

19世纪末物理学的三大发现

X射线、放射性和电子

称之为世纪之交的三大发现

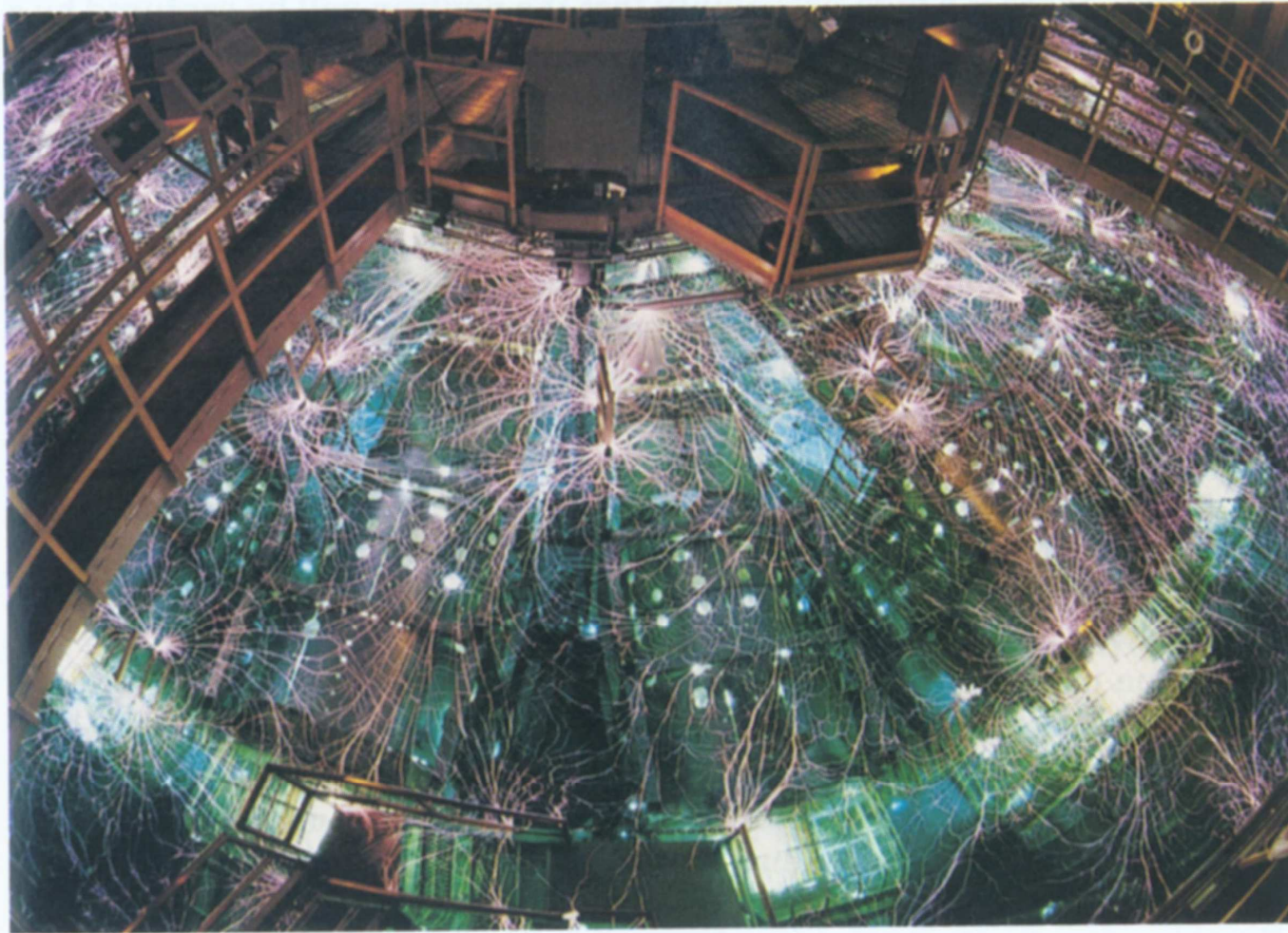
X射线的发现

1895年，伦琴在暗室做阴极散射管中气体放电的实验时，为了避免紫外线和可见光的影响，用黑纸板把阴极射线管包了起来。伦琴发现，在一段距离之外的荧光屏上竟发出了微弱的荧光。进一步的实验表明，激发这种荧光的是一种具有很强穿透性的新射线，称为X射线。



Wilhelm Konrad Röntgen (1845–1923). As a result of his discovery of X-rays in 1895, Röntgen became the instant hero of his age and the first winner of the Nobel Prize in Physics.

X射线源



Electrical discharge visible in the pulse-forming section of the Particle Beam Fusion Accelerator II, the nation's most powerful x-ray source, at Sandia National Laboratories. The discharges are due to air breakdown during firing at the surface of the water that covers this section. High-energy electrons are converted to x-rays at the center of the machine, which in turn are used to understand their effect on weapon systems and other components. (Courtesy of Sandia National Laboratories. Photo by Walter Dickenman)

放射性的发现

1896年，贝克勒尔从铀盐中发现了天然放射性，后来发现它由 α ， β 和 γ 三种射线组成。
1898年，居里夫妇发现了放射性元素钋与镭。

α 射线：氦离子流

β 放射：电子流

γ 射线：波长小于0.1纳米的电磁波，是比X射线能量还高的一种辐射。

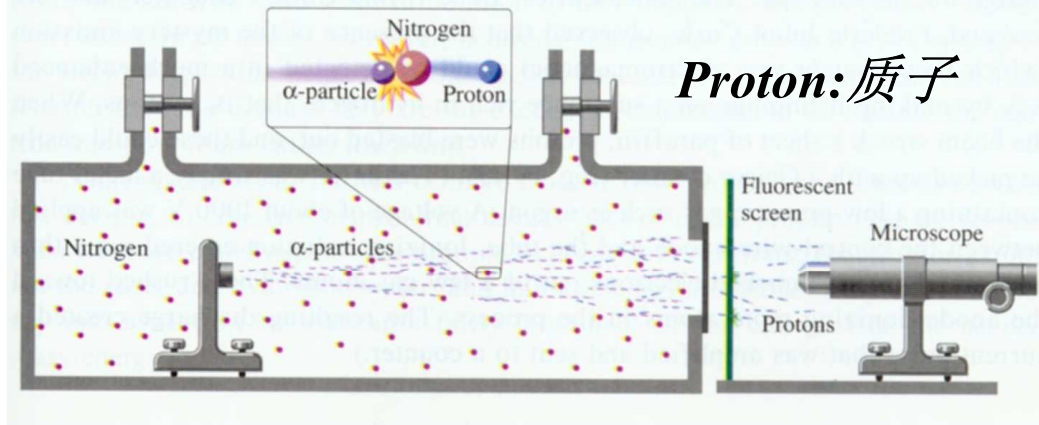
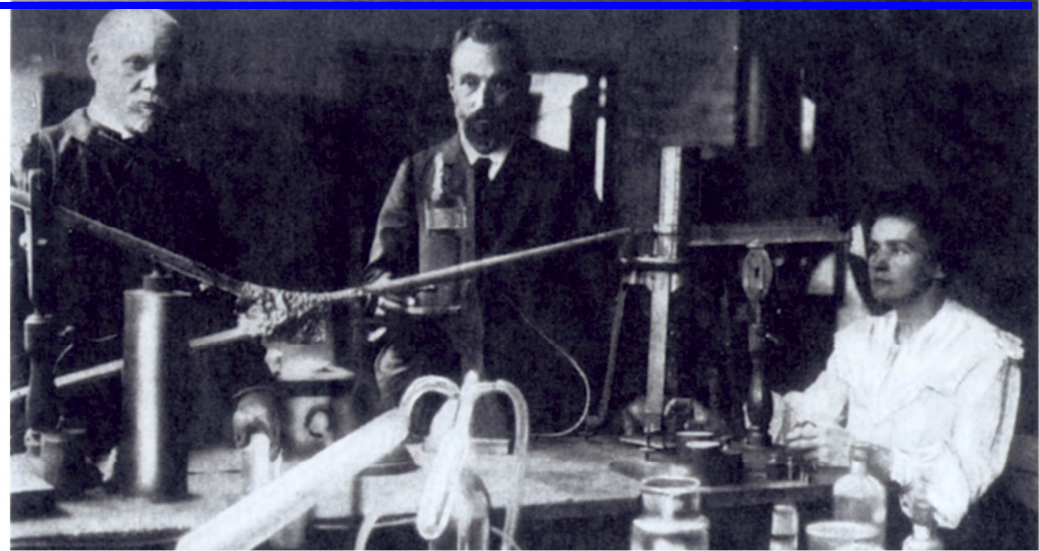
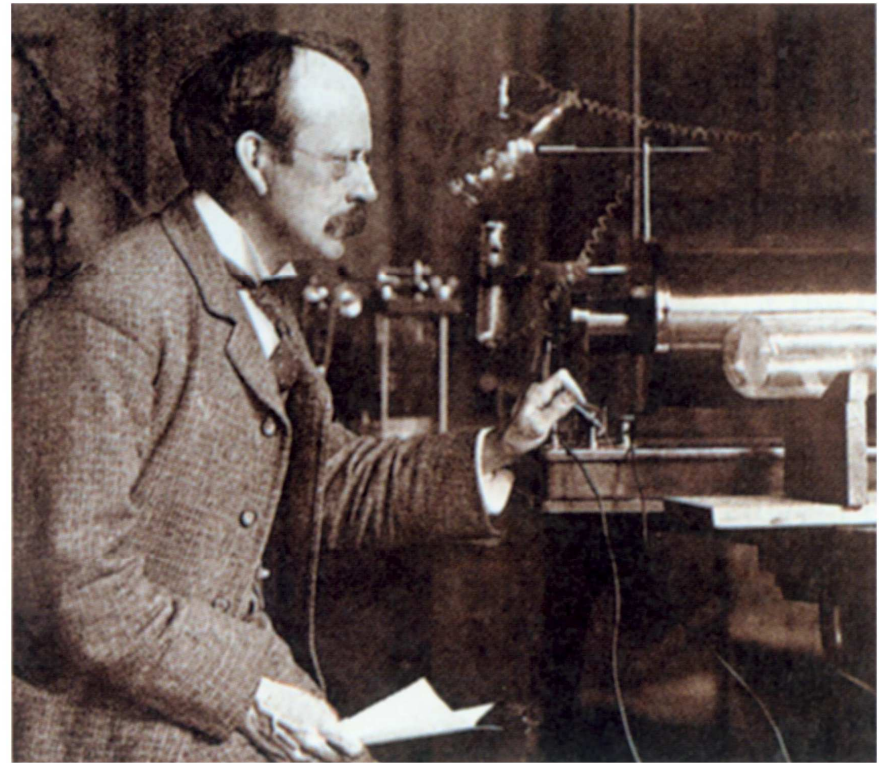


Figure 29.18 Alpha particles crashing into nitrogen atoms liberate protons, which strike the fluorescent screen, causing flashes that can be seen with a microscope. The chamber is sealed with a thin foil that will pass protons but not alpha particles.

电子的发现

1897年，J.J. 汤姆孙从实验上确认了电子的存在。他在测定电子荷质比后不到两年，分别测定了电子的电荷和质量。1910年，密立根用油滴实验精确地测定了电子电荷。



J. J. Thomson at the Cavendish Laboratory.

1901年诺贝尔物理学奖



——X射线的发现

伦琴

Willhelm Konrad Rotgen

1901年，首届诺贝尔物理学奖授予德国物理学家伦琴以表彰他在1895年发现的X射线。



Willhelm Konrad Rotgen
1845---1923

1903年诺贝尔物理学奖



——放射性的发现和研究

一半授予法国物理学家贝克勒尔, 以表彰他发现了自发放射性; 另一半授予法国物理学家居里夫妇, 以表彰他们对辐射现象所作的卓越贡献。



Antoine Henri Becquerel
1852 - 1908



Pierre Curie
1859 - 1906



Marie Skłodowska
1867 - 1934

1906年诺贝尔物理学奖



——气体导电

1906年诺贝尔物理学奖授予英国剑桥大学的J. J. 汤姆孙爵士以表彰他对气体导电的理论和实验所作的贡献。

最重要的结果是发现了电子，这是继X射线和放射性之后又一重大的发现。



Sir Joseph Thomson
1856-1940

(2) 原子的核式结构

- **汤姆孙的原子模型：**

原子是一个含有正负电荷分布的实心球体。

- **原子有核模型或原子核式结构
(1911年，卢瑟福)**

**原子中带正电的部分集中在很小的区域
($< 10^{-14}$ m)中，原子质量主要集中在带正电的
部分，形成原子核，而电子则围绕着它运动。**

原子结构经典理论的困难

- 任何作加速运动的带电粒子都要发射电磁波；
- 电子围绕原子核作旋转运动，作曲线运动的电子都具有加速度，电子将不断地辐射能量而减速，其运动轨道的半径会不断缩小，最后将掉到原子核上去，原子随之坍缩。但是，现实世界中的大量原子却稳定地存在着；
- 原子光谱应该是连续光谱。

卢瑟福(E. Rutherford)散射实验

- 1908年, 盖革(H.Geiger)和马斯登(E.Marsden)
- 1911年, 卢瑟福发表理论推算结果。

证明: 只有原子内的正电荷集中在比原子直径小得多的范围内, 才会发生大角度散射。

- 1913年, 盖革和马斯顿在卢瑟福的指导下作了进一步的实验, 证明了卢瑟福原子模型的正确性。

α 粒子 (He离子)



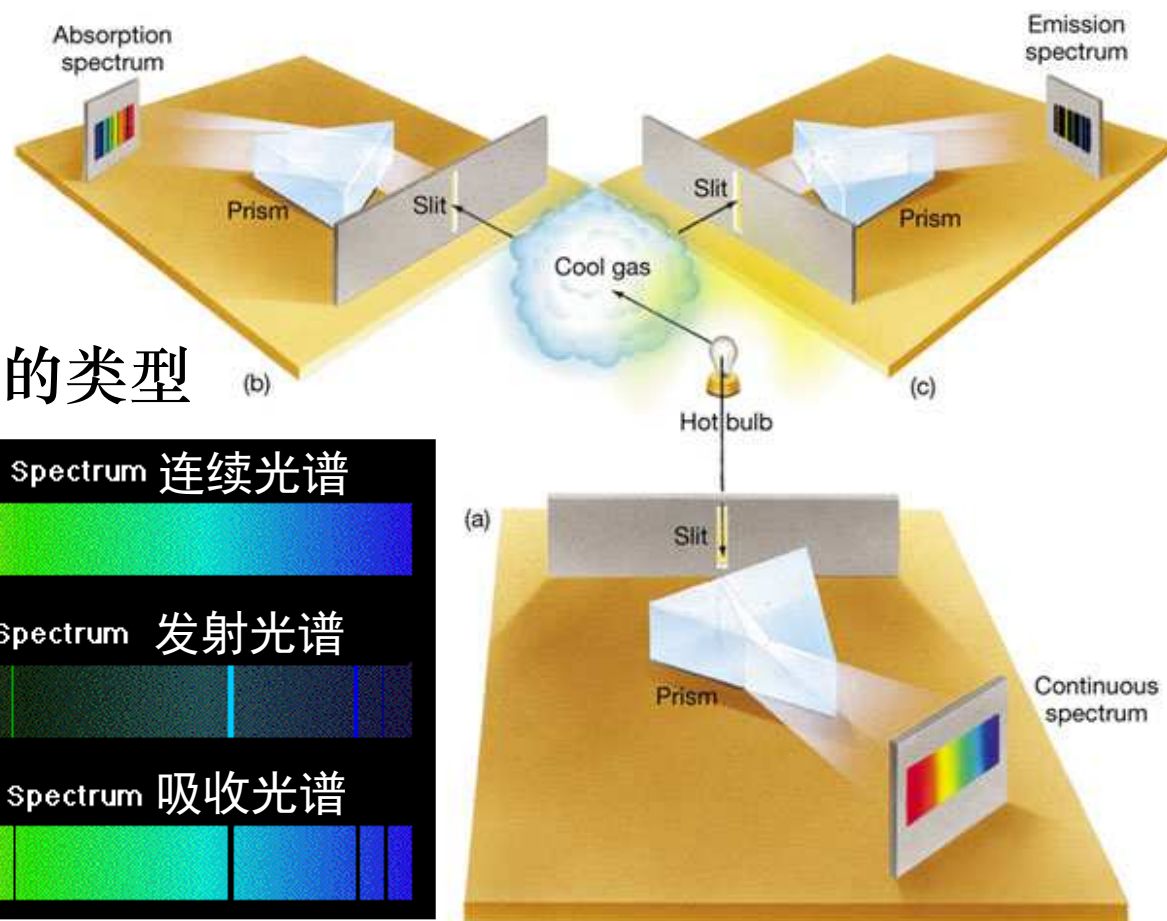
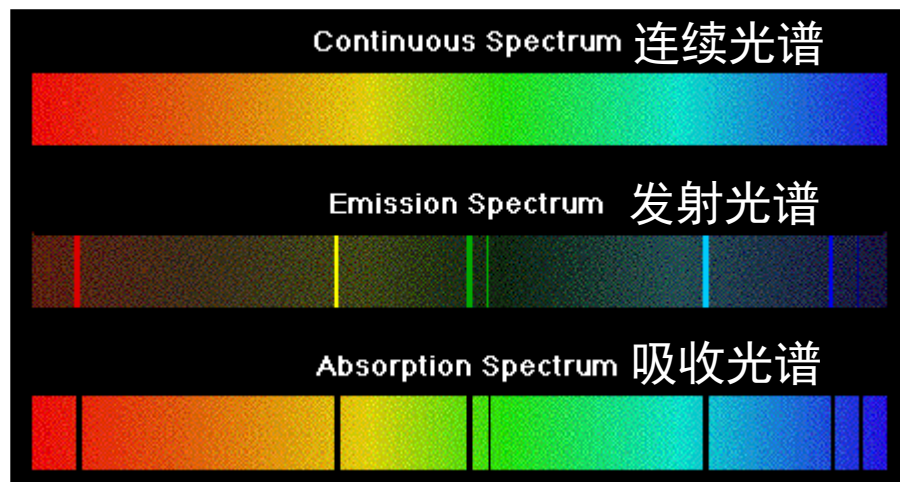
金箔 (400nm厚)

约1/8000的粒子
散射角度 > 90度
(背散射)

如何解释?

6-3 玻尔的氢原子理论

原子光谱的类型



一、氢原子光谱的实验规律



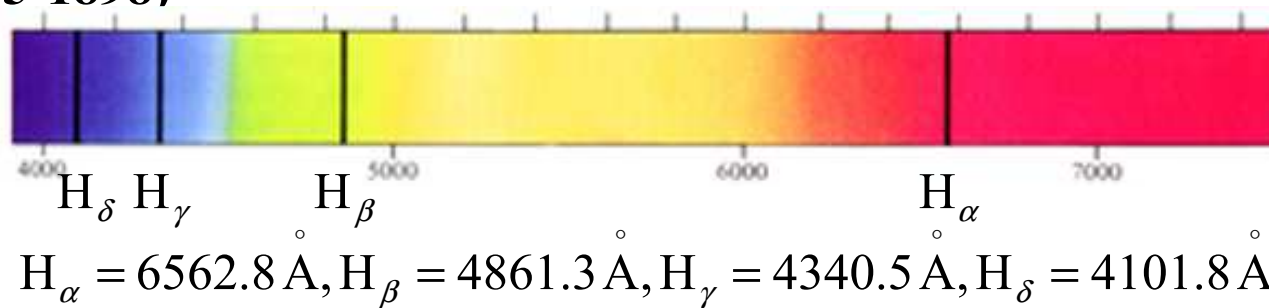
Johann Jacob Balmer
(1825-1898)

1885年，瑞士的中学数学教师巴耳末发现氢原子光谱前四条谱线的波长可归纳成一个简单的公式

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

---巴尔末公式

为光谱线的理论奠定了坚实的基础



巴耳末公式

谱线是线状分立的

巴耳末公式

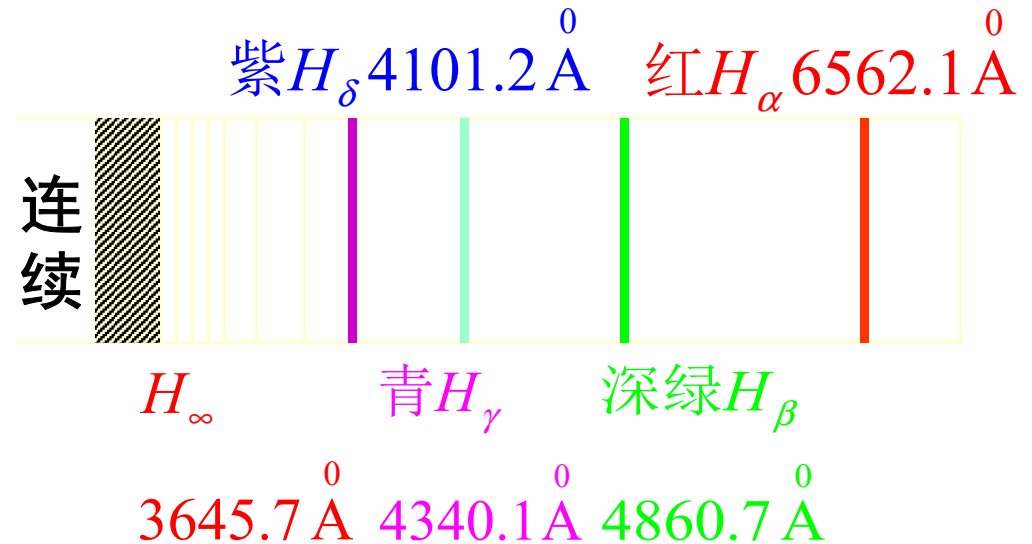
$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

$$B = 3645.7 \text{ \AA}$$

$$n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

光谱公式 $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$

$R = 4/B$ 里德伯常数 $1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$



广义巴耳末公式

赖曼系: $\tilde{\nu} = R(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2})$ $n = 2, 3, 4, \dots$ 在紫外区

帕邢系: $\tilde{\nu} = R(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2})$ $n = 4, 5, 6, \dots$ 在近红外区

布喇开系: $\tilde{\nu} = R(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2})$ $n = 5, 6, 7, \dots$ 在红外区

普芳德系: $\tilde{\nu} = R(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2})$ $n = 6, 7, 8, \dots$ 在红外区

广义巴耳末公式

$$\tilde{\nu} = R(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2}) \quad \text{其中} \begin{cases} k = 1, 2, 3, \dots \\ n = k + 1, k + 2, k + 3, \dots \end{cases}$$

$$\tilde{\nu} = T(k) - T(n)$$

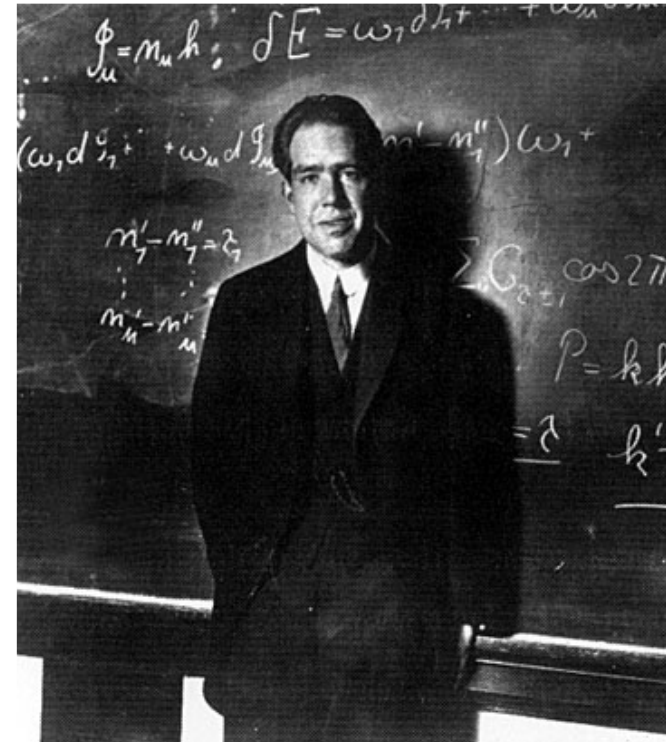
$$T(k) = \frac{R}{k^2}, T(n) = \frac{R}{n^2} \text{ 称为光谱项}$$

二、玻尔氢原子理论

原子的核式结构的缺陷：

- 无法解释原子的稳定性
- 无法解释原子光谱的不连续性

玻尔1913年在原子的有核模型的基础上，提出一个解释氢原子光谱的玻尔模型。



Niels Bohr (1885-1962)

The opposite of a correct statement is a false statement. But the opposite of a profound truth might be another profound truth.

Niels Bohr

玻尔原子理论的三个基本假设

1、定态假设

原子系统存在一系列不连续的能量状态，处于这些状态的原子中电子只能在一定的轨道上绕核作圆周运动，但不辐射能量。这些状态称为稳定状态，简称定态。

对应的能量 $E_1, E_2, E_3 \dots$ 是不连续的。

2、频率假设

原子从一较大能量 E_n 的定态向另一较低能量 E_k 的定态跃迁时，辐射一个光子

$$h\nu = E_n - E_k \quad \text{跃迁频率条件}$$

原子从较低能量 E_k 的定态向较大能量 E_n 的定态跃迁时，吸收一个光子。

3、轨道角动量量子化假设

$$L = n \frac{h}{2\pi} \quad \text{轨道量子化条件, } n \text{ 为正整数, 称为量子数}$$

波的共振

For a hydrogen atom:

Electron wave resonance

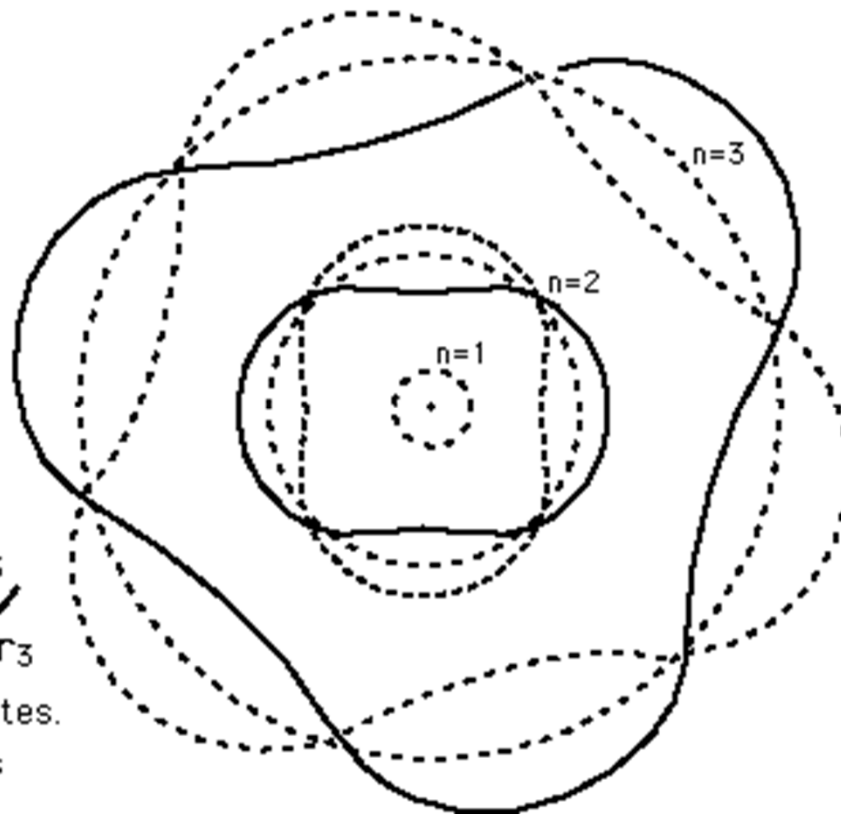
$\lambda_{n=1} = 2\pi r_1 = 6.28 a_0$

$\lambda_{n=2} = 12.57 a_0$
 $2\lambda_2 = 2\pi r_2$

$\lambda_{n=3} = 18.85 a_0$
 $3\lambda_3 = 2\pi r_3$

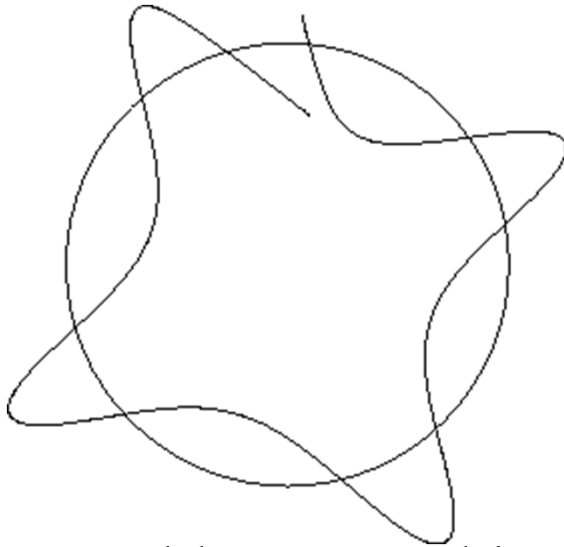
Wavelengths for hydrogen states.

$a_0 = 0.529 \text{ \AA} = \text{Bohr radius}$



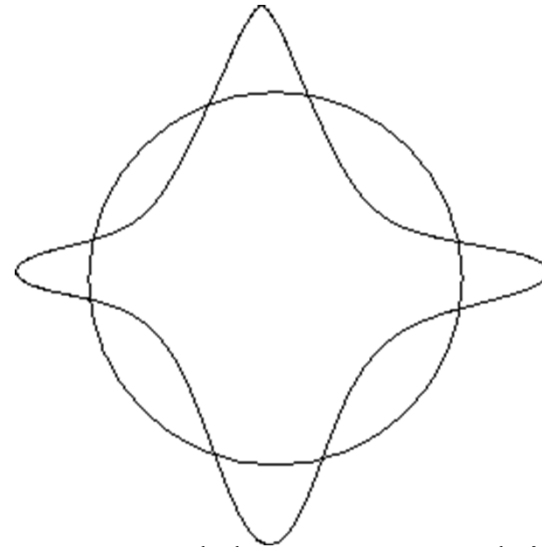
Wavelengths for Different States

驻波



An unstable wave orbit

For this configuration, when one starts the wave at a given point, one ends up after one complete revolution at a different point on the wave. The incoming wave will then be out of phase with the original wave, and destructive interference will occur.

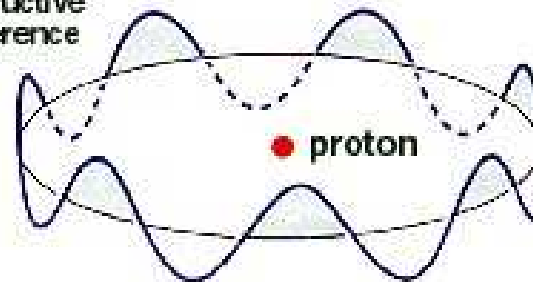


A stable wave orbit

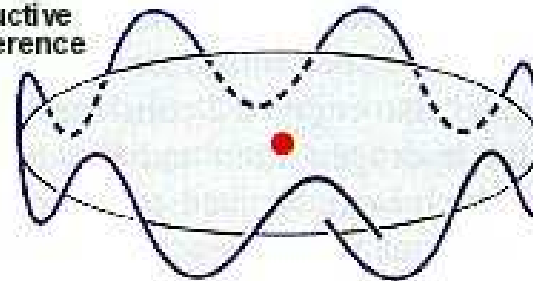
In this case, the wave ends up in phase with the original wave after one complete revolution, and constructive interference results. Such a pattern would result in a stable orbit. This type of wave is called a standing wave, and are common in other contexts.

相长干涉

Constructive
interference



Destructive
interference



玻尔量子论的核心思想

- ① 原子具有离散能量的定态的概念,
- ② 两个定态间的量子跃迁的概念及频率条件。



Figure 14 Wolfgang Pauli (left) and Niels Bohr watching a “tippy top,” a top that spins for a while on one end and then turns upside down. They are waiting for the “spin flip.”

基本假设应用于氢原子

(1) 轨道半径量子化

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_n^2} = m \frac{v^2}{r_n} \qquad L = mvr_n = n \frac{h}{2\pi}$$

$$r_n = n^2 \left(\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \right)$$

第一玻尔轨道半径 $r_1 = \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} = 0.53 \text{ \AA}$

基本假设应用于氢原子 (续)

(2) 能量量子化和原子能级

$$E_n = \frac{1}{2}mv_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad r_n = n^2 \left(\frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m e^2} \right)$$

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \left(\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \right) \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

基态能级

$$E_1 = -13.58 \text{ eV}$$

激发态能级

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.58}{n^2} \text{ eV}$$

氢原子的电离能

$$E_{\text{电离}} = E_{\infty} - E_1 = 13.58 \text{ eV}$$

基本假设应用于氢原子 (续)

(3) 氢原子光谱

氢原子发光机制是能级间的跃迁

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

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{E_n - E_k}{hc} = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

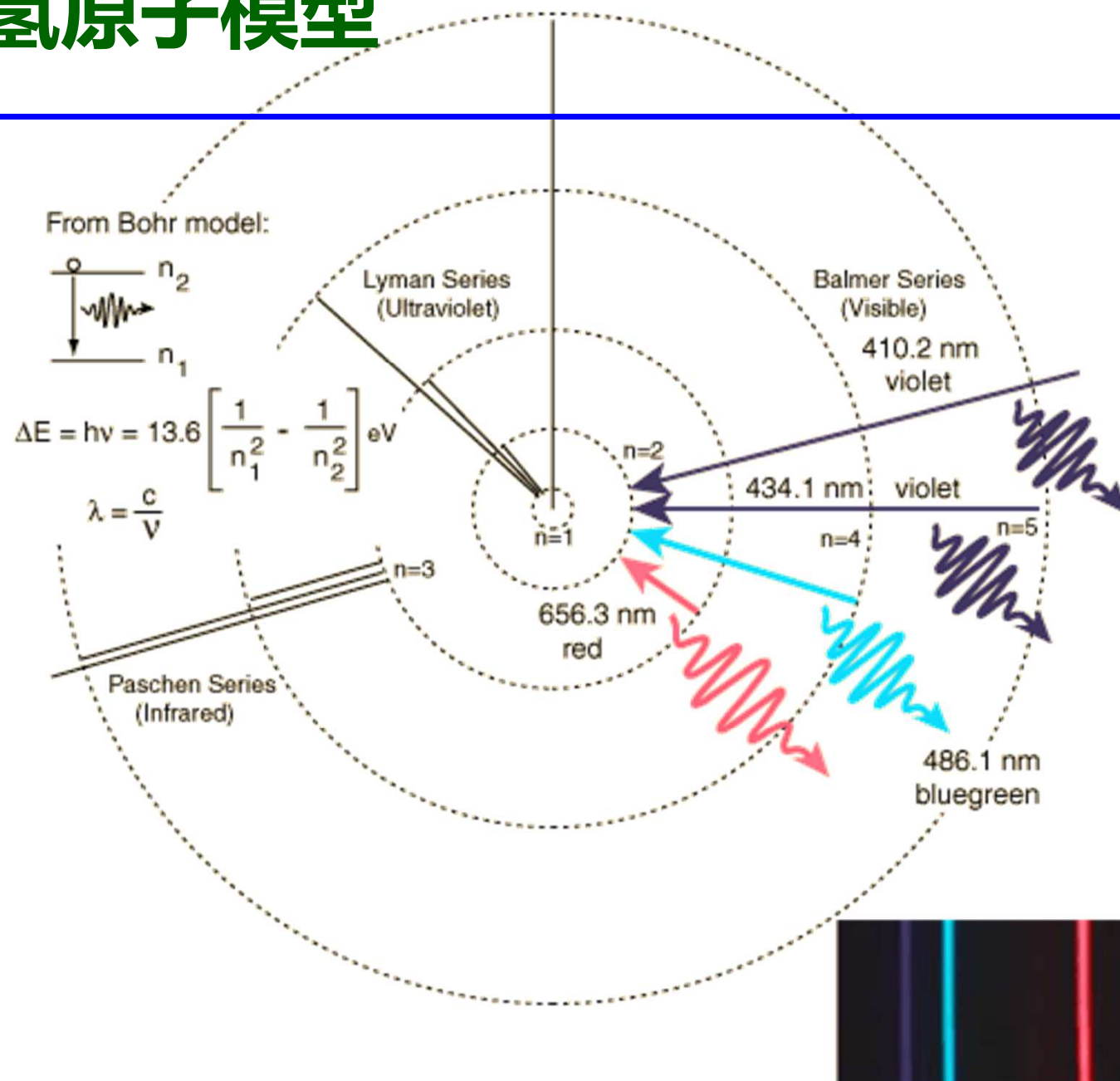
$$E_n = -\frac{Rch}{n^2}$$

$R_{\text{理论}}$ —里德伯常数

$$1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$R_{\text{实验}} = 1.096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

玻尔的氢原子模型

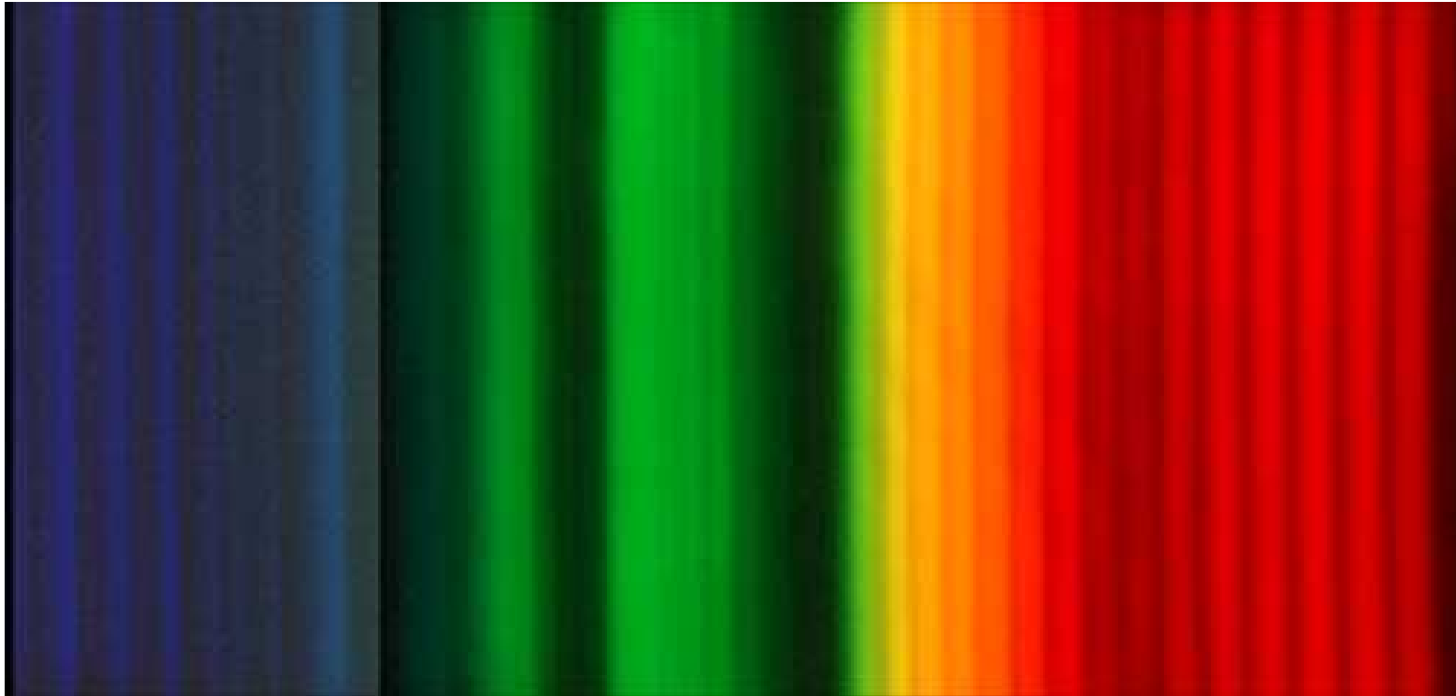


原子光谱 Atomic Spectra

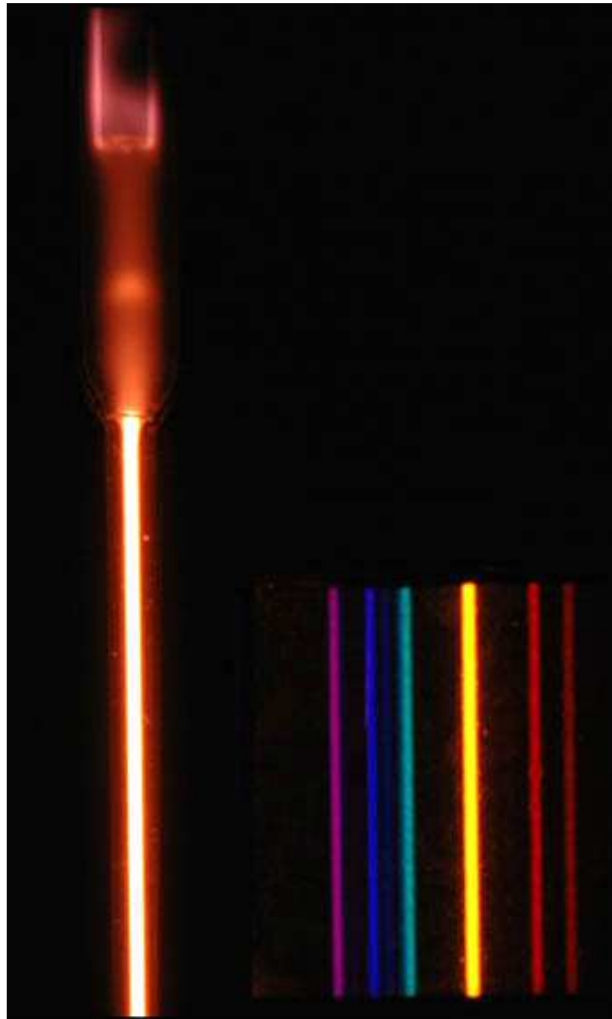


At left is a hydrogen spectral tube excited by a 5000 volt transformer. The three prominent hydrogen lines are shown at the right of the image through a 600 lines/mm diffraction grating.

氮原子光谱 Nitrogen spectrum



氦原子光谱 Helium spectrum



wavelengths (nm)

438.793 w

443.755 w

447.148 s

471.314 m

492.193 m

501.567 s

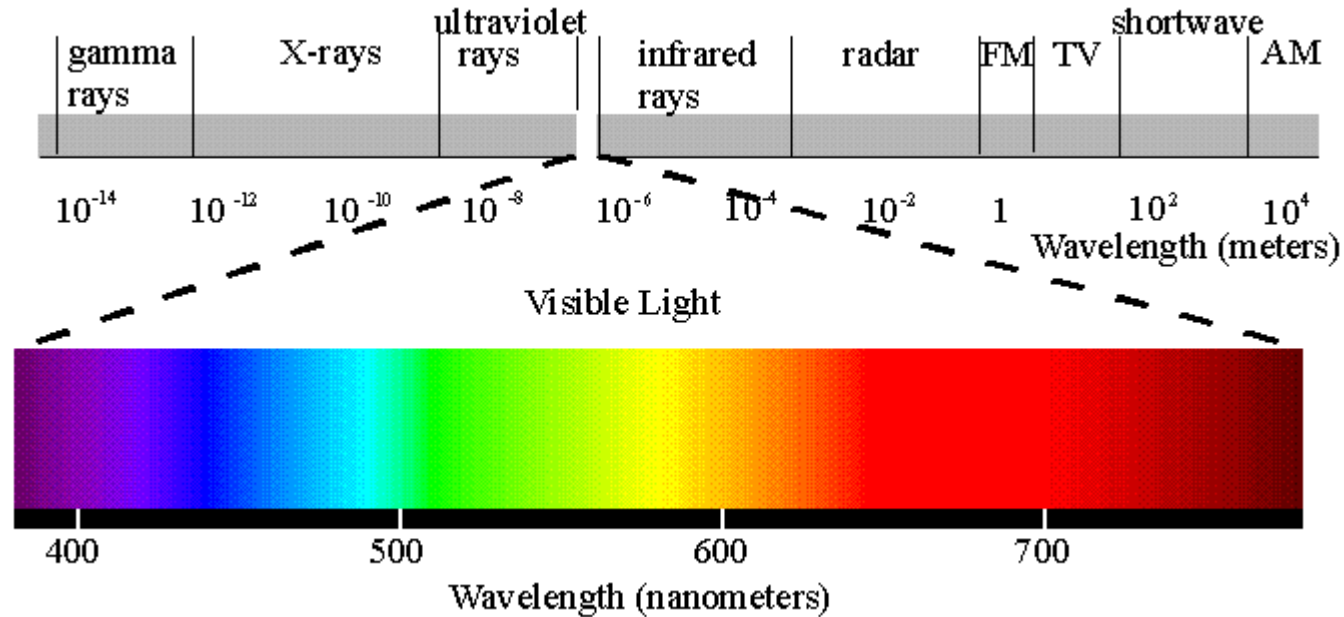
504.774 w

587.562 s

667.815 m

s=strong, m=med, w=weak

光谱



A rough classification of some of the types of radiation by wavelength is:

Infrared > 750 nm

Visible 400 - 750 nm

Ultraviolet 10-400 nm

X rays < 10 nm

可见光谱

An approximate classification of spectral colors



Violet (380-435nm)

Blue(435-500 nm)

Cyan (500-520 nm)

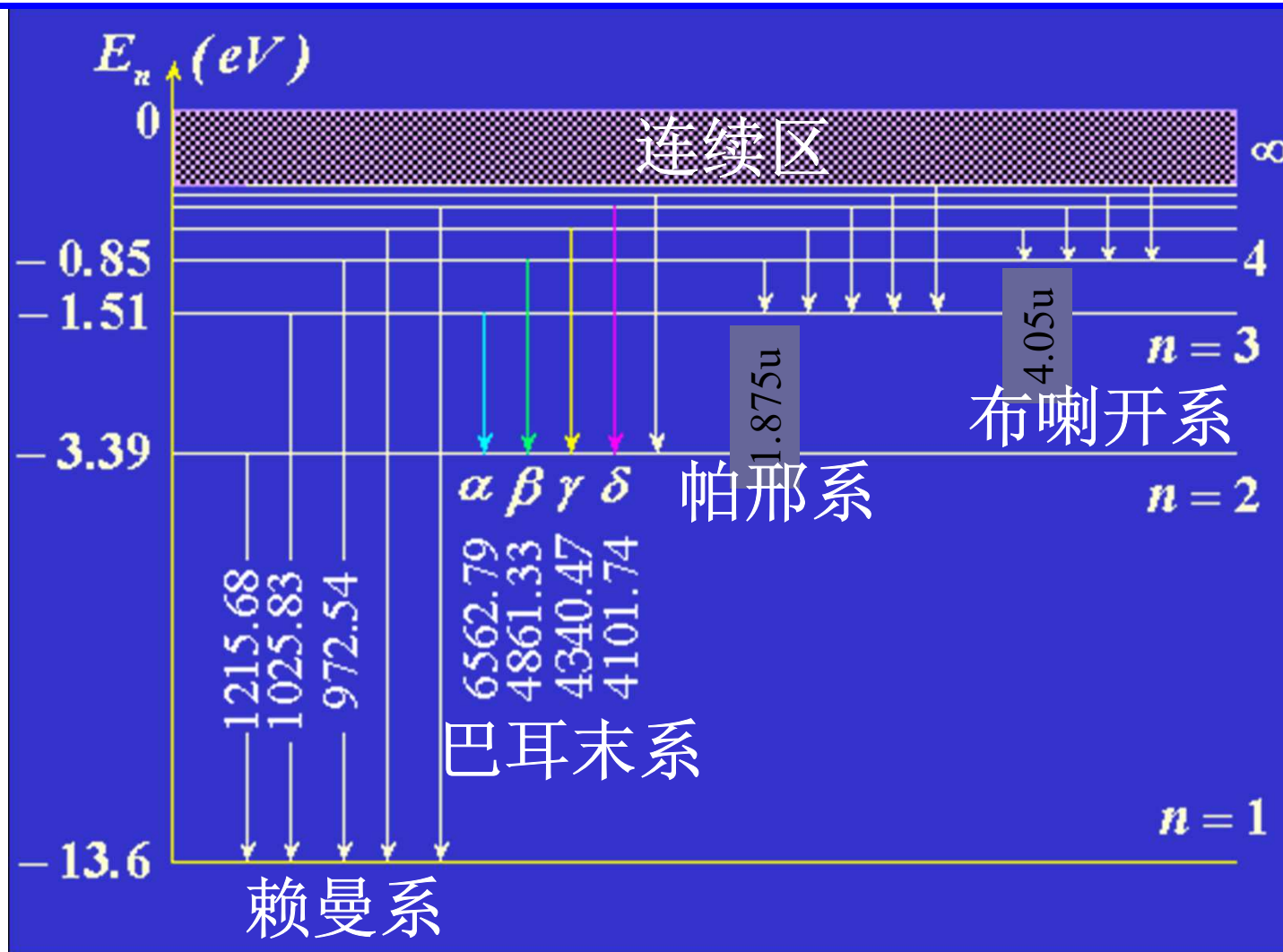
Green (520-565 nm)

Yellow (565- 590 nm)

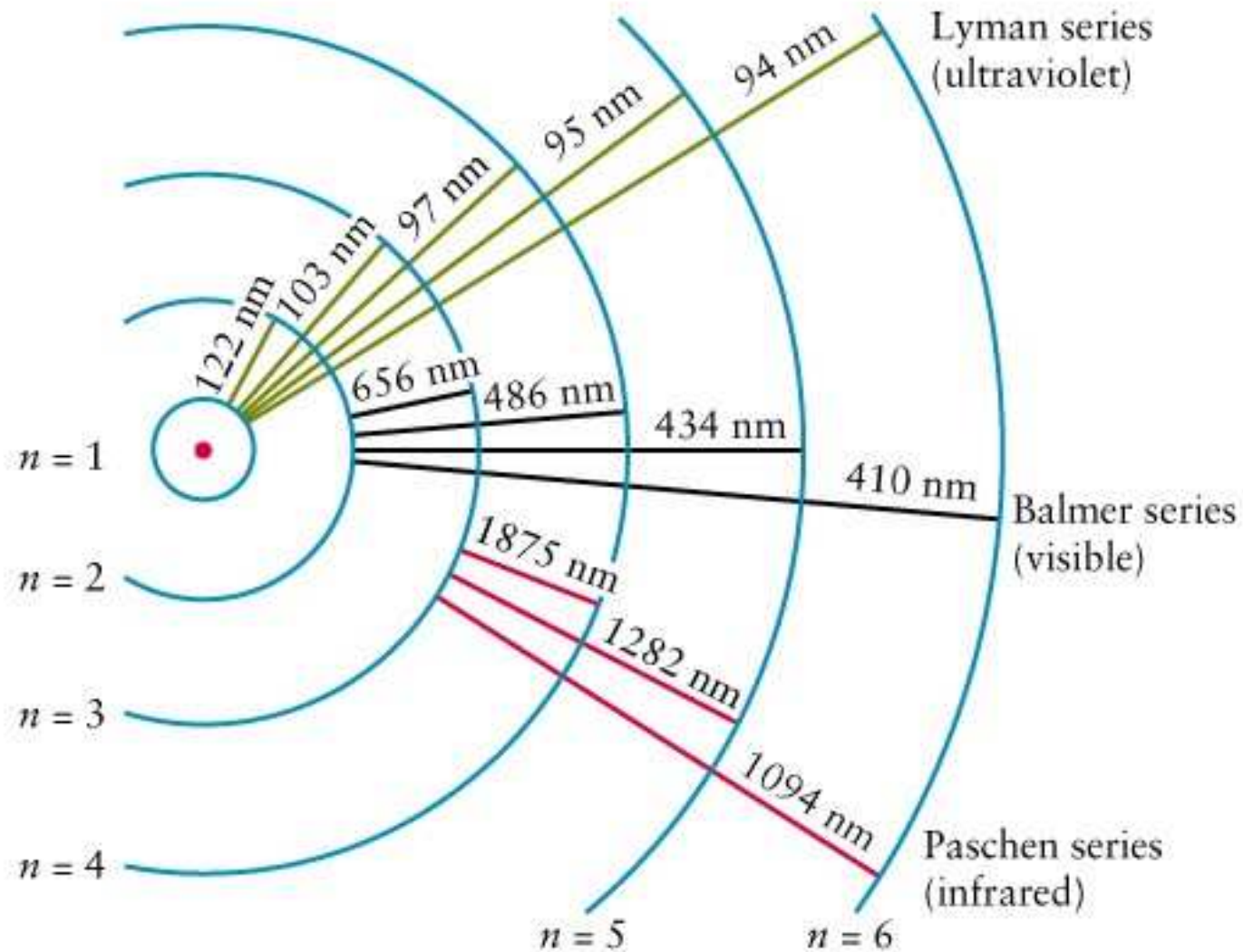
Orange (590-625 nm)

Red (625-740 nm)

氢原子光谱中的不同谱线



氢原子的光谱线系



例1、 试计算氢原子中巴耳末系的最短波长和最长波长各是多少？

解：根据巴耳末系的波长公式，其最长波长应是 $n=3 \rightarrow n=2$ 跃迁的光子，即

$$\frac{1}{\lambda_{\max}} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 1.097 \times 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right)$$

$$\lambda_{\max} = 6.56 \times 10^{-7} \text{ m} = 6563 \text{ \AA}$$

最短波长应是 $n=\infty \rightarrow n=2$ 跃迁的光子，即

$$\frac{1}{\lambda_{\min}} = R \frac{1}{2^2} = 1.097 \times 10^7 / 4 \quad \lambda_{\min} = 3464 \text{ \AA}$$

例2、 (1) 将一个氢原子从基态激发到 $n=4$ 的激发态需要多少能量?

(2) 处于 $n=4$ 的激发态的氢原子可发出多少条谱线? 其中多少条可见光谱线, 其光波波长各多少?

解: (1)

$$\begin{aligned}\Delta E &= E_4 - E_1 = \frac{E_1}{4^2} - E_1 \\ &= \frac{-13.58}{4^2} - (-13.58) \\ &= 12.75 \text{ eV} \approx 2 \times 10^{-18} \text{ J}\end{aligned}$$

(2) 在某一瞬时，一个氢原子只能发射与某一谱线相应的一定频率的一个光子，在一段时间内可以发出的谱线跃迁如图所示，共有6条谱线。

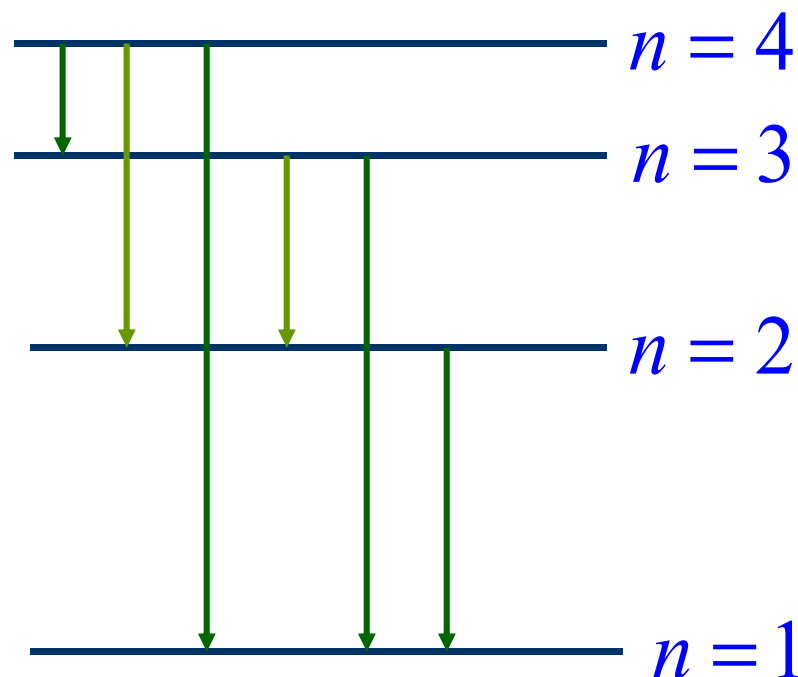
其中，可见光的谱线为 $n = 4$ 和 $n = 3$ 跃迁到 $n = 2$ 的两条

$$\begin{aligned}\tilde{\nu}_{42} &= R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{4^2}\right) \\ &= 1.097 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{16}\right) \\ &= 0.21 \times 10^7 \text{ m}^{-1}\end{aligned}$$

$$\lambda_{42} = \frac{1}{\tilde{\nu}_{42}} = 4861 \text{ \AA}$$

$$\tilde{\nu}_{32} = R\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2}\right) = 0.15 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda_{32} = \frac{1}{\tilde{\nu}_{32}} = 6563 \text{ \AA}$$



玻尔的量子论

玻尔量子论发表的第二年，弗兰克和赫兹在电子和汞原子碰撞的实验中，利用它们之间的非弹性碰撞，使汞原子从低能级激发到高能级，从而在实验上直接证实了原子具有离散能级的概念。

玻尔的量子论的成功：

- 1) 首次打开了人们认识原子结构的大门。
- 2) 玻尔提出的一些基本概念，例如原子能量的量子化和量子跃迁的概念以及频率条件等，至今仍然是正确的。

三、玻尔理论的缺陷

1. 把电子看作是一经典粒子，推导中应用了牛顿定律，使用了轨道的概念，所以玻尔理论不是彻底的量子论。
2. 角动量量子化的假设以及电子在稳定轨道上运动时不辐射电磁波的假设是十分生硬的。
3. 无法解释复杂原子的光谱和光谱线的精细结构。
4. 不能预言光谱线的强度。

1922年诺贝尔物理学奖



——原子结构和原子光谱

1922年诺贝尔物理学奖授予丹麦哥本哈根的尼尔斯·玻尔，以表彰他在研究原子结构,特别是研究从原子发出的辐射所作的贡献。



Niels Bohr
1885-1962

6-4 粒子的波动性

一、德布罗意波



德布罗意(1892-1960)
Louis Victor De Broglie

整个世纪以来，在辐射理论上，相对于波动的研究方法，我们过于忽视了粒子的研究方法；而在实物理论上，是否发生了相反的错误呢？是不是我们关于粒子的图象想得太多，而忽略了波的图象呢？

1924年博士论文《量子理论研究》，1929年获得诺贝尔物理奖

德布罗意提出物质波的假设:

任何运动的粒子皆伴随着一个波，粒子的运动和波的传播不能相互分离。

运动的实物粒子的能量 E 、动量 p 与它相关联的波的频率 ν 和波长 λ 之间满足如下关系：

$$E = mc^2 = h\nu \quad p = mv = \frac{h}{\lambda} \quad \text{德布罗意关系式}$$

表示自由粒子的平面波称为德布罗意波(或物质波)

德布罗意波的数量级

宏观物质的德波罗意波长均太小，难以观察其波动特性。

1. 地球:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{5.98 \times 10^{24} \times 2.98 \times 10^4} \\ = 3.72 \times 10^{-63} m$$

2. 子弹:

$$\lambda = \frac{h}{m_0 v} = 2.21 \times 10^{-34} m$$

德布罗意波的数量级 (续)

自由粒子速度较小时

$$E = \frac{p^2}{2m} \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

3. 电子:

质量 $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 经加速电势差 V 加速后

$$E = eV$$

电子的德布罗意波长为

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}} = \frac{12.2}{\sqrt{V}} \text{ \AA}$$

当 $V = 100V$ 时, $\lambda = 1.22 \text{ \AA}$

例题 计算：25°C时的慢中子的德布罗意波长。

解 $\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 298 = 6.17 \times 10^{-21} J$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2}mv^2$$

$$p = mv = \sqrt{2m\bar{\varepsilon}} = \sqrt{2 \times 1.67 \times 10^{-27} \times 6.17 \times 10^{-21}} \\ = 4.55 \times 10^{-24} m \cdot kg \cdot s^{-1}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = 1.46 \times 10^{-10} m$$

物质波实验验证

(1) 电子散射实验

1927年戴维孙-革末实验(C. J. Davisson, L. H. Germer)

(2) 电子透射实验

1927年汤姆孙(G. P. Thomson)

(3) 电子双缝干涉实验

1960年电子双缝干涉实验

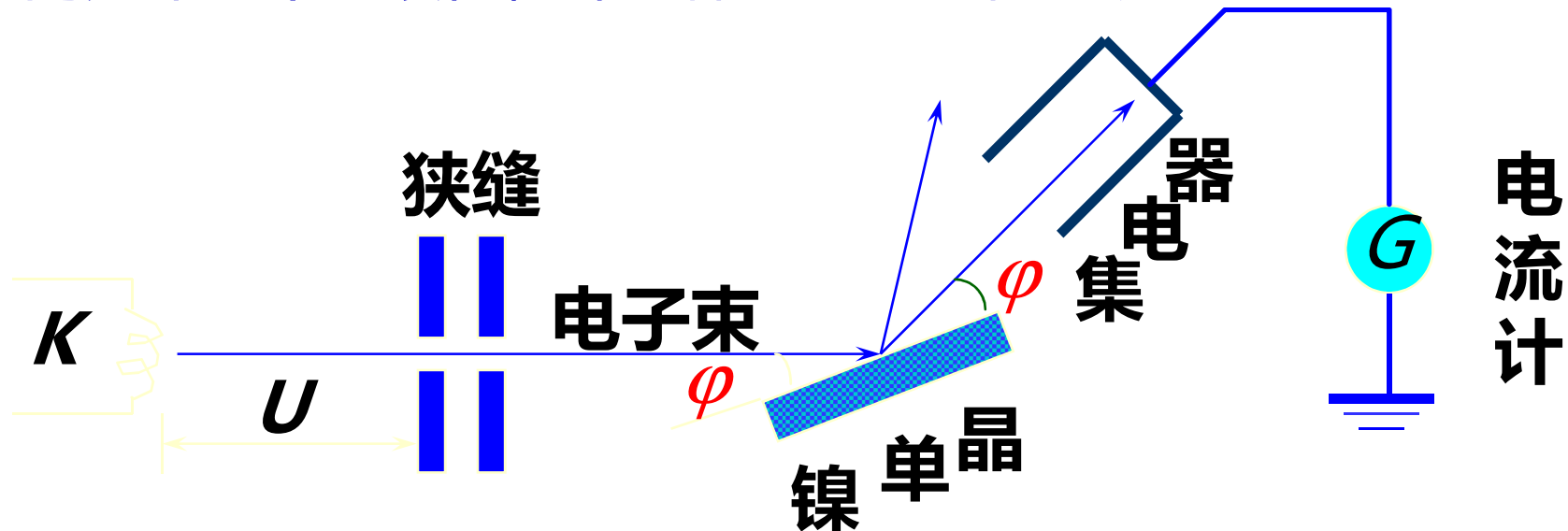
.....

1988年Zeilinger等做了中子的双缝实验

电子散射实验

戴维孙 - 革末实验 (Davisson-Germer experiment)

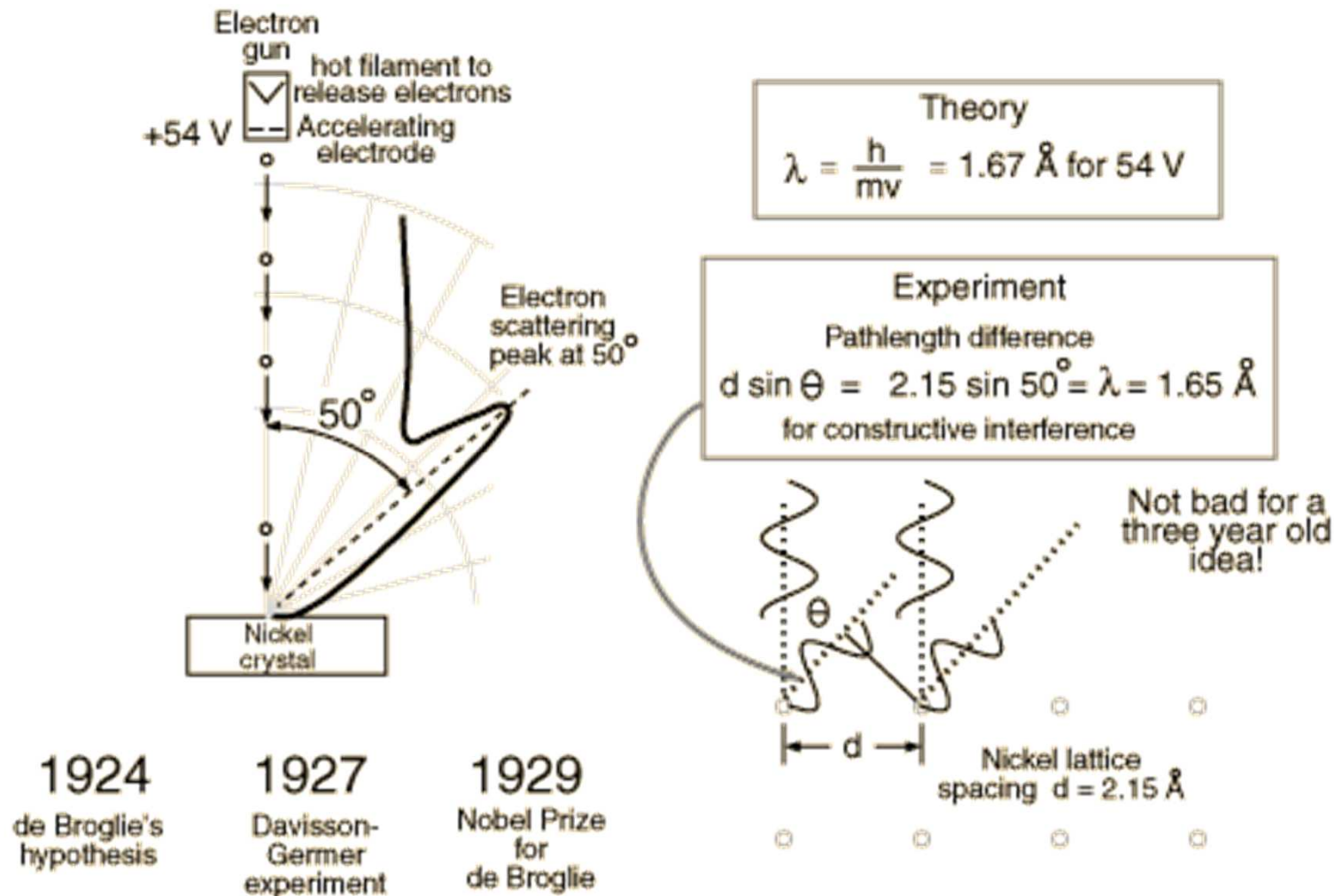
1927年, C.J.戴维孙和L.H.革末在观察镍单晶表面对能量为100电子伏的电子束进行散射时,发现了散射束强度随空间分布的不连续性,即晶体对电子的衍射现象。



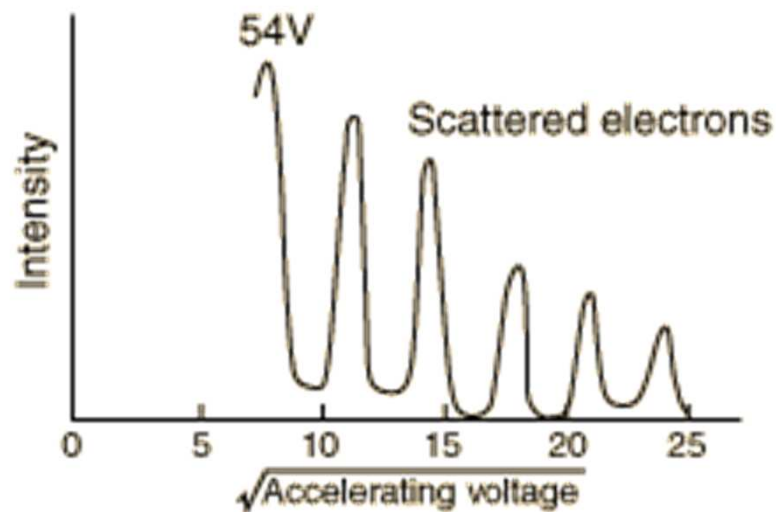
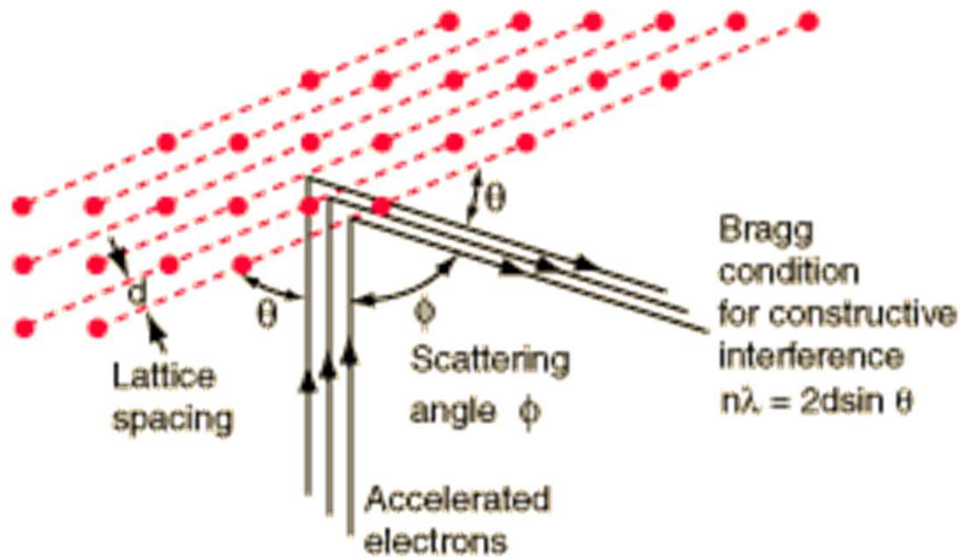
用加速后的电子投射到晶体上, 测量电流与电势差的关系。

实验结果

在某一角度 φ 下，电流强度 I 不是随电势差 U 增大而单调增大，而只有当 U 为某些特定值时，电子流才有极大值。



实验结果 (续)



衍射最大值:

$$2d \sin \varphi = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, 3 \dots$$

电子的波长: $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$

$$2d \sin \varphi = k \frac{h}{\sqrt{2meU}}$$

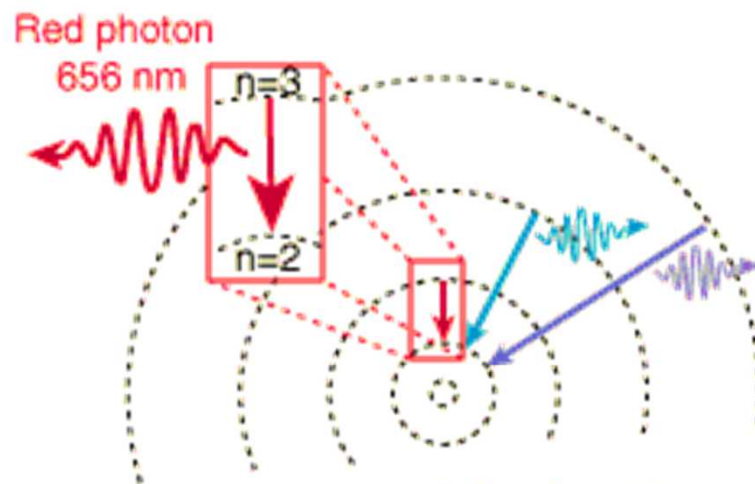
戴维孙—革末实验中

$$\varphi = 80^\circ \quad d = 2.03 \text{ \AA}$$

所以, 当 $\sqrt{U} = k \times 3.06$

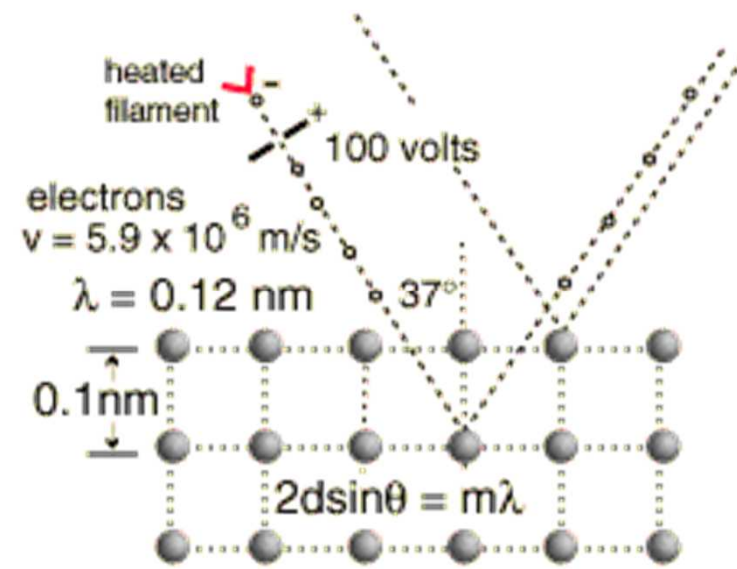
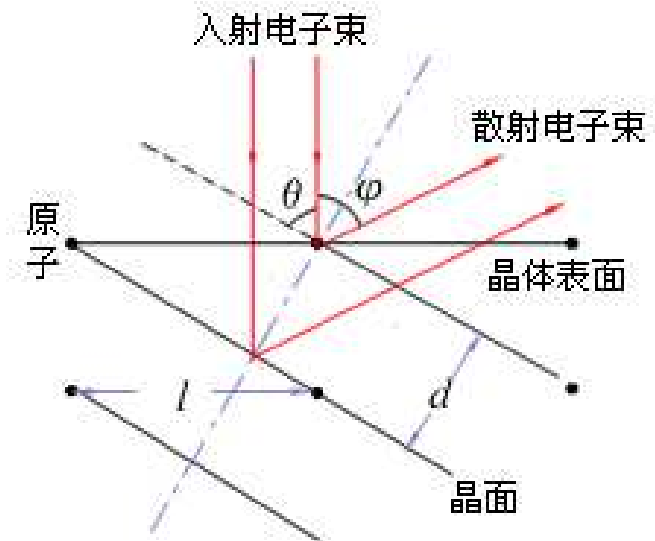
电流出现峰值

Examples of Electron Waves



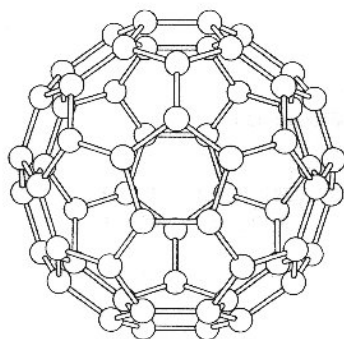
$$E_n = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

Hydrogen Energy Levels



Electron Diffraction

C₆₀实验



Wave-particle duality
of C₆₀ molecules

Nature **401**, 681(1999)

在所有实验中
所测得的物质波波长
都与德布罗意所预言
的波长相符合

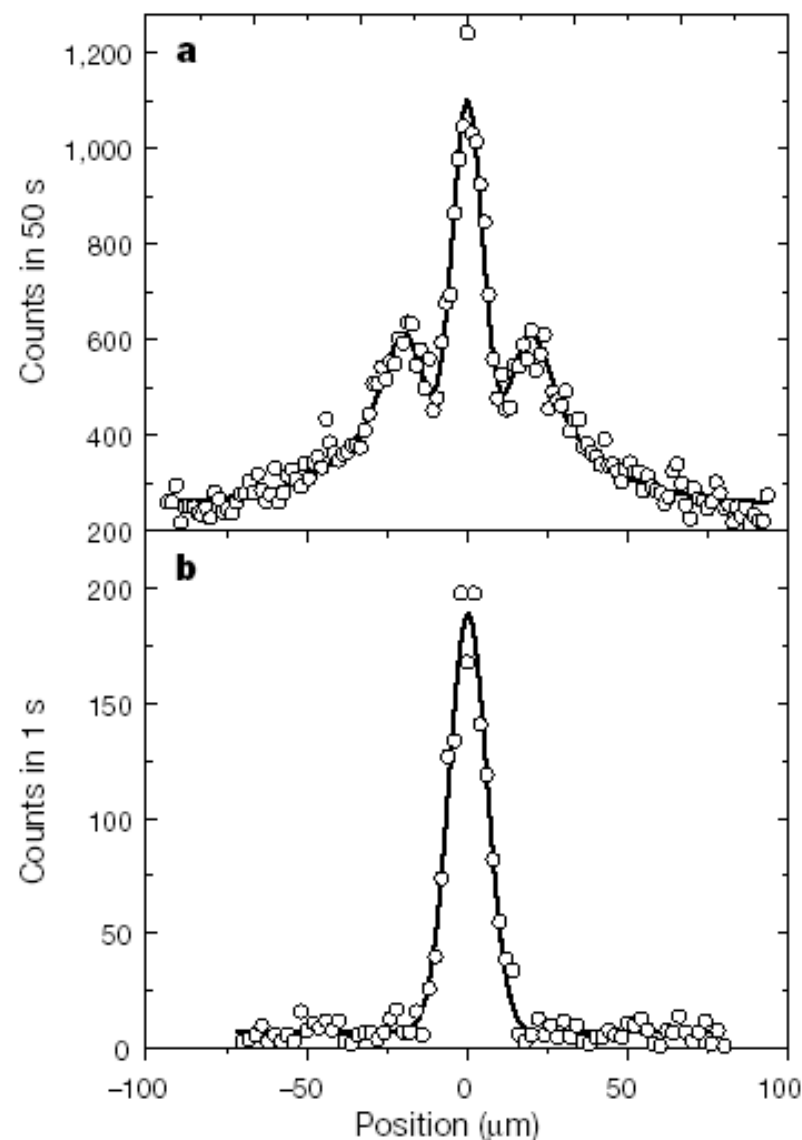
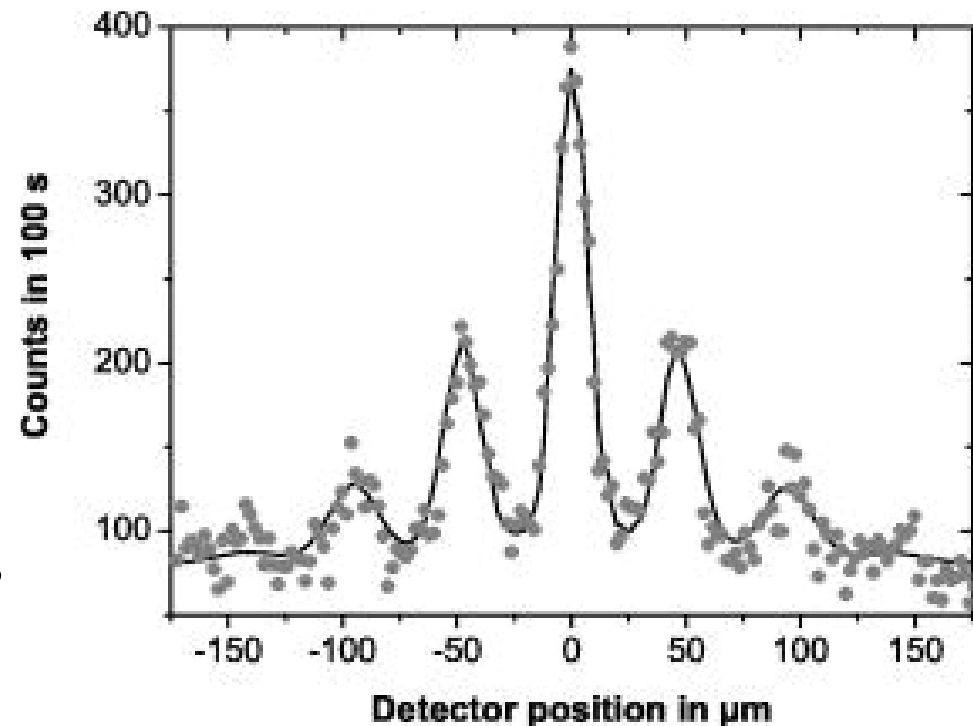
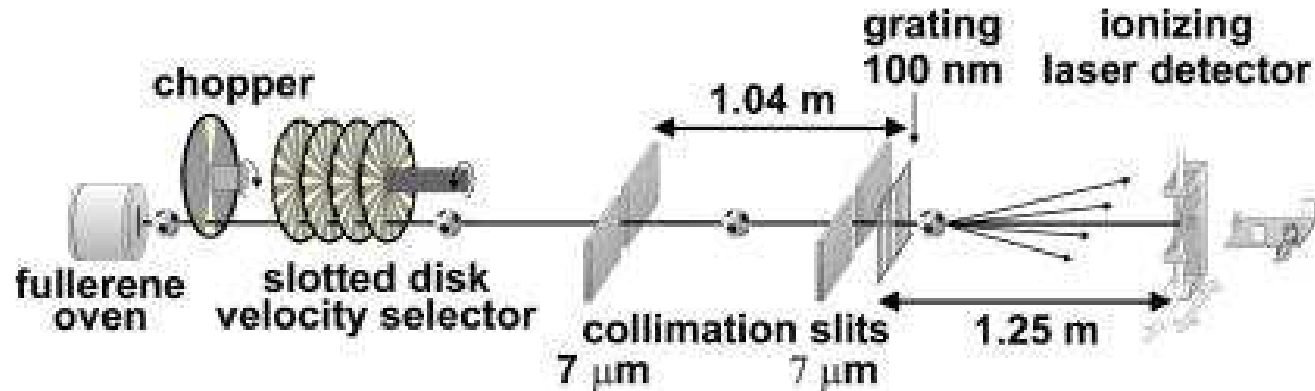


Figure 2 Interference pattern produced by C₆₀ molecules. **a**, Experimental recording (open circles) and fit using Kirchhoff diffraction theory (continuous line). The expected zeroth and first-order maxima can be clearly seen. Details of the theory are discussed in the text. **b**, The molecular beam profile without the grating in the path of the molecules.

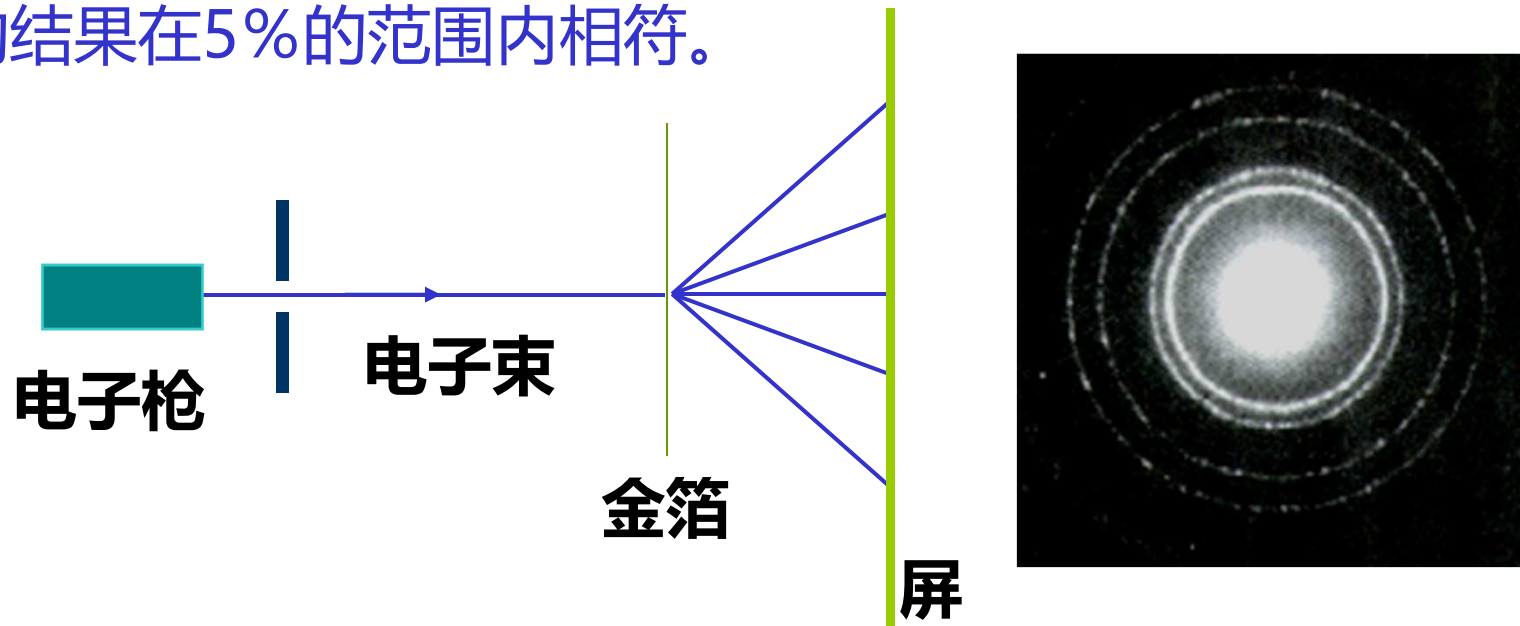
C₆₀实验



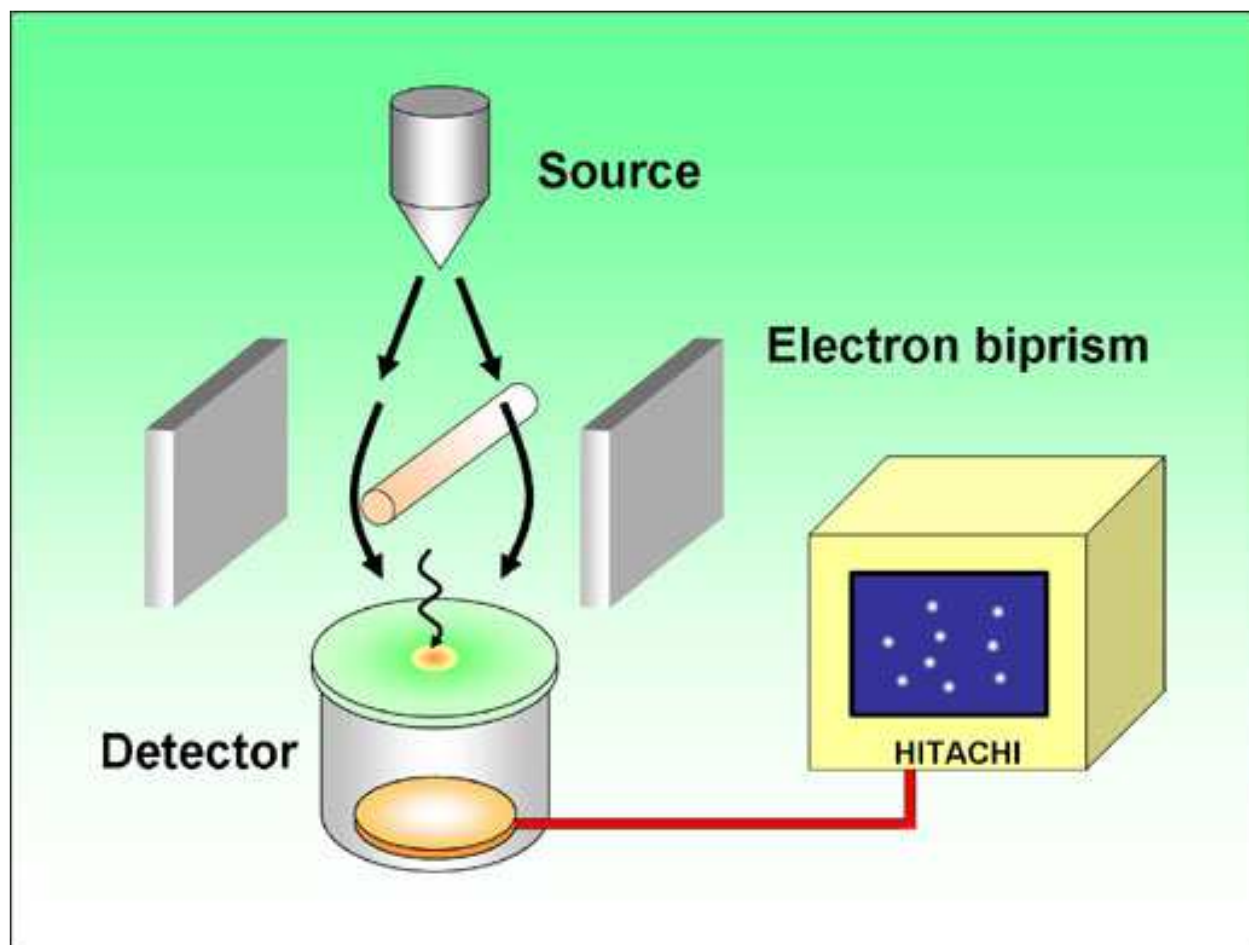
American Journal of Physics,
Vol. 71, No. 4, p319, April 2003,
Nairz, Arndt, and Zeilinger

电子透射实验

几乎与C.J.戴维孙和L.H.革末同时，G.P.汤姆孙和A.里德用能量为2万电子伏的电子束透过多晶薄膜做实验时，也观察到衍射图样。以短讯发表于1927年6月18日的《自然》杂志上。宣布其电子衍射图形与X射线“粉末法”所得图形非常相似。这些图形的大小与德布罗意波动力学理论预计的结果在5%的范围内相符。

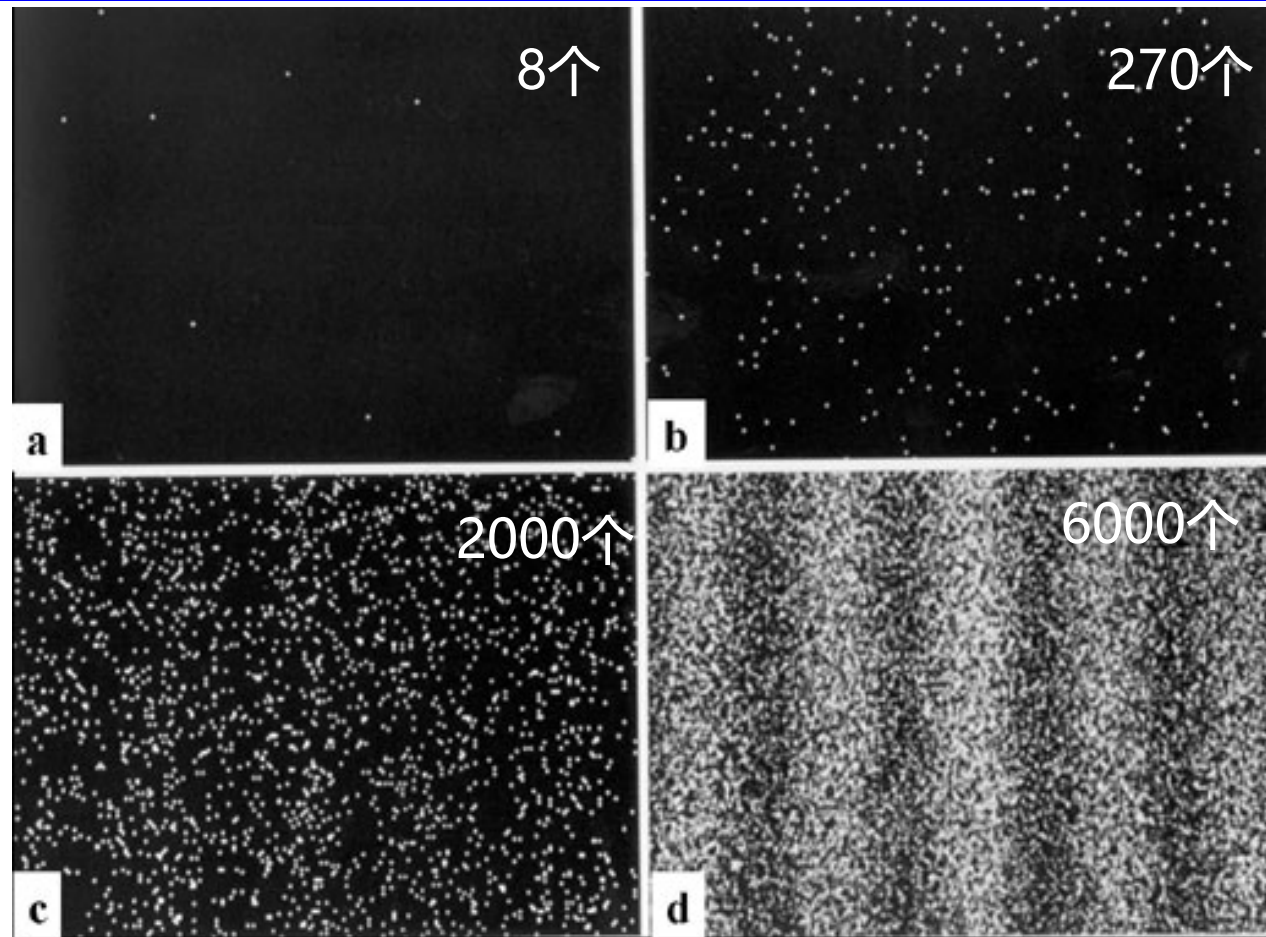


电子双缝干涉实验



实验装置等效于菲涅尔双棱镜

电子的双缝干涉实验结果



The number of electron ccumulated on the screen. (a) 8 electrons; (b) 270 electrons; (c) 2000 electrons; (d) 6000. The total exponsure time from the beginning to the stage (d) is 20 min.

电子or光的衍射

右图中哪一张是
电子直边衍射图样？

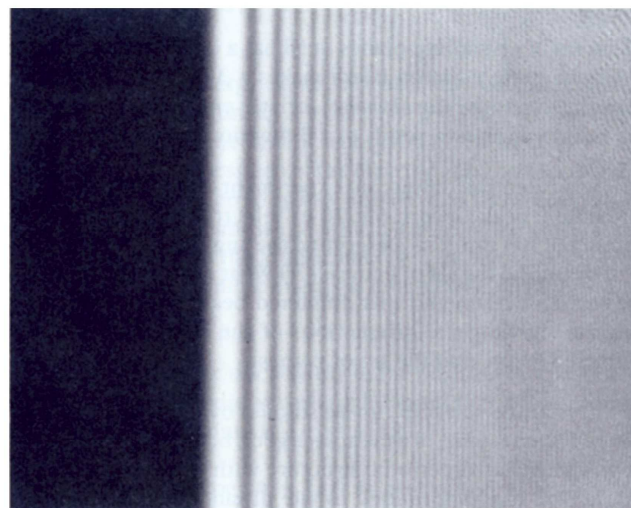
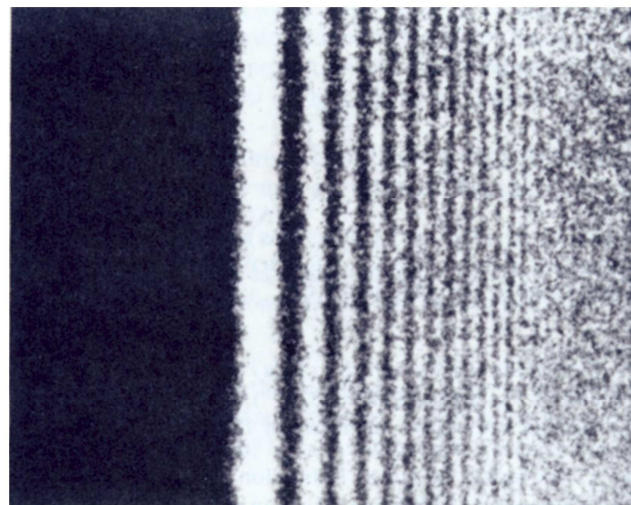
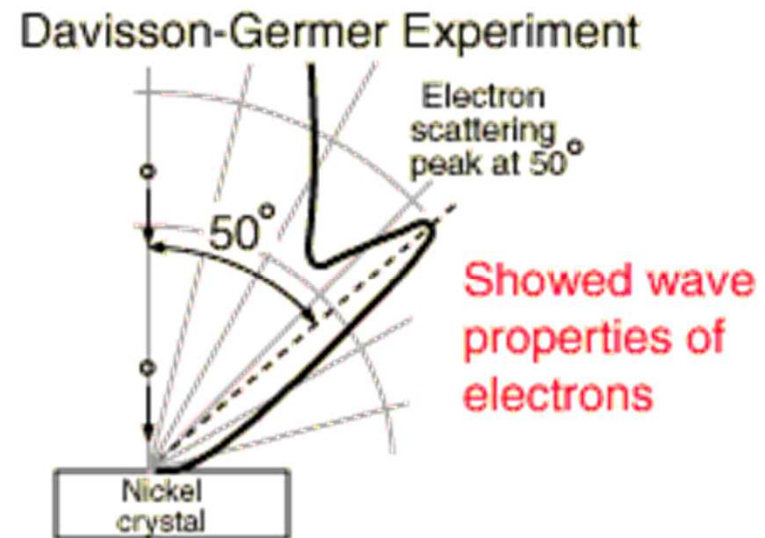
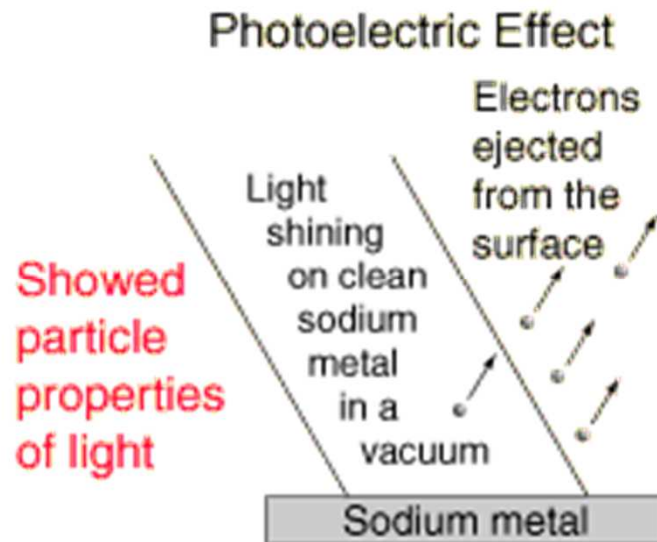


Figure 40-17. Question 12: Patterns formed on photographic film by beams partially blocked by the sharp edge of an obstacle. Which pattern was made by electrons?

Wave-Particle Duality



电子衍射的发现证实了 L.V.德布罗意提出的电子具有波动性的设想，构成了量子力学的实验基础。

1929年诺贝尔物理学奖



——电子的波动性

1929年诺贝尔物理学奖授予法国巴黎索本大学的路易斯·德布罗意，以表彰他发现了电子的波动性和电子波动性的理论研究。



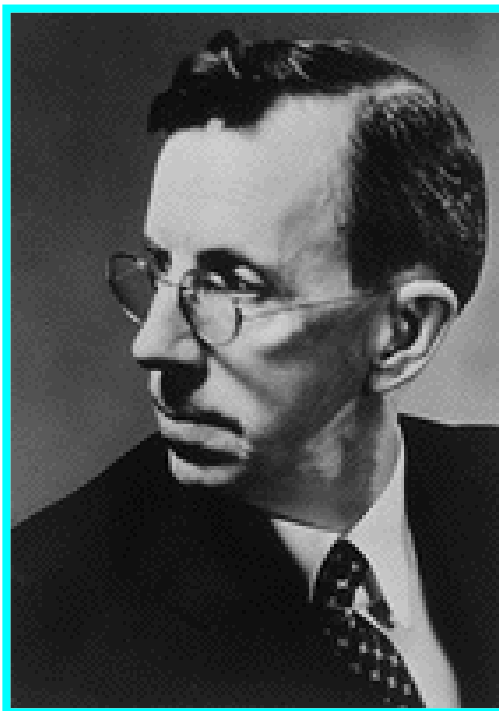
Louis-victor de Broglie
1892-1987

1937年诺贝尔物理学奖



——电子衍射

1937年诺贝尔物理学奖授予美国纽约州的贝尔电话实验室的戴维森和英国伦敦大学的汤姆孙，以表彰他们用晶体对电子衍射所作的实验发现。



Clinton Joseph Davission
1881-1958



Sir George Paget Thomson
1892-1975

二、德布罗意波的统计解释

1926年薛定谔关于波动力学的论文发表以后，物理界曾一度认为：粒子和量子跃迁等概念应当全部放弃，但德国物理学玻恩确信：粒子的概念不能取消，应当找出使粒子和波相一致的新途径。他在几率概念中发现了衔接点，即量子力学中著名的**波函数的统计解释：物质波在某一地方的强度与在该处找到它的几率成正比。**

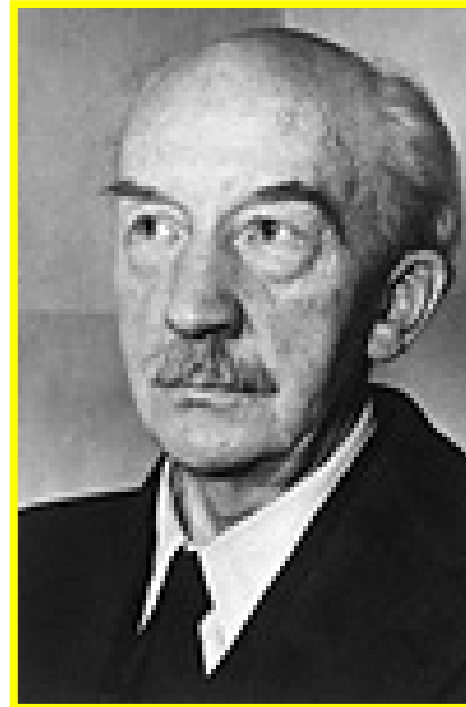
同年，玻恩提出了概率波，认为个别微观粒子在何处出现有一定的偶然性，但是大量粒子的空间分布却服从一定的统计规律。

物质波并不像经典波那样代表实在的波动，它实际上是一种几率波。几率波把物质粒子的波动性和粒子性正确地统一起来，并经历了无数实验的考验。

1954年诺贝尔物理学奖



Max Born 1882--1972



Walther Bothe 1891-1957

玻恩因在量子力学方面的基础研究，特别是波函数的统计解释，**博思**因提出符合计数法以及由此取得的发现，共同分享了1954年度诺贝尔物理学奖。

Einstein
"I can't believe
that God play
dice,"



Bohr answered,
"Einstein, stop
telling God what to
do."

第6章 量子物理基础作业

旧版

6.3, 6.4, 6.7;

6.12, 6.14, 6.16, 6.17, 6.18;

6.19, 6.22, 6.23

新版

2.3, 2.4, 2.7;

2.12, 2.14, 2.16, 2.17, 2.18;

3.1, 3.6, 3.8