

NaI 单晶 γ 能谱仪实验及相关讨论

复旦大学光科学与工程系 项晓辰 06300720373

摘要：本文重点解释了 γ 射线与物质相互作用的一般特性、 γ 能谱仪的结构以及定标方式，并对实验的改进提出了一些想法。

关键词：光电效应、康普顿散射、 γ 能谱仪、定标曲线

一、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 γ 射线测量过程中广泛使用了 NaI(Tl) 单晶 γ 能谱仪，本文将讨论能谱仪的使用和定标方法，并对实验的改良进行一些讨论。

二、实验目的

掌握 NaI(Tl) 单晶 γ 能谱仪的调整方法及测量 γ 射线的能谱，标定能谱仪的能量定标曲线，并利用定标曲线进行一系列实验。

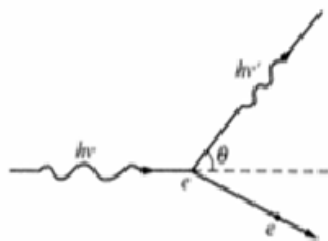
三、实验原理

3.1 γ 射线与物质相互作用的一般特性

γ 射线与物质的相互作用主要是光电效应、康普顿散射和正、负电子对产生这三种过程。

(1) 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_γ ，所以光电子的动能近似等于入射 γ 射线的能量 $E_{\text{光电}} = E_\gamma - E_1 \approx E_\gamma$

(2) 康普顿散射。核外电子与入射 γ 射线发生康普顿散射的示意图见上图。



康普顿散射示意图

设入射 γ 光子能量为 $h\nu$ ，散射光子能量为 $h\nu'$ ，则反冲康普顿电子的动能：

$$E_e = h\nu - h\nu'$$

康普顿散射后散射光子能量与散射角 θ 的关系为

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$$

式中 $\alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2}$ ，即为入射 γ 射线能量与电子静止质量所对应的能量之比。

由式 $h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)}$ ，当 $\theta = 0$ 时 $h\nu' = h\nu$ ，这时

时 $E_e = 0$ ，即不发生散射；

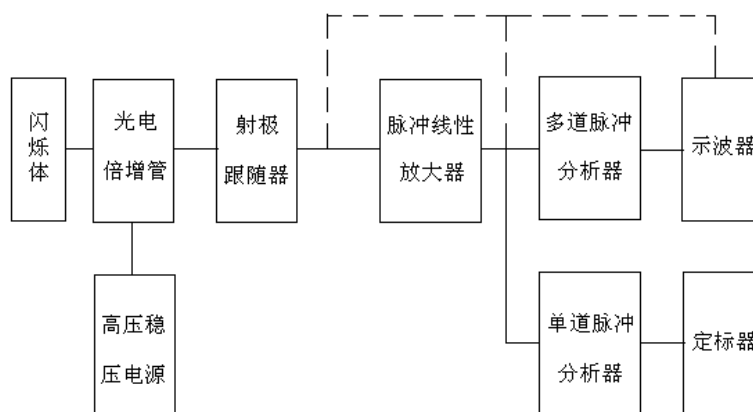
当 $\theta=180^\circ$ 时，散射光子能量最小，它等于 $h\nu / (1+2\alpha)$ ，这时康普顿电子的能量最大为 $E_{e(\max)} = h\nu \cdot \frac{2\alpha}{1+2\alpha}$

所以康普顿电子能量是连续分布的，在 0 至 $h\nu \cdot \frac{2\alpha}{1+2\alpha}$ 之间变化。

(3) 正、负电子对产生。当 γ 射线能量超过 $2m_e c^2$ (1.022MeV) 时， γ 光子受原子核或电子的库仑场的作用可能转化成正、负电子对。入射 γ 射线的能量越大，产生正、负电子对的几率也越大。在物质中正电子的寿命是很短的，当它在物质中消耗尽自己的动能，便同物质原子中的轨道电子发生湮没反应而变成一对能量各为 0.511MeV 的 γ 光子。

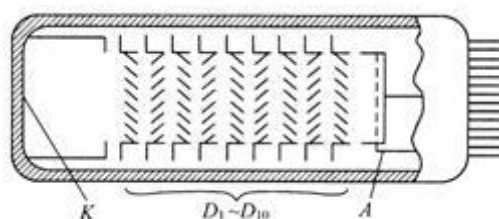
3. 2 γ 能谱仪

γ 能谱仪由 γ 能谱探头（由闪烁体与光电倍增管组成）和电子仪器两部分组成，



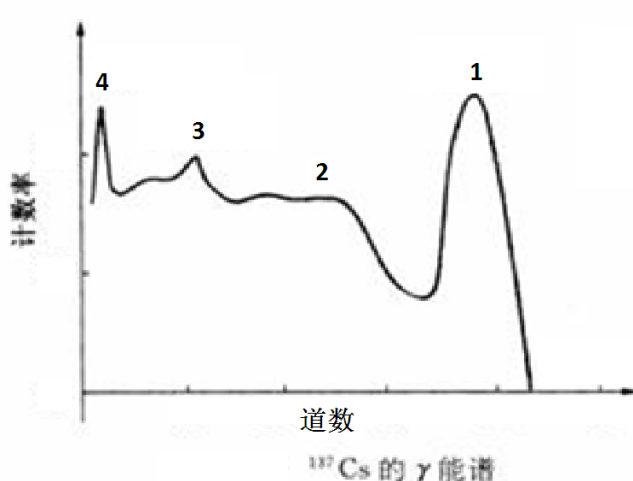
如图所示。

(1) 闪烁体。闪烁体是用来把射线能量转变为光能的。闪烁体分无机闪烁体和有机闪烁体两大类。实际运用中依据不同的探测对象和要求选择不同的闪烁体。本实验中采用含铯 (Tl) 的 NaI 晶体作 γ 射线的探测器。



(2) 光电倍增管。光电倍增管的结构如上图。它由光阴极 K 、收集电子的阳极 A 与在阳极与光阴极之间十个左右能发射二次电子的次阴极 (又称倍增极、打拿极或联极) 构成，相邻的两个电极之间的电位差一般在 $100V$ 左右。当闪烁体发出的光子打到光阴极时，它打出的光电子被加速聚焦到第一倍增极 D_1 上，平均每个光电子在 D_1 上打出 $3\sim 6$ 个次级电子，增殖的电子又为 D_1 和 D_2 之间的电场加速，打到第二个倍增极 D_2 上，平均每个电子又打出 $3\sim 6$ 个次级电子，.....这样经过 n 级倍增后，在阳极上就收集到大量的电子，在负载上形成一个电压脉冲。

3.3 γ 能谱



如图为¹³⁷Cs源的γ能谱图。

1号峰为全能峰，它的幅度与γ射线的能量成正比，这一个峰包含了光电效应及多次效应的贡献。在康普顿平台上出现的3号峰是反散射峰，它是入射光子穿过闪烁体打到光电倍增管上，如果发生180°康普顿散射时，反散射光子又返回闪烁体，通过光电效应而被记录。

2号平台状曲线为康普顿平台。4号峰是特征X射线峰。

四、实验操作

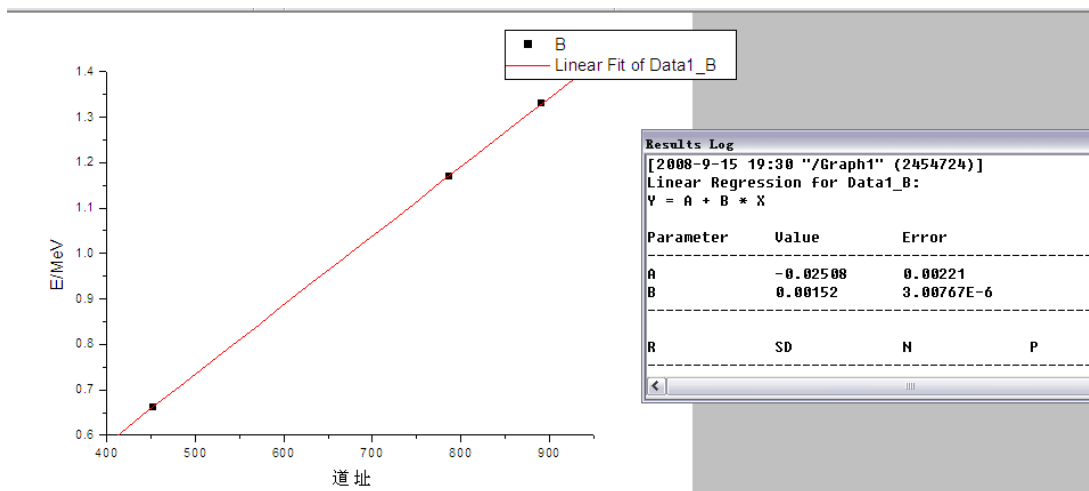
4.1 能谱仪的定标：

利用¹³⁷Cs的一个光电峰和⁶⁰Co的两个光电峰对能谱仪定标：

- (1) 将谱仪的测量范围设为0~1.5MeV，¹³⁷Cs全能峰为0.662MeV，应在 $1024 \times 0.662 \div 1.5 = 452$ 道上，通过调节增益和高压电源电压将全能峰定在452道上。此后就不要再调节增益和高压电源电压了。
- (2) 采样得到光电峰分别对应的道址：

编号	峰	对应道址	峰能量 (MeV)
1	¹³⁷ Cs	452	0.662
2	⁶⁰ Co	786.9	1.17
3	⁶⁰ Co	891.3	1.33

经origin拟合后得到直线方程： $E = -0.02508 + 0.00152x$
 分析误差产生的原因为：软件寻峰不精确导致误差。
 拟合图线如下：



4.2 利用定标曲线从 ^{22}Na 的光电峰和正负电子湮灭峰的位置求出能量并与理论值比较:

	实验测得道址	根据定标曲线求得能量 (MeV)	理论值 (MeV)	误差
光电峰	858.3	1.280	1.275	0.4%
正负电子湮灭峰	353.2	0.512	0.511	0.2%

可见理论值与实验测得的结果相差不大, 误差产生的原因可能还是软件在寻峰过程中造成的, 还有定标曲线本身的误差也会被带入。

4.3 利用定标曲线求出 ^{137}Cs 反散射峰和康普顿边缘的能量:

	实验测得道址	根据定标曲线求得能量 (MeV)	理论值 (MeV)	误差
反散射峰	130.5	0.173	0.184	5.4%
康普顿边缘	321	0.463	0.478	3.1%

实验中遇到的问题: 如何寻找康普顿边缘?



理论图

实验观察到的

图中左边为理论上观察到的康普顿平台, 由于探头分辨率的影响, 实验观察到的康普顿平台如图中右边的样子, 因此在找康普顿边缘的时候要取斜坡中间的点。这也就给实验带来误差。

4.4 用卡全能峰的方法求铅对射线的质量吸收系数 μ

利用 $\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$ 进行拟合来求得 μ_0 , 要注意放射源一旦放好就不要移动, 一块

一块向上叠放铅片, 将采样时间定为 200s。

测得数据如下表, 其中每块铅片的质量厚度为 2.83g/cm^2

编号	总和	块数	备注
1	28516	0	只有源
2	2484	0	本底
3	21540	1	
4	17391	2	
5	13849	3	
6	10675	4	
7	8644	5	

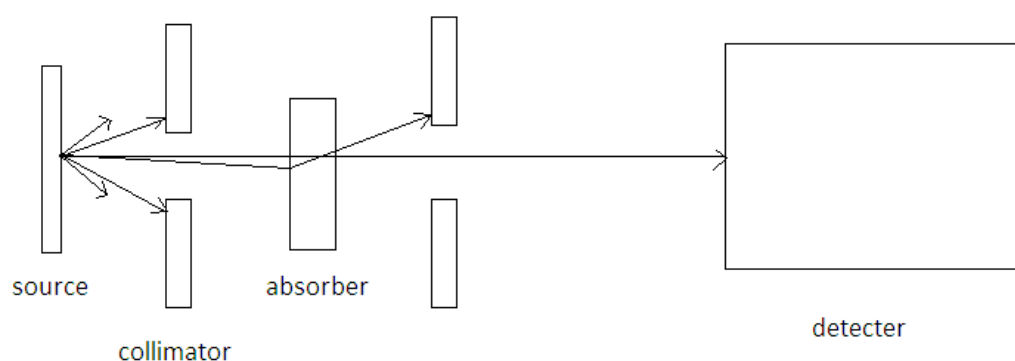
拟合数据:

X	Y
0	26032
2.83	19056
5.66	14907
8.49	11365
11.32	8191
14.15	6160

由 origin 拟合得 $u = 0.100 \pm 0.002 \text{cm}^2/\text{g}$

由 $u = \frac{k}{\rho} = \frac{\sigma n}{\rho}$ 可得: 散射截面 $\sigma = \frac{u\rho}{n} = \frac{u\rho}{\rho N_0 Z/A} = \frac{uA}{N_0 Z} = 4.2 \times 10^{-25} \text{cm}^2$

五、对实验的改进建议



上图是另一种实验装置图,与本实验相比,这个实验在吸收片的两侧加了很厚的铅砖,防止散射粒子进入探头,保证了实验的准直性和严密性。缺点是对装置要求比较高,而且由于这样进入探头的 γ 光子会减少许多,采集要花很多时间。为了减少散射粒子对实验的影响,可以将放射源摆放得离探头远一些,但是这么做又会增加本底对实验的影响。

六、致谢

感谢我的实验合作者林崴同学这个学期来对我的帮助以及本实验的指导老师王煜在实验时对我悉心的指导和帮助。

七、参考文献

- 1、《近代物理实验》 物理实验中心 2008
- 2、吴思诚,王祖铨《近代物理实验》北京大学出版社 1995
- 3、《核物理实验》 原子能出版社 1984