

# X 光系列实验及相关问题的讨论

师博博

06301010028

**摘要:** X 射线的研究在物理学从经典物理发展到量子物理学的过程中,起了十分重要的作用。了解 X 光、X 光的发射谱成分。在本实验中,我们了解了 GM 计数管的工作原理,深切体会了 X 光的成像原理,了解了布拉格衍射及其应用,检验了莫塞莱 (moseley) 定律,研究了 X 光在材料中的衰减系数与波长及材料的原子序数关系,验证了朗伯定律,测定了普朗克常数  $h$ 。我们做了这一系列有趣的实验,从而对 X 射线的产生、特点和应用有较深刻的认识,并提高独立从事研究工作的能力。

**关键词:** X 射线 莫塞莱(moseley)定律 朗拍定律 普朗克常数 GM 计数管 布拉格

## 一、引言

X 射线是波长很短的电磁波,它是德国物理学家伦琴于 1895 年发现的。从伦琴因发现 X 射线得诺贝尔物理学奖到 1979 年科马克等因发明 X 射线 CT 扫描仪得诺贝尔医学奖的 80 年中,因 X 射线方面的研究工作而得诺贝尔物理学奖、化学奖、生理学或医学奖的项目达 16 项、科学家达 24 人(平均每 5 年就有 1 项研究 X 射线的成果获诺贝尔奖)。有关 X 射线的实验非常丰富,其内容十分广泛而深刻。我们本次实验就是探索 X 射线的部分应用,并检验和验证一些关于 X 射线的定律。

## 二、实验内容

### 1. 调校测角器的零点

结果如图 1

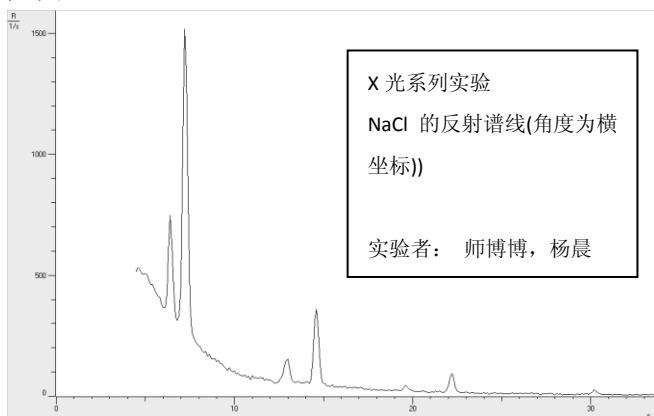


图 1: NaCl 的反射谱线(角度为横坐标)

### 2. 用电离腔测 X 射线

(1)观察零电流随  $U_c$  变化关系。

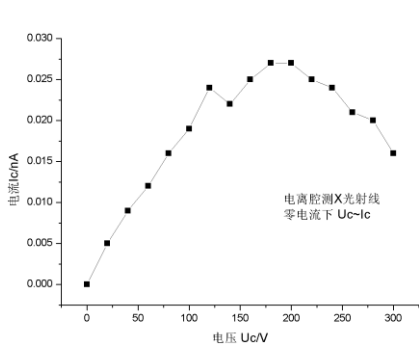


图 2: 零电流下  $U_c \sim I_c$

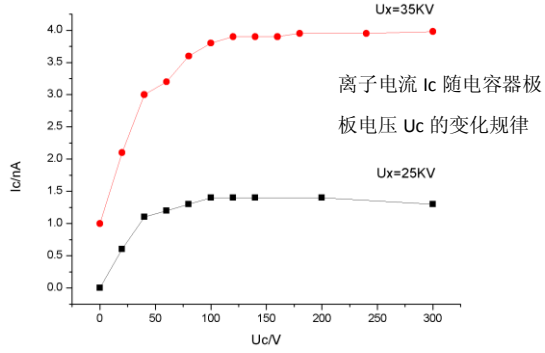


图 3: 离子电流  $I_c$  随电容器极板电压  $U_c$  的变化规律

上图为零电流随  $U_c$  的变化关系。测量此步时，我将表先调零后测量，测量时电压档量程放到了最小，灵敏度极高，旁边有人走动时指针就会摆，所以可能测量会很不准。但还是可以从上图看出开始时零电流随  $U_c$  一直增大，但到  $U_c=200V$  左右，零电流有所下降。

(2)测  $I_c$  与  $U_c$  的关系

观察发现， $U_x = 35kV$  时， $I_c$  先随  $U_c$  上升到  $125kV$  时达到饱和，之后基本呈水平。  
 $U_x=25kV$  时， $I_c$  也是先随  $U_c$  上升，而在  $U_c = 130V$  后呈渐渐下降趋势，但坡度非常非常小。

(3)测量饱和离子电流  $I_c$  随 X 光管 I 的变化

设置 X 光高压  $35kV$ ，取电容板电压  $250V$ ，测  $I_c$ ，作图如图 4。

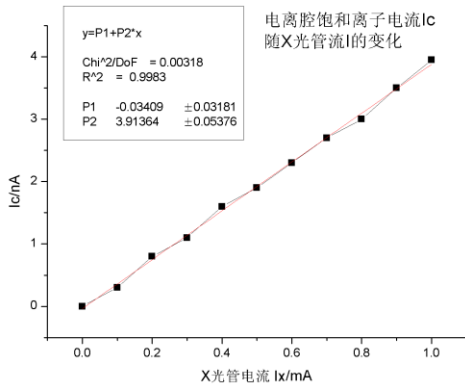


图 4: 电离腔饱和离子电流  $I_c$  随 X 光管流 I 的变化

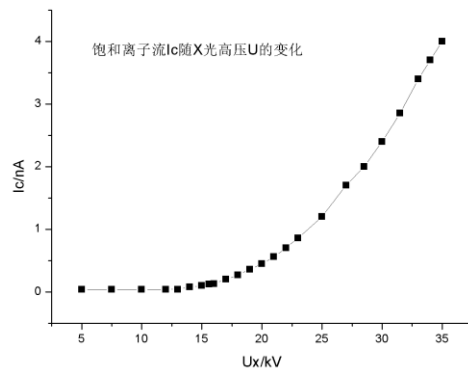


图 5: 饱和离子流  $I_c$  随 X 光高压 U 的变化

$I_c$  与  $I_x$  呈线性关系

拟合得:

$$I_c = -0.03409 + 3.91364I_x$$

(4)测量饱和离子电流  $I_c$  随 X 光高压 U 的变化

设置 X 光管电流  $I_x=1mA$ ，电容极板电压  $250V$ 。

作图如图 5，当  $U_x$  小于  $12.5kV$  时， $I_c$  不变，无电离现象，此时 X 光管发射性能不能被探测到，录电压继续增大时， $I_c$  开始有明显上升趋势，当  $U_x$  增大到一定程度( $25kV$ ),  $U_x-I_c$  关

系接近线性，此时几乎所有电子流的能量都用来发射 X 射线了（轫致辐射占较大比例）

3. 研究 X 光在材料中的衰减系数与波长及材料的原子序数的关系。

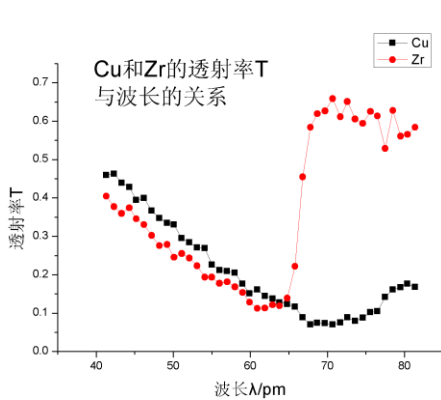


图 6: Cu 和 Zr 的透射率 T 与波长的关系

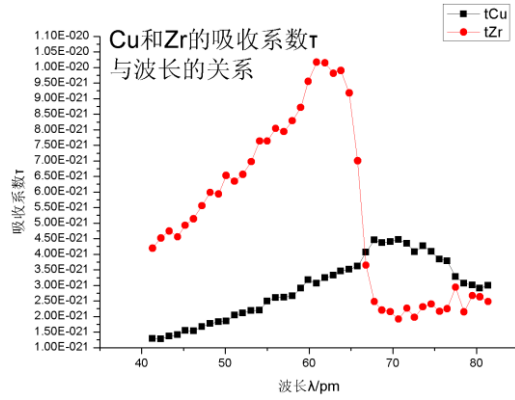


图 7: Cu 和 Zr 的吸收系数 τ 与波长的关系

图 6 为透射率与波长的关系，利用经验公式

$$\tau_a = \frac{\mu}{\rho} \cdot \frac{A}{N_A} - 0.2 \frac{cm^2}{g} \cdot \frac{A}{N_A} = -\frac{\ln T}{\rho \cdot x} \cdot \frac{A}{N_A} - 0.2 \frac{cm^2}{g} \cdot \frac{A}{N_A}$$

可以得到吸收系数  $\tau_a$  与波长  $\lambda$  的关系，得到图 7。从图中我们知道了 Cu 和 Zr 的吸收范围

因为我们知道对不同波长  $\lambda$  的 X 射线，原子吸收系数满足如下关系:

$$\tau \propto \lambda^\alpha$$

我们可以对上面数据的横纵坐标取对数，然后进行直线拟合，就可以得到  $\alpha$ ，拟合结果如下。

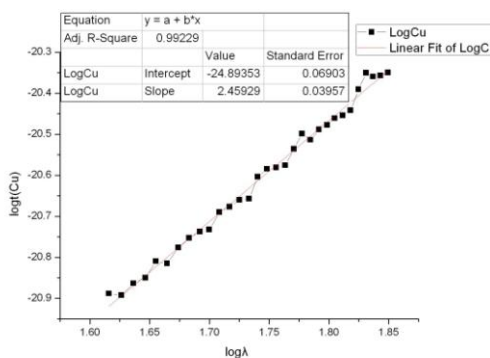


图 8: 对 Cu 金属  $\alpha$  的拟合

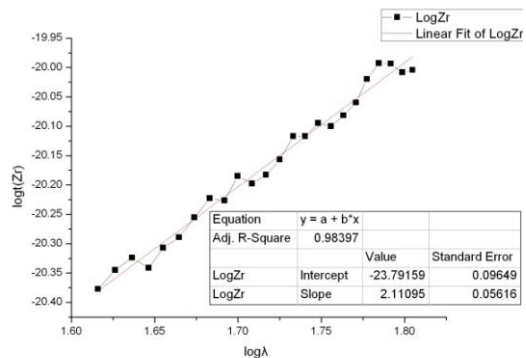


图 9: 对 Zr 金属  $\alpha$  的拟合

由拟合结果得到  $\alpha = 2.45929$ 。而 Zr 的拟合结果为

由拟合结果得到 Zr 的  $\alpha = 2.11095$ 。

### 三、实验讨论

#### 1. NaCl 或 LiF 的 X 光反射谱为何有两个主峰？

是  $K_\alpha$  (对应 L 层到 K 层跃迁) 和  $K_\beta$  (对应 M 层到 K 层跃迁) 线

由于热力学上的能量分布率, 高能级的原子数总小于低能级的原子, 故 P (M 到 K) 小于 P (L 到 K), 所以  $K_\alpha$  峰较高

#### 2. 反射谱中双峰间距为何变大？

解决该问题应该将横轴取  $\sin \beta$  则各峰位置为

峰	前一组峰	第二组峰	第三组	比值
$K_\alpha$	0.126	0.253	0.376	1:2.01:2.98
$K_\beta$	0.112	0.225	0.336	1:2.01:3

看比例, 明显接近 1: 2: 3, 证明它们对应  $K_\beta$  和  $K_\alpha$  在的第一, 二, 三级衍射主极大,

所以三组峰, 峰间距增大是因为  $2d \sin \beta = k\lambda$ ,  $k$  取相同间隔的值, 导致  $\beta$  取不同间隔,

所以在强度~ $\beta$  图上, 峰间距变大。

#### 3. 为何每组峰的强度在衰减？

学过电动力学之后, 想到了菲涅耳定律。由此想到了可能是因为不同角度晶面的反射率不同。

从 NaCl 和 LiF 的 X 光反射谱中得出下列数据

	晶体	一级角度/强度	二级角度/强度	三级角度/强度	四级角度/强度
$K_\alpha$	NaCl	7.2/1517	14.6/362.3	22.2/94	30.2/26.8
	LiF	10.2/1076	20.7/169.3	31.8/39.1	
$K_\beta$	NaCl	6.4/748.8	13/153.5	19.6/45.8	
	LiF	9/420.8	18.3/81.3	28/33	

如果单层晶面 NaCl 与 LiF 对光的反射率相同, 但由于 NaCl 晶面间距大, 晶面数少, 所以如果要将 NaCl, LiF 在一起比较, 就应对以上数据校正, 将它们的强度分别乘以它们的晶面距离, 如下。

	晶体	一级角度/强度	二级角度/强度	三级角度/强度	四级角度/强度
$K_\alpha$	NaCl	7.2/4300.695	14.6/1027.1205	22.2/266.49	30.2/75.978
	LiF	10.2/2166.9	20.7/340.95	31.8/78.74	
$K_\beta$	NaCl	6.4/2122.848	13/435.17	19.6/129.8	

	LiF	9/847.5	18.3/163.73	28/66.5	
--	-----	---------	-------------	---------	--

将上表数据放在一起作图发现反射强度基本与衍射级数无关，与 NaCl 还是 LiF 无关，仅与角度有关，近似满足菲涅耳定律

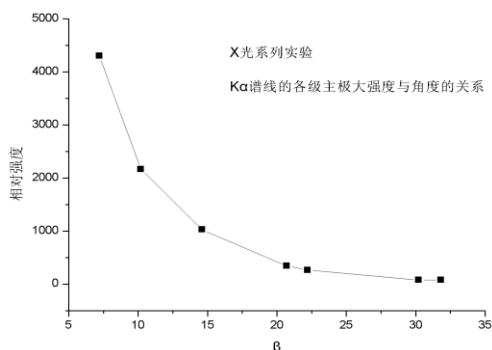


图 17:  $K_{\alpha}$  谱线的各级主极大强度与角度的关系

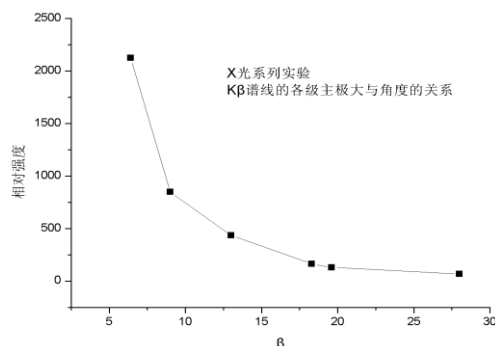


图 18:  $K_{\beta}$  谱线的各级主极大强度与角度的关系

上面两图分别为  $K_{\beta}$  和  $K_{\alpha}$  谱线主极大与角度的关系，他们基本与 NaCl 还是 LiF 无关，与级数也无关，与角度有关，大致符合菲涅耳定律，但对菲涅耳定律拟合图困难，这里只能给出大概图像。

所以导致三组峰强度不同的主要原因非常可能是不同角度晶面反射率不同

#### 4. 关于 X 反射曲线

钨的 X 光发射光谱由特征光谱和韧致辐射两部分构成，前者是外层电子跃迁入第一层所发出的，后者是高速电子受原子核吸引偏转产生的，特征光谱中  $K_{\alpha}$  也比  $K_{\beta}$  强度大，但单个光子能量小。

韧致辐射的能量分布是连续的，也称“连续谱”，特征光谱也称“线光谱”但由于不确定关系其呈现的是尖峰。

特征谱强度会随着  $U$  增大而增大，但波长不变，韧致辐射不仅强度大，整个波长分布都发生变化。

5. X 光管工作在高压下，做功大，散热需求较大，电子束撞击阳极的很大一部分能量还是转化成了热。
6. 关于晶央间距。

由 Bragg 公式  $2d \sin \beta = k\lambda$ ，对于确定的  $\lambda_{k\alpha}$ ， $\lambda_{k\beta}$ ，图像中的各级内，二者的间距越来越大，此原因已经在前面分析过，间距越来越大导致 LiF 第六个峰观测不到。

而此处测到的晶面间距到底是晶体哪个晶面取向的面间距呢？与样品的制作情况可能有关系。测得的  $d$  可能是与样品表面平行的一系列晶面的间距。

然而若样品制作时使表面呈任意方向，所得到的图像对应的是哪个晶面间距呢？期考

图像会有变化？尚需要验证，不过也有可能 Bragg 公式中的  $d$  一定是最小晶面间距。

此外，若晶体上下表面不平行，则对不同晶体调零时的位置都会不同。

#### 7. 关于 Moseley 定律实验。

此实验的原理是 X 光波长一旦大于某壳层电子相应的结合数时，折射率就会突然增大，形成突变。此处研究的是 K 壳层的电子，要得到突变处的波长，故 k-edge 的功能实际是用面积补偿法得到各处相应的波长。

### 四、致谢

特别感谢我的实验合作者杨晨同学在实验过程中的帮助和有益的讨论

### 五、参考文献

- 1 复旦大学物理教学实验中心网站 [phylab.fudan.edu.cn](http://phylab.fudan.edu.cn)
- 2 近代物理实验补充材料
- 3 梁励芬 蒋平 《大学物理简明教程》
- 4 王英华 《X 光衍射技术基础》