



一 德布罗意假设 (1924 年)

光学理论发展历史表明，曾有很长一段时间，人们徘徊于光的粒子性和波动性之间，实际上这两种解释并不是对立的，量子理论的发展证明了这一点。20世纪初发展起来的光量子理论，似过于强调粒子性，德布罗意企盼把粒子观点和波动观点统一起来，给予“量子”以真正的涵义。



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

德布罗意 (1892 — 1987)



法国物理学家

1924年他在博士论文《关于量子理论的研究》中提出把**粒子性和波动性**统一起来。5年后为此获得诺贝尔物理学奖。爱因斯坦誉之为“揭开一幅大幕的一角”。它为量子力学的建立提供了物理基础。





15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

思想方法：德布罗意始终对现代物理学的哲学问题感兴趣，喜欢将理论物理学、科学史和自然哲学结合起来考虑，其历史学背景帮助他认识到自然界在许多方面都是明显地对称的，可以采用类比的方法提出物质波的假设。

他将爱因斯坦创立的有关光的波粒二象性观念，扩展到了实物粒子领域内。



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

德布罗意假设：实物粒子具有波粒二象性

粒子性

$$\begin{cases} E = mc^2 = h\nu \\ P = mv = h/\lambda \end{cases}$$

波动性

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

◆ 德布罗意公式

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h}$$

这种波称为德布罗意波或物质波



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性



注 意

(1) 若 $v \ll c$ 则 $m = m_0$

若 $v \rightarrow c$ 则 $m = \gamma m_0$

(2) 宏观物体的德布罗意波长小到实验难以测量的程度，因此宏观物体仅表现出粒子性。



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

例1 一束电子中，电子的动能 200eV，求此电子的德布罗意波长。

解 $v \ll c, E_k = \frac{1}{2}m_0v^2 \quad v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_0}}$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 200 \times 1.6 \times 10^{-19}}{9.1 \times 10^{-31}}} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 8.4 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$\because v \ll c \quad \therefore \lambda = \frac{h}{m_0 v} = 8.67 \times 10^{-2} \text{ nm}$

此波长的数量级与 X 射线波长的数量级相当。



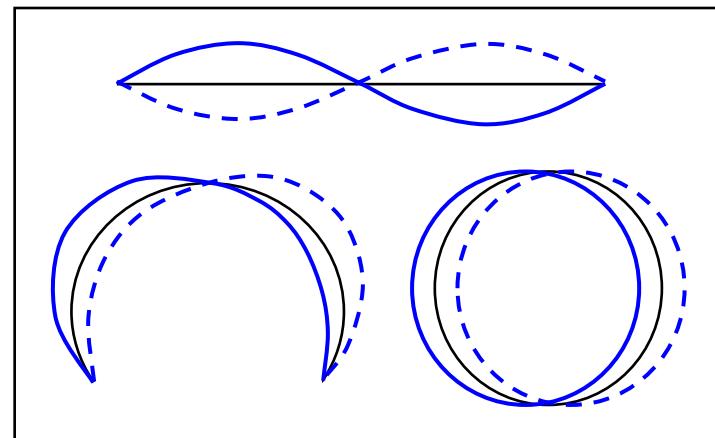
15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

例2 从德布罗意波导出氢原子玻尔理论中角动量量子化条件.

解 两端固定的弦，若其长度等于波长则可形成稳定的驻波.

将弦弯曲成圆时 $2\pi r = \lambda$

$$2\pi r = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots$$





15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

电子绕核运动其德布罗意波长为

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$2\pi rmv = nh$$

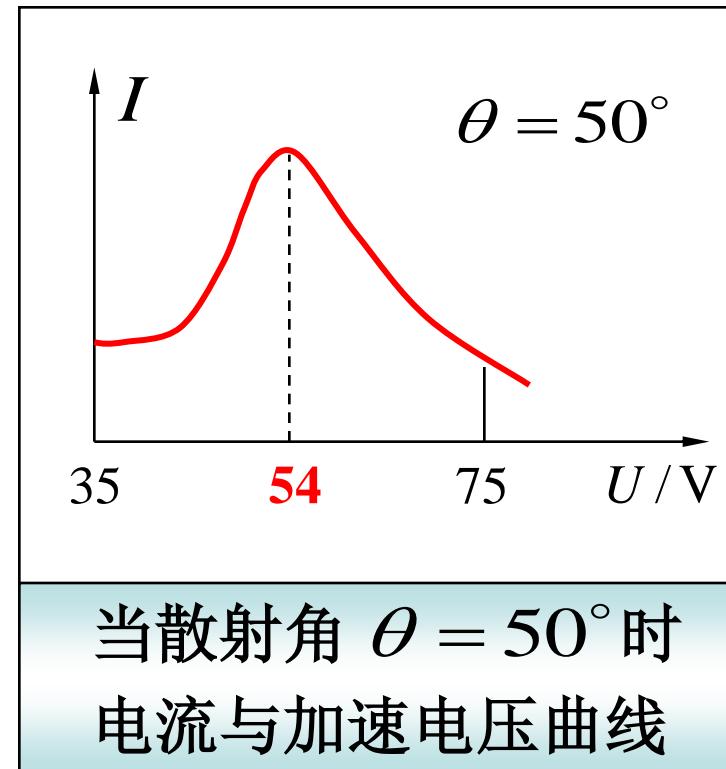
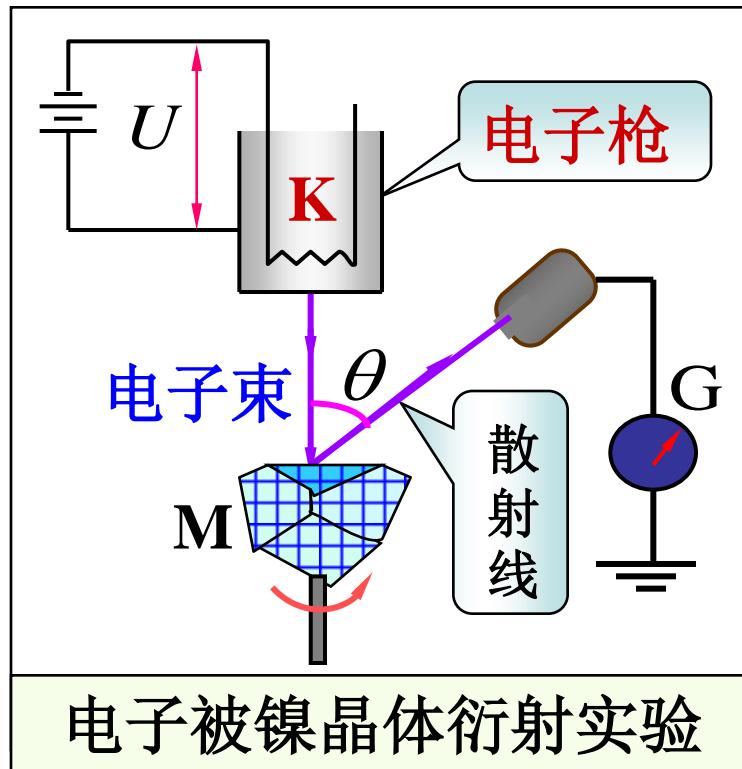
角动量量子化条件

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi}$$



二 德布罗意波的实验证明

1 戴维孙 - 革末电子衍射实验 (1927年)

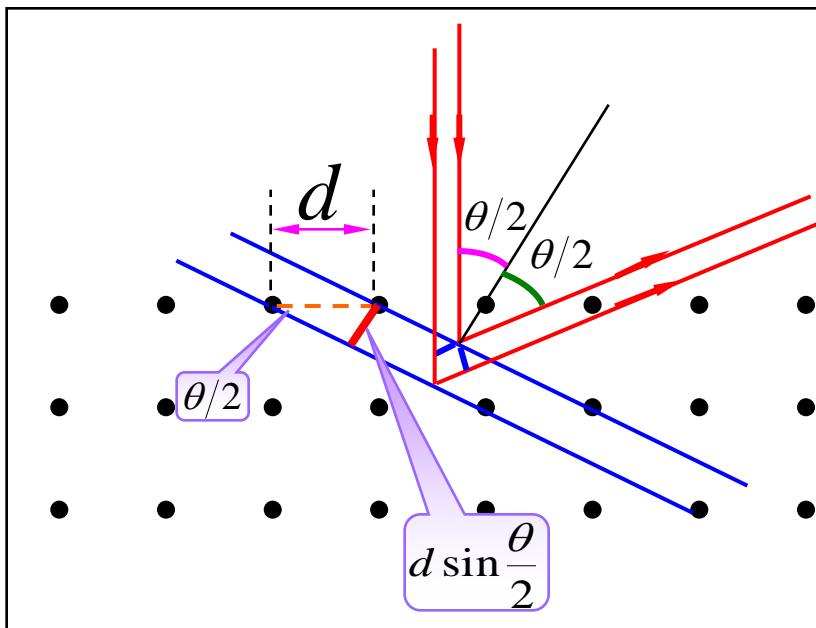




15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

电子束在单晶晶体上反射的实验结果符合X射线衍射中的布拉格公式.

相邻晶面电子束反射射线干涉加强条件:



$$2d \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = k\lambda$$

$$d \sin \theta = k\lambda$$

$$k = 1, \quad \theta = 50^\circ$$



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

镍晶体

$$d = 2.15 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\lambda = d \sin \theta = 1.65 \times 10^{-10} \text{ m}$$

电子波的波长

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_k}} = 1.67 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$d \sin \theta = kh \sqrt{\frac{1}{2emU}}$$



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性

$$\sin \theta = \frac{kh}{d} \sqrt{\frac{1}{2emU}} = 0.777k$$

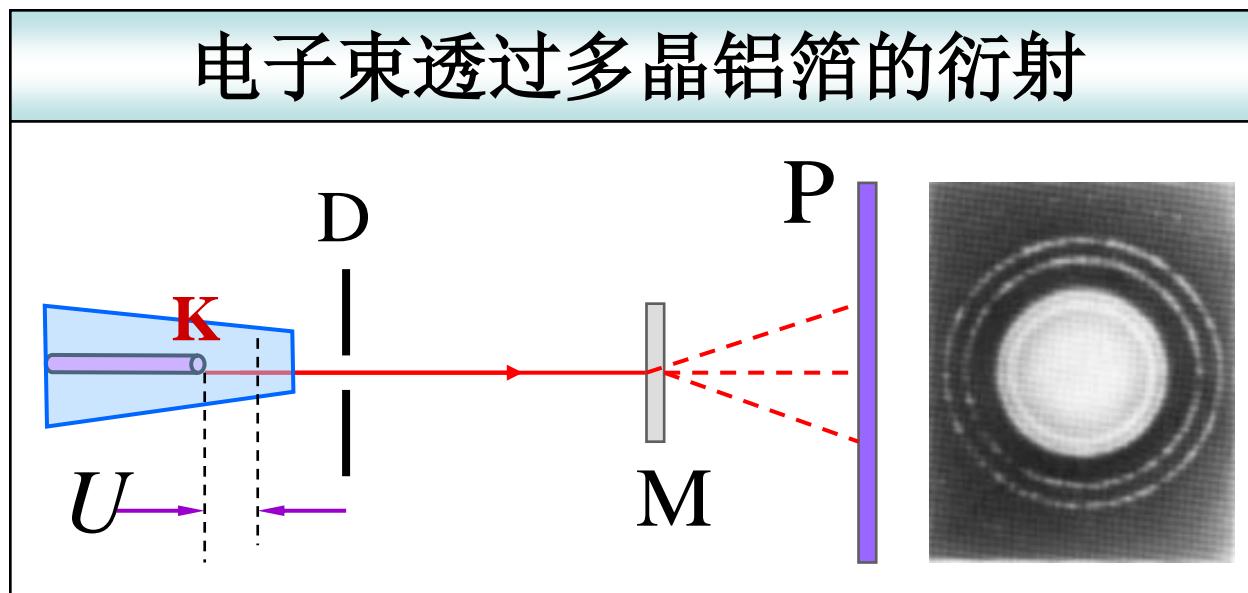
当 $k = 1$ 时, $\theta = \arcsin 0.777 = 51^\circ$ 与实验结果相近.

对镍板上的衍射图样的分析表明, 这是电子流产生的衍射图像, 从而表明了电子具有波动性, 这证明了电子既是一种粒子又是一种波。



2 G . P . 汤姆孙电子衍射实验 (1927年)

电子束穿越多晶薄片时出现类似X射线在多晶上衍射的图样。





三 应用举例

1932年鲁斯卡成功研制了电子显微镜，突破普通光学显微镜受可见光波长的限制，目前分辨率已达**0.2nm**；

电子显微镜有透射电子显微镜（TEM）和扫描电子显微镜（SEM）两类，在研究物质结构、观察微小物体方面具有显著功能，是当代科学的研究的重要工具之一。



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性



透射电镜
(TEM)



扫描电镜
(SEM)



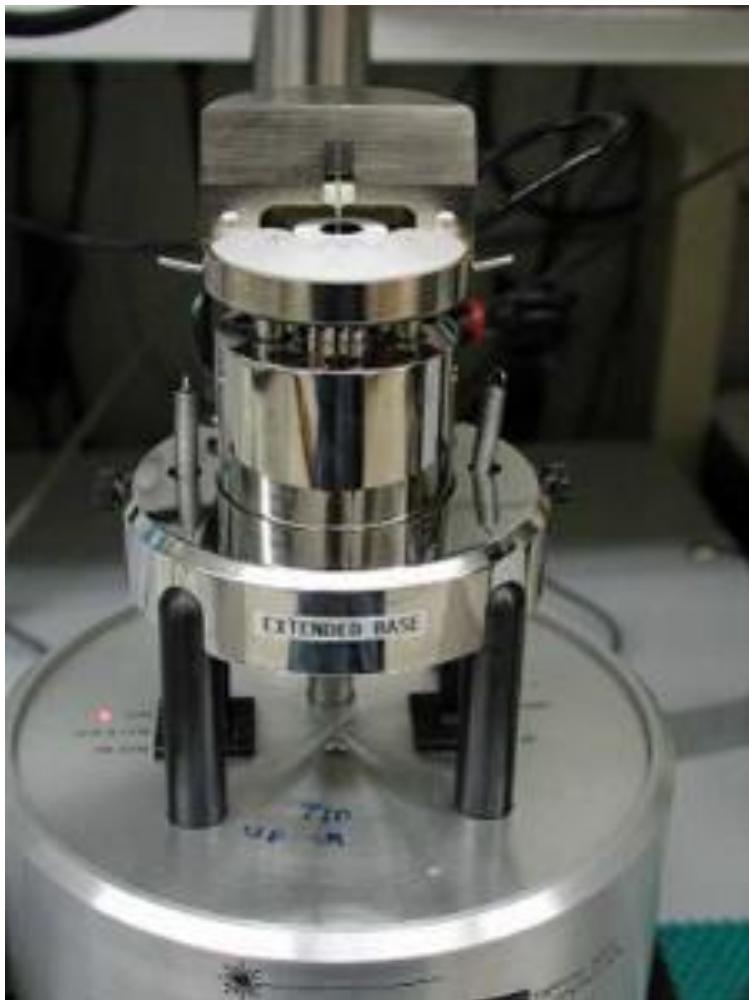
15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性



1981年德国人宾尼希和瑞士人罗雷尔，利用量子力学遂穿效应，制成了扫描隧道显微镜（STM），横向分辨率可达**0.1nm**，纵向分辨率已达**0.001nm**，1986年两人同获诺贝尔物理学奖。



15-6 德布罗意波 实物粒子的二象性



STM的发明为人类探索微观世界提供了一强有力地工具，对物理学及其相关科学技术领域的发展产生了巨大的推动作用。



四 德布罗意波的统计解释

经典**粒子** 不被分割的整体，有确定位置和运动轨道。

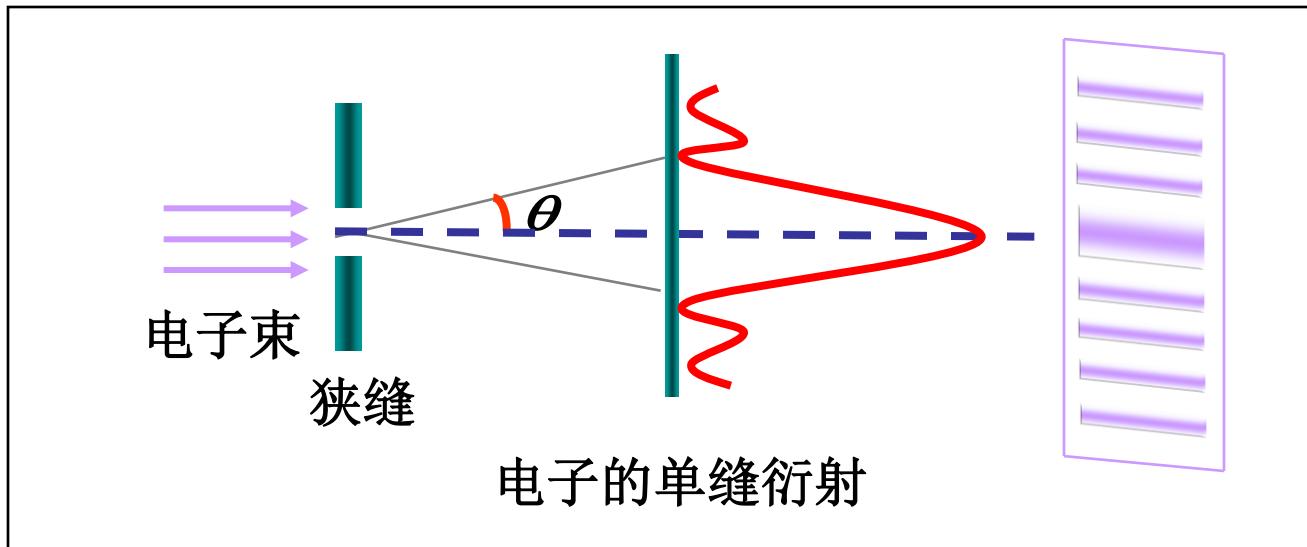
经典**的波** 某种实际的物理量的空间分布作周期性的变化，波具有相干叠加性。

二象性 要求将波和粒子两种对立的属性统一到同一物体上。



1 从粒子性方面解释

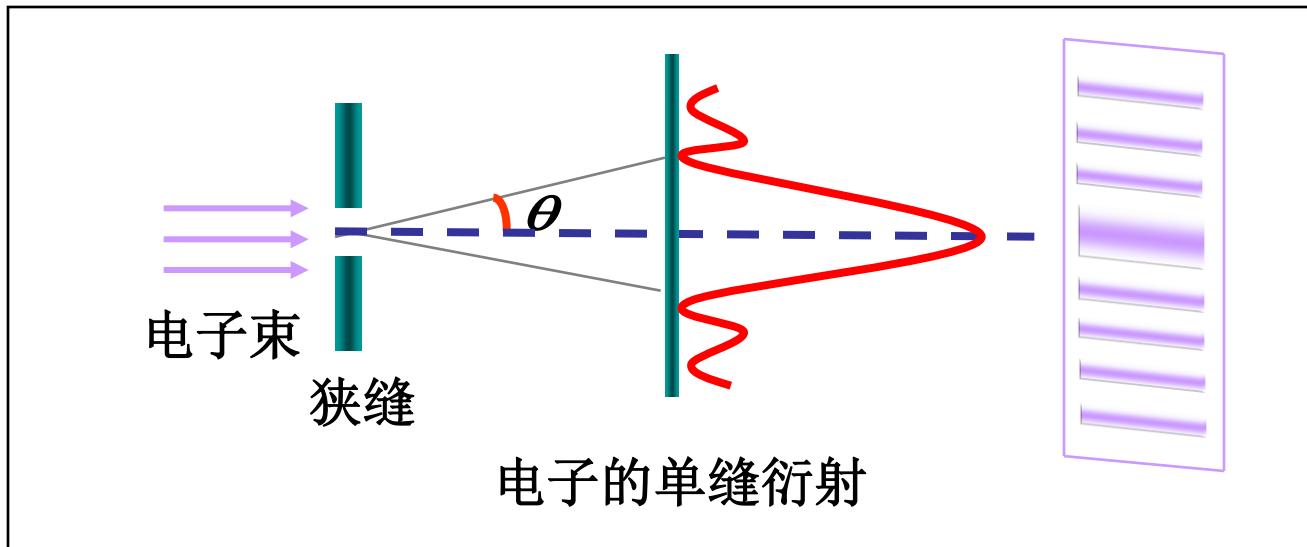
单个粒子在何处出现具有偶然性；大量粒子在某处出现的多少具有规律性。粒子在各处出现的概率不同。





2 从波动性方面解释

电子密集处，波的强度大；电子稀疏处，波的强度小。





3 结论(统计解释)

在某处德布罗意波的强度与粒子在该处附近出现的概率成正比.

1926年玻恩提出，德布罗意波为概率波.