

康普顿散射虚拟仿真实验

吕霄龙 19307110080

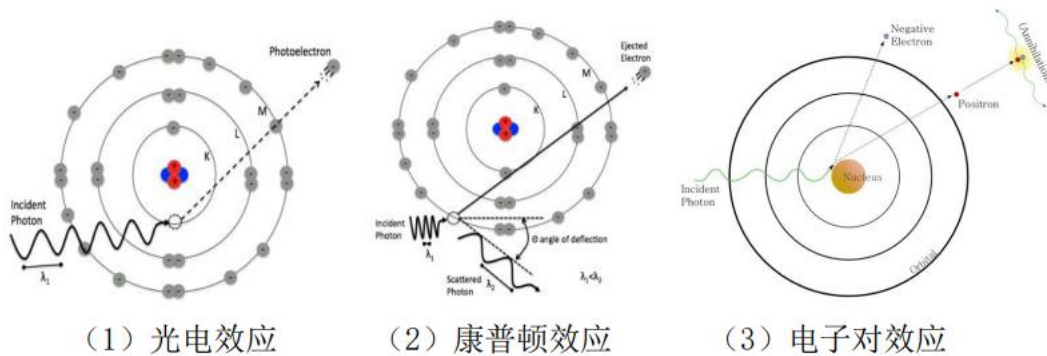
一、实验目的

- (1) 突破实验条件限制，为高危放射源的核物理实验学习提供重要的辅助工具；
- (2) 了解 γ 射线与物质的相互作用过程，熟悉闪烁体探测器谱仪的工作原理，测量多种放射源 γ 能谱并计算物质对不同 γ 射线能量的吸收系数；
- (3) 掌握符合测量技术，并验证康普顿散射的 γ 光子能量及微分截面与散射角的关系。

二、实验原理

1. γ 射线与物质相互作用

当 γ 射线入射至闪烁体时，主要发生光电效应、康普顿效应和电子对效应三种基本相互作用过程，如图 1-1 所示。对于低能 γ 射线和原子序数高的吸收物质，光电效应占优势；对于中能 γ 射线和原子序数低的吸收物质，康普顿效应占优势；对于高能 γ 射线和原子序数高的吸收物质，电子对效应占优势，如图 1 所示。



(1) 光电效应

(2) 康普顿效应

(3) 电子对效应

图表 1 三种相互作用

1) 光电效应

γ 光子与介质的原子相互作用时，整个光子被原子吸收，其所有能量传递给原子中的一个电子（多发生于内层电子）。该电子获得能量后就离开原子而被发射出来，称为光电子。光电子的能量等于入射 γ 光子的能量减去电子的结合能。光电子与普通电子一样，能继续与介质产生激发、电离等作用。由于电子壳层出现空位，外层电子补空位并发射特征 X 射线。

2) 康普顿效应

γ 光子与原子外层电子（可视为自由电子）发生弹性碰撞， γ 光子只将部分能量传递给原子中外层电子，使该电子脱离核的束缚从原子中射出。光子本身改变运动方向。被发射出的电子称康普顿电子，能继续与介质发生相互相互作用。散射光子与入射光子的方向间夹角称为散射角，一般记为 θ 。反冲电子反冲方向与入射光子的方向间夹角称为反冲角，一般记为 ϕ 。当散射角 $\theta = 0^\circ$ ，散射光子的能量为最大值，这时反冲电子的能量为 0，光子能量没有损失；当散射角 $\theta = 180^\circ$ 时，入射光子和电子对头碰撞，沿相反方向散射回来，而反冲电子沿入射光子方向飞出，这种情况称反散射，此时散射光子的能量最小。

3) 电子对效应

能量大于 1.022MeV 的 γ 光子从原子核旁经过时，在原子核的库仑场作用下， γ 光子

转变成一个电子和一个正电子。光子的能量一部分转变成正负电子的静止能量(1.022MeV)，其余就作为它们的动能。被发射出的电子还能继续与介质产生激发、电离等作用；正电子在损失能量之后，将于物质中的负电子相结合而变成 γ 射线，即湮没(annihilation)，探测这种湮没辐射是判明正电子产生的可靠实验依据。

2. 闪烁体及光电倍增管的工作原理

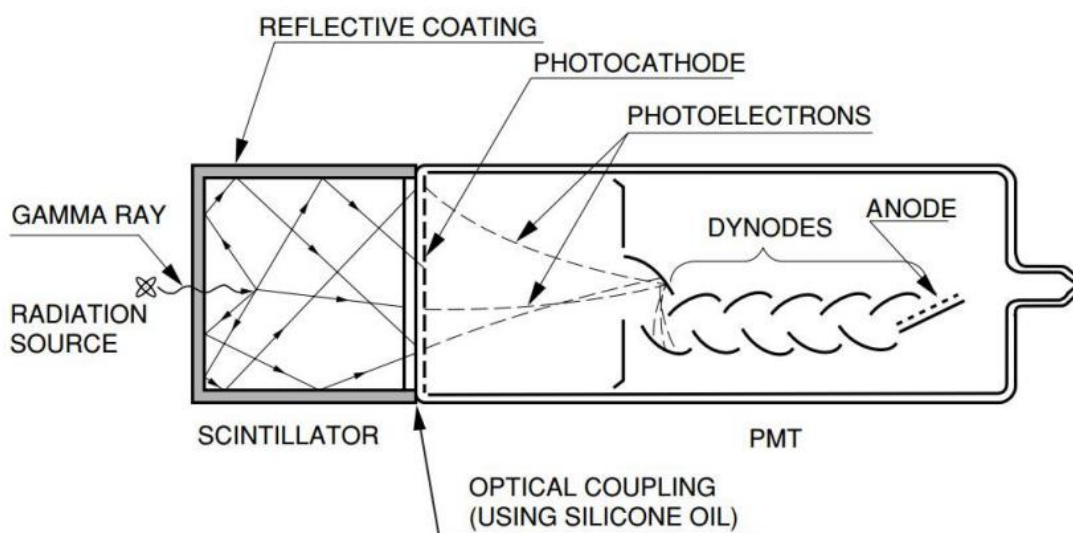
闪烁体探测器是利用电离辐射在某些物质中的闪光来进行探测的，也是应用最为广泛的电离辐射探测器之一。

1) 闪烁体

入射辐射与闪烁体物质发生相互作用并沉积能量，引起闪烁体中原子(或分子)的电离激发，之后受激粒子退激释放出波长接近于可见光的闪烁光子。本实验采用的真实及虚拟探测器为 NaI(Tl)闪烁体探测器，尺寸为 50*50mm。

2) 光电倍增管 (Photomultiplier Tube, PMT)

它由光电阴极 (PHOTOCATHODE)、打拿极 (DYNODES) 及阳极 (ANODE) 等密封在真空壳中组成。光电阴极是接受光子而放出光电子的电极，它是用光电效应较高，光电子逸出功小的特殊材料制成的。



图表 2 闪烁体与倍增管结构

本实验采用的虚拟探测器分别为 NaI(Tl)闪烁体探测器和塑料闪烁体探测器，前者用于探测散射的 γ 光子，后者用于探测反冲电子。

3. γ 能谱的构成及分析

在物理学中，粒子能谱是指粒子的计数或粒子束流的强度随粒子能量的分布。通过对谱仪进行能量刻度之后，就可以得到当前环境下粒子在探测器中的沉积能量的分布情况，就是对粒子能谱的一种定量分析。一般情况下， γ 射线的能谱主要包含以下一些主要结构：

λ 全能峰：全能峰是指当 γ 粒子的全部能量都沉积在探测器内时贡献的信号形成的峰。它理论上应该是一条单能谱线，但由于谱仪有限的能量分辨能力，这条谱线就被展宽成了一个高斯形状的峰。一般情况下，寻峰操作意味着针对这类峰进行高斯拟合。全能峰的主要贡献者是发生了光电效应的那些 γ 入射事例，因此其又常被称为光电峰。全能峰的峰位能量应该为 E_γ ，其中， E_γ 是入射的 γ 光子的能量。

λ 康普顿平台：康普顿平台是一个能量从零开始的连续区域，其主要贡献者是发生了康普顿效应的那些 γ 入射事例。因此其能量的最大值应该是电子在康普顿散射中所能得到的最大能量，也就是康普顿散射角度在 180° 时的示例。

背散射峰：在真实情况下，有一些 γ 光子可能在进入探测器之前已经经历过一次或者多次康普顿散射过程，这种现象在能谱上会形成一个峰结构，这个峰的峰计数大多是由一些经过约 180° 散射后的 γ 光子贡献的，因此被称为背散射峰。其峰位大致位于全能峰减去康普顿边界的能量。

单、双逃逸峰：对于入射 γ 光子能量大于两倍电子静质量 (1.022MeV) 的时候，电子对效应就可能发生，这时候正负电子湮灭后产生的两个 511keV 的次级 γ 可能：都把全部能量沉积在探测器中；其中一个逃离了探测器，而另一个能量全部沉积在探测器中，此时将在能谱中产生一个峰位为 $E_\gamma - 511\text{keV}$ 的峰，即单逃逸峰；两个都逃离了探测器，此时将在能谱中产生一个峰位为 $E_\gamma - 2*511\text{keV}$ 的峰，即双逃逸峰

三、实验仪器

放射源库、吸收片库、探测器库、高压电源、线性脉冲放大器、单道分析器、多道分析器、康普顿散射旋转平台、移动式 γ 谱

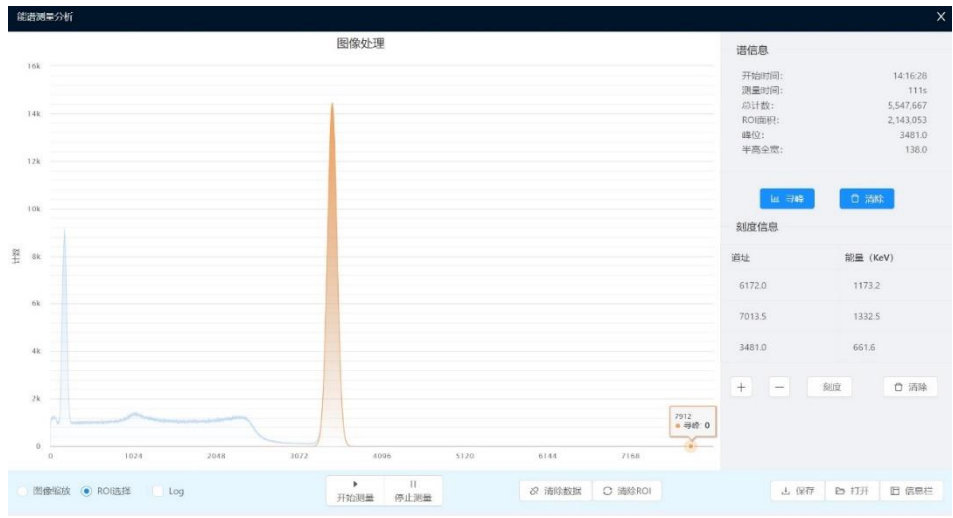
四、实验内容

- 1) 连接线路，熟悉仪器设备，调节仪器参数到工作的最佳状态；
- 2) 测量标准源 ^{137}Cs (0.662 MeV) 和 ^{60}Co ($1.17, 1.33\text{ MeV}$) 能谱，并对谱仪进行能量刻度；
- 3) 选择不同种类的放射源，测量能谱并计算 NaI 材料对不同能量 γ 射线的吸收系数及探测效率；
- 4) 测量不同散射角下 γ 光子的能量，验证康普顿散射能量公式；
- 5) 根据测量结果获得不同散射角下 γ 光子的微分截面，验证康普顿散射微分截面公式。

五、实验记录

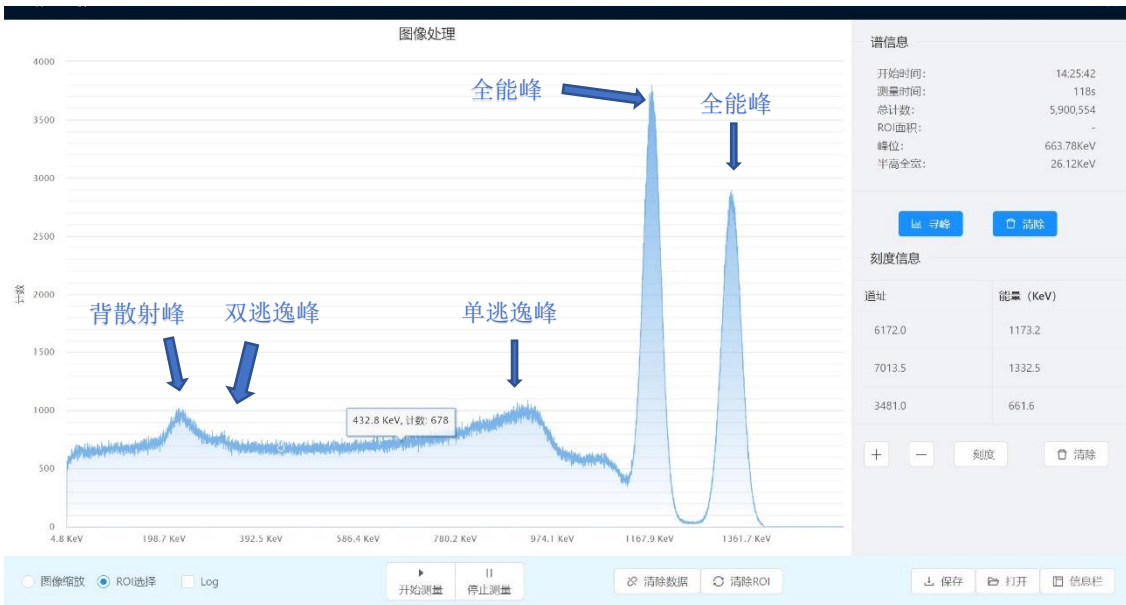
- 1、 γ 射线谱仪的连线
- 2、谱仪参数调节：放置当前放射源为 ^{60}Co ，调整高压及放大器，观察 ^{60}Co 能谱并选择合适的参数（先将高压参数置零），然后打开高压开关，接着调整高压参数。观察放射源 ^{60}Co 的全能峰位置，调整放大器参数，观察 ^{60}Co 能谱，当 ^{60}Co 能谱的全能峰位于道址约 $2/3$ 处时即可，之后不再更改放大倍数。

3、能量刻度：测量 ^{60}Co 能谱，进行寻峰操作并记录道址与能量的相关信息。更换当前放射源为 ^{137}Cs 测量 ^{137}Cs 能谱，进行寻峰操作，并在刻度信息栏记录其道址与已知能量信息将两种放射源的全能峰峰位道址信息和对应能量填写到右侧刻度信息栏，点击“刻度”，对谱仪进行能量刻度。



图表 3 标定刻度

4、观察并分析 γ 射线能谱：更换当前放射源为 ^{60}Co ，测量 ^{60}Co 能谱到足够计数，如下图所示，观察 ^{60}Co 的能谱结构，指出其康普顿边界、康普顿平台、单逃逸峰、双逃逸峰及背散射峰。



图表 4 ^{60}Co 谱线组成

5、不同能量 γ 射线的探测效率的测量：更换当前放射源为 ^{152}Eu ，在 ^{152}Eu 的 122keV 全能峰区域，选择 ROI 区域之后不再改变，同时记录下此时的 ROI 面积和测量时间，计算 122keV 全能峰的原始计数率。分别放置 1, 2, 3, 4, 5 层 NaI 吸收体在放射源与谱仪之间，重复上述步骤。更改不同能量的放射源，重复上述操作，测量不同能量 (122, 245, 344, 511, 662, 779, 835keV) 下不同厚度 NaI 吸收体的计数率。

6、康普顿效应的验证：将康普顿散射平台中间放上塑料闪烁体探测器，正确开启并调整塑料闪烁体高压，确保放射源为 ^{137}Cs ，并改变康普顿散射平台的旋转角度为 20° ，对能谱进行寻峰操作并记录其信息 (测量时间、总计数及峰位)。

六、结果分析

下图为谱仪在 662keV 的信息，由此可计算出谱仪在 662keV 的能量分辨率为 $138.0 \div 3481.0 * 100\% = 3.964\%$ 。



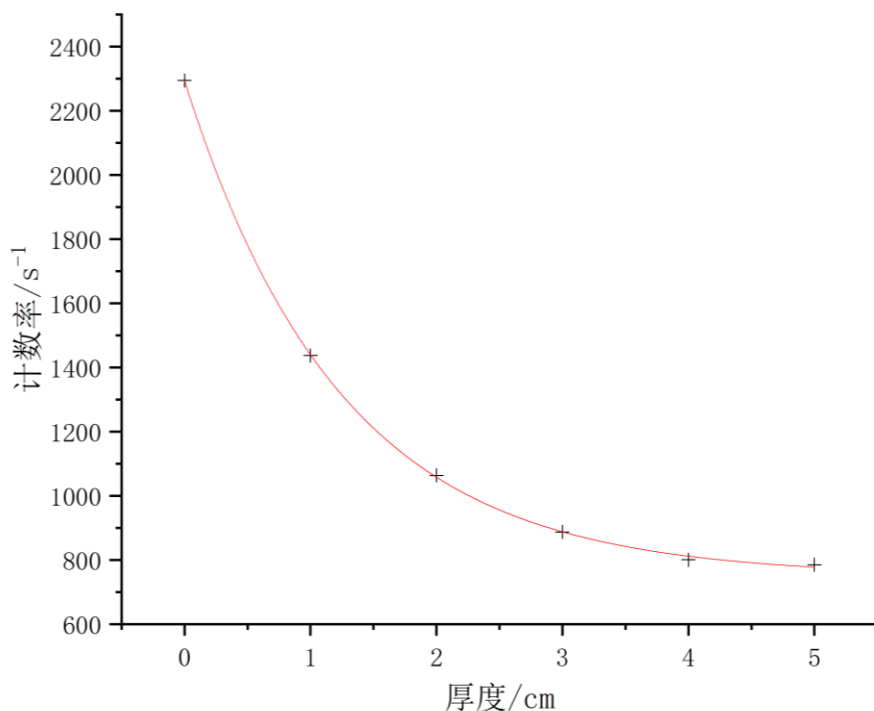
图表 5 662keV 下信息

Table 1 248.45keV 下不同厚度 NaI 计数率

时间/s	20	20	29	20	20	20
ROI 面积	45886	28749	30838	17742	16011	15703
计数率/s ⁻¹	2294.3	1437.45	1063.37	887.1	800.55	785.15

将厚度与计数率用 $y = y_0 + A * \exp(-R_0 * x)$ 函数拟合，得到吸收系数：

248.45keV 下计数率与厚度关系

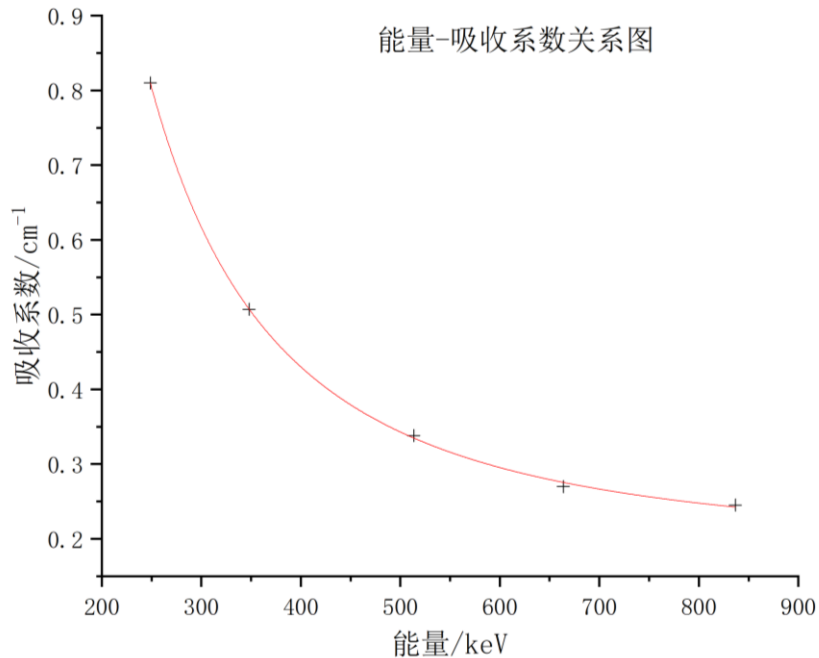


吸收系数为 $(0.81 \pm 0.01) \text{ cm}^{-1}$ ， $r=0.9998$ 。对不同能量下的数据做相同处理，得到不同能量下的吸收系数为：

Table 2 不同能量下吸收系数

能量/keV	248.45	348.02	513.57	663.78	779.64	836.62
吸收系数/cm ⁻¹	0.81	0.507	0.338	0.27	0.214	0.245

其中 836.62keV 数据偏离较多，舍弃。使用 $y=A*x^B+C$ 公式进行拟合：

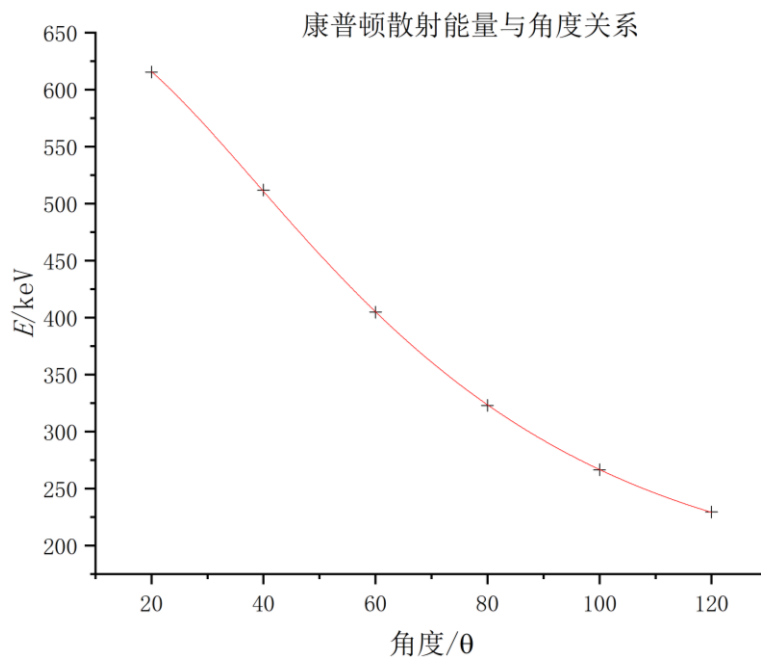


拟合结果 $\mu=3.3*10^4 * E^{-1.97}+0.185$, $r=0.9997$, 符合较好。

对康普顿散射不同角度下的能量与角度进行拟合

Table 3 康普顿散射不同角度下的能量

角度/°	20	40	60	80	100	120
能量/keV	615.41	511.96	404.81	322.94	266.43	229.42

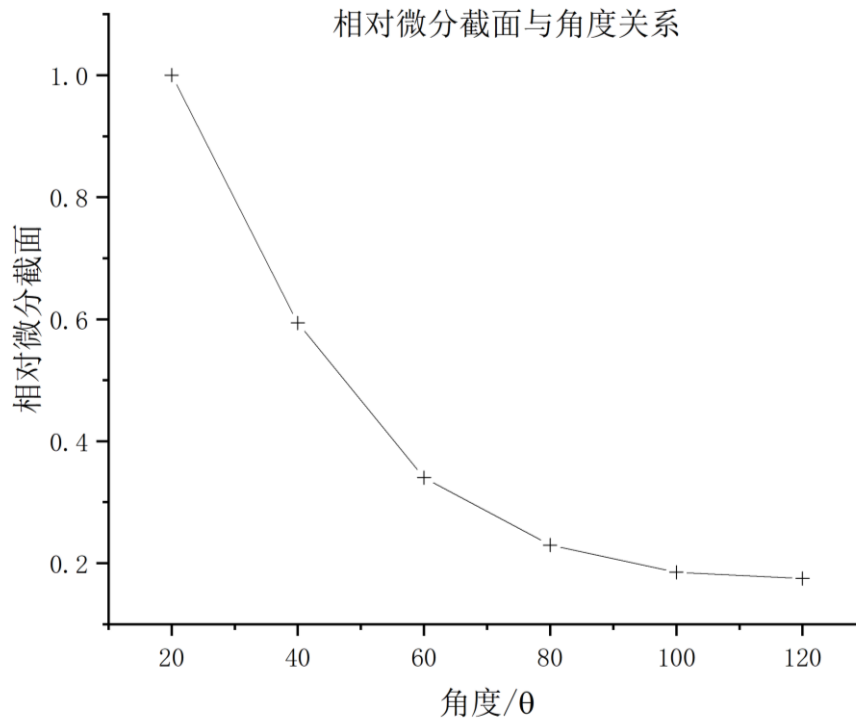


使用拟合公式 $E = \frac{C}{1 + \frac{C}{511(1 - \cos \theta)}} + B$, 拟合结果 $C = (659.1 \pm 1.2) \text{ keV}$, $r = 0.9998$ 。其中 C

与此事所用 ^{137}Cs 全能峰能量 663.78keV 也符合很好, 进一步证明拟合的正确性。

使用下列公式计算相对微分截面, 做出其与角度关系。原公式较为复杂, 仅做定性观察与预期相符。

$$\frac{d\sigma(\theta)/d\Omega}{d\sigma(\theta_0)/d\Omega} = \frac{N_p(\theta)}{R(\theta)\eta(\theta)} / \frac{N_p(\theta_0)}{R(\theta_0)\eta(\theta_0)} = \frac{N_p(\theta)}{\varepsilon_f(\theta)} / \frac{N_p(\theta_0)}{\varepsilon_f(\theta_0)} = \frac{N_a(\theta)}{\varepsilon(\theta)} / \frac{N_a(\theta_0)}{\varepsilon(\theta_0)}$$



七、实验结论

本实验首先分析了 ^{60}Co 的 γ 射线能谱, 观察了其中各个组成部分。之后换用不同放射源, 在不同厚度吸收材料下对能谱数据进行计算, 进而得到吸收系数与能量的关系: $\mu = 3.3 \times 10^4 \cdot E^{-1.97} + 0.185$ 。最后验证了康普顿散射, 包括能量与角度关系, 相对微分截面与角度关系, 结果均符合预期。

拉曼光谱及宝石检测仿真实验

吕霄龙 19307110080

一、实验目的

1. 掌握拉曼散射的产生机理以及拉曼光谱仪的发展与应用。
2. 熟悉激光拉曼光谱仪的基本结构和原理。
3. 通过测定 CCl_4 的激光拉曼光谱，熟悉拉曼光谱实验方法，了解拉曼光谱与分子振动-转动能级的关系，为进一步使用拉曼光谱进行研究打下基础。
4. 利用拉曼光谱仪测量钻石，辰砂以及雌黄等 24 个样品的拉曼光谱。

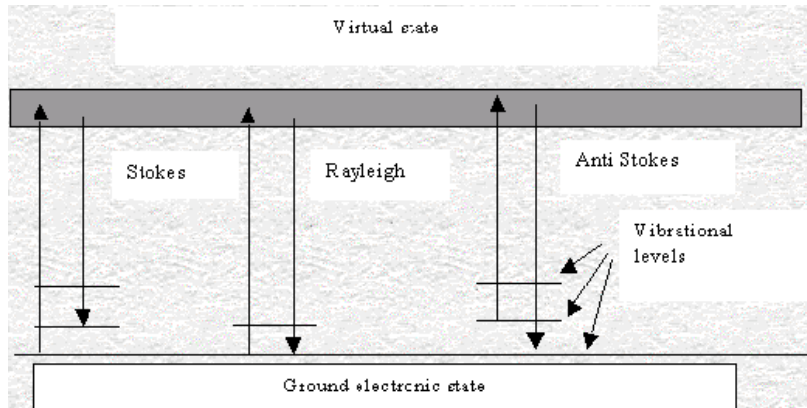
二、实验原理

1. 拉曼效应和拉曼光谱：

当光照射到物质上时会发生非弹性散射，散射光中除有与激发光波长相同的弹性成分（瑞利散射）外，还有比激发光波长长的和短的成分，后一现象统称为拉曼效应。由分子振动、固体中的光学声子等元激发与激发光相互作用产生的非弹性散射称为拉曼散射，一般把瑞利散射和拉曼散射合起来所形成的光谱称为拉曼光谱。

2. 拉曼光谱基本原理：

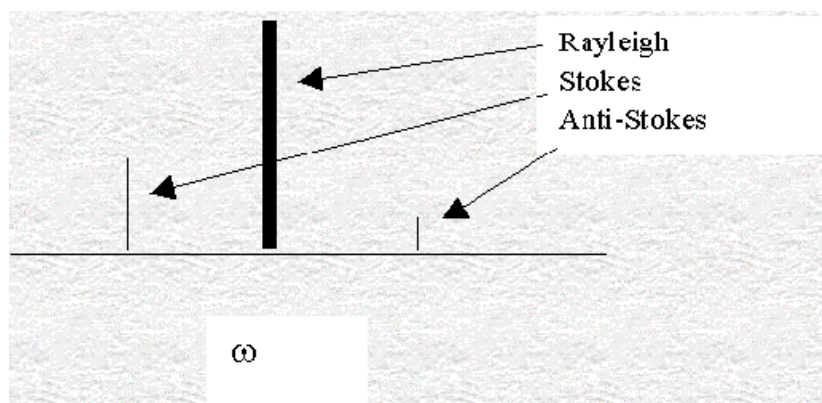
设散射物分子原来处于基电子态，振动能级如下图所示。



图表 1 能级示意

当受到入射光照射时，激发光与此分子的作用引起的极化可以看作为虚的吸收，表述为电子跃迁到虚态，虚能级上的电子立即跃迁到下能级而发光，即为散射光。设仍回到初始的电子态，则有如图所示的三种情况。因而散射光中既有与入射光频率相同的谱线，也有与入射光频率不同的谱线，前者称为瑞利线，后者称为拉曼线。在拉曼线中，又把频率小于入射光频率的谱线称为斯托克斯线，而把频率大于入射光频率的谱线称为反斯托克斯线。

瑞利线与拉曼线的波数差称为拉曼位移，因此拉曼位移是分子振动能级的直接量度。下图给出的是一个拉曼光谱的示意图。



图表 2 拉曼光谱示意

3. 拉曼效应的经典电磁解释：

如分子，在激发光的交变电场作用下发生感生极化，也就是正负电中心从相合变为相离，成为电偶极子。这感生电偶极子是随激发场而交变的，因此它也就是成了辐射体。简单的与激光同步的发射，就成为瑞利散射。然而分子本身有振动和转动，各有其特种频率。这些频率比激发光的频率低一两个数量级或更多些，于是激发光的每一周期所遇的分子振动和转动相位不同，相应的极化率也不同。

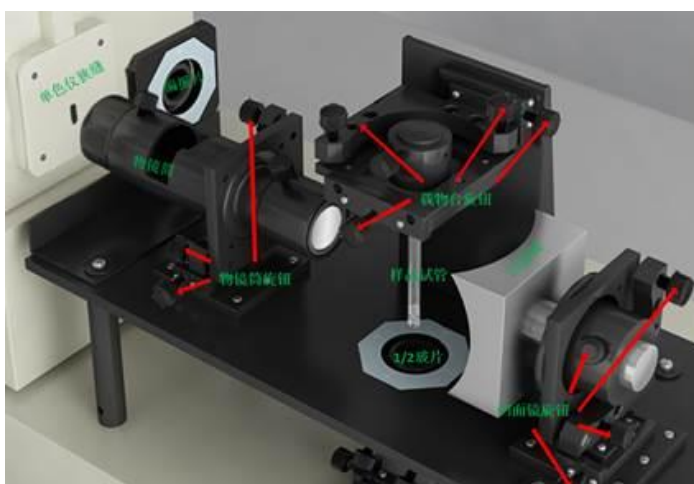
4. 拉曼光谱在外观上有三个明显的特征：

- (1) 对同一样品，同一拉曼线的波数差与入射光波长无关；
- (2) 其次在以波数为变量的拉曼光谱图上，如果以入射光波数为中心点，则斯托克斯线和反斯托克斯线对称地分裂在入射光的两边；
- (3) 斯托克斯的强度一般都大于反斯托克斯线的强度。拉曼光谱的上述特点是散射体内部结构和运动状态的反映，也是拉曼散射固有机制的体现。

三、实验内容

1. 获取 CCl_4 分子的拉曼光谱，与光谱库对比。
2. 利用拉曼光谱进行宝石鉴定，测量钻石，辰砂以及雌黄等 24 个样品的拉曼光谱。

四、实验仪器



图表 3 实验装置示意

拉曼光谱仪、处理扫描结果的电脑主机和显示器

五、实验记录与分析

选择实验样品四氯化碳，打开激光器电源以及拉曼光谱仪电源，调节样品管，调节光路，观察如下：

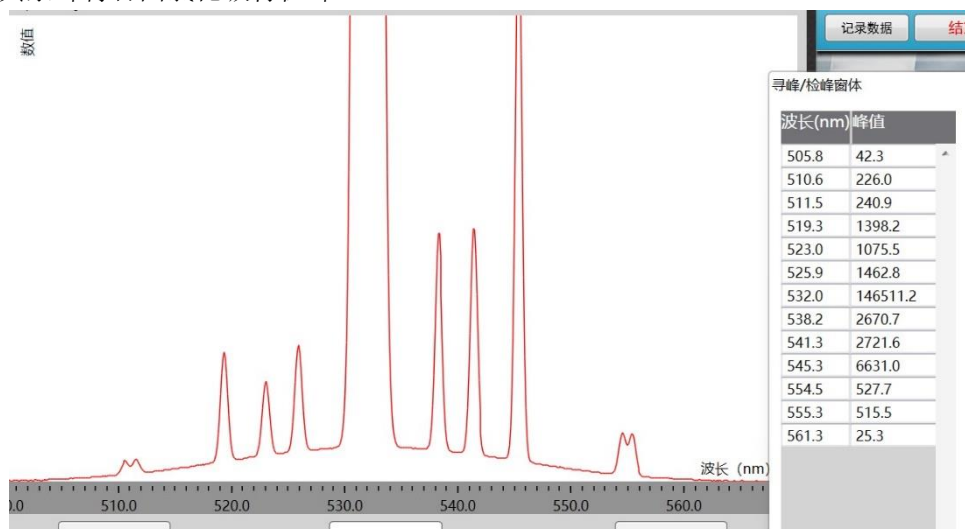


图表 4 单色仪光孔



图表 5 光路图

打开分析仪，首先进行阈值分析，然后扫描拉曼光谱，自动寻峰。其中有误检的峰，排除后其余峰符合四氯化碳特征峰。



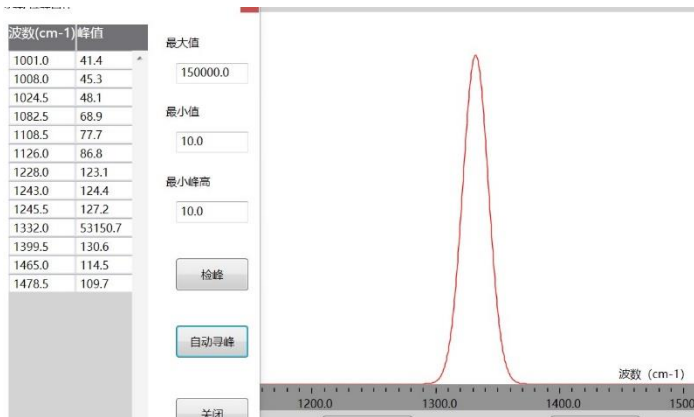
图表 6 四氯化碳扫描结果

将四氯化碳换为钻石，重复上述光路调节步骤。



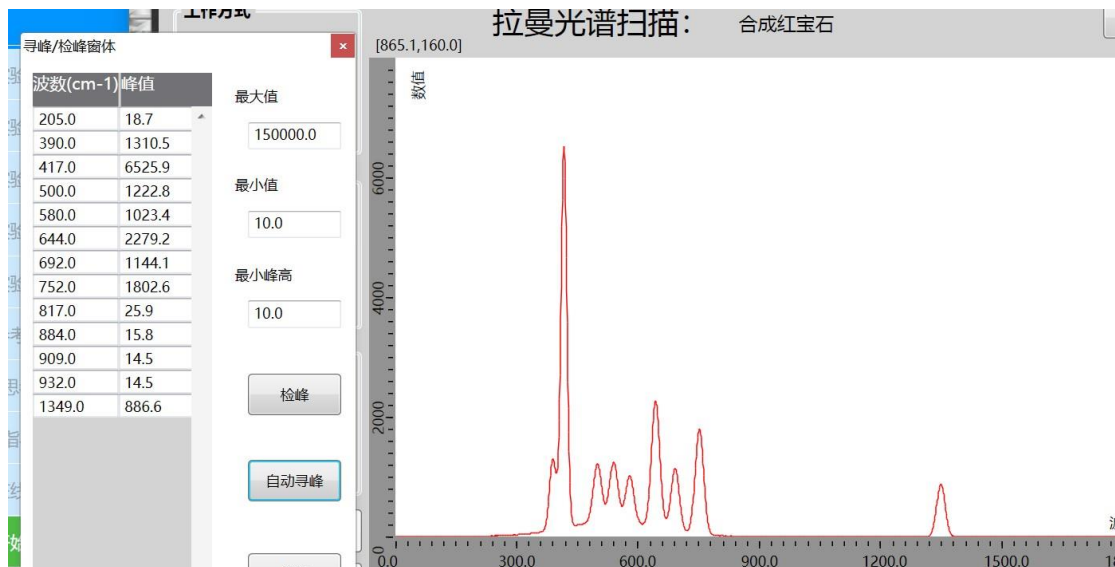
图表 7 换用钻石

扫描钻石的拉曼光谱，得到如下结果，最高峰位置符合钻石的特征谱。

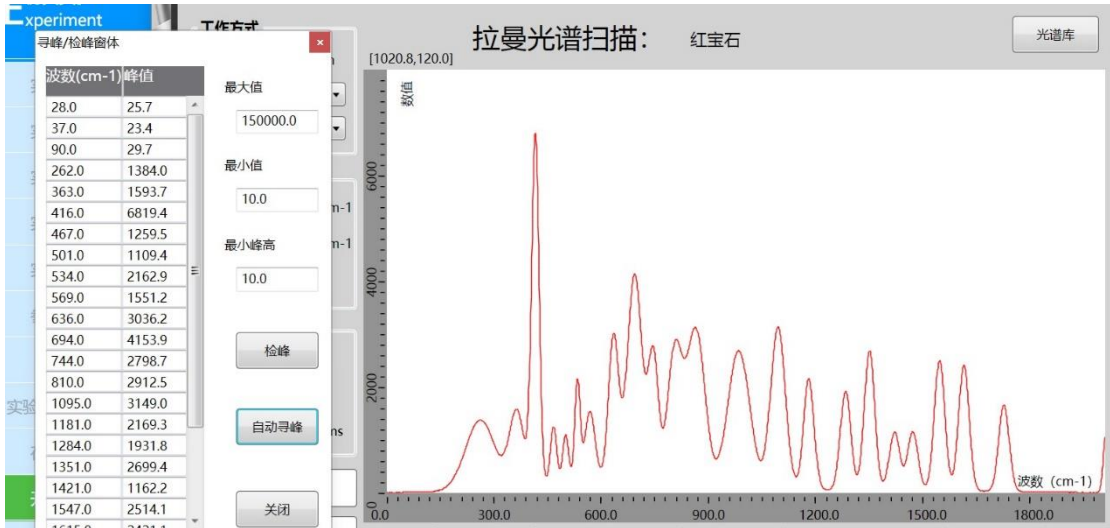


图表 8 钻石特征谱

扫描比较真红宝石与合成红宝石的谱线，可以看到真红宝石的峰数量远多于合成红宝石。

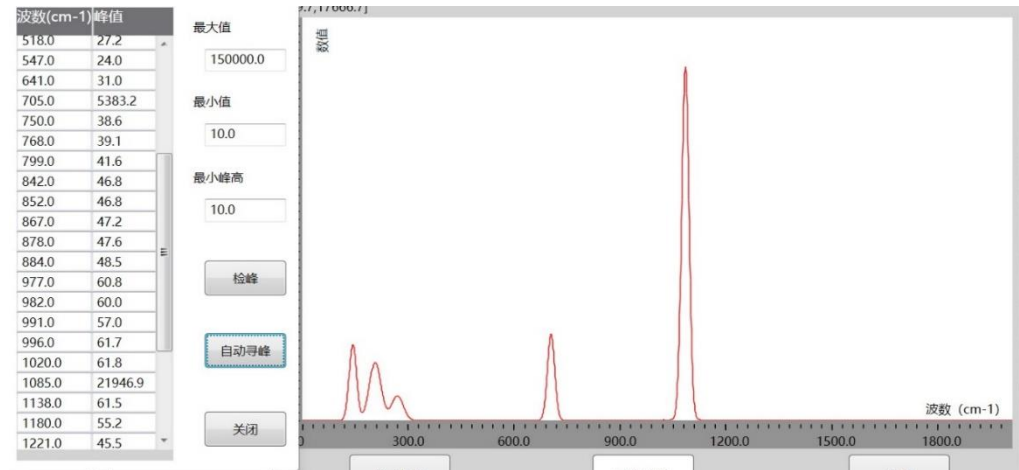


图表 9 合成红宝石谱线

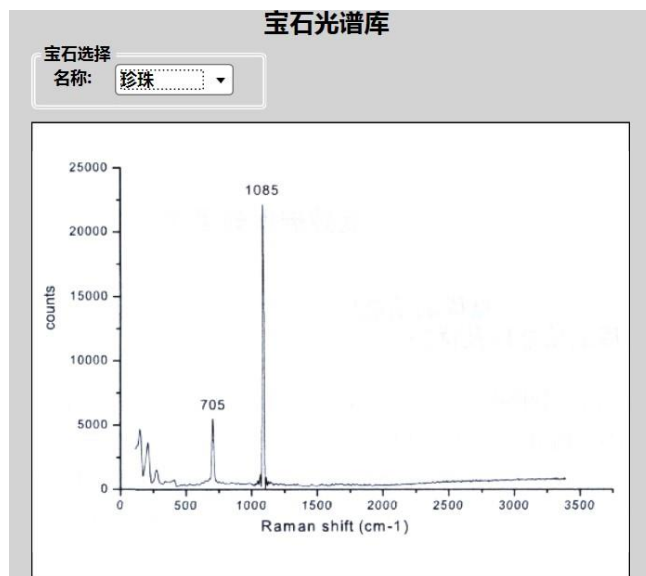


图表 10 红宝石谱线

最后扫描一未知样品：
翻阅谱库，对照得知该样品为珍珠：



图表 11 未知样品



图表 12 珍珠特征峰

六、实验结论

本实验先以四氯化碳样品熟悉拉曼光谱分析仪操作方法，后进行了宝石鉴定的操作，扫描了钻石，对真假红宝石进行鉴别，并通过观察特征峰的方式判断未知样品的种类。