

NaI (Tl) 单晶 γ 能谱仪

董佳垚 (复旦大学材料科学系)

摘要: 调整 NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪, 测量 γ 射线的能谱, 分析 γ 射线的能谱, 然后测量能谱仪的性能和标定它的能量定标曲线, 处理数据并与理论值进行比较。

关键词: NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪 γ 射线 能谱

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实验等, 都需要测量 γ 射线。在放射性同位素工业、农业、医疗和科学研究的各个应用中, 也经常使用 γ 射线和要求进行 γ 射线的各种测量。NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪则有较高的探测效率, 保管和使用都较为方便, 所以一般情况下尽可能使用 NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪。

1 基本原理

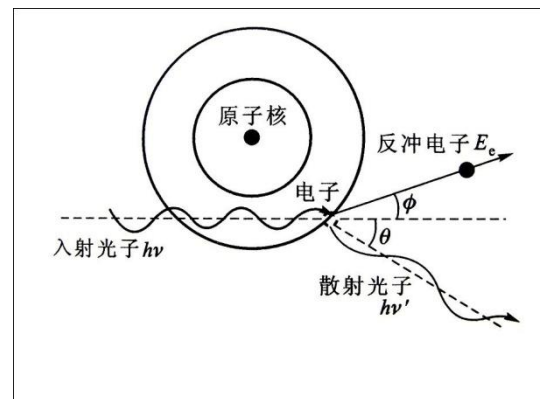
1.1 γ 射线与物质相互作用的主要三种方式: 光电效应, 康普顿散射和电子对效应。

1.1.1 光电效应

光电效应是指物质在电磁辐射照射下释放出电子的现象, 释放出的电子称为光电子。当入射 γ 光子 (能量= $h\nu$) 与物质原子中的束缚电子作用时, 光子有可能把全部的能量都转移给电子, 而把束缚电子从原子中打出来, 光子本身则消失掉。由于 γ 光子能量远大于电子的束缚能, 所以近似的认为光电子动能等于入射 γ 光子的能量。

$$E_{\text{光电}} = E_{\gamma} - E_i \sim E_{\gamma} = h\nu$$

1.1.2 康普顿散射 (康普顿效应)



γ 光子与原子的自由与静止的电子发生非弹性碰撞, 一部分能量转移给电子, 使他脱离原子成为反冲电子, 而 γ 光子则被散射。

散射光子的能量与散射角的关系

$$E_e = E_{\gamma} - E'_{\gamma}$$

$$E'_{\gamma} = \frac{E_{\gamma}}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)}$$

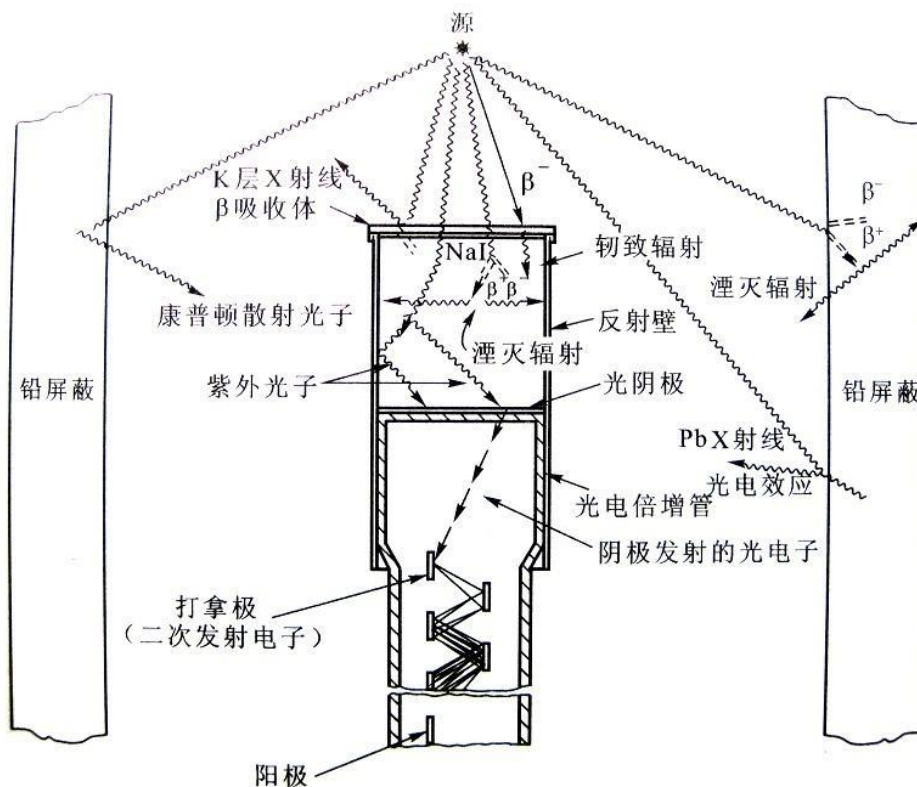
$$E'_{\gamma} \sim \frac{E_{\gamma}}{1 + 2E_{\gamma}(1 - \cos \theta)}$$

由于 θ 在 $0-180^{\circ}$ 之间连续变化, 所以康普顿电子的能量是连续分布的。

1.1.3 电子对效应

当 γ 光子的能量大于 $2m_0c^2$ (即 1.022MeV) 时, γ 光子在原子核或电子的库伦场的作用下可能转化为正负电子对,这一反应成为电

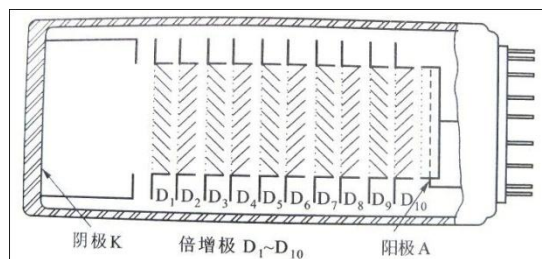
子对效应,在物质中正电子的寿命是很短的,当动能耗尽,便于物原子的轨道电子发生湮灭,与此同时产生两个运动方向相反,能量均为 0.511MeV 的 γ 光子。

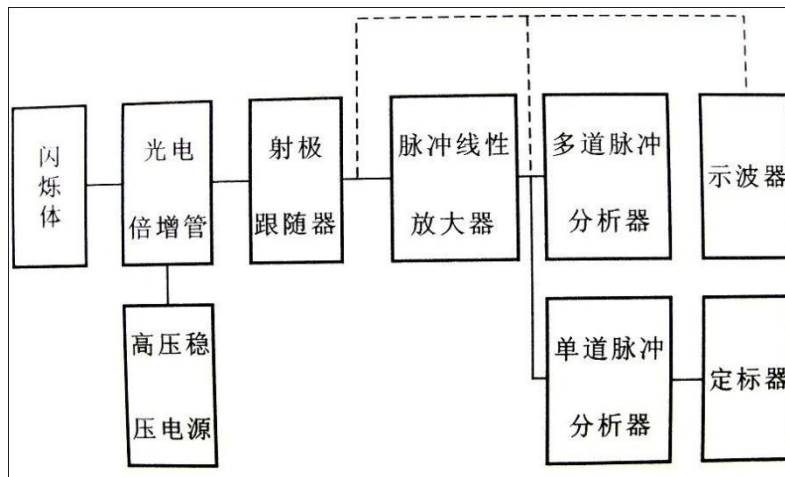


1.2 γ 能谱仪

γ 射线与闪烁体相互作用,产生次级电子,闪烁体洗手射线产生的次级电子的能量而时闪烁体的原子,分子电离和激发,退激时发射出大量的荧光光子,利用反射物和光导将荧光光子尽可能多的手机到光电倍增管的光阴极上,荧光光子打到光阴极时,由于光电效应,他将产生光电子,这些光电子经级间电场加速和聚焦后,打在第一打拿级

上,产生 3-6 个二次电子,这些二次电子再经过以后各级打拿级上的倍增,在阳极上可以接收到 $10^4 - 10^9$ 个电子。这些电子在阳极的负载电阻上输出电压脉冲,由于荧光光强与 γ 光子在闪烁体内消耗的能量成正比,而荧光光强又与光电倍增管阳极上输出地电压脉冲的幅度成正比,所以我们可以根据脉冲幅度确定入射 γ 光子能量。

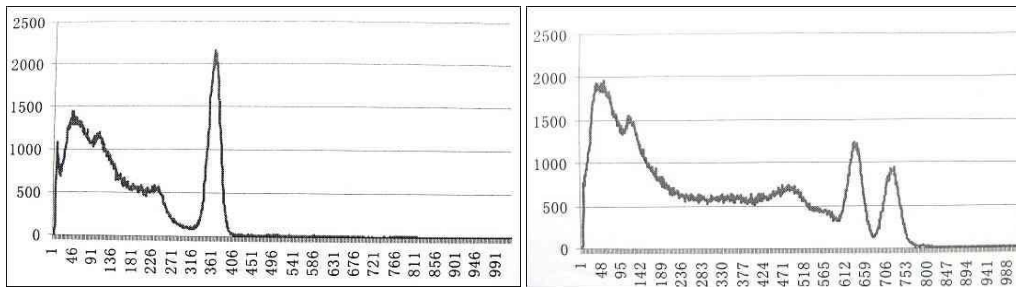




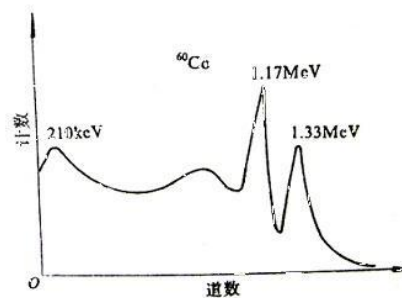
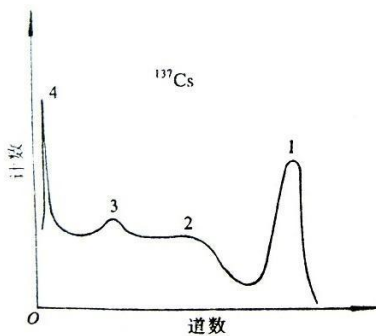
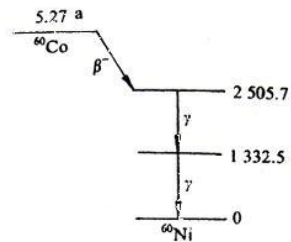
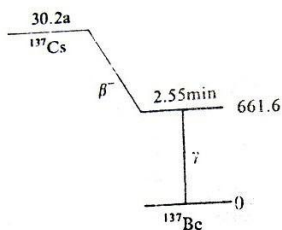
2 定标及数据处理

2.1 用 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 对能谱仪进行定标。

参数设定为高压 727V，增益 500。



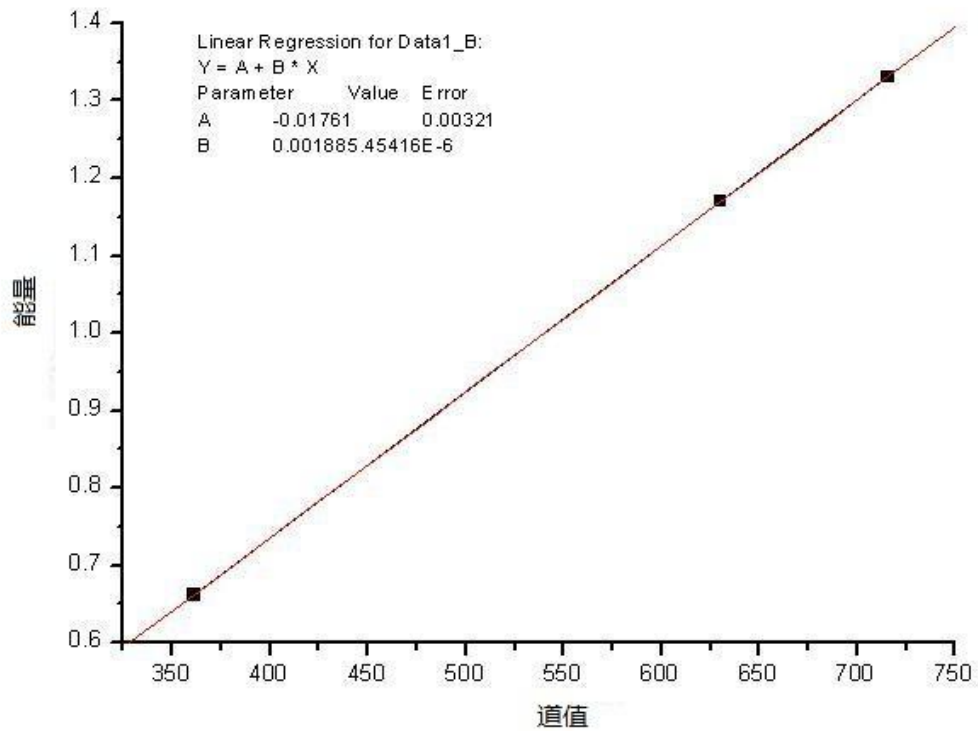
分别得到 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的能谱图，根据预先的理论数据，分别得到



分别得到 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的能谱图，根据预先的理论数据，分别得到

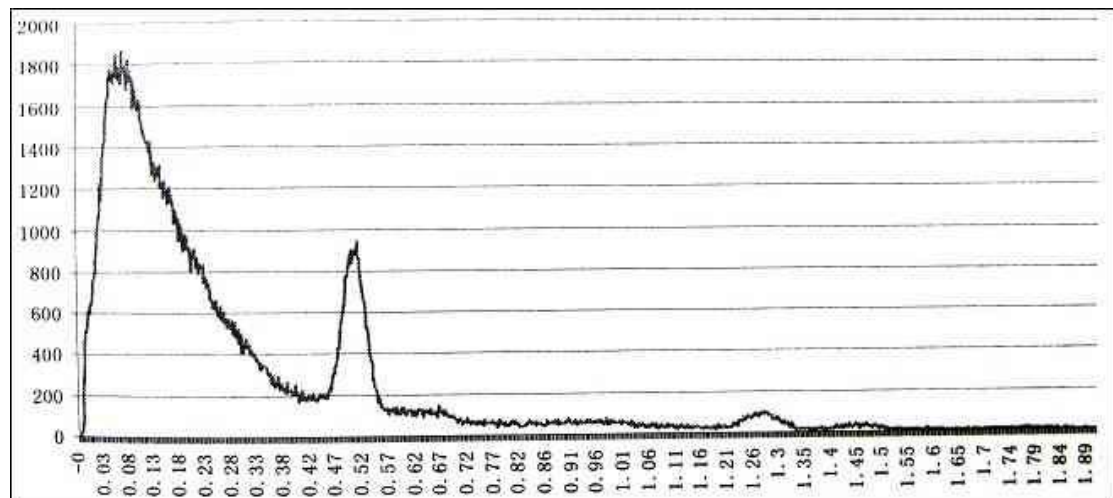
道数	对应能量	说明
361	0.662MeV	Cs 的光电峰
630	1.17MeV	Co 的第一个光电峰
716	1.33MeV	Co 的第二个光电峰

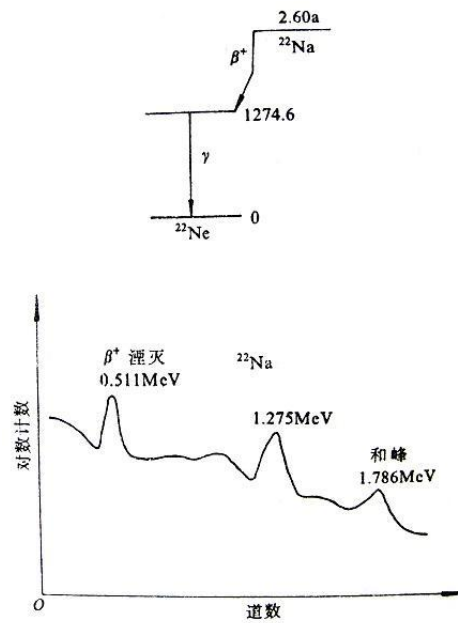
道值和能量对应的三个点，根据这三个点对能谱仪进行定标。



得到定标曲线，道值与能量的对应关系。

然后，测定 ^{22}Na 的能谱图。





根据定标曲线可以计算出
计算值

1.248MeV
0.5013MeV

理论值

1.2746MeV
0.511MeV

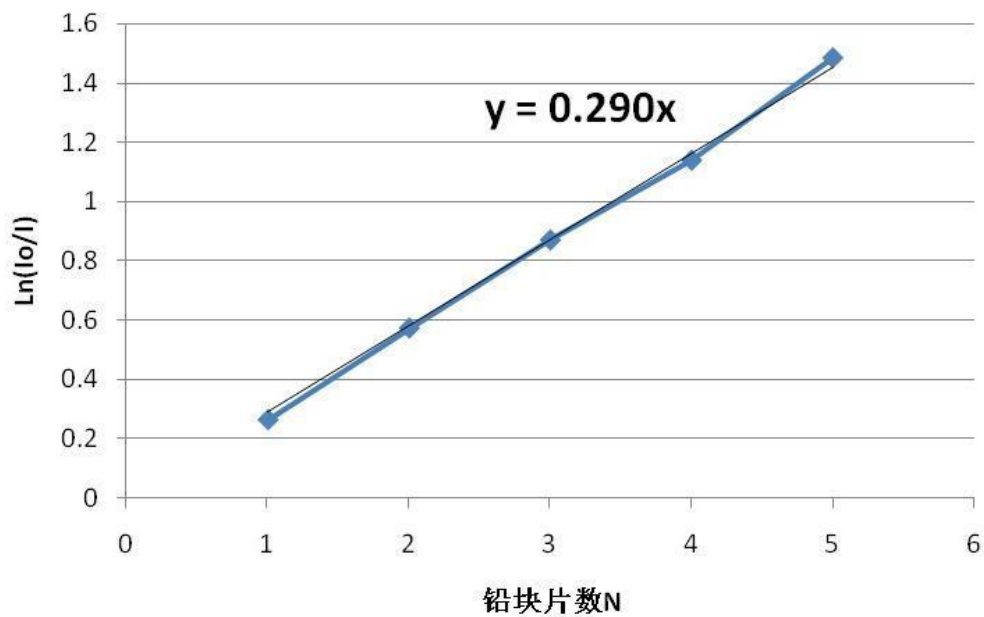
数据处理后得到全能峰的实验值与理论值的相对误差为 2.16%，湮灭峰的实验值与理论值的相对误差为 1.99%。误差与采样时间，放射源强度都有很大的关系。

3 铅板对 ^{137}Cs 的作用及数据处理

测量前半对射线的影响，在放射源与闪烁体间先不放置铅板，然后逐一增加，直至加到 5 块铅板。分别测量光电峰面积。

条件	光电峰面积
无铅板	19266
1 块铅板	14816
2 块铅板	10877
3 块铅板	8080
4 块铅板	6176
5 块铅板	4372

$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$ 与铅板块数呈线性关系，根据作图验证确实是线性关系，并拟合得到直线，得出吸收系数，进而得到散射截面。



$$\mu = \frac{\kappa}{\rho} = 0.102 \text{ cm}^2 / \text{g}$$

$$\rho = 2.83 \text{ g} / \text{cm}^3$$

$$\sigma = \frac{A}{N_0} \mu = \frac{207}{6.023 \times 10^{23}} \times 0.102 = 3.506 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$$

μ 为吸收系数为, σ 为散射截面。

$$\eta = \frac{\Delta V_p}{V_p} = \frac{\Delta E}{E} (\%)$$

$$\text{分辨率} \quad \eta = \frac{376 - 345}{362} \times 100\% = 8.56\%$$

4 结果与讨论

实验得出的实验值与理论值的误差很小，说明实验数据及试验方法是真实可靠的。

实验得到的数据处理：

$$\mu = \frac{\kappa}{\rho} = 0.102 \text{ cm}^2 / \text{g}$$

$$\rho = 2.83 \text{ g} / \text{cm}^2$$

$$\sigma = \frac{A}{N_0} \mu = \frac{207}{6.023 \times 10^{23}} \times 0.102 = 3.506 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$$

μ 为吸收系数为， σ 为散射截面。

$$\text{分辨率} \quad \eta = \frac{376 - 345}{362} \times 100\% = 8.56\%$$

对能谱图的理解：光电峰是由发生光电效应的 γ 射线通过能量转换产生的，所以反映了入射 γ 射线的能量，其后的康普顿平台以及康普顿边缘则是 γ 射线与 NaI 晶体作用后的能量分布，所以体现的是 γ 射线与 NaI 晶体作用后的能量分布。

对于合峰的影响：合峰的产生式由于在一个采集时间内得到两份能量，对能量脉冲叠加计入粒子数，在不计对全能峰及分辨率的影响下，换用放射性更强的样品，可以达到提高合峰的效果，或者更换 NaI 晶体，用反应时间更短的晶体替代亦可以达到提高合峰的效果。

提高系统的非线性度：可以通过提高光电倍增管和放大器的线性度。

$$M = \delta_1 \delta_2 \cdots \delta_m \quad \frac{\sigma_M^2}{M^2} = \frac{\sigma_1^2}{\delta_1^2} + \frac{1}{\delta_1} \frac{\sigma_2^2}{\delta_2^2} + \cdots + \frac{1}{\delta_1 \delta_2 \cdots \delta_{m-1}} \frac{\sigma_m^2}{\delta_m^2}$$

$$\frac{\sigma_M^2}{M^2} = \frac{\sigma_1^2}{\delta_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{\delta_2^2} + \cdots + \frac{\sigma_m^2}{\delta_m^2} \quad \frac{\sigma_M^2}{M^2} = \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_1 \delta} + \cdots + \frac{1}{\delta_1 \delta^{m-1}}$$

$$\delta_2 = \sum_{i=1}^{\delta_i} \delta_{2i} \quad = \frac{1}{\delta_1} \left(1 + \frac{1}{\delta} + \cdots + \frac{1}{\delta^{m-1}} \right)$$

$$= \frac{1}{\delta_1} \frac{1}{1 - 1/\delta}$$

$$= \frac{1}{\delta_1} \frac{\delta}{\delta - 1}$$

提高第一倍增极与光阴极之间的电位差，一般为其他级间电压的 2-3 倍，可以提高分辨率。

关于定标：试验中多道脉冲分析器道值与能量的关系式固定的，所以通过已知的两个道值能量对应关系，可以拟合出整体的道值与能量的关系直线。此时，在不改变原有实验参数

的前提下, 即不改变设定高压与增益, 道值与能量关系就不发生改变, 与入射射线无关, 所以可以用于测量未知粒子能谱, 或者未知射线能量。

致谢: 感谢实验室姚红英老师的指导, 以及其他近代物理实验的指导老师。

参考文献:

- [1]张天喆 董有尔 .近代物理实验:21 世纪高等院校教材. 科学出版社
- [2]戴道宣 戴乐山 .近代物理实验 第二版 . 高等教育出版社
- [3]王月兴 鲁永杰 杨翊方 张建国 用不同能量 γ 光子全能峰相对效率曲线和KCl 测定 ^{24}Na 活度方法的研究 . 核 技 术 Vol. 26, No.4
- [4]谢奇林, 白立新, 张一云, 徐家云, 吴丽萍, 周厚全 . Na I (Tl) γ 能谱分析中谱漂移的分时动态修正方法 . 四川大学学报(自然科学版) Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)J un. 2003
- [5]任晓荣 . NaI(Tl)闪烁探测器测量 γ 射线的性能分析 . Research & Development 研究与开发 2004.1 SensorWorld