

大学物理

张磊 (13072919527)

B824, Cyrus Tang Building



光的波粒二象性

光子能量

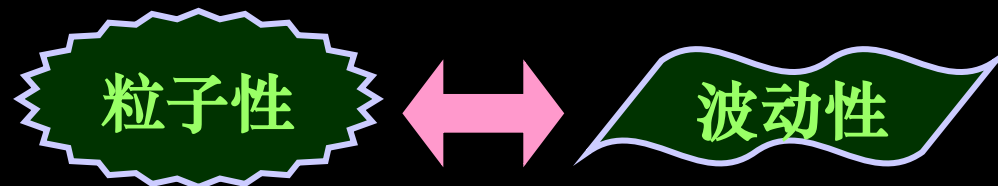
$$E = m_{\phi} c^2 = h\nu$$

光子质量

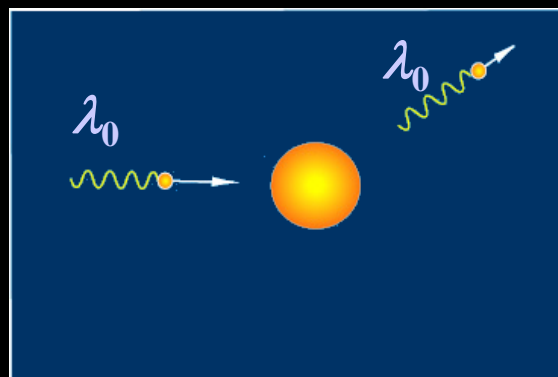
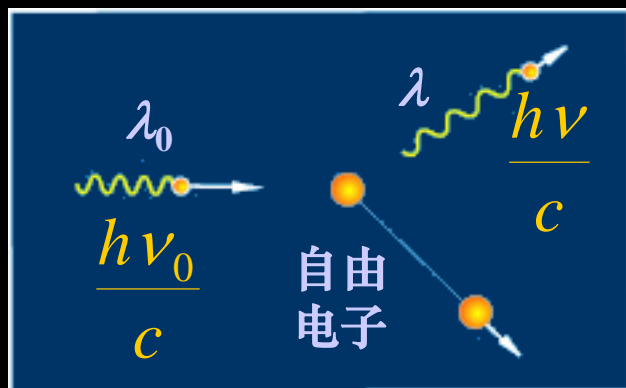
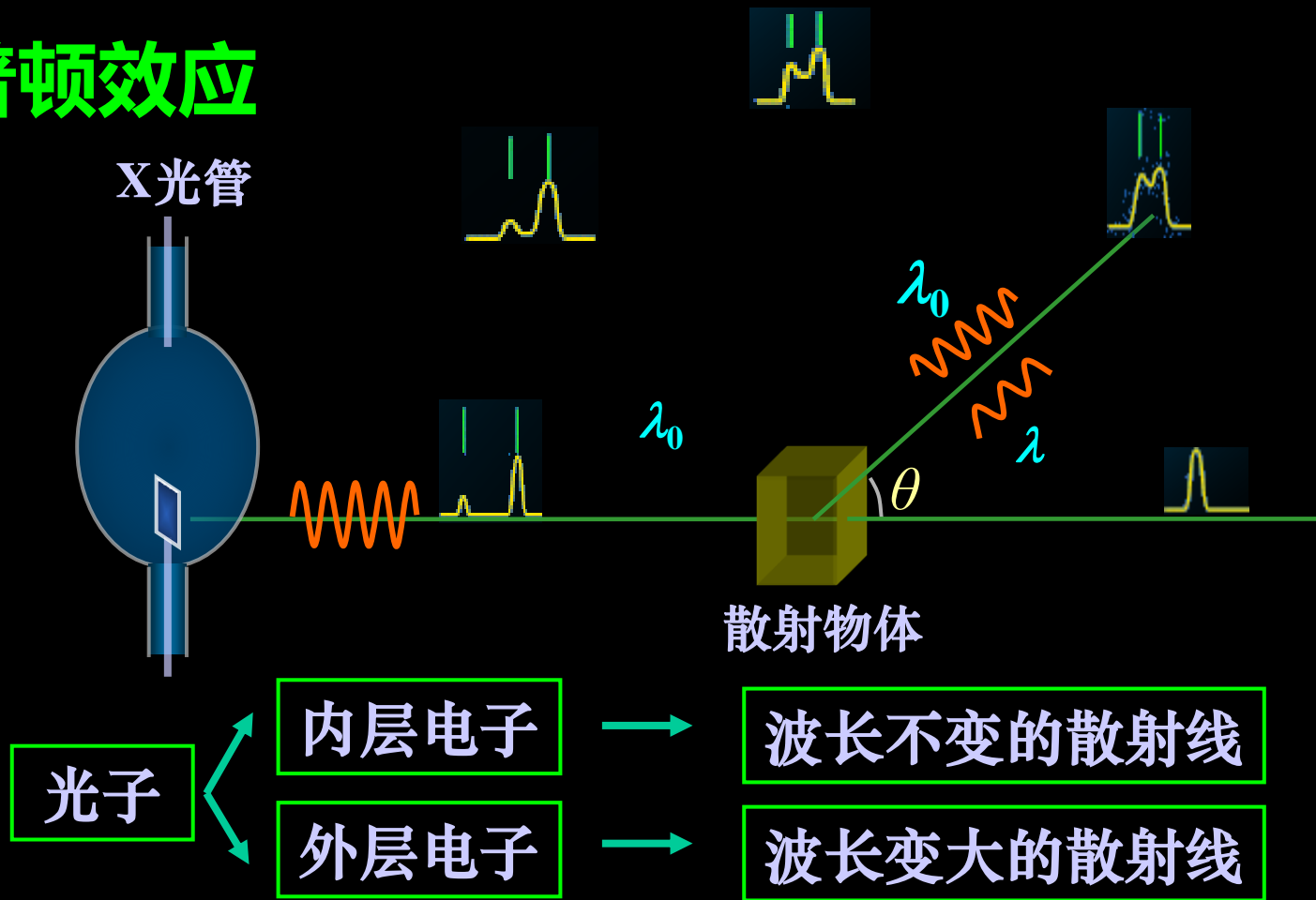
$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

光子动量

$$p = m_{\phi} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$



康普顿效应

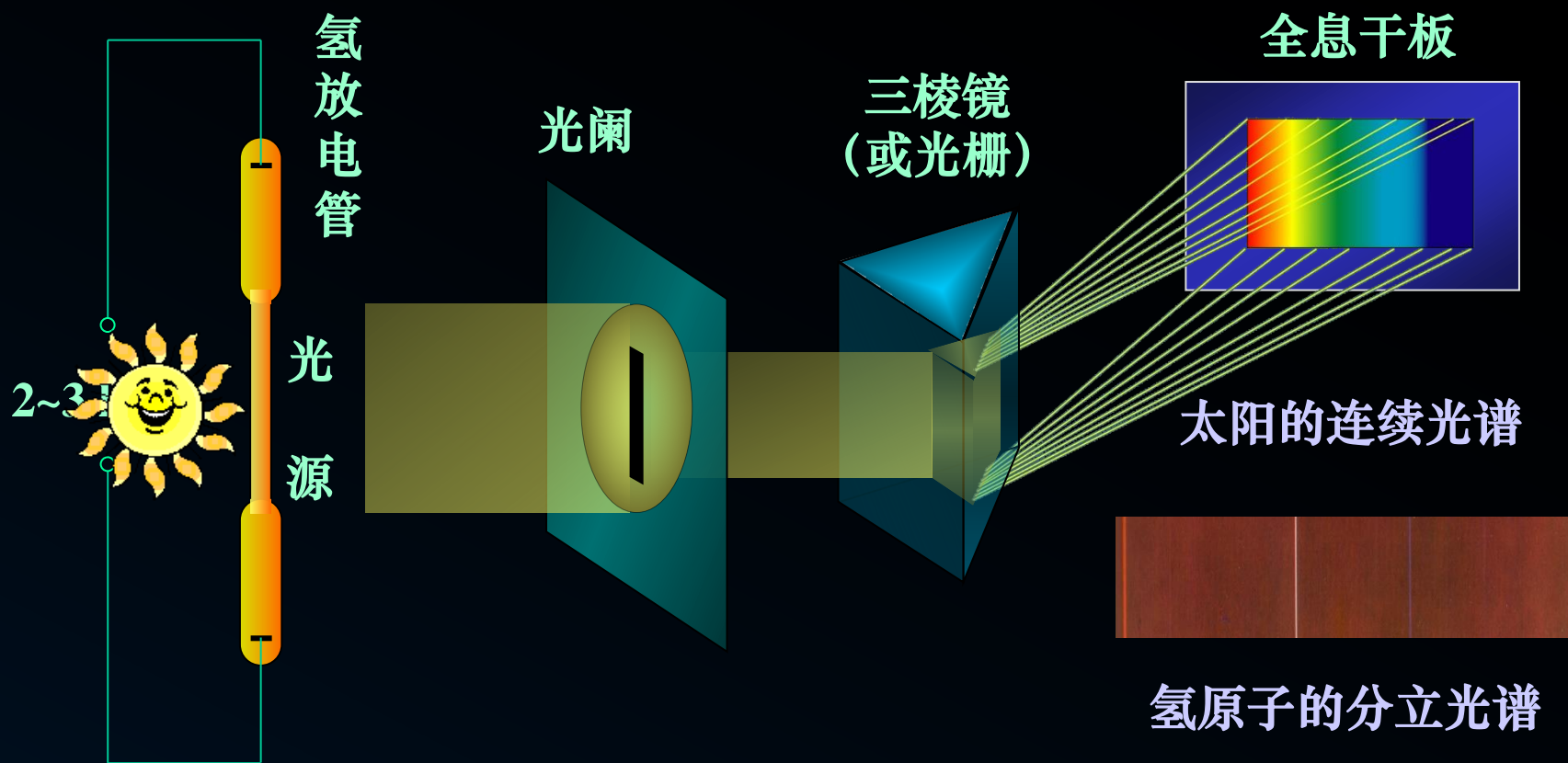


$$\begin{aligned}\Delta\lambda &= \lambda - \lambda_0 \\ &= 2\lambda_c \sin^2 \frac{\theta}{2}\end{aligned}$$

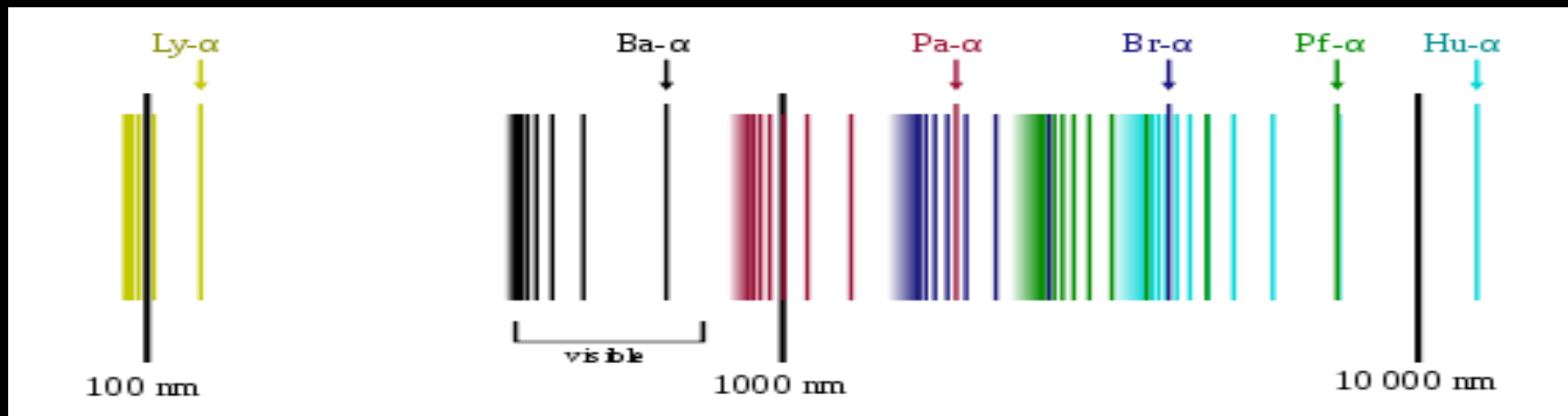
§16.4 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论

研究原子结构的两种方法：

1. 利用高能粒子轰击原子，研究轰出的未知粒子 → 高能物理
2. 原子在外界激发下发光，研究原子的发射光谱 → 光谱分析



一. 实验规律



谱线特征:

- (1) 谱线为**分立线状光谱**
- (2) 每一条光谱线的**波数**可表示为**两项之差**, 即

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

氢光谱的里德伯常量 $R_H = 1.097\ 373\ 1 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

$k = 2 (n = 3, 4, 5, \dots)$ 谱线系 —— 巴耳末系 (1896年)

赖曼系(1914)紫外部分 $\sigma = R(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2}) \quad n = 2, 3, 4,$

帕邢系(1908)可见光 $\sigma = R(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2}) \quad n = 4, 5, 6,$

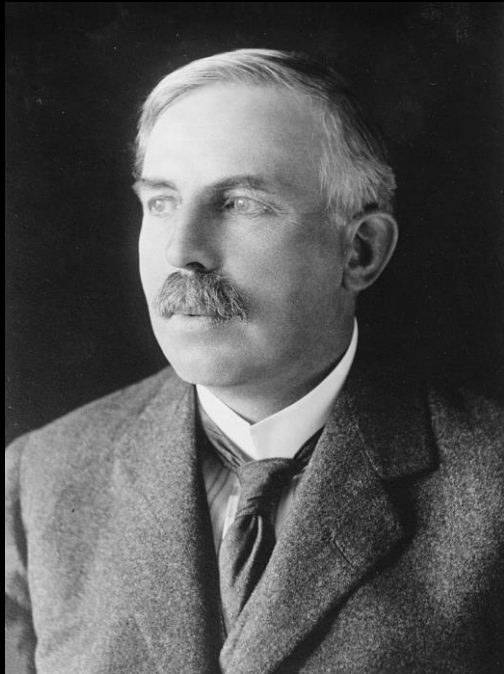
布喇开系(1922)近红外部分 $\sigma = R(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2}) \quad n = 5, 6, 7,$

普丰德系(1924)红外部分 $\sigma = R(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2}) \quad n = 6, 7, 8,$

汉弗莱系(1953)远红外部分 $\sigma = R(\frac{1}{6^2} - \frac{1}{n^2}) \quad n = 7, 8, 9,$

表面上如此繁杂的光谱线可以用如此简单的公式表示，这是一项出色的成果。但它是凭经验凑出来的，为什么与实验符合得如此之好，在公式问世将近三十年内，一直是个谜。

卢瑟福 (E. Rutherford, 1871-1937)



英国物理学家，出生于新西兰。

1895年，成为 J. J. Thomson 的研究生。

1899年1月，发现铀盐放射出 α 射线和 β 射线，提出天然放射性的衰变理论和衰变定律。

他于1908年获得诺贝尔化学奖。

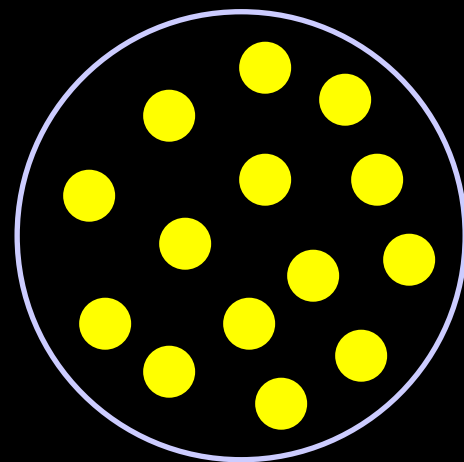
卢瑟福判定 α 粒子是带正电的氦原子核；根据 α 粒子散射实验提出原子的有核模型。

卢瑟福被誉为原子物理之父，又是开创原子核物理学的奠基人。

二. 卢瑟福的原子有核模型

1. 原子的葡萄干蛋糕模型

1903年，汤姆孙提出：原子中的正电荷和原子的质量均匀地分布在半径为 10^{-10}m 的球体范围内，而原子中的电子浸于此球中。



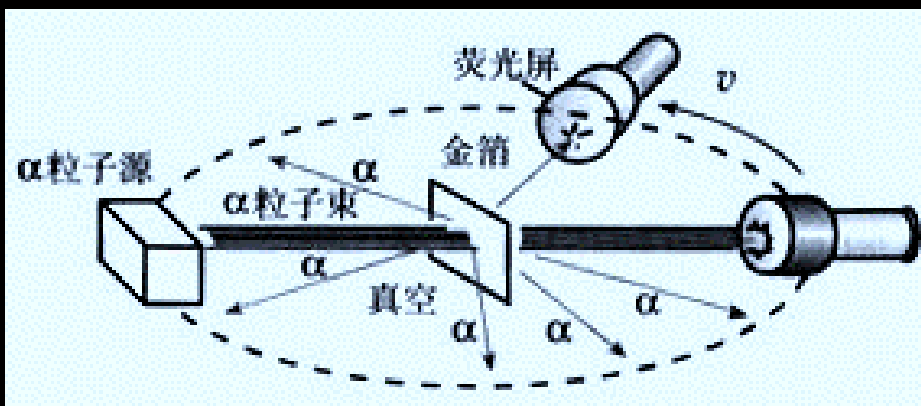
缺点：

- 不能解释正负电荷不中和
- 不解释氢原子光谱存在的谱线系

α 粒子由两个中子和两个质子构成（氦-4），
质量为氢原子的4倍

2. α 粒子散射实验

大部分 α 粒子穿过金箔后只偏转很小的角度；但是在实验中竟然发现有少量 α 粒子的偏转角度大于 90° ，甚至约有几万分之一的粒子被向后散射了。



α 粒子大角度散射否定了汤姆孙的原子模型。

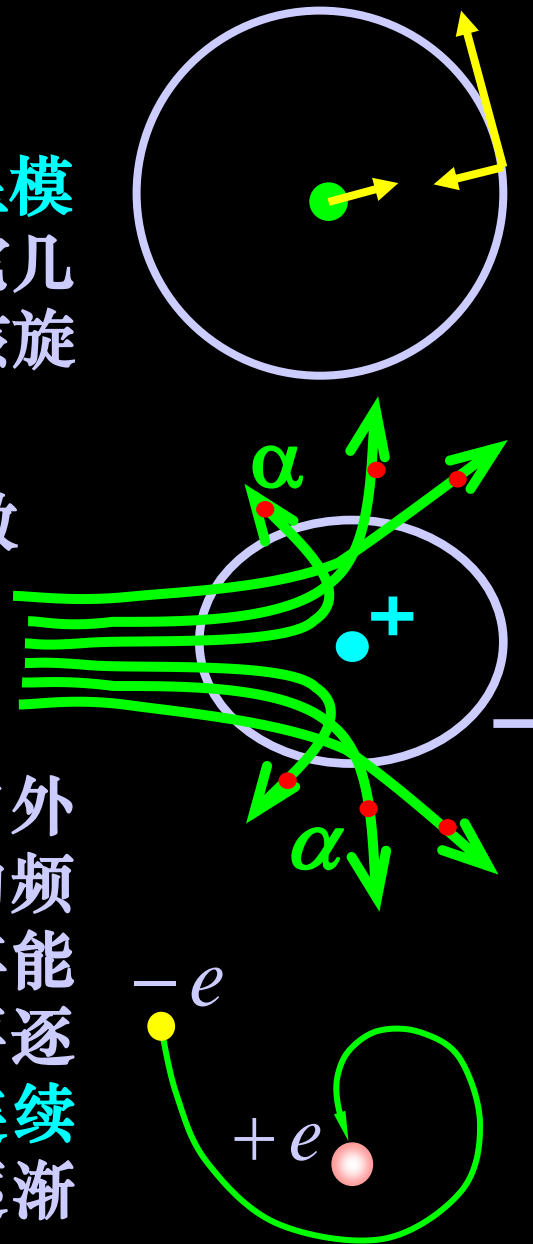
3. 卢瑟福的原子有核模型或行星模型

1911年，**卢瑟福**提出原子有核模型或称行星模型：原子的中心有一个带正电的原子核，它几乎集中了原子的全部质量，电子围绕这个核旋转，核的大小与整个原子相比是很小的。

原子的有核模型可以解释 α 粒子 的大角度散射问题。

4. 经典原子有核模型的困难

经典电磁理论：作加速运动的电子不断向外辐射电磁波，其频率等于电子绕核旋转的频率。由于原子不断地向外辐射电磁波，其能量会逐渐减少，电子绕核旋转的频率也要逐渐地改变，因而原子发射的光谱应该是**连续光谱**。由于原子总能量的减少，电子将逐渐接近原子核而导致电子会**落到原子核上**。



玻尔 (Niels H. D. Bohr, 1885-1962)



丹麦理论物理学家，现代物理学的创始人之一。

在1913年发表了《论原子结构与分子结构》等三篇论文，提出了在卢瑟福原子有核模型基础上的关于原子稳定性和量子跃迁的**三条假设**，从而圆满解释了氢原子的光谱规律。

玻尔的成功，使量子理论取得重大发展，推动了量子物理的建立，具有划时代意义。

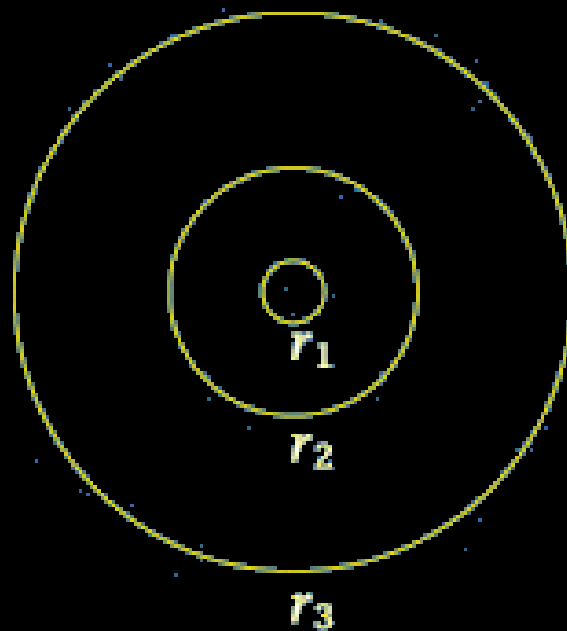
玻尔于1922年12月10日诺贝尔诞生100周年之际，在瑞典首都接受了当年的诺贝尔物理学奖金。

二. 玻尔氢原子理论

1. 定态假设

稳定状态

- 电子作圆周运动
- 不辐射电磁波
- 这些定态的能量不连续

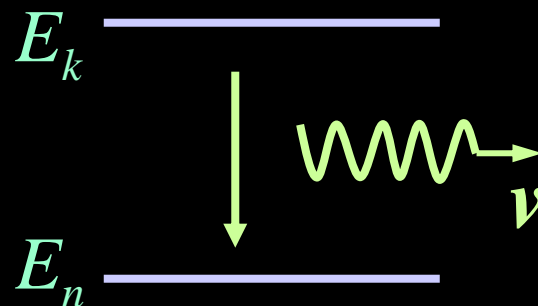


2. 跃迁假设

原子从一个定态跃迁到另一定态，
会发射或吸收一个光子

光子频率

$$\nu = \frac{|E_k - E_n|}{h}$$



3. 角动量量子化假设

轨道角动量 $L = mvr = n \frac{h}{2\pi}$

向心力是库仑力 $m \frac{v^2}{r} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{e^2}{r^2}$

由上两式得, 第 n 个定态的轨道半径为

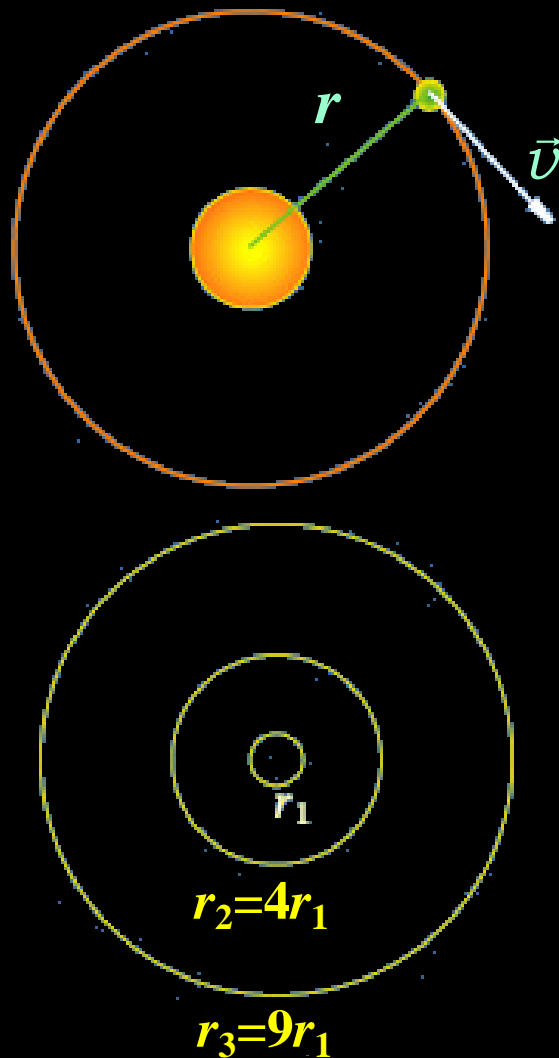
$$r_n = n^2 \left(\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \right) = n^2 r_1 \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

玻尔半径 $r_1 = 0.0529 \text{ nm}$

电子能量

$$E_n = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} = -\frac{1}{8\pi \epsilon_0} \frac{e^2}{r_n} = \frac{E_1}{n^2}$$

$E_1 = -13.6 \text{ eV}$



电子跃迁辐射规律

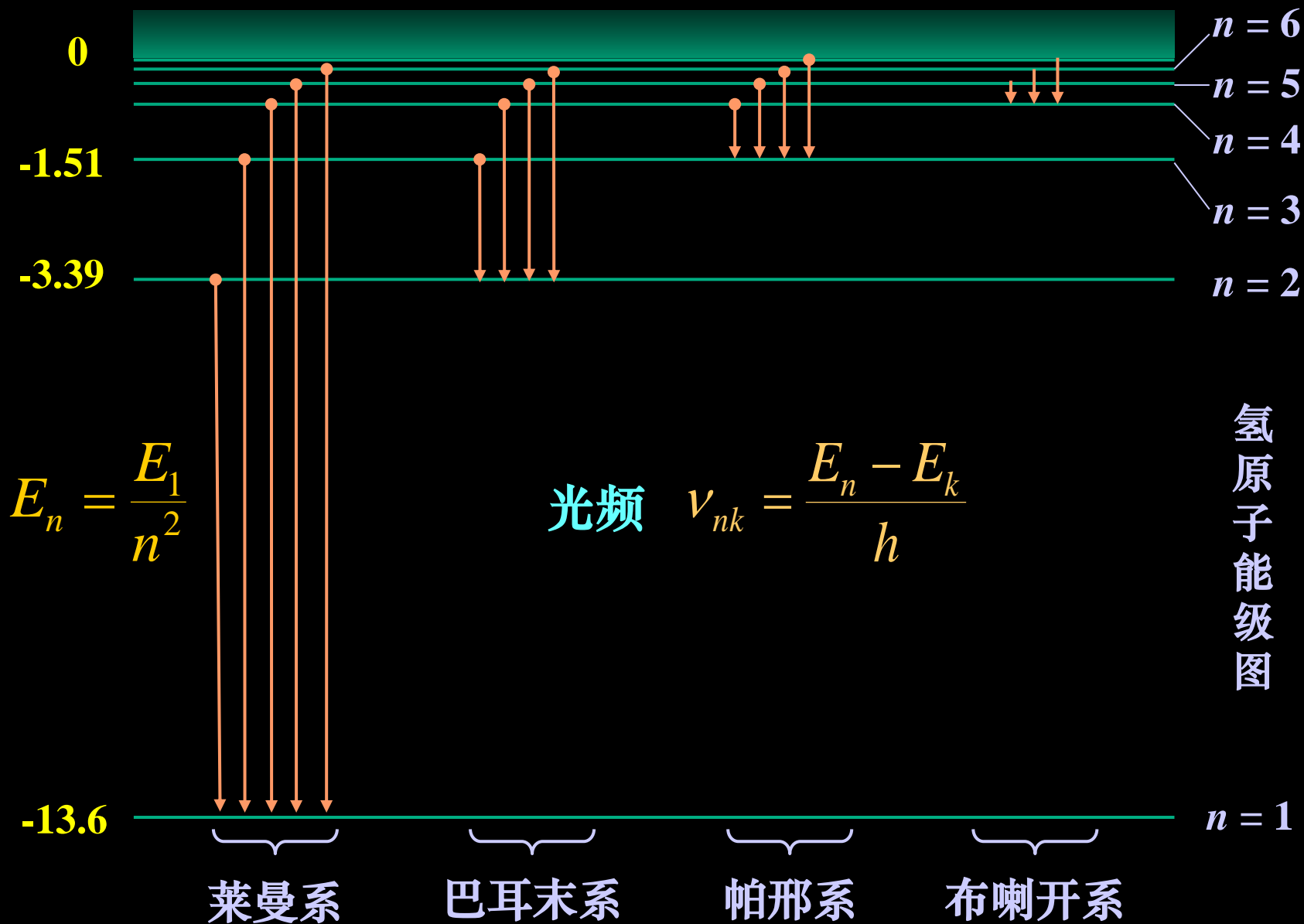
发射光子的波数(波长的倒数)为

$$\begin{aligned} \nu_{nk} &= \frac{1}{\lambda_{nk}} = \frac{\nu_{nk}}{c} \\ &= \frac{1}{hc} (E_n - E_k) = -\frac{E_1}{hc} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \\ &= R_{H\text{理论}} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right) \end{aligned}$$

其中计算得到 $R_{H\text{理论}} = 1.097\ 373\ 1 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$

实验测得 $R_{H\text{实验}} = 1.096\ 775\ 8 \times 10^7\ \text{m}^{-1}$

E_n (eV)



说 明

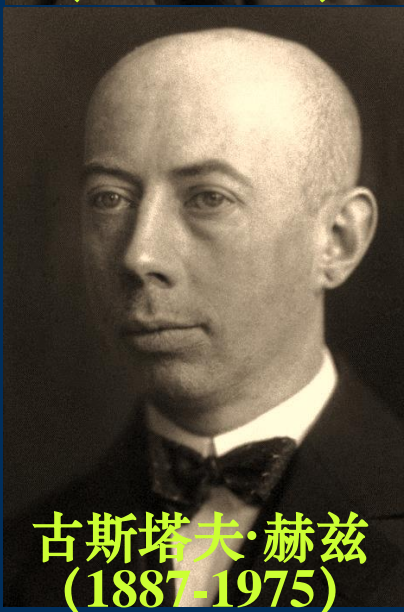
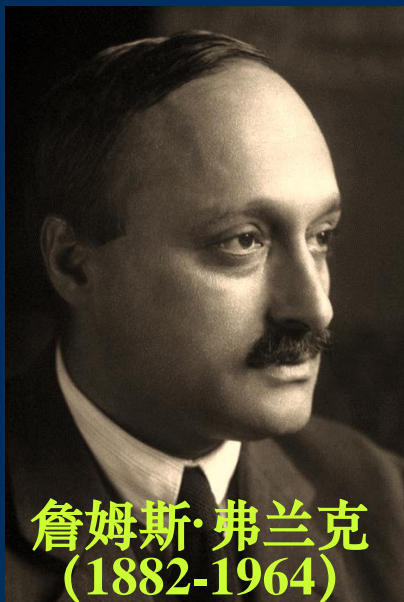
里德伯 - 里兹并合原则
(1896年)

普朗克量子假设
(1900年)

卢瑟福原子的有核模型
(1911年)

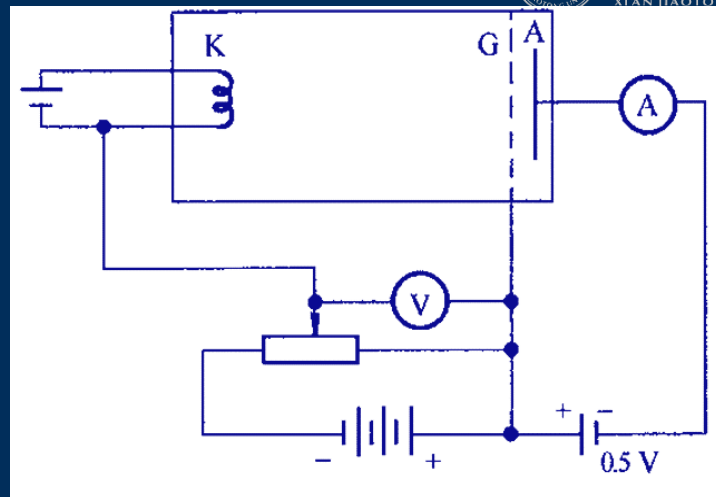
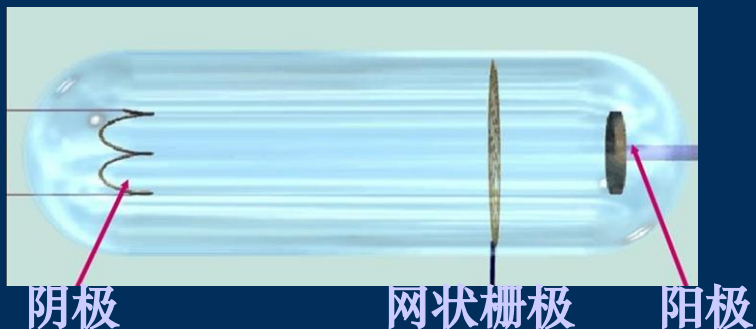
玻尔氢原子理论
(1913年)

夫兰克-赫兹实验



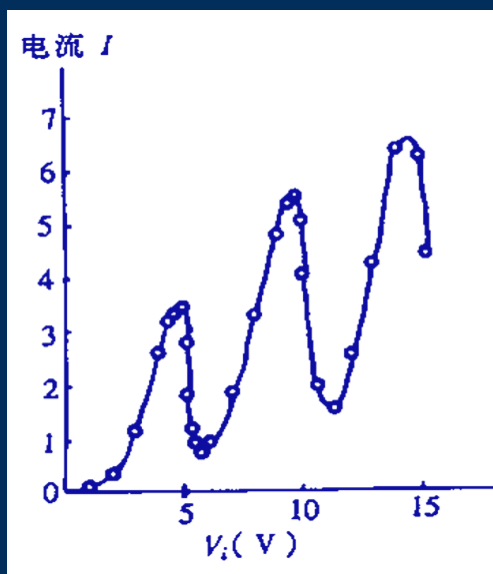
- 1914年，德国科学家詹姆斯·弗兰克和古斯塔夫·路德维希·赫兹研究气体放电中低能电子与原子相互作用时，发现：**透过汞蒸汽的电子流随电子的能量呈现有规律的周期性变化。**
- 实验证实了原子内部的能量是量子化的，是对玻尔原子能量量子化理论的**第一个决定性的证据！**
- 同获**1925年诺贝尔物理学奖**-"for their discovery of the laws governing the impact of an electron upon an atom."

1. 实验装置及结果



□ 水银管中充满低压汞蒸汽

□ 电子从加热的灯丝发射，在阴极(K)和栅极(G)间加速电压下被加速，向栅极运动；在栅极和阳极(A)之间加反向电压(0.5V左右)。电子穿过栅极到达阳极，电路中出现电流 I_p 。



- 当加速电压很低(<4.9V) 时，随电压增加，抵达阳极的电流单调递增；当电压在4.9V时，**电流猛烈地降低**。
- 继续增加电压，电流又跟随着增加，直到电压达到9.8V，又观察到电流骤降。
- 电压每增加4.9V，电流就会猛烈降低。

2. 实验解释

电流骤降 → 电子和原子发生相互作用，
Hg 原子只吸收特定大小(4.9eV)的能量

E_n (eV)	n
-2.7	3
-5.5	2
-10.4	1

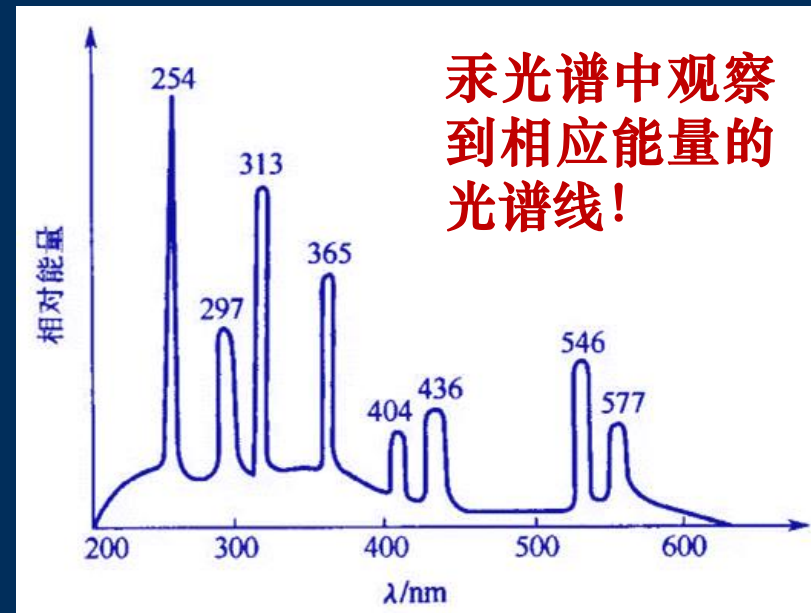
- ◆ 当电子能量 $E_k < E_2 - E_1$ ，电子不能使汞原子激发，电子与原子间为弹性碰撞，随加速电压的增加电流单调增加。
- ◆ 当 $E_k \geq E_2 - E_1$ ，可使汞原子从基态跃迁到激发态，电子与原子为非弹性碰撞，电子动能损耗，无法抵达阳极，电流降低。

3. 结论

表明：原子中确实存在离散能级！

$$h\nu = E_2 - E_1$$

$$\xrightarrow{E_2 - E_1 = 4.9\text{eV}} \lambda = \frac{ch}{\Delta E} = 253.5\text{nm}$$



玻尔氢原子理论的成绩

- 成功地解释了原子的稳定性、大小及氢原子光谱的规律性。
- 从理论上计算了里德伯常量；解决了近30年之久的巴耳末公式之迷，打开了人们认识原子结构的大门，而且玻尔提出的一些概念，如能量量子化、量子跃迁及频率条件等，至今仍然是正确的。
- 能对类氢原子的光谱给予说明。

玻尔氢原子理论的困难

- 不能解释多电子原子的光谱，不能解释谱线的强度和宽度；
- 不能说明原子是如何组成分子、构成液体和固体的；
- 没有从根本上揭示出不连续性的本质；
- 在逻辑上也存在矛盾：把微观粒子看成是遵守经典力学规律的质点，又赋予它们量子化的特征。

§16.5 德布罗意波 微观粒子的波粒二象性

德布罗意 (Louis Victor due de Broglie, 1892-1987)

法国物理学家。

1929年诺贝尔物理学奖获得者，波动力学的创始人，量子力学的奠基人之一。

德布罗意原来学习历史，后来改学理论物理学。他善于用历史的观点，用对比的方法分析问题。

1923年，德布罗意试图把粒子性和波动性统一起来。1924年，在博士论文《关于量子理论的研究》中提出德布罗意波，同时提出用电子在晶体上作衍射实验的想法。爱因斯坦觉察到德布罗意物质波思想的重大意义，誉之为“揭开自然界巨大帷幕的一角”。



四. 光的波粒二象性

光子能量

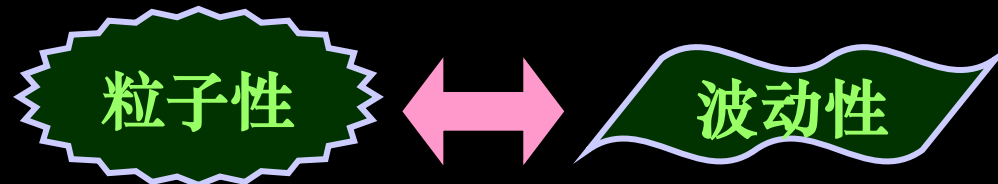
$$E = m_{\phi} c^2 = h\nu$$

光子质量

$$m_{\phi} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$$

光子动量

$$p = m_{\phi} c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$



一. 德布罗意假设(1924年)

	波动性 (λ, ν)	粒子性 (m, p)
光	+	+
实物粒子	?	+

假设：一个质量为 m 的实物粒子以速率 v 运动时，既具有以能量 E 和动量 p 所描述的粒子性，也具有以频率 ν 和波长 λ 所描述的波动性。

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

$$E = mc^2 = h\nu$$



波长 $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m_0 v} \sqrt{1 - v^2 / c^2}$

频率 $\nu = \frac{E}{h} = \frac{mc^2}{h} = \frac{m_0 c^2}{h \sqrt{1 - v^2 / c^2}}$

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

速度 $v=5.0 \times 10^2 \text{ m/s}$ 飞行的子弹，质量为 $m=10^{-2} \text{ Kg}$ ，对应的德布罗意波长为：

$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.3 \times 10^{-25} \text{ nm}$$

Too small to Measure!

速度 $v=5.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 的电子，质量 $m=9.1 \times 10^{-31} \text{ Kg}$ ，对应的德布罗意波长为：

$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.4 \times 10^{-2} \text{ nm}$$

~ X ray



$$\left. \begin{array}{l} 2\pi r = n\lambda \\ \lambda = h/p \end{array} \right\} \rightarrow 2\pi r m v = n h$$

$$l = \frac{h}{2\pi} \cdot n$$

— 轨道角动量量子化

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

$$E = mc^2 = h\nu$$

物质波的波速，光速？超光速？

<https://zhuanlan.zhihu.com/p/651179662>



文科生“一页纸”论文拿物理学诺奖？ 不拼爹更没抄袭，凭实力震惊爱因斯坦

纨绔子弟德布罗意在读历史学时突然对物理学产生兴趣，于是拜入著名物理学家郎之万门下，读博期间这位公子哥着实没怎么勤奋学习，为了混个博士证书，他东拼西凑了只有一页纸的博士论文。导师郎之万自然不想让他蒙混过关，可碍于德布罗意显赫的家庭背景，干脆把这个烫手山芋扔给鼎鼎大名的爱因斯坦：他将小德的论文寄给爱因斯坦请他评判。万没想到的是，爱因斯坦看了论文之后大为赞叹，认为该论文“揭开了大幕的一角”，举世皆为之侧目。德布罗意也因此而获得诺贝尔奖。

<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1573720151828670&wfr=spider&for=pc>

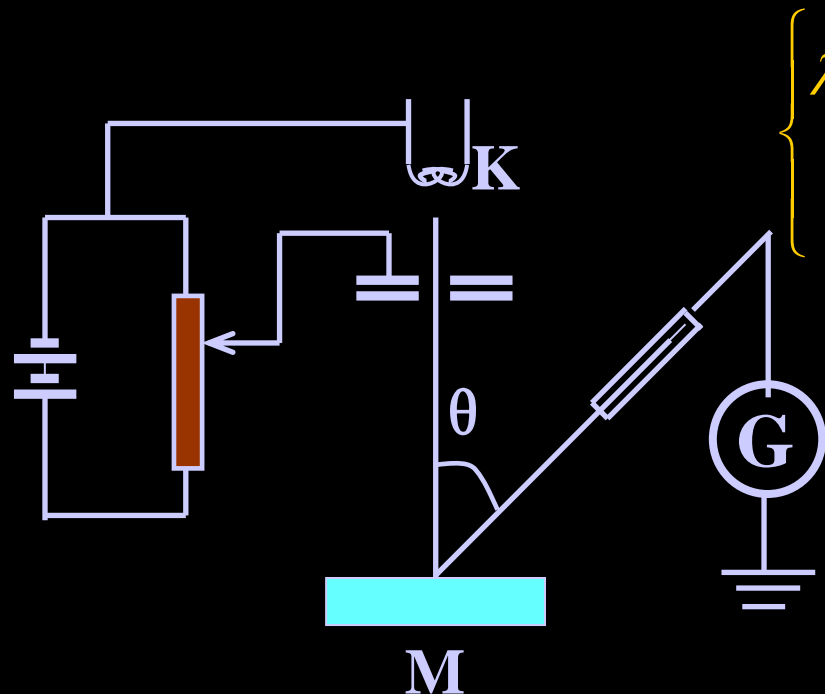
https://www.zhihu.com/question/31371190/answer/2701603156?utm_id=0



二. 德布罗意波的实验验证

1. 戴维逊-革末实验

戴维逊和革末的电子散射实验(1927年)是用电子束垂直投射到镍单晶，电子束被散射。散射电子的强度分布可用德布罗意关系和衍射理论给以解释，从而验证了物质波的存在。



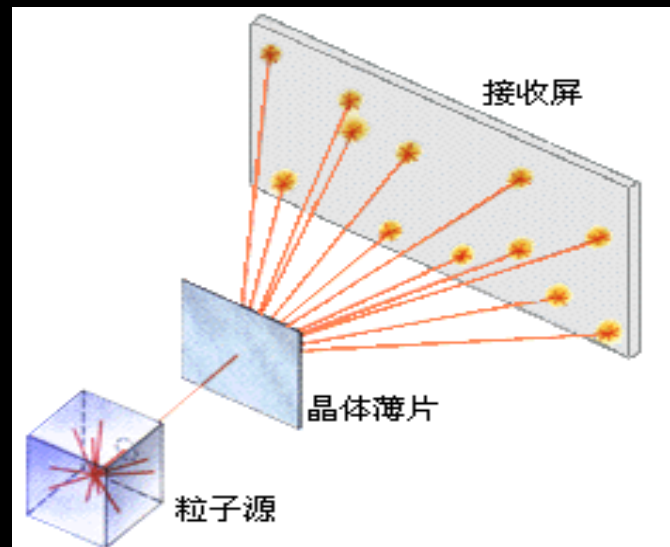
$$\begin{cases} \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0eU}} \Rightarrow \sqrt{U} = n \frac{h}{2d \sin \theta \sqrt{2em_0}} \\ 2d \sin \theta = n\lambda \end{cases}$$

在加速电压 $U=54\text{V}$ ，且 $\theta = 65^\circ$ 时，探测器中的电流有极大值。

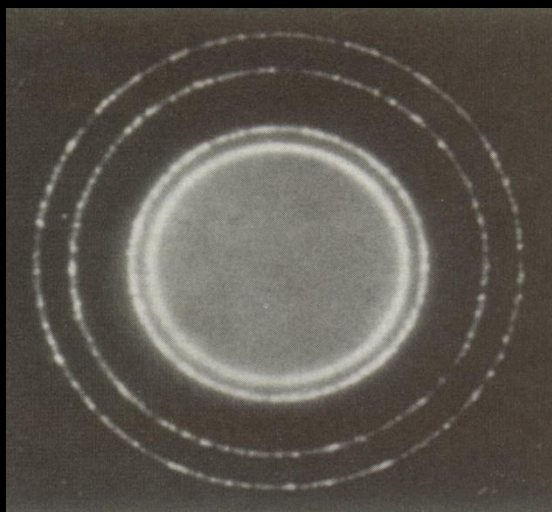
理论值与实验结果相差很小，表明电子确实具有波动性

2. 汤姆逊实验

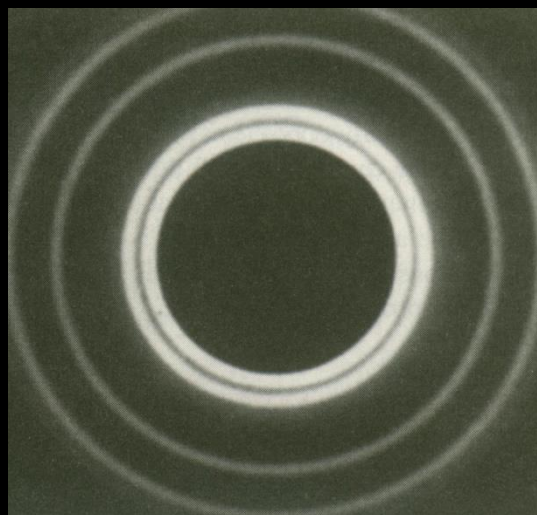
1927年，汤姆逊在实验中，让电子束通过薄金属层后射到照相底板上，结果发现，与X射线通过金箔时一样，也产生了清晰的电子衍射图样。



电子束



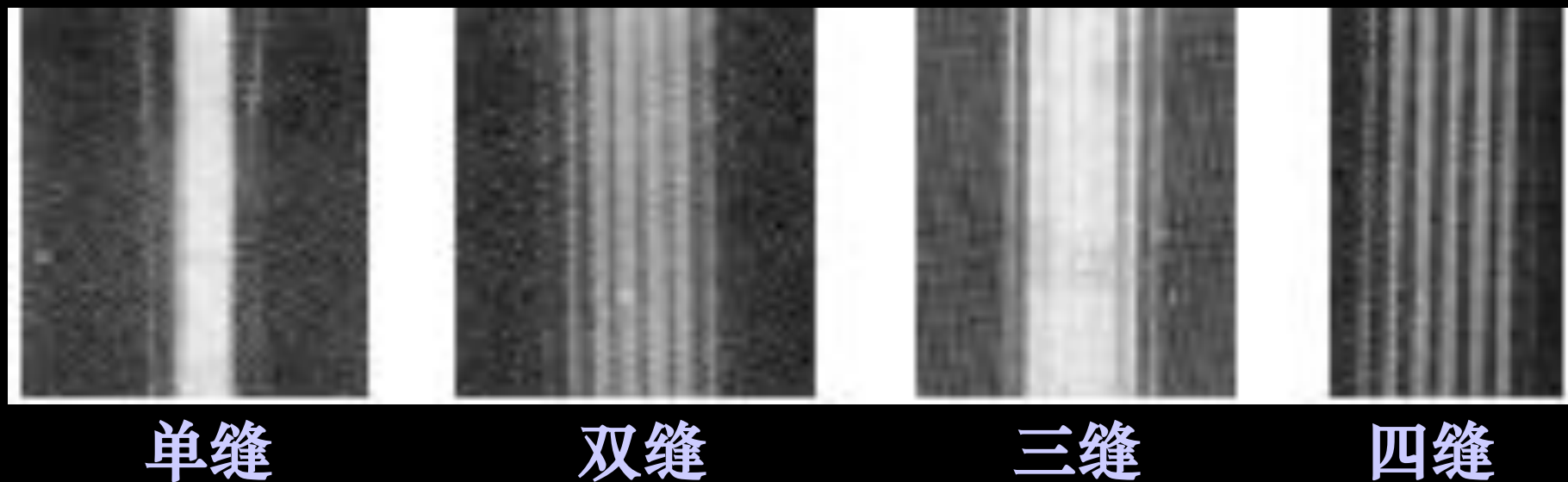
X射线



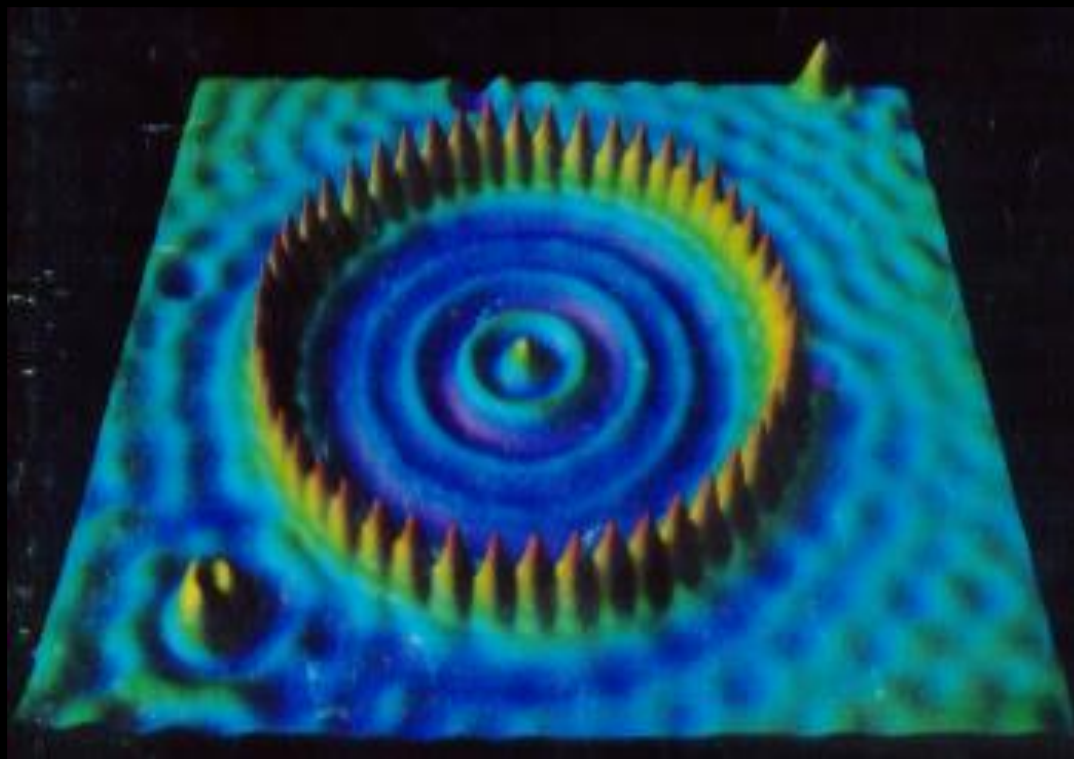
衍射图样 (波长相同)

3. 电子通过狭缝的衍射实验

1961年, Jonsson制成长度为50mm, 宽为0.3mm, 缝间距为 $1.0\mu\text{m}$ 的多缝。用50KV的加速电压加速电子, 使电子束分别通过单缝、双缝等, 均得到衍射图样。



1993年，Crommie等人用扫描隧道显微镜技术，把蒸发到铜(111)表面的铁原子排列成半径为7.13nm的圆形量子围栏，用实验观测到了在围栏内形成的同心圆状的驻波(“量子围栏”)，直观地证实了电子的波动性。



48个铁原子形成“量子围栏”，围栏中的电子形成驻波。

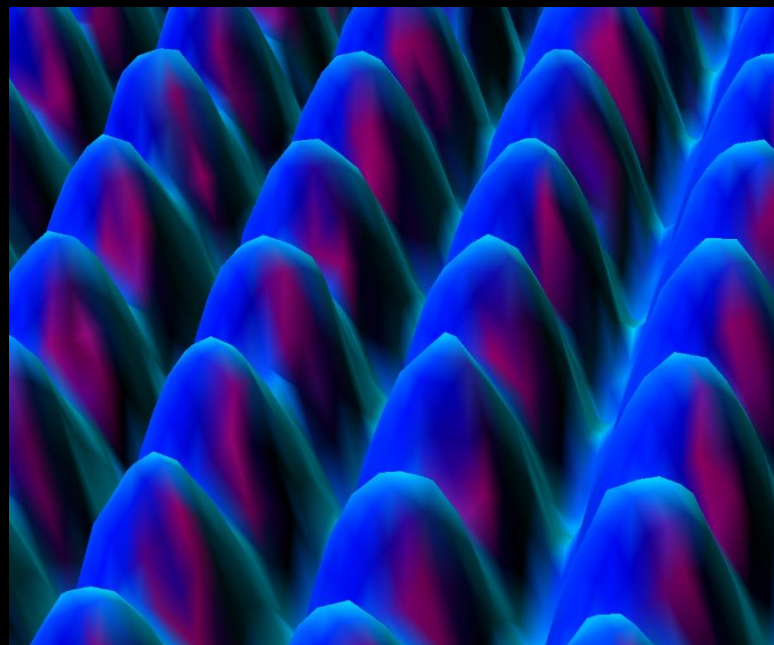
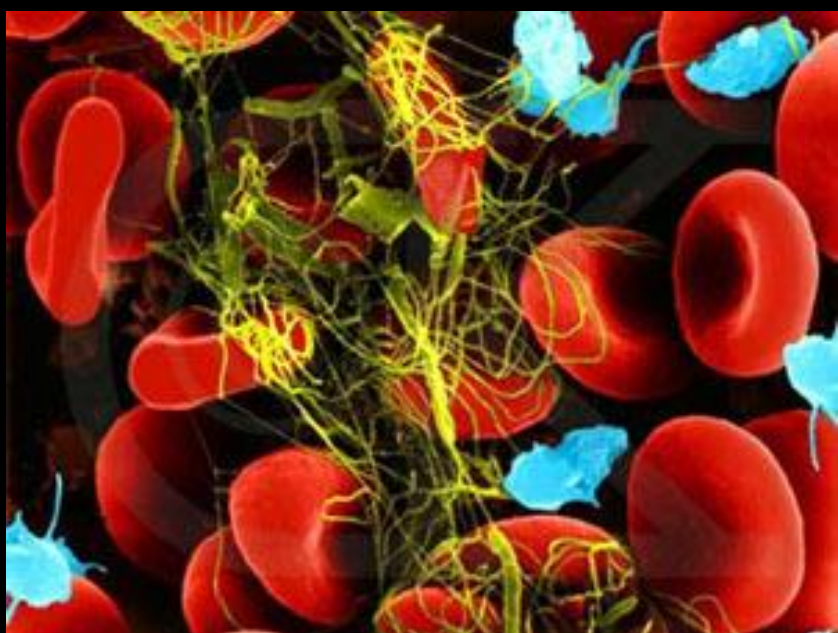
三. 物质波的应用举例

电子波波长 \ll **光波波长**

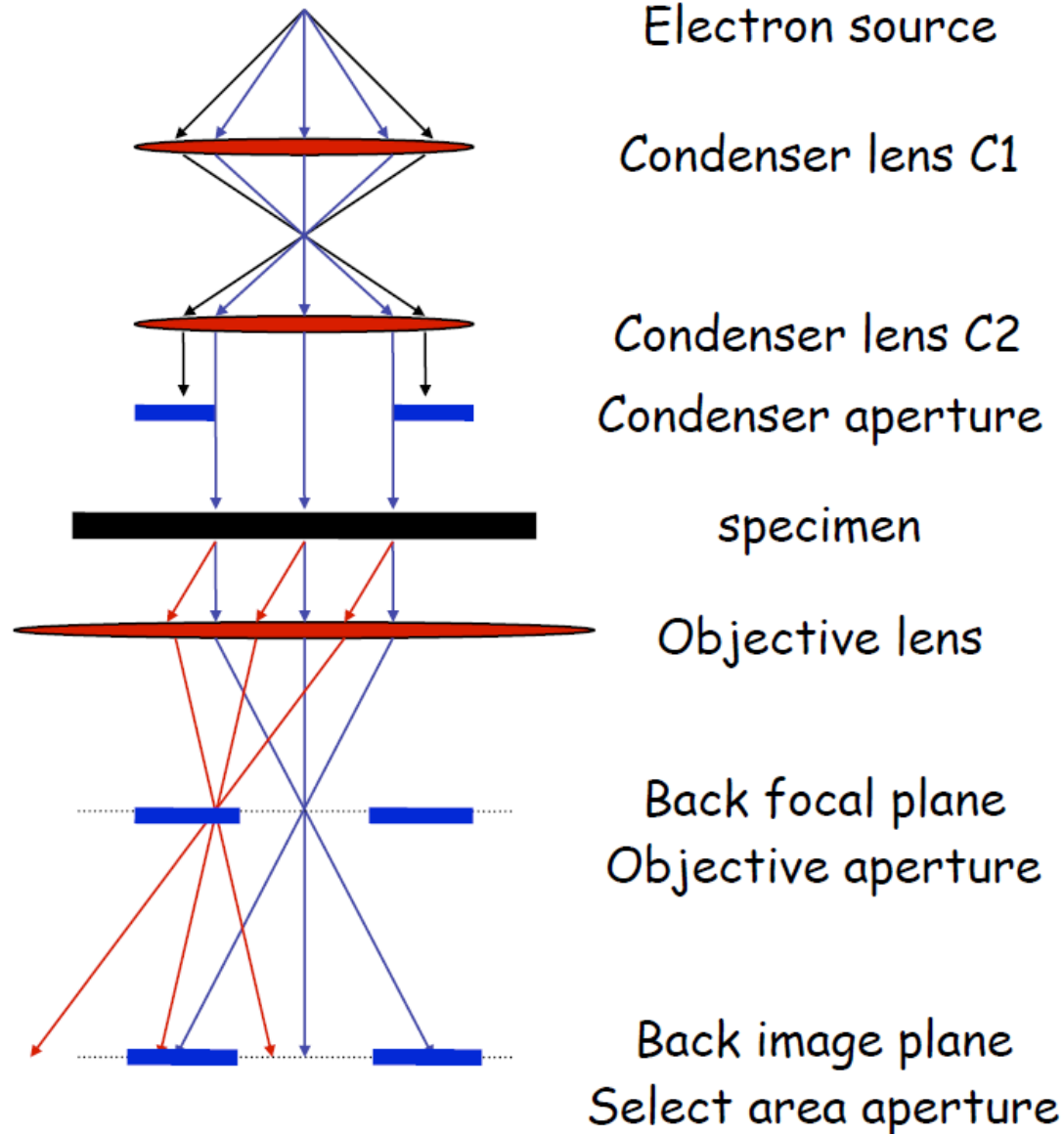
观测仪器的分辨本领 $\delta\varphi = \frac{1.22 \lambda}{D}$

电子显微镜分辨率 **远大于** 光学显微镜分辨率

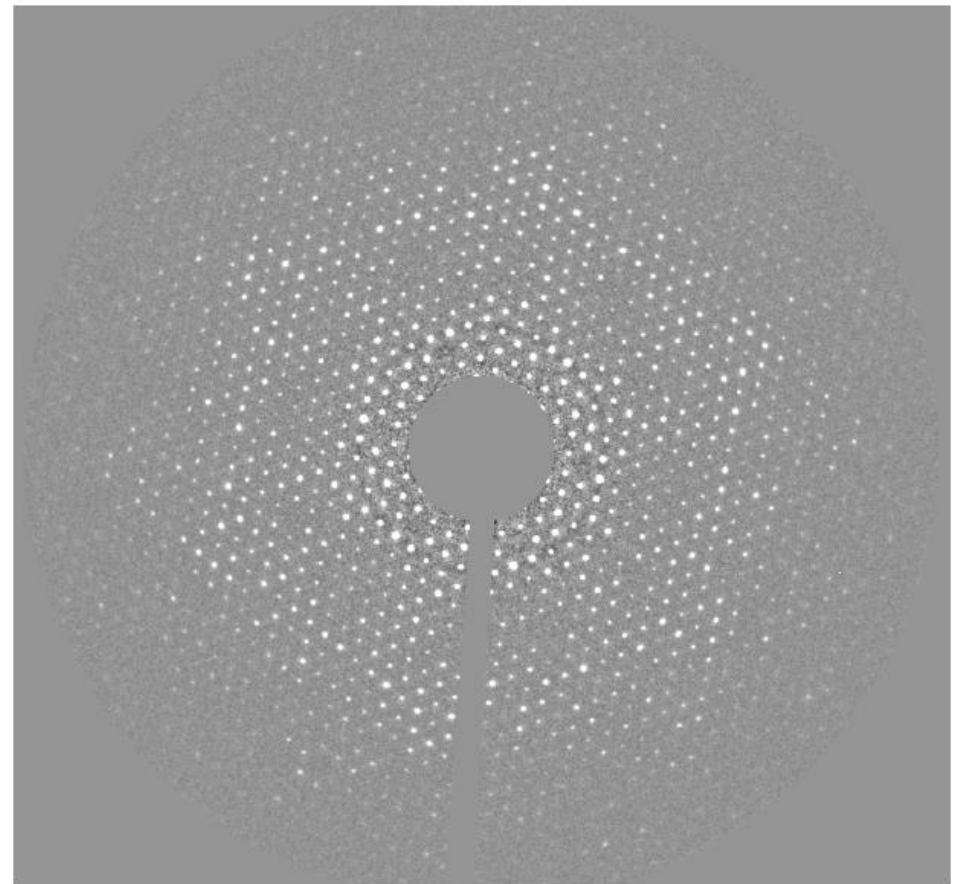
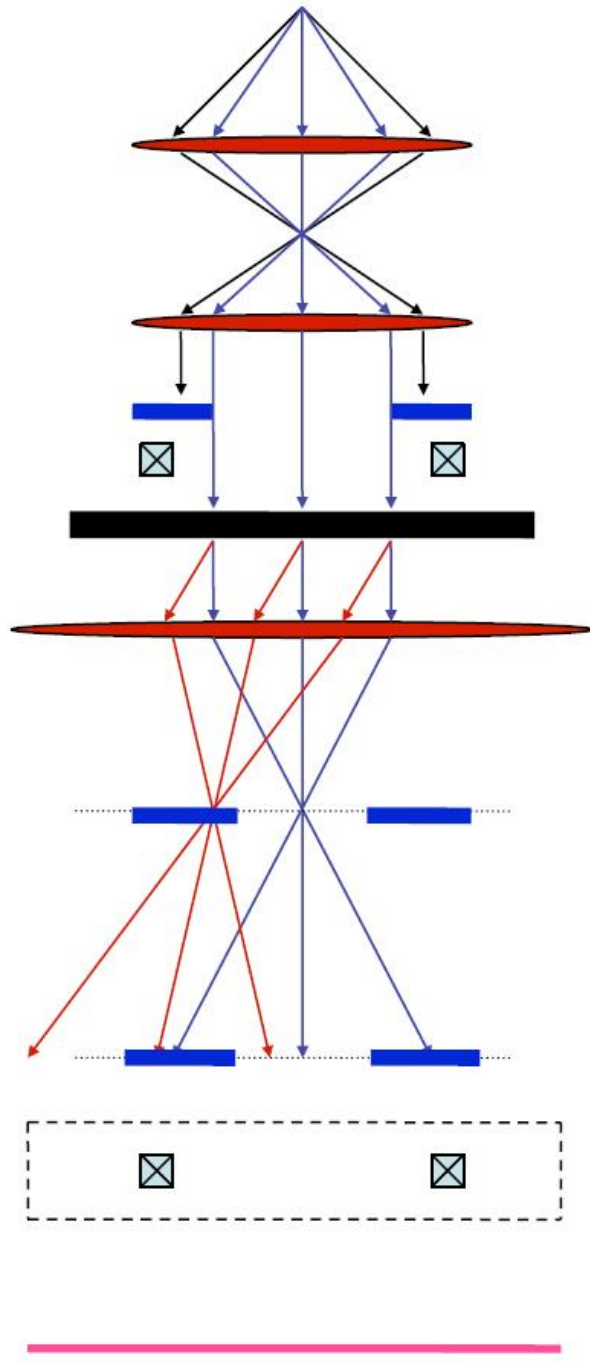
1932年，德国的鲁斯卡研制成功第一台电子显微镜



Optic system in an electron microscope



Diffraction mode



Diffraction mode

bacteriorhodopsin

Atomic resolution imaging with TEM

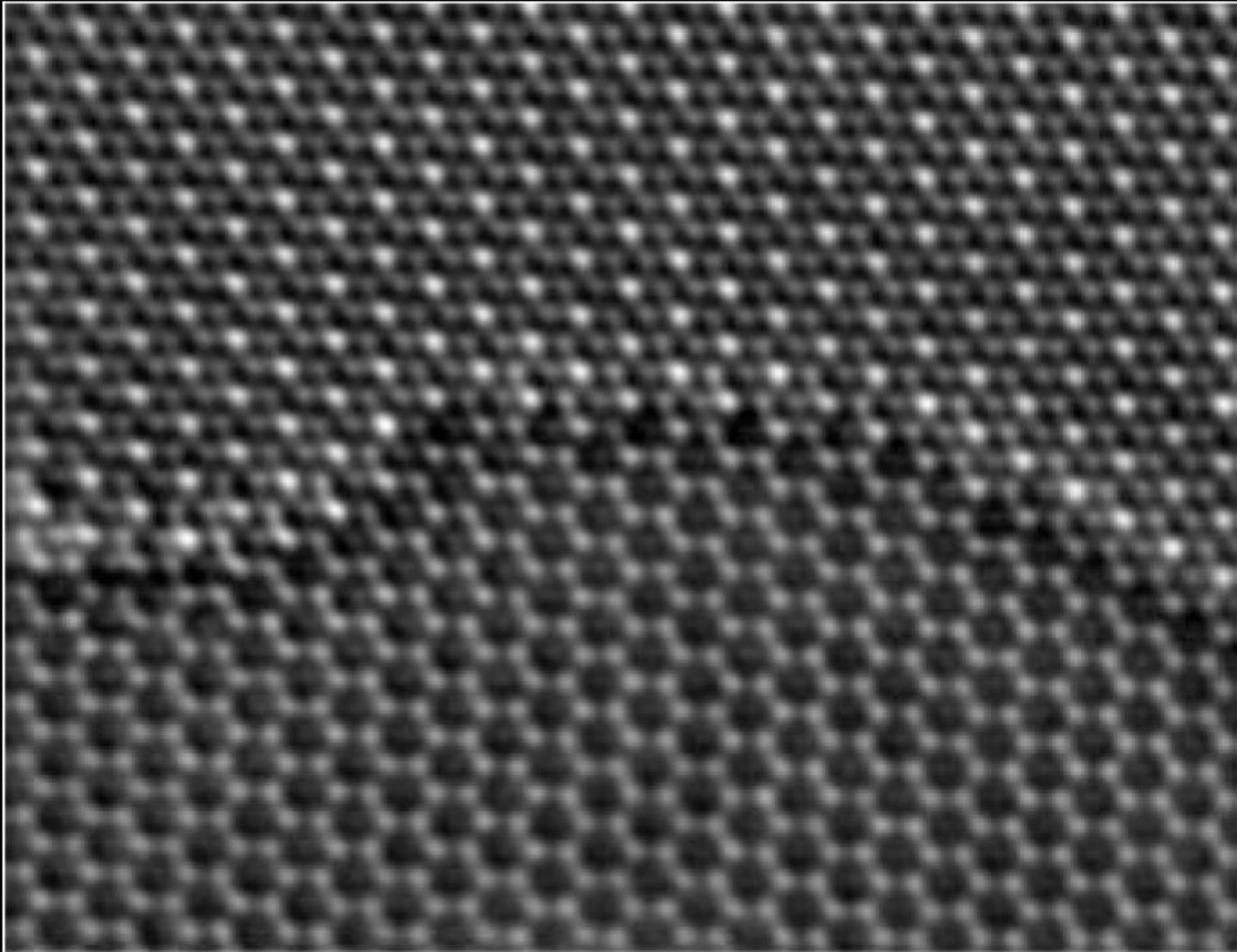
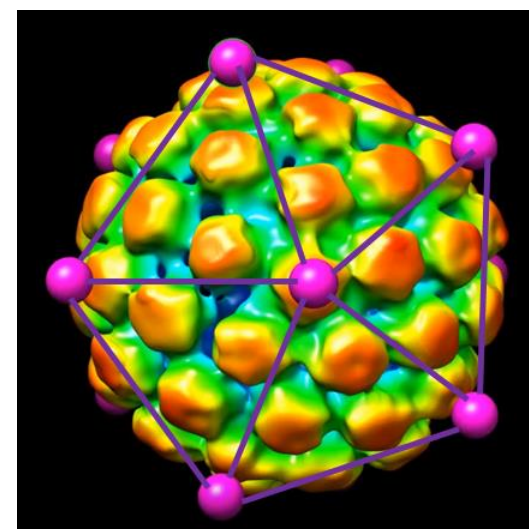
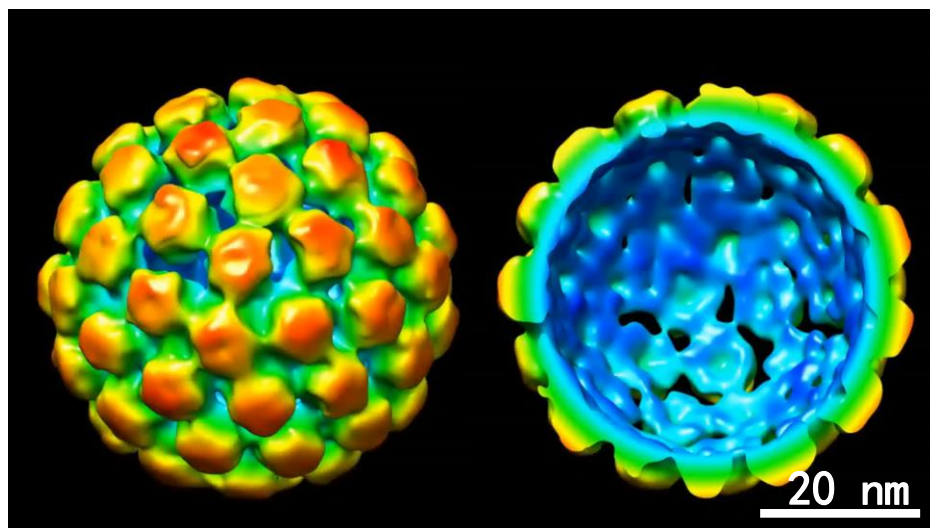
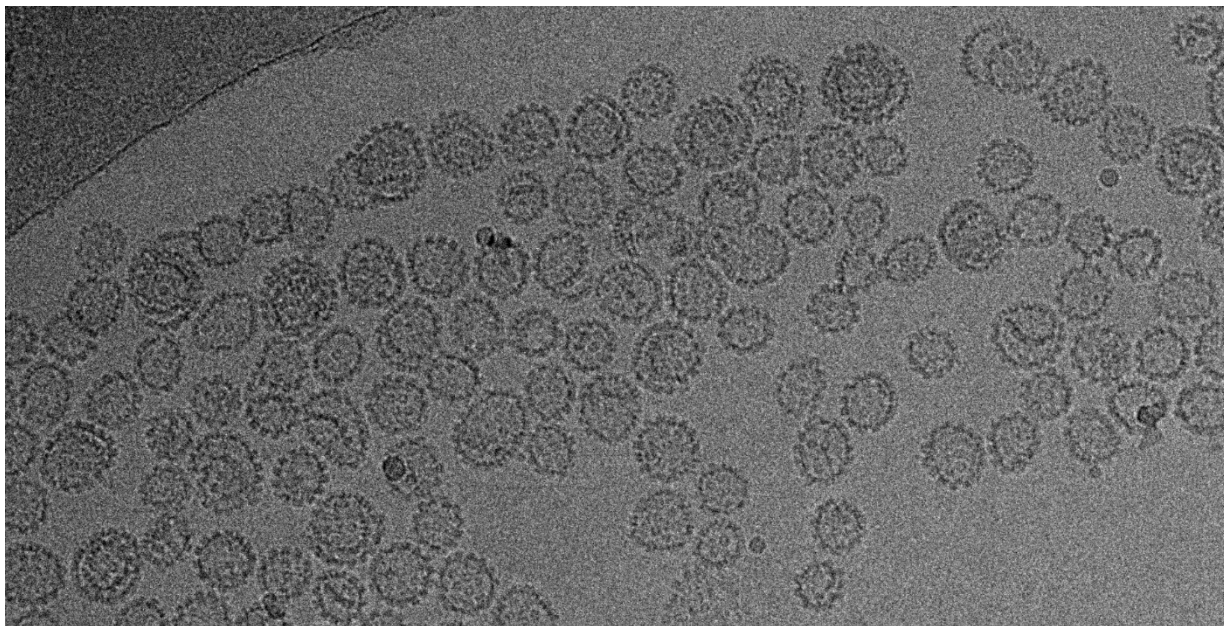


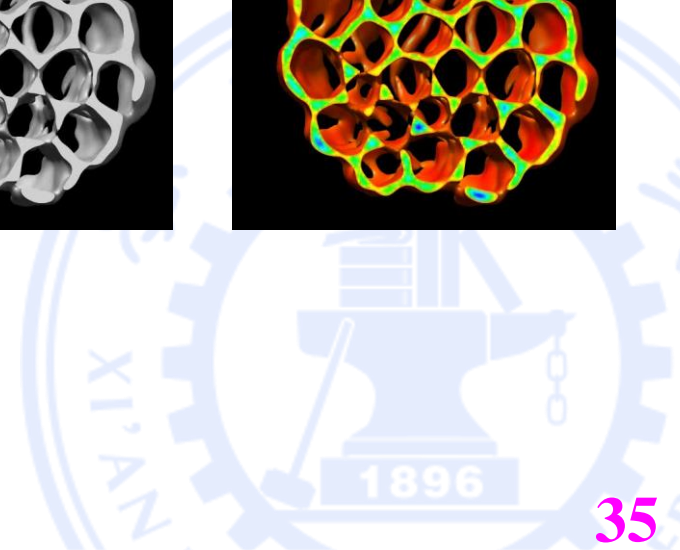
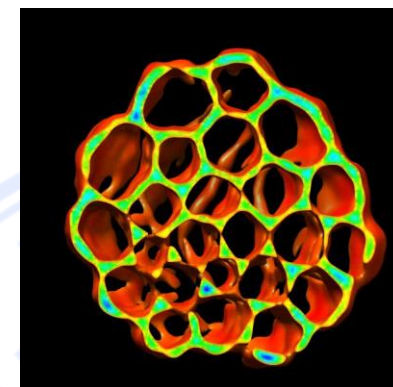
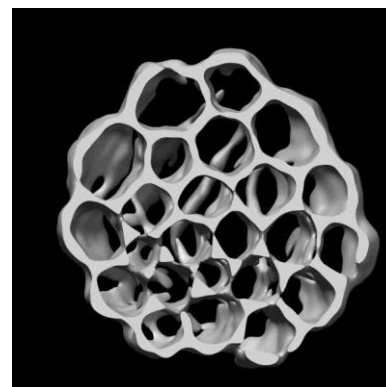
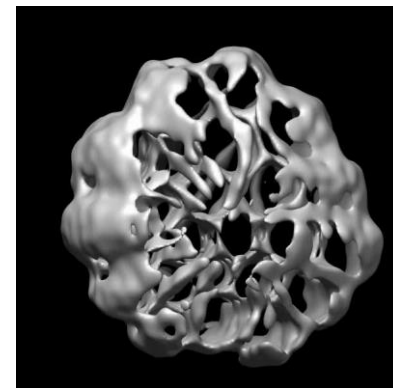
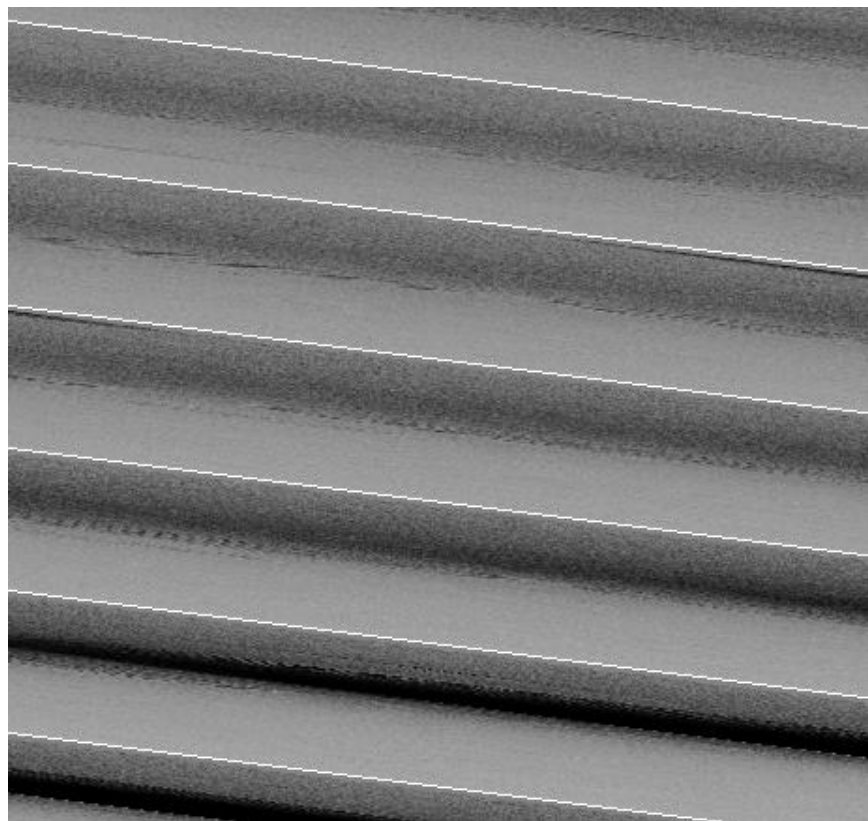
Image of graphene, Nature Mat, 2011, **10**, 165

Electron optic system of a modern electron microscope is of sufficient quality to image radiation resistant material (typically inorganic) at atomic resolution ($\sim 2\text{\AA}$ or better).



应用举例：病毒三维结构





怎样理解物质波（德布罗意波）？

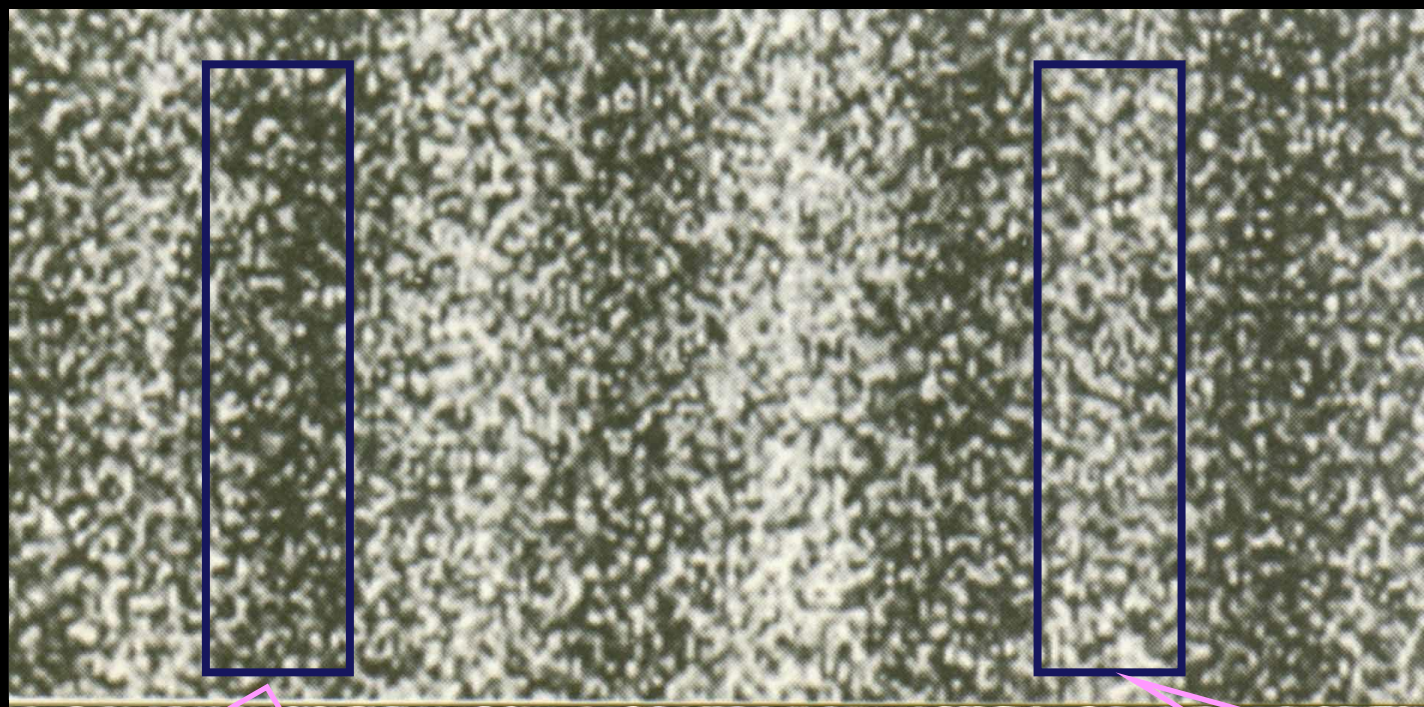
德布罗意：物质波是引导粒子运动的“导波”
——本质是什么，不明确

薛定谔：波是基本的，电子是“物质波包”
——夸大了波动性，抹煞了粒子性

- 通过电子衍射可以在空间不同方向上观测到波包的一部分：如果波代表实体，那就意味着能观测到电子的一部分，这与显示电子具有整体性的实验结果矛盾。
- 波包总要扩散，而电子是稳定的。

另一种理解：粒子是基本的，电子的物质波
是大量电子**相互作用**形成的。

为防止电子间发生作用，让电子一个一个地入射，发现时间足够长后的干涉图样和大量电子同时入射时完全相同。



电子双缝干涉图样

电子数少

电子数 $N=70000$

电子数多

电子的波动性并不是很多电子在空间聚集在一起时相互作用的结果，而是**单个电子本身就具有波动性**。
换言之，**干涉是电子“自己和自己”的干涉**。

无论是大量电子同时入射，还是电子一个一个地长时间地入射，都只是让单个电子干涉的效果在底片上积累并显现出来而已。

单个粒子在哪一处出现是**偶然事件**；

大量粒子的分布有确定的**统计规律**。

玻恩 (M.Born)：德布罗意波并不像经典波那样是代表实在物理量的波动，而是**描述粒子在空间的概率分布的“概率波”**。

对微观粒子波粒二象性的正确理解

粒子性

整体性

不是经典的粒子 没有“轨道”概念

波动性

“可叠加性”

有“干涉”、“衍射”、“偏振”现象

不是经典的波 不代表实在物理量的波动



微观粒子在某些条件下表现出粒子性，在另一些条件下表现出波动性，而两种性质虽寓于同一客体中，却不能同时表现出来。