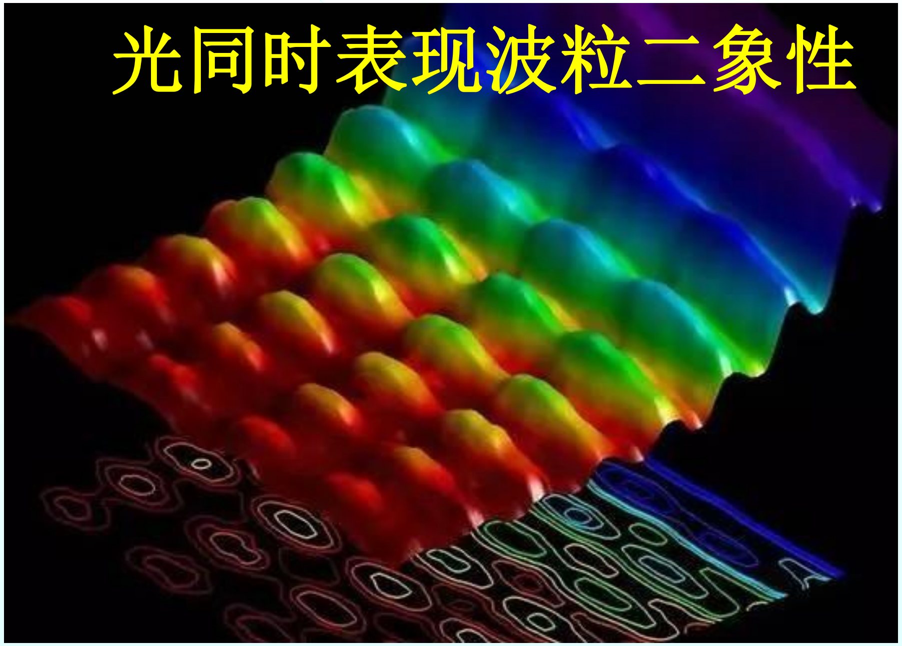
引入新课



问题：实物粒子有波动性吗？

一、德布罗意波（1924年）

	波动性 (λ , ν)	粒子性 (m , p)
光	√	√
实物粒子	?	√

$$\boxed{\varepsilon = h\nu}$$

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

实物粒子和光子一样，
也具有波粒二象性。

L.V. de Broglie 1892–1987

The Nobel Prize in Physics 1929

二、德布罗意波长

质量为m的粒子以速度v 匀速运动时

粒子性： 具有确定的能量E和动量p.

波动性： 可看成频率为ν，波长为λ 的单色平面波.

- 考虑相对论效应

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

$$\boxed{p = m\upsilon = \frac{h}{\lambda}}$$

频率
$$\boxed{\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} = \frac{m_0c^2}{h\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}}$$

波长
$$\boxed{\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m\upsilon} = \frac{h}{m_0\upsilon}\sqrt{1-\upsilon^2/c^2}}$$

实物粒子的波动既不是机械波也不是电磁波，它被称为“物质波”或“德布罗意波”。

思考：若不考虑相对论效应呢？

• 不考虑相对论效应

（$v<<c$）

$$\lambda=\frac{h}{p}=\frac{h}{m_0 v}$$

讨论：

（1）若电子经电势差为U的电场加速后，则

$$\frac{1}{2}m_0 v^2=eU \Rightarrow v=\sqrt{2eU/m_0}$$

$$\lambda=\frac{h}{P}=\frac{h}{\sqrt{2em_0U}}\approx\frac{1.225}{\sqrt{U}}nm$$

$$U=150V \Rightarrow \lambda=0.1nm$$

（2）若是$m=1g$，$v=1cm/s$的实物粒子呢？

$$\lambda=\frac{h}{mv}=\frac{6.62\times10^{-34}}{10^{-3}\times10^{-2}}=6.62\times10^{-29}m$$

结论：实物粒子的德布罗意波波长很短，很难呈现出显著的波动性.

思考：若已知动能，德布罗意波长如何表示？

- 考虑相对论效应

$$\left.\begin{aligned} E &= E_k + m_0c^2 \\ E^2 &= m_0^2c^4 + P^2c^2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow P = \sqrt{\left(\frac{E_k}{c}\right)^2 + 2m_0E_k}$$

$$\Rightarrow \boxed{\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{\sqrt{\left(\frac{E_k}{c}\right)^2 + 2m_0E_k}}}$$

- 不考虑相对论效应

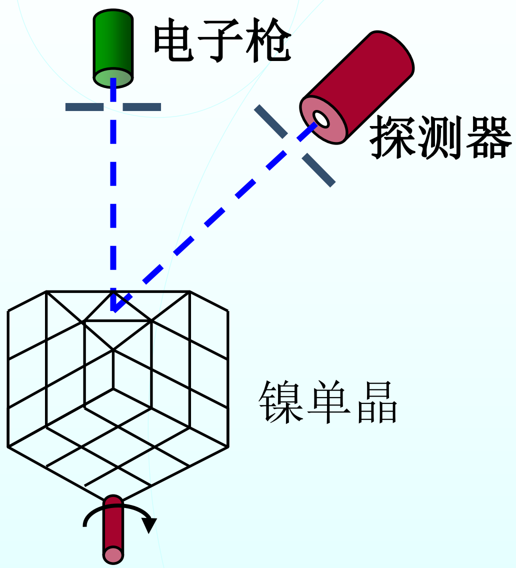
若$v \ll c$，即$E_k \ll m_0c^2$ $\Rightarrow$ $\boxed{\lambda \approx \frac{h}{\sqrt{2m_0E_k}}}$

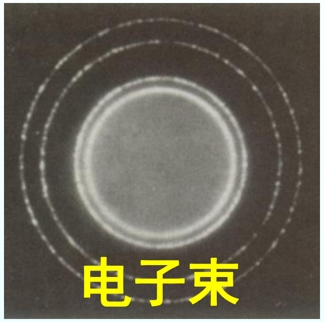
现代物理知识： 2002年1期 《少女与老妪》

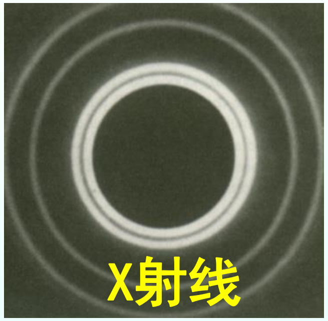
电子的波动性如何观察？

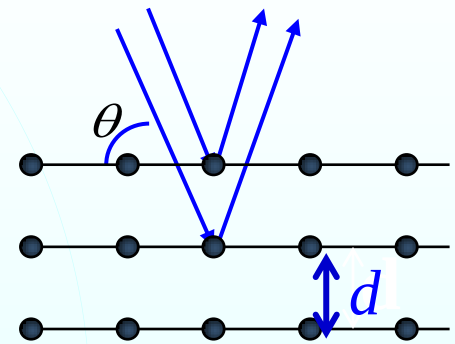
三、电子衍射实验

- 1927年戴维孙和革末观测到电子衍射现象









$$2d\sin\theta = k\lambda$$

电子衍射

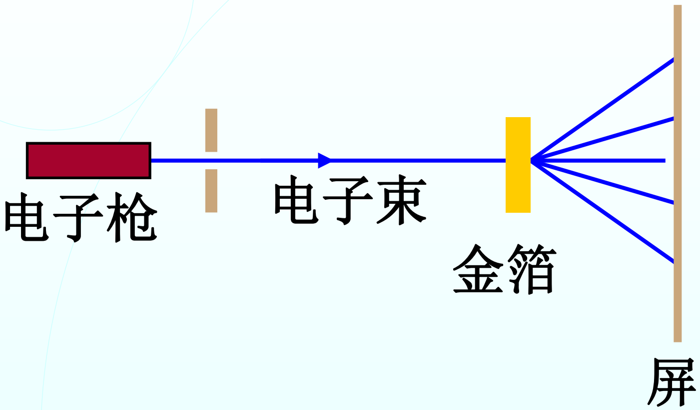
强度是散射角的函数，

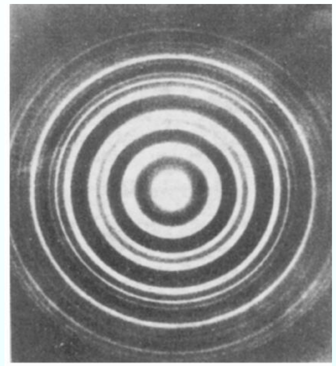
随着散射角不同，出现极大值和极小值.

Clinton Joseph Davisson
1881-1958

Lester Halbert Germer
1896-1971

- 1927年，汤姆逊做了电子通过金多晶薄膜的衍射实验

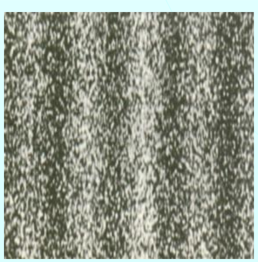




George Paget Thomson
1892-1975

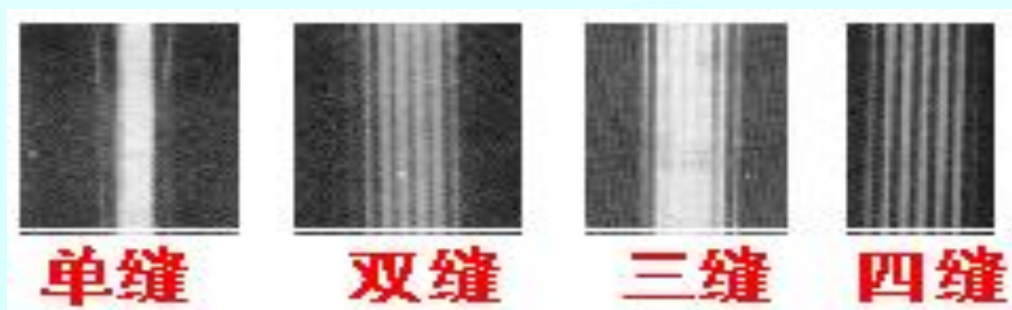
1937年，戴维孙与汤姆逊共获诺贝尔物理学奖

- 1961年，约恩孙（德国）电子入射铜膜狭缝



电子双缝干涉

杨氏双缝干涉



- 30年代后，实验又验证了：质子、中子、原子、分子等实物粒子都具有波动性，并满足德布罗意关系。

※ 一切实物粒子都具有波动性

结论：

- 德布罗意波反应物质粒子在空间出现的几率，是几率波.
- 粒子在空间各个点出现的几率服从统计规律.

四、德布罗意波的应用

电子显微镜

1933年，鲁斯卡等人成功研制第一台电子显微镜.

分辨率：约10 nm

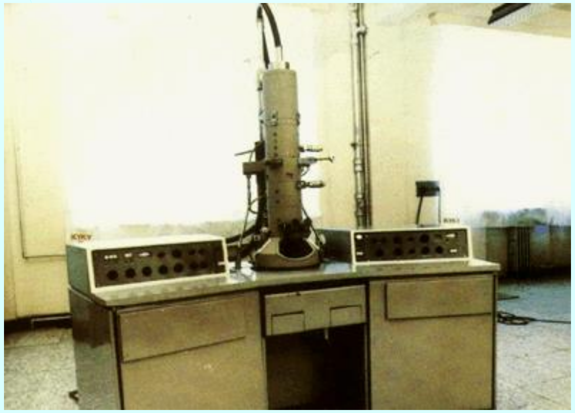
分辨本领：$\boxed{R=\dfrac{D}{1.22\lambda}}$

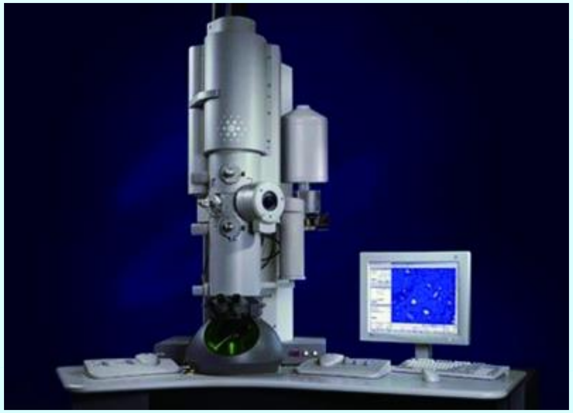
电子波波长 ≪ 可见光波长

电子显微镜分辨率远大于光学显微镜分辨率

E. Ruska

The Nobel Prize in Physics 1986





小 结：

- 德布罗意物质波
  - 德布罗意假设
    - 光波
      - 波动性
      - 粒子性
    - 粒子
      - 波动性？
      - 粒子性
    - 波粒二象性
      - $E = mc^2 = h\nu$
      - $2\pi r = n\lambda$
  - 玻尔角动量量子化条件解释
    - 稳态：驻波
    - $2\pi r = n\lambda$
    - $L = mvr = pr = \frac{h}{\lambda} \cdot \frac{n\lambda}{2\pi} = n \cdot \frac{h}{2\pi}$
  - 电子衍射实验
    - 1927，戴维森-革末
    - 1927，乔治-佩杰特-汤姆生
    - 分享1937年诺贝尔物理学奖
  - 电子显微镜
    - 分辨本领反比于波长
    - 德国-鲁斯卡
    - 1986年诺贝尔物理学奖

引 入

“只要有足够的数据
就能计算出未来”

“拉普拉斯妖”

知道宇宙中每个原子的确切位置和动量，就能使用牛顿定律展现宇宙事件的整个过程，过去及未来。

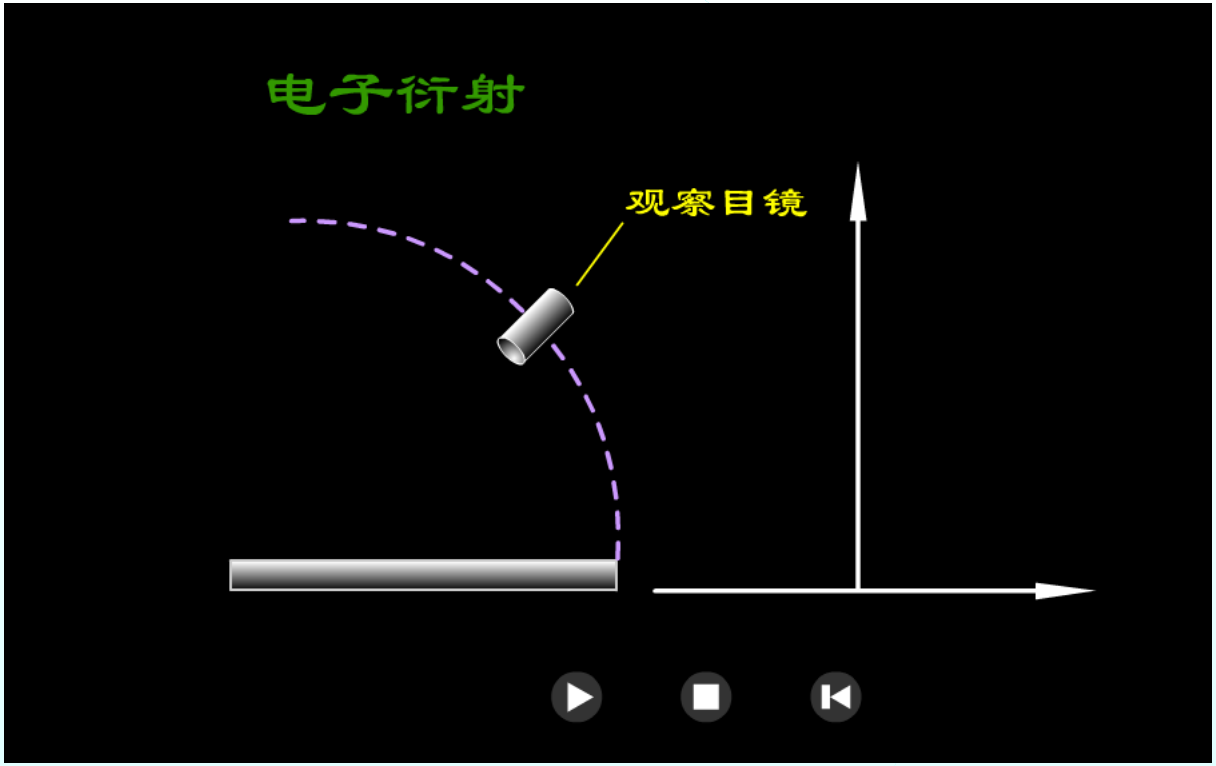
问题：微观粒子的位置和动量能同时准确确定吗？

§ 13-6 不确定性原理

W. Heisenberg

(1901-1976)

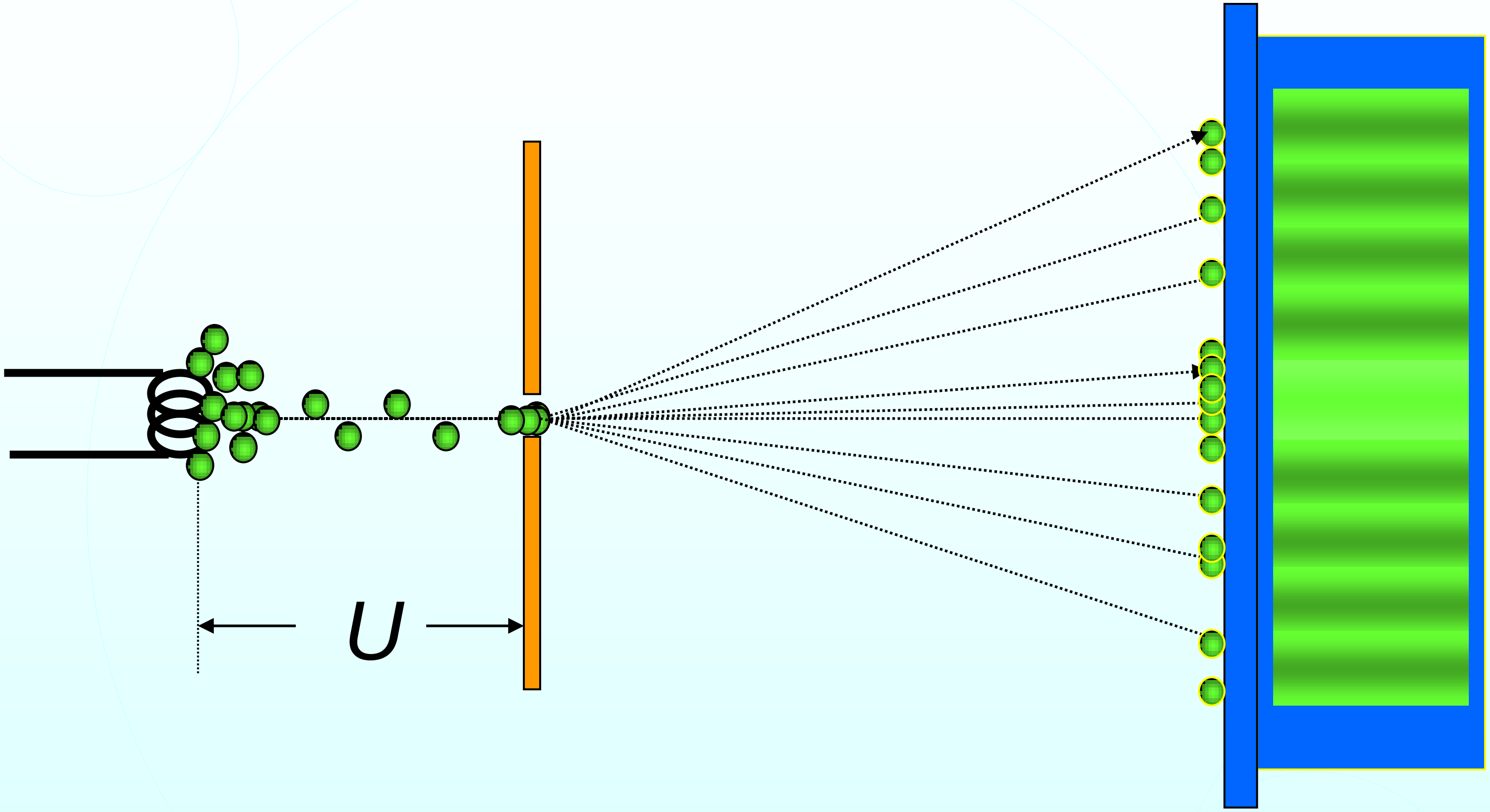
The Nobel Prize in Physics 1932



1927年海森伯提出了不确定关系

一、坐标和动量的不确定关系

以电子单缝衍射为例

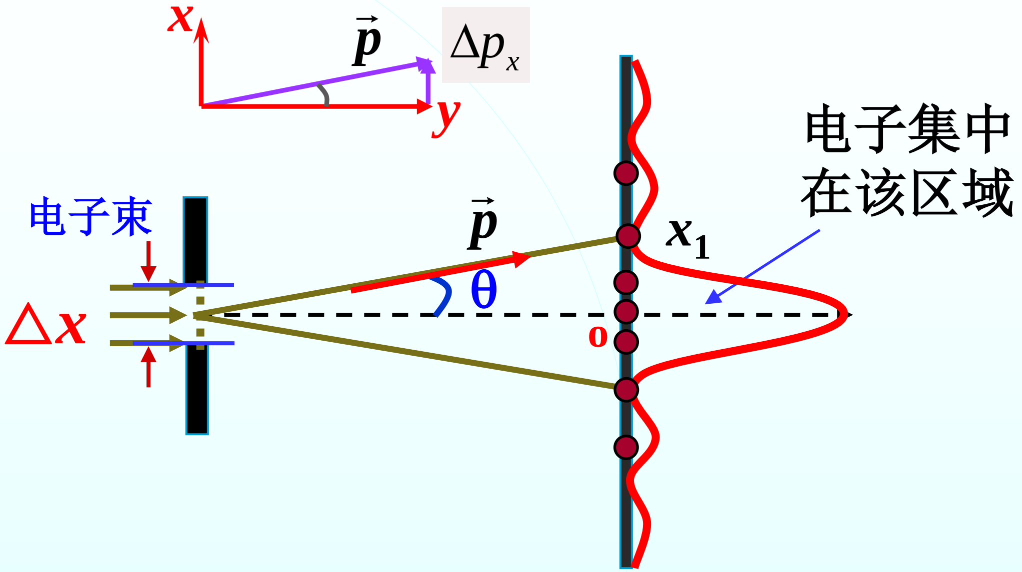


电子穿过狭缝时具有波动性，会发生衍射现象.

在 x 方向:

位置不确定度: $\Delta x = a$

动量不确定度:



$$\Delta p_x = p\sin\theta = \frac{h}{\lambda}\cdot\sin\theta$$

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

衍射关系：$a\cdot\sin\theta = \lambda$

$$\Rightarrow \Delta x\cdot\Delta p_x = \frac{\lambda}{\sin\theta}\cdot\frac{h}{\lambda}\sin\theta = h$$

再考虑其它衍射条纹: $\boldsymbol{\Delta x\cdot\Delta p_x \geq h}$