

γ 辐射能谱测量

洪宇宸[†] 181840084

南京大学物理学院

摘要： 原子核从激发态跃迁到较低能级或基态跃迁能产生 γ 射线，在本实验中，将 γ 射线的次级电子按不同能量分别进行强度测量，从而得到 γ 辐射强度按能量的分布。并通过测量 γ 射线在不同物质中的吸收系数，了解 γ 射线在不同物质中的吸收规律。

关键词： γ 射线，能谱，能量分辨率，探测效率

1 引言

本实验要求大家了解 NaI(Tl) 闪烁 γ 能谱仪（探测器）的结构，并对其工作原理有一定的认识。 γ 射线射入闪烁体，通过光电效应、康普顿效应和电子对产生这三种效应，产生次级电子，再由这些次级电子去激发闪烁体发光。所发之光被光电倍增管接收，经光电转换及电子倍增过程，最后从光电倍增管的阳极输出电脉冲。分析、记录这些脉冲就能测定射线的强度和能量，从而得到 γ 射线的能谱。研究 γ 射线的能谱对于放射性核素的应用和研究原子核的能级结构有很重要的意义。

闪烁 γ 能谱仪（探测器）在科学技术的许多部门有着十分重要的应用，它的主要优点是：既能探测各种类型的带电粒子，又能探测中性粒子，既能对辐射强度进行测量，又能对辐射的能量进行分析，而且探测效率高（比 G-M 计数器高几十倍），分辨时间短（约 10 秒）。通过本实验，我们将学习掌握一种测量射线能量的方法：用 NaI(Tl) 闪烁 γ 能谱仪（探测器）测量 γ 能谱。

2 实验目的

1. 学习闪烁 γ 谱仪的工作原理和实验方法。
2. 验证 γ 射线通过物质时其强度减弱遵循指数规律。
3. 测量 γ 射线在不同物质中的吸收系数。

3 实验原理

一、 γ 射线与物质的相互作用

1) 光电效应

当能量 E_γ 的入射 γ 光子与物质中原子的束缚电子相互作用时，光子可以把全部能量转移给某个束缚电子，使电子脱离原子束缚而发射出去，光子本身消失，发射出去的电子称为光电子，这种过程称为光电效应。发射出光电子的动能

$$E_e = E_\gamma - B_i \quad (1)$$

[†] Email: 181840084@smail.nju.edu.cn

B_i 为束缚电子所在壳层的结合能。原子内层电子脱离原子后留下空位形成激发原子，其外部壳层的电子会填补空位并放出特征 X 射线。例如 L 层电子跃迁到 K 层，放出该原子的 K 系特征 X 射线。

2) 康普顿效应

γ 光子与自由静止的电子发生碰撞，而将一部分能量转移给电子，使电子成为反冲电子， γ 光子被散射改变了原来的能量和方向。计算给出反冲电子的动能为

$$E_e = \frac{E_\gamma^2 (1 - \cos \theta)}{m_0 c^2 + E_\gamma (1 - \cos \theta)} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)}} \quad (2)$$

式中 $m_0 c^2$ 为电子静止质量，角度 θ 是 γ 光子的散射角，见下图所示。由图看出反冲电子以角度 ϕ 出射， ϕ 与 θ 间有以下关系：

$$\cot \phi = \left(1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2} \right) \tan \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

由式 (2) 给出，当 $\theta = 180^\circ$ 时，反冲电子的动能 E_e 有最大值：

$$E_{\max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_\gamma}} \quad (4)$$

这说明康普顿效应产生的反冲电子的能量有一上限最大值，称为康普顿边界 E_c 。

3) 电子对效应

当 γ 光子能量大于 $2m_0 c^2$ 时， γ 光子从原子核旁边经过并受到核的库仑场作用，可能转化为一个正电子和一个负电子，称为电子对效应。此时光子能量可表示为两个电子的动能与静止能量之和，如

$$E_\gamma = E_e^+ + E_e^- + 2m_0 c^2 \quad (5)$$

其中 $2m_0 c^2 = 1.02 \text{ MeV}$ 。

综上所述， γ 光子与物质相遇时，通过与物质原子发生光电效应、康普顿效应或电子对效应而损失能量，其结果是产生次级带电粒子，如光电子、反冲电子或正负电子对。次级带电粒子的能量与入射 γ 光子的能量直接相关，因此，可通过测量次级带电粒子的能量求得 γ 光子的能量。

二、 γ 射线的吸收

γ 射线与物质的原子一旦发生三种相互作用，原来为 E_γ 的光子就消失了，或散射后能量改变并偏离原来的入射方向。通常把通过物质的未经过相互作用的光子所组成的射线束成为窄束 γ 射线（也成为良好的几何条件下的射线束）。 γ 射线通过物质时其强度会逐渐减弱，这种现象称为伽马射线吸收。单能窄束 γ 射线强度的衰减，遵循指数规律，即

$$I = I_0 e^{-\sigma_\gamma N x} = I_0 e^{-\mu x} \quad (6)$$

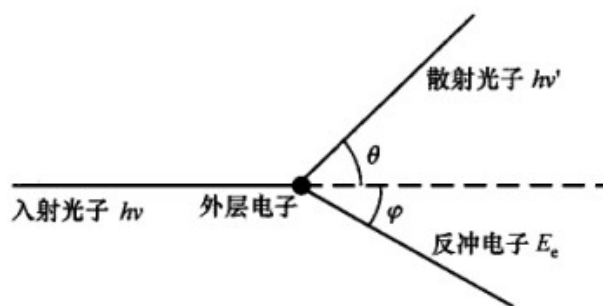


图 2.2.1-2 康普顿效应示意图

其中 I_0 、 I 分别是通过物质前、后 γ 射线强度， x 是 γ 射线通过物质的厚度（单位为 cm ）， σ_γ 是三种效应（光电效应、康普顿效应和电子对效应）截面之和， N 是吸收物质单位体积中的原子数， μ 是物质的线性吸收系数，（单位为 cm^{-1} ）。显然 μ 的大小反映了物质吸收 γ 射线能力的大小。

由于在相同的实验条件下，某一时刻的计数率 n 总是与该时刻的 γ 射线强度 I 成正比，因此 I 与 x 的关系也可以用 n 与 x 的关系来代替。由（6）式可以得到

$$n = n_0 e^{-\mu x} \quad (7)$$

$$\ln n = \ln n_0 - \mu x \quad (8)$$

可见，如果在半对数坐标图上绘制吸收曲线，那么这条曲线就是一条直线，该直线斜率的绝对值就是线性吸收系数 μ 。

如果所要测量的放射源包括多种能量的 γ 射线，在半对数坐标纸上的标绘将是一条曲线。随着 γ 射线通过物质厚度（ x ）的增加，低能 γ 射线逐渐被滤出去，当吸收物质超过一定的厚度以后，当厚度增加时，则吸收曲线将是一条直线，根据这条直线的斜率的绝对值，我们就可以得到最大能量 γ 射线的吸收系数；把这一直线延伸到 $x=0$ ，再以原来的吸收曲线减去这条直线相对应吸收体厚度的计数率，就可以得到其他能量的 γ 射线的吸收曲线，从得到的曲线最后部分求斜率，即可得到能量仅次于最高能量 γ 射线的吸收系数；重复上述方法，就能一次得到其他 γ 射线的吸收系数。

为了得到准确的结果，最好是放射源只放出一种能量的射线或者是探测器能对各种能量的 γ 射线进行鉴别。

三、闪烁 γ 能谱仪

1. 闪烁谱仪的结构框图及各部分的功能

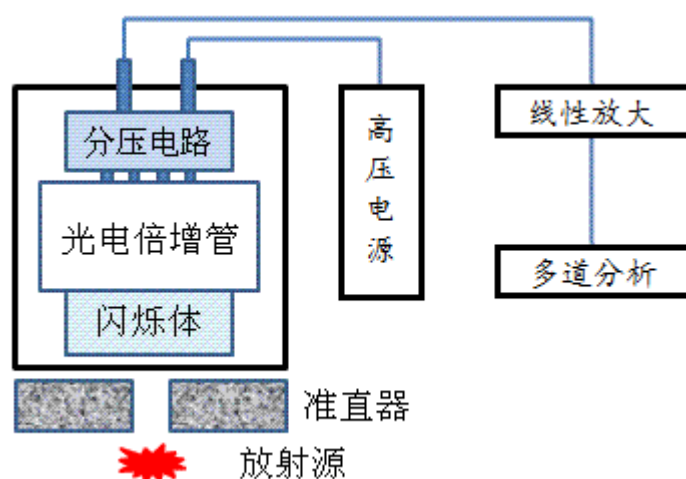


图 1. 闪烁谱仪的结构框图

闪烁谱仪的结构框图示于图 1 中，它可分为闪烁探头与高压、信号放大与多道分析等两大部分。以下分别介绍各部分的功能。

1) 闪烁探头与高压

闪烁探头包括闪烁体、光电倍增管、分压电路以及屏蔽外壳。实验中测量 γ 能谱多使用无机闪烁体如 NaI (Tl) 晶体。闪烁体的功能是在次级带电粒子的作用下产生数目与入射 γ 光子能量相关的荧光光子。这些荧光光子被光导层引向加载高压的光电倍增管，并在其光敏阴极再次发生光电效应而

产生光电子，这些光电子经过一系列倍增极的倍增放大，从而使光电子的数目大大增加，最后在光电倍增管的阳极上形成脉冲信号。脉冲数目是和进入闪烁体 γ 光子数目相对应的。而脉冲的幅度与在闪烁体中产生的荧光光子数目成正比，从而和 γ 射线在闪烁体中损失的能量成正比。整个闪烁探头应安装在屏蔽暗盒内以避免可见光对光电倍增管的照射而引起损坏。

2) 信号放大与多道分析

由于探头输出的脉冲信号幅度很小，需要经过线性放大器将信号幅度按线性比例进行放大，然后使用多道脉冲幅度分析器测量信号多道能谱。多道脉冲幅度分析器的功能是将输入的脉冲按其幅度不同分别送入相对应的道址（即不同的存贮单元）中，通过软件可直接给出各道址（对应不同的脉冲幅度）中所记录的脉冲数目，即得到了脉冲的幅度概率密度分布。

由于闪烁 γ 能谱仪输出的信号幅度与射线在晶体中沉积的能量成正比，也就得到了 γ 射线的能谱。

2. γ 能谱的形状

闪烁 γ 能谱仪可测得 γ 能谱的形状，图 2.2.1-6 所示是典型 ^{137}Cs 的 γ 射线能谱图。图的纵轴代表各道址中的脉冲数目，横轴为道址，对应于脉冲幅度或 γ 射线的能量。

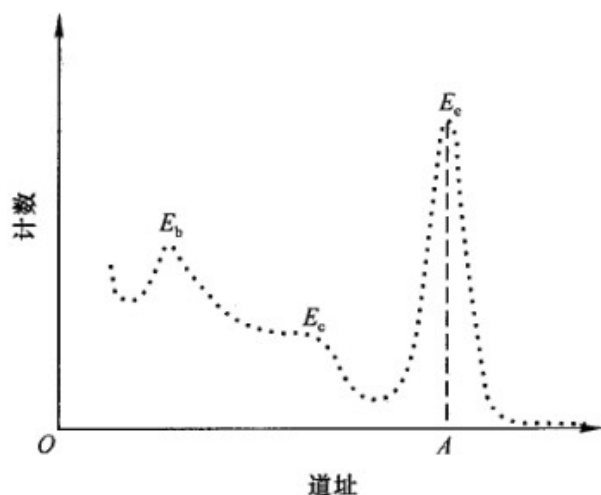


图 2.2.1-6 ^{137}Cs 的 γ 能谱图

从能谱图上看，有几个较为明显的峰，光电峰 E_e ，又称全能峰，其能量就对应 γ 射线的能量 E_γ 。这是由于 γ 射线进入闪烁体后，由于光电效应产生光电子，能量关系见式 (1)，其全部能量被闪烁体吸收。光电子逸出原子会留下空位，必然有外壳层上的电子跃入填充，同时放出能量 $E_z = B_i$ 的 x 射线，一般来说，闪烁体对低能 x 射线有很强的吸收作用，这样闪烁体就吸收了 $E_e + E_z$ 的全部能量，所以光电峰的能量就代表 γ 射线的能量，对 ^{137}Cs ，此能量为 0.661 MeV。

E_c 即为康普顿边界，对应反冲电子的最大

能量。

背散射峰 E_b 是由射线与闪烁体屏蔽层等物质发生反向散射后进入闪烁体内而形成的光电峰，一般背散射峰很小。

3. 谱仪的能量刻度和分辨率

1) 谱仪的能量刻度

闪烁谱仪测得的 γ 射线能谱的形状及其各峰对应的能量值由核素的蜕变纲图所决定，是各核素的特征反映。但各峰所对应的脉冲幅度是与工作条件有关系的。如光电倍增管高压改变、线性放大器放大倍数不同等，都会改变各峰位在横轴上的位置，也即改变了能量轴的刻度。因此，应用 γ 谱仪测定未知射线能谱时，必须先用已知能量的核素能谱来标定 γ 谱仪。

由于能量与各峰位道址是线性的： $E_\gamma = kN + b$ ，因此能量刻度就是设法得到 k 和 b 。例如选择 ^{137}Cs 的光电峰 $E_\gamma = 0.661 \text{ MeV}$ 和 ^{60}Co 的光电峰 $E_{\gamma_1} = 1.17 \text{ MeV}$ ，如果对应 $E_1 = 0.661 \text{ MeV}$ 的光电

峰位于 N_1 道，对应 $E_2 = 1.17\text{MeV}$ 的光电峰位于 N_2 道，则有能量刻度

$$k = \frac{1.17 - 0.661}{N_2 - N_1} \text{MeV} \quad b = \frac{(0.661 + 1.17) - k(N_1 + N_2)}{2} \text{MeV} \quad (6)$$

将测得的未知光电峰对应的道址 N 代入 $E_\gamma = kN + b$ 即可得到对应的能量值。

2) 谱仪分辨率

γ 能谱仪的一个重要指标是能量分辨率。由于闪烁谱仪测量粒子能量过程中，伴随着一系列统计涨落过程，如 γ 光子进入闪烁体内损失能量、产生荧光光子、荧光光子在光阴极上打出光电子、光电子在倍增极上逐级倍增等等，这些统计涨落使脉冲的幅度服从统计规律而有一定分布的。

定义谱仪能量分辨率 η ：

$$\eta = \frac{FWHM}{E_\gamma} \times 100\% \quad (7)$$

其中 FWHM(Full Width Half Maximum)表示选定能谱峰的半高全宽， E_γ 为与谱峰对应的 γ 光子能量， η 表示闪烁谱仪在测量能量时能够分辨两条靠近的谱线的本领。目前一般的 NaI 闪烁谱仪对 ^{137}Cs 光电峰的分辨率在 10%左右。对 η 的影响因素很多，如闪烁体、光电倍增管等等。

4 实验仪器

虚拟核仿真信号源 NEK0600-01G 一台

通用数据采集器 AV6012-GE 一台

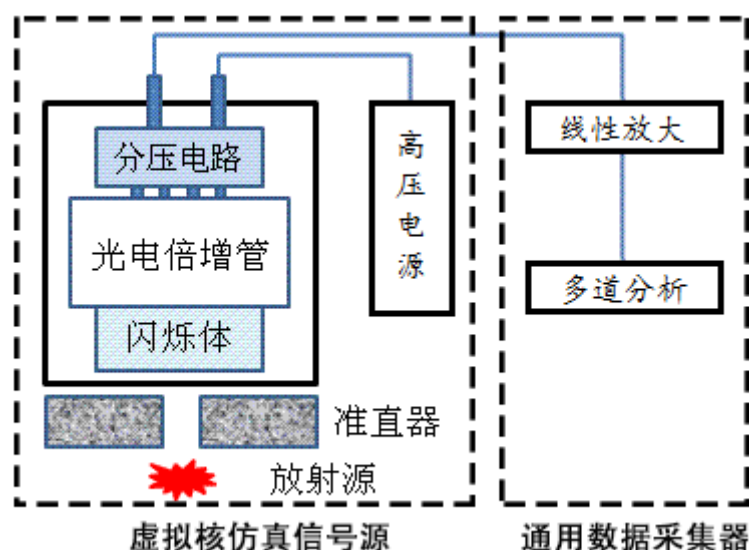


图 2. γ 能谱测量实验装置连接图

如上图所示本实验中使用虚拟核仿真信号源产生核脉冲信号，从而代替了放射源、探测器与高压电源的使用；通用数据采集器使用多道分析功能，对信号源输出的核脉冲进行线性放大并进行多道能谱测量与分析。通过软件控制虚拟核仿真信号源的电压和放射源的状态，可以得到相应的核脉冲信号，经过多道分析可以观察到相应的物理现象。

5 实验内容

1. γ 谱仪的探测效率, $\eta = N/(S \cdot t)$, N 为净计数 (选区计数), S 为强度, t 为测量时间, ^{137}Cs 的 $S=66.6 \times 10^3 \text{Bq}$
2. 能量测量: $E(X_p) = G \cdot X_p + E_0$ (其中 G 为增益, 即单位脉冲幅度对应的能量; E_0 为直线截距; X_p 为全能峰峰位, 即峰道址), 通过 ^{137}Cs 的 X_0 和 $E(X_0)$, 求得 ^{60}Co 的 $E(X_2)$ 。

$$E(X_0)=0.66\text{MeV}$$

$$E(X_1)=1.17\text{MeV}$$

$$E(X_2)=1.33\text{MeV}$$

6 数据记录与处理

6.1 测量 γ 谱仪的能量分辨率 μ 及探测效率 η (计数时间: 100,300,600s 共测 3 次)

源设定为 ^{137}Cs

测量时间为 100s:

全能峰道址 X_0 为 314.19, 计数 n_0 25379
半高宽左道址 X' 295.26, 半宽高右道址 X'' 333.12
全能峰左边界道址 X_l 270, 右道址 X_r 358
全能峰净计数 N 7440

测量时间为 300s:

全能峰道址 X_0 为 312.19, 计数 n_0 75481
半高宽左道址 X' 295.145, 半宽高右道址 X'' 329.435
全能峰左边界道址 X_l 270, 右道址 X_r 358
全能峰净计数 N 21915

测量时间为 600s:

全能峰道址 X_0 为 312.41, 计数 n_0 151451
半高宽左道址 X' 295.965, 半宽高右道址 X'' 328.855
全能峰左边界道址 X_l 270, 右道址 X_r 362
全能峰净计数 N 44513

取三次测量的平均值:

能量分辨率为:

$$\mu = \frac{1}{3} (10.53\% + 12.05\% + 10.98\%) = 0.111867$$

探测效率:

$$\eta = \frac{1}{3} (7440/100 + 21915/300 + 44513/600) / (66.6 \times 10^3) = 0.0011093$$

6.2 测量 ^{60}Co 的 γ 能谱（计数时间：600s）

第一次测量已知源获得 X_1 ，第二次测量测量未知源 X_2

左全能峰道址 X_1 _____ 509.93 _____

右全能峰道址 X_2 _____ 582.93 _____

左峰左边界道址 X_l _____ 484 _____，右边界 X_r _____ 550 _____

由 $E(X_p) = G \cdot X_p + E_0$ ， $E(X_0) = 0.66\text{MeV}$ ， $E(X_1) = 1.17\text{MeV}$ 解得 $G = 0.00258\text{MeV}$ ， $E_0 = -0.147\text{MeV}$

解得 $E(X_2) = 1.36\text{MeV}$

7 思考题

1. 用闪烁谱仪测量 γ 能谱时，要求在多道分析仪的道址范围内能同时测量出 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的光电峰，应如何选择何时的工作条件？在测量中盖工作条件可否改变？

在测量 Cs 的光电峰量分辨率；具体的合适的条件是指，调整光电倍增管的放大系数，然后反复观察 Cs 和 Co 的能谱，一般要使 Cs 的 0.661MeV 光电峰在 512 道址左侧，一般选择在 400 左右比较合适，可以充分利用量程，而 Co 的两个主光电峰接近屏幕右侧。不能改变，这样才能保证在同一能量刻度下测量，否则会对能量刻度产生影响，进而影响测量过程的统一性和准确性。

2. 为什么 γ 射线被吸收了？为什么说 γ 射线通过物质时没有确定的射程？

与样品中的电子发生光电效应、康普顿效应和电子对效应三种相互作用而被吸收。

吸收是有一定概率的，对于某一确定的 γ 射线，射程不是确定的，能量越大，就有更大的机会在物质中通过更长的距离。^[1,2]

8 参考文献

- [1] 大学核与粒子物理实验讲义[J].
- [2] 黄润生，沙振舜，唐涛等. 近代物理实验[M]. 第 2 版. 江苏 南京：南京大学出版社，2007.