

课前阅读

1、课前提前完成本实验室的预习测试

2、实验操作

参考实验室提供的《实验操作页》，并遵从实验室《安全管理制度》。

3、数据处理

当堂提交的数据处理内容（不需进行不确定度分析）：

- 手绘 ^{137}Cs 的 γ 能谱图，在图上指出光电峰、康普顿边界、背散射峰的位置和道址；
- 利用 ^{137}Cs 的光电峰、背散射峰的能量和道址对谱仪进行能量刻度；
- 求 ^{137}Cs 的 γ 能谱光电峰的能量分辨率；
- 测量紫铜片对 ^{137}Cs 发射的 γ 射线的吸收曲线，取半对数坐标，利用实验室计算机里的 Origin 软件作图，求出线性吸收系数和半吸收厚度；
- 测量 ^{60}Co 的光电峰对应的能量；
- 整理实验装置，关机。

4、出门测

国家级实验教学示范中心

中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部

γ 能谱及 γ 射线的吸收

(本文内容选自高等教育出版社《大学物理实验》)

(本实验当堂提交数据处理报告)

根据原子核结构理论, 原子核能级属于分立能级。当处于激发态 E_2 上的核跃迁到低能级 E_1 上时, 就发射 γ 射线。放出的光子能量 $h\nu = E_2 - E_1$, 此处 h 为普朗克常数, ν 为 γ 光子的频率。原子核衰变放出的 γ 射线的能量反映了核能级差, 且能量大小通常为特征能量, 因此通过测量 γ 射线强度按能量的分布即 γ 射线能谱, 可以用于研究核能级、核衰变纲图等, 在放射性分析、同位素应用及鉴定核素等领域有重要的意义。

当 γ 射线穿过物质时, 可能通过光电效应、康普顿效应和电子对效应 (当 $E_\gamma > 1.02\text{MeV}$) 而损失能量, 强度逐渐减弱, 这种现象称为物质对 γ 射线的吸收。目前物质对 γ 射线的吸收规律广泛应用于工业、科研、医疗、资源勘探、环境保护许多领域。

闪烁 γ 能谱仪具有实用范围广、探测效率高、时间分辨小、价格低廉等优点, 是测量 γ 射线能谱最常用的工具。

本实验的目的是学习闪烁 γ 谱仪的工作原理和实验方法, 研究吸收片对 γ 射线的吸收规律。

实验原理

1、 γ 射线与物质的相互作用

γ 射线与物质原子之间的相互作用主要有三种方式: 光电效应、康普顿散射、电子对效应。

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, 这个过程称为光电效应。发射出光电子的动能

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

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及散射光子的能量为：

$$E_e = \frac{E_\gamma^2(1-\cos\theta)}{m_0c^2 + E_\gamma(1-\cos\theta)} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0c^2}{E_\gamma(1-\cos\theta)}} \quad (2)$$

$$E_\gamma' = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2}(1-\cos\theta)} \quad (3)$$

式中 $m_0c^2 = 0.511\text{MeV}$ 为电子静止质量，角度 θ 是 γ 光子的散射角，见图 2.2.1-2 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：

$$\cot\varphi = \left(1 + \frac{E_\gamma}{m_0c^2}\right) \tan\frac{\theta}{2} \quad (4)$$

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

$$E_{\max} = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0c^2}{2E_\gamma}} \quad (5)$$

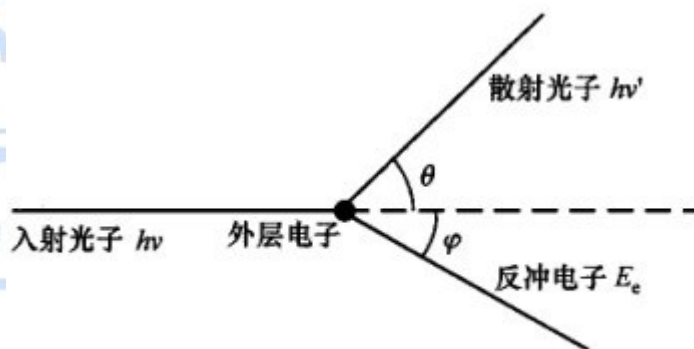


图 2.2.1-2 康普顿效应示意图

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 $2m_0c^2$ 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

$$E_\gamma = E_e^+ + E_e^- + 2m_0c^2 \quad (6)$$

其中 $2m_0c^2 = 1.02\text{MeV}$ 。

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。

2、闪烁 γ 能谱仪

2.1、闪烁谱仪的结构框图及各部分的功能

闪烁谱仪的结构框图示于图 2.2.1-3 中，它可分为闪烁探头、供电与信号放大模块、计算机数据采集系统等三部分。以下分别介绍各部分的功能。

(1) 闪烁探头

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

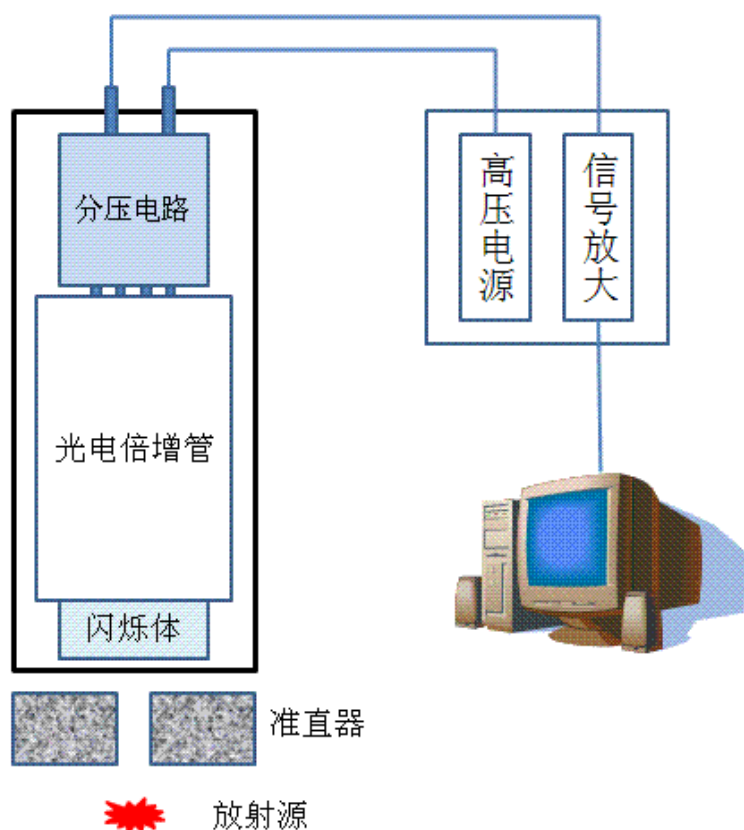


图 2.2.1-3 闪烁能谱仪结构框图

荧光光子。这些荧光光子被光导层引向光电倍增管，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) 供电与信号放大模块

高压电源通过分压电路为光电倍增管阳极和各倍增极提供工作电压。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，一般输入脉冲的极性正或负均可，输出脉冲均为正极性，放大倍数可通过十圈电位器连续调节。

(3) 计算机数据采集系统

数据采集系统包括多道脉冲幅度分析器及其软件。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,因此测量能谱就非常方便。

闪烁 γ 能谱仪正是利用 γ 光子与闪烁体相互作用时产生次级带电粒子,进而由次级带电粒子引起闪烁体发射荧光光子,通过这些荧光光子的数目来推出次级带电粒子的能量,再推出 γ 光子的能量,以达到测量 γ 射线能谱的目的。

2.2、 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。

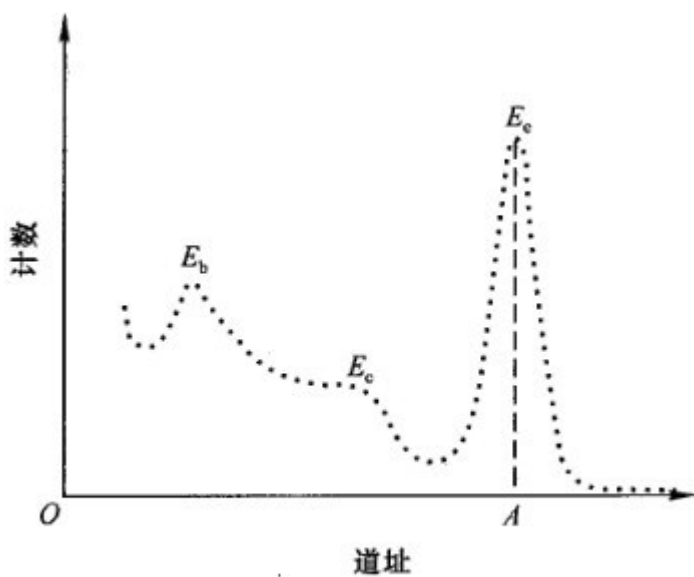


图 2.2.1-6 ^{137}Cs 的 γ 能谱图

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 $E_x = B_i$ 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 $E_e + E_x$ 的全部能量,所以光电峰的能量就代表 γ 射线的

的能量,对 ^{137}Cs ,此能量为0.662MeV。

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。

2.3、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 $E_\gamma = 0.662 \text{ MeV}$ 和 ^{60}Co 的光电峰 $E_{\gamma 1} = 1.17 \text{ MeV}$ ，如果对应 $E_1 = 0.662 \text{ MeV}$ 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

$$k = \frac{1.17 - 0.662}{N_2 - N_1} \text{ MeV} \quad b = \frac{(0.662 + 1.17) - k(N_1 + N_2)}{2} \text{ MeV} \quad (7)$$

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 ：

$$\eta = \frac{FWHM}{E_\gamma} \times 100\% \quad (8)$$

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。

3、物质对 γ 射线的吸收

当 γ 射线穿过物质时，一旦与物质中的原子发生三种相互作用，原来的光子就消失或通过散射改变入射方向。通常把通过物质且未经相互作用的光子所组成的射线称为窄束 γ 射线（或良好几何条件下的射线束）。实验表明，单能窄束 γ 射线的衰减遵循指数规律：

$$I = I_0 e^{-\sigma_T N x} = I_0 e^{-\mu x} \quad (9)$$

其中 I_0 、 I 分别是通过物质前、后的 γ 射线强度，在本实验中可用全能峰的峰面积表示， x 是 γ 射线通过物质的厚度， σ_T 是三种作用截面之和， N 是吸收物质单位体积的原子数， μ 是物质的线性吸收系数，表示单位路程上 γ 射线与物质发生三种相互作用的总几率，其大小反映了物质吸收 γ 射线能力的大小。

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，直线的斜率的绝对

值就是线性吸收系数 μ 。

γ 射线强度减弱一半所需的吸收层厚度称为半吸收厚度 $d_{1/2}$ ，从（9）式可知：

$$d_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (10)$$

实验内容

请按如下内容操作实验，手绘相关实验数据曲线，当场处理实验数据(不需进行不确定度分析)，提交完实验报告后方可离开实验室，课后不再接收实验报告！

- 1、将 ^{137}Cs 放射源横放在探头旁边，探头另一侧放置紫铜片作为散射体。
- 2、开启电源，有两路电压输出，确认左边电压为 12.0V，右边电压为 5.0V，预热 20 分钟；
- 3、测量 ^{137}Cs 的 γ 能谱 10 分钟，观察能谱形状，手绘能谱图，并在图上指出光电峰、康普顿边界、电子对峰（如有的话）、背散射峰等峰位。记录能谱的计数率备用（选作内容需要）；
- 4、利用 ^{137}Cs 的光电峰、背散射峰的能量、峰位对谱仪进行能量刻度，并利用测得的 FWHM 确定 ^{137}Cs 光电峰的能量分辨率（不扣本底）；
- 5、测量紫铜片对 ^{137}Cs 发射的 γ 射线的吸收曲线，每个点测 3 分钟。在半对数坐标纸上作图，求出线性吸收系数和半吸收厚度（紫铜片厚度用游标卡尺测量，每片测一次）。
- 6、课堂计算（选作内容）
根据上述第 3 步记录的计数率估计实验期间（按 3 小时计） γ 辐射对人体的有效剂量，评估本实验电离辐射的安全性（题目说明见附录 I）。
- 7、将 ^{60}Co 置于探头下对准准直孔，测量 ^{60}Co 的能谱，确定光电峰的能量，测 30 分钟；
- 8、关闭电源，注销放射源。

思考题

- 1、用闪烁谱仪测量 γ 射线能谱时，要求在多道分析器的道址范围内能同时测量出 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的光电峰，应如何选择合适的工作条件？在测量过程中该工作条件可否改变？

(张宪锋)