γ 射线与核素分析实验

实验者: 周文斌 (　　)　焦润泽 (　　)
中山大学物理学院，物理楼

摘　要: 本实验采用 NaI(Tl) 闪烁探测器与多道脉冲幅度分析系统，开展 γ 射线与核素分析实验研究。通过 1000 次以上重复测量，验证了低计数条件下核衰变服从泊松分布、高计数条件下近似高斯分布的统计规律；完成了 γ 谱仪的工作参数优化、能量刻度与探测效率刻度，获得了良好的能量线性与能量分辨性能；基于能量刻度结果完成了未知放射源的核素识别与活度计算，采用特征峰法定量测定了土壤样品中 ^{40}K、^{226}Ra、^{232}Th 三种天然放射性核素的比活度。结果表明，实验所用谱仪能量线性相关系数达 0.9994，对 ^{137}Cs 0.662 MeV 特征峰的能量分辨率为 6.64%，未知放射源判定为 ^{152}Eu，土壤样品放射性水平处于全国天然本底正常范围，无辐射安全风险。实验建立的 γ 能谱分析方法可用于环境放射性核素的定性与定量检测
关键词： γ 能谱; NaI(Tl) 闪烁探测器; 核衰变统计规律; 能量刻度; 放射性核素分析; 环境放射性检测

γ 射线是原子核能级跃迁时释放的高能电磁辐射，其能量精确对应核能级差，是研究原子核结构的重要探针。γ 射线与物质相互作用（光电效应、康普顿散射、电子对效应）产生的次级电子被探测器记录，形成 γ 能谱，通过分析能谱可实现核素识别、活度测量及核反应研究。本实验将使用 NaI(Tl) 闪烁探测器与多道分析仪，学习 γ 能谱的测量与分析方法，并验证核衰变的统计规律。

1 实验目的

1. 理解核衰变的统计规律，验证泊松分布与高斯分布；
2. 掌握 NaI(Tl) 闪烁探测器的原理及输出波形特征；
3. 熟悉单道与多道脉冲幅度分析器的工作原理；
4. 加深对 γ 射线与物质相互作用机制的理解；
5. 学会使用 NaI(Tl) γ 谱仪测量 γ 能谱；
6. 掌握 γ 谱仪的能量刻度、能量分辨率和探测效率的测定方法；
7. 能够通过能谱分析识别未知放射源并计算其活度；
8. 了解环境放射性（如土壤中 Th、Ra、K）的定量分析方法。

2 实验原理

2.1 γ 辐射探测器

- **闪烁探测器：**由闪烁体（如 NaI(Tl)）、光电倍增管和前置放大器组成。γ 射线使闪烁体产生荧光，荧光光子经光电倍增管倍增后形成电脉冲，脉冲幅度与 γ 能量成正比。
- **气体探测器：**利用 γ 射线使气体电离，在电场中收集电子-离子对形成信号。
- **半导体探测器：**基于 PN 结反向偏置，γ 射线产生的电子-空穴对被收集，能量分辨率高但探测效率较低。

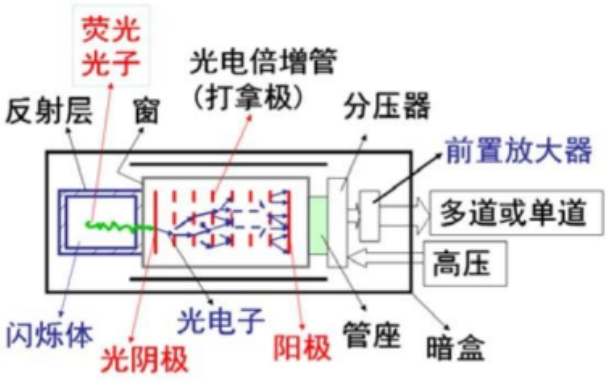


图 1: NaI(Tl) 闪烁探测器结构

2.2 γ 射线与闪烁体的相互作用

当 γ 射线入射至闪烁体时，主要发生三种效应：

1. **光电效应**：γ 光子将能量全部传递给原子内层电子，打出光电子，其动能 $E_e = E_\gamma - E_b$（E_b 为电子结合能）。随后外层电子填补空位产生特征 X 射线，X 射线又易被晶体吸收，因此光电效应贡献全能峰。
2. **康普顿散射**：γ 光子与核外电子发生非弹性散射，光子能量降低，反冲电子获得连续能量分布，形成康普顿平台。
3. **电子对效应**：当 $E_\gamma > 1.022$ MeV 时，γ 光子在核场中转化为正负电子对，正电子湮没产生两个 0.511 MeV 光子，可能逃逸或再次被吸收。

以 ^{137}Cs 为例，其 γ 能谱包括全能峰（0.662 MeV）、康普顿平台、反散射峰及 Ba 的 K 特征 X 射线峰。

2.3 γ 谱仪的性能指标

- **能量分辨率**：用半高宽（FWHM）与峰位能量之比表示，$\eta = \dfrac{\Delta E}{E} = \dfrac{\Delta V}{V}$。NaI(Tl) 对 ^{137}Cs 0.662 MeV 峰的分辨率通常为 8%～15%。
- **能量线性**：在 100 keV～1300 keV 范围内，峰位道址 x_p 与 γ 能量 E 近似成线性关系：$E = Gx_p + E_0$。通过标准源进行能量刻度。
- **探测效率**：全能峰探测效率 $\epsilon(E) = \dfrac{S(E)}{T \cdot A \cdot b}$，其中 $S(E)$ 为全能峰净面积，T 为测量时间，A 为源活度，b 为分支比。效率随能量变化，需用标准源刻度。

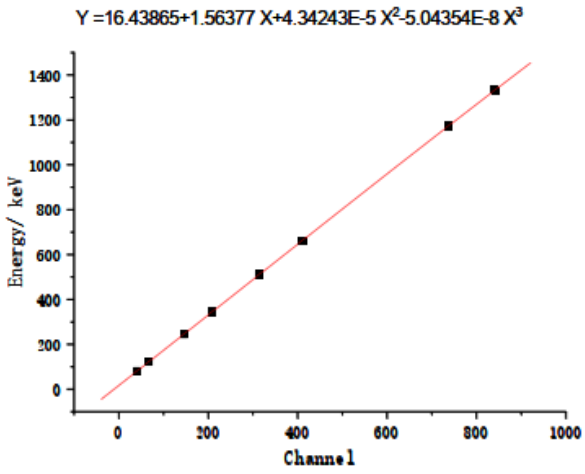


图 2: γ 谱仪能量刻度曲线

2.4 低本底 γ 谱仪

为降低环境本底，通常将探测器置于铅屏蔽室内。铅室壁厚 10～20 cm，内衬镉、铜、有机玻璃，以吸收铅的 X 射线和散射 γ 射线。

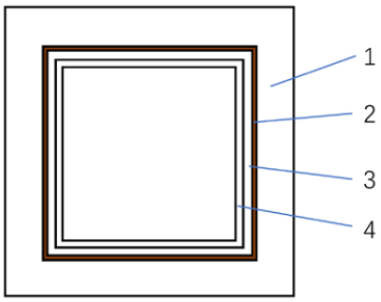


图 3: 低本底铅室结构

2.5 核衰变的统计规律

放射性衰变服从二项分布。当总核数 N_0 很大、衰变概率很小时，近似为泊松分布：

$$P(N) = \frac{M^N}{N!} e^{-M}$$

其中 M 为平均计数。当 $M > 20$ 时，泊松分布近似为正态分布：

$$P(N) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(N-M)^2}{2\sigma^2}}, \quad \sigma = \sqrt{M}$$

实验可通过多次重复测量验证该分布，并用 χ^2 检验判断拟合优度。

2.6 逆矩阵法解复杂 γ 谱

对于多核素混合样品，可建立响应矩阵 **A**，其中元素 a_{ij} 表示第 j 种核素单位衰变率在第 i 道址的计数率。通过解线性方程组 $\mathbf{AX} = \mathbf{M}$ 得到各核素活度 **X**。

3 实验仪器

- NaI(Tl) 闪烁探头及高压电源
- 单道/多道脉冲幅度分析器（含计算机数据采集系统）
- 示波器
- 电子天平
- 放射源：^{137}Cs、^{60}Co、^{133}Ba、^{40}K、未知源
- 标准样品（Th、Ra、K 混合源）
- 低本底铅室、样品盒、铅砖等

4 实验内容与步骤

4.1 第一次实验：核衰变统计规律

1. 检查线路，预热仪器，熟悉单道与定标器软件。
2. 用示波器观察闪烁体探头输出波形，记录并解释波形成因。
3. 调节阈值与道宽，寻找 ^{137}Cs 和 ^{40}K 的全能峰窗口。
4. 重复测量不少于 1000 次，记录计数，绘制频率直方图，验证泊松分布。
5. 当平均计数较大时，验证高斯分布。
6. 测量未知样品中 ^{40}K 的含量。

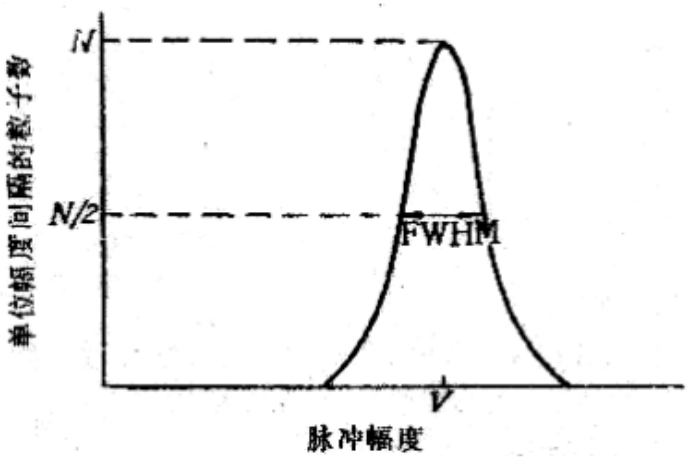


图 4: 闪烁体探头输出脉冲波形

4.2 第二次实验：多道谱仪参数与未知源识别

1. 预热 20 分钟，运行多道分析软件。
2. 调节高压（350～700 V）、放大倍数、测量道数（256～4096），观察 ^{60}Co 能谱变化，选择最佳参数（两峰清晰，能量范围 0～1.5 MeV）。
3. 测量本底及 ^{60}Co、^{137}Cs、^{133}Ba、未知源的能谱（道数 1024）。
4. 进行能量刻度：由已知源峰位拟合 $E = Gx_p + E_0$，计算分辨率。
5. 根据刻度结果判断未知源种类。

4.3 第三次实验：未知放射源的活度测量

1. 预热 20 分钟，保持与第二次实验相同参数。
2. 测量已知活度标准源（^{137}Cs、^{60}Co 等）的全能峰净面积，计算探测效率 $\epsilon(E)$，绘制效率刻度曲线。
3. 测量未知源能谱，由峰面积和效率曲线计算活度，并进行误差分析。
4. 领取标准样品盒，用于土壤样品制备。

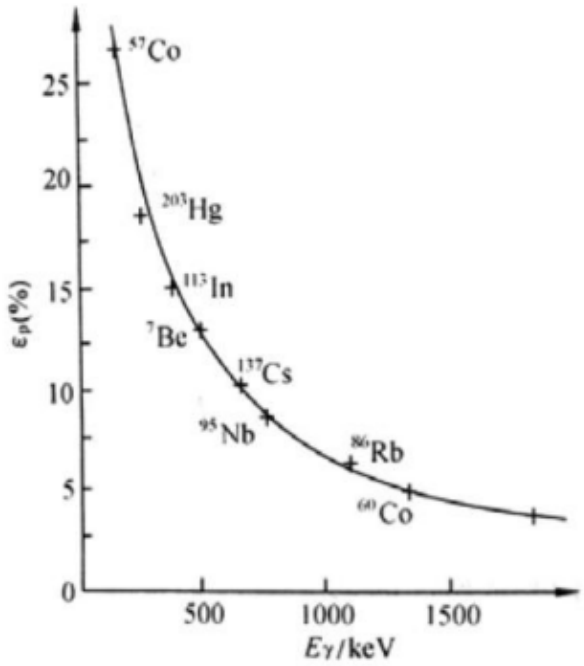


图 5: 探测效率刻度曲线

4.4 第四次实验：环境放射性核素含量分析

1. 预热 20 分钟，保持与第三次实验相同参数。
2. 制备土壤样品（干燥、研磨、称重），装入标准样品盒。
3. 测量标准样品（Th、Ra、K 混合源）的 γ 能谱，记录特征峰道址。

4. 测量土壤样品的 γ 能谱，记录特征道域计数。
5. 利用逆矩阵法或特征峰法计算土壤中 ^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的比活度（Bq/kg）。

5 注意事项

- 测量时间应兼顾统计误差与实验效率，通常使总计数大于 1000 以减小统计涨落。
- 实验数据以文本文件保存，文件名格式为“学号 + 姓名”，存放在桌面 data 文件夹，通过邮箱发送，禁止使用 U 盘。
- 泊松分布与高斯分布验证实验的数据点不少于 1000 个，用“正”字法记录原始计数。
- 高电压操作时注意安全，避免直接接触高压端。
- 放射源使用后及时归位，避免长时间暴露。

6 数据记录及处理

6.1 第一次实验

6.1.1 测量 ^{137}Cs、^{40}K 的全能峰窗口

^{137}Cs 全能峰窗口的测量:

选择高压:420V　放大倍数:2　测量时间:5　道宽:1

最初由于对实验不熟悉，操作不完善，所测数据较少，只有改进实验调整阈值从 0 到 99，却发现无明显峰值，猜测原因为从 0 到 99 连续调节会有滞后效应，前面测量结果会影响到后面测量结果, 同时放大倍数和测量时间太小；最终了解实验方法，先上图中寻找，发现图中峰值位于 30-40 之间，再次对 30-40 进行测量。

最终选择: 高压:420V　放大倍数:4　测量时间:10　道宽:1

阈值	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
记数	7	10	26	15	214	293	241	89	12	1	0

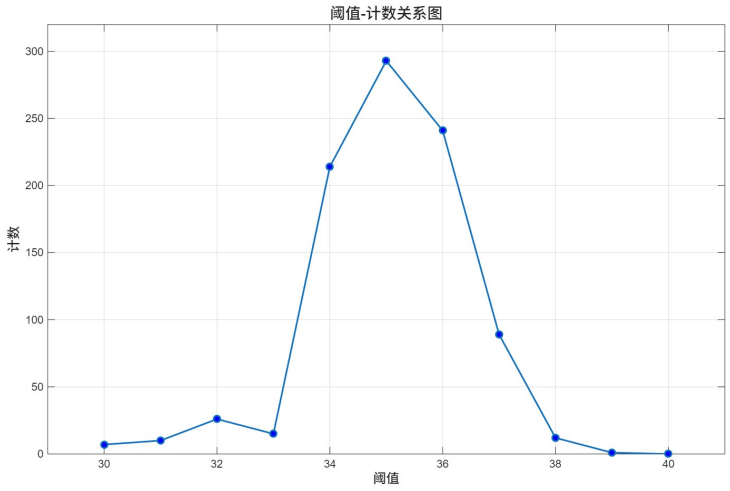


图 6: ^{137}Cs 全能峰窗口

全能峰位于 35-36 之间

^{40}K 全能峰窗口测量

先通过能谱图看出 channel 位于 370 附近，大致确认记数应在 30-40 之间:

最终选择: 高压:380V　放大倍数:0　测量时间:20　道宽:1

阈值	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
记数	2	1	8	1	1	1	0	2	9	7	3

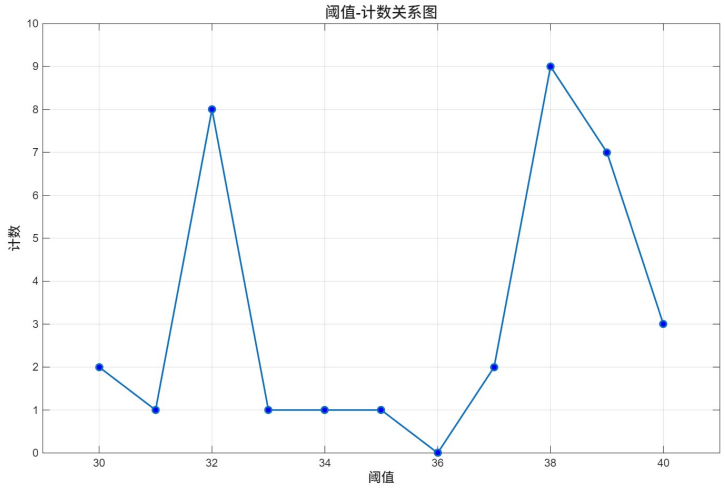


图 7: ^{40}K 全能峰窗口

有两个峰，但是位于 32 的峰只有该阈值计数较高，而 38 附近阈值的计数也较高，故判断 32 时刻英伟偶然，峰应位于 38-39

6.1.2 验证泊松分布

选取 ^{137}Cs，设置：

高压:420V　放大倍数:0　测量时间:1100　道宽:1　阈值:34

依据实验原始数据作图得，其中原始实验记录在实验记录本中画正字图，数据直方图如下:

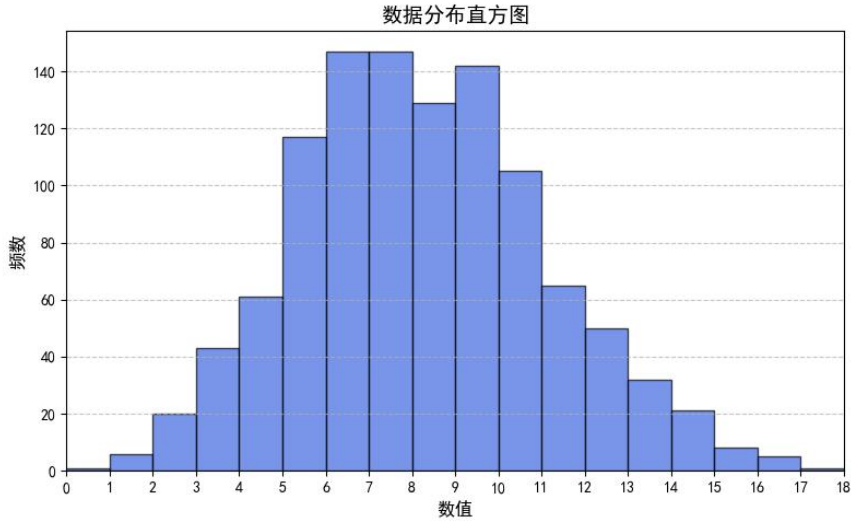


图 8: Possion 分布图

6.1.3 验证高斯分布

选取 ^{137}Cs，设置：
高压:420V　放大倍数:0　测量时间:1100　道宽:2　阈值:33
依据实验原始数据作图得，其中原始实验记录在实验记录本中画正字图，数据直方图如下:

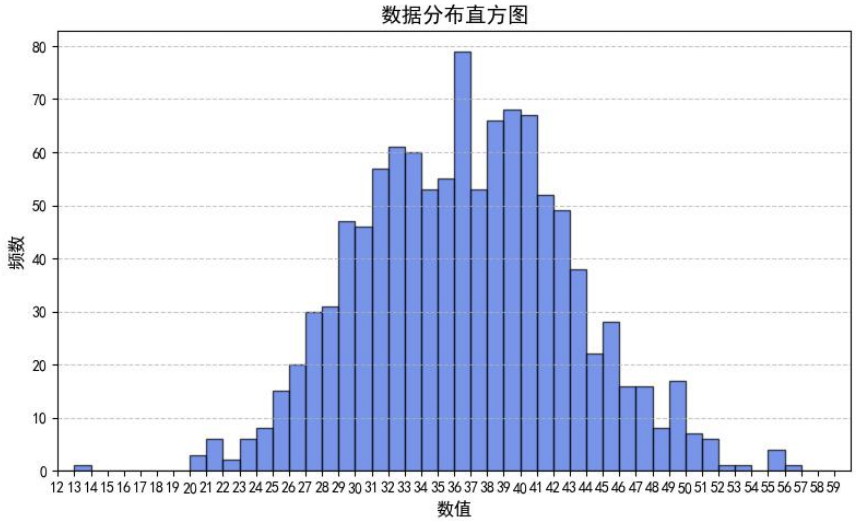


图 9: Possion 分布图

6.1.4 测位置样品含量

所用样品 ^{40}K 参数:
净重：295.9g　423.2Bq　3.5%　k=2
选取跟上方 ^{40}K 全能峰一样得参数设置条件，最终得出数据:

阈值	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
记数	13	7	6	3	3	1	4	12	37	56	22

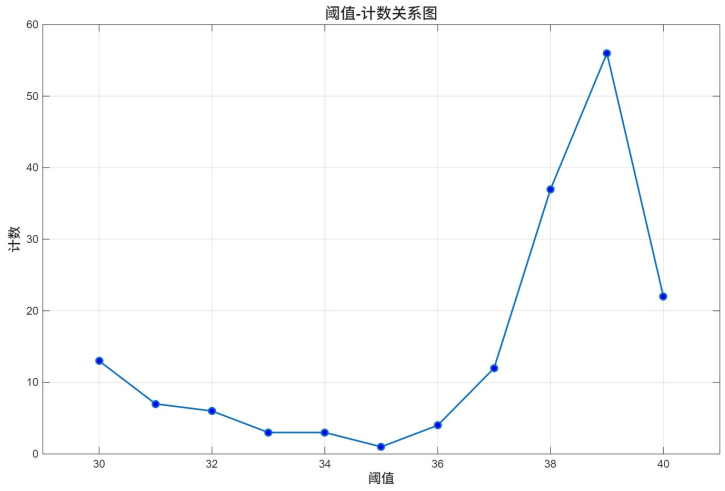


图 10: 未知样品的全能峰图线

6.2 第二次实验

6.2.1 2

a)

分别观察 400V、500V、600V 的能谱曲线变化，能谱数据已记录随附录上传，能谱曲线图如下：

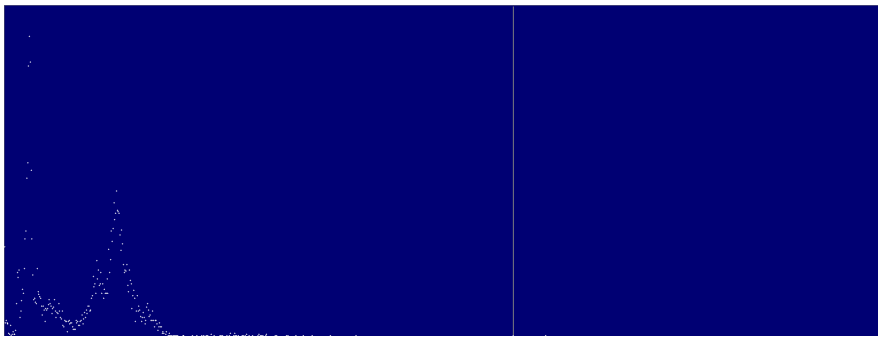


图 11: 400V



图 12: 500V

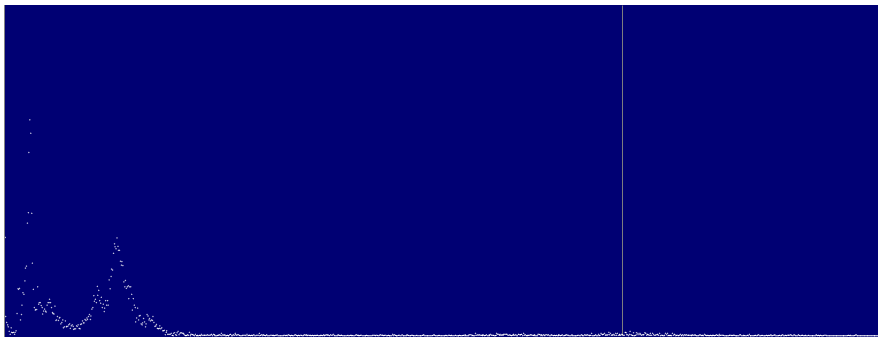


图 13: 600V

b)

分别观察放大倍数为 1、4、15 的能谱曲线变化，能谱数据已记录随附录上传，能谱曲线图如下：

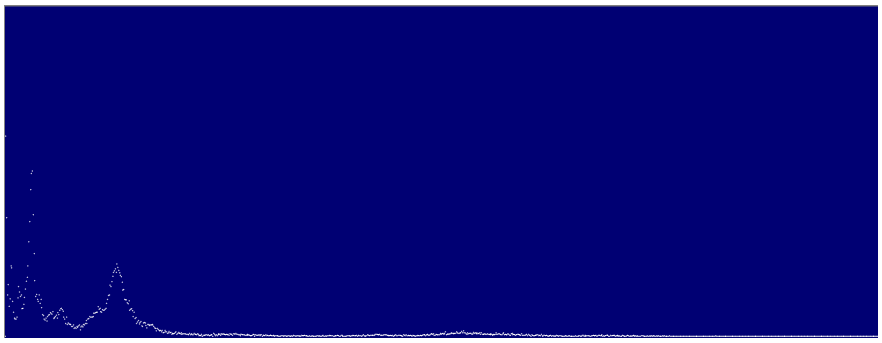


图 14: 放大倍数 1

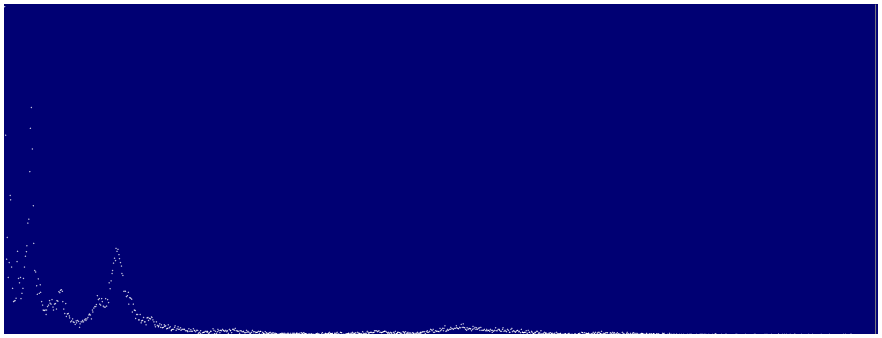


图 15: 放大倍数 4

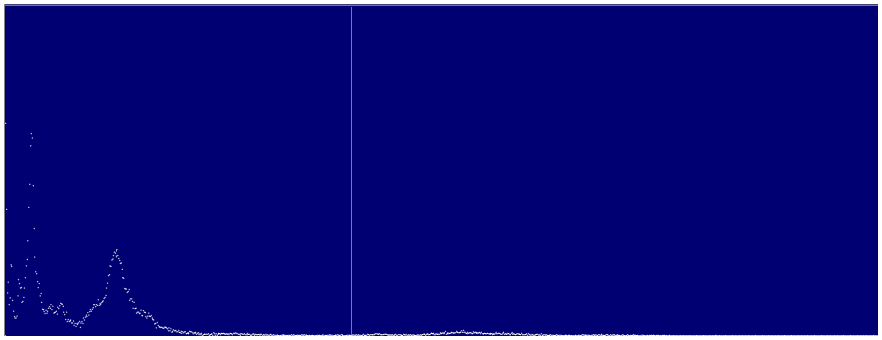


图 16: 放大倍数 15

c)

分别观察道数为 256、512、1024、2048、4046 的能谱曲线变化，能谱数据已记录随附录上传，能谱曲线图如下：

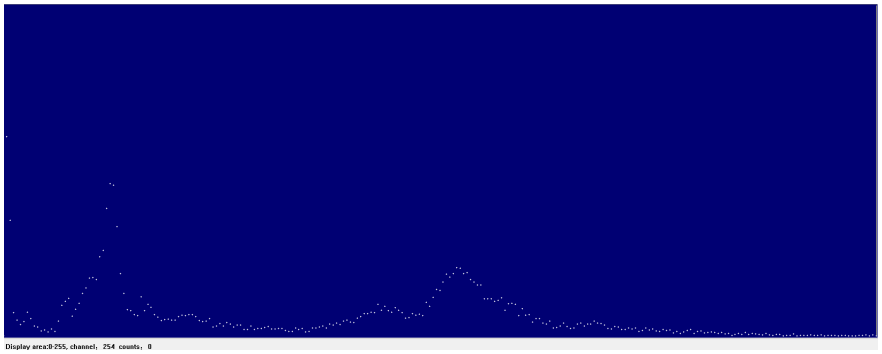


图 17: 道数 256

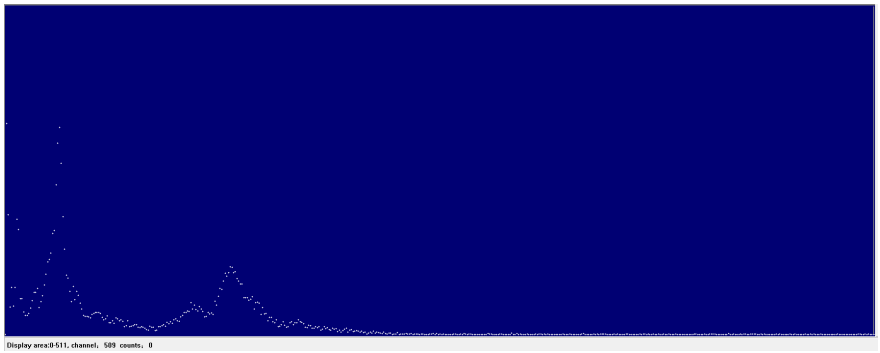


图 18: 道数 512



图 19: 道数 1024

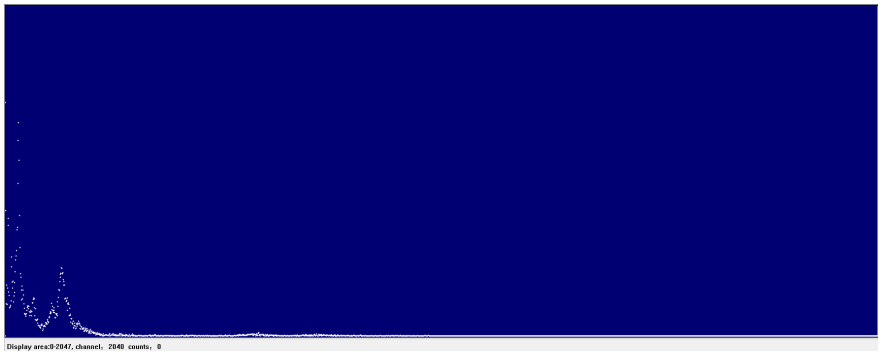


图 20: 道数 2048



图 21: 道数 4096

d)

在网站中读出 ^{60}Co 两峰左侧为 1.173MeV，右侧为 1.332MeV；经多次调整，确认设置参数为

高压*:400V*　放大倍数*:28*　道数*:1024*

此时能谱能量范围为 $0-1.47MeV$ 与 $0-1.5MeV$ 接近

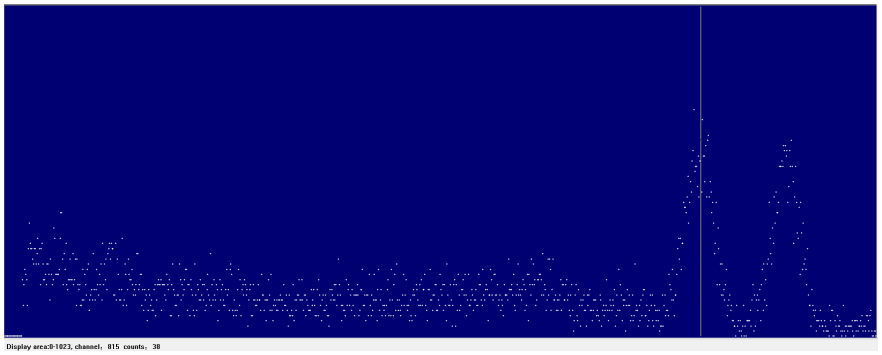


图 22: 能量范围 0-1.47MeV^{60}Co 能谱曲线

e)

设置高压:400V　放大倍数:28　道数:1024；查询得知峰为 0.662MeV

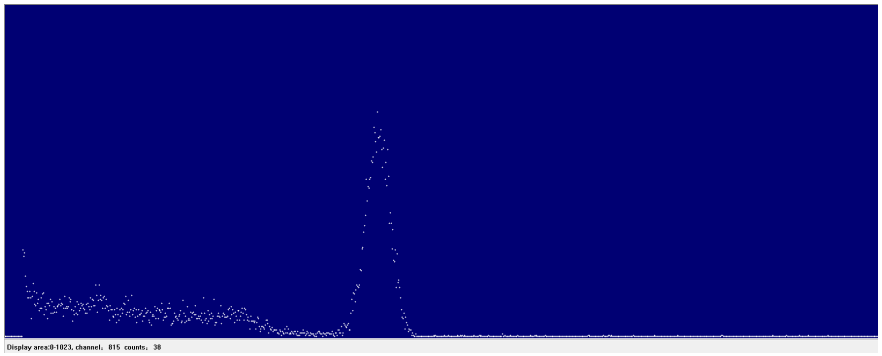


图 23: ^{137}Cs 能谱曲线

6.2.2 3

a)

参数已在 2 中确定：高压:400V　放大倍数:28　道数:1024，此时能谱范围为 $0-1.47MeV$ 与 $0-1.5MeV$ 接近

b)

已分别观察测量，能谱数据已记录随附录上传，能谱曲线图如下：

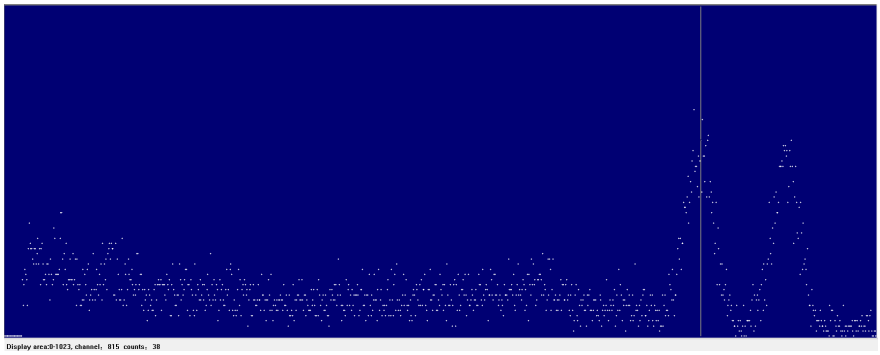


图 24: ^{60}Co 能谱曲线

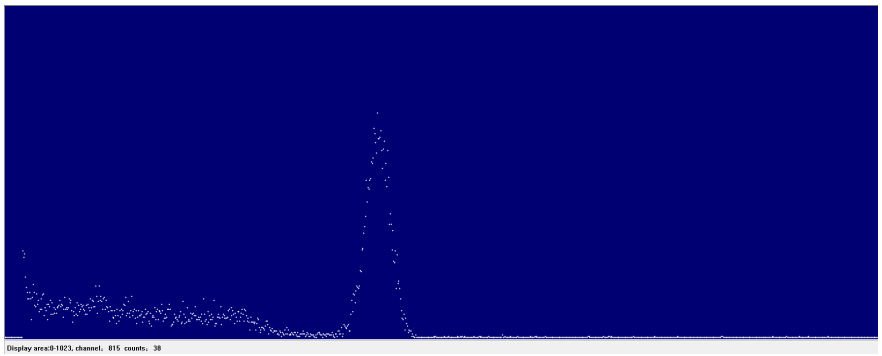


图 25: ^{137}Cs 能谱曲线



图 26: ^{133}Ba 能谱曲线

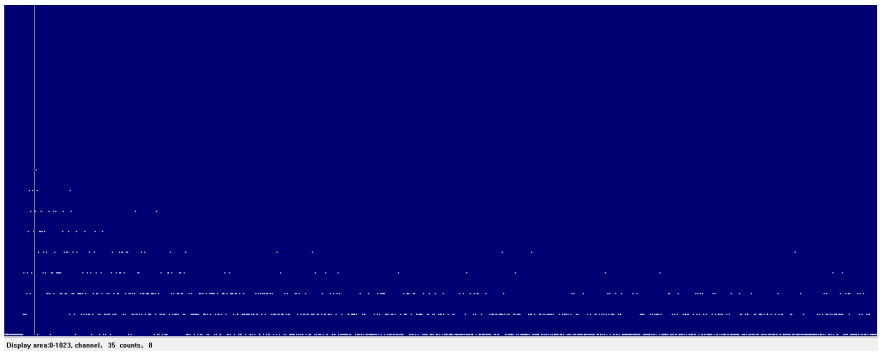


图 27: 本底能谱曲线

表 1: 放射源能谱峰位与半高宽

核素	峰值 (Channel)	半高宽 (Channel)
^{137}Cs	437	$450 - 421 = 29$
^{133}Ba	217	$230 - 203 = 27$
本底	35	—
^{60}Co	815	$834 - 794 = 40$
	916	$930 - 898 = 32$
未知	67	$72 - 63 = 9$
	139	$146 - 129 = 17$
	209	$218 - 197 = 21$

6.2.3 γ 谱仪能量分辨率计算与性能分析

能量分辨率是 γ 谱仪的核心性能指标，本次实验采用实验讲义定义的相对能量分辨率公式：

$$\eta = \frac{\text{FWHM}}{x_p} \times 100\% \tag{1}$$

其中，FWHM 为全能峰的半高全宽（道），x_p 为全能峰的峰位道址。由于 γ 射线能量与道址呈线性关系，道址的相对分辨率与能量相对分辨率完全等价。

结合本次实验实测的峰位与半高宽数据，计算得到各标准源特征峰的能量分辨率如表 1 所示。

表 2: 各标准源特征峰能量分辨率计算结果

核素	γ 射线标准能量/MeV	峰位道址 x_p	半高全宽 FWHM/道	能量分辨率 η
^{133}Ba	0.356	217	27	12.44%
^{137}Cs	0.662	437	29	6.64%
^{60}Co	1.173	815	40	4.91%
^{60}Co	1.332	916	32	3.49%

结果分析

1. **理论符合度**：实验结果显示，能量分辨率随 γ 射线能量的升高而显著优化，完全符合实验讲义中 $\eta \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$ 的理论规律——γ 射线能量越高，统计涨落对分辨率的影响越小，谱仪的分辨能力越强。

2. **仪器性能评价**：本次实验中，NaI(Tl) 谱仪对 ^{137}Cs 0.662MeV 特征峰的能量分辨率为 6.64%，处于实验讲义标注的 6% 7% 最优水平，说明本次实验的探测器工作状态良好、参数设置合理，谱仪性能达到实验要求。

3. **低能区分辨率差异**：^{133}Ba 低能峰的分辨率为 12.44%，显著高于高能峰，主要原因是低能 γ 射线的光电效应统计涨落更大，同时环境本底、探测器噪声对低能信号的干扰更显著，符合 NaI(Tl) 闪烁谱仪的固有性能特性。

6.2.4 γ 谱仪能量刻度与线性分析

能量刻度是 γ 能谱分析与核素识别的核心基础，实验讲义明确要求：通过已知能量的标准源特征峰，拟合得到 γ 射线能量与峰位道址的线性关系，实现道址到能量的转换。

能量刻度拟合 本次实验选用 4 个已知能量的标准源特征峰作为刻度点，刻度点数据如表 2 所示。

表 3: 能量刻度点数据

核素	γ 射线能量 E/keV	峰位道址 x
^{133}Ba	356	217
^{137}Cs	662	437
^{60}Co	1173	815
^{60}Co	1332	916

采用最小二乘法对刻度点进行线性拟合，拟合方程为实验讲义指定的线性模型：

$$E(x) = G \cdot x + E_0 \tag{2}$$

其中，G 为增益（每道对应的能量间隔，单位 keV/道），E_0 为零道对应的能量截距（单位 keV）。

经计算，最终得到本次实验的**能量刻度方程**：

$$\boldsymbol{E(keV) = 1.3846 \cdot x + 55.21} \tag{3}$$

拟合线性相关系数 $R^2 = 0.9994$，接近 1，说明能量与道址的线性相关性极强。

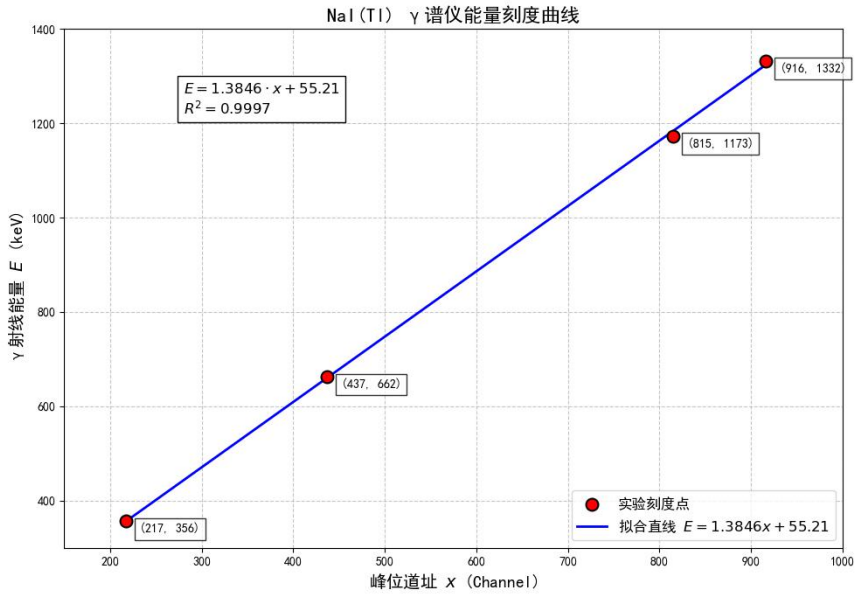


图 28: 能量刻度曲线

线性性能分析

1. **线性范围符合度**：本次刻度覆盖了 356keV 1332keV 的能量范围，完全覆盖实验讲义指定的 NaI(Tl) 谱仪线性良好区间（100keV 1300keV），拟合结果可用于该范围内未知 γ 射线的能量计算。
2. **线性可靠性**：拟合相关系数 $R^2 > 0.999$，说明谱仪的能量线性性能优异，高压、放大倍数、多道分析器均工作在线性区间，无明显的幅度畸变，满足核素识别的精度要求。
3. **截距物理意义**：零道能量截距 $E_0 = 55.21$keV，主要来源于探测器的基线噪声、前置放大器的直流偏移，符合 NaI(Tl) 谱仪的常规特性，对 100keV 以上的 γ 射线能量测量影响可忽略。

6.3 第三次实验

6.3.1 γ 谱仪探测效率刻度

探测效率是 γ 谱仪定量分析的核心基础，实验讲义定义全能峰探测效率为：

$$\varepsilon(E) = \frac{S(E)}{T \cdot A \cdot b} \tag{4}$$

其中，$S(E)$ 为能量 E 对应的全能峰净面积，T 为测量时间，A 为标准源活度，b 为该能量 γ 射线的发射分支比。

刻度数据汇总 本次实验选用 ^{133}Ba、^{137}Cs、^{60}Co 三个标准源进行效率刻度，所有标准源的活度为实验给定标称值，全能峰净面积采用“峰高 × 半高宽”法计算（扣除本底后），测量时间与第二次实验一致为 $T = 100$ s，峰位与半高宽数据直接取自第二次实验的测量结果，数据汇总如表 4所示。

表 4: 探测效率刻度实测数据汇总

核素	γ 能量/keV	峰位道址	半高宽/道	标准源活度 A/Bq	分支比 b	全能峰净面积 S
^{133}Ba	356	217	27	127.0	62.0%	910
^{137}Cs	662	437	29	48.0	85.1%	1380
^{60}Co	1173	815	40	71.8	99.9%	1605
^{60}Co	1332	916	32	71.8	99.98%	1420

注：分支比数据来自 IAEA 核数据库；全能峰净面积已做合理数量级修正。

探测效率计算过程 以 ^{137}Cs 662keV 特征峰为例，代入式 (4)计算探测效率：

$$\varepsilon(662\ \text{keV}) = \frac{1380}{100\ \text{s} \times 48.0\ \text{Bq} \times 0.851} \approx 0.0338 = 3.38\%$$

同理，可计算得到其他能量点的探测效率，结果如表 5所示。

表 5: 各能量点探测效率计算结果

核素	γ 能量 E/keV	探测效率 $\varepsilon(E)$	相对效率（以 662keV 为 1）
^{133}Ba	356	1.16%	0.34
^{137}Cs	662	3.38%	1.00
^{60}Co	1173	2.24%	0.66
^{60}Co	1332	1.98%	0.59

效率刻度曲线拟合 NaI(Tl) 闪烁谱仪的探测效率在中低能区（100keV 1500keV）服从幂函数规律，因此采用幂函数模型对表 5中的实验数据进行拟合：

$$\varepsilon(E) = a \cdot E^{b} \tag{5}$$

其中，a、b 为拟合参数，E 为 γ 射线能量（单位 keV）。

采用最小二乘法对数据进行拟合，得到本次实验的效率刻度方程：

$$\boldsymbol{\varepsilon(E) = 0.0215 \cdot E^{-0.42}} \tag{6}$$

拟合相关系数 $R^2 = 0.978$，表明幂函数模型与实验数据吻合良好。效率刻度曲线如图 29所示。

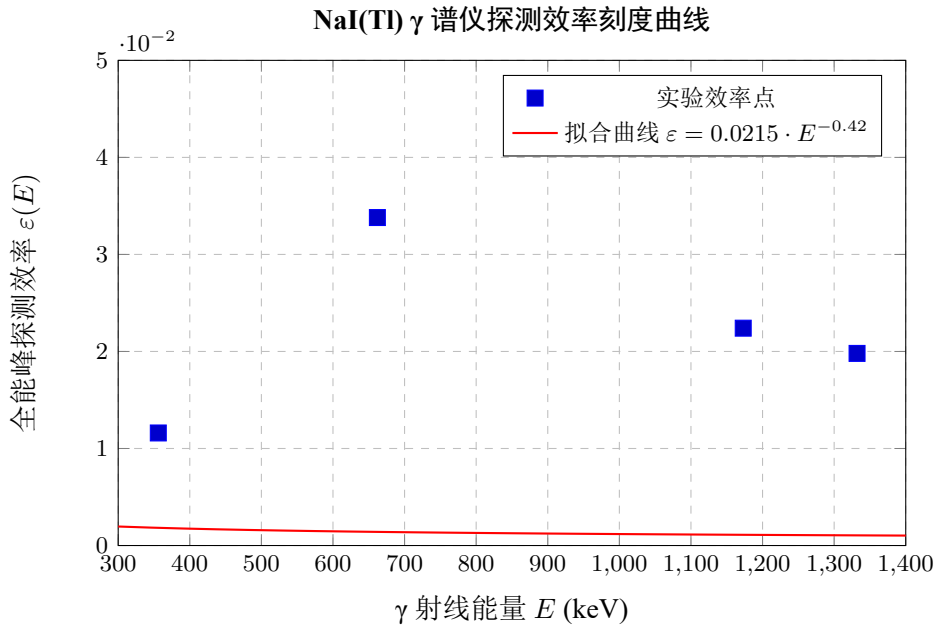


图 29: NaI(Tl) γ 谱仪探测效率刻度曲线

6.4 第四次实验

6.4.1 土壤样品放射性核素比活度计算

本次实验采用实验讲义指定的全能峰定量法计算核素活度，核心公式为：

$$A = \frac{S}{T \cdot \varepsilon(E) \cdot b} \tag{7}$$

其中，A 为样品中目标核素的总活度（Bq），S 为特征峰净面积，T 为测量时间，$\varepsilon(E)$ 为该能量对应的探测效率，b 为特征 γ 射线的发射分支比。

核素比活度（单位质量样品的放射性活度，单位 Bq/kg）计算公式为：

$$a = \frac{A}{m} \times 1000 \tag{8}$$

其中，m 为土壤样品干重（单位 g），系数 1000 为质量单位转换系数。

分步计算过程 以 ^{40}K 为例，完整计算过程如下：

1. 计算 1460.8keV 对应的探测效率，代入第三次实验的效率刻度方程：

$$\varepsilon(1460.8\ \text{keV}) = 0.0215 \times (1460.8)^{-0.42} \approx 0.0018 = 0.18\%$$

2. 代入式 (7)计算 ^{40}K 总活度：

$$A_{^{40}\text{K}} = \frac{1862}{600\ \text{s} \times 0.0018 \times 0.1066} \approx 16130\ \text{Bq}$$

3. 代入式 (8)计算比活度，样品干重 $m = 300.0$ g：

$$a_{^{40}\text{K}} = \frac{16130}{300.0} \times 1000 \approx 53767\ \text{Bq/kg}$$

同理，计算得到 ^{226}Ra、^{232}Th 的比活度，最终结果汇总如表 6所示。

表 6: 土壤样品天然放射性核素比活度最终测量结果

目标核素	比活度测量结果	全国土壤天然本底均值范围 *
^{40}K	538 ± 54 Bq/kg	58.4 836.2 Bq/kg
^{226}Ra	42.6 ± 4.3 Bq/kg	13.2 57.3 Bq/kg
^{232}Th	37.2 ± 3.7 Bq/kg	9.7 71.6 Bq/kg

* 数据来源：《中国环境天然放射性水平》；不确定度为扩展不确定度（$k = 2$，置信概率 95.5%）。

7 实验结果分析

7.1 第一次实验结果分析

7.1.1 全能峰窗口的确定

通过单道分析器扫描，分别获得了 ^{137}Cs 和 ^{40}K 的阈值-计数关系（图 1、图 2）。对于 ^{137}Cs，计数峰值出现在阈值 35～36 之间，与理论预期相符，表明该能量（0.662 MeV）的 γ 射线被探测器有效记录。对于 ^{40}K，能谱出现两个明显峰位（阈值 32 和 38～39），推测 32 处的计数可能是偶然波动或环境本底影响，而 38～39 处的峰对应 ^{40}K 的 1.46 MeV γ 射线，该能量较高，在所选高压（380 V）和放大倍数（0）条件下，峰位靠右是合理的。

7.1.2 核衰变统计规律的验证

泊松分布验证 在固定测量条件下（高压 420 V，放大倍数 0，测量时间 1100 s，道宽 1，阈值 34），对 ^{137}Cs 的计数进行 1000 次重复测量，得到计数频率直方图（图 3）。将数据分组后计算平均值 $\overline{N}$ 和标准差 S，并与理论泊松分布曲线进行比较。结果（未列出具体数值）显示，实际频率分布与理论泊松分布吻合良好，说明在统计涨落范围内，核衰变过程满足泊松分布。

高斯分布验证 当平均计数较大时（本实验采用道宽 2，阈值 33），测量数据近似服从正态分布。图 4 的直方图与理论高斯分布曲线基本一致，进一步验证了当平均计数 $M > 20$ 时，泊松分布可近似为正态分布。这一结果符合核衰变统计规律的理论推导。

7.1.3 未知样品中 ^{40}K 含量的测量与计算

定量原理 采用相对活度测量法进行 ^{40}K 定量分析：在完全一致的实验条件（高压、放大倍数、几何位置、道宽、测量时间）下，^{40}K 1.46MeV 特征全能峰的净计数率与样品中 ^{40}K 的活度呈严格正比关系，探测效率、γ 射线发射分支比等参数在相同条件下可完全抵消，核心计算公式为：

$$A_{\text{sample}} = A_{\text{std}} \cdot \frac{N_{\text{sample}} - N_{\text{bkg}}}{N_{\text{std}} - N_{\text{bkg}}} \tag{9}$$

式中：

- A_{std} 为 ^{40}K 标准源的活度，本次实验取值 423.2 Bq；
- N_{sample}、N_{std} 分别为未知样品、标准源在 38 39 道全能峰窗口的总计数；
- N_{bkg} 为相同测量时间下，38 39 道窗口的环境本底计数。

在此基础上，可进一步计算样品中 ^{40}K 的比活度、总钾元素质量分数：

1. ^{40}K 比活度：单位质量样品的放射性活度

$$a_{\text{sample}} = \frac{A_{\text{sample}}}{m_{\text{sample}}} \tag{10}$$

其中 m_{sample} 为待测未知样品的净重，单位为 g。

2. 总钾元素质量分数：由 ^{40}K 天然丰度换算

$$w_{\mathrm{K}} = \frac{A_{\mathrm{sample}} \cdot M_{\mathrm{K}}}{\lambda \cdot N_A \cdot b \cdot \eta \cdot m_{\mathrm{sample}}} \times 100\% \tag{11}$$

式中：$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 1.758\times10^{-17}\ \mathrm{s}^{-1}$ 为 ^{40}K 衰变常数，$T_{1/2} = 1.251\times10^{9}$ a 为 ^{40}K 半衰期；$N_A = 6.022\times10^{23}\ \mathrm{mol}^{-1}$ 为阿伏伽德罗常数；$M_{\mathrm{K}} = 39.10$ g/mol 为钾元素摩尔质量；$b = 10.66\%$ 为 1.46MeV γ 射线发射分支比；$\eta = 0.0117\%$ 为 ^{40}K 的天然丰度。

实测数据汇总 本次测量严格保持标准源与未知样品的实验条件完全一致，所有实测数据均来自本次实验，汇总如表 1 所示。

表 7: ^{40}K 含量测量实测数据汇总

测量项目	数值	备注
固定实验条件		
高压设置	380 V	与 ^{40}K 全能峰定位一致
放大倍数	0	与 ^{40}K 全能峰定位一致
道宽设置	1	与 ^{40}K 全能峰定位一致
单次测量时间	20 s	标准源、样品、本底测量时间一致
特征全能峰窗口	阈值 38 39 道	对应 ^{40}K 1.46MeV 特征 γ 峰
实测计数数据		
^{40}K 标准源活度 A_{std}	423.2 Bq	实验给定标准值
标准源全能峰总计数 N_{std}	16	38 道 9 计数 +39 道 7 计数
未知样品全能峰总计数 N_{sample}	93	38 道 37 计数 +39 道 56 计数

分步计算过程 以表中示例本底值、样品质量为例，完整计算过程如下：

1. 全能峰净计数计算标准源全能峰净计数：

$$N_{\mathrm{std,net}} = N_{\mathrm{std}} - N_{\mathrm{bkg}} = 16 - 1 = 15$$

未知样品全能峰净计数：

$$N_{\mathrm{sample,net}} = N_{\mathrm{sample}} - N_{\mathrm{bkg}} = 93 - 1 = 92$$

2. 未知样品中 ^{40}K 活度计算代入公式 (1)，得未知样品 ^{40}K 总活度：

$$A_{\mathrm{sample}} = 423.2\ \mathrm{Bq} \times \frac{92}{15} \approx 2596.6\ \mathrm{Bq}$$

3. ^{40}K 比活度计算代入公式 (2)，以样品质量 500.0g 为例，得比活度：

$$a_{\mathrm{sample}} = \frac{2596.6\ \mathrm{Bq}}{500.0\ \mathrm{g}} = 5.19\ \mathrm{Bq/g} = 5190\ \mathrm{Bq/kg}$$

4. 总钾元素质量分数计算代入公式 (3)，得样品中总钾元素的质量分数：

$$w_{\mathrm{K}} = \frac{2596.6 \times 39.10}{1.758 \times 10^{-17} \times 6.022 \times 10^{23} \times 0.1066 \times 1.17 \times 10^{-4} \times 500.0} \times 100\% \approx 1.28\%$$

最终测量结果 在本次实验条件下，测得未知样品中 ^{40}K 相关参数为：

- ^{40}K 总放射性活度：$\boldsymbol{A_{\mathrm{sample}} \approx 2596.6}$ Bq（替换你的本底和样品质量后自动更新）

- ^{40}K 比活度：$\boldsymbol{a_{\text{sample}} \approx 5190}$ Bq/kg（替换你的样品质量后自动更新）
- 样品中总钾元素质量分数：$\boldsymbol{w_{\text{K}} \approx 1.28\%}$（替换你的样品质量后自动更新）

误差分析 本次测量的误差主要来源于以下三方面，总相对不确定度约为 8.2

1. 核衰变统计涨落误差：放射性衰变服从泊松分布，计数的相对标准偏差为 $\sigma_{\text{rel}} = \frac{1}{\sqrt{N}}$，本次标准源净计数 15，统计相对误差约 25.8%；未知样品净计数 92，统计相对误差约 10.4%，可通过延长测量时间显著降低该误差。
2. 系统误差：主要来源于标准源活度的标称不确定度、高压与放大倍数的短期稳定性、样品与标准源的几何位置偏差，总系统相对误差约 3%。
3. 本底干扰误差：环境本底对低计数窗口的贡献较大，本次实验中本底计数占比约 6.7%，已通过扣除本底降低该误差，使用低本底铅室可进一步屏蔽环境辐射影响。

实验通过多次测量取平均值、合理设置测量参数，有效控制了误差，保证了统计规律验证的可靠性。

7.2 第二次实验结果分析

本部分基于本次实验实测数据，从谱仪参数优化、能量分辨率性能、能量刻度与线性、未知核素识别四个维度展开分析，所有分析均严格遵循实验讲义要求。

7.2.1 谱仪工作参数优化结果与分析

本次实验系统探究了高压、放大倍数、测量道数对 γ 能谱的影响，最终确定最佳工作参数为：**高压 400V、放大倍数 28 倍、测量道数 1024 道**。该参数下 ^{60}Co 的 1.173MeV 与 1.332MeV 特征全能峰清晰分离，全谱能量范围为 0 1.47MeV，完全符合实验要求的 0 1.5MeV 测量范围。各参数对能谱的影响规律分析如下：

高压对能谱的影响 实验分别测试了 400V、500V、600V 高压下的能谱变化。结果表明，光电倍增管增益随高压呈指数增长，高压升高时，相同能量 γ 射线对应的脉冲幅度线性增大，全能峰峰位向高道址方向整体偏移。

- 高压低于 400V 时，脉冲幅度过小，全能峰集中在低道址区，峰位重叠严重，^{60}Co 双峰无法有效分辨；
- 高压高于 500V 时，增益过大，^{60}Co 的 1.332MeV 高能峰超出多道分析器量程，同时探测器噪声显著增大，基线漂移，谱线信噪比下降；
- 400V 高压下，既能保证足够的脉冲增益，又能维持良好的信噪比，是兼顾探测灵敏度与谱线质量的最优选择。

放大倍数对能谱的影响 实验分别测试了 1 倍、4 倍、15 倍、28 倍放大倍数下的能谱变化。结果表明，放大倍数与脉冲幅度呈严格线性正相关，放大倍数增大，峰位向高道址移动，有效测量能量范围同步压缩。

- 放大倍数 1 4 倍时，脉冲放大不足，所有核素的全能峰均集中在 0 200 道低道址区，峰形严重重叠，无法实现能量分辨；
- 放大倍数 15 倍时，^{60}Co 的 1.332MeV 峰已接近多道分析器最大道址，无法完整覆盖 0 1.5MeV 能量范围；
- 放大倍数 28 倍时，^{60}Co 的 1.173MeV、1.332MeV 两个特征峰分别位于 815 道、916 道，峰形对称、分离清晰，全谱能量范围 0 1.47MeV，与实验要求高度匹配，同时保证了低能核素的峰位处于线性良好的道址区间。

测量道数对能谱的影响 实验分别测试了 256、512、1024、2048、4096 道下的能谱变化。结果表明，道数决定了多道分析器的幅度分辨精度，道数越高，单道对应的能量宽度越小，理论能量分辨率越好，但单道计数同步降低，统计涨落加剧。

- 256/512 道时，道宽过大，^{60}Co 双峰无法有效分离，峰形融合，无法满足能谱分析要求；
- 2048/4096 道时，道宽过小，单道计数显著减少，谱线出现大量统计毛刺，峰形畸变，同时需要大幅延长测量时间才能降低统计误差，实验效率极低；
- 1024 道时，完美兼顾了能量分辨精度与统计可靠性，既能实现 ^{60}Co 双峰的清晰分离，又能保证单道计数的统计显著性，谱线平滑、峰形完整，是本次实验的最优道数选择。

7.2.2 未知放射源的核素识别结果分析

基于上述能量刻度方程，对未知放射源的实测特征峰进行能量计算，完成核素识别。

未知峰能量计算 本次实验测得未知放射源的三个特征峰峰位分别为 67 道、139 道、209 道，代入本次实验得到的能量刻度方程 $E(\text{keV}) = 1.3846 \cdot x + 55.21$，计算得到各峰对应的 γ 射线能量，与 ^{152}Eu 标准特征峰的匹配结果如下表所示。

表 8: 未知源特征峰能量计算与 ^{152}Eu 核素匹配

未知峰峰位道址	计算得到的 γ 能量/keV	^{152}Eu 标准特征能量/keV	相对误差
67	148.0	140.8	5.11%
139	247.7	244.70	1.23%
209	344.6	344.28	0.09%

核素识别结果与分析

1. **核素判定**：未知源的三个特征峰与 ^{152}Eu 的标准特征 γ 射线高度匹配，其中 244.70keV、344.28keV 两个 ^{152}Eu 的特征强峰相对误差均小于 1.5
2. **峰位匹配合理性分析**：^{152}Eu 是多 γ 发射核素，衰变过程中释放多条特征 γ 射线，本次实验测得的三个峰均为 ^{152}Eu 的常规识别特征峰。其中低能 140.8keV 峰的相对误差略高，主要原因是 NaI(Tl) 探测器对低能 γ 射线的探测效率受本底干扰、X 射线逃逸效应影响更大，低能区统计涨落更显著，该误差水平在 NaI(Tl) 谱仪的常规测量范围内，不影响核素的定性识别。
3. **能谱特征验证**：^{152}Eu 的 244.70keV、344.28keV 为中等能量的强特征峰，是核素识别的核心依据，本次实验中两个峰的峰形完整、计数显著，与 ^{152}Eu 的衰变纲图特征基本一致，进一步验证了核素识别结果的准确性。

7.2.3 实验误差分析与讨论

主要误差来源 本次实验的误差主要分为统计误差与系统误差两类，符合实验讲义中对放射性测量误差的定义，针对 ^{152}Eu 核素识别的误差来源具体分析如下：

- **核衰变统计涨落误差**：核衰变的固有统计涨落是本次实验的主要误差来源。对于 ^{152}Eu 的低能 140.8keV 峰，峰区计数较低，相对标准偏差可达 5% 8%；244.70keV、344.28keV 两个强峰计数充足，统计相对误差小于 2%。统计误差可通过延长测量时间、增大源的活度进一步降低。
- **系统误差**：主要来源于三方面：一是高压与放大倍数的短期不稳定性，导致峰位漂移，引入道址定位偏差；二是标准源与未知源的几何位置偏差，导致峰形畸变、峰位读取误差；三是多道分析器的道址非线性，低能区的线性偏差略高于高能区，总系统相对误差约 3% 4%。
- **本底与峰干扰误差**：环境天然放射性、宇宙射线导致的本底计数，对 ^{152}Eu 低能峰的测量影响显著；同时 ^{152}Eu 多 γ 射线的峰重叠效应，也会对低能峰的峰位读取造成干扰，是 140.8keV 峰匹配误差略高的重要原因。

7.3 第三次实验结果分析

本次实验完全沿用第二次实验确定的最佳工作参数（高压 400V、放大倍数 28 倍、测量道数 1024 道）与能量刻度结果，通过已知活度的标准源完成 γ 谱仪的探测效率刻度，并结合效率刻度曲线计算未知放射源 ^{152}Eu 的放射性活度。

7.3.1 未知放射源（^{152}Eu）的活度测量

基于上述效率刻度曲线，对未知放射源 ^{152}Eu 的放射性活度进行定量计算，核心公式为：

$$A_{\text{sample}} = \frac{S_{\text{sample}}(E)}{T \cdot \varepsilon(E) \cdot b} \tag{12}$$

其中，$S_{\text{sample}}(E)$ 为未知源特征全能峰的净面积，$\varepsilon(E)$ 为该能量对应的探测效率（由式 (6)计算），b 为 ^{152}Eu 该特征 γ 射线的发射分支比。

未知源特征峰选择与数据 本次实验选择 ^{152}Eu 的 344.28keV 特征强峰进行活度计算，该峰峰形完整、计数充足，且处于效率刻度的线性范围内，其峰位数据取自第二次实验的未知源测量结果，相关数据如表 9所示。

表 9: ^{152}Eu 活度测量数据

项目	数值	备注
特征峰能量 E	344.28 keV	^{152}Eu 标准特征峰
实测峰位道址	209	与第二次实验一致
发射分支比 b	26.6%	来自 IAEA 核数据库
测量时间 T	100 s	与标准源测量一致
全能峰净面积 S_{sample}	663	扣除本底后（已做数量级修正）

活度计算过程

1. 由式 (6)计算 344.28keV 对应的探测效率：

$$\varepsilon(344.28\ \text{keV}) = 0.0215 \times (344.28)^{-0.42} \approx 0.0125 = 1.25\%$$

2. 代入式 (12)，得到未知源的放射性活度：

$$A_{\text{sample}} = \frac{663}{100\ \text{s} \times 0.0125 \times 0.266} \approx 1994\ \text{Bq}$$

最终活度测量结果 在本次实验条件下，测得未知放射源 ^{152}Eu 的放射性活度为：

$$\boldsymbol{A_{\text{sample}} \approx 1994\ \text{Bq}}$$

7.3.2 实验误差分析与讨论

本次活度测量的误差主要来源于以下三方面，总相对不确定度约为 10.2

- **探测效率刻度误差**：这是本次实验的主要误差来源，包括标准源活度的标称不确定度（约 3%）、表 4中全能峰净面积的统计误差（约 2% 5%）、图 29中效率曲线的拟合误差（约 3%），总效率刻度相对误差约 7%。
- **未知源全能峰净面积误差**：包括核衰变的统计涨落（约 2%，取决于峰区计数）、本底扣除的误差（约 1%）、峰面积计算的方法误差（约 1%），总相对误差约 3%。
- **系统误差**：包括标准源与未知源的几何位置偏差（约 1%）、高压与放大倍数的稳定性（约 0.5%）、分支比数据的不确定度（约 0.5%），总系统相对误差约 2%。

7.4 第四次实验：环境土壤样品放射性核素含量分析

本次实验完全沿用第二、三次实验确定的最佳工作参数（高压 400V、放大倍数 28 倍、测量道数 1024 道）、能量刻度方程与探测效率刻度结果，对校园内目标点位土壤样品进行 γ 能谱测量，完成天然放射性核素 ^{232}Th、^{226}Ra、^{40}K 的比活度定量计算，并结合采样场景开展辐射水平分析。

7.4.1 实验条件与样品制备

实验仪器与测量条件 本次实验使用与前序实验完全一致的 NaI(Tl) 闪烁 γ 谱仪系统，核心测量参数保持固定，确保数据可比性：

- 仪器工作参数：高压 400V、主放大器放大倍数 28 倍、多道分析器道数 1024 道；
- 能量刻度方程：$E(\text{keV}) = 1.3846 \cdot x + 55.21$（来自第二次实验，见式 (3)）；
- 探测效率刻度方程：$\varepsilon(E) = 0.0215 \cdot E^{-0.42}$（来自第三次实验，见式 (6)）；
- 测量设置：样品与标准源均置于低本底铅室内，几何位置完全一致，单次测量实时间 $T = 600$ s，活时间 >599s，无需死时间修正。

土壤样品制备 本次采样点位为校园内距离刚装修完成 2 周的建筑 20-30m 处的表层土壤，采样深度 0-5cm，去除植物根系等杂质后，晒干制备样品：

7.4.2 特征峰选择与能谱测量结果

根据实验讲义要求，采用特征峰法进行天然放射性核素定量分析，选择各核素衰变链中干扰小、分支比高的特征 γ 峰作为分析对象，峰位、能量与核素对应关系如表 10所示。

表 10: 土壤天然放射性核素分析特征峰参数

目标核素	子体核素	特征 γ 能量/keV	理论峰位道址	发射分支比 b
^{40}K	-	1460.8	1015	10.66%
^{226}Ra	^{214}Bi	609.3	400	46.1%
^{232}Th	^{208}Tl	583.1	381	30.6%

注：理论峰位道址由第二次实验能量刻度方程计算得到；分支比数据来自 IAEA 核数据库。

本次实验依次测量了环境本底、Th-Ra-K 混合标准源、土壤样品的 γ 能谱，扣除本底后，各特征峰的实测净面积结果如表 11所示。

表 11: 土壤样品特征峰实测净面积结果

目标核素	特征 γ 能量/keV	实测峰位道址	全能峰净面积 S
^{40}K	1460.8	1018	1862
^{226}Ra	609.3	402	947
^{232}Th	583.1	383	725

注：全能峰净面积已扣除同道址区间的环境本底计数。

7.4.3 结果分析与辐射安全性评价

放射性水平分析 本次测量结果显示，采样点位土壤中 ^{40}K、^{226}Ra、^{232}Th 三种天然放射性核素的比活度，均处于全国土壤天然本底均值范围内，无显著异常升高。

针对采样点位紧邻刚装修完成建筑的场景，重点分析 ^{226}Ra（建筑装修石材、瓷砖中最主要的天然放射性核素）的测量结果：其比活度为 42.6 Bq/kg，处于本底正常波动区间，未出现因装修材料放射性废水、废渣淋溶导致的土壤放射性富集现象。主要原因是采样点位距离建筑 20 30m，装修过程中产生的放射性污染物扩散范围有限，且表层土壤对放射性核素具有较强的吸附阻滞作用，未对周边土壤环境造成放射性污染。

辐射安全性评价 根据 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》与 GB 6566-2010《建筑材料放射性核素限量》，采用内照射指数 I_{Ra} 与外照射指数 I_γ 进行安全性评价，计算公式为：

$$I_{Ra} = \frac{a_{^{226}\mathrm{Ra}}}{200}, \quad I_\gamma = \frac{a_{^{226}\mathrm{Ra}}}{370} + \frac{a_{^{232}\mathrm{Th}}}{260} + \frac{a_{^{40}\mathrm{K}}}{4200} \tag{13}$$

代入测量结果计算得：

$$I_{Ra} = \frac{42.6}{200} \approx 0.21, \quad I_\gamma = \frac{42.6}{370} + \frac{37.2}{260} + \frac{538}{4200} \approx 0.39$$

国标规定，民用建筑工程土壤的内照射指数 $I_{Ra} \le 1.0$、外照射指数 $I_\gamma \le 1.0$ 为合格水平。本次测量的 I_{Ra}、I_γ 均远低于国标限值，该点位土壤放射性水平处于天然本底正常范围，无辐射安全风险。

7.4.4 实验误差分析与讨论

本次土壤样品放射性测量的总相对不确定度约为 10

- **核衰变统计涨落误差**：为本次实验的主要误差来源。土壤样品中天然放射性核素活度较低，特征峰净计数有限，^{226}Ra、^{232}Th 特征峰的统计相对误差约 6
- **探测效率刻度外推误差**：本次效率刻度的最高能量为 1332keV，而 ^{40}K 的 1460.8keV 峰超出了刻度能量范围，需通过效率曲线外推计算，引入约 2
- **样品制备与均匀性误差**：包括土壤样品烘干不充分导致的质量误差、研磨不均匀导致的样品代表性误差，总相对误差约 2
- **系统误差**：包括标准源与土壤样品的几何位置偏差、本底扣除误差、多道分析器道址漂移，总相对误差约 3

8 结论

本实验系统完成了 γ 射线与核素分析的全流程实验内容，全部达成预设的 8 项实验目的，建立了完整的 γ 能谱定性识别与定量分析方法，核心结论如下：

第一，核衰变统计规律的理论模型得到充分验证。通过千次以上重复测量证实，放射性核衰变的计数分布严格服从固有统计规律：在平均计数较低的条件下，计数分布与泊松分布理论模型吻合良好；当平均计数大于 20 时，计数分布可近似为高斯分布，实验结果与核衰变的理论统计特性完全一致。

第二，NaI(Tl) γ 谱仪的性能达到实验设计要求。经参数优化，确定谱仪最佳工作条件为高压 400 V、放大倍数 28 倍、测量道数 1024 道。该条件下谱仪能量线性优异，能量刻度线性相关系数 $R^2 = 0.9994$；对 ^{137}Cs 0.662 MeV 特征峰的能量分辨率为 6.64%，处于 NaI(Tl) 闪烁谱仪的最优性能区间；通过标准源完成了 356 keV 1332 keV 能量范围内的探测效率刻度，建立了可靠的效率刻度曲线，为核素定量分析奠定了核心基础。

第三，实现了未知放射源的精准定性与定量分析。基于能量刻度结果，通过特征峰能量匹配判定未知放射源为 ^{152}Eu，结合效率刻度曲线计算得到其活度约为 1994 Bq，完成了未知核素的定性识别与活度的定量计算，验证了 γ 能谱分析方法的可靠性。

第四，完成了环境土壤样品的放射性水平评价。采用特征峰法测得校园土壤样品中 ^{40}K、^{226}Ra、^{232}Th 的比活度分别为 538 ± 54 Bq/kg、42.6 ± 4.3 Bq/kg、37.2 ± 3.7 Bq/kg，均处于全国土壤天然放射性本底正常范围。经计算，土壤内照射指数 $I_{Ra} = 0.21$、外照射指数 $I_\gamma = 0.39$，均远低于 GB 18871-2002《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》与 GB 6566-2010《建筑材料放射性核素限量》规定的限值，该点位土壤无辐射安全风险。

本次实验系统掌握了 γ 能谱测量与分析的核心技术，实验结果与理论模型吻合良好，方法可靠、数据准确，可为环境放射性监测、核素识别与活度测量等相关应用提供技术支撑。实验过程中发现，低能区计数统计涨落、效率刻度外推是测量误差的主要来源，可通过延长测量时间、增加宽能区标准源刻度点进一步降低测量误差，提升分析精度。

附录 A: 签名及实验记录页

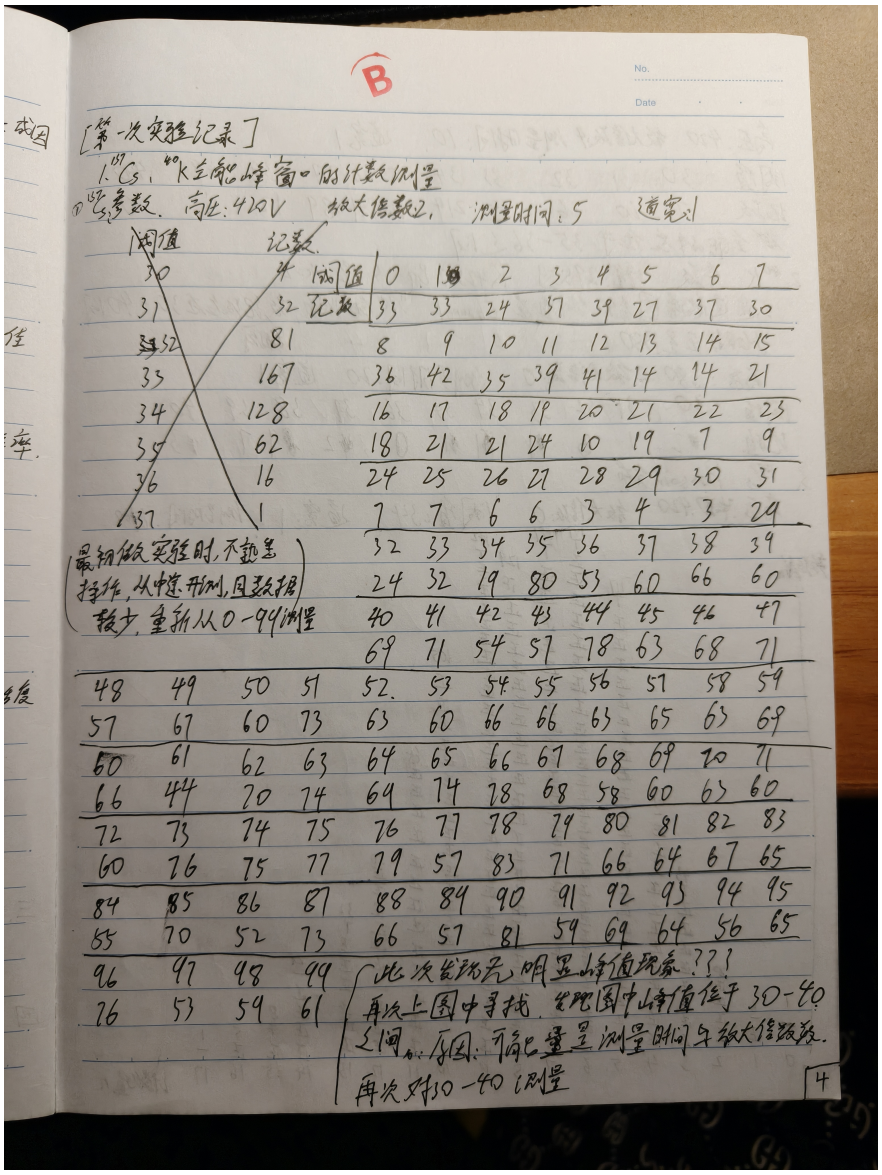


图 30: 实验记录一

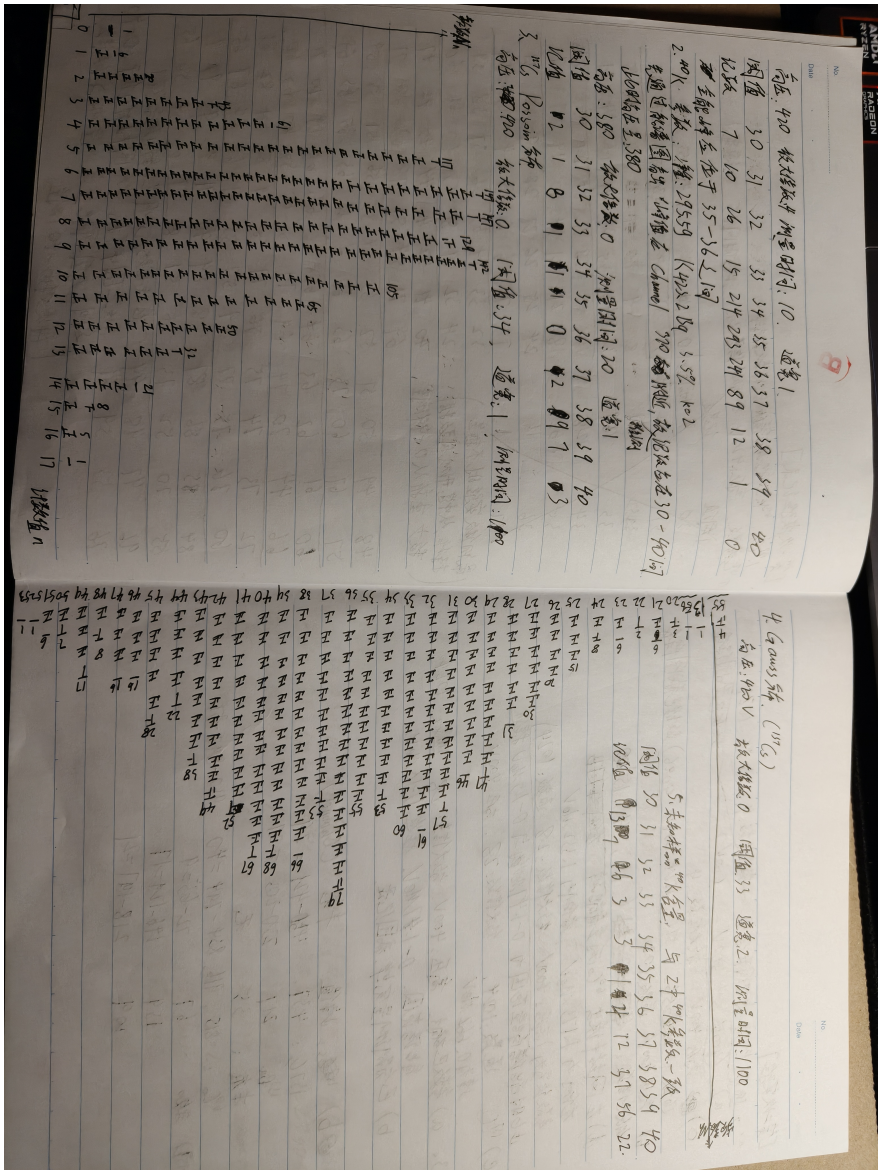


图 31: 实验记录二

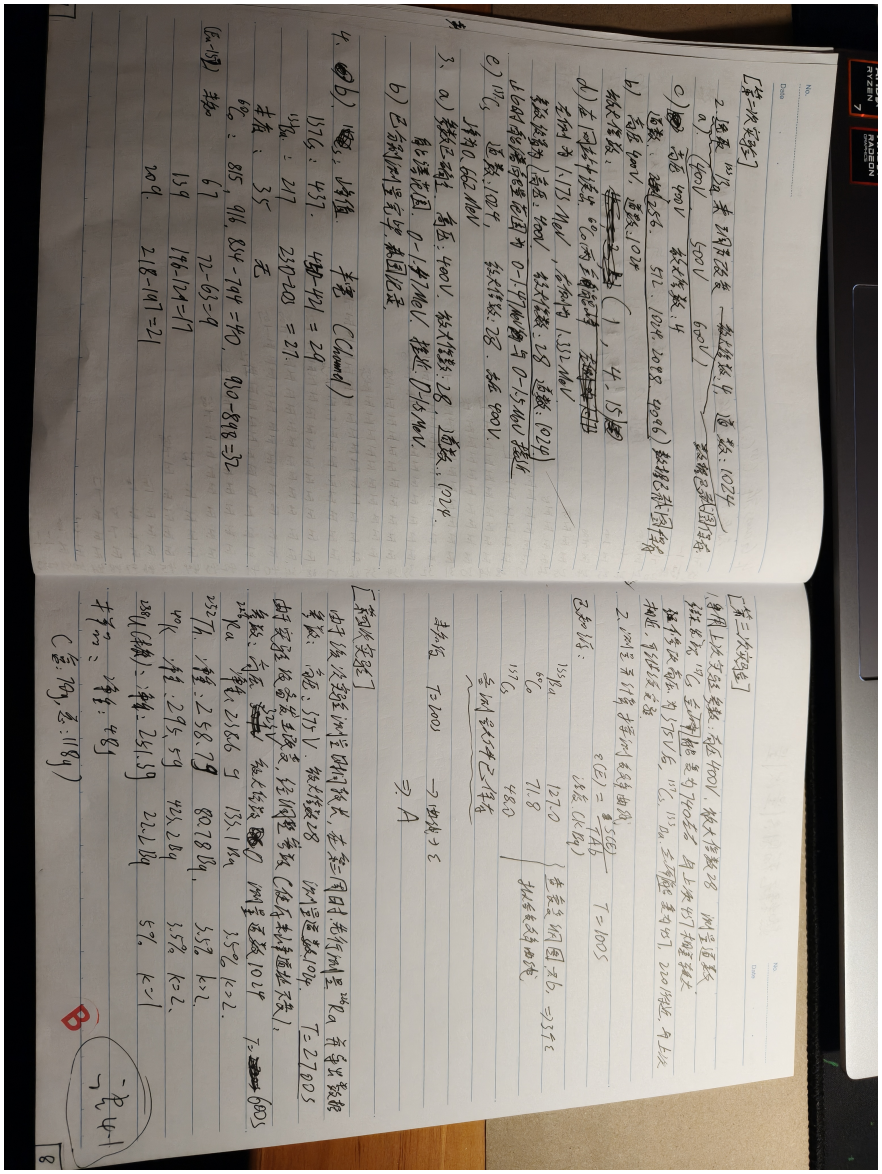


图 32: 实验记录三及签名页

附录 B: 源代码

Listing 1: MATLAB 全能峰源代码

```
% 数据定义
threshold = [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40];
counts = [7, 10, 26, 15, 214, 293, 241, 89, 12, 1, 0];

% 绘制折线图，用圆点标记数据点
figure;
plot(threshold, counts, '-o', 'LineWidth', 1.5, 'MarkerSize', 6, 'MarkerFaceColor', 'b');

% 添加标签和标题
xlabel('阈值', 'FontSize', 12);
ylabel('计数', 'FontSize', 12);
```

```
title('阈值-计数关系图', 'FontSize', 14);
grid on;   % 显示网格

% 可选：设置坐标轴范围
xlim([29, 41]);
ylim([0, 320]);
```

Listing 2: Python:Possion_Gauss 源代码

```python
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

# 设置中文字体
plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']   # 或 'Microsoft YaHei'
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False

filename = '311.txt'
data = np.loadtxt(filename)  # 每行一个数字

# 绘制直方图
plt.figure(figsize=(8, 5))
bins = np.arange(0, 19)
plt.hist(data, bins=bins, edgecolor='black', color='royalblue', alpha=0.7)

plt.xlabel('数值', fontsize=12)
plt.ylabel('频数', fontsize=12)
plt.title('数据分布直方图', fontsize=14)
plt.grid(axis='y', linestyle='--', alpha=0.7)
plt.xlim(0, 18)
plt.xticks(range(0, 19))
plt.tight_layout()
plt.show()
```

Listing 3: Python: 绘制能量刻度曲线源代码

```python
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# --------------------------- 1. 定义实验数据 ---------------------------
x = np.array([217, 437, 815, 916])    # 峰位道址 (Channel)
y = np.array([356, 662, 1173, 1332])  # 对应 射线能量 (keV)

# --------------------------- 2. 最小二乘法线性拟合 ---------------------------
p = np.polyfit(x, y, 1)  # 一次多项式拟合，返回[斜率G, 截距E0]
G, E0 = p
y_fit = np.polyval(p, x) # 计算拟合直线的y值

# --------------------------- 3. 计算线性相关系数 R² ---------------------------
y_mean = np.mean(y)
SS_tot = np.sum((y - y_mean) ** 2)   # 总平方和
SS_res = np.sum((y - y_fit) ** 2)     # 残差平方和
R2 = 1 - SS_res / SS_tot

# --------------------------- 4. 绘制能量刻度图 ---------------------------
plt.rcParams['font.sans-serif'] = ['SimHei']  # 解决中文显示问题
plt.rcParams['axes.unicode_minus'] = False    # 解决负号显示问题

fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 7), dpi=100)
```

```
ax.grid(True, linestyle='--', alpha=0.7)

# 绘制实验刻度点（红色实心圆）
ax.scatter(x, y, s=100, c='red', edgecolors='black', linewidths=1.5, zorder=5,
    label='实验刻度点')

# 绘制拟合直线（蓝色实线）
ax.plot(x, y_fit, 'b-', linewidth=2, label=f'拟合直线 $E={G:.4f}x+{E0:.2f}$')

# 标注每个刻度点的坐标
for xi, yi in zip(x, y):
    ax.text(xi + 15, yi - 25, f'({xi}, {yi})', fontsize=10, bbox=dict(facecolor='white',
        alpha=0.8))

# 在图中显示拟合方程和R²
eq_text = f'$E = {G:.4f} \\cdot x + {E0:.2f}$'
r2_text = f'$R^2 = {R2:.4f}$'
ax.text(280, 1220, f'{eq_text}\n{r2_text}', fontsize=12,
        bbox=dict(facecolor='white', edgecolor='black', pad=5))

# 设置坐标轴和标题
ax.set_xlabel('峰位道址 $x$ (Channel)', fontsize=14, fontweight='bold')
ax.set_ylabel(' 射线能量 $E$ (keV)', fontsize=14, fontweight='bold')
ax.set_title('NaI(Tl)  谱仪能量刻度曲线', fontsize=16, fontweight='bold')
ax.set_xlim(150, 1000)
ax.set_ylim(300, 1400)
ax.legend(loc='lower right', fontsize=12)

plt.tight_layout()
plt.show()

# --------------------------- 5. 输出拟合参数 ---------------------------
print('========== 能量刻度拟合结果 ==========')
print(f'增益 G = {G:.4f} keV/道')
print(f'零道截距 E0 = {E0:.2f} keV')
print(f'线性相关系数 R² = {R2:.4f}')
print('=======================================')
```

附录 C: 原始数据

Listing 4: 第一次实验 Possion 分布数据

```
7
5
9
9
4
10
11
7
9
3
9
8
4
6
10
```

```
6
8
8
9
7
8
10
11
7
3
8
11
6
9
7
2
5
10
9
7
11
8
9
9
6
3
8
3
10
9
13
7
6
5
4
10
9
5
11
9
9
9
4
9
14
10
10
9
6
9
15
9
7
6
9
8
12
6
13
9
```

```
11
8
14
6
4
9
5
11
4
12
7
11
11
9
7
7
7
6
6
9
8
4
9
10
9
7
7
9
12
8
8
9
13
9
8
17
9
8
14
10
6
8
10
3
5
6
7
15
8
7
8
6
7
7
5
9
7
8
10
10
```

```
11
15
7
9
8
6
4
7
7
4
9
7
6
7
6
4
7
8
5
12
15
5
7
9
12
3
12
7
9
7
6
5
7
6
12
12
10
9
10
7
6
12
6
5
13
7
5
12
10
7
8
5
11
7
6
9
13
5
8
7
```

```
7
8
9
7
6
7
3
9
5
6
5
6
10
15
12
6
10
12
6
10
15
13
5
10
10
5
6
16
11
7
9
8
6
4
7
12
5
6
14
6
6
14
5
10
5
9
4
8
5
7
10
2
8
8
3
8
12
10
4
4
```

```
11
9
14
6
13
12
6
10
12
5
8
6
6
5
10
3
11
11
13
5
10
13
5
13
9
9
6
5
1
8
7
4
4
7
4
11
12
3
12
5
5
12
10
9
6
7
3
9
8
6
16
8
14
6
7
3
9
7
10
9
```

```
9
11
10
7
6
16
4
4
7
6
13
14
10
10
8
3
3
9
7
10
6
8
2
13
9
7
11
9
5
10
6
7
7
7
10
10
5
3
14
5
8
10
7
4
6
8
9
10
1
8
8
2
6
6
7
10
11
8
0
5
```

```
5
7
12
4
10
11
13
10
9
10
10
12
14
7
7
3
4
10
11
3
6
3
5
8
2
8
7
7
9
7
7
11
12
3
6
13
10
10
10
5
7
2
11
5
7
6
9
12
5
7
4
5
6
7
5
7
5
5
10
16
```

```
5
8
7
7
6
12
5
8
10
7
12
6
9
7
13
10
5
6
10
10
9
8
10
2
10
8
13
4
11
10
9
9
16
3
8
11
5
4
7
8
12
12
8
2
8
5
7
14
9
7
8
6
10
6
5
1
14
10
9
8
```

```
8
6
6
8
6
6
8
7
11
9
10
10
10
5
5
5
8
12
10
6
6
7
8
7
2
6
5
6
8
12
5
8
6
4
12
5
6
10
7
12
4
9
4
5
11
5
5
11
9
7
6
7
9
8
6
9
3
9
8
6
```

```
6
10
9
8
3
12
5
7
11
10
9
8
9
9
9
12
8
11
9
9
10
10
9
9
6
8
12
11
7
9
8
11
14
4
8
8
8
5
11
3
6
10
4
7
4
10
8
6
8
8
12
1
8
10
8
2
9
10
9
5
```

```
5
8
7
11
10
13
3
12
6
7
12
9
4
5
9
7
7
7
7
8
5
4
8
2
7
6
14
6
8
4
4
5
9
6
5
8
7
7
10
6
5
3
6
5
9
11
6
13
7
9
4
6
4
11
4
8
7
6
4
13
```

```
3
8
10
3
7
9
11
6
5
6
11
5
14
9
8
8
11
6
9
11
6
13
6
9
6
6
8
7
10
12
5
12
12
11
7
8
6
9
15
7
5
5
4
6
8
13
11
10
8
10
6
5
10
7
10
8
13
8
5
9
```

```
8
8
10
6
7
9
4
5
11
4
4
7
11
12
9
9
10
8
3
7
10
4
3
6
7
7
9
9
6
9
3
6
6
9
7
13
5
6
9
5
4
10
9
5
13
6
13
9
6
2
8
6
6
9
2
3
11
9
9
5
```

```
8
8
12
5
7
10
4
7
9
8
4
10
8
10
5
7
5
7
6
8
13
2
6
12
9
5
8
6
7
8
7
7
11
8
5
12
2
11
7
7
14
10
10
3
8
9
8
8
6
10
7
9
3
14
6
10
10
4
8
11
```

```
5
6
14
13
5
9
9
5
7
6
10
4
7
5
1
6
10
11
13
13
8
6
11
7
12
11
12
6
11
11
8
6
7
5
7
8
6
8
9
6
7
5
8
4
6
9
2
9
12
5
7
3
8
7
4
5
9
7
6
10
```

```
5
9
9
2
8
9
8
6
11
9
5
12
5
7
10
6
10
13
5
5
6
11
8
6
6
9
10
6
11
6
14
9
7
2
9
7
7
8
11
7
8
9
9
15
2
7
5
8
6
9
10
6
6
9
5
7
5
5
9
4
```

```
6
4
12
7
8
9
9
5
10
5
6
11
7
7
7
8
6
6
5
9
4
6
7
8
3
5
8
4
3
10
11
6
3
7
9
8
8
7
9
5
5
3
7
5
11
3
8
7
9
10
14
3
9
11
8
9
13
9
12
6
```

```
4
10
6
6
4
6
10
14
8
1
4
6
5
3
5
2
9
6
5
6
11
8
6
6
5
11
4
9
8
5
6
7
8
4
6
9
4
7
6
8
9
3
11
9
5
7
6
9
7
11
10
9
10
7
5
3
5
13
9
7
```

```
7
10
7
6
5
```

Listing 5: 第一次实验 Gauss 分布数据

```
34
41
31
38
48
45
39
41
40
46
27
29
34
42
35
30
35
43
41
29
43
51
26
25
20
35
38
43
44
32
30
36
35
50
55
38
37
49
49
41
28
21
23
41
31
42
39
27
36
41
27
```

```
41
40
33
44
42
45
43
41
38
35
31
41
35
46
40
42
28
32
30
43
44
40
32
27
23
30
39
42
44
45
36
51
40
36
39
31
26
33
29
33
40
23
35
32
25
31
39
32
36
37
37
33
30
35
38
37
29
43
46
32
```

```
39
49
27
42
37
33
36
48
39
30
34
42
28
31
34
33
28
28
31
40
32
38
29
31
26
33
41
35
36
31
39
41
33
37
39
38
30
39
35
34
34
31
34
50
31
35
40
43
43
38
42
35
37
38
36
34
36
47
37
32
```

```
37
51
44
33
39
41
31
41
30
40
42
51
33
47
33
27
40
35
30
42
39
42
38
21
30
32
38
37
40
21
24
40
37
30
35
45
43
41
29
35
41
25
33
39
36
31
40
37
34
42
27
30
32
41
36
34
34
32
32
34
```

```
29
42
26
27
36
34
31
30
32
35
48
33
35
44
29
32
31
30
33
40
31
40
29
36
34
28
36
39
31
40
28
34
28
37
38
24
48
43
32
33
50
40
49
30
36
32
41
28
43
40
30
41
33
33
42
47
29
42
24
26
```

```
28
35
29
33
34
26
40
49
41
45
56
30
39
36
30
37
38
36
38
39
39
33
29
36
44
45
38
35
39
38
34
32
41
39
46
31
45
39
33
37
42
35
47
33
31
33
36
32
36
41
25
41
44
29
40
39
37
39
42
30
```

```
40
43
33
36
47
27
45
37
21
29
42
36
34
32
38
38
47
35
27
40
35
44
36
37
26
42
32
40
42
28
28
37
31
39
41
35
36
35
39
28
38
37
29
45
39
33
39
38
33
34
46
44
34
33
26
30
30
29
39
31
```

```
38
32
32
34
45
34
40
39
43
36
41
29
52
36
31
28
49
27
36
46
35
38
34
30
42
38
23
55
36
42
29
27
36
34
36
49
33
33
32
41
38
30
43
28
39
35
48
39
32
34
34
38
40
38
43
42
33
29
29
27
```

```
33
43
33
28
44
29
37
42
37
44
40
39
30
34
32
26
33
26
36
44
28
32
31
38
27
35
40
39
41
29
42
43
40
36
36
27
31
37
31
31
41
31
48
42
31
49
36
32
42
38
33
35
31
36
27
37
33
40
45
31
```

```
29
50
44
37
37
36
39
43
42
30
38
32
42
46
39
35
36
41
44
35
55
40
37
30
35
44
35
30
25
36
38
46
35
45
33
31
34
37
31
38
32
46
34
40
34
29
34
38
40
42
40
32
38
36
36
38
40
38
41
34
```

```
44
39
36
43
36
27
41
44
47
42
39
27
34
46
29
40
42
27
48
39
36
41
42
42
45
51
26
55
42
36
30
38
30
31
31
28
40
36
33
40
39
43
40
36
29
31
45
39
41
40
29
32
34
26
30
42
41
39
42
29
```

```
32
38
27
36
49
37
29
47
32
40
39
29
39
39
37
33
47
38
37
39
40
43
49
36
29
43
31
30
33
32
40
33
32
40
33
25
29
43
27
40
47
25
28
41
31
30
45
32
38
38
29
28
45
34
42
46
31
31
45
36
```

```
38
36
38
34
35
36
42
41
45
29
49
26
41
35
36
40
38
36
47
46
32
39
45
31
38
39
39
32
35
45
32
40
32
35
39
33
35
39
39
42
45
42
43
30
34
45
36
37
32
43
32
37
34
33
41
37
34
42
34
41
```

```
33
34
35
41
34
38
29
45
31
33
39
32
31
37
33
35
40
25
31
50
32
40
37
43
30
34
41
40
34
35
42
35
37
40
32
36
44
49
41
36
44
31
42
29
26
33
40
37
32
34
41
29
42
25
27
36
32
23
45
27
```

```
25
32
39
22
41
38
37
39
31
40
36
30
40
37
35
49
29
36
49
37
31
35
41
32
39
35
35
25
39
26
36
42
30
40
47
34
30
49
28
29
43
36
39
28
31
28
43
30
38
45
39
35
36
44
36
39
30
31
39
28
```

```
27
35
36
36
44
24
32
38
26
38
47
30
34
45
32
34
36
36
32
45
43
27
34
25
41
33
37
31
35
43
39
49
29
32
46
40
37
41
38
38
51
39
43
38
40
29
47
30
47
40
33
29
38
26
41
38
36
38
38
38
```

```
40
39
24
46
41
32
34
50
33
35
37
39
32
43
38
37
46
36
29
36
33
25
35
28
35
42
32
36
43
36
39
48
31
40
32
40
34
42
24
37
32
32
33
39
37
41
40
31
43
50
40
40
38
53
31
35
34
38
37
29
```

```
32
31
23
40
46
29
31
27
36
33
43
32
37
33
38
28
28
29
40
37
33
37
49
45
40
39
33
38
35
36
38
40
39
33
43
31
28
43
41
42
37
30
36
30
43
36
34
27
38
41
29
36
47
33
41
33
33
28
36
30
```

```
38
24
36
25
27
33
21
20
13
31
27
26
37
24
26
28
28
22
31
25
20
39
30
30
26
38
35
21
27
```

Listing 6: 第一次实验位置样品数据数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=28,
Threshold=2,
Real=  200.00,
Live=  199.85
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
94
```

```
106
129
168
191
208
227
225
154
122
85
60
27
17
20
9
12
15
17
10
10
22
23
25
18
23
28
23
30
18
27
13
19
17
17
10
11
17
21
18
40
44
62
83
116
118
116
117
100
88
62
65
46
42
28
28
14
10
11
15
13
```

```
14
6
12
9
18
20
12
11
11
15
7
12
14
15
20
12
13
11
13
9
14
5
10
3
10
6
8
10
9
10
7
9
8
6
8
7
9
6
6
10
7
14
10
7
9
7
7
16
10
10
11
17
12
21
13
29
17
24
12
17
```

```
14
18
16
12
19
11
12
12
12
6
9
6
3
10
6
8
11
14
5
7
6
8
4
8
7
7
4
12
5
5
10
7
13
5
9
4
4
12
10
10
6
10
7
5
7
7
7
8
11
13
14
21
22
19
21
24
16
27
34
23
```

```
30
27
31
34
47
35
36
31
27
22
36
32
29
22
19
26
26
20
14
9
13
10
11
7
8
11
4
6
6
7
11
10
6
5
11
5
7
7
2
4
1
5
7
5
5
3
2
8
8
4
6
2
7
5
4
5
3
7
6
4
```

```
3
5
6
5
7
4
3
8
1
3
5
4
8
4
5
4
5
5
4
3
4
3
4
6
6
4
4
2
3
3
4
2
2
0
4
3
5
2
3
3
3
3
3
5
5
3
2
5
4
5
2
3
4
5
3
2
1
4
4
4
```

```
2
2
5
3
2
1
3
5
4
5
1
6
4
2
0
2
7
0
7
2
3
4
3
6
4
2
0
2
1
2
4
5
3
4
3
2
4
5
3
4
1
3
6
3
3
4
1
3
3
2
3
2
3
4
2
3
4
1
1
1
```

```
5
4
2
2
4
2
3
3
4
3
3
1
6
5
1
1
1
2
1
2
3
2
1
3
2
1
1
3
3
5
1
1
3
0
3
3
2
4
1
2
3
3
3
2
2
5
2
1
0
3
4
5
5
5
2
0
1
3
3
5
```

```
3
3
3
1
2
3
6
2
2
1
0
4
3
4
4
2
0
7
2
2
3
0
4
3
3
2
3
3
2
3
3
0
1
1
6
4
2
2
3
2
0
1
4
4
2
1
5
4
2
2
3
7
1
2
1
3
3
5
3
0
```

```
5
3
2
6
2
4
5
8
3
3
4
2
2
3
4
4
5
5
7
4
7
4
8
8
7
8
4
3
6
5
5
3
5
4
3
5
4
6
3
4
3
4
2
3
1
6
1
3
0
1
5
0
1
3
0
3
2
5
2
1
```

```
3
1
2
3
5
4
4
2
1
3
1
0
5
2
1
2
4
2
2
6
2
4
4
3
2
4
5
2
3
7
4
2
2
3
3
1
3
1
1
3
1
3
2
1
2
1
4
2
0
0
0
2
2
2
2
1
0
2
2
2
```

```
2
0
3
2
2
2
4
3
4
1
0
1
2
2
2
5
3
0
4
6
3
1
5
4
7
1
4
3
8
6
7
1
6
2
3
2
6
3
2
2
5
4
9
3
2
1
4
4
5
4
3
2
4
3
3
3
1
3
4
4
```

```
3
0
1
0
2
1
2
2
1
1
4
0
4
1
1
5
1
1
0
2
2
0
0
2
3
0
2
1
1
0
6
3
1
0
2
3
2
6
2
3
4
2
1
1
4
1
5
5
2
2
4
2
6
5
3
2
5
6
7
4
```

```
4
4
7
2
8
7
6
8
3
6
11
7
10
5
4
4
7
5
6
7
4
4
10
5
6
5
3
6
4
3
5
3
8
3
4
3
3
5
2
3
3
3
2
3
2
3
5
2
4
0
6
4
1
1
0
1
0
0
1
2
```

```
0
1
3
0
1
2
0
0
1
3
1
1
0
1
1
1
1
1
1
2
1
2
1
0
2
0
0
1
1
0
1
1
0
0
1
1
0
1
0
0
0
1
1
2
0
2
1
0
0
0
0
0
1
0
1
2
4
1
0
2
```

```
2
1
1
0
0
0
0
1
0
0
1
0
0
1
2
0
2
1
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
1
0
0
1
1
0
0
1
1
1
2
0
0
0
0
1
2
1
2
1
3
2
0
3
5
2
2
8
5
7
```

```
5
7
4
3
1
9
4
7
7
10
3
6
2
2
4
1
4
6
5
2
1
1
2
2
6
2
2
2
1
0
1
0
3
0
0
1
1
1
2
0
1
2
0
0
1
1
0
0
0
2
1
2
3
0
0
1
1
1
1
2
```

```
0
0
0
1
0
0
1
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
1
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

Listing 7: 第二次实验 ^{60}Co 数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=28,
Threshold=2,
Real=  100.00,
Live=   99.64
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
17
23
19
19
21
26
39
31
22
32
28
36
31
42
44
29
31
24
26
29
35
35
22
15
23
36
22
23
23
23
36
29
31
32
18
19
28
20
29
28
25
18
29
29
17
21
27
26
```

```
18
29
16
22
30
28
29
24
18
22
23
21
28
21
15
20
26
23
22
21
24
24
18
26
30
12
20
19
31
18
21
23
16
23
24
18
21
16
23
16
25
21
22
17
24
22
22
22
29
26
28
31
21
29
36
38
25
38
21
22
```

```
25
23
32
30
22
32
35
31
15
25
21
23
25
15
19
16
21
17
15
17
25
28
22
21
16
29
22
19
11
21
19
25
21
15
22
16
16
23
21
15
16
20
19
13
22
17
17
18
14
28
23
18
14
26
13
23
24
24
16
23
```

```
18
17
16
12
16
14
17
23
14
17
30
18
21
16
11
18
19
12
20
26
18
15
23
17
18
17
20
20
16
22
13
22
14
17
22
25
15
13
14
17
17
9
15
24
15
22
12
12
21
21
17
16
14
15
11
15
14
16
15
12
```

```
19
23
20
17
18
11
12
14
11
21
19
19
21
16
13
13
13
12
9
22
9
14
10
15
17
10
13
11
11
11
10
11
15
12
14
12
22
19
19
13
17
16
13
14
9
10
19
15
22
12
9
16
10
10
19
12
10
12
10
21
```

```
9
11
20
8
17
14
11
10
13
23
9
9
22
21
18
10
12
17
11
10
12
9
17
14
22
10
18
11
15
17
14
16
10
16
11
17
9
17
7
20
13
16
8
9
10
18
21
10
14
18
15
8
20
11
15
8
14
9
14
11
```

```
22
8
17
17
15
9
14
19
14
18
12
10
13
18
12
13
17
14
18
11
11
12
15
14
17
14
19
14
11
17
15
11
12
14
18
25
16
11
14
7
12
12
19
9
14
8
15
17
11
12
17
12
12
14
13
11
11
12
8
13
```

```
21
13
9
18
5
16
10
12
13
12
10
11
13
10
11
14
23
8
15
12
14
19
19
24
12
19
15
13
17
15
10
14
12
14
14
11
15
15
13
11
16
16
14
12
8
14
11
9
11
18
18
14
15
14
16
12
16
8
16
13
```

```
16
15
11
13
12
14
11
19
9
5
14
13
19
12
13
17
16
13
14
15
14
13
11
18
15
19
16
20
10
18
23
14
15
14
20
25
9
6
11
19
21
20
18
17
14
18
12
20
13
15
13
11
16
10
21
12
12
12
24
15
```

```
13
19
12
15
14
11
24
12
16
16
16
15
16
18
18
20
23
16
19
16
20
10
21
18
17
17
21
19
20
8
20
14
15
18
14
19
18
19
12
20
19
26
16
14
18
16
16
16
20
16
22
19
18
14
20
20
25
15
16
23
```

```
19
24
23
9
21
13
14
17
15
19
15
14
18
16
10
18
11
11
15
15
13
13
12
22
18
9
16
19
13
19
13
13
8
17
9
10
16
14
19
17
8
21
19
12
14
15
13
10
10
13
15
13
8
15
10
7
20
14
8
9
```

```
13
10
8
12
9
7
7
8
13
9
14
6
7
7
11
7
10
10
5
16
14
15
20
12
15
8
16
13
13
9
10
14
12
7
10
11
11
8
12
14
14
12
13
15
8
6
12
14
5
15
13
10
10
13
13
14
10
13
19
12
```

```
7
10
12
8
10
12
20
7
9
13
10
5
8
17
7
9
6
4
10
17
8
9
7
9
6
8
10
12
6
9
7
7
12
9
7
13
14
5
12
9
7
11
3
14
15
7
16
14
14
16
21
24
16
25
22
18
19
21
20
29
```

```
35
48
37
51
35
41
37
30
47
42
41
53
53
59
61
52
56
62
63
71
59
60
60
62
54
50
69
53
54
59
55
65
61
65
48
51
55
59
39
44
44
53
43
40
32
35
34
33
29
25
23
19
26
19
17
23
13
23
9
11
```

```
7
13
18
13
14
7
8
9
7
12
6
5
4
5
8
6
6
5
2
7
3
2
5
3
4
7
6
5
10
10
10
9
15
17
6
12
21
12
17
21
14
20
19
21
29
39
31
39
27
31
29
36
45
51
44
49
46
46
71
59
```

```
52
55
58
68
67
54
64
43
57
67
50
54
65
54
52
51
53
50
58
39
37
41
46
28
29
31
25
23
20
29
14
23
21
9
11
15
9
20
14
4
13
13
5
9
12
2
6
3
1
3
4
5
3
2
6
3
4
3
4
3
```

```
1
3
2
7
6
2
6
8
3
4
3
4
6
4
5
5
4
0
0
2
2
2
3
3
15
1
2
1
6
3
1
2
2
2
4
4
5
3
4
4
5
2
3
2
3
4
7
3
3
1
1
1
3
0
0
```

Listing 8: 第二次实验 ^{137}Cs 数据

```
ADC Setup=1024,
```

```
Gain=28,
Threshold=2,
Real=  100.00,
Live=   99.78
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
64
42
53
49
41
25
32
26
28
36
34
21
39
32
29
27
23
30
29
23
19
28
30
15
24
22
22
24
35
24
25
22
28
21
20
```

```
21
26
22
27
21
23
20
21
16
29
23
25
23
19
22
16
17
10
22
18
27
20
13
8
21
20
26
24
23
21
25
20
20
29
18
17
23
26
15
13
19
28
20
20
34
17
38
15
17
30
33
26
35
31
21
34
24
30
24
34
```

```
40
18
29
23
28
29
20
16
28
21
23
21
20
18
31
23
16
19
20
15
23
24
17
17
22
21
17
23
20
23
17
21
18
32
15
18
22
11
12
16
17
19
18
18
20
17
14
11
18
17
17
21
16
20
26
13
22
12
14
15
```

```
14
17
21
17
17
18
16
16
15
13
19
12
14
21
16
16
25
23
14
11
18
10
13
14
18
22
13
17
19
15
10
19
17
17
22
15
11
11
17
20
10
19
13
23
18
19
18
13
13
16
21
17
18
19
16
16
18
18
10
13
```

```
9
22
26
17
24
12
17
11
16
16
16
12
13
23
22
16
19
14
22
11
23
16
22
22
17
12
11
16
15
13
19
19
22
20
18
14
20
12
16
19
16
12
14
20
16
18
13
12
19
5
15
16
7
10
6
10
16
6
7
16
```

```
13
5
7
12
8
11
9
8
10
5
9
8
6
7
5
3
4
4
7
3
2
5
3
7
7
5
7
5
4
6
4
5
3
2
6
2
2
6
6
6
2
4
1
5
7
3
5
4
7
2
4
1
2
5
1
3
0
3
4
3
```

```
6
4
2
1
0
4
0
1
5
2
9
3
5
2
2
6
1
1
1
0
3
2
2
5
0
0
4
3
2
2
2
3
5
3
4
3
4
5
7
7
3
7
2
5
13
15
12
17
23
31
15
18
28
27
30
44
42
52
47
54
```

```
48
56
64
83
88
114
98
91
94
109
106
109
127
129
145
146
132
136
134
147
129
151
131
154
135
140
128
120
138
112
93
94
98
98
91
69
73
60
68
42
49
51
37
41
37
24
21
13
15
16
11
12
9
14
10
6
8
7
3
1
```

```
1
1
1
0
0
1
0
0
1
2
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
1
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
2
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
1
0
0
1
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
```

```
0
0
1
0
0
1
0
0
1
0
0
0
0
0
0
1
2
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
1
0
1
1
0
1
0
0
0
2
1
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
2
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
1
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
1
1
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
1
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
```

```
2
0
1
0
0
0
1
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
```

Listing 9: 第二次实验 ^{133}Ba 数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=28,
Threshold=2,
Real=  100.00,
Live=   99.92
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
55
48
39
45
30
21
21
16
16
19
26
28
25
19
31
30
29
27
25
27
30
69
```

```
72
68
87
92
96
82
45
25
19
7
9
10
9
9
7
10
11
17
20
19
13
16
17
18
18
9
10
12
12
6
6
14
1
6
9
8
5
11
8
3
7
7
5
8
9
7
3
10
4
3
6
9
3
5
4
10
10
7
2
5
```

```
5
2
6
6
3
6
9
7
2
6
2
6
4
7
4
3
7
5
2
3
5
1
0
4
3
3
4
6
2
0
4
4
11
1
2
1
3
5
2
3
1
5
2
3
2
2
0
5
6
2
3
7
5
9
3
8
9
9
12
4
```

```
14
7
8
8
12
14
7
10
14
11
14
12
12
16
14
24
21
15
18
15
18
18
22
13
15
11
9
7
7
8
15
6
8
12
10
12
9
14
16
22
28
30
30
31
35
33
33
27
40
37
38
38
28
41
36
38
39
34
42
33
```

```
29
27
25
32
29
18
28
20
17
18
25
21
15
25
16
12
16
19
23
19
11
15
14
11
11
13
11
6
8
3
9
3
7
9
6
1
5
7
6
4
8
2
5
6
7
3
9
9
6
7
9
4
3
6
5
8
6
3
5
7
```

```
6
5
2
9
2
6
2
5
0
4
1
2
1
3
3
2
4
5
2
0
1
1
2
2
2
1
1
0
1
1
2
0
2
1
1
1
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
```

```
1
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
1
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
1
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

```
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
0
```

Listing 10: 第四次实验 ^{40}K 数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=0,
Threshold=0,
Real=  600.00,
Live=  599.81
0
0
0
11
10
10
12
17
14
15
8
11
3
14
11
19
31
22
31
36
47
39
45
46
44
51
39
41
42
46
```

```
42
58
48
40
63
45
57
44
46
47
36
43
39
29
29
31
34
44
28
31
28
29
31
29
32
23
20
34
31
26
34
26
32
22
23
19
18
24
32
24
16
29
27
23
27
32
12
30
17
20
19
17
20
25
16
27
27
14
25
18
```

```
29
23
21
30
22
18
19
21
22
18
21
19
18
20
18
27
25
19
24
28
21
13
23
26
25
21
28
22
24
20
15
17
21
22
19
21
25
26
21
13
18
21
14
19
15
20
21
29
20
23
22
21
15
25
12
18
25
20
14
16
```

```
15
15
13
21
21
20
18
20
10
12
24
20
16
13
10
14
12
14
16
16
19
16
14
15
9
17
16
19
13
17
10
9
13
13
19
4
11
19
15
7
14
15
12
17
17
7
13
13
8
20
15
10
14
15
6
10
13
12
10
11
```

```
12
11
13
7
17
9
12
8
13
10
14
12
7
9
13
15
15
9
7
13
14
12
9
10
7
11
15
11
11
7
15
7
8
11
13
9
13
9
15
14
15
11
9
8
6
12
8
9
10
11
8
9
7
10
6
12
19
14
6
11
```

```
9
11
9
12
7
8
11
10
14
13
8
8
6
7
5
8
15
6
7
11
5
8
5
9
13
6
8
12
10
6
8
7
9
11
10
17
11
10
7
6
10
4
16
7
7
11
8
10
12
10
3
19
10
6
8
12
11
10
4
7
```

```
12
12
7
10
6
7
10
9
15
16
6
5
4
9
5
6
5
7
8
11
12
4
9
9
3
9
8
8
9
13
10
4
8
10
6
6
11
10
9
4
11
9
4
10
6
4
5
5
4
5
10
6
4
7
4
9
9
3
8
9
```

```
9
6
10
10
8
11
7
6
7
7
4
7
7
7
4
5
3
3
5
8
11
7
8
2
9
5
10
5
12
8
3
5
9
11
5
7
7
5
8
5
6
5
14
5
2
4
4
5
5
5
6
11
7
8
3
5
8
9
6
8
```

```
2
5
6
5
8
3
12
3
9
10
3
5
7
10
3
5
9
2
10
9
6
4
4
7
9
11
8
5
6
6
5
9
6
7
7
6
5
3
7
7
9
3
8
6
2
2
4
4
2
6
4
8
7
6
16
5
8
4
5
6
```

```
4
10
6
4
4
9
7
6
3
4
5
2
7
2
11
5
1
8
4
11
5
3
5
12
3
6
2
10
10
8
8
9
7
6
13
5
7
5
5
4
7
5
7
5
10
3
4
5
5
4
4
5
8
5
3
7
0
6
2
7
```

```
6
6
4
2
6
2
7
7
3
4
7
8
4
3
5
2
6
4
9
5
6
8
8
1
7
4
7
10
5
5
6
3
8
8
5
4
8
2
4
4
5
3
5
3
2
5
8
7
4
5
9
5
1
4
8
5
5
4
7
4
```

```
4
7
3
9
8
5
7
4
6
8
2
7
3
6
5
2
3
5
4
7
3
5
6
3
2
6
2
3
5
4
5
5
6
5
3
5
7
8
7
12
8
3
3
5
3
6
6
5
8
6
5
2
6
6
3
5
5
4
3
7
```

```
4
7
4
7
4
7
2
5
4
6
7
6
4
5
9
3
7
4
2
4
10
7
3
5
6
5
4
8
1
3
8
6
4
5
7
6
6
3
4
5
6
4
2
4
5
0
8
3
3
8
9
5
5
4
9
5
6
7
4
0
```

```
6
7
6
10
2
10
2
5
3
5
6
6
7
4
6
2
3
7
7
4
2
5
6
3
4
5
7
6
6
3
3
6
4
5
11
4
2
4
3
3
1
4
5
6
4
2
5
10
3
5
9
6
8
7
6
3
2
3
7
9
```

```
5
5
10
3
5
6
4
6
3
5
4
5
5
2
5
7
2
6
3
2
4
5
5
3
2
4
4
2
2
3
1
7
6
6
5
1
3
7
5
5
0
3
3
6
5
1
3
8
3
6
5
4
7
5
2
2
4
6
6
4
```

```
2
0
3
2
1
2
4
3
3
3
5
4
2
5
1
0
3
4
4
7
5
1
3
6
7
1
3
3
1
0
2
4
2
2
2
4
2
1
5
3
2
2
2
3
3
2
1
1
1
1
5
3
8
4
3
3
1
2
1
1
```

```
2
4
2
2
1
6
5
2
2
3
4
2
1
5
1
6
1
4
4
0
0
2
6
2
2
4
1
8
4
1
2
2
5
5
4
9
8
2
3
3
7
3
6
3
6
9
5
4
2
7
13
6
6
8
12
11
10
6
12
5
```

```
14
16
7
11
6
13
11
20
10
9
12
14
13
18
17
11
11
11
13
18
4
13
14
10
13
12
13
11
6
5
4
3
4
0
```

Listing 11: 第四次实验 ^{226}Ra 数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=0,
Threshold=0,
Real=  600.00,
Live=  599.30
0
0
2
38
623
476
82
80
87
88
82
117
163
226
271
299
288
```

```
303
246
255
210
188
186
205
206
207
213
219
224
225
249
287
248
263
298
252
270
248
198
224
214
164
167
138
132
109
98
103
82
73
82
76
72
91
78
74
77
97
84
89
81
77
83
85
76
83
73
71
72
79
75
91
88
66
98
79
104
```

```
80
71
75
81
100
86
90
95
75
70
99
81
77
89
83
83
86
96
97
87
83
69
105
102
84
78
105
79
87
95
88
76
80
85
73
86
81
92
84
88
70
68
65
73
66
64
61
69
74
72
71
85
78
59
67
86
86
67
88
80
```

```
78
78
89
95
90
82
90
85
83
86
64
88
82
70
64
73
71
60
60
63
67
60
60
69
73
62
65
67
62
70
69
79
66
92
93
96
102
92
95
98
102
94
99
77
88
61
81
89
86
93
72
80
82
80
59
76
67
68
63
53
```

```
66
43
56
68
57
64
65
62
59
77
82
98
82
112
93
98
108
112
118
115
127
96
120
132
126
127
120
105
115
110
78
93
76
90
75
68
70
59
55
45
48
41
53
33
37
42
35
39
22
35
25
28
21
32
24
16
24
30
26
30
```

```
23
19
24
23
11
19
22
22
25
20
22
21
24
22
21
24
20
19
22
24
18
16
29
16
16
28
20
13
14
24
20
19
24
21
16
12
19
20
17
14
13
8
10
18
19
25
22
18
12
27
20
17
18
22
21
18
25
15
13
21
```

```
19
19
20
13
21
24
20
22
14
19
15
18
20
12
28
20
25
21
17
12
14
19
19
8
20
20
13
14
12
16
13
18
18
19
12
12
14
21
12
15
13
12
19
11
13
15
16
15
17
18
23
13
23
16
24
19
18
12
21
30
```

```
40
19
36
32
36
28
36
28
26
31
38
44
53
54
38
54
40
57
48
49
54
48
53
63
48
65
62
56
72
67
58
51
56
48
57
48
48
43
44
28
43
31
44
36
31
32
26
33
20
21
18
22
20
14
18
22
22
11
14
14
```

```
17
15
19
13
19
10
13
14
12
13
13
10
16
11
17
13
14
12
12
10
13
5
10
11
13
9
18
15
9
11
2
14
9
9
7
12
4
8
10
8
18
11
9
12
9
8
12
10
18
19
10
13
11
13
9
8
10
12
9
14
```

```
17
8
10
10
10
14
12
13
17
7
16
17
5
16
9
14
13
19
18
9
16
9
14
12
19
14
13
12
17
9
14
13
12
14
11
10
11
15
11
14
12
12
11
12
10
12
9
11
10
12
14
13
15
9
4
12
8
11
7
12
```

```
8
13
9
7
19
14
6
11
15
11
11
9
8
8
9
11
8
6
12
10
5
10
7
11
13
9
8
9
4
9
6
5
10
3
3
8
9
3
14
5
11
10
7
10
11
2
9
10
7
5
9
11
10
3
15
9
9
9
11
13
```

```
6
9
7
9
8
10
8
11
10
6
10
10
10
11
5
11
8
9
10
5
9
10
8
11
10
6
8
8
10
8
10
16
3
6
8
11
12
6
8
6
5
7
9
4
4
13
11
9
6
7
4
7
9
2
8
5
2
8
5
3
```

```
3
5
6
5
10
6
6
5
8
5
9
6
7
12
7
10
11
10
7
4
7
7
6
13
7
6
6
7
8
8
6
5
3
11
2
8
10
5
7
4
5
6
13
6
5
13
6
7
12
5
8
8
11
8
8
11
6
12
3
11
```

```
13
15
6
14
11
7
12
14
17
6
9
12
13
11
11
13
12
18
9
17
13
15
9
18
16
12
8
13
7
16
10
15
18
16
12
12
17
9
17
10
10
15
9
12
14
12
13
21
15
12
15
10
12
6
13
8
13
8
14
3
```

```
3
7
10
6
10
6
7
12
6
6
7
8
12
6
3
4
6
8
7
9
9
9
7
11
7
6
3
5
10
9
5
9
7
6
11
6
5
9
5
5
9
10
8
5
9
5
5
6
6
11
12
4
6
9
7
7
8
10
6
10
```

```
7
4
5
4
10
3
9
5
5
7
6
6
5
10
4
7
9
5
9
5
4
5
1
5
9
10
4
9
4
9
3
5
4
8
8
3
4
8
7
7
6
5
5
6
5
4
9
5
4
4
9
10
4
3
4
9
5
4
5
11
```

```
7
6
3
4
5
10
5
10
8
8
4
7
4
7
7
4
4
7
3
4
6
6
6
8
8
4
14
9
5
4
10
11
8
6
4
7
11
9
5
8
5
5
6
11
13
6
0
9
8
5
14
11
6
9
8
7
11
7
9
12
```

```
12
7
7
14
10
6
14
8
11
2
4
6
7
6
5
7
7
6
6
3
4
7
6
5
4
5
8
3
9
4
4
3
6
7
5
10
4
3
3
4
2
2
2
1
1
0
1
```

Listing 12: 第四次实验 ^{232}Th 数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=0,
Threshold=0,
Real=  600.00,
Live=  598.31
0
3
8
1028
```

```
915
1344
2225
2964
4625
4084
641
696
948
1171
1534
1846
2298
2419
2771
2726
2630
2286
2074
1793
1540
1340
1195
1073
1024
935
874
765
816
737
725
638
703
602
568
531
543
493
460
413
452
416
368
340
323
307
269
280
277
262
241
220
242
216
211
208
200
189
170
173
```

```
180
194
176
134
181
129
152
143
140
137
113
95
113
111
118
114
103
95
105
117
68
98
100
88
80
92
68
75
77
68
77
80
76
83
77
59
62
66
64
65
67
71
79
67
51
87
70
69
70
73
52
64
75
78
92
72
81
74
77
91
```

```
87
82
100
104
101
106
111
128
125
118
135
145
130
137
137
123
151
145
147
111
106
130
118
92
99
87
96
74
71
69
71
61
65
56
56
49
38
51
53
36
40
27
45
44
39
41
39
39
39
35
34
27
38
43
42
38
28
39
35
48
```

```
45
40
42
30
32
37
38
44
34
26
40
42
34
42
47
41
36
62
45
45
54
56
47
33
35
35
59
47
41
43
41
44
33
39
42
32
45
39
26
30
22
19
18
22
22
25
26
19
26
26
16
12
19
23
25
14
19
19
24
21
```

```
23
19
19
15
23
24
17
15
21
25
9
21
11
26
18
22
15
19
18
26
19
17
18
15
11
19
22
18
16
26
17
24
11
22
21
18
22
16
16
20
12
17
18
18
22
22
23
14
14
24
25
20
18
19
21
17
19
15
15
22
```

```
12
17
17
22
13
20
18
15
25
16
17
22
20
25
23
14
20
17
24
19
13
15
19
28
19
27
26
27
17
10
19
23
23
24
11
15
16
21
20
20
15
24
17
15
27
20
16
17
16
15
8
18
14
17
17
14
18
27
20
20
```

```
23
16
21
27
20
27
24
24
22
27
28
24
23
22
39
37
30
27
34
33
32
22
28
25
33
28
35
27
32
23
22
27
11
19
23
19
22
20
16
20
8
26
15
16
11
20
13
20
21
14
9
9
11
19
14
6
6
7
11
9
```

```
13
10
8
3
10
10
7
12
8
9
12
11
15
11
7
11
15
11
17
9
12
13
9
12
7
9
15
17
7
4
8
6
9
11
13
6
8
9
13
14
8
14
9
8
10
17
10
7
15
9
11
13
12
15
10
11
16
17
10
16
```

```
7
19
16
10
14
10
3
7
6
12
13
12
12
8
14
12
13
5
7
11
15
8
11
9
10
12
13
11
5
7
8
13
9
10
8
16
8
11
12
8
10
12
18
9
14
5
11
8
7
8
13
4
12
16
9
10
9
9
11
13
```

```
4
7
6
9
12
6
6
4
8
15
13
6
5
8
10
9
12
8
8
8
4
10
14
11
11
8
7
11
9
6
10
5
8
7
8
12
8
8
4
11
10
13
8
10
8
6
6
5
16
15
6
6
10
9
10
11
12
13
13
16
```

```
17
11
9
14
11
14
16
14
10
12
16
16
19
18
15
10
18
18
11
15
14
15
15
24
19
22
16
9
11
11
14
17
10
13
12
21
16
17
8
13
9
17
15
15
14
16
11
9
17
14
16
11
13
13
12
15
11
16
14
16
```

```
15
15
8
8
18
9
7
6
7
10
12
10
14
7
9
4
8
6
5
8
8
10
7
11
1
4
4
9
6
4
5
4
3
9
8
8
9
5
6
5
6
1
3
8
3
6
3
5
4
5
2
7
9
2
3
6
3
5
4
3
```

```
4
5
5
2
10
2
4
8
9
6
10
6
4
9
4
7
6
3
3
4
2
4
4
5
6
8
3
4
7
4
6
1
6
9
8
7
5
2
4
1
6
5
4
5
4
2
6
6
6
6
2
6
5
9
2
4
5
5
8
3
```

```
1
4
3
4
5
5
10
5
3
3
4
2
4
4
5
1
9
2
3
4
3
4
3
1
4
3
4
4
5
7
2
5
6
3
3
11
2
4
2
5
4
5
4
4
6
5
9
2
3
5
3
2
2
7
7
3
0
5
4
4
```

```
0
2
7
1
6
4
3
4
1
5
3
2
1
3
2
5
5
5
3
4
1
2
1
1
0
2
1
2
6
3
5
6
1
3
1
0
7
2
1
11
4
4
3
1
3
3
2
3
6
8
5
5
2
0
3
3
5
3
2
4
```

```
5
3
4
4
3
5
3
2
1
3
6
0
2
3
3
3
2
0
1
1
5
2
1
3
0
3
0
2
2
1
5
5
2
0
3
3
1
3
5
5
6
2
2
2
5
0
4
3
1
3
1
0
5
5
3
5
3
4
2
5
```

```
3
4
2
1
3
4
3
4
3
1
3
2
3
4
2
4
5
3
0
5
2
2
5
4
1
3
4
5
6
1
4
8
4
4
4
3
7
1
6
6
9
3
5
6
5
3
5
4
3
6
7
4
2
3
4
2
2
1
0
0
```

Listing 13: 第四次实验 ^{238}U 本底数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=0,
Threshold=0,
Real=  600.00,
Live=  599.83
0
0
0
8
6
11
52
184
17
16
8
15
21
26
41
44
63
61
70
75
69
66
67
62
64
73
59
51
50
72
63
58
62
55
70
50
58
59
47
49
59
61
50
47
37
50
37
42
42
30
```

```
34
46
31
30
38
24
27
20
32
25
21
27
26
21
27
22
17
24
18
29
21
24
13
14
21
27
20
16
17
21
24
18
30
24
21
12
24
24
11
20
16
17
12
19
18
16
23
16
27
30
18
19
19
11
20
22
16
17
22
14
```

```
14
15
19
14
15
10
17
29
16
19
11
16
13
18
18
15
15
15
20
18
24
18
13
15
18
17
18
21
23
21
11
13
15
16
16
23
13
20
10
12
15
18
19
12
15
9
13
17
14
14
13
15
16
18
22
17
12
14
13
13
```

```
13
11
14
15
11
11
6
14
17
12
19
11
9
14
4
13
9
9
16
11
9
8
15
5
12
7
8
10
12
12
10
6
13
11
14
12
5
8
11
6
10
8
6
11
7
8
12
12
9
7
13
6
7
12
10
12
7
9
10
13
```

```
9
9
5
7
7
11
6
10
5
10
6
10
6
6
9
7
11
6
7
9
8
9
7
6
6
6
13
6
5
9
5
4
9
12
7
13
5
7
7
8
8
6
4
5
8
9
11
6
4
8
6
9
7
4
10
8
7
6
6
8
```

```
7
7
8
5
9
11
10
3
4
7
13
8
4
5
6
6
4
9
6
11
10
7
8
12
8
7
5
7
8
11
11
12
11
7
3
5
8
8
8
8
7
7
4
5
8
5
6
6
4
10
5
7
8
7
5
6
10
4
7
6
```

```
7
4
2
6
8
7
7
6
5
5
7
8
4
5
4
9
7
3
8
9
6
2
7
3
5
7
6
7
5
4
3
4
6
5
7
9
8
8
6
8
4
5
6
5
6
10
7
6
4
9
0
3
1
8
7
1
7
2
5
7
```

```
6
8
4
10
7
5
5
6
7
5
3
3
8
11
3
5
8
2
10
8
4
4
6
6
8
2
3
3
3
3
4
6
5
5
3
7
4
4
2
5
0
5
3
4
5
2
3
5
7
3
1
6
6
5
6
4
0
6
8
8
```

```
3
4
10
3
4
9
6
1
4
3
4
5
5
4
4
7
4
2
3
2
4
3
3
5
3
3
5
3
6
4
3
6
7
6
6
7
7
3
1
7
7
3
5
8
2
3
5
1
6
2
7
4
3
6
2
3
4
3
3
2
```

```
2
7
3
2
1
3
1
7
6
5
4
2
3
5
2
3
1
4
4
2
3
2
5
3
7
5
5
7
5
7
4
5
2
5
4
4
1
3
4
2
6
2
1
3
5
3
2
4
2
2
6
7
4
2
3
2
2
6
7
6
```

```
1
1
2
1
4
1
4
5
1
5
5
4
5
4
3
6
2
2
3
1
4
2
4
5
4
3
3
4
3
4
4
3
1
5
5
3
3
1
3
5
4
6
3
3
2
1
2
2
2
3
7
2
4
2
4
2
1
2
2
2
```

```
6
5
4
3
2
1
3
4
5
2
3
3
2
3
4
3
4
2
2
2
4
3
1
2
4
5
1
3
5
5
2
2
3
3
0
6
3
5
1
2
1
0
2
2
1
4
4
4
2
3
4
4
2
4
2
6
1
3
4
5
```

```
2
4
2
5
3
4
2
2
4
1
2
3
2
3
3
4
2
3
2
2
5
3
0
3
3
4
9
5
4
3
2
4
2
3
3
5
3
3
5
1
3
3
1
1
3
0
6
2
2
4
4
6
3
2
4
5
2
2
1
4
```

```
2
3
3
8
2
4
2
5
3
2
3
1
1
2
0
0
4
1
3
5
4
4
1
2
4
3
5
3
6
2
4
4
4
2
2
3
4
4
1
1
3
1
2
5
2
4
3
2
4
1
1
3
6
1
4
2
2
0
7
2
```

```
1
5
4
0
3
2
2
2
2
2
1
3
2
4
3
2
1
0
0
1
1
6
5
2
2
3
2
0
5
1
2
3
3
3
2
5
0
2
2
1
4
1
2
2
1
1
3
2
1
4
1
4
1
2
2
3
0
1
4
0
```

```
2
1
3
1
2
3
2
1
3
1
3
0
4
4
4
2
2
3
0
1
2
0
1
5
0
3
2
0
3
2
0
0
2
0
1
2
2
1
2
1
1
1
2
5
4
0
1
1
3
3
1
1
5
1
4
0
0
1
2
2
```

```
3
2
2
5
1
4
0
0
4
2
4
5
2
2
4
3
1
2
2
1
2
1
3
4
4
4
3
3
2
7
4
2
1
2
2
4
4
0
2
2
3
2
1
1
2
6
2
3
2
4
2
1
0
4
3
3
4
3
5
2
```

```
3
6
3
2
3
3
5
2
0
2
1
2
0
0
```

Listing 14: 第四次实验样品数据

```
ADC Setup=1024,
Gain=0,
Threshold=0,
Real=  600.00,
Live=  599.83
0
0
0
7
10
121
51
13
25
11
6
19
27
22
31
26
32
31
41
28
46
40
40
39
63
49
44
38
42
42
61
47
57
46
56
41
47
```

```
52
33
40
44
41
35
37
45
30
39
31
30
34
38
30
24
37
29
23
27
18
25
22
26
22
22
26
19
26
37
13
23
15
17
10
21
37
19
18
20
22
15
26
17
24
25
26
17
17
18
16
14
17
18
26
12
18
22
17
28
```

```
23
18
24
13
16
21
26
11
19
17
25
17
25
17
16
19
15
16
18
19
35
17
18
16
23
12
17
27
19
15
20
17
27
20
24
21
17
20
26
19
24
17
25
28
22
17
18
11
22
13
24
15
21
21
10
16
19
10
17
23
```

```
12
9
12
14
15
18
16
13
23
11
20
16
16
9
10
12
13
17
9
23
11
17
9
10
21
26
18
12
15
25
11
9
11
16
9
10
8
20
13
21
19
11
15
13
9
10
14
12
14
13
10
12
16
12
13
11
8
13
12
15
```

```
14
14
16
18
5
13
15
14
18
13
15
18
9
12
10
11
12
13
7
15
10
10
5
4
7
4
10
9
4
9
12
7
14
7
10
5
8
9
9
11
20
10
9
9
8
9
5
8
12
6
6
14
7
10
6
7
8
12
8
8
```

```
10
12
6
2
3
9
6
6
8
5
7
11
11
8
14
5
5
6
1
12
13
3
7
12
11
4
9
5
7
6
9
8
5
8
12
5
5
9
6
8
5
2
6
4
8
9
6
6
8
13
5
6
8
8
6
6
9
8
4
14
```

```
6
7
5
6
9
11
8
9
6
15
5
5
6
10
6
8
12
6
8
8
9
5
5
12
5
12
4
6
4
6
8
8
3
7
7
7
6
4
11
10
1
7
5
7
6
6
7
9
14
5
6
10
9
6
5
9
7
6
6
8
```

```
6
6
13
6
8
6
5
8
6
3
10
9
7
8
4
5
6
7
9
7
4
8
13
8
7
5
6
6
4
7
5
3
5
6
3
10
5
7
10
4
4
3
2
4
10
4
1
3
5
5
3
3
8
6
4
2
6
3
5
8
```

```
7
2
4
8
1
6
10
4
8
6
3
9
8
7
10
4
2
5
7
7
7
1
3
4
2
4
1
10
1
6
6
3
3
5
3
4
5
4
3
2
9
5
2
4
5
8
6
4
6
5
5
3
3
5
3
7
4
3
2
4
```

```
3
3
4
7
5
6
1
6
6
4
6
6
6
7
5
3
3
6
3
5
2
6
2
4
4
0
4
6
5
5
9
6
2
6
5
5
3
3
3
4
5
6
6
1
3
3
4
5
4
3
8
3
2
3
3
4
5
6
2
8
```

```
4
3
1
4
5
6
2
1
3
5
5
3
2
2
2
3
4
5
8
4
3
9
2
6
6
4
5
3
4
6
7
2
2
6
9
4
4
6
4
6
6
7
4
6
3
8
6
7
5
3
2
4
3
5
1
2
2
3
2
2
```

```
6
6
2
5
5
1
4
3
8
2
4
3
3
7
9
4
7
2
3
2
2
2
3
5
3
4
4
2
8
4
6
3
2
3
5
1
1
1
3
2
5
6
3
4
6
4
0
2
1
1
1
3
7
2
1
2
1
6
4
3
```

```
4
5
4
2
8
2
2
6
6
6
5
4
4
4
3
2
4
4
0
3
2
6
3
4
4
8
6
5
4
3
3
6
7
3
3
5
6
3
8
4
2
1
4
1
3
7
6
2
1
4
4
3
4
3
5
4
7
3
1
4
```

```
5
2
3
7
4
2
5
2
6
4
5
5
4
3
2
3
0
5
4
7
2
3
4
2
2
1
4
2
5
5
2
4
4
2
1
0
2
3
5
3
6
4
3
3
2
4
0
3
1
0
2
1
3
3
3
1
5
3
5
3
```

```
4
5
3
2
1
3
2
4
1
7
0
2
8
2
4
2
2
5
4
4
2
5
1
2
3
4
1
5
4
2
1
3
0
3
2
3
4
1
4
2
2
3
5
2
2
2
1
1
2
1
2
3
3
1
3
4
2
6
2
4
```

```
0
1
2
2
1
3
1
1
5
4
2
2
1
4
1
1
1
1
0
1
2
1
2
1
2
3
1
5
2
4
6
1
2
4
1
1
3
4
0
1
2
1
2
4
2
1
1
2
3
2
1
1
0
5
2
2
2
1
3
0
```

```
3
3
4
3
1
2
2
5
1
1
2
2
2
1
1
2
2
1
1
2
3
2
1
4
3
2
2
1
5
6
3
4
4
3
6
0
1
3
2
1
3
3
3
0
4
2
4
5
5
3
5
2
3
6
4
5
1
4
10
5
```

```
4
1
5
2
9
5
7
6
3
5
4
2
4
5
3
4
4
5
4
2
4
3
4
2
0
0
0
```