

德国莱宝 X 射线实验仪验证康普顿效应实验研究

刘哲郡

(复旦大学 材料科学系, 上海 200433)

摘要: 使用德国莱宝 X 射线实验仪, 通过测量 X 射线散射前后计数率的方法验证了康普顿效应, 采用了两种实验测量方法验证了康普顿散射波长的位移公式, 分析了不同测量方法对实验结果的影响。

关键词: X 射线实验仪; 康普顿效应; 透射系数; 量子理论

1 引言

光子在介质中和物质微粒相互作用时, 可能使得光向任何方向传播, 这种现象叫光的散射。1922 年, 美国物理学家康普顿在研究石墨中的电子对 X 射线的散射时发现了用经典理论不能解释的结果: 即散射波中除了含有原波长的 X 光外, 还产生了比入射波波长更长的 X 射线, 其波长的增量随散射角不同而变化, 该现象就是著名的康普顿效应。^[1]用经典电磁理论来解释康普顿效应遇到了困难, 康普顿借助于爱因斯坦的光子理论, 从光子与电子碰撞的角度对此实验现象进行了圆满地解释。^[2]由能量守恒定律和动量守恒定律, 考虑相对论效应, 可以计算出 X 射线在被电子散射前后波长与散射角的关系:

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc}(1 - \cos 2\theta) \quad (1)$$

式中 h 是普朗克常量, c 是光速, θ 为散射后光子与入射光子方向的夹角, λ_1 、 λ_2 分别是散射前后 X 射线的波长, 其中 $\lambda_c = \frac{h}{mc} = 0.0243\text{nm}$, 称为康普顿波长。

康普顿效应的发现, 以及理论分析和实验结果的一致, 不仅有力地证实了光子假说的正确性, 并且证实了微观粒子的相互作用过程中, 也严格遵守能量守恒和动量守恒定律。康普顿因此获得了 1927 年度的诺贝尔物理学奖。^[1]

本实验利用德国莱宝公司生产的 X 射线实验仪采用两种方法测量并计算了不同散射角度下康普顿散射的波长位移, 验证了康普顿的光量子理论。

2 实验原理

由朗伯定律可知, X 光在某种材料中的衰减满足指数关系 $I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$, 可推得

$$-\ln \frac{I}{I_0} = \mu d \quad (2)$$

所以通过 $\mu = -\ln \frac{I}{I_0} / d$ 即可求得不同材料的衰减系数。衰减系数与密度的比值可以用 $\mu_m = \mu / \rho$ 表示, 称为质量吸收系数^[3], 其大小与入射 X 射线波长及穿透材料的原子序数呈正比:

$$\mu_m = k\lambda^3 Z^3 \quad (3)$$

由此可知同种材料对 X 射线的吸收强度与入射 X 射线的波长有关。由于发生康普顿散射前后 X 射线的波长发生变化, 同一材料在散射前后对 X 射线的吸收强度将发生变化。

X 射线透过一定厚度的铜片时, 透射系数 T (即 I/I_0) 与波长的关系是^[4]:

$$T = e^{-a\left(\frac{\lambda}{100\text{pm}}\right)^n} \quad (4)$$

其中波长以 pm 为单位, 除以 100 pm 是为了是常数 a 没有单位且数值小于等于 10 以利于计算。

当铜片厚度固定时, 透射系数仅仅是波长的函数, 所以可以根据单色的入射波和散射波对相同铜片的透射系数来求入射射线和散射射线的波长。

3 实验仪器及实验方法

本实验采用了德国莱宝公司生产的X射线实验仪，X光管的阳极材料是钼靶，利用Mo的 k_α 特征谱线作为入射X射线，X射线探测器是GM计数管。用铝块作为X射线的散射材料，选取了散射角为 90° 、 120° 及 150° 三组进行测量。

具体方法是：首先测量光路中不加Cu片时某一角度的计数率 R_0 ，然后分别将Cu片固定在散射前后处，分别测量X光子被散射前后穿过Cu片的技术率 R_1 和 R_2 。由于康普顿散射的强度比较低，尤其是在光路中加入Cu吸收片后，这时需要考虑背景散射，即不加X光时的计数率 R 。康普顿散射前后X光子穿过Cu片的透射率可以表示为：

$$T_1 = \frac{R_1 - R}{R_0 - R} \quad (5) \qquad T_2 = \frac{R_2 - R}{R_0 - R} \quad (6)$$

则可由 T_1 和 T_2 分别求出 λ_1 和 λ_2 ，从而求出 $\Delta\lambda$ ，验证康普顿效应。

4 实验结果与分析

首先测量公式 $T = e^{-a(\frac{\lambda}{100\text{pm}})^n}$ 中a和n的值，可以根据Cu片对已知波长的钼靶 k_α 、 k_β 特征峰的吸收来计算a和n的值。使用NaCl晶体，在接收器一端加Cu吸收片，分别设置COUPLED模式 $\beta = 6.4^\circ$ 和 $\beta = 7.2^\circ$ ，设定计数时间 $\Delta t = 600\text{s}$ ，可得出 k_α 、 k_β 特征峰对应的透射系数 T_α 、 T_β 。

$$T_\alpha = e^{-a(\frac{\lambda_\alpha}{100\text{pm}})^n} \quad \lambda_\alpha = 0.0711\text{nm} = 71.1\text{pm} \quad T_\alpha = \frac{I_\alpha}{I_{\alpha 0}} = 0.080$$

$$T_\beta = e^{-a(\frac{\lambda_\beta}{100\text{pm}})^n} \quad \lambda_\beta = 0.0632\text{nm} = 63.2\text{pm} \quad T_\beta = \frac{I_\beta}{I_{\beta 0}} = 0.163$$

联立可解得

$$a = 6.57, n = 2.80$$

仪器说明书参考值为

$$a = 7.60, n = 2.75$$

1) 实验测量方法 1

在发射端加Zr片，使产生X射线为单一波长的 k_α 线。使用COUPLED模式，即靶台转动 θ ，接收器转动 2θ 。首先测量光路中不加Cu片时某一角度的计数率 R_0 ，然后分别将Cu片固定在散射前后处，分别测量X光子被散射前后穿过Cu片的技术率 R_1 和 R_2 。最后测量不加X光时的计数率 R 。然后改变 θ 得到一系列不同角度的 R_0 、 R_1 、 R_2 和 R 值。

设置管压35kV，管流1mA， R_1 、 R_2 和 R 计数时间600s， R_0 计数时间60s

θ	R/s^{-1}	R_0/s^{-1}	R_1/s^{-1}	R_2/s^{-1}	T_1	T_2
45°	0.338	7.15	1.373	1.038	0.287	0.346
60°	0.301	7.176	1.493	1.048	0.267	0.337
75° (管压由35kV改为了31kV)	0.311	4.31	0.863	0.648	0.301	0.377

计算结果如下：

理论值	实测 a、n 值计算				参考 a、n 值计算			
	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda/\text{pm}$	误差	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda/\text{pm}$	误差
2.426	64.015	68.475	4.460	83.8%	63.498	68.005	4.507	85.8%
3.640	62.375	67.870	5.495	51.0%	61.842	67.394	5.552	52.5%
4.528	65.160	70.550	5.389	19.0%	64.655	70.104	5.449	20.3%

从表中可以看出散射角较大时实验值与理论值符合得较好，散射角较小时实验值与理论值误差较大。

2) 实验测量方法 2

使用 target 模式，将靶台转动 20° ，测量接收器处于不同 2θ 角度时的 R_0 、 R_1 、 R_2 和 R 值
设置管压 30kV，管流 1mA， R_1 、 R_2 和 R 计数时间 600s， R_0 计数时间 60s

2θ	R/s^{-1}	R_0/s^{-1}	R_1/s^{-1}	R_2/s^{-1}	T_1	T_2
90°	0.309	6.95	1.044	0.729	0.335	0.420
120°	0.316	7.11	1.023	0.778	0.344	0.409
150°	0.339	6.51	1.079	0.753	0.323	0.411

计算结果如下：

理论值 $\Delta\lambda/\text{pm}$	实测 a、n 值计算				参考 a、n 值计算			
	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda/\text{pm}$	误差	λ_1	λ_2	$\Delta\lambda/\text{pm}$	误差
2.426	67.669	73.371	5.702	135%	67.190	72.959	5.769	138%
3.640	68.339	72.676	4.337	19.2%	67.868	72.256	4.388	20.6%
4.528	66.778	72.807	6.029	33.2%	66.289	72.388	6.099	34.7%

从表中可以看出散射角较大时实验值与理论值符合得较好，散射角较小时实验值与理论值误差超过了 100%，可能是由于偶然误差造成，说明实验测量方法 2 没有方法 1 可靠。

5 实验总结

实验设计验证康普顿实验的方法中，产生了较大误差，可能的原因有以下几点：

1. 验证康普顿效应是基于公式 $\mathbf{T} = e^{-a(\frac{\lambda}{100\text{pm}})^n}$ ，但 a 和 n 的值不确定，通过对 Cu 吸收 k_α 、 k_β 特征峰来求 a 和 n 时引入了测量误差，导致在之后使用 a 与 n 的值时增加了误差。
2. 通过康普顿效应公式求出的理论值最大也只有 4.528pm，而实验中所用的钨靶 X 射线波长较大，导致计算得到的 λ_1 、 λ_2 都在 60~80pm 之间，由此得到的康普顿散射波长差会比较大。所以对于康普顿散射实验如果采用波长较小的 X 射线，实验误差会相对小一些。
3. 本实验使用了 Al 块作为散射材料，一般采用石墨做散射材料较好，因为 Al 比 C 原子序数大，对 X 光的康普顿散射较弱。
4. 本实验为了得到单一波长采用了入射端加 Zr 片吸收的方法，虽然 Zr 片将 X 射线的 k_β 线吸收，只留下了强度较高的 k_α 线，但是还是有强度较低连续谱线残留，这将给康普顿散射带来误差。

实验虽然存在误差，但除了测量方法 2 的第一组结果外，属于可接受范围内，说明此方法验证康普顿效应是可行的。

致谢：

感谢姚红英老师提供实验指导，感谢同组搭档武汪洋同学的合作。

参考文献：

- [1] 百度百科“康普顿效应”词条.
- [2] Compton A H. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements [J]. Phys. Rev., 1923, 21(5):483~501.
- [3] 范雄. X 射线衍射金属学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982. 17.
- [4] 德国莱宝教具公司. Leybold physics leaflets, Compton effect [Z]. 6. 3. 3. 7.