

# 实验2-2 $\gamma$ 能谱的测量

# $\gamma$ 能谱仪的主要用途

- $\gamma$ 能谱仪是实现 $\gamma$ 能谱测量的仪器， $\gamma$ 能谱测量是一种重要的核地球物理方法，是解决地球科学、环境科学等有关问题的主要手段之一。
- 根据所测的 $\gamma$ 射线能谱，可获得 $\gamma$ 辐射总量以及铀、钍、钾等元素含量以及其它有关元素及岩性信息，根据这些信息，我们不仅可以进行铀矿勘探，而且还可以将其应用于地质填图，油气勘测，寻找各种金属和非金属矿产等。
- $\gamma$ 能谱测量在放射性污染监测领域发挥着重要的作用，同样能服务于建材和环境中的放射性监测等。

# $\gamma$ 能谱仪的主要技术指标

- $\gamma$ 射线能量测量范围（例：30-3000keV，400-3000keV）；
- $\gamma$ 能谱仪分析道数（例：4道，多道256、1024、4096道）；
- $\gamma$ 能谱仪能量分辨率（例：优于10%，对于 $^{137}\text{Cs}$ ）；
- 精确性：（例：对同一样品进行10次测量，相对标准误差不大于 $\pm 20\%$ 。或：保持测量条件不变，连续测量100次，测量计数值应符合放射性统计涨落规律。）
- 他功能：（例：原始测量数据能够自动储存、处理、能显示伽玛射线谱线，自动计算、显示最终结果等。）

# 一、实验目的

1. 了解 $\gamma$ 射线与物质的三种相互作用
2. 掌握NaI(Tl)闪烁谱仪的工作原理与使用方法,
3. 学会如何测定谱仪的能量分辨率
4. 掌握用谱仪测能量的方法.

## 二、实验原理

### 1. $\gamma$ 射线与物质相互作用机理

$\gamma$ 光子与物质原子相互作用主要有三种方式，如图所示。

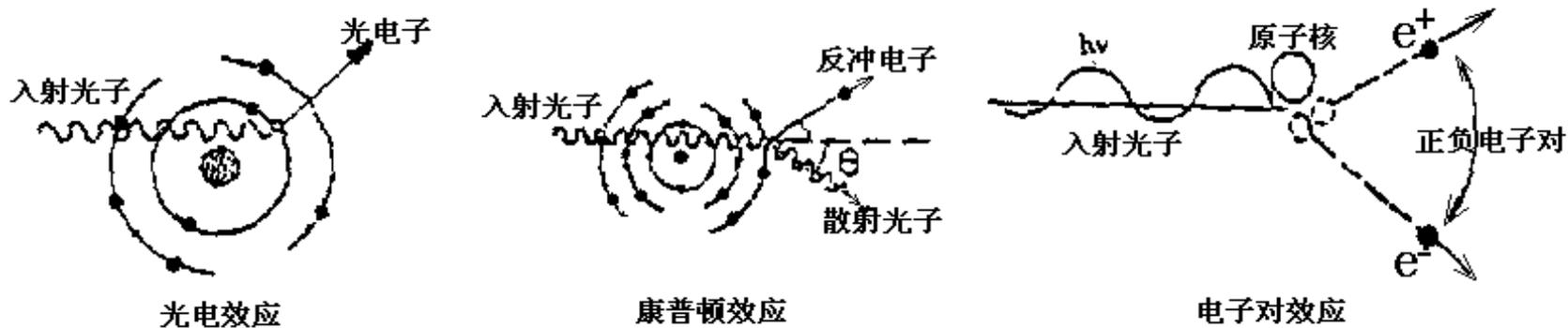
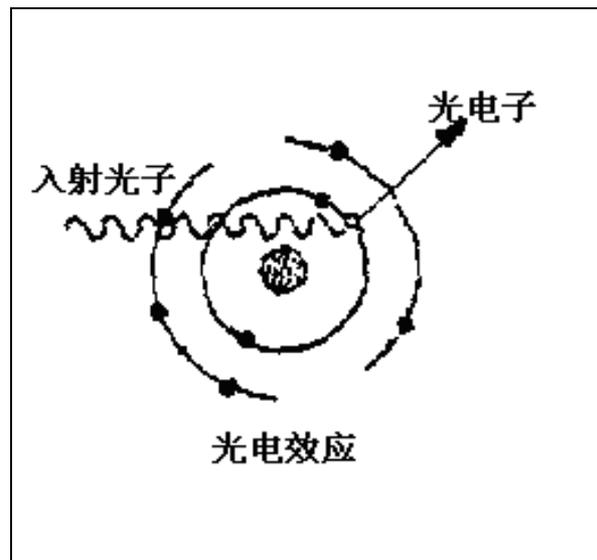


图2-1  $\gamma$ 光子与物质原子相互作用

## (1) 光电效应

能量为 $E_\gamma$ 的入射 $\gamma$ 光子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，成为光电子，光子本身消失。发射光电子的动能 $E_e$ 为



$$E_e = E_\gamma - B_i \quad (2-13)$$

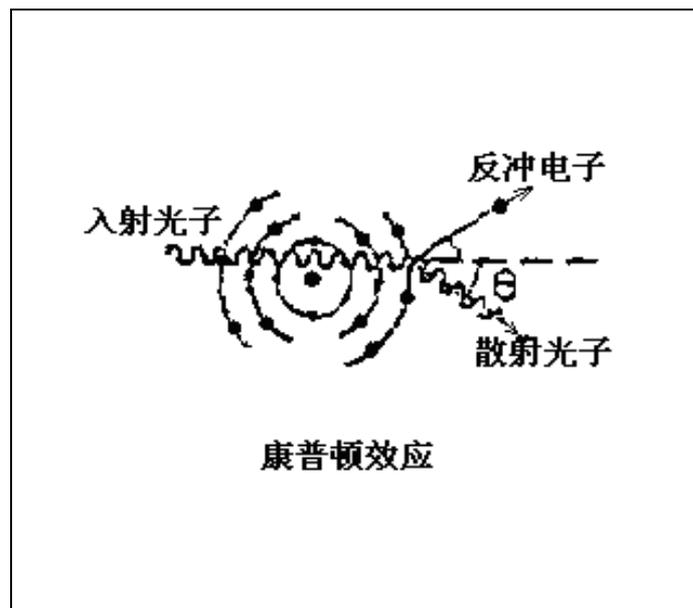
$B_i$ 为束缚电子所在壳层的结合能。原子内层电子脱离原子后留下空位形成激发原子，其外部壳层的电子会填补空位并放出特征X射线。

## (2) 康普顿效应

$\gamma$ 光子与自由静止的电子发生碰撞，将一部分能量转移给电子，使电子成为反冲电子， $\gamma$ 光子被散射，改变了原来的能量和运动方向，这就是康普顿效应。反冲电子的动能为

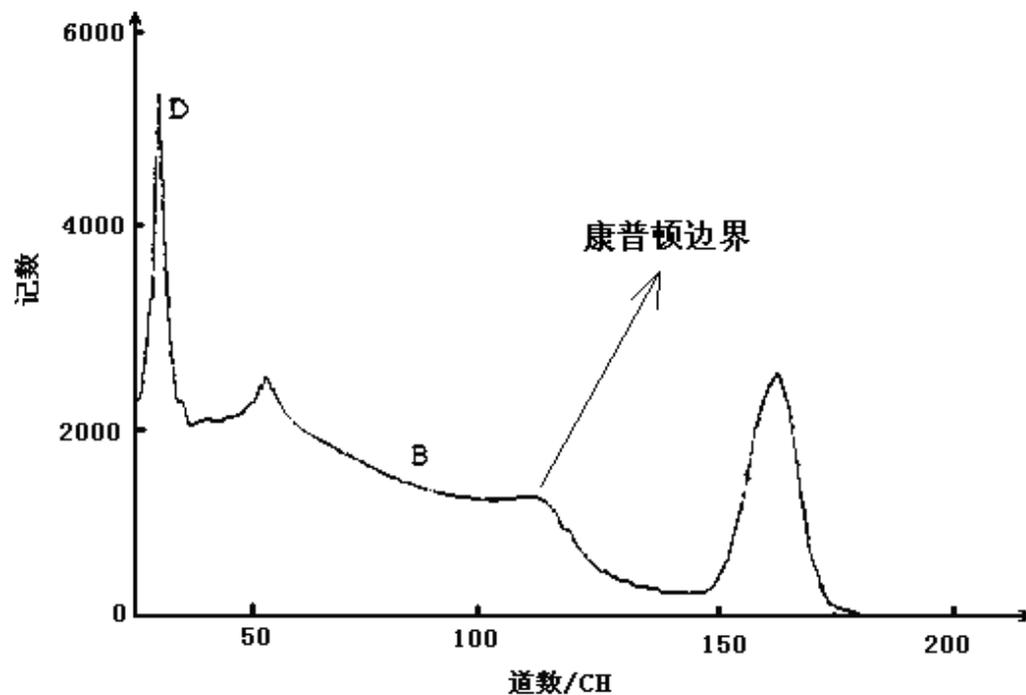
$$E_e = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{m_0 c^2}{E_\gamma (1 - \cos \theta)}} \quad (2-14)$$

式中： $m_0 c^2$ 为电子静止能量，约为0.5 MeV；角度 $\theta$ 是散射光子的散射角。当 $\theta = 180^\circ$ 时（即光子向后散射，又称为反散射），反冲电子的动能有最大值，此时



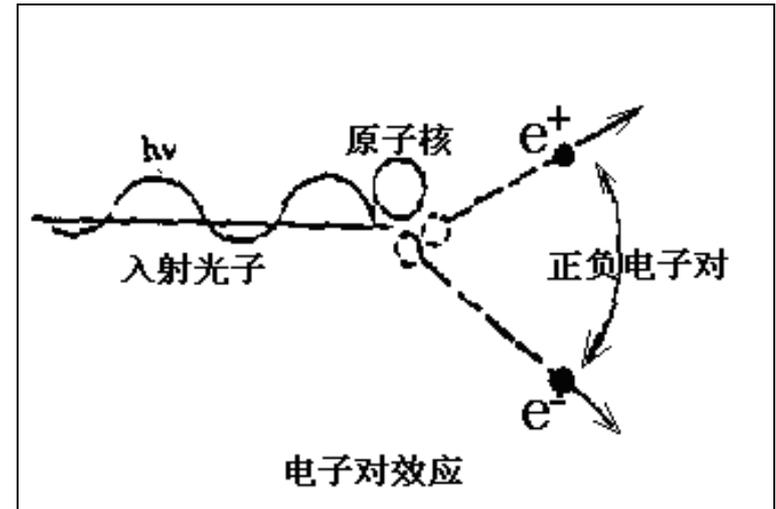
$$E_{\max} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \frac{m_0 c^2}{2E_{\gamma}}} \quad (2-15)$$

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**。



### (3) 电子对效应

当 $\gamma$ 光子能量大于 $2m_0c^2$ 时， $\gamma$ 光子从原子核旁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，即



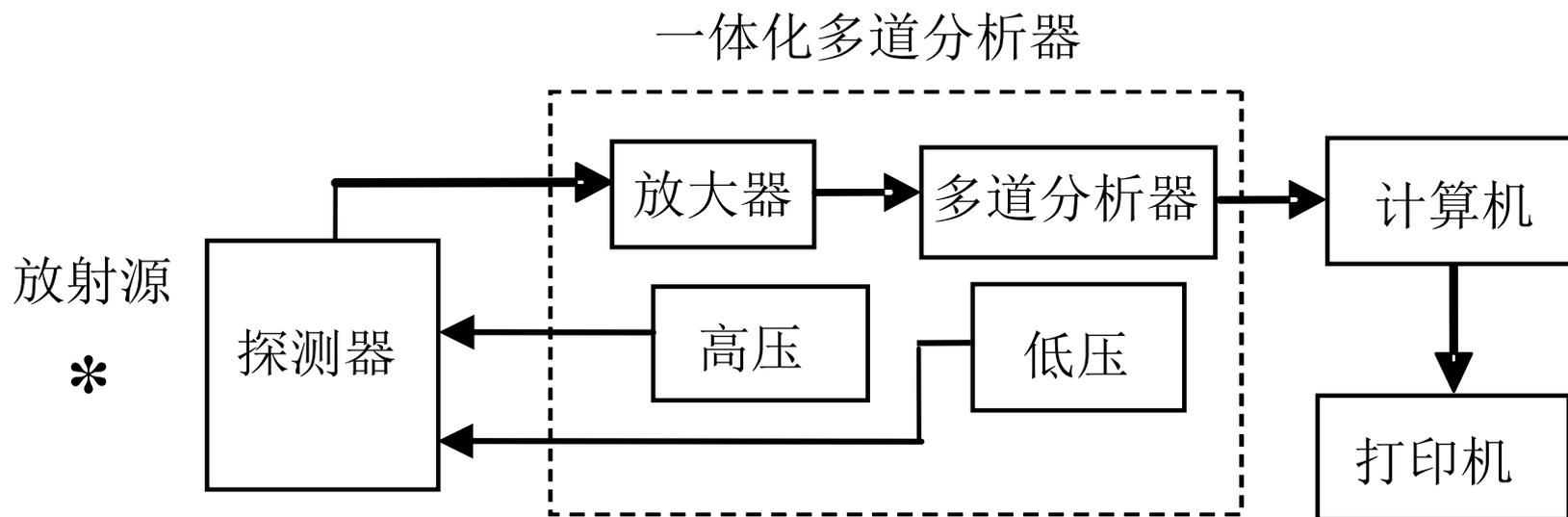
$$E_{\gamma} = E_{e^{+}} + E_{e^{-}} + 2m_0c^2 \quad (2-16)$$

## 一个重要的结论

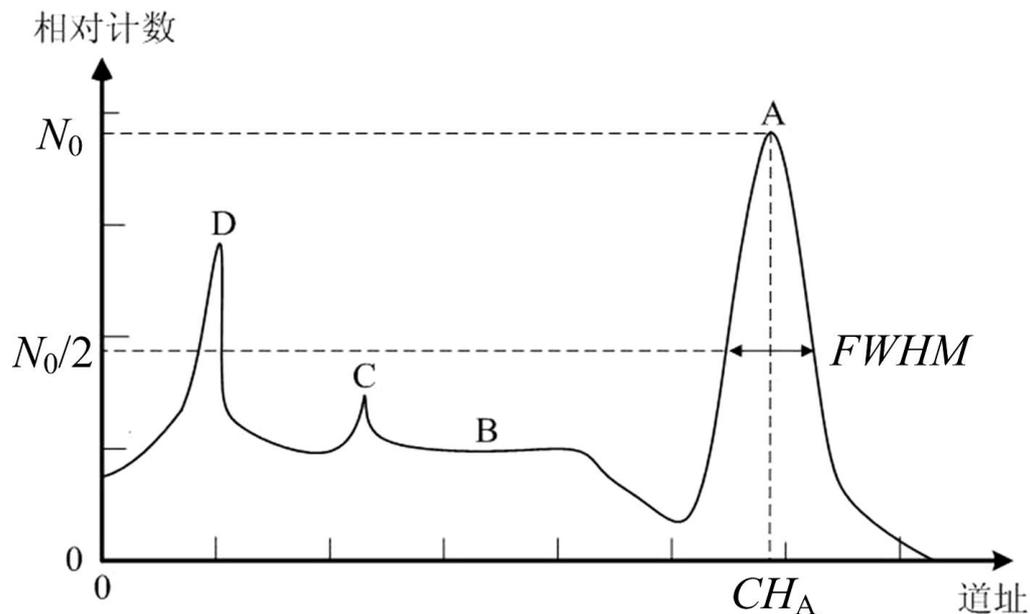
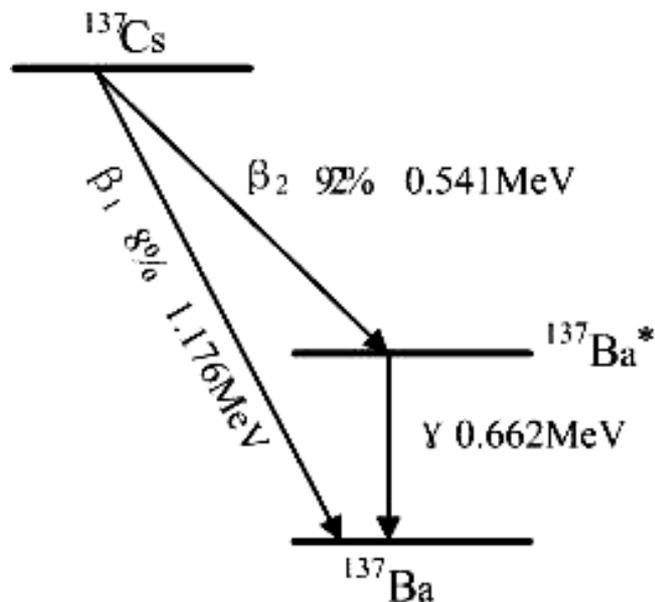
综上所述， $\gamma$ 光子与物质发生作用时，能量较低时以光电效应为主，如果 $\gamma$ 射线能量接近 1 MeV，康普顿效应将占主导地位，而当 $\gamma$ 射线能量超过 1.02 MeV时，就有可能产生电子对效应。



## 2. NaI(Tl) $\gamma$ 能谱仪介绍



### 3. $^{137}\text{Cs}$ 能谱分析.



光电峰A、康普顿平台B、反散射峰C和特征X射线峰D. 光电峰又称全能峰, 对应于光电效应, 其峰位的能量对应于 $\gamma$ 射线的能量. 平台状曲线B 是康普顿效应的贡献, 它的特征是散射光子逃逸出晶体后留下的一个连续电子谱. 反散射峰是散射角  $\theta = 180^\circ$  时的反散射光子造成的. 此时的反散射峰的能量为

$$E'_{r \min} = \frac{E_r}{1 + 2E_r / m_0 c^2} = 0.184 \text{ MeV}$$

#### 4. $\gamma$ 谱仪的性能指标:能量分辨率、线性及稳定性等.

(1) 能量分辨率:在一定工作条件下,输出脉冲幅度大小与入射射线在闪烁体中的能量损失成正比,即当射线能量单一时,输出的脉冲幅度也应该是单一的,但实际上却是一个有着某种分布的峰.原因是整个过程中存在着多种统计涨落,表现在脉冲的微分分布曲线上就是围绕平均值有一宽度分布.通常把分布曲线极大值一半处的全宽度称为半高宽,用 $FWHM$ 表示,它反映了谱仪对相邻的脉冲幅度或能量的分辨本领.因为有些涨落因素与能量有关,故使用相对分辨本领即能量分辨率

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{FWHM}{CH_A}$$

能量分辨率一般为8~10%,理想的能量分辨率为7.8%

(2) 能量线性——在相同的条件下，入射  $\gamma$  粒子的能量和它形成的脉冲幅度成正比的特性。反应在能谱中就是入射  $\gamma$  粒子的能量与其对应的峰的峰位道址成正比。一般NaI(Tl)闪烁谱仪在较宽的能量范围内(约100keV到1300 keV)是近似线性的。通常，在实验中用系列 $\gamma$  标准源，在相同的条件下分别测量它们的能谱，用其全能峰峰位横坐标与其对应的已知的粒子能量作图，即为能量刻度曲线。理想的能量刻度曲线是不通过原点的一条直线，即

$$E_r = G \cdot x + E_0$$

利用这条能量刻度曲线还可以测量未知源的射线能量。

显然，确定未知  $\gamma$  射线能量的准确度取决于全能峰位的准确性。这将与谱仪的稳定性、能量刻度线及增益漂移有关。因此，一台好的谱仪必须具有长时间的稳定性。

# 三、实验内容

1. 测 $^{137}\text{Cs}$ 能谱并计算能量分辨率
2. 测能量刻度曲线
3. 确定未知源的能量.
- \*4. 测定装饰材料等的放射性活度. 很多装饰材料都含有一定的放射性物质,

# 四、思考与讨论

1. 用闪烁 $\gamma$ 能谱仪测量单能 $\gamma$ 射线的能谱，为什么呈连续的分布？
2. 反散射峰是怎样形成的？如何从实验上减小这一效应？
3. 能量分辨率产生的原因是什么？
4. 为什么要测谱仪的线性？谱仪线性主要与哪些量有关？线性的好坏对我们有何意义？如何测谱仪的线性？
5. 能量刻度测量 $^{60}\text{Co}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的能谱时，其工作条件不同行不行？为什么？
6. 若有一能量为 $1.9\text{MeV}$ 的单能 $\gamma$ 射线源，请预言其谱形。