

§ 4 实物粒子的波粒二象性

实践呼唤着物理学家对旧量子论进行彻底的改造，建立起完整的微观物质世界的理论。

在从旧量子论向量子理论前进的过程中，迈出决定性一步的是法国青年物理学家德布罗意。

德布罗意：

光(波)具有粒子性，

那么实物粒子具有波动性吗？

从而掀起了一场物理学革命！



一 德布罗意假设

L.V. de Broglie （ 法国人， 1892 – 1987 ）

从自然界的对称性出发，认为：

既然光(波)具有粒子性，
那么实物粒子也应具有波动性。

1924.11.29**德布罗意**把题为

“量子理论的研究”

的博士论文提交给了巴黎大学。



他在论文中指出：

一个能量为 E 、动量为 p 的实物粒子，同时也具有波动性，它的波长 λ 、频率 ν 和 E 、 p 的关系与光子一样：

$$\left. \begin{array}{l} E = h\nu \\ p = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \nu = \frac{E}{h} \\ \lambda = \frac{h}{p} \end{array} \quad \text{德布罗意关系}$$

与粒子相联系的波称为物质波或德布罗意波，

λ — 德布罗意波长 (de Broglie wavelength) ☆



路易.德布罗意

Louis.V.de Broglie

法国人

1892 — 1987

1929年获诺

贝尔物理奖

提出电子的波动性



经爱因斯坦的推荐，物质波理论受到了关注。

在论文答辩会上，佩林问：

“这种波怎样用实验来证实呢？”

德布罗意答道：

“用电子在晶体上的衍射实验可以做到。”

电子的波长： $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0E}}$ （电子 $v \ll c$ ）

设加速电压为 U
（单位为伏特） $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eU}} \approx \frac{1.225}{\sqrt{U}} (\text{nm})$

$U=150V$ 时， $\lambda=0.1\text{nm}$ — X 射线波段

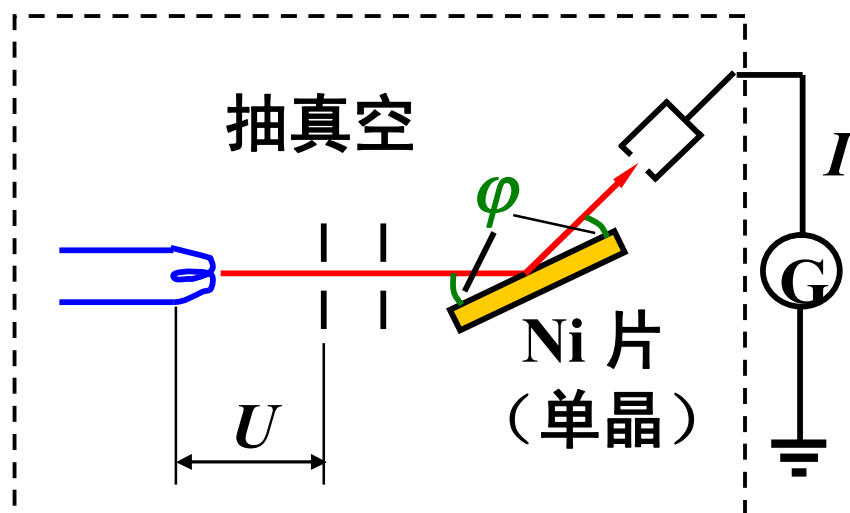


二 电子衍射实验

d 为晶格常数



●戴维孙(Davisson)革末(Germer)实验(1927)



$$E_K = eU = \frac{p^2}{2m}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 eU}}$$

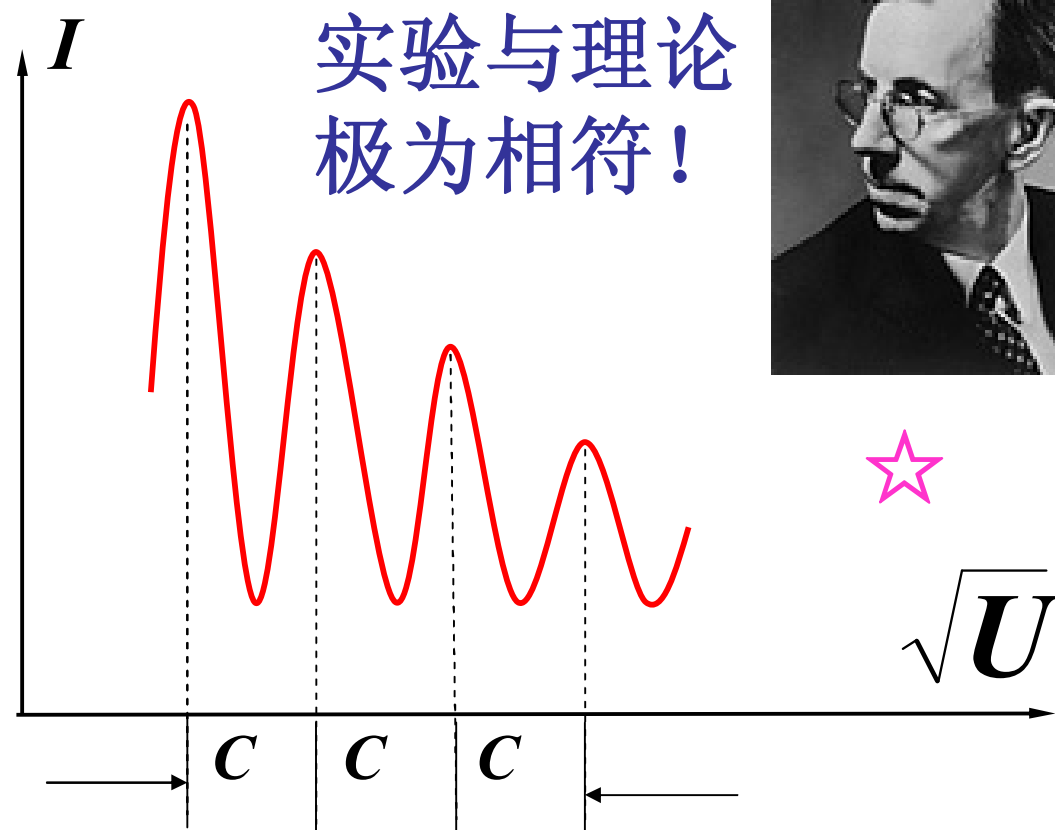
当满足 $2d \sin \varphi = n\lambda$, $n=1,2,3,\dots$ 时,
应观察到电流 I 为极大。

若固定 φ 角,

连续改变加速电压时,
光电流极大的条件

$$\sqrt{U} = n \frac{h}{2d \sin \varphi \sqrt{2em_0}} = nC$$

实验结果



理论预言：
在固定 φ 角，
(C 为常数)
连续改变电压，
出现光电流
极大的条件

$$\sqrt{U} = nC$$
$$n = 1, 2, 3, \dots$$

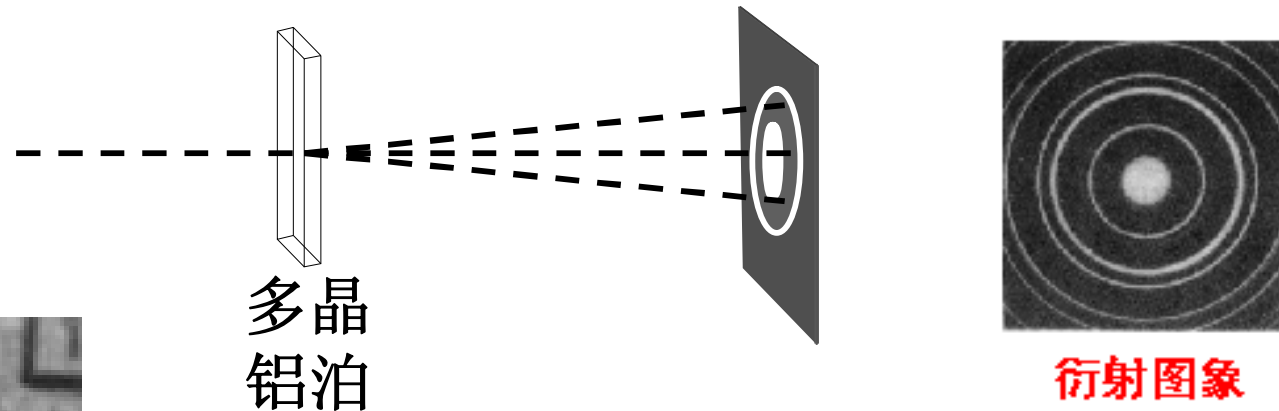
当 $\sqrt{U} = C; 2C; 3C \dots$

实验观察到 I 为极大！

戴维逊(Clifton Joseph
Davisson, 1881-1958)
1937年诺贝尔物理奖

汤姆逊（1927）电子衍射实验

电子束穿过多晶薄膜，
与X射线通过多晶薄膜后产生的衍射图样
极为相似的衍射图样

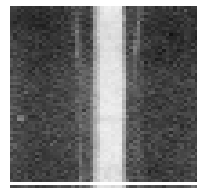


汤姆逊(George Paget Thomson,
1892-1975)
1937年诺贝尔物理奖

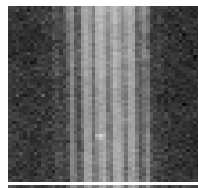


约恩逊（1961）电子衍射实验

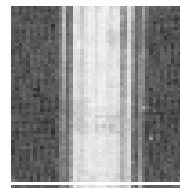
电子的单缝、双缝、三缝和四缝衍射实验图象



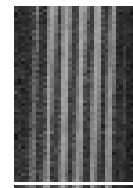
单缝



双缝



三缝



四缝

更加直接地说明了电子具有波动性



质子、中子、原子、分子...也有波动性。

德布罗意公式对这些粒子同样正确

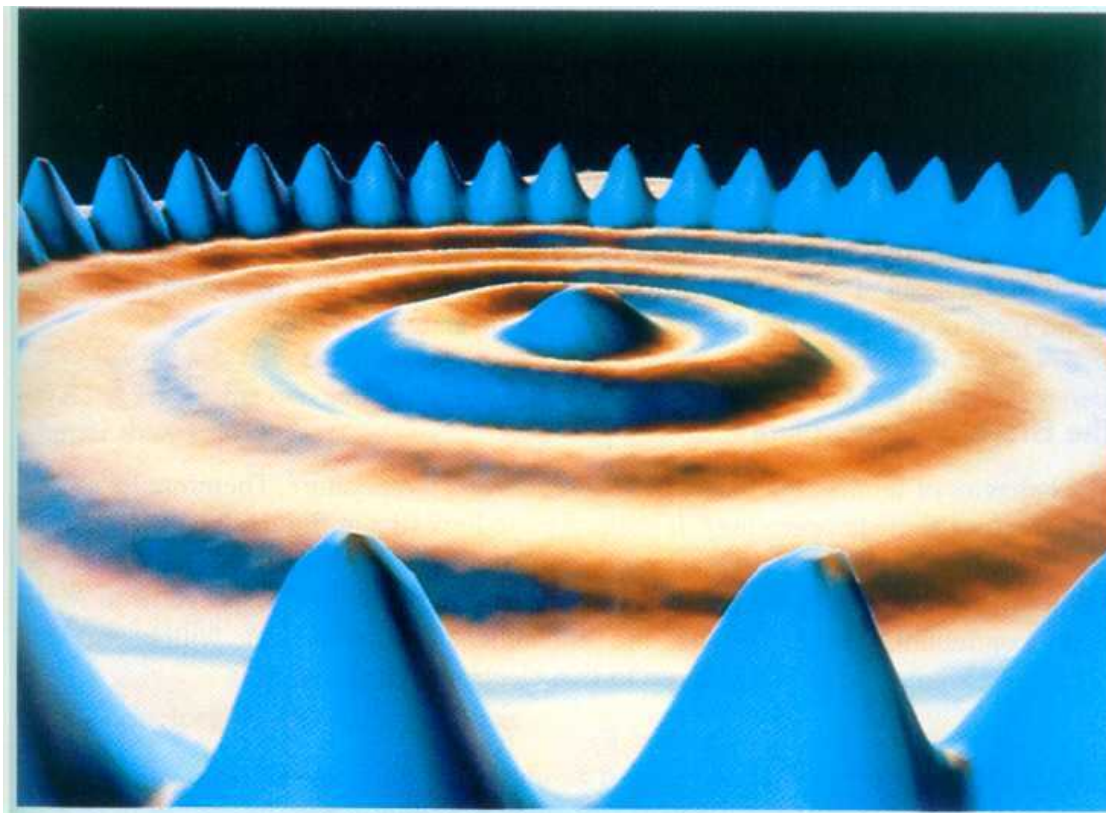
一切微观粒子都具有波粒二象性，
德布罗意公式就是
描述微观粒子波粒二象性的基本公式。

$$\lambda = \frac{h}{m v} \propto \frac{1}{m}, \quad m \uparrow \rightarrow \lambda \downarrow$$

宏观粒子 m 大， $\lambda \rightarrow 0$ ，表现不出波动性。



1993年，克罗米（M. F. Crommie）等美国科学家，用扫描隧道显微镜技术，把蒸发到铜（111）表面上的铁原子排列成了半径 7.13nm 的圆环形量子围栏，用实验观测到了在围栏内形成的同心圆状的驻波，直接地证实了电子的波动性。



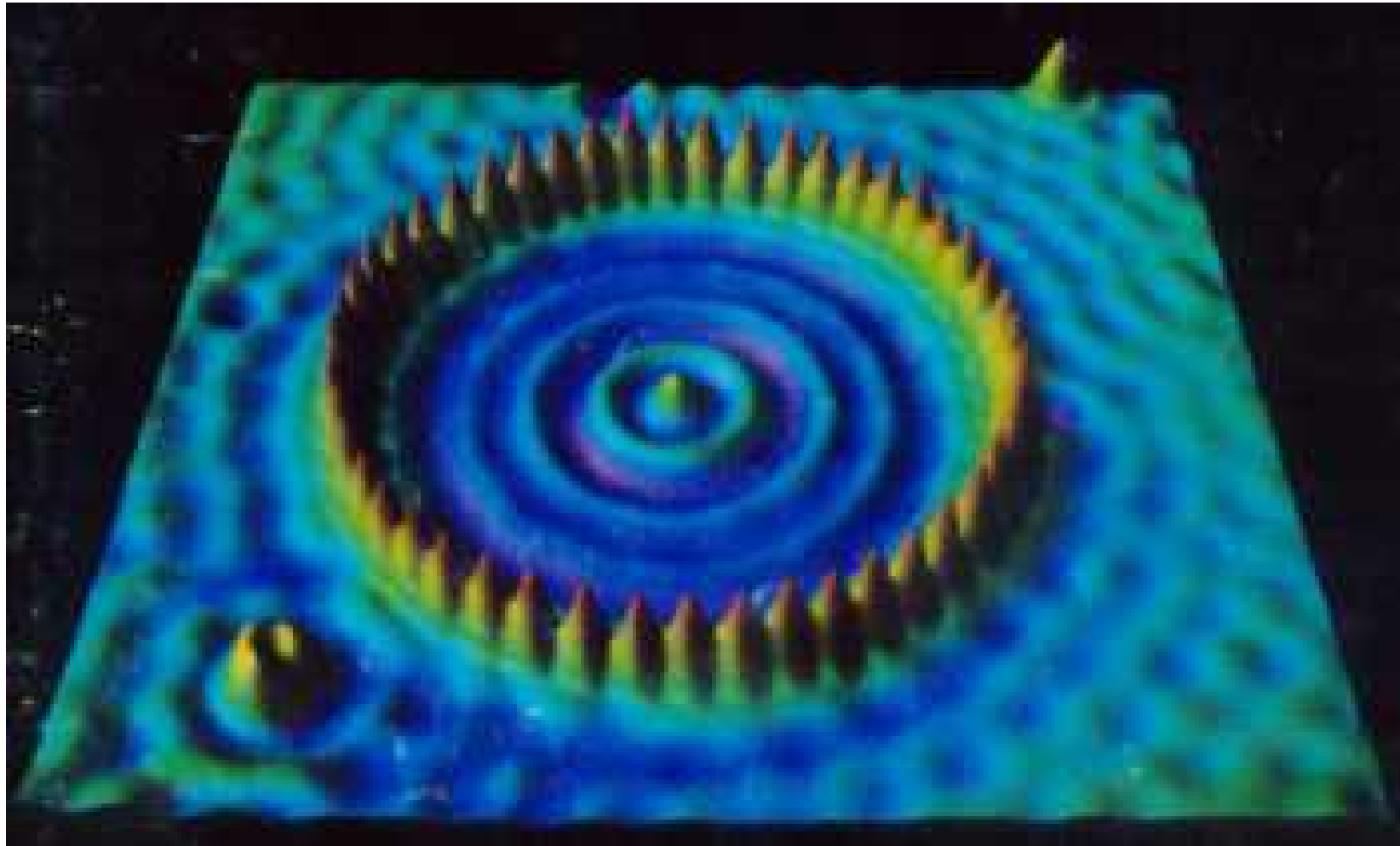
“量子围栏”

48个铁原子排列在
铜表面

证明电子的波动性



1993年美国科学家移动铁原子，
铁原子距离0.9纳米



粒子的波动性已有很多的重要应用。

由于低能电子波穿透深度较X光小，
所以低能电子衍射被广泛地用于
固体表面性质的研究。

由于中子易被氢原子散射，
所以中子衍射就被用来研究含氢的晶体。

电子显微镜利用了电子的波动性，
由于电子的波长可以很短，
电子显微镜的分辨能力可以达到0.1 nm。



例19—5

- (1) 质量为 100g 的子弹，以 $100\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度运动，按德布罗意公式计算其波长；
- (2) 计算电子经过 $U_1 = 100\text{V}$ 和 $U_2 = 10000\text{V}$ 的电压加速后的德布罗意波。

解：(1) 应用非相对论公式，计算子弹的德布罗意波长

$$\lambda = \frac{h}{mV} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{0.1 \times 100} = 6.63 \times 10^{-35} (\text{m})$$

对于宏观物体来说，普朗克常数极其微小，其德布罗意波长在实验中难以测量。



(2) 此时，电子的速度仍然远远小于光速，
仍然可以应用非相对论公式

$$\lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m_0 e U_1}} \approx \frac{1.225}{\sqrt{U_1}} = 0.1225(nm)$$

$$\lambda_2 = \frac{h}{\sqrt{2m_0 e U_2}} \approx \frac{1.225}{\sqrt{U_2}} = 0.01225(nm)$$

这都与X射线的波长相当。

可见一般实验中电子波的波长是很短的，
正是因为这个缘故，
观察电子衍射时就需要利用晶体。



h 极小 \rightarrow 宏观物体的波长小得实验难以测量
 \rightarrow “宏观物体只表现出粒子性”

两把自然尺度： c 和 h

$c \rightarrow \infty$: 相对论 \longrightarrow 牛顿力学

$h \rightarrow 0$: 量子物理 \longrightarrow 经典物理

($\lambda \rightarrow 0$: 波动光学 \longrightarrow 几何光学)

