

華東理工大學
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

《大学物理实验》 实验报告

班 级： 计 203
学 号： 20002462
姓 名： 刘子言
指导教师： 倪一

信息科学与工程学院

2022 年 3 月

实验名称： γ 射线能谱测量及其在材料改性中的应用

姓名：刘子言 学号：20002462 实验班：G13 组号：15 教师：倪一

一、实验目的与要求

- 1、测量 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的 γ 能谱，并进行能量刻度和能量重建。
- 2、画出以能量为横坐标的 ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的 γ 能谱图。指出 γ 能谱的特征结构。
- 3、测量辐照后宝石的 γ 能谱；在同样测量条件下测量环境的 γ 能谱。比较两者，并据此判断辐照宝石同环境相比有无明显放射性。

二、实验原理

1、基本概念

- (1) 放射性：也称核辐射，是指不稳定原子核发射粒子的现象。常见的辐射类型包括 α 、 β 、 γ 辐射。
- (2) γ 射线：是一种电磁辐射，通常产生于原子核的衰变、核反应、闪电等。在宇宙中，中子星、脉冲星、超新星爆发、黑洞附近以及活动星系核等也可以产生 γ 射线。 γ 射线具有很强的穿透能力，在超过一定照射剂量时，是一种具有危险性的辐射。
- (3) γ 射线与物质的相互作用包括：
 - 光电效应（主导能区： $<50\text{KeV}$ ）
 - 康普顿散射（主导能区： $100\text{KeV}\sim 10\text{MeV}$ ）
 - 电子对效应（主导能区： $>5\text{MeV}$ ）
- (4) γ 放射源的能谱：是放射源发射的粒子在不同能量上的计数的统计。
 - 能谱的测量：确定每个粒子的能量；统计每个能量上的粒子数目。
- (5) 放射源发射的 γ 光子是单能的，常见的 γ 放射源有：
 - ^{137}Cs ： γ 光子的主要能量为 0.662MeV
 - ^{60}Co ： γ 光子的主要能量位 1.173MeV ， 1.332MeV
- (6) 能谱的主要特征：反散射峰、康普顿边、全能峰。
 - 全能峰：放射源的单能 γ 射线能量全部沉积在探测器中的情况概率最大，计数最多，在能谱图上就会对应的形成一个峰。
 - 康普顿边： ^{60}Co 和 ^{137}Cs 的 γ 射线能量在 $100\text{KeV}-10\text{MeV}$ 之间，与探测物质的作用以康普顿散射为主；康普顿散射的反冲电子能量是散射角 θ 的函数，是连续分布的；在散射角等于 0 度时，反冲电子获得最大动能，对应的能量截断结构称为康普顿边。

2、 γ 粒子能量探测原理

- (1) 闪烁体探测器探测原理：
 - 粒子打进闪烁体，使闪烁体分子激发或电离，损失全部或部分能量；
 - 受激原子或分子退激发射可见光范围光子；
 - 光子经过反射层和光导，大部分打到 PMT 光阴极上；
 - PMT 放大光信号形成电流脉冲，经过后级电路成为电压脉冲；
 - PMT 脉冲经过放大后进入多道分析器。
- (2) 光电倍增管原理：

可见光光子在光阴极产生光电效应；打拿极雪崩放大光电子形成电流；最终产生的一个电压脉冲对应一个 γ 光子，其幅度正比于伽马光子的能量，原因如下：

由于：闪烁体产生的光子数 正比于 粒子能量
输出脉冲幅度 正比于 闪烁体产生的光子数
所以：输出脉冲幅度 正比于 粒子能量

(3) 多道分析器：

本质上是一个模-数转换器，本实验中用于测量统计得到的脉冲幅度。

(4) 能量刻度与能量重建：

- ^{60}Co 通过两个全能峰对应的能量和通道数来绘制能量刻度；
- ^{137}Cs 通过坐标原点和一个全能峰对应的能量与通道数来绘制能量刻度。
- 利用刻度的关系画获得能量为横坐标的过程为能量重建，最终得到能谱图（计数-能量）。

3、宝石辐照原理

—— γ 射线材料改性

(1) 宝石的颜色：

- 宝石颜色来源于色心（晶体中对可见光产生选择性吸收的缺陷部位）。
- 辐照可以使晶体的晶格产生缺陷，改变宝石的色心。光照射到有缺陷的晶体时，就会呈现与原来不同的颜色。

(2) 经辐照宝石的安全性：

是否安全，是否有残留放射性，都需要利用 γ 射线的能谱测量来确定。

三、实验仪器

闪烁体探测器，放大器，多道脉冲分析器，高压电源，NIM 机箱，放射源（ ^{60}Co 、 ^{137}Cs 、宝石）、示波器、计算机、导线若干

四、实验操作步骤

本次实验基于虚拟实验室完成。

1、准备工作：

- 首先进入实验室，打开右侧墙壁上的环境监测仪；
- 来到实验台前，检查桌面上已有的设备；
- 前往储物柜，取出闪烁体探测器、放大器、多道脉冲分析器和高压电源，回到实验台前，将闪烁体探测器放置于桌面，将放大器、多道脉冲分析器和高压电源以此放入 NIM 机箱中；
- 正确连接电路，确认无误后再打开机箱开关、示波器开关和计算机开关，将计算机调至测量界面；

2、测量 ^{137}Cs 的 γ 能谱

(1) 取数前：

- 前往放射源保险柜取出放射源 ^{137}Cs ，关好柜门，并在使用卡上登记相关信息；
- 回到实验台，将 ^{137}Cs 放入闪烁体探测器；将高压电源 PV 值调至 900V，并将高压电源开关打开；
- 适当调高放大器的增益倍数，再调节示波器，根据示波器上脉冲的显示情况再来适当调节放大器的增益倍数，使示波器上显示较为清晰的脉冲信号；
- 在计算机测量界面设定正确的通道（CH3），道数（1024），脉冲阈值（50mV）；
- 计算取数时间：已知 γ 射线进入到闪烁体中的事例率为 1665Hz，探测器的总探测效率为 60%，如果要取百万数量级的 γ 事例，取数时间至少设为： $(10^6/1665)/0.6\text{ s}$ ；

(2) 取数时：

- 测量：点击运行按钮（run），若测量图中发现图像较为偏左，则停止测量，适当调大放大器增益倍数，再测量；若偏右而超出坐标轴，则调小增益倍数；等待，完成后将数据保存在电脑上；

(3) 取数后：

- 关闭高压电源开关，再将 ^{137}Cs 取出，放回放射源保险柜，并在使用卡上登记相关信息；
- 回到实验台，打开高压电源开关，保持所有条件不变重复测量操作，测量环境中 γ 射线的能谱，并保存数据，结束后及时关闭高压电源开关。

3、测量 ^{60}Co 的 γ 能谱

- 前往放射源保险柜取出放射源 ^{60}Co ，关好柜门，并在使用卡上登记相关信息；
- 重复测量 ^{137}Cs γ 能谱时的相关步骤，注意每次打开闪烁体探测器时要保证高压电源处于关闭状态；
- 将数据保存在电脑上；并及时归还放射源，做好登记。

4、测量辐照后宝石的 γ 能谱

- 前往储物柜取出宝石，前往辐照室，将宝石放入桶中，送入内室辐照 60 天，再取出。注意辐照过程人员应当离开辐照室，且注意进出一定要关门；
- 将宝石带到实验台，重复测量 ^{137}Cs γ 能谱时的相关步骤，将数据保存在电脑上；注意每次打开闪烁体探测器时要保证高压电源处于关闭状态；再将宝石放回储物柜；
- 再打开高压电源开关，保持所有条件不变重复测量操作，测量环境中 γ 射线的能谱，并保存数据，结束后及时关闭高压电源开关。

5、收尾工作

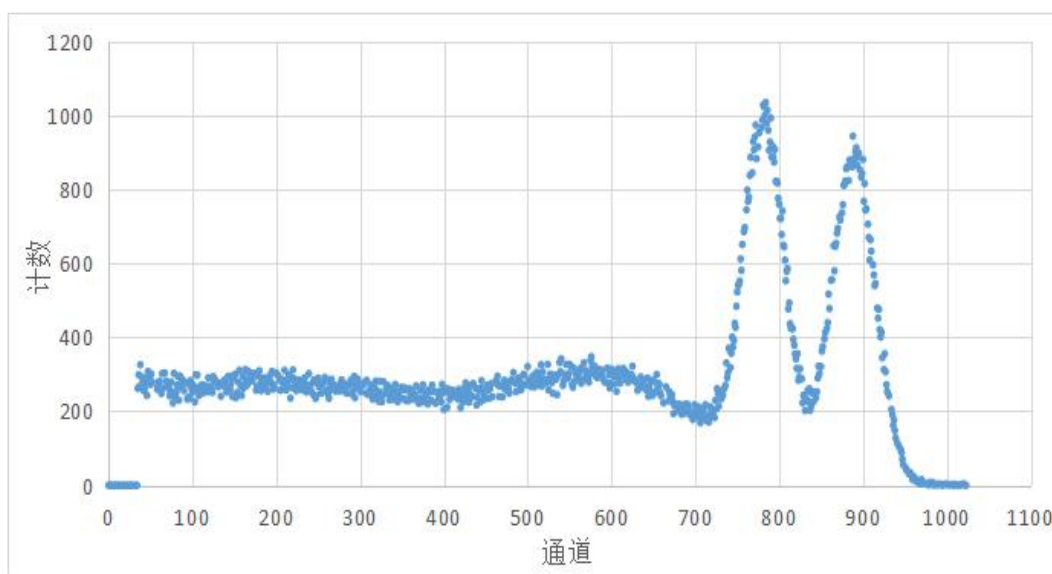
- 将所有电源开关关闭，收回导线和各仪器，放回储物柜中；
- 检查放射源保险柜中的放射源是否归还到位，并将放射源储物间门关闭锁上；
- 检查实验台是否整理完毕，关闭环境监测仪，结束实验。

五、数据记录与处理

1、绘制 ^{60}Co 的 γ 能谱图

- 计数-通道图

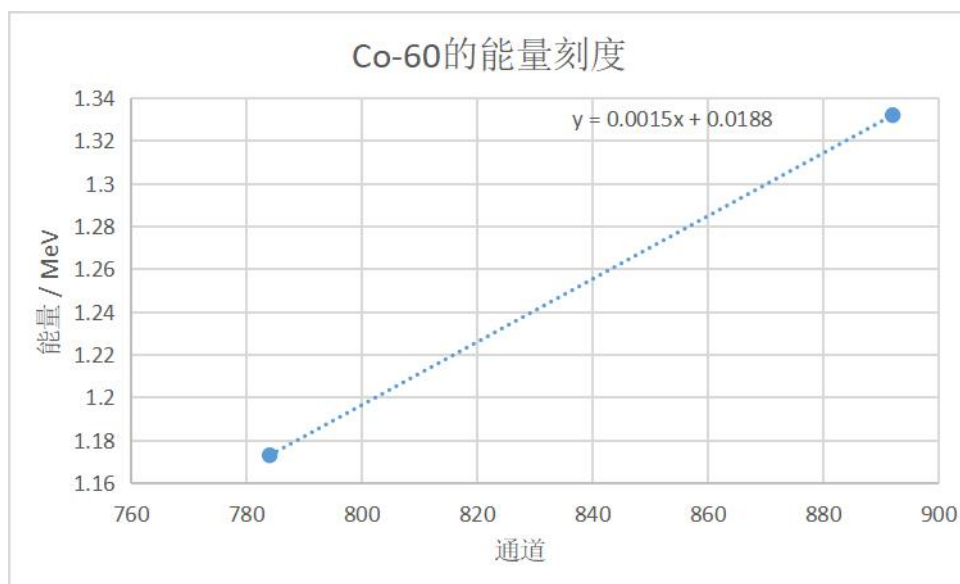
将 ^{60}Co 保存的表格数据绘制成计数-通道图，如图一；



图一 ^{60}Co 计数-通道图

- 能量刻度

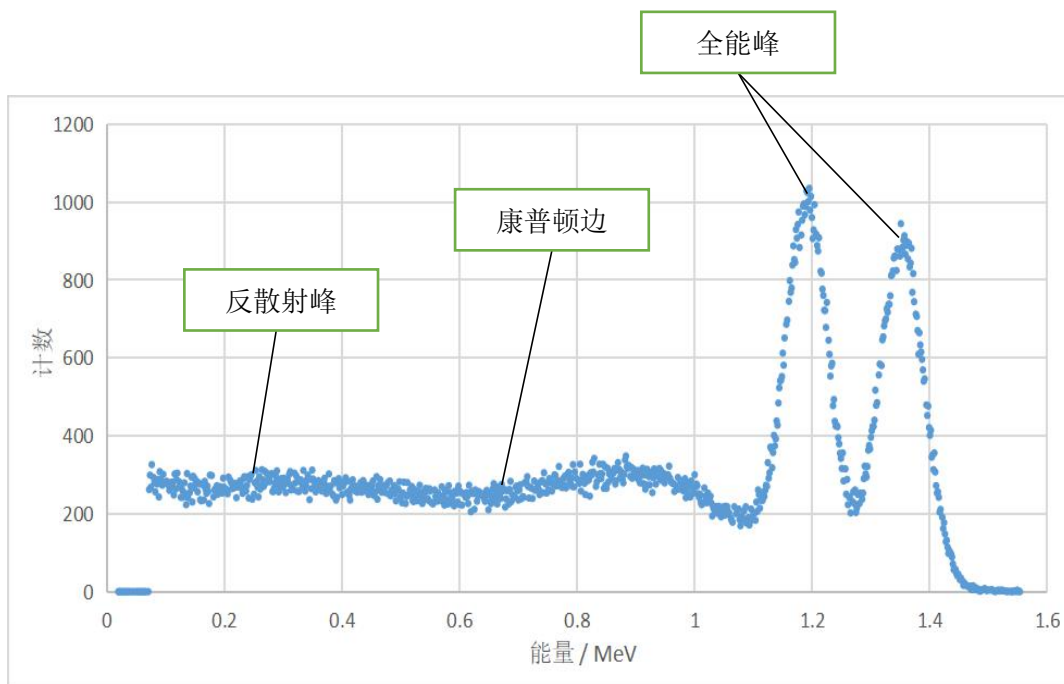
从计数-通道图中读出两个全能峰的能量中心值，通道数分别为 784（对应能量为 1.173MeV）和 892（对应能量为 1.332MeV）；以此绘制 ^{60}Co 的能量刻度，如图二；



图二 ^{60}Co 的能量刻度

- γ 能谱图

在能量刻度图中得到通道-能量的线性关系式，利用公式在表格中计算相应通道对应的能量值，再绘制计数与能量的关系图，即 ^{60}Co 的 γ 能谱图，如图三；

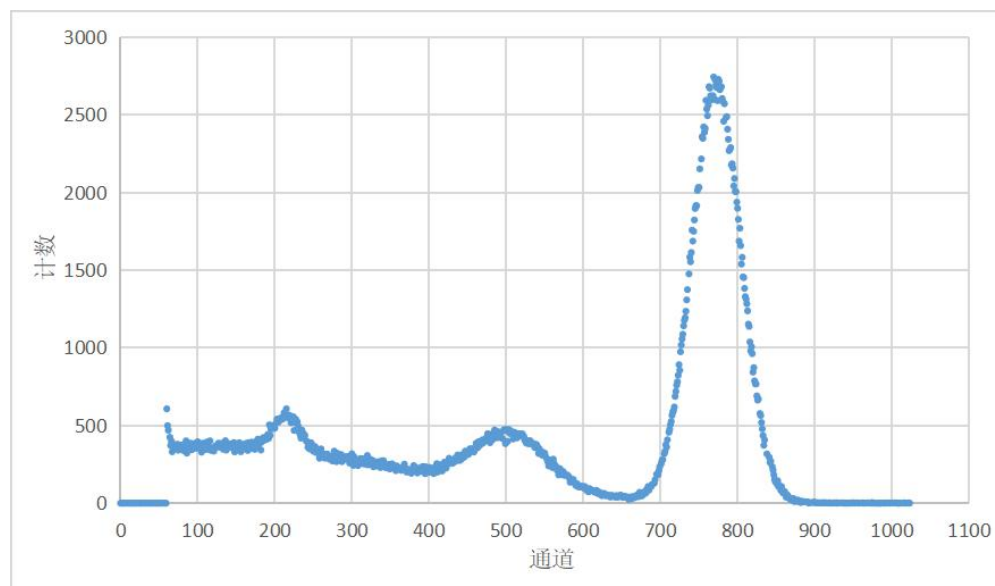


图三 ^{60}Co 的 γ 能谱图

2、绘制 ^{137}Cs 的 γ 能谱图

- 计数-通道图

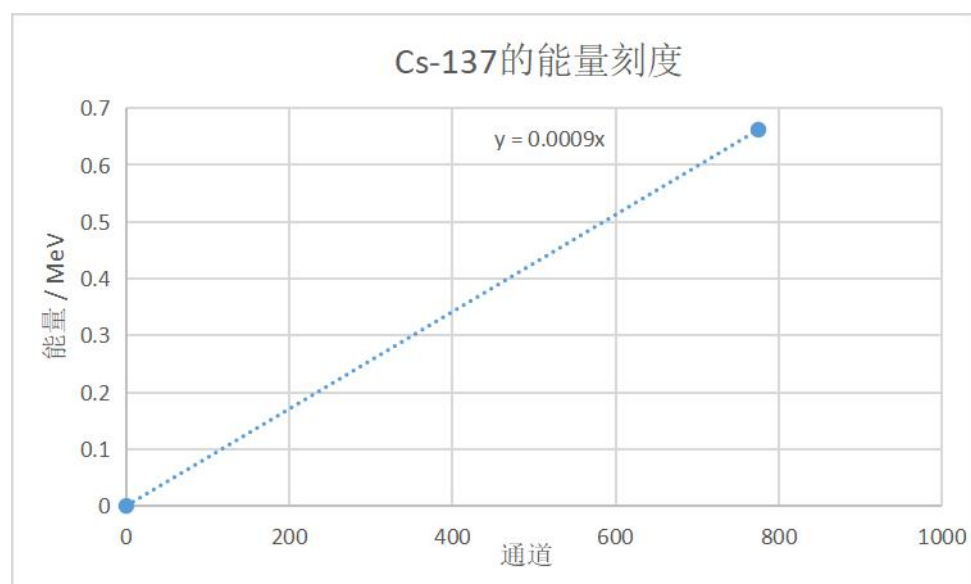
绘制过程与 ^{60}Co 类似，如图四；



图四 ^{137}Cs 计数-通道图

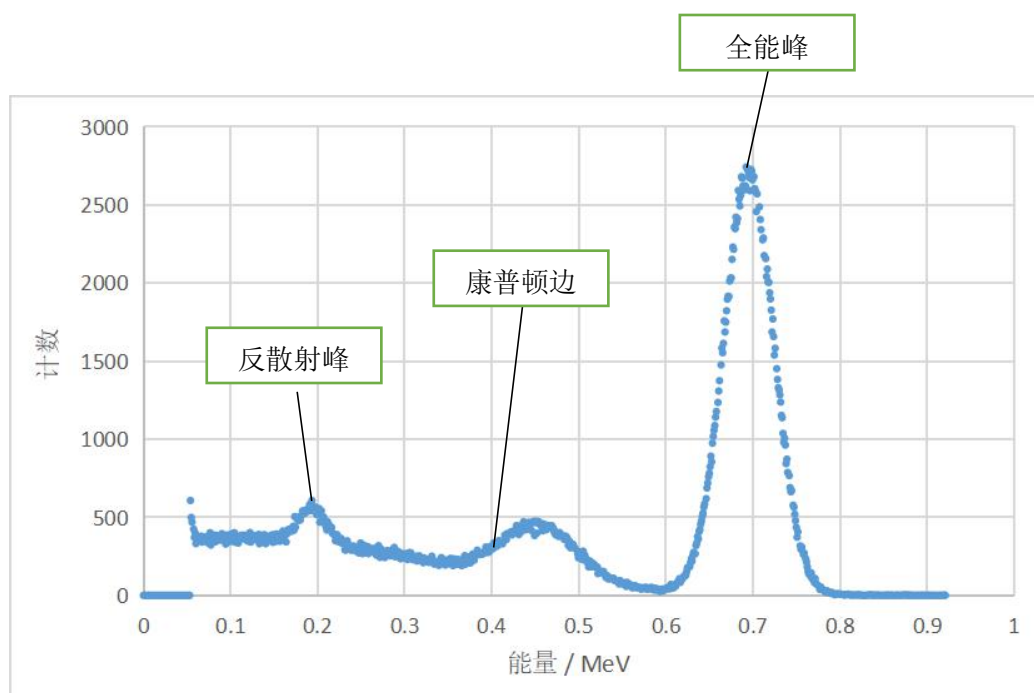
- 能量刻度

绘制能量刻度时，从计数-通道图中读出一个全能峰的能量中心值为 775（对应能量为 0.662MeV），与（0，0）点相连绘制能量刻度，如图五；



图五 ^{137}Cs 的能量刻度

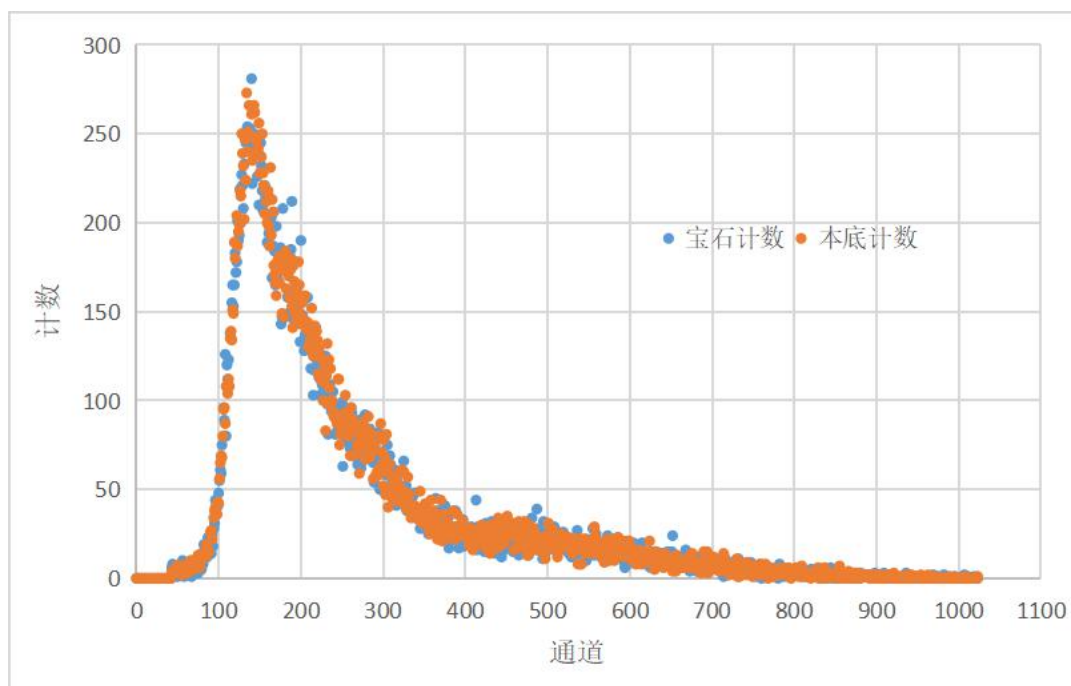
- γ 能谱图
绘制过程与 ^{60}Co 类似，如图六；



图六 ^{137}Cs 的 γ 能谱图

3、辐照后宝石放射性鉴定

- γ 能谱
将环境测量数据与宝石数据放入同一张表格中，绘制 γ 能谱图，如图七；



图七 宝石与环境的 γ 能谱

- 比较放射性

由图像可先大致看出，辐照后宝石的 γ 能谱与环境的 γ 能谱相当。

对计数求总和，下面计算相对偏差：

$$\varepsilon = \frac{|\text{宝石总计数} - \text{环境总计数}|}{\text{环境总计数}} \times 100\% = \frac{|38261 - 38505|}{38505} \times 100\% \approx 0.6\%$$

由此可见，实验中辐照后的宝石与环境相比较基本没有明显的放射性。

六、结果与讨论

1、 ^{60}Co 与 ^{137}Cs 经过能量重建后的 γ 能谱图见图三与图六，图中已标出其特征结构。

2、辐照后的宝石和环境的 γ 能谱图如图七，结合图像，再经过计算，得到宝石与环境总计数的相对偏差为 0.6%，可以得出结论，实验中所辐照的宝石辐照后与环境相比较，基本没有明显的放射性。

七、分析讨论题

1. 请思考以下电子学插件的参数设置会对能谱产生什么影响？在讨论其中一个参数时，请固定其他两个进行讨论。

- ①放大器的放大倍数
- ②多道分析器的总道数
- ③取数的时间

答：分析如下：

- 多道分析器是测量并记录脉冲数目的器件，具有最大量程电压 U 。
- 多道分析器取数时可以选择总道数 n ，例如 512 道，1024 道，2048 道等，每一道所分的电压就是 U_{max}/n 。
- 如果接收的信号脉冲是电压是 U_{signal} ，那么信号到达的道数是 $U_{\text{signal}}/(U_{\text{max}}/n)$ 。
- 如果对信号放大 k 倍，信号的脉冲电压幅度就变成 kU_{signal} ，信号到达的道数就是 $kU_{\text{signal}}/(U_{\text{max}}/n)$ 。
- 多道分析器会累计到达每个通道的信号的个数，取数完毕之后，就给出了信号的计数每个通道的分布，将量程电压等分成 n 个格子，统计落到不同电压格子的信号数目。

(1) 放大器的放大倍数 k 影响：当总道数和取数时间不变时，放大器的放大倍数 k 越大，能谱的横坐标越大，纵坐标越小。

由于：

- a. 放大器放大倍数 正比于 信号脉冲高度 正比于 信号在多道中达到的道数(信号对应的能谱横坐标的通道位置)；
- b. 多道分析器是对粒子计数的仪器；

则对应的有以下结论：

- a. 如果信号脉冲高度放大 n 倍，信号对应的通道数也会放大 n 倍，因此能谱的横坐标就会放大 n 倍；
- b. 无论放大多少倍，多道分析器看到的粒子总数目(能谱的面积)不会变化。所以当能谱的横坐标放大 n 倍时，能谱的纵坐标就会缩小，以保证能谱总面积不变。

(2) 多道分析器的总道数 n 影响：当放大倍数和取数时间不变时，总道数 n 变大，能谱的横坐标会变大，纵坐标会变小。

- 结合多道分析器的工作原理，多道分析器的总道数增大，不会使峰在整个量程的相对位置发生变化；而因为入射粒子总计数不会变化，多道的总道数若增大，每个通道分得的粒子计数就会减少，因此能谱的纵坐标就会减小。

(3) 取数时间影响：当放大倍数和总道数不变时，取数时间越长，取得的事例数就越多，能谱谱线也会越光滑（越密集），能谱的高度会增大（纵坐标会变大）。

2. 在比较辐照后的宝石和环境的放射性水平时，我们强调需要在完全相同的测量条件下进行测量，才可以直接对两者进行比较。如果发生了以下测量条件不同的情况，应该怎么比较？在讨论其中一个参数时，请固定其他两个进行讨论。

①放大器的放大倍数不同：宝石测量放大倍数为 A，环境测量放大倍数为 B；

②多道分析器的总道数不同：宝石测量总道数为 M，环境测量总道数为 N；

③取数的时间不同：宝石测量取数时间为 T，环境测量取数时间为 K。

答：分析如下：

• 放射性水平，相当于放射性活度。在相同测量条件下测量两个物理量，可以对这两个量进行直接比较。如果测量条件不同，就要折算为相同条件才可以直接比较。

(1) 结合第 1 题的第 (1) 问，放大倍数不会影响粒子的总计数，放大倍数增大会使能谱的横坐标增大、纵坐标减小。

- 将环境的能谱横坐标乘以 A/B 倍，纵坐标乘以 B/A 倍，才能够统一比较。

(2) 多道分析器总道数越多，每个道分到的事例数就越少，整个能谱的高度就越低，因此能谱高度和多道分析器设定的总道数成反比关系。

- 将环境的能谱横坐标乘以 M/N，纵坐标乘以 N/M，才能够统一比较。

(3) 取数时间越长，粒子计数越多。取数时间和能谱高度成正比关系。

- 环境的能谱纵坐标乘以 T/K，才能够统一比较。

3. 不同的材料对射线的阻挡能力不同。现在有两块材料 A 和 B 需要测试哪一种可以更有效的屏蔽射线。请利用本实验的探测器，设计实验测量方案并判断应该选择哪一种作为屏蔽材料。

答：方案设计如下：

利用本实验中的 γ 射线能谱测量装置进行测量，实验步骤如下：

(1) 数据测量：

- 取材料 A 包装 ^{60}Co 放射源，再放入闪烁体探测器中，依据实验中的具体步骤，调节好相关参数，测量并记录 γ 射线穿过材料 A 后的能谱；
- 再取材料 B 包装相同的 ^{60}Co 放射源，放入闪烁体探测器中，保持所有的条件参数不变，重复测量步骤并记录能谱；
- 将 ^{60}Co 放射源不加包装直接放入闪烁体探测器，重复测量步骤测量并记录其 γ 能谱；
- 取出放射源，保持所有的条件参数不变，重复测量步骤来测量并记录环境中 γ 能谱；

(2) 数据处理：将四个能谱图绘制在一张坐标图中；再进一步求出材料 A、B 下能谱总计数，分别与纯放射源能谱总计数做差值。

(3) 得出结论：以环境能谱和纯放射源能谱为基准，观察比较 A、B 能谱高度、峰值高度，若有一方明显较高，则这种材料对射线的屏蔽效果较差；再进一步来比较差值大小，差值越大，说明该材料的屏蔽效果越好，应选择这种屏蔽材料。