

验证 X 光波粒二象性的两个实验

吴昊 07301010086

摘要 我们利用比较成熟的实验仪器，选择了两个典型的实验，分别对电子轰击钨靶所产生的 X 光检验粒子性和波动性。最终的实验数据计算结果与理论的计算值有出入，但从定性上完全验证了 X 光同时具有以上两种性质。

关键词 X 光；康普顿效应；德拜成像

1 引言

X 射线的发现，揭开了近代物理的帷幕，而如今，X 光亦在各种领域中发挥了巨大作用。本科的教学实验室中，X 光也是重要的实验内容，有成熟的实验装置来验证材料对 X 光的吸收、布拉格发射、吸收边与原子序数关系等各项近代物理的发现^[1]。而自从近代物理建立以来，光的波粒二象性已为大家所熟知。本次试验，我们选择了两个典型的实验：康普顿效应和德拜成像，利用成熟的实验仪器，分别对 X 光的粒子性与波动性进行了验证。

2 X 光的粒子性：康普顿效应

2.1 实验原理

康普顿在 X 光与物质的散射实验中发现，X 光被散射后，会有波长增加的部分出现。这是经典理论无法解释的，而在考虑能量和动量守恒后，就可以准确给出解释，如此，康普顿效应成为 X 光具有粒子性的有力证据，并且得出散射前后波长变化量公式，即康普顿散射公式^[2]：

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

为测量波长的变化，我们利用物质对 X 光的吸收定律，透射率 T 有^[2]：

$$T = e^{-\mu d} \quad \text{②}$$

其中 d 为吸收材料厚度， μ 为衰减系数。当 X 光波长 λ 小于吸收材料的 K 吸收边 λ_K 时，有关系^[3]：

$$\mu \sim Z^3 \cdot \lambda^{-4}$$

Z 是吸收材料的原子序数。对于一固定材料，利用上式，②式可改写为

$$T = e^{-a\lambda^3} \quad \text{③}$$

于是，有散射前后的透射率 T_1, T_2 ，我们就可以求出波长的变化：

$$\Delta\lambda = \left(\frac{\ln T_2}{-a} \right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{\ln T_1}{-a} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{④}$$

通过实验，可以比较④式与①式结果来验证康普顿效应。

2.2 实验内容

我们采用了如图 2-1，由莱德教具公司生产的 X 光仪进行实验。实验过程中光阑内放上

一铍片，这样就可以过滤作为光源的 Mo 本征 X 射线中的 K_{β} 线，剩下的 K_{α} 线谱类似于单色光。散射材料采用 Al 块，放置于平台上并以 20° 倾斜于入射 X 光。



图 2-1 X 光实验仪

为得到某一角度下的透射率，在光阑口加上 Cu 片吸收散射前 X 光，得到计数 R_1 。然后将 Cu 片放在计数器口，得到此角度下的计数 R_2 。取下 Cu 片后，计数器读数为 R_0 。这样，我们就有

$$T_1 = R_1/R_0$$

$$T_2 = R_2/R_0$$

如果要扣除背景辐射，那么在切断 X 光电源时读出此角度下的计数 R ，于是所用到的透射率就是：

$$T_1 = \frac{R_1 - R}{R_0 - R}, \quad T_2 = \frac{R_2 - R}{R_0 - R}$$

那么波长的改变量④式就成为：

$$\Delta\lambda = \left[\frac{\ln(R_0 - R) - \ln(R_2 - R)}{a} \right]^{\frac{1}{3}} - \left[\frac{\ln(R_0 - R) - \ln(R_1 - R)}{a} \right]^{\frac{1}{3}} \quad \text{⑤}$$

为得到结果，还需知道 a 的值。此处我们利用 Cu 对 NaCl 晶体衍射谱的吸收，定出 $a = 6.1 \times 10^{-6} \text{ pm}^{-3}$ 。

2.3 实验结果与讨论

表 2-1 中列出了实验结果，并将由⑤式所得 $\Delta\lambda$ 与①式所得理论结果 $\Delta\lambda_{th}$ 进行对比。

角度/ $^{\circ}$	R1	R2	R0	R	T1	T2	$\Delta\lambda$ /pm	$\Delta\lambda_{th}$ /pm	误差
145	2.90	1.77	17.38	0.36	0.149	0.083	6.376	4.413	44.5%
135	2.73	1.83	16.88	0.20	0.152	0.098	4.892	4.141	18.1%
125	3.10	1.77	15.80	0.31	0.180	0.094	7.385	3.817	93.4%
115	3.22	1.97	16.05	0.22	0.190	0.111	6.360	3.451	84.3%
105	2.83	1.42	15.07	0.35	0.168	0.073	9.125	3.054	198.8%

表 2-1 康普顿散射实验结果

我们发现，实验所得的波长差与理论计算相比有比较大的误差，最大甚至相差 2 倍。但是，无论如何，散射前后，X 光的波长发生了改变这件事是毋庸置疑的，实验所得的波长增加量比理论计算的还要大，X 光的粒子性是确实存在的。

实验与理论上数值的偏差，一方面，尽管由 Zr 片过滤后 X 光单色性还尚可，但其他波长并不是完全忽略，我们没能考虑 X 光衍射对康普顿效应的影响。另一方面，为了使 $\Delta\lambda$ 较大，我们所选角度也比较大，但问题在于，此时的计数就显得比较小，计数器的波动容易导致 10% 误差。我们固然可以通过长时间的叠扫来减小不确定度，而且对于透射率 T 而言，传递下来的不确定度可以接受，但当运算后进行相减而得到 $\Delta\lambda$ 时，其偏差相对于 $\Delta\lambda$ 比较

大。所以，在可以的条件，提高计数、采用近自由电子近似较好的材料做散射体都是可行的提高准确度的办法。一些文献还提到，选用波长更短的射线，也有助于减小误差^[4]。

3 X光的波动性：晶体衍射的德拜成像

3.1 原理

作为波最典型的性质，就是其衍射。对于 X 光而言，其波长适合采用各种晶体作为衍射体。由晶体的多晶粉末衍射而成图像，称为德拜成像法。

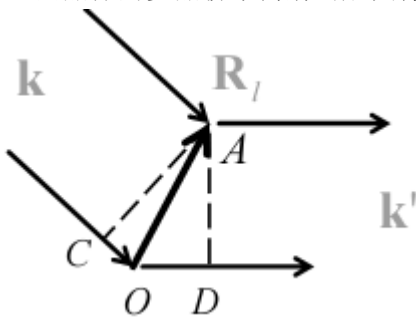


图 3-1

如图 3-1，当满足 Von-Laue 条件 $\mathbf{k}' - \mathbf{k} = \mathbf{G}_h$ 时，将有衍射极大。如果入射光与

出射光夹角为 θ ，则有 $|\mathbf{G}_h| = 2|\mathbf{k}| \sin \frac{\theta}{2}$ 。⑥

晶体晶格常数为 a ，入射光波长为 λ ，倒格矢 \mathbf{G}_h 所垂直的晶面指数为 (h, k, l) 。于是就可以得

$$\text{到 } h^2 + k^2 + l^2 = \frac{2a^2}{\lambda^2} (1 - \cos \theta) \quad \text{⑦。}$$

3.2 实验结果与讨论

以 Zr 过滤 K_α ，在光阑口放置 NaCl 晶体的多晶粉末。距光阑 $L=20\text{mm}$ 处架起 X 光底片，受通过多晶粉末衍射后的 X 光曝光。经过 26 个小时的曝光后，冲洗所得底片如图 3-2。可以很明显的看到，中央的一块斑纹周围，有一圈圈的衍射环，这是德拜成像法的典型成像

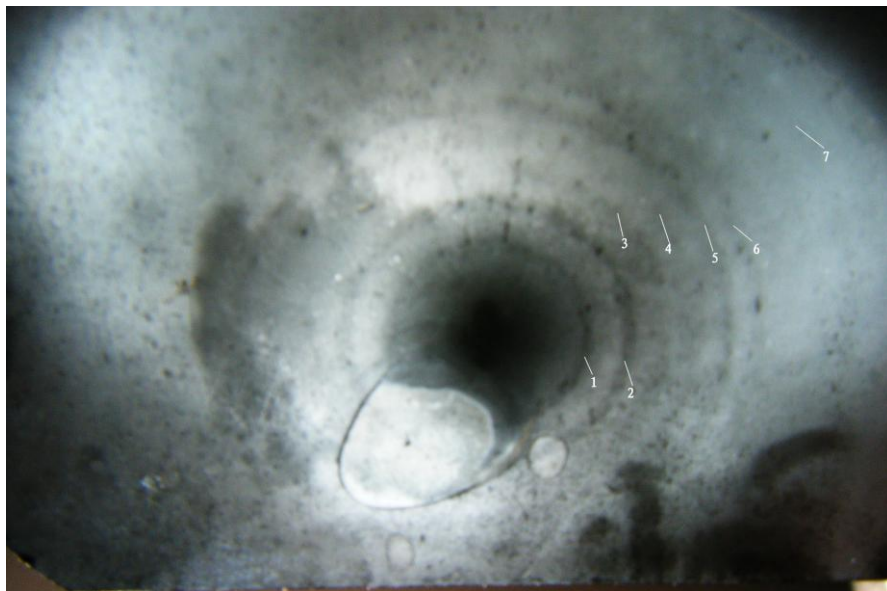


图 3-2 德拜成像法衍射图案(中心气泡为底片冲印瑕疵)

图案完全体现了 X 光的波动性。

在得到 X 光的衍射图案后，可以用来确定晶体的晶面指数。在每个环上取三个点，将其记录到一张方格纸上。确定圆心之后，就可通过读出纸上点的格数来计算对应圆环半

径。

下面以环半径 R ，底片到光阑距离 L 计算得出⑦式中的 $1 - \cos \theta$ 值，列于表 3-1。通过各个环 $1 - \cos \theta$ 之间的比值，也就知道了各个环所对应晶面的 $h^2 + k^2 + l^2$ 之间的比值。将 NaCl 晶体可能产生衍射的晶面列于表 3-2，之前得到的比值与之对比，从而确定各个环对应的晶

面指数。

环序号	R	1-COS θ
1	5.45	0.0352
2	8.6	0.0813
3	10.97	0.1232
4	12.67	0.1552
5	14.79	0.1960
6	16.52	0.2290
7	22.17	0.3302

表 3-1 R 和计算所得 θ

h	k	l	$h^2+k^2+l^2$
1	1	1	3
2	0	0	4
2	2	0	8
3	1	1	11
2	2	2	12
4	0	0	16
3	3	1	19
4	2	0	20
4	2	2	24
3	3	3	27
5	1	1	27
4	4	0	32
5	3	1	35
4	4	2	36
6	0	0	36

表 3-2 NaCl 晶体各个可以出现的晶面指数

设第 1 个环对应(1,1,1)或者(2,0,0)晶面,根据之后 6 个面的 1-COS θ 值与第一个的比值,可以确定如下晶面对应的可能性。在考虑了 6 号环与 7 号环之间隐约有两个环的情况之后,由于预设第 1 环为(2,2,0)晶面之后,虽然计算出的可能晶面显得符合得较好,但 6 号环与 7 号环之间空开了过多的晶面,从而被舍弃。

序号	第一种预设	第二种预设
1	(2,0,0)	(1,1,1)
2	(2,2,0)	(2,0,0),(2,2,0)
3	(2,2,2),(4,0,0)	(3,1,1)
4	(4,0,0),(3,3,1)	(2,2,2)
5	(4,2,0),(4,2,2)	(4,0,0)
6	(3,3,3),(5,1,1)	(4,2,0)
7	(4,4,2),(6,0,0)	(3,3,3),(5,1,1)

表 3-3 与第一个环比值所确定的可能的晶面指数

在考察了其他各个环之间 $1-\cos\theta$ 的比值，并与晶面 $h^2+k^2+l^2$ 之间的比值对比，最终在两种预设下的到最终结果表 3-4。其中(3,3,3)(5,1,1)之间，(4,4,2)(6,0,0)之间 $h^2+k^2+l^2$ 的值是一样的。

序号	第一种预设	第二种预设
1	(2,0,0)	(1,1,1)
2	(2,2,0)	(2,2,0)
3	(2,2,2)	(3,1,1)
4	(4,0,0)	(2,2,2)
5	(4,2,0)	(4,0,0)
6	(3,3,3),(5,1,1)	(4,2,0)
7	(4,4,2),(6,0,0)	(3,3,3),(5,1,1)

由于采用方格纸处理的数据，在不确定度的范围内已经没有办法在这两者之间进行取舍，必须采用另外的手段来确定到底是由哪一套晶面产生的衍射图案。

表 3-4 最终确定的两种结果

最后以⑦式，计算产生这 7 个环的晶体晶格常数。两种预设下分别为 $a_1=517\text{pm}$ ， $a_2=465\text{pm}$ 。与文献参考值 $a=563\text{pm}$ 相比^[5]， a_1 相差 8.2%， a_2 相差 17.4%。

实验中，无论以哪一套预设来看，都有一些衍射环没有出现。可能有些环过于靠近，比如(2,2,2)和(3,1,1)，以致于重合一起没能分辨，也可能是强度不够没能观测到。

4 结论

本实验利用实验室的仪器，选取两种简单的实验验证了 X 光的波粒二象性。采用巧妙的实验设计，得出康普顿散射前后光波长会改变的结论。虽然与理论值相较就一定数值相差，但 X 光的粒子性是无可辩驳的。而后观察了多晶粉末对 X 光衍射的图案，并利用德拜成像尝试计算了参与衍射的晶面指数以及 NaCl 晶体的晶格常数，得到了不错的结果。

5 参考文献

- [1] 近代物理实验补充讲义
- [2] 杨福家.《原子物理学》(第三版),高等教育出版社,北京,2000.
- [3] 吴思诚,王祖铨.《近代物理实验(一)》,北京大学出版社,1986.
- [4] 陈星,李剑龙,韩文琪等 用 γ 射线做康普顿散射测量[J] 物理实验. 2006, 26(6): 33~35.
- [5] 基泰尔(Kittel)著,项金钟,吴兴惠译.《固体物理导论》,化学工业出版社,北京,2005. pp11