

Nal(Tl)单晶 γ 能谱仪实验

许翔 物理学系 10300290009

【实验介绍】

核反应一般都会发射 γ 射线。测量 γ 射线的强度和能量是核物理研究和应用的重要内容。Nal(Tl)单晶闪烁探头有较高的探测效率和能量分辨率，在现实中有非常广泛的应用。

通过本实验，要求掌握核物理的基本知识、核辐射探测的基本技能和能谱分析的基本方法。并且深入地探讨本实验中物理量的转换过程及电学信号的处理过程。最后通过 γ 能谱测量 Pb 的吸收系数。

【实验原理】

1. 光子与物质的相互作用

Nal(Tl)单晶 γ 能谱仪是通过 γ 光子与 Nal(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，与物质的相互作用主要有三种：

1.1 光电效应

光子将能量全部传给束缚电子，使束缚电子从原子中释放出来称为光电子。由于 γ 光子能量远大于电子束缚能，故光电子的能量约等于 γ 光子能量。这些光电子在闪烁体中不断激发其他电子至高能级，经过退激后闪烁体发出的荧光将能量传递至光电倍增管。

1.2 康普顿（散射）效应

γ 光子与电子发生非弹性碰撞，将部分能量传递给电子，使其成为反冲电子。之后的过程同光电效应中一样，这部分能量最终以荧光的形式传递给了光电倍增管。通过能量和动量守恒定律不难证明康普顿电子的能量是连续分布的，从 0 到最大值 $2\alpha E_\gamma / (1+2\alpha)$ ，其中 $\alpha = E_\gamma / m_0 c^2$ 为入射光子能量与电子静止能量之比。在 γ 能谱上就表现为能量连续且有边界的康普顿平台。

1.3 电子对效应

当 γ 光子的能量大于 $2m_0 c^2$ （即 1.022MeV）时， γ 光子在原子核或电子的库仑场作用下，可能转化为正、负电子对。正电子寿命短，其动能消耗尽后，同轨道电子发生湮灭，并形成一对运动方向相反，能量均为 0.511MeV 的 γ 光子。

2. γ 能谱仪的工作原理

2.1 过程简述

γ 射线进入闪烁体后通过上述的三种效应失去能量产生次级电子（部分 γ 射线直接穿过闪烁体到达光电管）。次级电子与闪烁体中分子或原子相互作用，使其激发或电离。在退激的过程中，闪烁体发出荧光，并会聚至光电倍增管阴极（TI的作用是改变 NaI 的能带结构，使闪烁体不会对发出的荧光自吸收）。光电倍增管阴极吸收光子，通过光电效应逸出光电子。这些光电子经过各级打拿级的倍增作用，在阳极接收到大量电子，形成电压脉冲信号。脉冲信号通过放大器线性放大，脉冲分析器根据脉冲高度分类，将每次脉冲归类至相应的通道计一次数。经过一段时间即可获得放射源的 γ 能谱图。

γ 能谱仪工作原理的关键在于，最终经过放大的脉冲信号强度与 γ 光子在闪烁体中损失的能量成正比。

2.2 能量分辨率

由于上述过程中存在统计涨落（荧光光子数、光阴级发射电子数），且电子系统存在噪声，输出的脉冲幅度也是有一定涨落的。表现到 γ 能谱图上即是谱线的横向展宽。定义能量分辨率 η

$$\eta = \frac{\Delta V_{1/2}}{V_0} = \frac{\Delta E}{E}(\%) \quad (1)$$

即为全能峰的半宽能量 ΔE 与峰对应的能量 E 的比值。

时间分辨率也是 γ 能谱仪的一个重要参数指标，但本实验不涉及，暂不赘述。

3. 物质对 γ 射线的吸收

光子经过物质，通过以上的三种效应，物质对总的光子能量有吸收作用。我们常用吸收物质的质量厚度 ξ 来表示它的吸收本领。设单位面积的入射通量为 I_0 ，则入射束中未被吸收的出射通量为

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu\xi) \quad (2)$$

其中， μ 为物质的质量吸收系数。其与物质的原子序数 Z 、质量数 A 和物质密度 ρ 都有关系。

【实验仪器】

北京核仪器厂的 γ 能谱仪实验装置包括 NaI(Tl)闪烁探头、NIM (Nuclear Instrument Module) 机箱、高压电源、低压电源、线性放大器，脉冲多道幅度分析器，示波器，电脑及放射源 (^{22}Na 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co)、Pb 片等。

【实验内容与方法】

1. 观察实验条件的变化对脉冲信号的影响:

分别改变光电倍增管高压、增益系数、微分积分参数等实验条件, 观察脉冲信号的变化, 并且选择合适的参数设置, 进行之后的实验。

2. 能谱仪的定标与能量分辨率的测定:

1) 利用 ^{22}Na 能谱中的 0.511MeV 电子对峰、1.275MeV 光电峰以及 ^{137}Cs 能谱中的 0.662MeV 光电峰对能谱仪定标。 *Na 的峰也作已知峰用于定标!*

2) 在 ^{137}Cs 能谱中测量 0.662MeV 光电峰的能量分辨率 η , 测量 ^{137}Cs 的反散射峰和康普顿边界, 测量 ^{60}Co 能谱中的两个光电峰能量、 ^{22}Na 能谱中和峰的能量。

3) 测量背景辐射能谱, 并作为本底扣除。

3. 用卡全能峰法测 Pb 对 0.662MeV 的 γ 射线的质量吸收系数 μ 。

测量 ^{137}Cs 分别经过 1~5 块 Pb 片, 光电峰净面积 S 。根据公式(2)对 $\ln S$ 与块数 n 做线性拟合, 测定 μ 。

【实验结果与分析】

1. 实验条件对脉冲信号影响的观察:

未接放大器直接测得的脉冲信号如图 1 所示, 经过放大器处理一个典型的脉冲信号如图 2 所示。 *未接微分功能。*

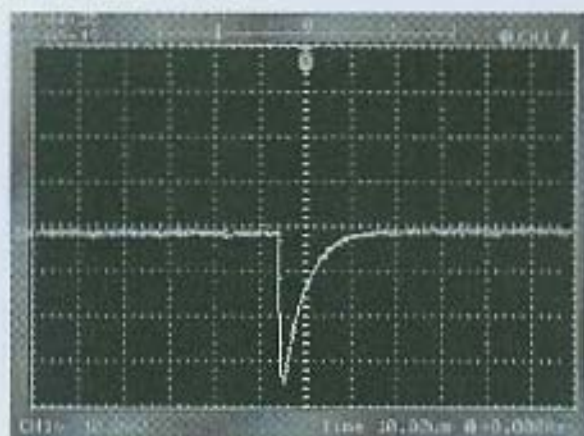


图 1 未接放大器脉冲信号波形

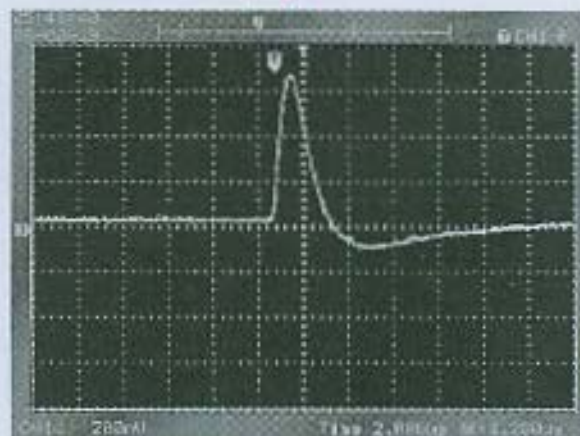


图 2 放大器处理后脉冲信号波形

实验中观察到, 当其他三组实验条件不变的情况下分别改变光电倍增管高压、增益系数、微分和积分, 对脉冲波形有如下影响:

1) 微分、积分能调整脉冲正部分的时间展宽。微分越小 (不低于 0.5), 积分越小, 展宽就越窄, 更有利于时间分辨;

可利用示波器存储的数据，在一张图上画出不同条件下的信号进行对比，以便使讨论更有说服力。

2) 增益系数越大，脉冲信号总体的幅度就越大。

3) 光电倍增管高压越大，脉冲总体幅度就越大，信噪比越高。但高压太大会导致幅度达到饱和，使幅度较大的脉冲波形上端变平。

故在实验的过程中保持微分 0.5，积分 0，光电倍增管高压 600V 左右，增益系数视能谱最大所需能量调整。若对电子信号处理过程有更多了解，建议学习“核电子学”

而直接观察未经放大器处理的探头脉冲信号（如图 1 所示）。脉冲电压为负值，从图上可以看到探头信号的特点是：前沿上升极快，之后衰减回基线却很慢，形成一道大于 $10\mu s$ 的“长尾巴”。可见处理这种信号必须用到放大器，使脉冲信号恢复基线的时间缩短，时间分辨的能力提高。至于为何原始信号为负脉冲，经过放大器处理后为正脉冲，由于对放大器工作原理不甚了解，暂时无法说明其原因。

信号极性选择开关

2. 能谱仪的定标与能量分辨率的测量：

实验条件：

光电倍增管高压 661V 增益系数 37.85 微分 0.5 积分 0

实验中所有的计数率先除以相应的测量时间 t 进行归一，并扣除背景辐射的本底能谱。

对 ^{22}Na 能谱中的 0.511MeV 电子对峰、1.275MeV 光电峰和 ^{137}Cs 能谱中的 0.662MeV 光电峰选择左右道址进行高斯拟合，寻得其峰所在道址如表 1 所示：

能量范围偏窄。Coin 峰在此范围之外。一直要外推。Na 和 Cs “外推”可靠否？

表 1 能谱仪的定标

Channel	253.0	328.9	637.7
Energy/MeV	0.511	0.662	1.275

对 Energy-Channel 进行线性拟合

（如图 3 所示）

由拟合结果可以得到本组实验条件下的定标函数为：

下的定标函数为：

$$E = 0.00199C + 0.00864(\text{MeV}) \quad (3)$$

其中 C 为道址数。

γ 光子能量 E 与道址 C 之间有良好的线性关系。

相关系数？

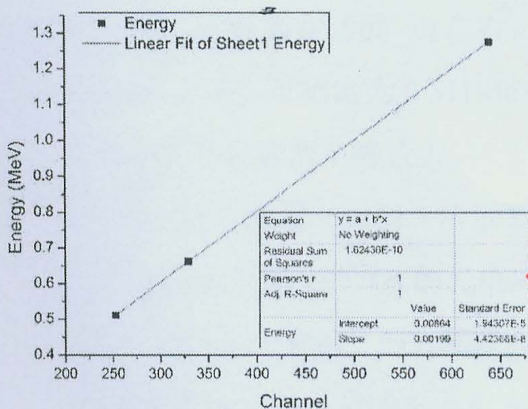


图 3 γ 能谱仪的定标曲线

正式报告中，数据处理的细节可简化

结果表应列出！

若是每秒计数，
应是 Rate!

下面对一些放射源的能谱进行测量、观察和分析：

Count or Rate?

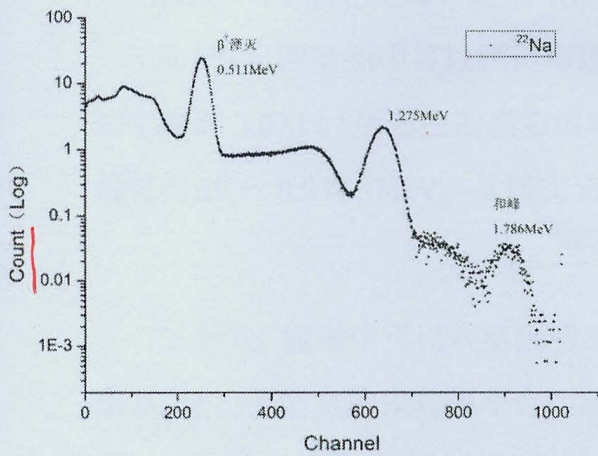


图 4 ^{22}Na 能谱图

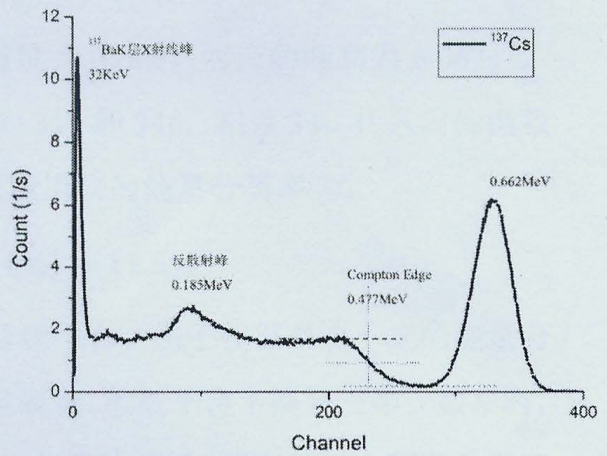


图 5 ^{137}Cs 能谱图

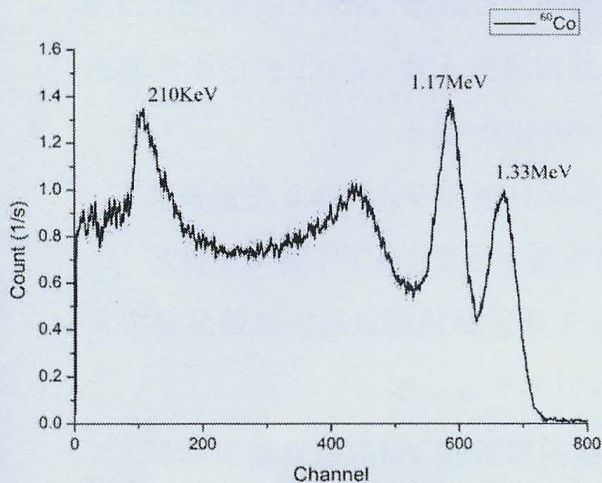


图 6 ^{60}Co 能谱图

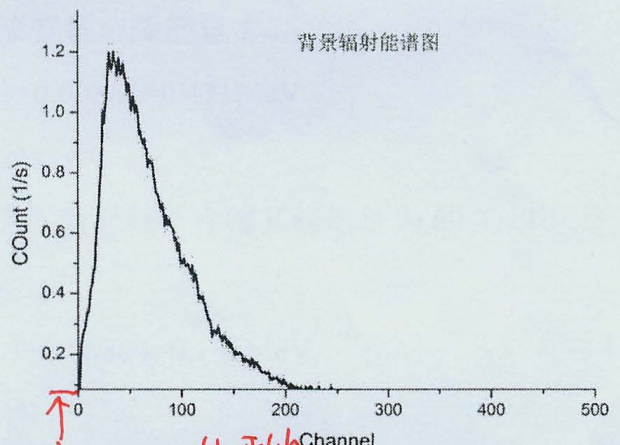


图 7 背景辐射能谱图

1) ^{22}Na 能谱 (如图 4 所示)

0.511MeV 峰为电子对效应产生的峰，而 1.275MeV 峰为 ^{22}Na 的光电峰。

由于和峰 (1.786MeV) 计数率太小，为能观察到和峰，对计数率做 Log10 对数处理。观察到在 900 道左右，有明显的峰。代入定标函数(3)可知其能量为 1.8MeV 左右，可确定为 0.511MeV 与 1.275MeV 的和峰。由于计数率太小，故其不确定度相比前两个峰较大。

2) ^{137}Cs 能谱 (如图 5 所示)

0.662MeV 峰为 ^{137}Cs 的光电峰。通过卡光电峰扣除本底 (谷与谷之间由线段连接作为本底) 求积分的方法求光电峰的净面积为 224.64，对于全谱 (0~1024 道址) 进行积分可得全谱的总面积为 708.02。两面积之比为 $224.64/708.02=31.64\%$ 。这说明有 31.64% 的 γ 光子 (0.662MeV) 直接打

到光电倍增管而未发生散射或在

??

闪烁体中产生光电效应。

利用 ^{137}Cs 的光电峰，能测量能谱仪的能量分辨率：

从 ^{137}Cs 能谱图中可以测得峰顶所在道址为 328.9，对应的峰高为 6.062s^{-1} ，则半峰高 3.031s^{-1} 所对应的左右道址分别为 312 和 346，相差 34。代入定标函数后可得 $\Delta E = 0.0763\text{MeV}$ ，从而实验所用 γ 能谱仪的能量分辨率为：

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{0.0763}{0.662} (\%) = 11.5\%$$

在 ^{137}Cs 能谱中可以观察到明显的康普顿平台。由于仪器具有一定的能量分辨率，理论上竖直的康普顿平台边缘有一定展宽。故取平台下降至一半计数率时，所对应的能量为康普顿边缘的能量。从图 5 中可以测得，康普顿平台刚开始下降时的计数率为 1.669，谱线谷底的计数率为 0.165，两者平均后为 0.917，其所对应的通道数为 232.3，代入定标函数可得康普顿边缘能量 E_{max} 为

$$E_{\text{max}} = 0.00199 \times 232.3 + 0.00864 = 0.471\text{MeV}$$

与理论值 0.477MeV 的相对偏差为 1.2%。

事实上，在 ^{137}Cs 能谱图中还能观察到反散射峰，寻得其峰道址为 89.3，代入定标函数后可得反散射峰能量 $E_{\text{反散射}}$ 为

$$E_{\text{反散射}} = 0.00199 \times 89.3 + 0.00864 = 0.186\text{MeV}$$

与理论值 0.185MeV 的相对偏差为 0.1%。

而在低能区 0 通道附近，可以观察到有一尖锐的峰，是为能量为 32keV 的 ^{137}Ba 的 K 层 X 射线峰。

3) ^{60}Co 能谱 (如图 6 所示)

从 ^{60}Co 能谱图中可以观察到 ^{60}Co 具有两个光电峰 (两次衰变的 γ 光子能量不同)。利用高斯拟合的方法可以寻得相对低能峰的道址为 584.3，高能峰的道址为 665.9。分别代入定标函数，可得 ^{60}Co 的两个光电峰能量为 1.17MeV 和 1.33MeV ，与理论值完全吻合。

而在低能区 110 道址处也有一峰，代入定标函数可得其能量为 215keV ，与理论值 210keV 相差 2.4%。此峰是 ^{60}Co 的反散射峰。

4) 背景辐射能谱 (如图 7 所示)

从背景辐射能谱中可以观察到，其在低能区 (0~200 道) 会对原谱线造成一定程度的影响，并在 35 道附近达到最大值 1.2s^{-1} 。而在 200 道之后，背景辐射计

实验

数率相比放射源能谱计数率可以忽略不计。造成背景辐射的原因是环境中本身就存在的放射性物质，如墙壁材料等。

如本节实验开头所述，在数据处理的过程中，已预先将背景辐射直接扣除。

3. Pb 对 0.662MeV γ 射线的质量吸收系数 μ 的测量

在卡全能峰求其净面积的过程中，本实验以两边峰谷的连接线段作为本底扣除。5次测量不改变源与闪烁体的相对位置，卡全能峰所选取的两边峰谷道址也保持一致，最终得到全能峰净面积 S 与所添加的 Pb 板块数 n 有如下关系：

表 2 全能峰净面积与 Pb 片块数的关系

块数 n	全能峰净面积 S	$\ln(S)$
1	259.29	5.558
2	199.61	5.296
3	150.94	5.017
4	113.08	4.728
5	83.83	4.429

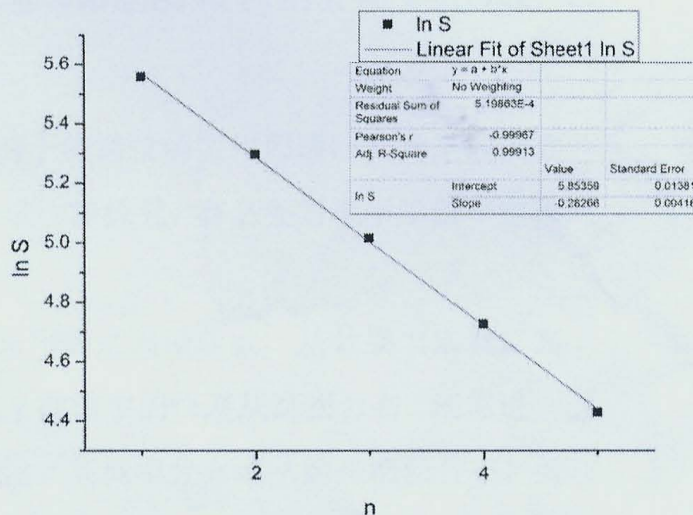


图 8 $\ln S$ 与 Pb 块数 n 的线性拟合

对 $\ln S$ 与 n 做线性拟合，可得如图 8 所示直线，拟合结果为

$$\text{斜率 } k = -0.283 \pm 0.004$$

实验室提供的铅板的质量厚度 ξ 为 2.83 g/cm^2 ，故 Pb 片对 0.662 MeV 光电峰的质量吸收系数 μ 为：

$$\mu = k/\xi = -0.283/-2.83 = 0.100 \pm 0.001 \text{ cm}^2/\text{g}$$

此不确定度如何得到？

4. Pb 的 K 层 X 射线峰观察

调整实验条件，使 1024 道址内恰好能观察到 0.662 MeV 的 ^{137}Cs 光电峰。

实验条件：

光电倍增管高压 661V

增益系数 116.2

微分 0.5 积分 0

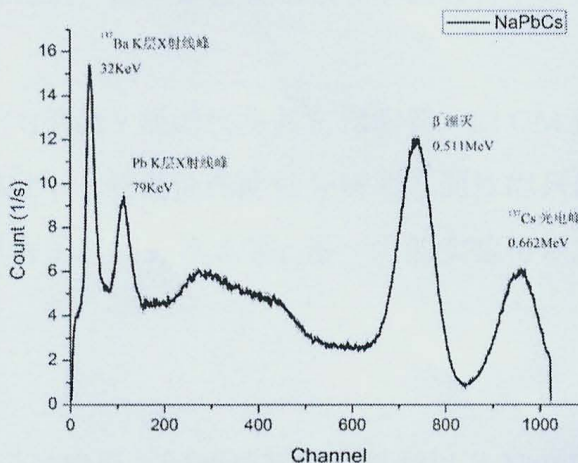


图 8 Na+Pb+Cs 能谱图

实验

数率相比放射源能谱计数率可以忽略不计。造成背景辐射的原因是环境中本身就存在的放射性物质，如墙壁材料等。

如本节实验开头所述，在数据处理的过程中，已预先将背景辐射直接扣除。

3. Pb 对 0.662MeV γ 射线的质量吸收系数 μ 的测量

在卡全能峰求其净面积的过程中，本实验以两边峰谷的连接线段作为本底扣除。5 次测量不改变源与闪烁体的相对位置，卡全能峰所选取的两边峰谷道址也保持一致，最终得到全能峰净面积 S 与所添加的 Pb 板块数 n 有如下关系：

表 2 全能峰净面积与 Pb 片块数的关系

块数 n	全能峰净面积 S	$\ln(S)$
1	259.29	5.558
2	199.61	5.296
3	150.94	5.017
4	113.08	4.728
5	83.83	4.429

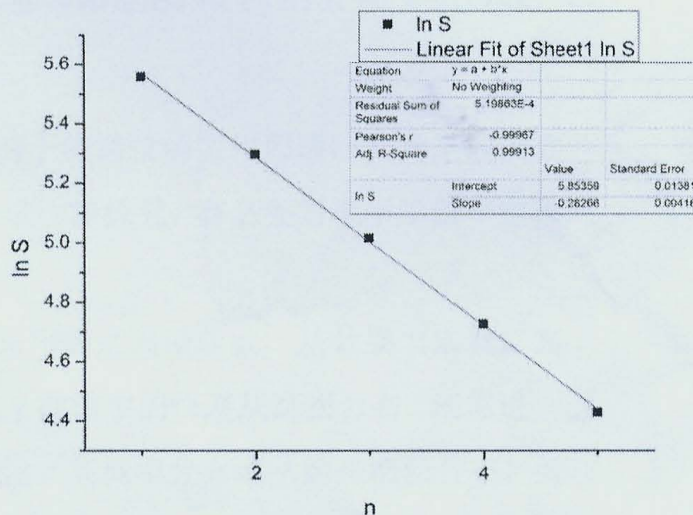


图 8 $\ln S$ 与 Pb 块数 n 的线性拟合

对 $\ln S$ 与 n 做线性拟合，可得如图 8 所示直线，拟合结果为

$$\text{斜率 } k = -0.283 \pm 0.004$$

实验室提供的铅板的质量厚度 ξ 为 2.83 g/cm^2 ，故 Pb 片对 0.662 MeV 光电峰的质量吸收系数 μ 为：

$$\mu = k/\xi = -0.283/-2.83 = 0.100 \pm 0.001 \text{ cm}^2/\text{g}$$

此不确定度如何得到？

4. Pb 的 K 层 X 射线峰观察

调整实验条件，使 1024 道址内恰好能观察到 0.662 MeV 的 ^{137}Cs 光电峰。

实验条件：

光电倍增管高压 661V

增益系数 116.2

微分 0.5 积分 0

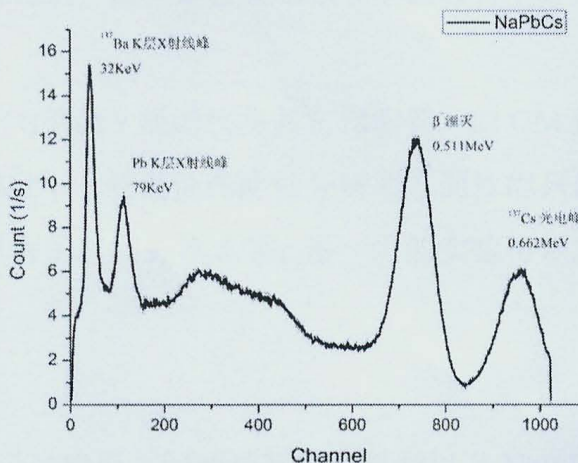


图 8 Na+Pb+Cs 能谱图

放射源依下至上分别为 ^{22}Na 、Pb 片和 ^{137}Cs ， ^{137}Cs 置于最上方是为了避免其产生的 BaK 层 X 射线不被 Pb 所吸收。

用 0.511MeV 峰和 0.662MeV 峰对能谱仪重新定标，得到定标函数：

$$E=0.0007C-0.0039$$

对两个低能峰进行高斯拟合，得到其峰道址分别为 43.6 和 113.2，代入新的定标函数可得两个低能峰的能量分别为 26.6keV 和 75.3keV。与理论值 Ba 的 K 层 X 射线能量 29keV 和 Pb 的 K 层 X 射线能量 79keV 作对比，实验值虽偏小（定标偏差所致），但可以确定，这两个低能峰即是 Ba 和 Pb 的 K 层 X 射线峰。

【实验讨论】

1. 本实验的物理过程是清晰的。但对于能谱仪的工作原理，尤其是放大器是如何通过电路改变脉冲波形的，还有待进一步探究，有必要对电子学做一定程度的了解。

2. 在数据的处理方面，对峰的拟合采用的是高斯函数。从效果上来看，高斯函数的拟合效果非常好。而对于为什么 γ 能谱中的峰遵从高斯分布，还需进一步探讨。事实上，放射性衰变存在统计涨落，其概率分布遵从的是泊松分布。而当统计总数较大时，泊松分布和高斯分布十分接近。实际应用中常用高斯分布取代泊松分布。

↑ 是指时间分布，本实验的峰展宽是能量展宽 → 信号强度涨落

3. 本实验数据处理的另一大工具是求全能峰净面积时，扣除本底的方法。本实验采取的是峰谷之间直接用直线连接作为本底扣除，从结果来看，这样处理是合理的。不考虑背景辐射的影响，能谱图中全能峰的本底主要是来自康普顿平台的展宽，由于康普顿平台展宽至光电峰处，其计数率已经较为有限且呈递减趋势，用上述方法近似扣除本底的确是合理的，但一定会带来误差。是否有更好的扣除本底的办法有待进一步探究。

4. 作为一种粒子探测器，将 NaI(Tl)单晶 γ 能谱仪与其它探测器，如 GM 计数器作比较是很有意义的一件事。事实上， γ 能谱仪在能量分辨率方面性能只能说是一般，其优势如资料中所说是其良好的时间分辨本领。进一步的实验可以探究各种粒子探测器之间的性能比较。

【实验结论】

通过本实验，实验者基本了解了光子与物质之间的相互作用机制以及 NaI(Tl)

引用这样的表述.

单晶 γ 能谱仪的一些基本工作原理。实验测得了 ^{22}Na 、 ^{137}Cs 和 ^{60}Co 的能谱图，并进行了一些讨论，包括对能谱仪的定标，测得能谱仪在 0.662MeV 光电峰的能量分辨率为 11.5%，以及测得 Pb 对 0.662MeV 光电峰的质量吸收系数为 $0.100 \pm 0.001 \text{ cm}^2/\text{g}$ 。实验者还对实验的方法进行了讨论，提出了进一步探究的设想。

欠具体!

参考文献?!

乐 4.20

95.

建议：以写一篇文章稿件的模式来写实验报告。

1. 精炼.
2. 准确
3. 有内容.
4. 规范.