

# 物质对β射线的吸收（二）

## 预备知识

射线与物质的相互作用，使射线通过一定厚度的物质后，能量或强度有一定的减弱，称为物质对射线的吸收。研究物质对射线的吸收规律及不同物质的吸收性能等，在了解核性质和核参数、防护核辐射、核技术应用和材料科学等许多领域都有重要的意义。

### 1、如何获得 β 射线？

β 射线是指放射性核素发生 β 衰变时所释放出的高能量电子。本实验中采用  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  放射源出射的 β 射线，其衰变纲图如下图 1。由于发生β衰变的原子核在发射电子的同时还放出中微子，两者分配能量的结果导致发射出的电子能谱为 0 至最大动能 $E_{\text{max}}$ 之间连续分布的能谱。

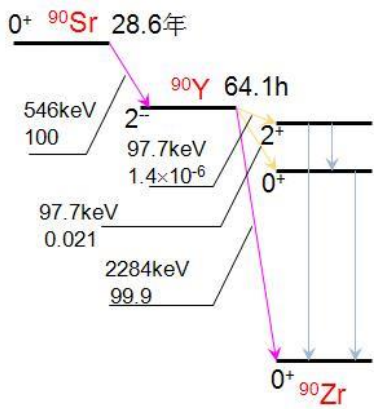


图 1  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  放射源的衰变纲图

（紫红色箭头：β 衰变）

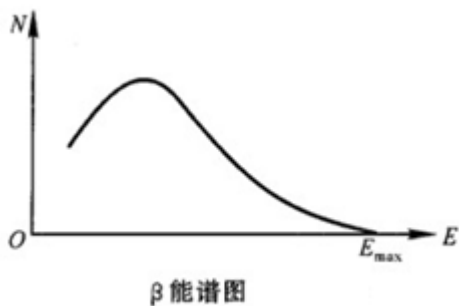


图 2 β 射线能谱

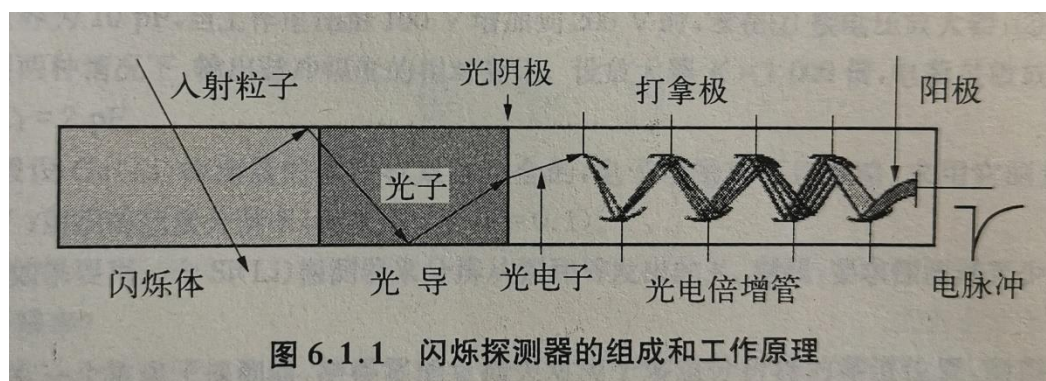
### 2、如何探测 β 射线？

闪烁探测器是一种相当成熟、使用非常广泛的探测器，它的发明已有 100 多年的历史。本实验中测量核辐射的仪器为 NaI 闪烁探测器，或 LYSO 闪烁 (Scintillation)能谱仪。它们是固体型的核辐射探测器。其功能是记录射线中不同能量的粒子的数目，形成能谱。

与其他探测器比较，闪烁探测器具有显著的特点。第一，能够探测各种类型

的粒子，包括中性粒子，并能测量它们的能量和性质，可以在各种场合与复杂环境中使用。第二，闪烁体可以是固体和液体介质，又可以加工很大尺寸，因此其探测效率很高。第三，有较小的分辨时间，允许在高计数率场合工作，这对时间测量有重要意义，可以在较强的粒子源场合与符合测量中使用。

典型的闪烁型探测器装置如下图 6.1.1 所示，由闪烁体、光导、光电转换器件（如：光电倍增管）和电源组成。



闪烁探测器的工作原理同气体探测器和半导体探测器不同。当粒子进入闪烁体时，入射粒子损失部分能量或全部能量，使闪烁体的原子和分子电离或激发，在退激发过程中发出一定波长的光。利用光导和反射物使大部分荧光光子被收集到光电倍增管的光阴极上，这些荧光光子打在光阴极上发出光电效应，产生光电子，光电子在光电倍增管中倍增，最后被阳极收集产生电压脉冲，输入电子学仪器被记录下来。

从粒子射入闪烁探测器内损失能量转变为电信号，可分为以下几个阶段：

- (1) 粒子进入闪烁体内使原子或分子激发和电离，从而损失能量。
- (2) 受激的原子或分子在退激发时，发射可见光范围内的荧光光子。
- (3) 光阴极吸收光子发射光电子。
- (4) 光电子在光电倍增管中倍增，最后到阳极形成电压脉冲。
- (5) 这个脉冲通过成形后由射极跟随器或前置放大器输出，被电子学仪器分析记录。

由以上讨论可知，闪烁探测器的输出脉冲的幅度与入射粒子能量成正比。选择光产额大的晶体，提高光阴极的光电转换效率、电子传输系数和光电倍增管的放大倍数，都可以使输出脉冲幅度增大。

## 物质对 $\beta$ 射线的吸收（二）

本实验包含二个方面的内容。其一，验证从放射源辐射出的高能 $\beta$ 粒子，它的动量与动能之间关系，是满足爱恩斯坦狭义相对论的关系，还是牛顿经典力学关系？其二，测量物质（铝吸收片）对单能 $\beta$ 射线的吸收曲线，并与“ $\beta$ 射线的吸收（一）”的实验结果进行对比。

### 实验目的

- 1、学习产生单能电子束的原理；
- 2、学习 $\beta$ 磁谱仪的原理与使用；
- 3、学习闪烁能谱仪的使用；
- 4、验证高速电子的动量与动能关系；
- 5、测量吸收片对单能电子束的吸收曲线。

### 实验原理

#### 1、怎么测量电子的动量？

本实验采用半圆聚焦 $\beta$ 磁谱仪测量电子的动量，图 1 为 $\beta$ 磁谱仪与闪烁能谱仪的原理框图。垂直于匀强磁场入射的电子由于受洛伦兹力作用而循半圆轨道运动，若轨道半径为  $R$ ，则电子的动量  $p$ ：

$$p = eBR \quad (1)$$

其中  $e$  为电子电量， $B$  为磁感应强度，在实验中为已知量。可见，只要用直尺测出轨道半径  $R$  就可以得到从探测器前端狭缝处出射的电子动量。本实验所用的磁

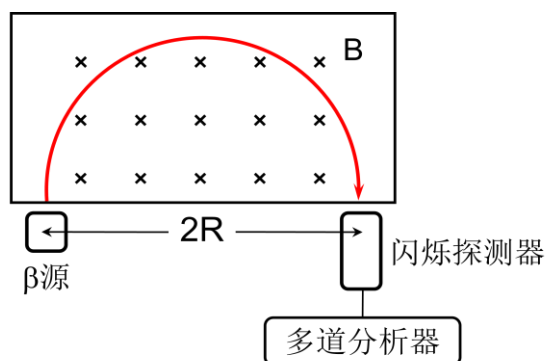


图 1 半圆聚焦 $\beta$ 磁谱仪与闪烁能谱仪示意图

谱仪的动量分辨率 $\varepsilon_p$ 为:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta R}{R} \quad (2)$$

## 2、怎么测量电子的动能?

实验中利用 NaI(Tl)闪烁能谱仪测量电子的动能  $E$ 。由于动能的大小与能谱的峰位  $N$  是成线性关系的,

$$E = aN + b \quad (3)$$

式中  $E$  为  $a$ 、 $b$  为待定系数。

若测得几个已知能量粒子的峰位, 则能对该线性关系进行能量定标 (参考本讲义附录一“能谱仪定标原理”)。定标后的能谱仪就能直接用于测量入射电子的动能。关于闪烁能谱仪的具体知识请参考“ $\gamma$ 射线能谱”实验。在此需要注意的是闪烁体前有一厚度约  $200\mu\text{m}$  的铝质入射窗, 当电子穿过铝窗时会有部分能量损失, 因此在测量电子的动能时必须考虑这部分损失的能量  $\Delta E$ 。

## 3、高速电子的动量与动能关系

经典力学给出运动物体的动量  $p$  与动能  $E_k$  间的关系为:

$$E_k = \frac{p^2}{2m_0} \quad (4)$$

其中 $m_0$ 为粒子的质量, 在经典力学中是不变的。

根据狭义相对论, 物体的质量与相对于观测者的速度 $v$ 有关:

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (5)$$

当 $v=0$ 时即为静止质量 $m_0$ 。

物体的动能 $E_k$ :

$$\begin{aligned}
 E_k &= E - E_0 \\
 &= \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0 c^2 \\
 &= \sqrt{\frac{m_0^2 v^2 c^2}{1 - v^2/c^2} + \frac{m_0^2 c^4 - m_0^2 v^2 c^2}{1 - v^2/c^2}} - m_0 c^2 \\
 &= \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} - m_0 c^2
 \end{aligned} \tag{6}$$

根据式(4)、(6)两式描绘的动量与动能关系见图2, 可见低速时相对论中的 $pc \sim E_k$ 曲线与经典力学中的曲线很接近, 但在高速时两者间有显著的区别。

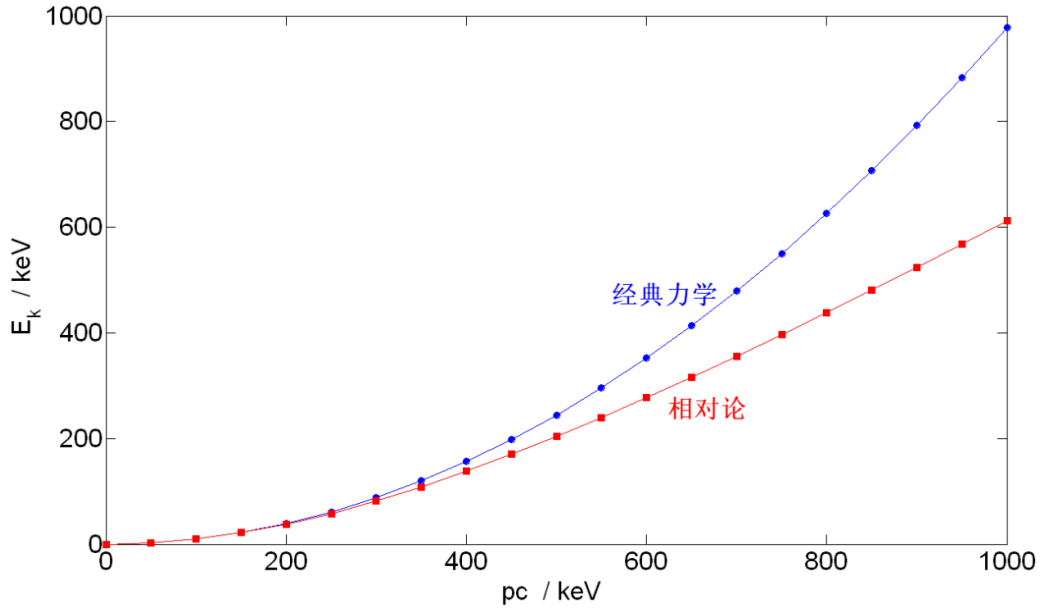


图2 动量与动能的关系曲线

为了计算方便, 实验中的动量可用 $pc$ (动量与光速的乘积)表示, 这样式(1)可转换为:

$$\begin{aligned}
 pc &= eBRc \quad (J) \\
 &= \frac{eBRc}{10^6 \cdot e} = 300BR \quad (MeV)
 \end{aligned} \tag{7}$$

$pc$ 单位为 MeV, 磁感应强度  $B$  的单位是 T, 半径  $R$  的单位是 m。

#### 4、怎么获得单能电子束？

由于发生 $\beta$ 衰变的原子核在发射 $\beta$ 粒子的同时还放出中微子，两者分配能量的结果导致发射出的 $\beta$ 粒子能谱为 0 至最大动能 $E_{\max}$ 之间连续分布的能谱，在磁谱仪中的偏转半径也各不相同，具有相同动能的 $\beta$ 粒子在 $\beta$ 磁谱仪中的偏转半径也相同。据此，我们可以在闪烁探头前开一条与磁场平行的狭缝，只让某一偏转半径的 $\beta$ 粒子进入闪烁探测器。只要狭缝足够窄，就可以认为进入闪烁探测器的就是单能电子束，闪烁能谱仪测出的就是该单能电子束的能谱。

#### 5、测量物质对单能电子束的吸收曲线

当一定能量的  $\beta$  射线通过物质时，与该物质原子或原子核相互作用而损失能量，强度会逐渐减弱，即在物质中被吸收。电子与物质相互作用导致强度减弱的机制主要有三种：

第一，电子与物质原子的核外电子发生非弹性碰撞，使原子激发或电离，电子以此种方式损失能量称为电离损失。电离损失的能量与入射电子的速度、物质的原子序数、原子的平均激发能等因素有关。

第二，电子受物质原子核库仑场的作用而被加速，根据电磁理论作加速运动的带电粒子会发射电磁辐射，称为轫致辐射，使电子的部分能量以  $x$  射线的形式放出，称为辐射损失。这主要在能量较高的电子与物质相互作用时发生。辐射损失与物质的  $Z^2$  成正比，与入射电子的能量成正比。

第三， $\beta$  射线在物质中与原子核的库仑场发生弹性散射，使  $\beta$  粒子改变运动方向，因电子质量小，可能发生比较大角度的散射，还可能发生多次散射，因而偏离原射束方向，使入射方向上的射线强度减弱，这种机制称为多次散射。如果散射角超过  $90^\circ$ ，称为反散射。

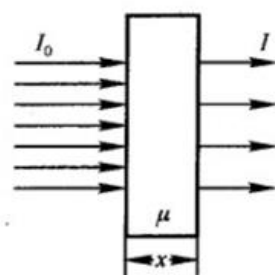


图 4.3.2-1 物质吸收  $\beta$  射线示意图

考虑一束初始强度为  $I_0$  的单能电子束，当穿过厚度为  $x$  的物质时，强度减弱为  $I$ 。强度  $I$  随厚度  $x$  的增加而减小且服从指数规律，可表示为：

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (8)$$

式中  $\mu$  是该物质的线性吸收系数。实验指出，不同物质的线性吸收系数有很大的差别，但随原子序数  $Z$  的增加，质量吸收系数  $\mu_m = \mu / \rho$  ( $\rho$  是该物质的密度) 却只是缓慢地变化，特别是很多时候不容易精确测量吸收片的厚度，因而常用质量厚度  $d = \rho \cdot x$  来代替线性厚度  $x$ ，单位通常为  $\text{g/cm}^2$ 。于是式 (8) 变为：

$$I = I_0 e^{-\mu_m d} \quad (9)$$

对单能电子束，通常定义通过吸收物质后，射线强度降低到  $I/I_0 = 10^{-4}$  时，所对应的吸收物质厚度为  $\beta$  射线的射程  $R$ 。

目前物质对  $\beta$  射线的吸收规律广泛应用于监测膜厚、监测 PM2.5&PM10、辐射防护等许多领域。

## 实验仪器

闪烁 $\gamma$ 能谱仪	半圆聚焦 $\beta$ 磁谱仪	吸收片
$^{137}\text{Cs}$ 放射源	$^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$ 放射源	电子秤
狭缝	直尺	

## 实验内容

本实验用半圆聚焦 $\beta$ 磁谱仪测量电子的动量，用 NaI(Tl)闪烁能谱仪测量电子的动能， $\beta$ 源为  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  放射源，强度约  $10^5\text{Bq}$ ，定标源为  $^{137}\text{Cs}$  放射源。有关使用放射源的注意事项请参考“ $\gamma$ 能谱”实验讲义的相应内容。

- (1) 在探头前端放置  $^{137}\text{Cs}$  放射源。接通电源，调整探测器高压，将  $^{137}\text{Cs}$  源  $0.662\text{MeV}$   $\gamma$ 射线的全能峰峰位调至 280 ~ 300 道，预热约 30 分钟。
- (2) 探头预热期间，请阅读实验室的仪器说明书，熟悉半圆聚焦 $\beta$ 磁谱仪、NaI(Tl)闪烁能谱仪的结构和使用方法，遵守实验室关于使用放射源的注意事项。
- (3) 1、2、3 号实验台，测量  $^{137}\text{Cs}$  的 $\gamma$ 光子能谱 10 分钟左右。根据其全能峰与

反散射峰的位置对能谱仪进行能量定标，定标方程见公式（3）。能谱定标后，用来测量电子能量时，能量修正值参考实验室提供的数值（1、2、3号实验台  $\Delta E$ : 0.21、0.20、0.09MeV）。4、5号实验台是新仪器，使用探头内含的  $^{176}\text{Lu}$  微量元素能谱的三个特征峰进行定标。有关三条谱线的能量数值，参见“附录一”中给出的值。目前暂无确定的  $\beta$  射线穿过探测器薄窗口后的能量损失修正值  $\Delta E$ 。

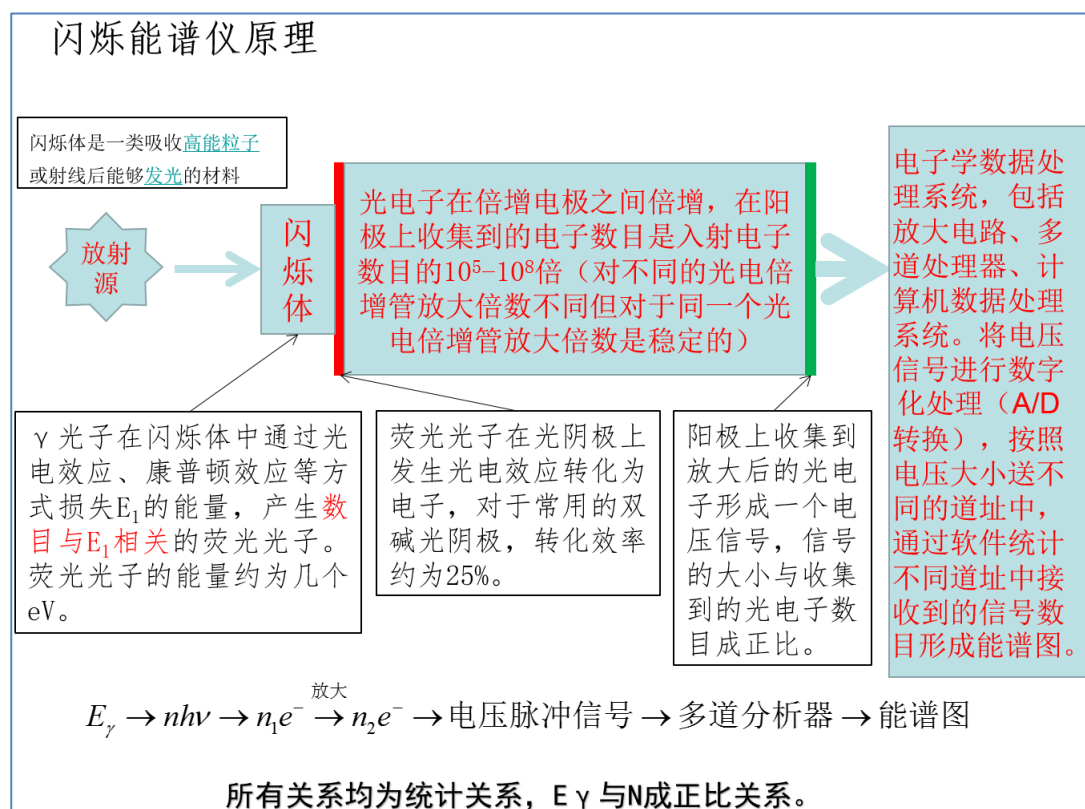
能量 $E$ (MeV)			
峰位 $N$			
待定系数	a=		b=

- (4) 将  $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$  放射源置于探头狭缝前，观察并手绘  $\beta$  能谱的示意图。
- (5) ①由于 1 号、2 号和 3 号实验台的  $\beta$  射线放射源，放置在 10cm 处，那么，在 23.0 ~ 34.0cm 范围内改变闪烁探测器的位置，记录探测器在不同位置处的电子能谱峰位。共记录 8 组数据，每组测 5 分钟。②第 4、5 号实验台 LYSO 探测器放置在 0cm 处固定，那么，在 13.0 ~ 23.0cm 范围内改变放射源的位置，记录放射源在不同位置处的电子能谱峰位。
- (6) 记录磁感应强度  $B$  的值。计算上述数据对应动量和动能，画出散点图（实验曲线），并与经典力学、相对论中的动能 ~ 动量的二个理论曲线进行比较。
- (7) 将探头移动至 28.0cm （第 4、5 号实验台源移至 18cm） 处，计算该处  $\beta$  射线的动能，列表计算并绘出铝片对该处出射的（单能） $\beta$  射线的吸收曲线（测量时间为 5 分钟，强度取能谱末端 150 道总计数）。

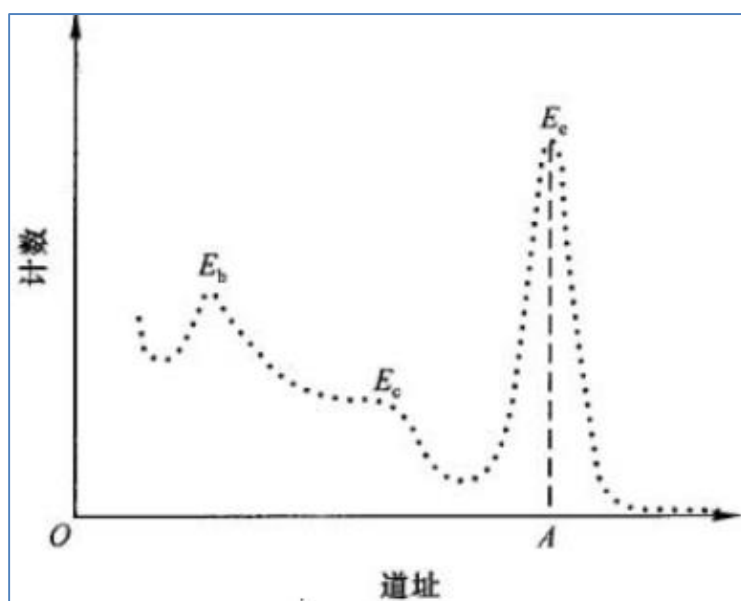


## 附录一 闪烁能谱仪定标原理

1、2、3 号实验台，使用 NaI 探测器和多道分析仪。它观测到能谱中，道址与能量之间，可用  $^{131}\text{Cs}$  源  $\gamma$  射线能谱的二个特征峰来标定（定标）。



本实验中，先使用  $^{131}\text{Cs}$  源放出的  $\gamma$  射线，对 NaI 闪烁探测器进行定标。形成的能谱如下图所示。



在电脑中可以看到（如上方图所示）类似的能谱图，横坐标为道址，代表了  $\gamma$  射线的能量，纵坐标为相应能量粒子的计数。

图中  $E_e$  为  $\gamma$  光子的全能光电峰 0.662 MeV

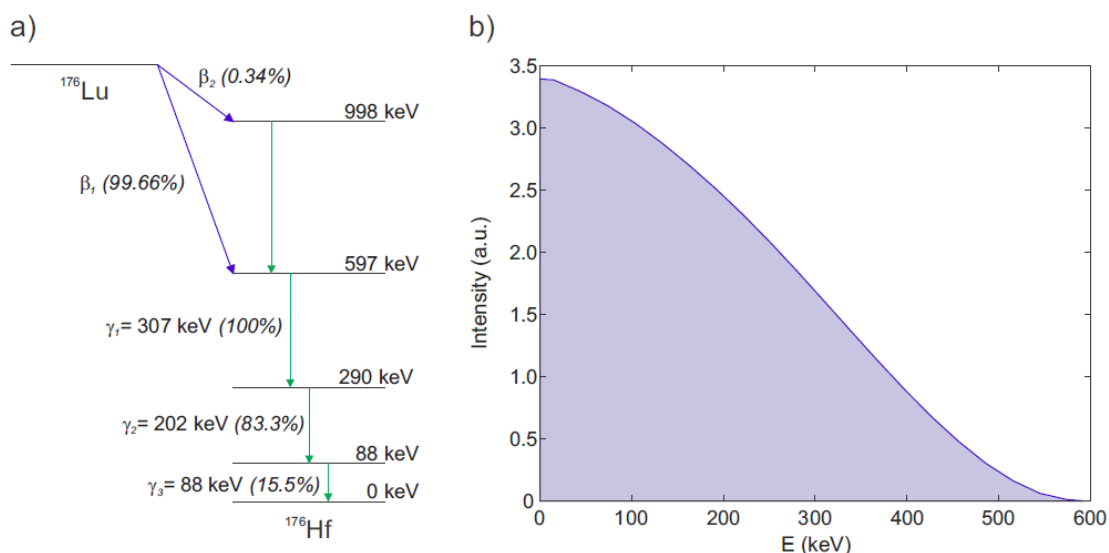
$E_b$ 为背散射峰 $E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_0 c^2}(1 - \cos\theta)}$ , 对应  $\theta = 180^\circ$  散射。 $E_c$ 为康普顿边界。

已知能谱图中能量与道址成线性关系： $E = kN + b$ 。我们选取  $^{137}\text{Cs}$  全能峰与背散射峰进行定标，只要在能谱图中找到他们所对应的道址就能求出  $k$  和  $b$ 。

本实验利用上述 NaI 闪烁探测器，也可以测量单能电子峰的能量。道址  $N$  与电子能量  $E$  之间关系，利用上述公式进行转化和换算， $E = kN + b + \Delta E$ 。式中  $\Delta E$  表示高能电子进入闪烁探测器（薄铝片）窗口后的能量损失。

**4、5 号实验台使用 LSO/LYSO 探测器，内含  $^{176}\text{Lu}$  微量放射性元素。观测到的本底能谱上有三个特征峰，可用来定标探测器观测的能谱。**

另 2 套“ $\beta$  吸收二”实验新仪器，探头使用的晶体是 LSO/LYSO。(LSO) Lutetium Oxyorthosilicate or (LYSO) Lutetium Yttrium Oxyorthosilicate are the scintillatormaterials (闪烁物质)。内含有  $^{176}\text{Lu}$  微量放射性元素。它的衰变能纲图如下(a)所示。定标使用的能量（峰）分别为：597KeV、290KeV、88KeV。



(a)Simplified  $^{176}\text{Lu}$  decay scheme

(b) $\beta$ -particle energy spectrum corresponding to the  $\beta_1$  transition

在电脑中看到的 LYSO 本底能谱【 $\gamma$  射线与  $\beta$  射线的级联】图，如下图所示。三个特征能量峰分别为：597KeV、290KeV、88KeV。

