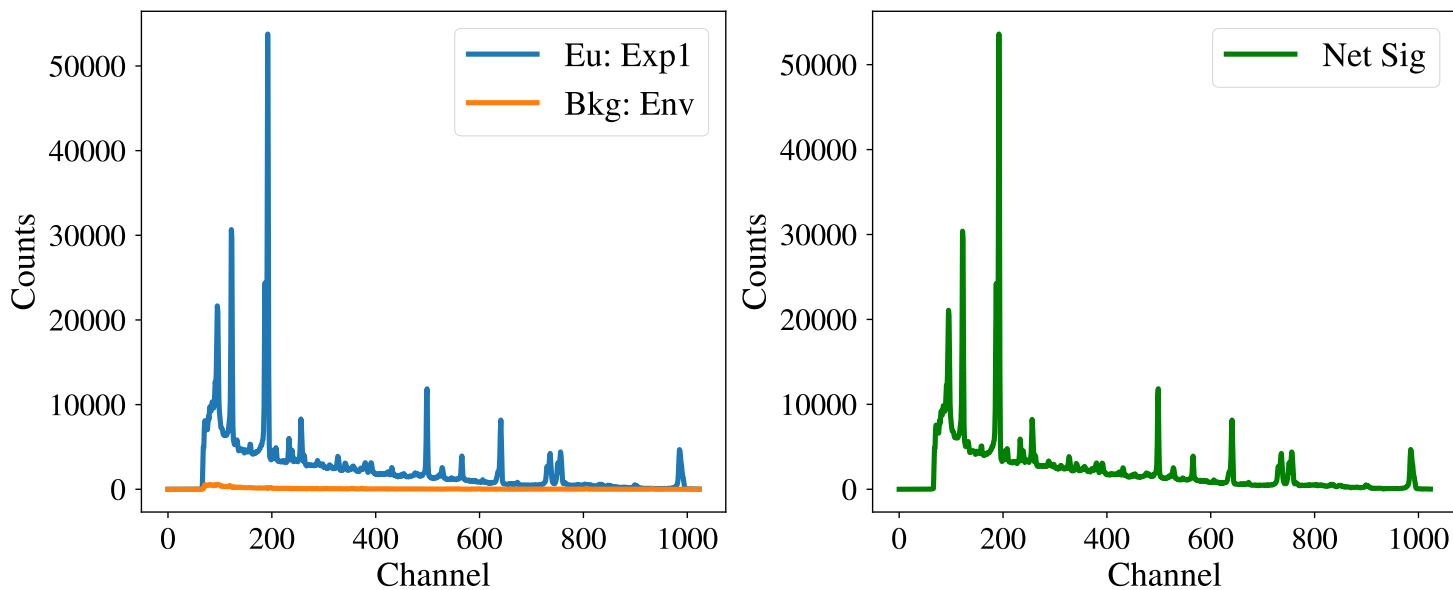


图 3:  $^{152}\text{Eu}$  第一次刻度的测量结果

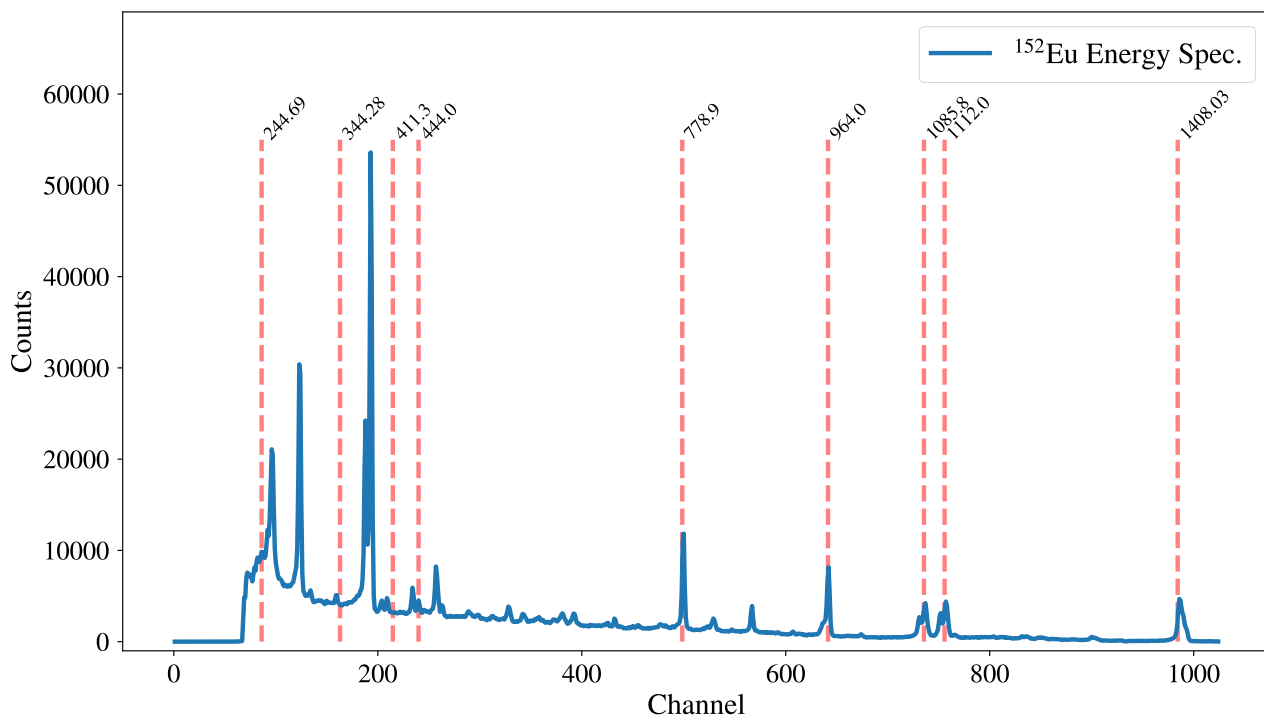


图 4: 利用  $^{60}\text{Co}$  的粗刻度结果对  $^{152}\text{Eu}$  的峰位进行预测，并和测量结果进行比较

对  $^{152}\text{Eu}$  的测量结果如图3所示。

如果利用上述  $^{60}\text{Co}$  进行刻度的结果对  $^{152}\text{Eu}$  进行粗测，结果如图4。

在 高能区，粗测的刻度结果能够很好的解释实验观察到的峰位。但是能量较低的区间，则难以令人满意，这可能是由于低能区的响应不够线性带来的。因此，我们选用高能区的五个峰位，加上  $^{60}\text{Co}$  的两个峰进行刻度。 $^{152}\text{Eu}$  在这一阶段的测量数据记录如表2。

表 2:  $^{152}\text{Eu}$  的测量结果

Peak	Channel	Peak Area: $S$	Probability: $K$	$E[\text{KeV}]$	$S/K$	$\ln(S/K)$	$\ln(E)$
1	985	31800	0.20850	1408.03	152517.986	11.935	7.250
2	756	23924	0.13560	1112.00	176430.678	12.081	7.014
3	736	22745	0.10160	1085.80	223868.110	12.319	6.990
4	641	31479	0.14620	964.00	215314.637	12.280	6.871
5	499	30256	0.12960	778.90	233456.790	12.361	6.658
6	256	20451	0.03121	444.00	655270.747	13.393	6.096
7	233	9357	0.02230	411.30	419596.413	12.947	6.019
8	192	197370	0.26580	344.28	742550.790	13.518	5.841
9	122	83933	0.07510	244.69	1117616.511	13.927	5.500
10	95	115823	0.28370	121.78	408258.724	12.920	4.802

根据实验数据，可得刻度为：

$$E = 1.2945 * \text{Ch} + 133.41 \quad (4)$$

刻度结果如图5。同时，也可得相对效率曲线如图6。考虑到低能区的响应不是很好，我们去除了低能的离群点。得到相对效率曲线如下：

$$\ln(S/K) = -1.1274 \ln(E) + 20.0469 \quad (5)$$

### 3.3 绝对效率曲线

对谱线的绝对效率值可以进行如下计算：

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 \times \left( \frac{S_i}{K_i} / \frac{S_0}{K_0} \right) \quad (6)$$

将  $^{60}\text{Co}$  的全能峰的峰位代入，可以得到

$$\frac{S_0}{K_0} \approx 152583.73 \quad (7)$$

由此，可以得到绝对探测效率公式为

$$\varepsilon_i = 1.97 \times 10^{-8} \left( \frac{S_i}{K_i} \right) \quad (8)$$

而后，可以做出绝对效率曲线如图7。

### 3.4 分析未知源能谱

在这一阶段的实验里，因为调节了放大倍数，需要重新做刻度。重新测量的  $^{152}\text{Eu}$  如图8 鉴于放大倍数缩小到了原来

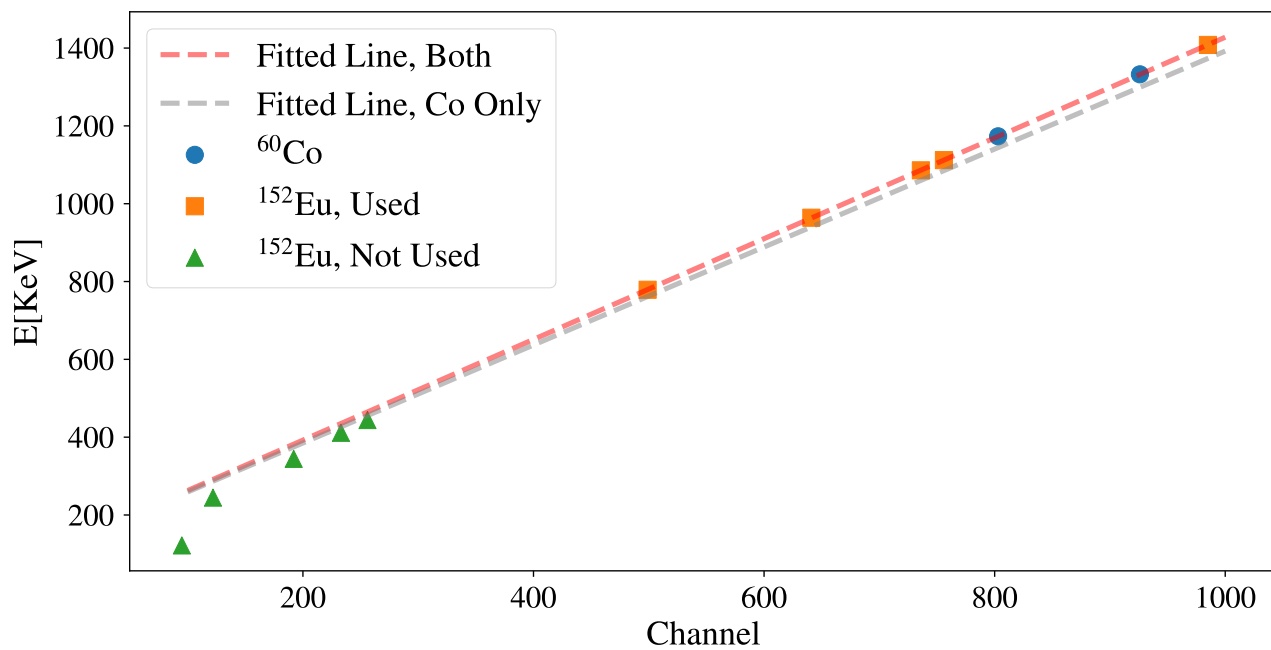


图 5: 本部分的刻度结果

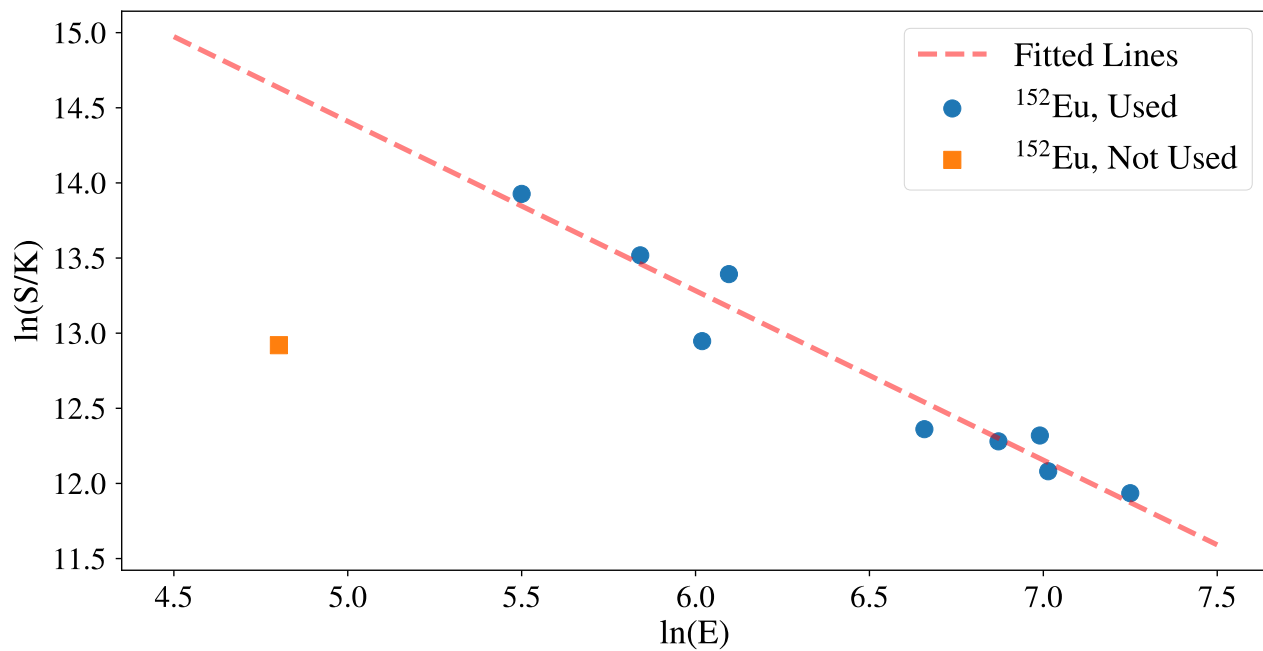


图 6: 相对效率曲线  $\ln(S/K) - \ln(E)$

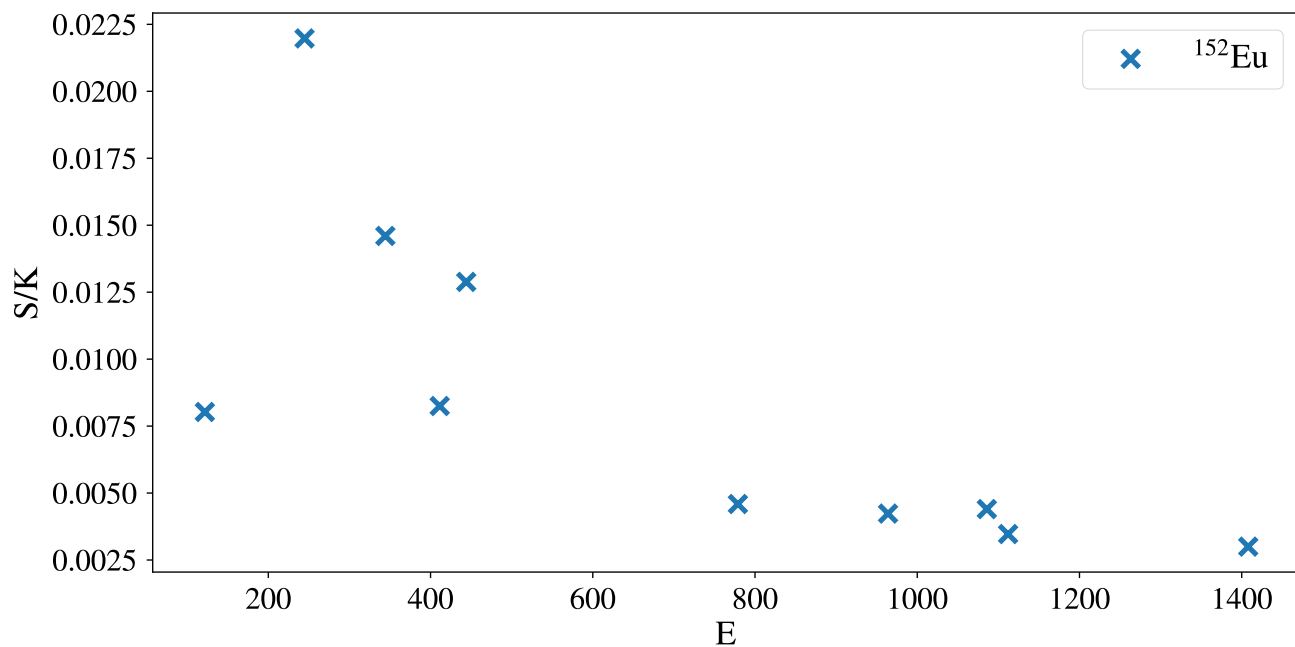


图 7:  $^{152}\text{Eu}$  的绝对效率曲线

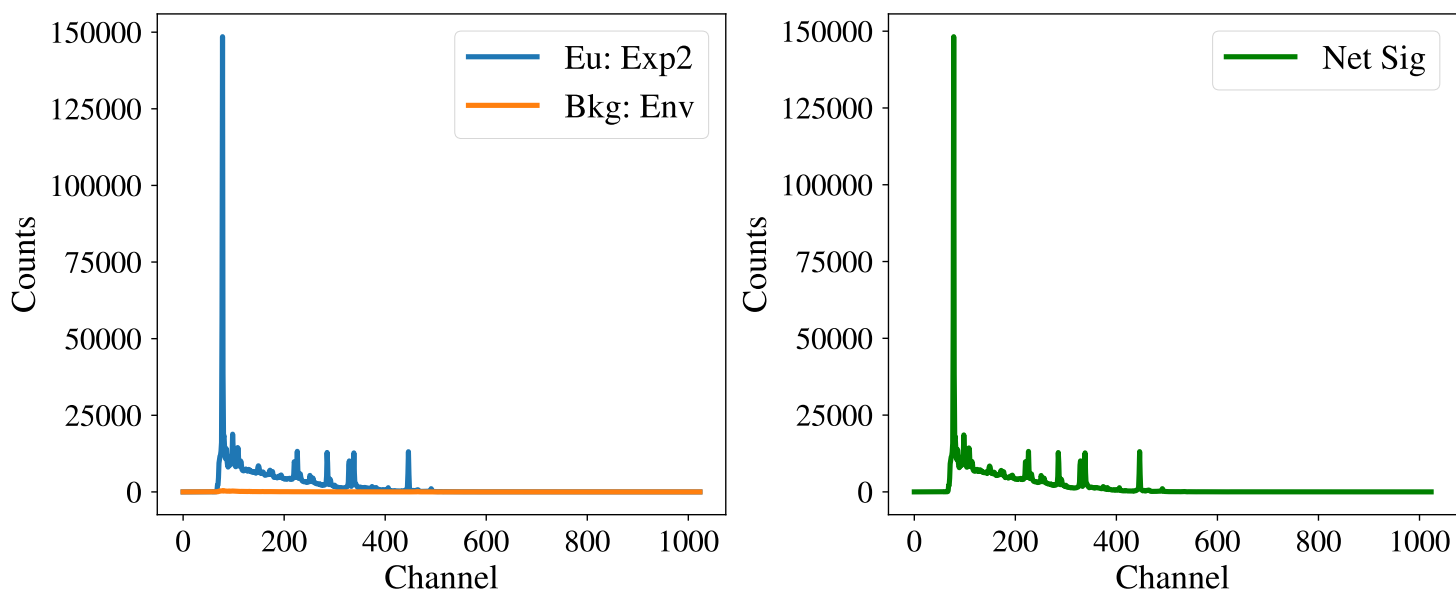


图 8: 放大倍数缩小一半后的  $^{152}\text{Eu}$  测量结果

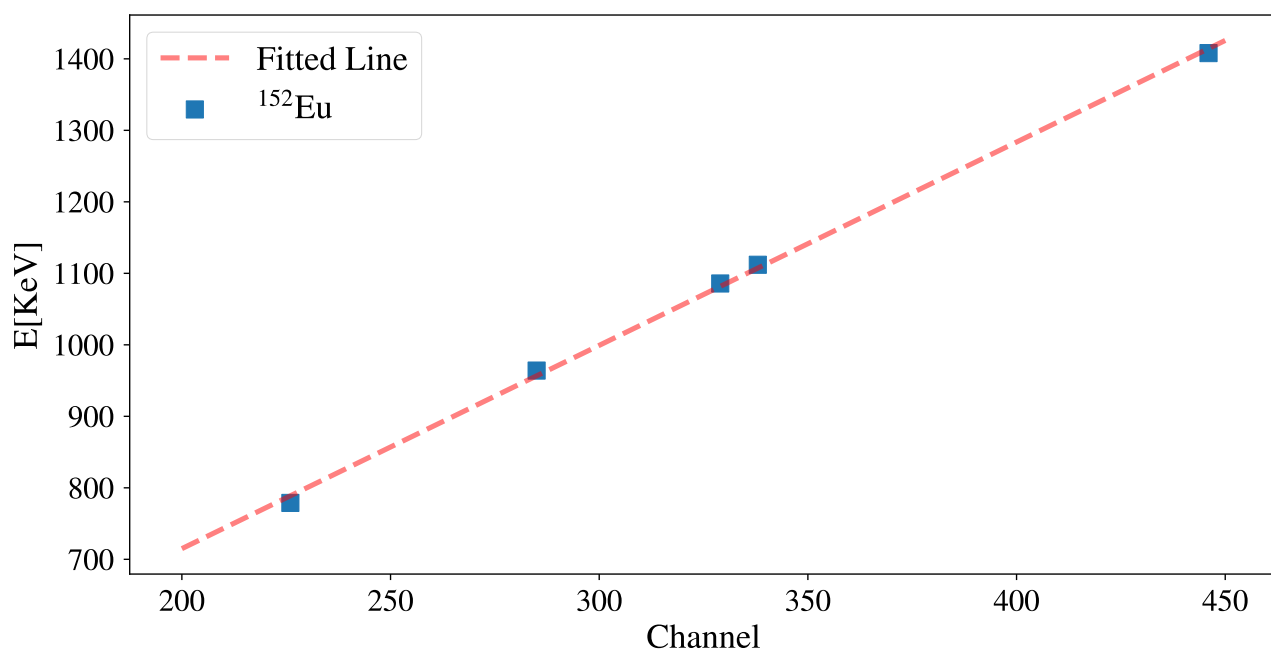


图 9:  $^{152}\text{Eu}$  放大倍数缩小一半后刻度结果

的一半，考虑到原先观察到的低能区的线性性并不好，这里我们仅考虑能量最大的四个峰进行刻度。测量结果如表3。进行刻度，可得：

$$E = 2.8433 * \text{Ch} + 146.2568 \quad (9)$$

线性拟合图如9。

表 3:  $^{152}\text{Eu}$  放大倍数缩小一半后刻度结果

Peak	1	2	3	4	5
Channel	446	338	329	285	226
E[KeV]	1408.03	1112.0	1085.8	964.0	778.9

对环境本底和矿渣的测量图如图10所示。

对环境本底的各峰如表4及图11所示。对矿渣样品的测量结果如图12和表5所示。并没有在这些信号中得到一些有意

表 4: 环境本底测量和峰位能量表

Peak	1	2	3	4	5	6	7
Channel	915.000000	581.00000	464.000000	286.000000	242.000000	97.000000	81.00000
E Pred.	2747.835006	1798.18789	1465.527074	959.427712	834.324499	422.052548	376.56047

义的能谱。



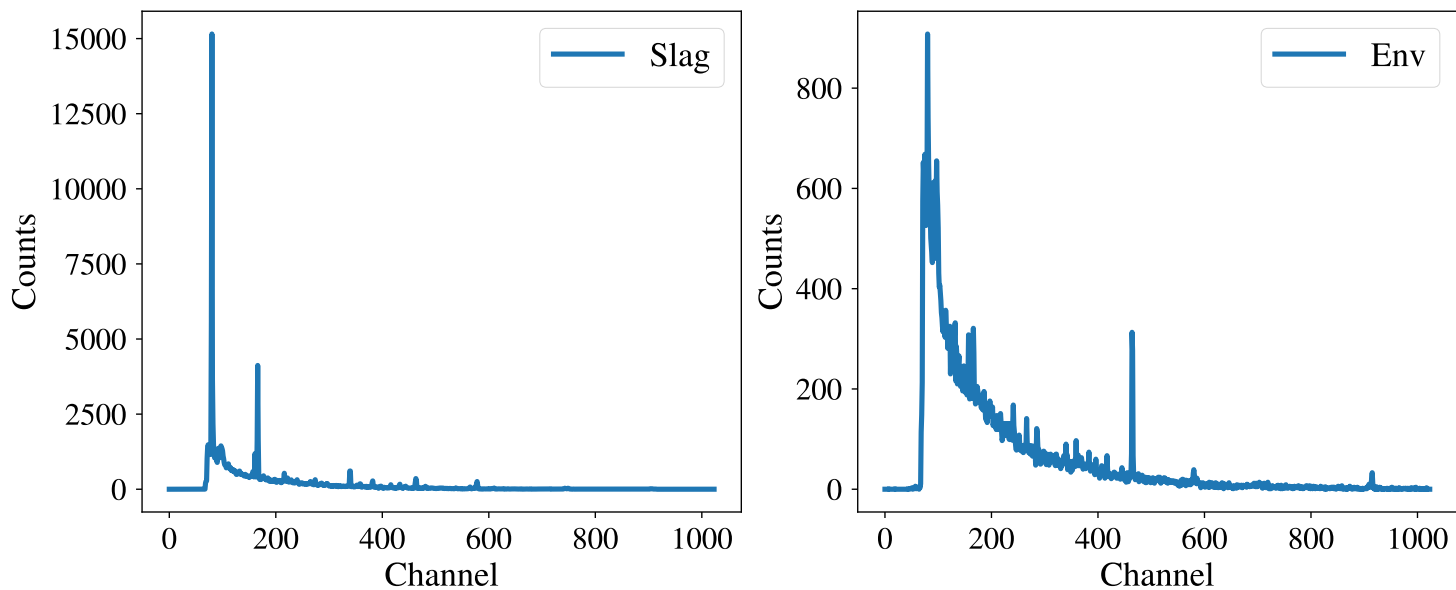


图 10: 矿渣（左）和环境本底（右）的测量结果

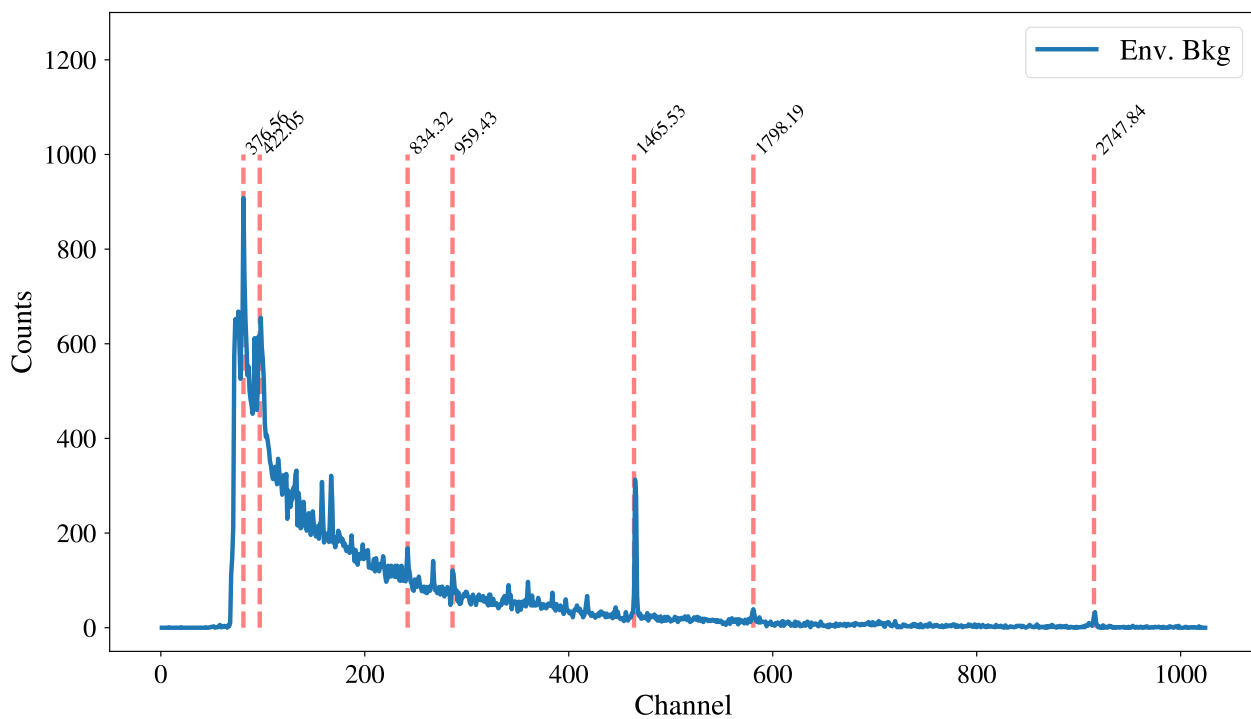


图 11: 环境本底测量和峰位能量图

表 5: 矿渣信号测量和峰位能量表

Peak	1	2	3	4	5	6	7
Channel	577.00000	412.00000	380.00000	339.00000	165.00000	98.00000	80.00000
E Pred.	1786.81487	1317.67782	1226.69366	1110.12021	615.39387	424.89580	373.71721

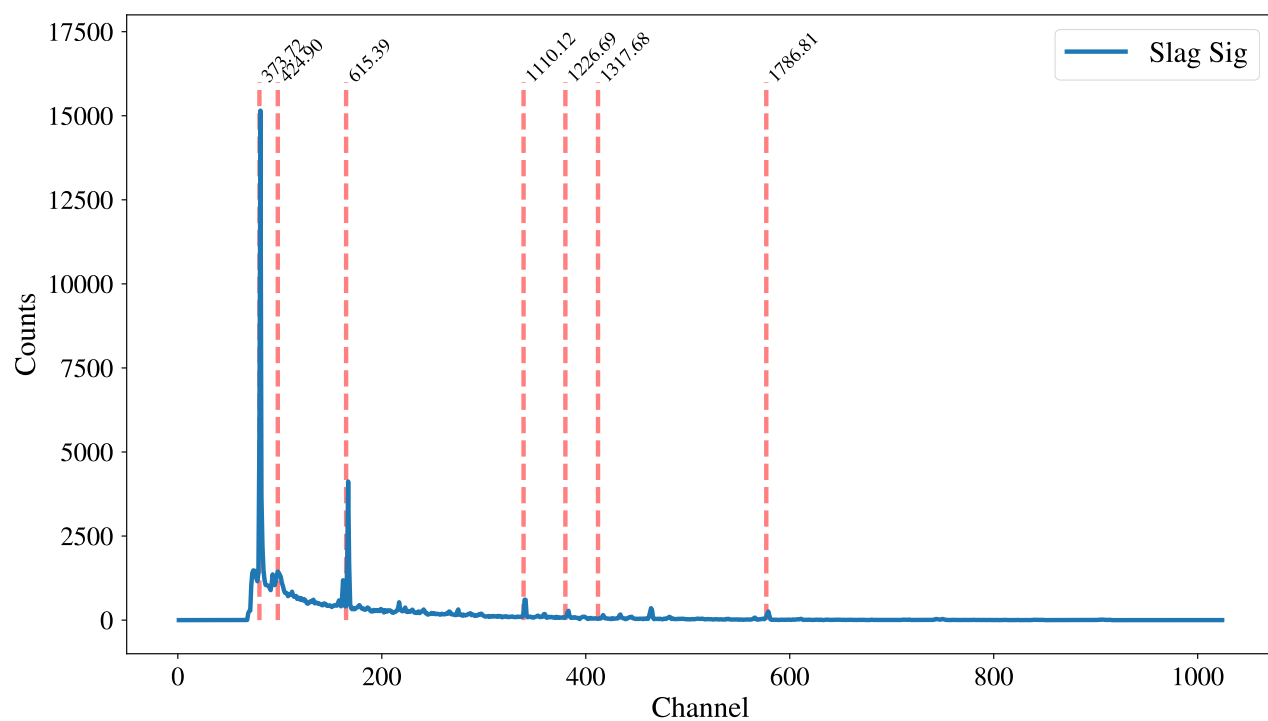


图 12: 矿渣信号本底测量和峰位能量图

## 4 致谢

感谢许金艳老师的实验指导，感谢刘寅绅同学和童星昱同学的讨论。也感谢张轩豪同学一起进行实验。

# 附录

## A 思考题

1.
  - NaI(Tl) 探测: 对  $\gamma$  射线, 当能量大于 150KeV 时响应是线性的。其主要优点是密度大, 原子序数高, 对  $\gamma$  射线探测效率高。同时因为发光效率高, 能量分辨率也较好。但必须密封使用以防止潮解。
  - 高纯锗: 作为半导体探测器, 必须用液态氮冷却条件下使用。他的优点一是空间分辨率好, 分辨时间快; 二是灵敏度高; 三是在同样剂量辐照下, 输出的信号比电离室大。但也有能量响应差而不能做绝对测量和辐射损伤效应等缺点。
2. 相对效率曲线体现出不同能量下探测效率的相对大小。通过与已知活度的放射源比较可以将相对效率归一到绝对效率。在能量小于  $2m_e$  时, 光子主要发生康普顿散射, 能量会沉积在全能峰, 所以探测效率随着能量增大逐渐增加。当能量大于  $2m_e$  时, 开始发生电子对效应, 高能量的电子和正电子可能在消耗完能量之前就从灵敏体积中逸出, 在能谱中形成单逃逸峰或双逃逸峰, 使全能峰的探测效率随能量增大而减小。
3. 高纯锗探测器禁带宽度较窄 ( $\sim 0.7\text{eV}$ ), 需要低温真空 (液氮冷却至 77K 左右) 运行, 保证锗晶体工作于半导体状态。同时, 因为探测器十分灵敏, 低温也可以防止电子因为温度自激发带来显著噪声。