

电子干涉、衍射实验——微观粒子波粒两象性的验证

许明康

(杭州大学)

微观粒子具有波粒二象性，这是量子力学中最基本的概念。而波动性的一个基本特征是波的叠加，在一定条件下表现为波的干涉、衍射等现象。

静止质量不为零的实物粒子(例如电子)的干涉、衍射现象，并不象光那样在日常生活的某些条件下就能观察得到，对它进行干涉、衍射实验远比对光的实验要困难。最早证实电子具有波性的实验是1927年戴维孙(Davisson)和盖末(Germer)所做的电子在晶体表面反射后产生的衍射^[1]。接着不久是汤姆孙(Thomson)^[2]和塔尔塔科夫斯基(Тартаковский)^[3]分别用快速和慢速电子对晶体的衍射。但这些实验的结果都与晶体本身的晶格常数有关。然而我们知道，证实光的波动性最典型的是杨氏干涉等实验，在那里它只与光源本身性质及光源、狭缝(孔)的大小有关，而与所用的材料是无关系的。因此，人们设法对电子等实物粒子也作类似于杨氏干涉那样的实验，称为电子光学实验。随着科学技术的发展，确已有人成功地做了这类实验。

大家知道，在不少量子力学教科书中，根据电子具有波性这一事实，而设想一定存在电子单缝衍射现象，并称之为“假想实验”。1961年约恩孙(Jönsson)^[4]成功地做了电子单缝等衍射实验，使“假想”终于变成了事实。他巧妙地利用特殊工艺，制得了薄金属片上五条狭缝，每条缝长 50μ ，宽 0.3μ ，间隔为 1μ 。用50kV电压来加速电子，相应的德布罗意波长为 0.05Å ，控制电子束足够细，让电子分别通过薄金属片上的单缝、双缝……五缝时，就得到相应的衍射

图样。图1就是一组经过放大的电子单缝衍射和双缝干涉图样。它与光的衍射图样完全相似。利用光学理论，计算衍射图样的相对强度和位置，与实验相符，证实了德布罗意物质波假设的正确性。

另一个很有特色的电子干涉实验是缪伦斯特特(Möllénstedt)和德维克尔(Duker)^[5]的电子光学双稜镜实验。图2(a)是非涅耳(Fresnel)双稜镜实验示意图；(b)是与它相对应的电子双稜镜实验示意图。其中 F 是一条外面镀金的石英细丝(作电极用)，其上加正电位，两侧的极板接地。当高速电子飞近它们时就被偏转。在小角度范围内，从 s 发出的电子可看作来自虚电子源 s' 和 s'' ，因而与非涅耳双稜镜相似。它们射至 op 面上时有重叠部分。由于电子的波动性，在重叠区域产生干涉条纹，条纹宽度 Δ 满足关系式 $\Delta = \lambda(a+b)/d$ ，其中 λ 是德布罗意波长， a, b, d 如图2所示。另外， d 与镀金石英丝 F 的直径 ϕ 及 op 上重叠区域的宽度 W 有关，满足关系式 $d = [Wa + \phi(a+b)]/b$ ，而电子源本身大小 s 应满足相干条件 $s <$

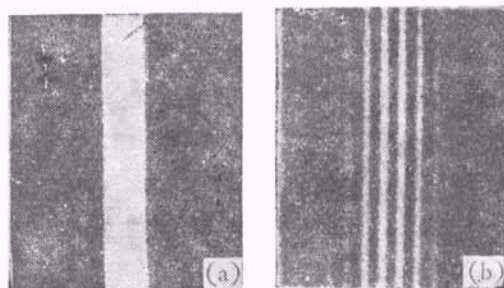


图1 电子衍射图样

(a) 电子单缝衍射图样；(b) 电子双缝干涉图样

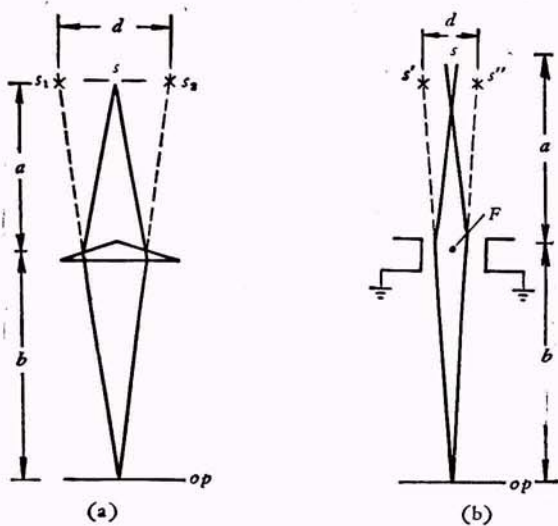


图2 双稜镜干涉实验示意图
(a) 光学; (b) 电子

$\frac{a\Delta}{4b}$. 图3的一组照片是缪伦斯德特和德维克在1956年所得的经放大的电子干涉、衍射图样。当 F 上不加电压时,就是电子通过直单丝的衍射,见图3(a)。实验中电子的加速电压为19.4kV,电子源的尺寸 $\sim 0.08\text{mm}$,电极 F 的

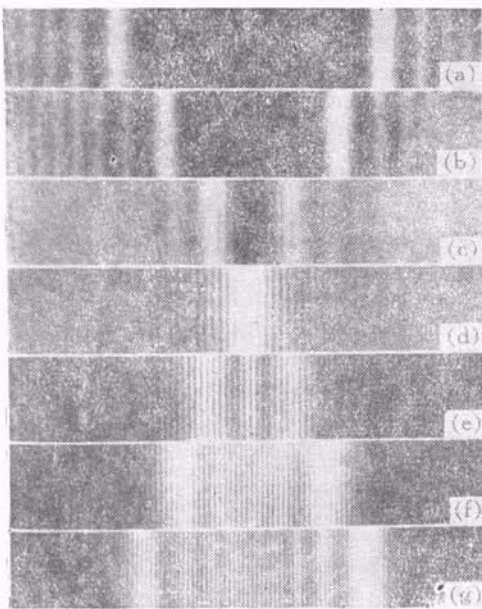


图3 加在电极 F 上的电压不同时所得到的电子干涉图样
(a) $U_F = 0$; (b) $U_F = 1.5\text{V}$; (c) $U_F = 2.8\text{V}$;
(d) $U_F = 4.0\text{V}$; (e) $U_F = 5.0\text{V}$; (f) $U_F = 5.8\text{V}$;
(g) $U_F = 7.0\text{V}$

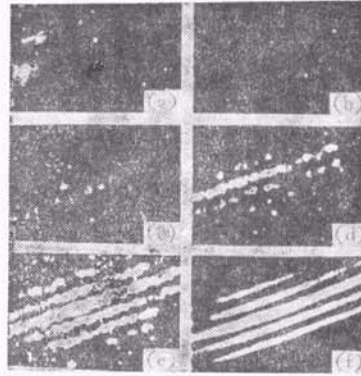


图4 (a)–(f) 从电视屏幕上拍摄下来的电子流密度顺次增加时的干涉图样

直径 $\phi \approx 2\mu$, 电子源与屏距离 $a + b = 293.5\text{mm}$, 电子源与稜镜距离 a 为39.5mm。实验结果所得的波长 λ 与应用德布罗意关系式所决定之值,误差不超过5%。

1973年陶纳得 (Donati) 等人^[6]考虑到文献[5]中实验所用的是一专门特制仪器,不便作为教学上用,因而改用一般的电子显微镜,在其上另外配制一个电子光学双稜镜系统,也能得到与文献[5]相似的结果。实验所用的电子加速电位为80kV,相应的 $\lambda = 0.04\text{\AA}$,电子源大小 $\sim 400\text{\AA}$,电极 F 的直径 ϕ 为 0.5μ ,电子源与稜镜距离为10cm,稜镜与屏距离为6cm,两虚电子源间距离为 6μ ,电子干涉区域宽度为 3μ 。

1976年,梅尔立 (Merli) 等人^[7]在文献[6]中叙述的实验的基础上再加以改善,除了在电子显微镜内插入一个电子双稜镜系统外,再用装在电子显微镜上的电视象加强器,使干涉条纹间隔放大到 300μ 。这样,不仅能使文献[6]中所述的实验得到重现,而且更有趣的是能在电视屏幕上直接对干涉现象进行观察。图4的一组照片是直接 from 电视屏上拍摄下来的。这些照片记录的是不同电子流密度下的一组干涉图样。图4(a)是在低电子流密度时的情形。在图中只出现几颗亮点,随着电子流密度的增加,在图4(c)–(e)中隐约可见干涉条纹。图4(f)所示是电子流密度较大时情形,这时可以看到十分清晰的有规律的干涉条纹。

除了上面这些实验外,还有电子半平面衍射^[8],各种形状的小孔衍射^[9],电子波的迈克尔逊干涉实验^[10]等。

在显示微观粒子具有波粒二象性的实验中,还有人做了单电子衍射。例如,毕柏曼(Биберман)、苏许金(Сушкин)和法勃利康(Фабрикант)^[11]用微弱的电子流(就平均而言,相继发射两个电子所需时间约为电子穿过仪器所需时间的 3×10^4 倍)让电子几乎是一个一个地通过金属箔,它所产生的衍射图样与强 10^7 倍的电子流所得到的图样是完全一样的。与单电子实验类似的,还有人做了单光子干涉实验^[12]。

以上这些实验都表明了,电子等静止质量不为零的微观粒子与光子一样,都具有波粒二象性。从这些实验的结果我们还可看出:

1. 电子单缝衍射实验是测不准关系的有力证明。多年来,人们是用“假想”的单缝衍射实验来论证测不准关系式的。现在电子单缝实验已成事实,这就有力地证实了测不准关系式的正确性。至于如何用它来说明测不准关系式,这里就不再赘述。

2. 电子的干涉实验是波函数统计解释的形象说明。图4的一组照片说明了,当少量电子通过稜镜时,它一颗一颗地落在屏上,其分布看起来毫无规律,并不形成“暗淡”的干涉条纹,显示了电子的“粒子性”。但大量电子通过稜镜时,则在屏上形成了清晰的有规律的干涉条纹,这又显示了电子的“波动性”。毕柏曼等人的实验表明,大量电子一次通过所得的结果与一个一个电子通过,但通过的次数很多时所得结果是一样的。因而我们也可将图4(a)~(f)的一组照片看成是在电子流密度甚低情况下,不同时

刻拍摄下来的。它显示出干涉条纹逐渐形成的过程。图4反映了条纹形成过程中的统计规律,所以是对波函数统计解释的有力支持。

3. 单电子和单光子的干涉、衍射实验,表明了粒子的波动性是它本身的固有属性,粒子的干涉是自身的干涉而不是不同粒子之间的干涉。因为电子或光子几乎一个个地通过仪器,最终得到了衍射或干涉图样,这就表明波动性并不是大量粒子在一起时才具有的,而是每个粒子具有的,其干涉或衍射花样当然也是每个粒子本身干涉效应的结果。在光学中所采用的相干光源总是把同一原子所辐射的光分为两束而成的,这就反映出光子是自己与自己干涉。这支持了狄拉克^[13]从能量守恒角度出发所得出的“每个光子只能与它自己发生干涉,从来不会出现两个不同光子之间的干涉”的结论。

参 考 文 献

- [1] C. J. Davisson and L. H. Germer, *Nature*, **119** (1927), 558.
- [2] G. P. Thomson and A. Reid., *Nature*, **119** (1927), 890.
- [3] П. С. Тартаковский, Экспериментальные основания волновой теории материи, ГТТИ (1932), 51.
- [4] C. Jönsson, *Z. Physik*, **161** (1961), 454.
- [5] G. Möllenstedt, U. H. Düker, *Z. Physik*, **145** (1956), 377.
- [6] O. Donati, G. F. Missikoli, G. Pozzi, *Am. J. Phys.*, **41** (1973), 639.
- [7] P. G. Merli, G. F. Missikoli, G. Pozzi, *Am. J. Phys.*, **44** (1976), 306.
- [8] H. Boersch, *Naturewiss.*, **28** (1940), 709.
- [9] Y. Sakaki, G. Möllenstedt, *Optik*, **13** (1956), 193.
- [10] L. Marton, *Phys. Rev.*, **90** (1953), 490.
- [11] Л. Биберман, Н. Сушкин, В. Фабрикант, Доклады Академии Наук СССР, **LXVI**(1949), 185.
- [12] S. Parker, *Am. J. Phys.*, **39** (1971), 420.
- [13] P. A. M. 狄拉克, 陈威亨译, 量子力学原理, 科学出版社, (1965), 9.