

## X射线的康普顿效应

美国物理学家康普顿 (A. H. Compton) 在研究X射线与物质散射的实验里, 发现散射波中含有波长增大的波, 该现象就是著名的康普顿效应。康普顿指出: 散射应遵从能量守恒和动量守恒定律, 出射X射线波长变长证明了X射线光子带有量子化动量。康普顿效应是近代物理学的一大发现, 它进一步证实了爱因斯坦的光子理论, 揭示出光的二象性, 从而导致了近代量子物理学的诞生和发展; 另一方面康普顿效应也阐明了电磁辐射与物质相互作用的基本规律。因此, 无论从理论或实验上, 它都具有极其深远的意义。康普顿因此获得了1927年度诺贝尔物理学奖。

### 【实验目的】

实验研究散射X射线的能量随散射角的变化。

### 【实验原理】

#### 1. X射线的产生和X射线能谱

高速运动的电子与物质相互作用减速时, 即可产生X射线。实验室X射线源一般用高速电子束激发金属靶产生的X射线, 其核心部件是X射线管。本实验用的X射线管结构如图1所示, 它是一个抽成高真空的石英管, 其工作原理如图2所示。工作时热阴极通电加热后可发射电子, 电子在高压加速作用下轰击钨阳极而产生X射线。钨靶受电子轰击的面是斜面, 以利于X射线定向射出。

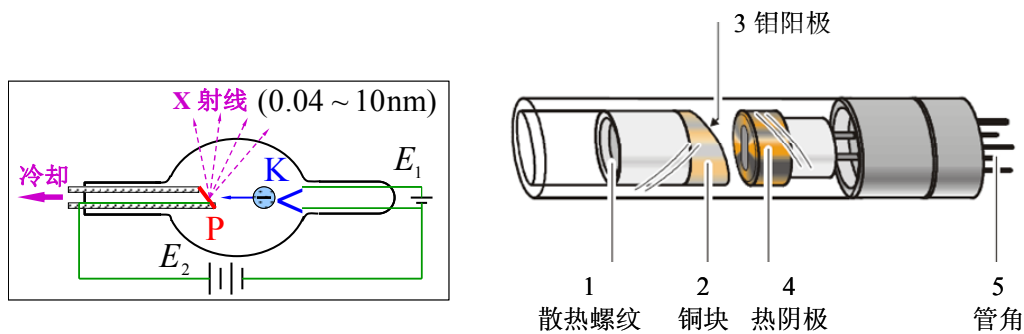


图 1 X 射线管工作原理

图 2 钨 X 射线管结构

高速电子轰击靶材产生的X射线其能谱分连续谱和特征谱两部分, 图3是钨阳极X射线管的能谱。连续谱是高速电子与靶原子发生碰撞, 一般会有多次碰撞, 辐射出的光子能量各不相同, 形成连续谱, 即韧致辐射, 它是一个连续谱, 且有确定的最高频率 (或最小波长)。当电子的能量超过一临界值时, 将会出现X射线的特征谱线, 即在连续的韧致辐射光谱上添加分离的光谱线。这是因为当更高能量的电子深入到阳极原子的壳内, 通过撞击将最里面轨道上的电子驱逐出来后, 产生的空位由外层轨道的电子填补, 并发出X射线。各外层电子跃迁到K层产生的X射线组成K线系, L层到K层的为 $K_{\alpha}$ 线, M层到K层的为 $K_{\beta}$ 线。

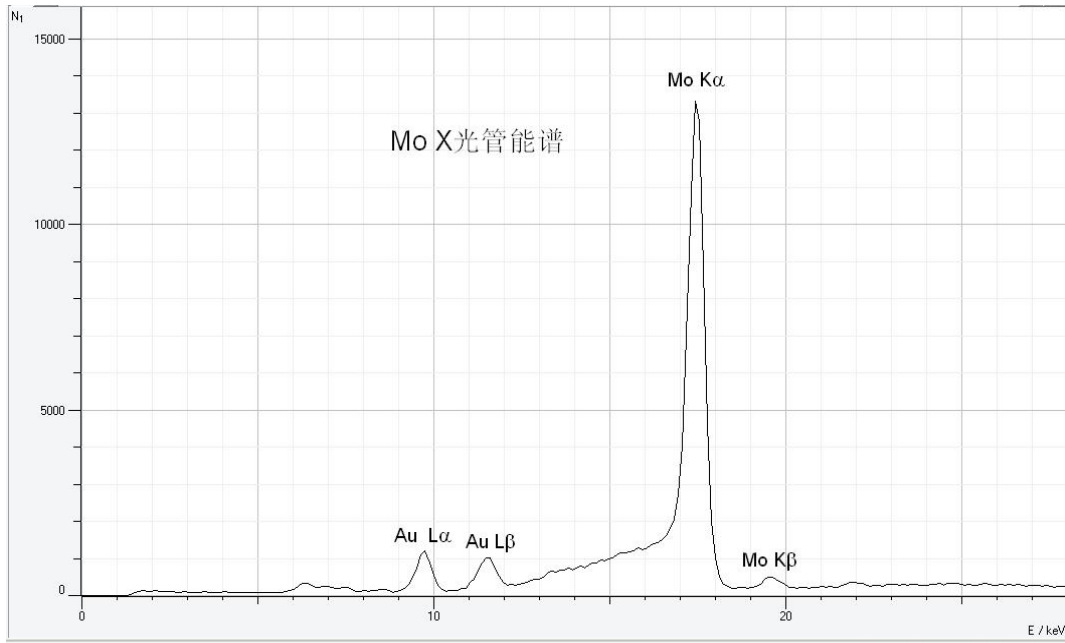


图3 钼阳极 X 光管的能谱  
(使用硅 PIN 光电二极管和 Zr 滤片)

## 2. 康普顿效应

康普顿效应可理解为X光子与自由电子碰撞的结果(图3)。若认为碰撞前电子是静止的,根据相对论的能量守恒公式则有

$$\frac{h \cdot c}{\lambda_1} + m_0 \cdot c^2 = \frac{h \cdot c}{\lambda_2} + \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (1)$$

其中 $h$ 为普朗克常数、 $c$ 为光速、 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 为X光子散射前后的波长、 $m_0$ 为电子的质量、 $v$ 为碰撞后电子的速度。根据动量守恒关系则有

$$\frac{h}{\lambda_2} \cdot \cos \vartheta + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot v \cdot \cos \varphi = \frac{h}{\lambda_1}$$

和

$$\frac{h}{\lambda_2} \cdot \sin \vartheta + \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \cdot v \cdot \sin \varphi = 0 \quad (2)$$

其中 $\theta$ 和 $\varphi$ 为散射角。碰撞前后X光子的波长改变量为

$$\Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \frac{h}{m_0 \cdot c} (1 - \cos \theta) = \lambda_c (1 - \cos \theta) \quad (3)$$

式中定义  $\lambda_c=2.426\text{pm}$ 为电子的康普顿波长。

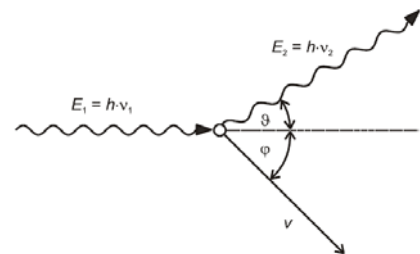


图4 康普顿散射示意图

从公式(1)和(2)中可推出散射X光子的能量

$$E_2 = \frac{E_1}{1 + \frac{E_1}{m_0 \cdot c^2} \cdot (1 - \cos \theta)} \quad (4)$$

式中 $E_1$ 是入射X光子的能量。

### 【实验仪器】

X射线实验仪（含Mo阳极X光管和测角仪），X射线能量探测器，康普顿效应附件，计算机辅助测量分析系统（CASSY）的传感器模块、多道分析仪模块和软件（CASSY Lab）。

### 【实验内容】

1. 根据实验室提供的参考资料，调整设置实验系统（图5）。

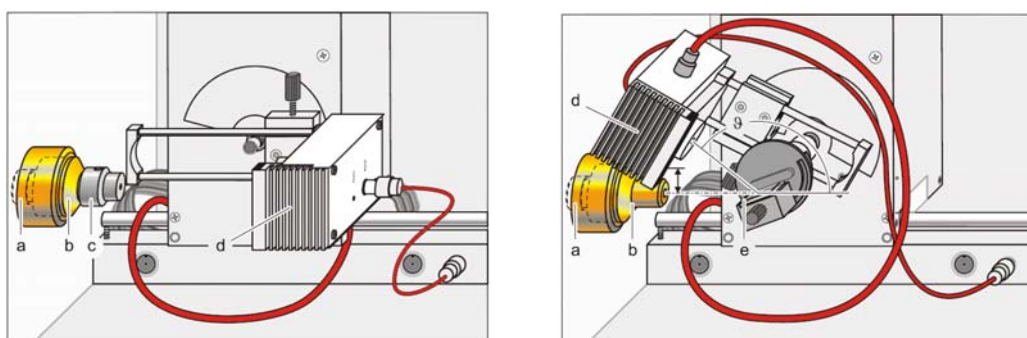


图5 测量入射X射线能谱（左图）和测量散射X射线能谱（右图）的实验系统设置  
a-Zr滤片，b-准直器，c-衰减器，d-X射线能量探测器，e-散射体

2. 调节入射X射线的计数率并设置探测器的零点位置。取下样品靶台，将能量探测器置于 $0^\circ$ 位置；将衰减器装在圆形准直器上，并仔细对齐（螺孔分别在上下方向）；设置X光管的高压为35kV、电流为0.1mA；开启高压，在能量探测器的 $0^\circ$ 位置附近仔细调节，寻找总计数率最大的角度，设置该机械零点为能量探测器的 $0^\circ$ 角位置；调节X光管的电流，使计数率约为150/s为宜（计数率不要超过200/s，以免损坏能量探测器）。

3. 测量入射X射线的能谱，并进行能量定标。当使用硅PIN光电二极管作为能量探测器时，可使用Au  $L\alpha$ 线（9.71keV）和Mo  $K\alpha$ 线（17.44keV）（见图3）进行能量定标。

4. 用有机玻璃作为散射体，测量不同散射角度的散射X射线能谱，将测量结果与理论值进行比较。测量时，取下衰减器，将有机玻璃散射体放置在样品靶台上并固定住；设置X光管的高压为35kV、电流为0.9mA；将散射体靶台调至 $20^\circ$ ，在 $30^\circ$ - $150^\circ$ 间改变能量传感器的角度，选择合适的测量时间，测量记录X射线散射谱；利用峰位计算拟合功能，确定和记录不同角度散射谱的峰位；计算分析实验结果，并与公式(4)的理论值比较。

### 【注意事项】

1. X射线实验仪的设计符合安全使用的规定，在仪器固有的保护和屏蔽条件下，使用时X射线的泄露剂量小于 $1\mu\text{Sv/h}$ ，与天然本底处同一数量级。为安全起见，应该做到：在开启实验仪前应检查设备的外罩，尤其是铅玻璃窗和X射线管是否完好，玻璃滑门可关闭良好；按下滑动门的安全锁销时，要确保X射线管的高压能自动切断。

2. 为安全和延长X射线管的使用寿命，仅在工作需要时开启X射线管的工作电压，工作结束应立即关闭X射线管的工作电压。的为避免X射线管过热，实验仪工作时，应确保X射线管室的通风设备正常运转。

3. 应避免测角仪转动中被卡住，切忌强行转动测角仪。