

浅析NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪实验的数据处理

复旦大学物理系 徐迪飞 08300190012

摘要: γ 能谱实验通过测定 ^{137}Cs 的 γ 能谱来定标所使用的 γ 能谱仪,进而计算 ^{60}Co 、 ^{22}Na 的反射峰、康普顿边缘、特征X射线峰能量。本文针对数据处理中能量定标线的零道能量是否应该为零提出质疑,并按照实验情况作出一些分析与讨论,最后计算。

关键词: γ 能谱 ^{137}Cs 定标线 零道能量

1 引言

测量 γ 射线的强度和能量是核辐射探测的一个重要方面。在核物理研究中,测量原子核的激发能级、研究核衰变纲图、测定短的核寿命及进行核反应试验等,都需要测量 γ 射线。在放射性同位素的工业、农业和科学研究的各种应用中也经常使用 γ 射线和要求进行 γ 射线的各种测量。由于有较高的探测效率,保管和使用都较为方便,一般情况下使用NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪进行实验。

2 原理

2.1 γ 射线与物质相互作用的一般特性

NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪是通过 γ 光子与NaI(Tl)单晶的相互作用来探测 γ 光子和它的能量的。 γ 光子是不带电的中性粒子,因此它与物质的相互作用与带电粒子有显著的差别。 γ 射线与物质的相互作用主要有三种方式:光电效应,康普顿散射和电子对效应。

光电效应 入射 γ 粒子把能量全部转移给原子中的束缚电子,而把束缚电子打出来形成光电子。由于束缚电子的电离能 E_1 一般远小于入射 γ 射线能量 E_r ,所以光电子的动能近似等于入射 γ 射线的能量 $E_{\text{光电}} = E_r - E_1 \sim E_r = h\nu$ 。

康普顿散射 在康普顿散射中, γ 光子与原子的自由静止的电子发生非弹性碰撞,一部分能量转移给电子,使它脱离原子成为反冲电子,而 γ 光子则被散射,散射光子的能量和运动方向都发生变化,如图2.1-1所示。

根据能量和动量守恒定律,不难证明反冲电子的能量 $E_e = E_r - E_r'$,散射光子的能量 E_r' 与散射角

$$E_r' = \frac{E_r}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}, \text{ 其中 } \alpha = E_r/m_0c^2$$

为入射光子能量与电子静止能量之比。康普顿电子的能量是连续分布的,从零到最大值 $2\alpha E_r/1 + 2\alpha$ 。

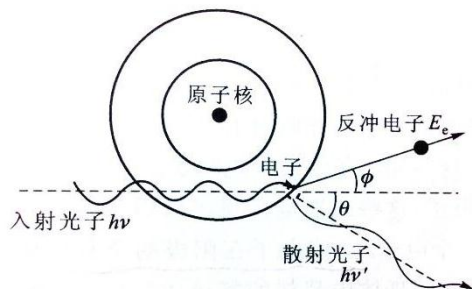


图 2.1-1 康普顿散射示意图

电子对效应 当 γ 光子的能量大于 $2m_0c^2$ 时, γ 光子在原子核或电子的库仑场的作用下,可能转化为正、负电子对。在物质中,正电子的寿命是很短的,当动能耗尽便与物质原子的轨道电子发生湮灭,与此同时产生两个运动方向相反,能量均为 0.511MeV 的 γ 光子。

2.2 NaI(Tl) γ 能谱仪

NaI(Tl)能谱仪结构如图 2.2-1 所示。

整个仪器由探头（包括闪烁体、光电倍增管）、电子仪器两部分组成。

当射线进入闪烁体时， γ 射线与闪烁体相互作用产生次级电子发出荧光。闪烁体的发光强度与射线在闪烁体内损失的能量成正比。不带电的 γ 射线通过闪烁体时，先在闪烁体内产生光电子、康普顿电子及正、负电子对，然后这些电子使闪烁体内的分子或原子激发和电离而发光。闪烁体发出的光子被闪烁体外的光反射层反射，会聚到光电倍增管的光电阴极上，打出光电子。光电子在光电倍增管中倍增出大量电子，最后为阳极吸收形成电压脉冲。每产生一个电压脉冲，探测器就会在相应道数的储存器中加 1。

由于电压脉冲幅度与粒子在闪烁体内消耗的能量（产生的光强）成正比，所以根据脉冲幅度的大小可以确定入射粒子的能量，利用脉冲幅度分析器可以测定 γ 光子的能谱图。

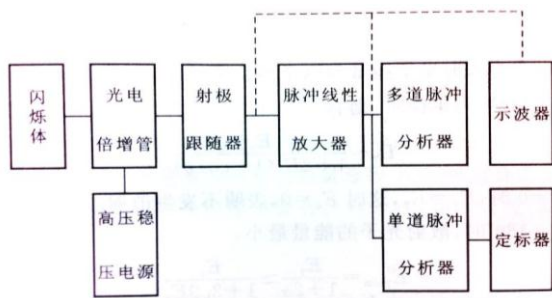


图 2.2-1 NaI(Tl) 能谱仪

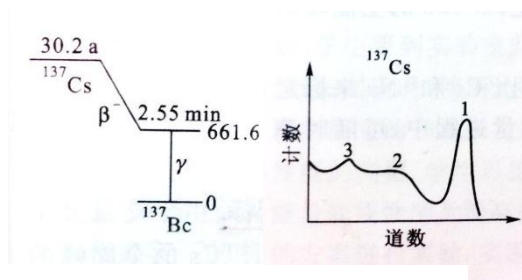


图 2.3-1 ^{137}Cs 的衰变图与能谱图

2.3 γ 能谱

图 2.3-1 是 ^{137}Cs 的衰变图与能谱图，在图中标出了能谱的 X 射线峰、反散射峰、康普顿平台、康普顿边缘。1 号为全能峰，包含光电效应和多次效应的贡献，其幅度与 γ 射线的能量成正比；3 号为反散射峰，是光子被 180 度康普顿散射回闪烁体被能谱仪记录下来的，能量在 200KeV 左右。康普顿散射中的散射光子逃逸晶体时，留下的反冲电子形成了一个能量连续分布的电子谱，即 2 号平台状曲线，称为康普顿平台。3 号峰左侧非常接近横坐标零点处为 X 射线峰（图中未标出），是原子外壳层的特征 X 射线贡献的。实验使用三种放射源， ^{137}Cs ， ^{60}Co ， ^{22}Na 。使用 ^{137}Cs ， ^{60}Co 来标定能谱探头，进而计算不同放射源的 X 射线峰、反散射峰、康普顿平台、康普顿边缘能量。

3 测量分析

3.1 测量 ^{137}Cs ， ^{60}Co 的能谱（参数：微分 0.5，积分 0，增益 5.0，电压 605V）

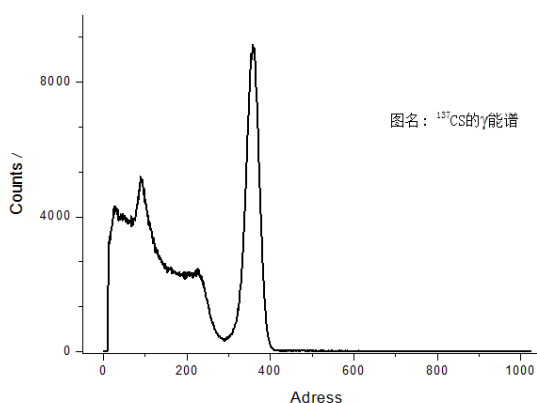


图 3.1-1 ^{137}Cs 的能谱

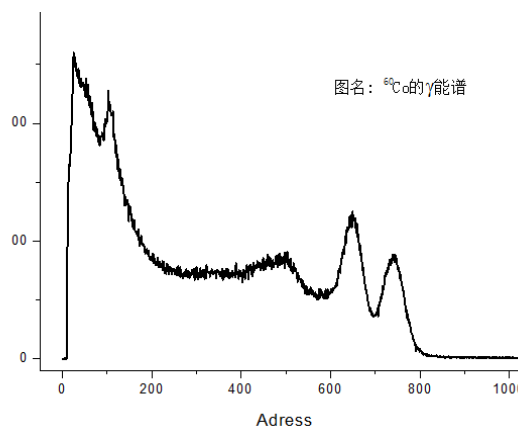


图 3.1-2 ^{60}Co 的能谱

3.2 定标能谱探头

由于 ^{137}Cs 与 ^{60}Co 的光电峰较尖锐，峰位容易读准，所以使用它们的光电峰来定标。

源	峰对应能量/MeV	峰位/道
^{137}Cs	0.662	357
^{60}Co	1.17	649
	1.44	741

表 3.2-1 ^{137}Cs 与 ^{60}Co 的光电峰位置与对应能量

使用 Origin 8.0 作直线拟合

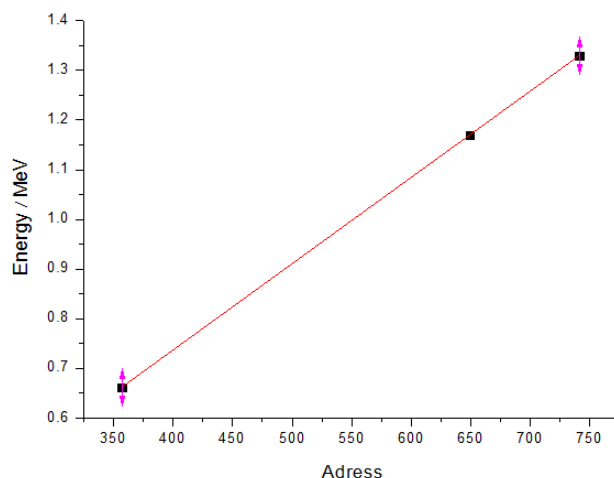
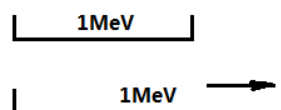


图 3.2-1 能谱仪定标线

拟合结果 斜率 $0.00174\text{MeV}/\text{道}$ 截距 0.04096MeV $R=1$

3.3 零道能量

能谱仪能调节能量与道数的关系的参数有高压以及增益，高压越高、增益越大，某一特定的道数对应的能量越大，调节高压与增益实际是一种对尺度的缩放，如右侧示意图。缩放的不动点应该在应该固定在零点（零道），对应能量为零是最为理想，否则有一段能谱（零道之前）是无法记录的。



从拟合的结果来看，能量与道数的关系为 $y(\text{MeV}) = 0.00174x(\text{道}) + 0.04096$ 。让我们考虑一下 $x=0$ 的情况（即道值为零处），拟合结果给出的能量（零道能量）为 0.04096MeV ，并不为零，与预想的不一样。这是实验中引入的误差，还是本身零道能量就不为零？是否有必要将拟合曲线固定过原点？为了能更准确地定标能谱探头，必须做一定的讨论。

能够影响定标直线的实验误差很大程度上取决于光电峰有没有读准。但是 ^{137}Cs 与 ^{60}Co 的光电峰都很尖锐，道址改变 1 计数改变 200 以上，而且环境的辐射本底均处在道址很低的地方（即能量较低的地方），由光电峰引入的误差是非常小的。所以，基本排除是实验误差所导致，认为可能是试验仪器的本身零道能量就不为零。

为了验证是否实验仪器本身的零道能量就不为零，可以适当改变能谱仪参数，重新测量 2 组 ^{137}Cs 的 γ 能谱：

图 3.3-1 参数：微分 0.5，积分 0，增益 5.2，电压 636V

图 3.3-2 参数：微分 0.5，积分 0，增益 9.0，电压 636V

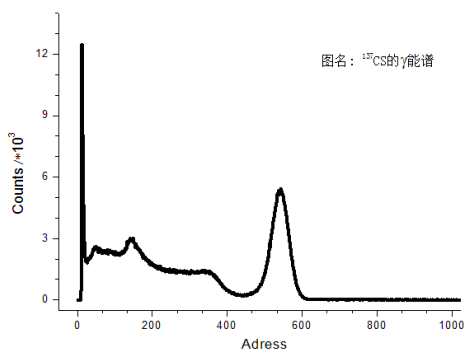


图 3.3-1

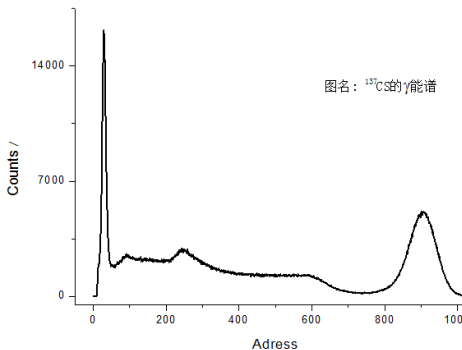


图 3.3-2

	光电峰位	反散射峰位	比值
图 3.3-1	543	145	3.74
图 3.3-2	907	249	3.64
图 3.1-1	357	89	4.01

表 3.3-1 3 幅 ^{137}Cs γ 能谱图光电峰位与反散射峰位

综合分析 ^{137}Cs 的 3 幅能谱图可以知道，如果能量与道数成正比（即零道能量为零），即使改变电压或增益，也只是改变了能量的尺度，特定的峰位之比（如光电峰位与反散射峰位之比）应该是个定值。但是从表 3.3-1 中可以明显看出，特定峰位之比不是定值，也就是说零道能量并不为零，真正的零能量应该在负的道数上。

不仅如此，在调整了参数之后，可以看到很明显的 ^{137}Cs 的 X 射线峰(图 3.3-1、图 3.3-2)，但是在图 3.1-1 中并不能看到 X 射线峰。因为 ^{137}Cs 的 X 射线峰的能量为 30.85KeV ，使用之前拟合的结果 $y(\text{MeV}) = 0.00174x(\text{道}) + 0.04096$ 计算 X 射线峰的峰位是小于零的，所以在图上 3.1-1 上看不到。

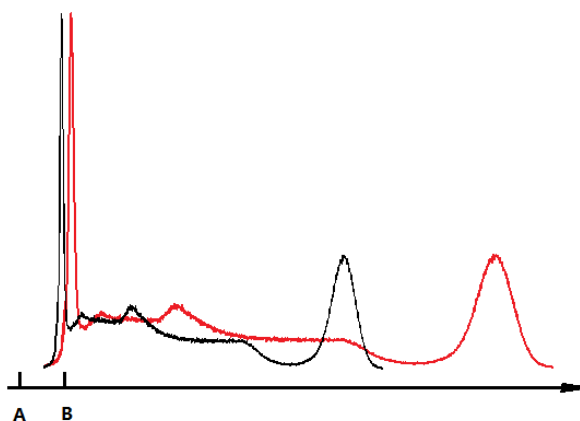


图 3.3-3 尺度缩放示意图

从图 3.3-3 也可以比较直观地了解到为什么看不到 X 射线峰。实际零能量对应的道值为 A，B 是零道址。通过调节电压、增益，原先红色的能谱缩小为黑色的能谱线。原先 X 射线峰在 B 右侧，所以在能谱图上能看见；调节参数后，X 射线峰的道址变到了 B 左侧，自然在能谱图上看不到了。这正好从侧面证明了，零道能量的确不为零。

所以综上，数据处理中不需要将定标直线固定使之过原点。

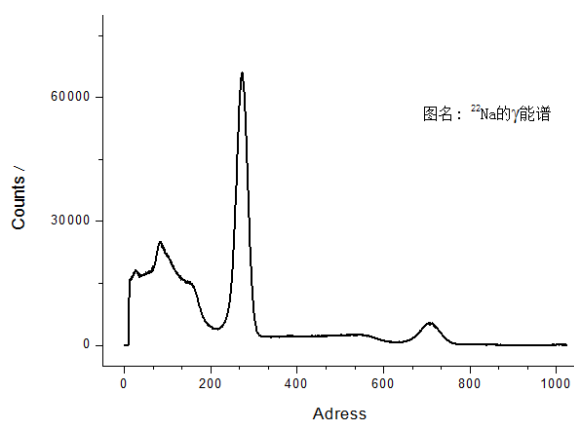
3.4 测定 ^{22}Na 的光电峰能量 (参数: 微分 0.5, 积分 0, 增益 5.0, 电压 605V)图 3.4-1 ^{22}Na 的能谱

图 3.4-1 中最高的峰为 β^+ 湮灭峰, 道址 273 道。带入定标线 $y = 0.00174x + 0.04096$ 计算其对应能量为 $y = 0.00174 \times 273 + 0.04096 = 0.516 \text{ MeV}$ 。查阅资料可知其理论值为 0.511 MeV , 误差 $\eta = (0.516 - 0.511) / 0.511 \times 100\% = 0.978\% \approx 1\%$, 结果令人满意。

4 结论

通过分析讨论比较, 确定能量定标值线不过原点, 即零道能量不为零。使用拟合曲线计算 ^{22}Na 的 β^+ 湮灭峰能量, 结果相对误差 $< 1\%$, 结果令人满意。

5 致谢

感谢乐永康老师带病指导实验, 并且认真批复实验报告、答疑解惑。同样感谢同伴苗子齐同学, 在他的帮助下, 通过与他的共同努力与讨论实验才得以顺利完成。

6 参考文献

- [1] 戴道宣、戴乐山, 近代物理实验, 北京高等教育出版社, 2006:200~223 页