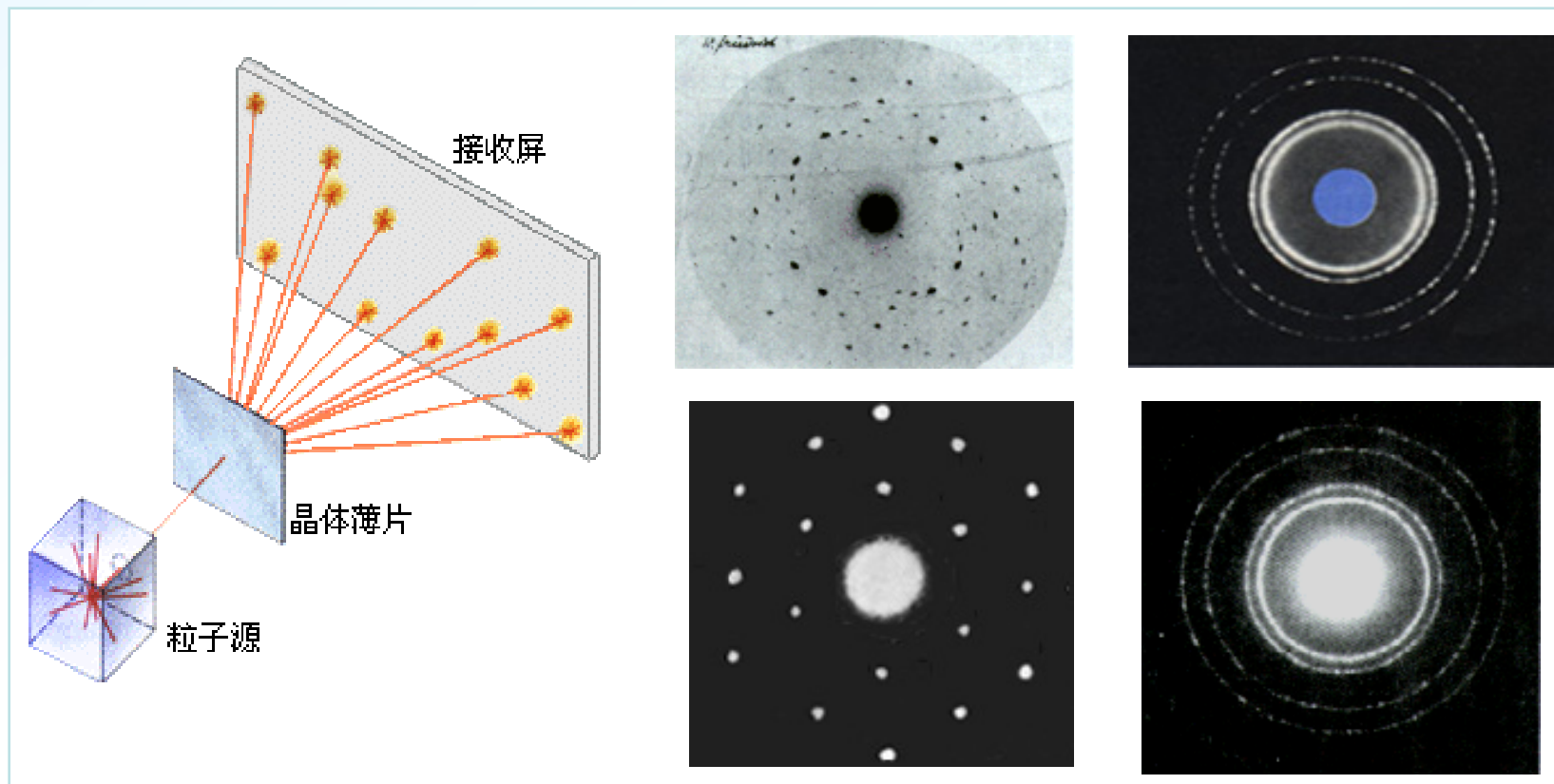


同学们好



关键人物及其理论

- 爱因斯坦光量子理论
- 康普顿、吴有训实验验证光量子理论

光子的量子力学模型 $E = h\nu$ $p = \frac{h}{\lambda}$ $m = \frac{E}{c^2}$

单纯用 波动 均不能完整地描述光的性质
粒子 “波粒二象性”

$$\left. \begin{array}{l} I \propto A^2 \\ I \propto N \end{array} \right\} N \propto A^2$$

振幅越大, 表示光子数越多, 光子到达该处概率越大 —— 概率波.

思考题讨论: 1. 光电效应和康普顿效应都包含有电子与光子的相互作用过程, 这两过程有什么不同?

2. 红外线是否适宜用来观察康普顿效应, 为什么?

氢原子光谱和玻尔理论

光谱 —— 强度随波长的分布图

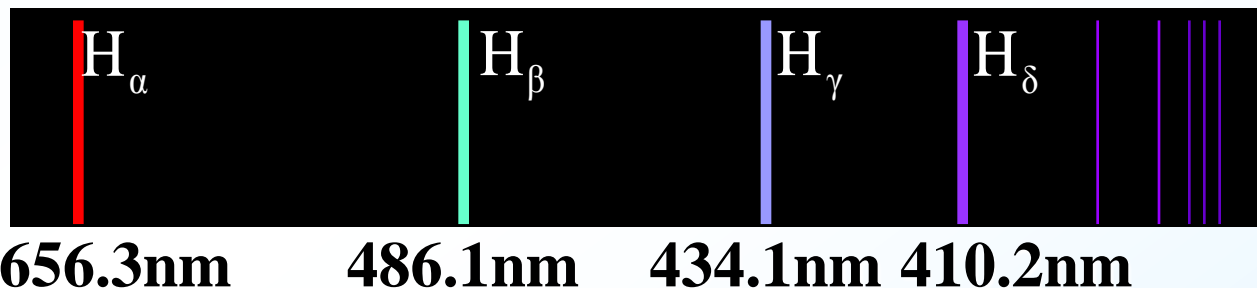
{	线状谱——	原子光谱
	带状谱——	分子光谱
	连续谱——	固体光谱

一、氢原子(hydrogen atom) 光谱的实验规律

1. 巴尔末系



Johann Jakob Balmer
1825—1898



1885年巴耳末得到氢原子可见光谱线
(Balmer series)波长的经验公式:

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (n = 3, 4, 5, \dots) \quad B = 364.6 \text{ nm}$$

2. 里德伯公式 —— 氢原子光谱的普遍公式



Janne Rydberg
1854—1919

1889年里德伯和里兹发现普遍公式：

$$\text{波数 } \tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_{\text{H}} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \begin{cases} m = 1, 2, 3, \dots \\ n = m + 1, m + 2, m + 3, \dots \end{cases}$$

里德伯常数： $R_{\text{H}} = 1.096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$

$$\tilde{\nu} = R_{\text{H}} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) = T(m) - T(n)$$

$$(n > m)$$

里兹并合原理：

谱线的波数可以表示为两光谱项之差。



Walter Ritz
1878-1909

氢原子光谱的波数



T. Lyman
1874-1954

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 2, 3, \dots$$

赖曼系(紫外光)

T. Lyman 1914年发现



F. Paschen
1865-1947

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 3, 4, \dots$$

巴尔末系(可见光)

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 4, 5, \dots$$

帕邢系(红外光)

F. Paschen 1908年发现



A.H. Pfund
1879-1949

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 5, 6, \dots$$

布喇开系(红外光)

F. Brackett 1922年发现

$$\tilde{\nu} = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad n = 6, 7, \dots$$

普芳德系(红外)

H.A. Pfund 1924年发现

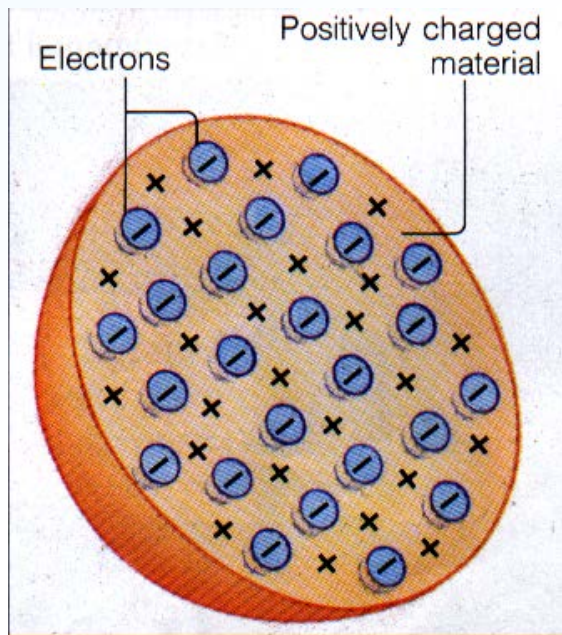
$n \rightarrow \infty$, 该谱线系的线系限(波长最短的谱线)

二、玻尔的氢原子理论

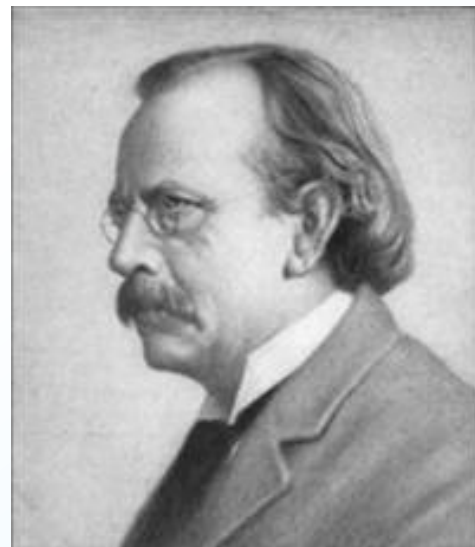
1. 基本实验事实

1) 早期原子模型(atomic model)

1897年汤姆逊发现电子, 并建立了原子的“西瓜模型”



汤姆逊的西瓜模型



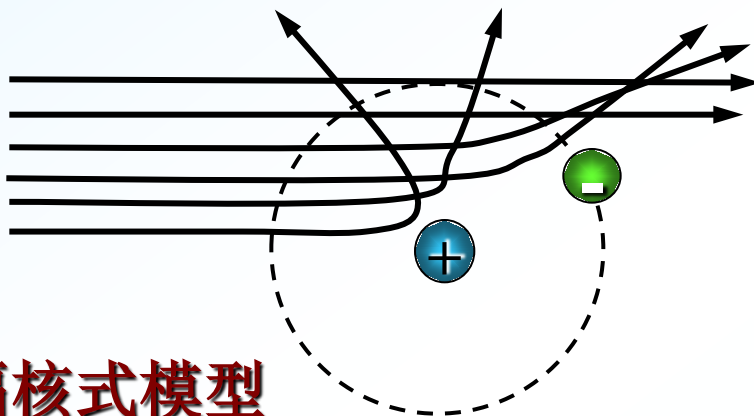
Joseph John Thomson
1856—1940

The Nobel Prize in Physics 1906

2) 卢瑟福行星模型

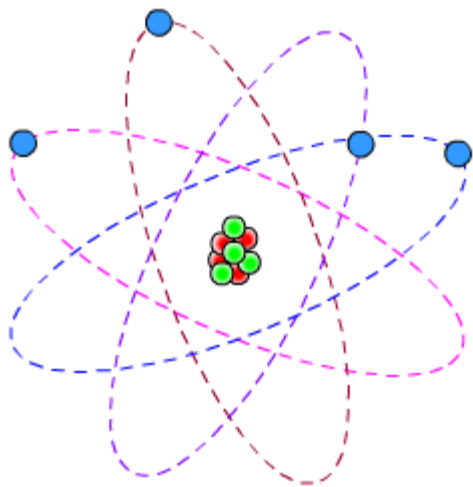
The Nobel Prize in Chemistry 1908

α 粒子的大角散射



Ernest Rutherford
1871—1937

1911卢瑟福核式模型



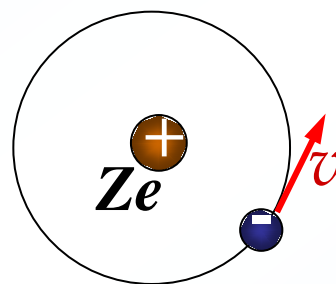
原子由原子核(atomic nucleus)和核外电子构成, 原子核带正电荷, 占据整个原子的极小一部分空间, 而电子带负电, 绕着原子核转动. 原子半径 $r=10^{-10}\text{m}$, 原子核半径 $r=10^{-14}\sim 10^{-15}\text{ m}$.

问题: (1) 原子的稳定性问题?
(2) 分立的线状光谱?

2. 经典理论解释原子分立光谱和原子稳定结构的困难

卢瑟福的原子模型：

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad U = -\frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 r}$$



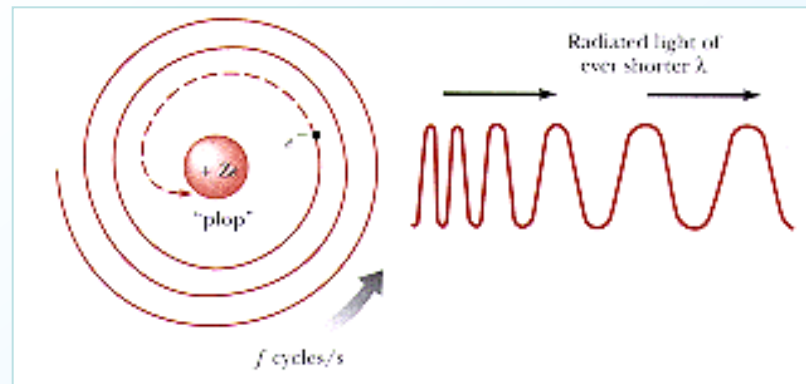
能量 $E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{Ze^2}{8\pi\epsilon_0 r} \begin{cases} r \uparrow & E \uparrow \\ E < 0 \end{cases}$

半径 $r = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mv^2}$ 频率 $\nu = \frac{v}{2\pi r} = \frac{1}{2\pi r} \cdot \sqrt{\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 mr}}$

1) 加速运动 → 辐射电磁波 → $E \downarrow \rightarrow r \downarrow$

原子不稳定！

2) ν 随 r 的变化而连续变化
原子光谱应是连续谱！



3. 玻尔的氢原子理论 (1913年)

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

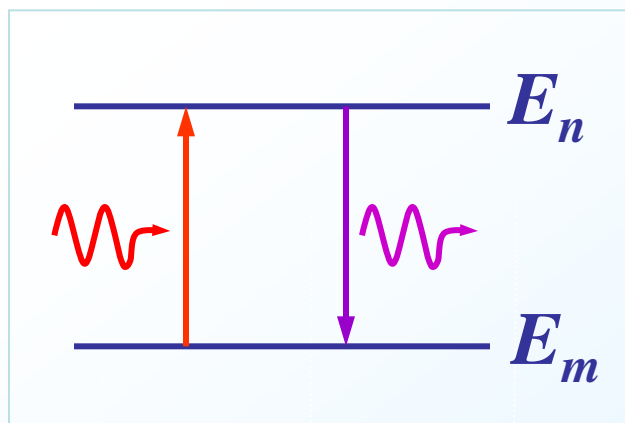
$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hcR_H}{m^2} - \frac{hcR_H}{n^2} = E_n - E_m$$



Niels Bohr
1885-1962

$$E_m = -\frac{hcR_H}{m^2}$$

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



玻尔假设(玻尔理论):

- (1) 定态(stationary state)假设: 电子在原子中沿一组特殊轨道运动, 并处于稳定的能量状态(不辐射).

$$E_1, E_2, \dots$$

- (2) 跃迁假设: 当电子从一个能态轨道向另一个能态轨道跃迁(transition)时, 要发射或吸收光子.

$$h\nu = E_n - E_m$$

- (3) 轨道角动量量子化:

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

半经典理论

由基本假设计算能量和轨道半径

由经典力学:
$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n^2} = m \frac{v_n^2}{r_n} \Rightarrow r_n = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m v_n^2}$$

玻尔量子化条件:
$$m r_n v_n = n \hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

$$r_n = \frac{n^2 \hbar^2}{m e^2 / 4\pi\epsilon_0} = n^2 r_1$$

$$v_n = \frac{e^2 / 4\pi\epsilon_0}{n \hbar} = \frac{\alpha c}{n}$$

玻尔半径(Bohr radius):
$$r_1 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m e^2} = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$$

电子的轨道半径:
$$r_1, 4r_1, 9r_1, \dots$$

精细结构常数:
$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137}$$
 原子物理最重要的两个无量纲常数之一

轨道能量: $E_n = \frac{1}{2}mv_n^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n} \quad (n=1,2,3,\dots)$

$$E_n = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{me^4 / (4\pi\epsilon_0)^2}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{1}{2}m(\alpha c)^2 \left(\frac{1}{n}\right)^2 = \frac{E_1}{n^2}$$

氢原子的基态(ground state) 能量:

$$E_1 = -\frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \approx -13.6 \text{ eV}$$

氢原子的激发态(excitation state)能量: $E_n = -\frac{13.6}{n^2} \text{ eV}$

$n \rightarrow \infty, E_n \rightarrow 0$ 束缚态, $E > 0$ 电子被电离

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = 13.6 \frac{2n-1}{n^2(n+1)^2} \text{ eV} \quad n \uparrow \rightarrow \Delta E \downarrow$$

对氢光谱的解释：

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

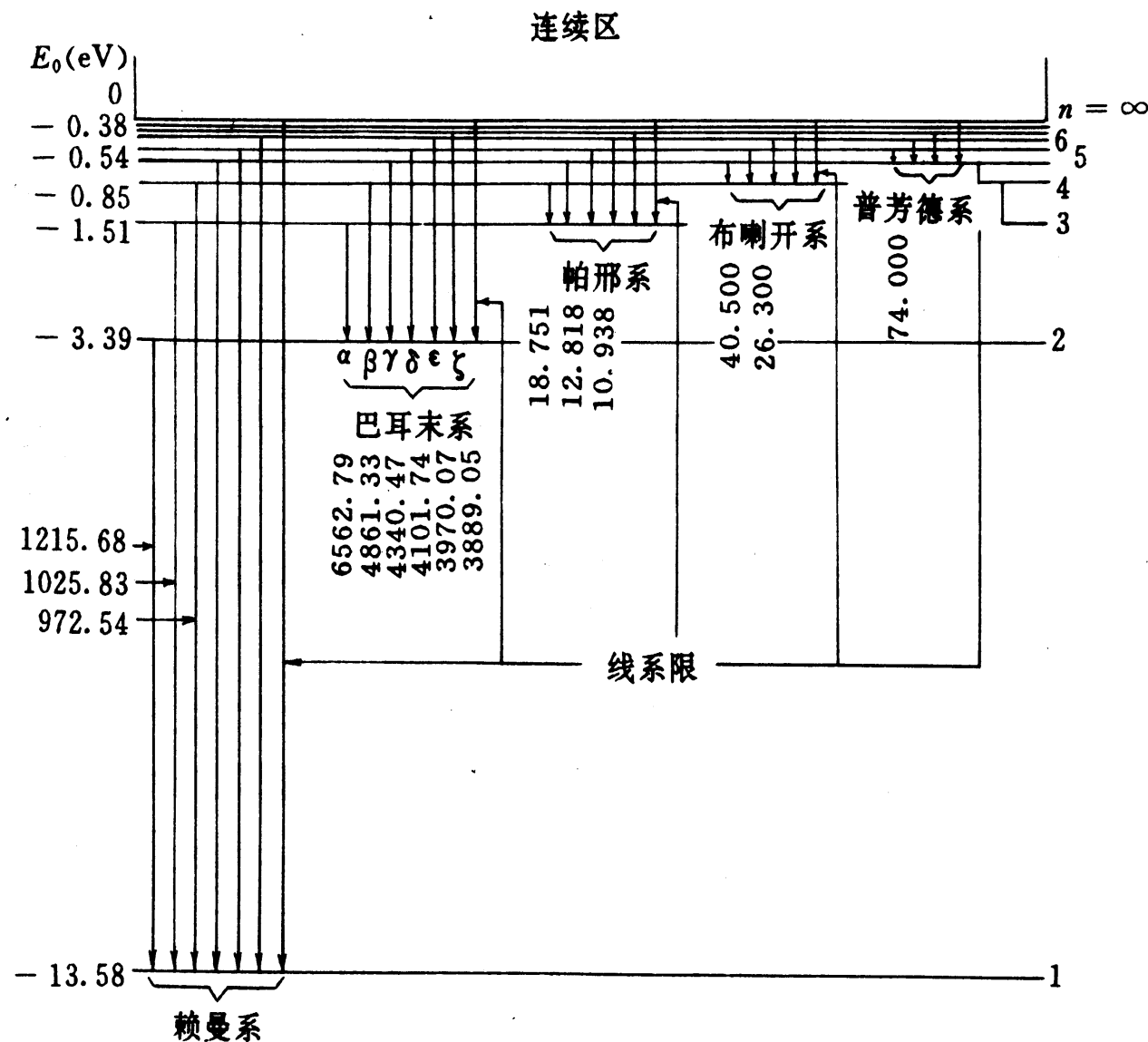
里德伯常数的理论值：

$$R_H = \frac{me^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

里德伯常数的实验值：

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

氢原子能级图



1922年诺贝尔物理学奖

例1. 若用能量为12.6 eV的电子轰击氢原子, 将产生哪些谱线?

解: $\Delta E = E_n - E_1$ $12.6 \text{ eV} = \frac{-13.6 \text{ eV}}{n^2} - (-13.6 \text{ eV})$

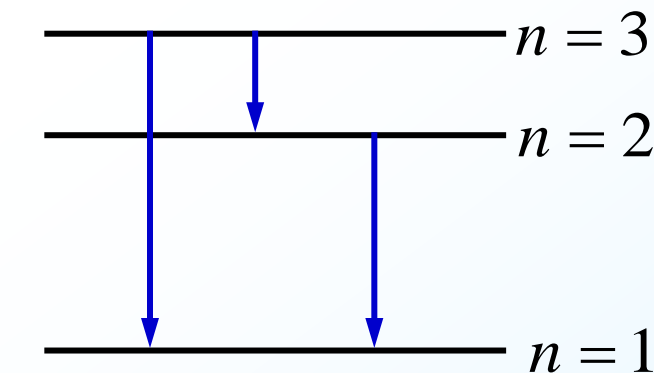
$$n = \sqrt{\frac{13.6}{13.6 - 12.6}} \approx 3.69$$

取 $n = 3$

可能的轨道跃迁:

$3 \rightarrow 1$, $3 \rightarrow 2$, $2 \rightarrow 1$

$$h \frac{c}{\lambda_1} = \frac{E_1}{3^2} - \frac{E_1}{1^2}$$



$$\lambda_1 = 1.025 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\lambda_2 = 6.579 \times 10^{-7} \text{ m} \quad \lambda_3 = 1.216 \times 10^{-7} \text{ m}$$

三、玻尔量子理论的成功与缺陷

- 成功**
- 1) 提出的定态、轨道、能量量子化、辐射跃迁等概念成功地解释了原子的**稳定性**, 成为量子力学的先驱
 - 2) 成功地解释了氢原子及类氢原子光谱现象
 - 3) 再次验证了 h 判据

缺陷



- 1) 不能预言光谱线的强度
- 2) 不能解释谱线的非周期性
- 3) 无法解释光谱线的精细结构
- 4) 无法解释比氢光谱线更复杂的光谱

原因: 带有经典的残余, 是半经典、半量子化的理论

经典物理在解释**热辐射**上的困难——

1900年普朗克能量量子论

经典物理在解释**光电效应**上的困难——

1905年爱因斯坦光量子论

经典物理在解释**氢光谱**上的困难——

1913年玻尔氢原子理论

旧
量
子
论

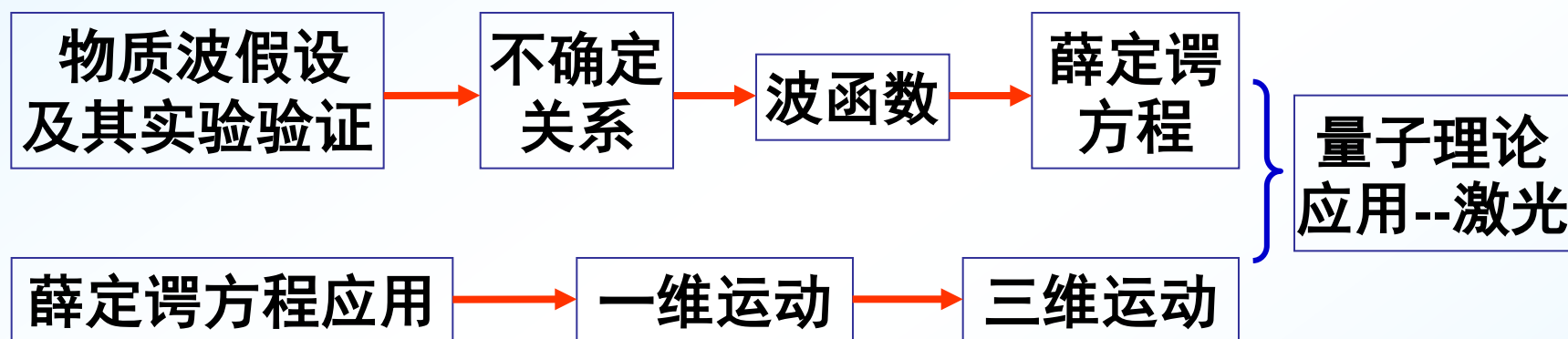
玻尔氢原子理论

- 在物理学史上曾起重要作用。
- 半经典、半量子过渡性理论, 已被量子力学所取代。

思考题: 氢原子状态能量为什么是负值?

旧量子论: 在经典理论框架中引入量子假设, 通过革新基本观念, 解决各局部领域的问题.

量子力学: 从基本属性上认识微观粒子的运动规律.



要点: 德布罗意公式

不确定关系

物质波波函数及其统计解释

薛定谔方程及其应用

德布罗意假设及其验证

一、德布罗意假设

The Nobel Prize in Physics 1929

Louis de Broglie 1924年在巴黎大学完成的博士论文《量子理论的研究》中提出德布罗意波(de Broglie wave), 五年后因这篇论文而获得诺贝尔物理奖。

---整个世纪以来, 在辐射理论上, 比起波动的研究方法来, 是过于忽视了粒子的研究方法; 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图像想得太多, 而过分地忽略了波的图像呢? ...



Louis de Broglie
1892-1987

1. 德布罗意假设

光的粒子性(corpuscular property)与波动性(undulatory property) 的关系式

$$E = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

德布罗意假设: 自然界是对称统一的. 实物粒子和光子一样, 也具有波粒二象性. 如果用能量 E 和动量 p 来描述实物粒子的粒子性, 则可用频率 ν 和波长 λ 来表征实物粒子的波动性.

德布罗意公式 $E = h\nu \quad p = \frac{h}{\lambda}$

注意: 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”** (matter wave) 或 **“德布罗意波”** (de Broglie wave).

2) 德布罗意波对应的原子轨道

玻尔假设原子轨道量子化, 德布罗意利用波假设和波的特性来解释原子的闭合轨道——驻波闭合弦

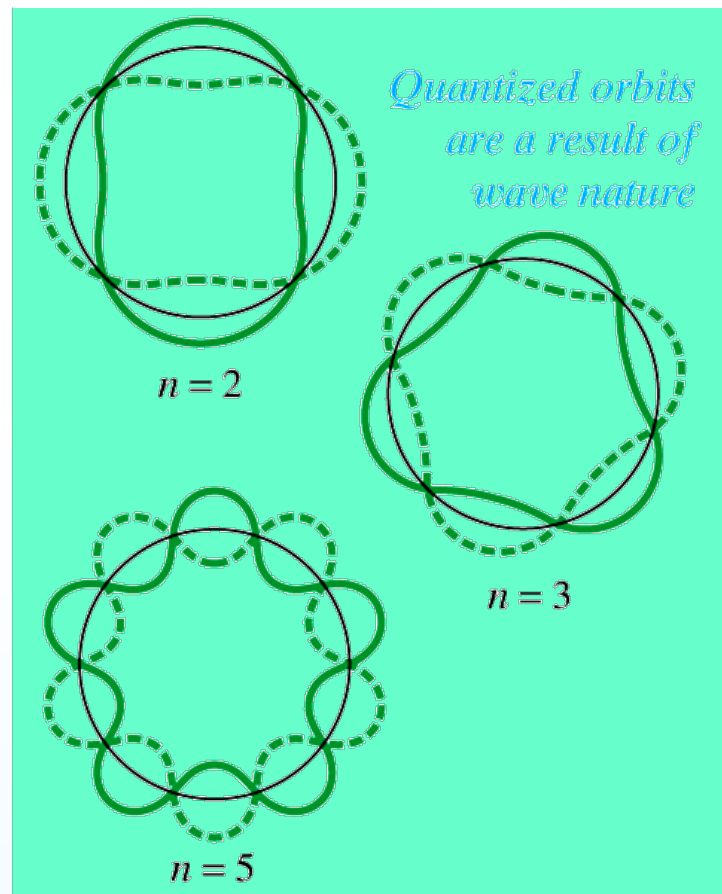
围绕圆周必须有整数个波长排列

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

$$2\pi r_n = n \frac{h}{mv}$$

$$mvr_n = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

即玻尔量子化条件



3. 德布罗意波波长的数量级

地球 $m_0 = 5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$ $v = 29.8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$

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

子弹 $m_0 = 0.01 \text{ kg}$ $v = 300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

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

宏观物质的德波罗意波长均太小, 难以观察其波动特性.

电子:

$$p = \frac{1}{c} \sqrt{E^2 - E_0^2} = \frac{1}{c} \sqrt{(E_0 + E_k)^2 - E_0^2} = \frac{1}{c} \sqrt{2E_0E_k + E_k^2}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{(2m_0c^2 + E_k)E_k}} \begin{cases} E_k \ll E_0 & \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV}} \approx \frac{12.25}{\sqrt{V}} \text{Å} \\ E_k \gg E_0 & \lambda \approx \frac{hc}{eV} = \frac{1.24 \times 10^4}{V} \text{Å} \end{cases}$$

电子质量 $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 加速电压为 V $E_k = eV$

$V = 150\text{V}$, $\lambda = 1\text{Å}$; $V = 10000\text{V}$, $\lambda = 0.122\text{Å}$

可以用晶体对电子的衍射来显示其波动性, 检验德布罗意公式的正确性.

二、物质波实验验证

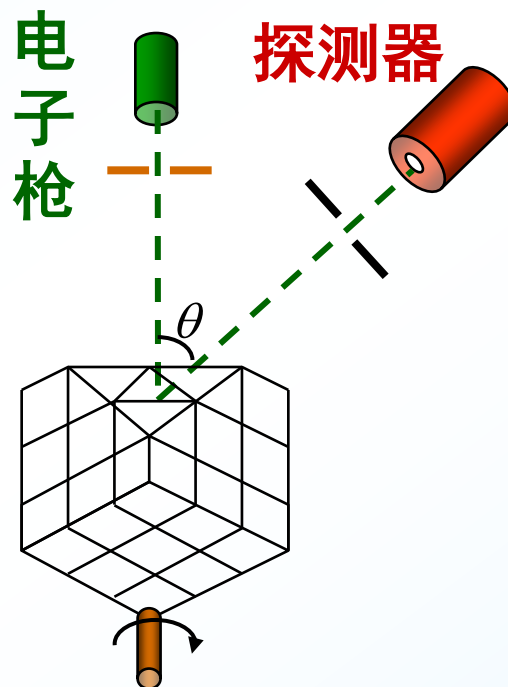
1. 戴维孙——革末实验

1923年 用电子散射实验研究镍原子结构

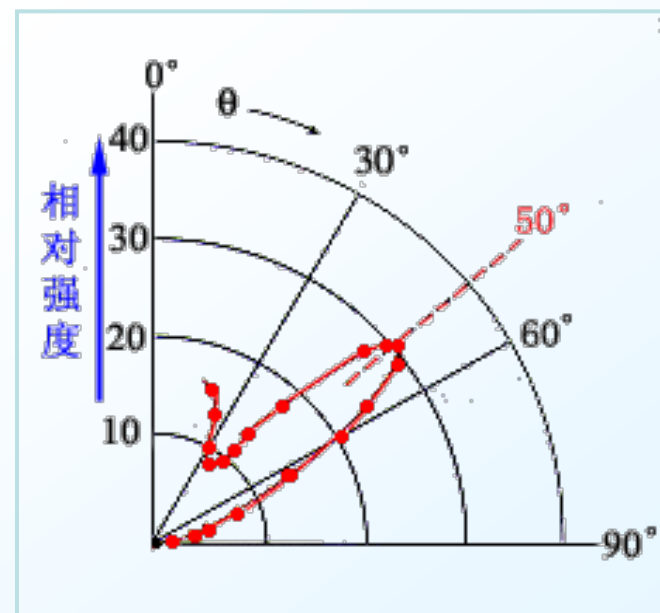
1925年 实验曲线反常, 出现若干峰值



Clinton Joseph Davisson
1881-1958

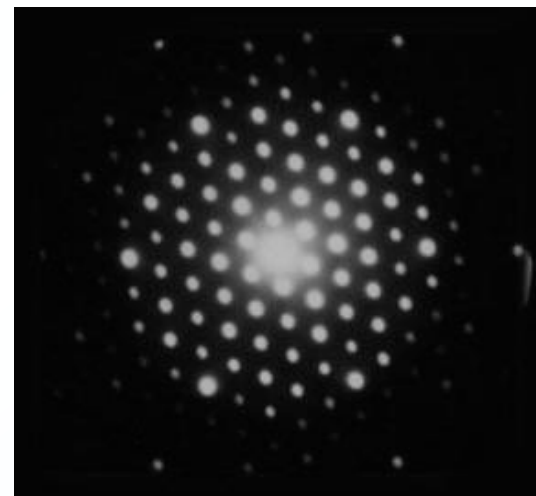
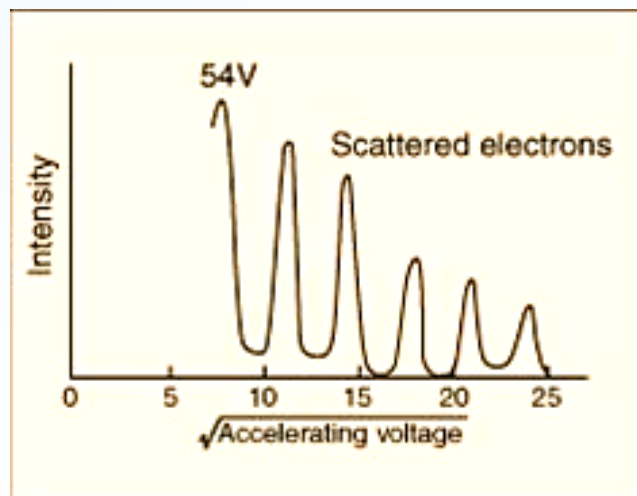
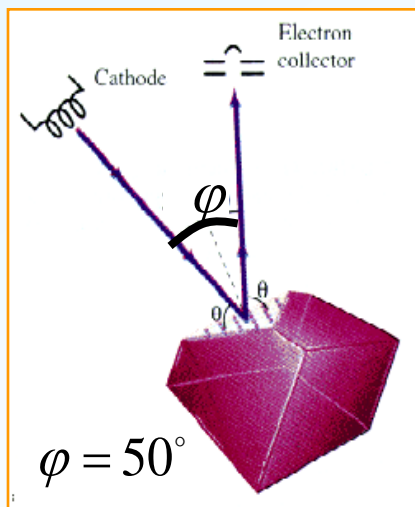


Lester Halbert Germer
1896—1971



1926年 了解德布罗意物质波假设

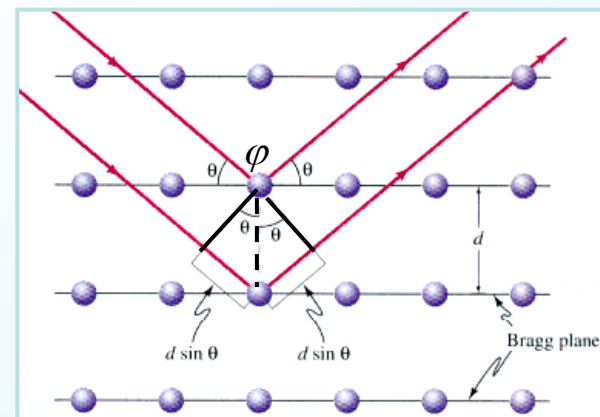
1927年 有意识寻求电子波实验依据, 2~3个月出成果



用德布罗意理论 $\lambda = \frac{12.25}{\sqrt{V}} = \frac{12.25}{\sqrt{54}} = 1.67 \text{ \AA}$

用X光衍射理论 $2d \sin \theta = k\lambda$

$2d \sin 65^\circ = k\lambda \xrightarrow{k=1} \lambda = 1.65 \text{ \AA}$



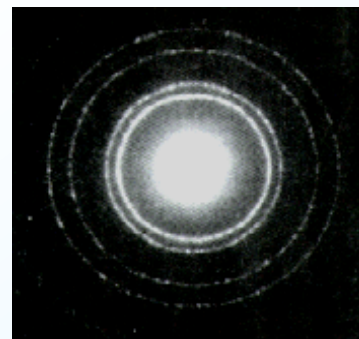
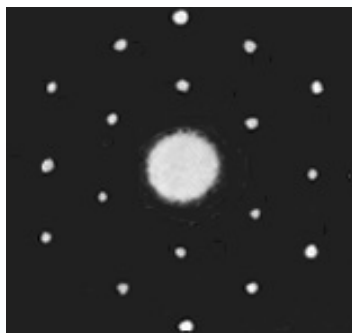
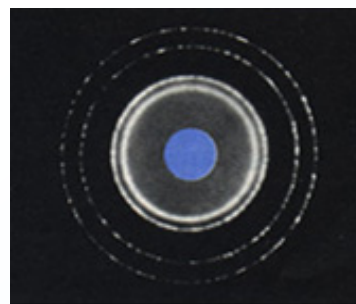
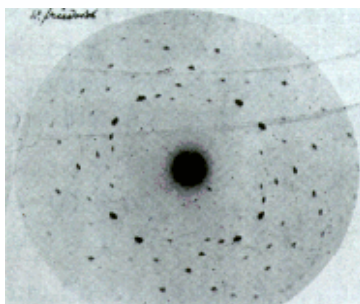
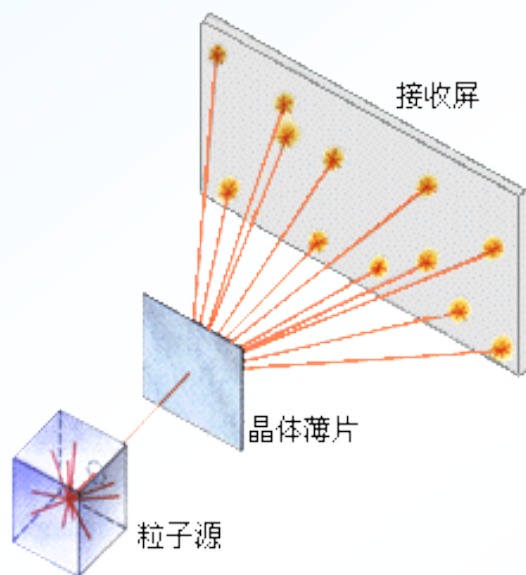
2. 汤姆孙实验(J.P.Thomson)

用电子束直接穿过厚 10^{-8}m 的单/多晶膜, 得到电子衍射照片

The Nobel Prize in Physics 1937

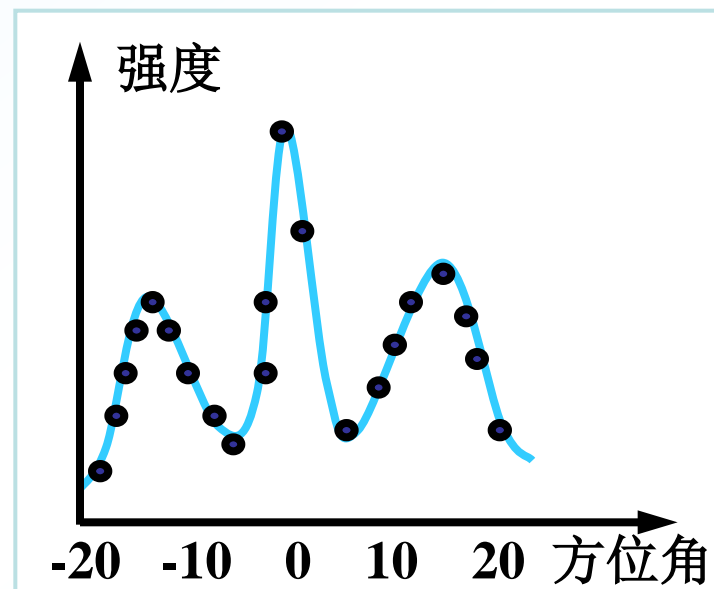
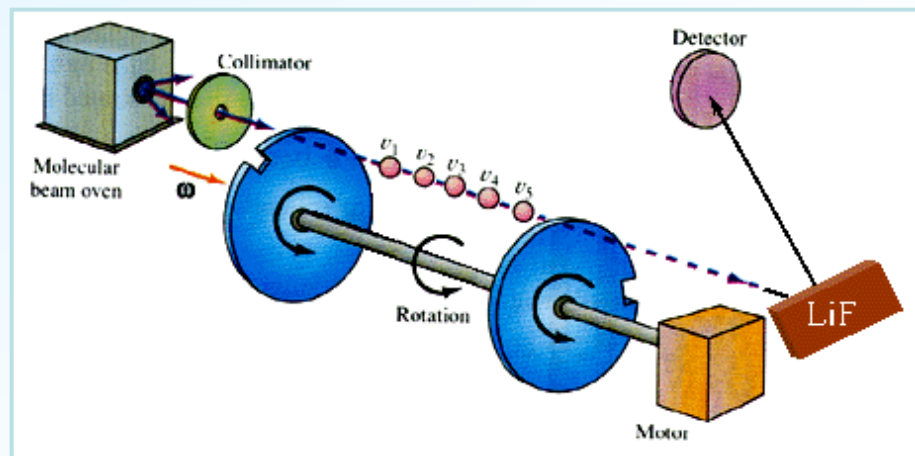


George Paget Thomson
1892-1975



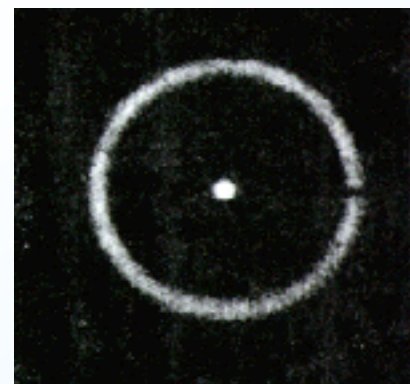
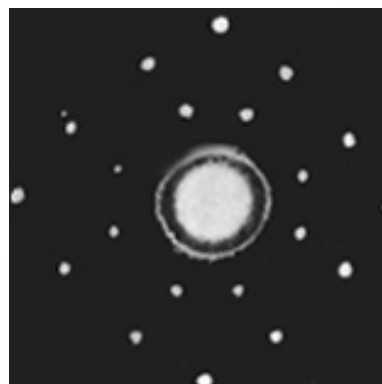
3. 其它实验

1929年斯特恩氢分子衍射



1936年 中子束衍射

* 中性微观粒子，
具有波粒二象性



1961年 电子单缝、双缝、多缝衍射 2:38

1986年 证实固体中电子的波动性

例2. 求一动能为 13.6 eV 的电子的德布罗意波长.

解: 因为

$$m_0 c^2 = \frac{9.1 \times 10^{-31} \times (3 \times 10^8)^2}{1.6 \times 10^{-19}} = 0.51 \text{ MeV}$$

$$\text{所以 } E_k = 13.6 \text{ eV} \ll m_0 c^2$$

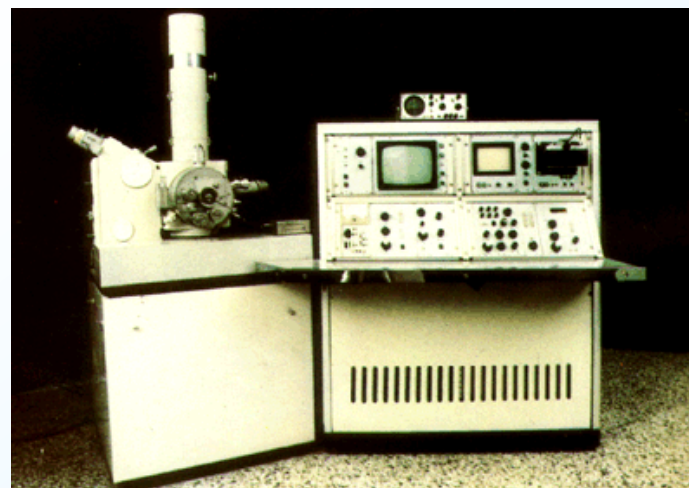
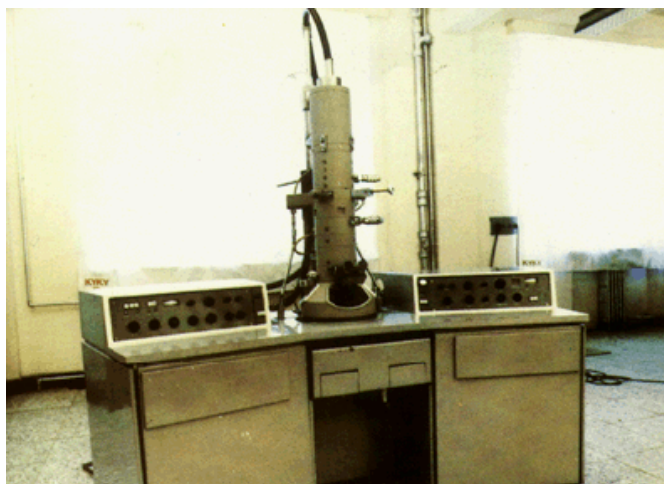
$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{\sqrt{2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times 13.6 \times 1.6 \times 10^{-19}}} \text{ m} \\ &= 3.32 \times 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$

电子显微镜

光学显微镜的分辨本领与光波的波长成反比。

当加速电场很大时, 电子的德布罗意波长可以比可见光波长短得多, 如 V 为 ~ 10 万伏时, 电子的波长为 0.004nm , 比可见光短 10 万倍. 因此利用电子波代替可见光制成的电子显微镜能具有极高的分辨本领.

电子显微镜在现代工农业生产 and 科学研究中应用广泛.

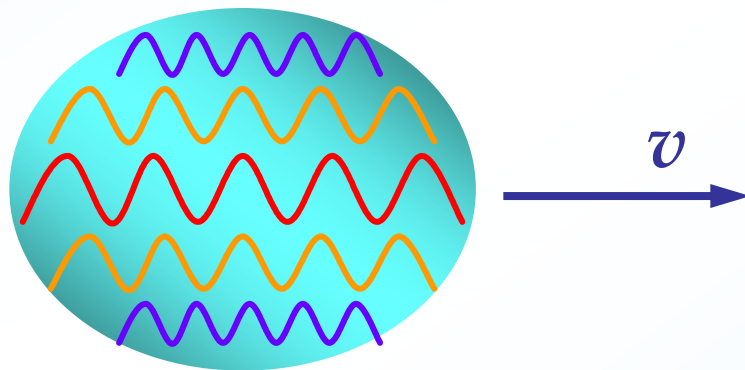


微观粒子的波粒二象性是得到实验证实的科学结论

三、对实物粒子波粒二象性的理解

历史上曾有的代表性观点：

1. **波包说：**认为粒子实为不同频率波构成的波包



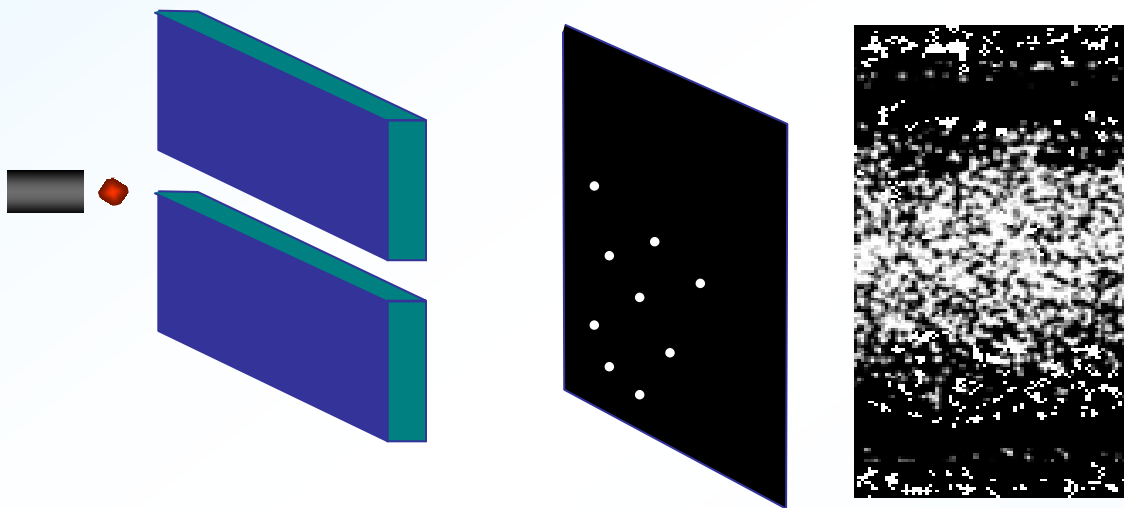
问题

- 不同波长的波在媒质中的群速度(非 u)不同, 波包在传播中会扩散, 使粒子“发胖” ;
- 波包在媒质界面上要反射和折射, 但未见电子“碎片” .

波包说夸大了波动性一面, 抹杀了粒子性一面.

2. 疏密波(粒子)说: 认为波动是大量粒子分布在空间的一种疏密分布

实验否定: 电子一个个通过单缝, 长时间积累也出现衍射效应



疏密波说夸大了粒子性一面, 抹杀了波动性一面.

波或粒子? 波和粒子? 在经典框架内无法统一.

山重水复疑无路，柳暗花明又一村。一种崭新的观念和优美的数学方法悄然而生

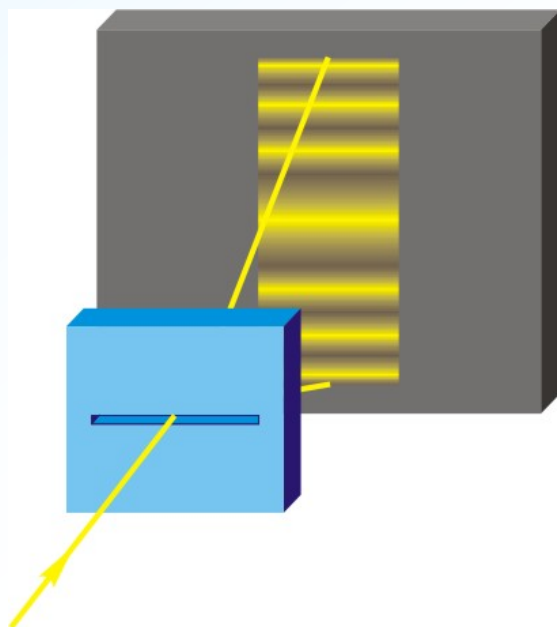
The Nobel Prize in Physics 1954

3. 概率波 (probability wave)

1926年Born提出粒子在空间位置出现的概率具有波动性的分布——**概率波**。



Max Born
(1882-1970)



光的衍射：光 — 光子流

$$E = h\nu, \quad I = Nh\nu \propto N$$

条纹明暗分布 —— 屏上光子数分布

强度分布曲线 —— 光子堆积曲线

设想：光强 $I \downarrow$, 光子一个个通过，光子是如何运动的？

起点，终点，轨道
均不确定

只能作概率性判断

亮纹：光子到达概率大

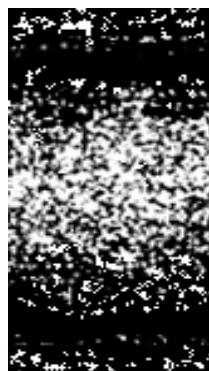
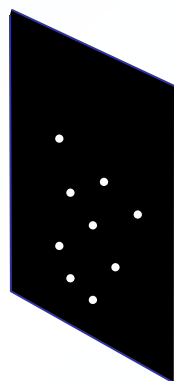
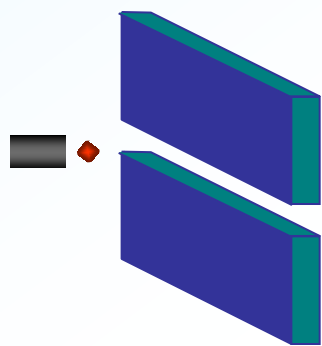
次亮纹：光子到达概率小

暗纹：光子到达概率为零

光强分布 —— 光子落点概率分布

“光子波” —— 概率波

类比：与实物粒子相联系的物质波 —— 概率波



强度大：电子到达概率大

强度小：电子到达概率小

零强度：电子到达概率为零

物质波的强度分布反映实物粒子出现在空间各处的概率

关键人物及其理论

- 玻尔半经典半量子化理论解释氢原子光谱
- 德布罗意物质波假设
- 戴维孙——革末实验
- J.P.汤姆孙实验
- 斯特恩氢分子衍射
-
- 玻恩提出概率波概念

复习: § 13.4~ § 13.6

练习: 思考题 14-9~ 14-13, 习题 14-12~ 14-18

预习: § 13.7