



1911年第一届索尔维会议



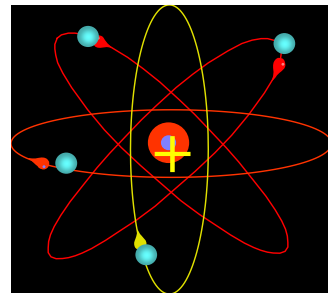
卢瑟福, E.

卢瑟福是约瑟夫·约翰·汤姆逊的学生

1911年提出原子有核模型

实验室被称为“诺贝尔奖得主的幼儿园”

- 1、绕核运动的电子不断辐射电磁波，
轨道半径随能耗而连续变小，
原子光谱应是连续光谱。



- 2、绕核运动的电子因轨道半径变小必迅速落入原子核。

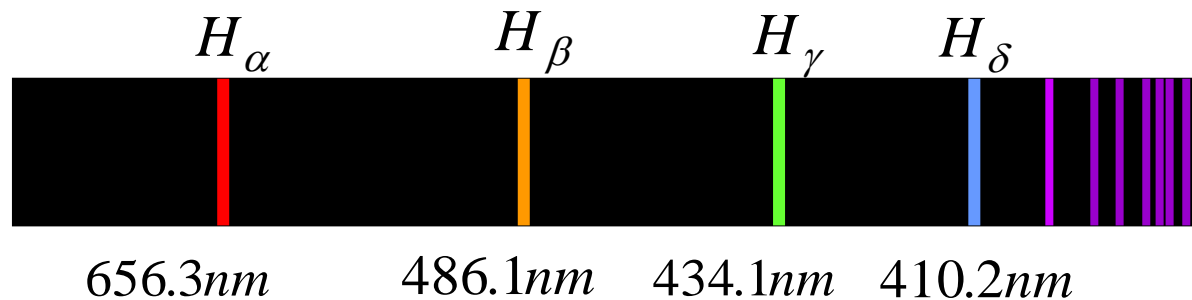
原子是不稳定的。 10^{-12}s

20世纪初经典物理在三个问题上陷入困境：

- 黑体辐射问题，即所谓“紫外灾难”
- 光电效应 康普顿效应
- 原子的稳定性和大小

21.4 玻尔氢原子理论

一、氢原子光谱的实验规律



尼尔斯.玻尔

1、巴耳末公式

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4} \quad B = 364.57nm \quad n = 3, 4, 5, 6, \dots$$

$$\text{波数: } \tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{n^2 - 4}{Bn^2} = \frac{4}{B} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$R = 1.096776 \times 10^7 m^{-1} \quad \text{里德伯常数}$$

2、里德伯公式

$$\tilde{\nu} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$m=1,2,3\ldots$

决定谱线系

$n=m+1, m+2\ldots$

决定各谱线系中的谱线

m	n	光 谱 系	区域	日期
1	≥ 2	莱曼 (<i>Lyman</i>) 系	紫外	1916年
2	≥ 3	巴耳末 (<i>Balmer</i>) 系	紫外,可见	1885年
3	≥ 4	帕邢 (<i>paschen</i>) 系	红外	1908年
4	≥ 5	布拉开 (<i>Brackett</i>) 系	红外	1922年
5	≥ 6	普丰德 (<i>Pfund</i>) 系	红外	1924年

二、玻尔氢原子理论

1. 玻尔氢原子假设 (1913)

(1) **定态假设** 原子系统只能处在一系列不连续的能量状态 E_1, E_2, E_3, \dots ($E_1 < E_2 < E_3 < \dots$)

(2) **跃迁假设** $\nu_{mn} = \frac{|E_n - E_m|}{h}$

(3) **量子化条件** 电子绕核运转的轨道角动量 L

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

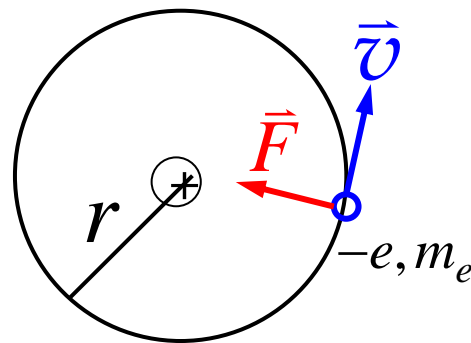
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1.0545887 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \text{约化普朗克常量}$$

2、氢原子轨道半径和能量的计算

(1) 定态轨道半径

$$\left\{ \begin{array}{ll} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = m_e \frac{v^2}{r} & \text{经典理论} \\ m_e v r = n \frac{h}{2\pi} & \text{量子理论} \end{array} \right.$$

$$r_n = n^2 \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m_e e^2} \quad (n = 1, 2, \dots)$$



结论：轨道半径是量子化的。

说明：(1) $n=1$ 时，第一玻尔轨道半径： $r_1 = 0.529 \times 10^{-10} m$

(2) 量子数为 n 的轨道半径为： $r_n = n^2 r_1$

(2) 定态能量

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m_e v^2 + \left(-\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \frac{1}{n^2}$$

$$n = 1: E_1 = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} = -13.6 \text{ eV}$$

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

负号的物理意义：氢原子中的电子被束缚在原子内

$$v = \frac{e^2}{2\epsilon_0 h n}$$

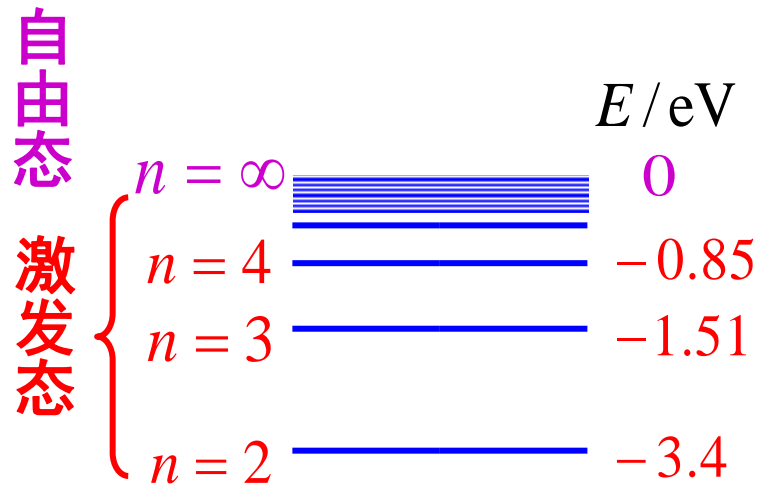
$$r = n^2 \frac{\epsilon_0 h^2}{\pi m_e e^2}$$

氢原子能级图

$$E_1 = -13.6 \text{ eV}$$

$$E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

$$n=1, 2, 3, \dots$$



结论： 能量是量子化的。

基态 $n=1$ _____ -13.6

1913年，玻尔在《哲学杂志》发表“伟大的三部曲”

THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[SIXTH SERIES.]

JULY 1913.

I. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*
By N. BOHR, Dr. phil. Copenhagen *.

Introduction.

IN order to explain the results of experiments on scattering of α rays by matter Prof. Rutherford† has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the

LXXIII. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*
By N. BOHR, Dr. phil., Copenhagen *.

PART III.—SYSTEMS CONTAINING SEVERAL NUCLEI †.

§ 1. *Preliminary.*

ACCORDING to Rutherford's theory of the structure of atoms, the difference between an atom of an element and a molecule of a chemical combination is that the first consists of a cluster of electrons surrounding a single positive nucleus of exceedingly small dimensions and of a mass great in comparison with that of the electrons, while the latter contains at least two nuclei at distances from each other comparable with the distances apart of the electrons in the surrounding cluster.

XXXVII. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*
By N. BOHR, Dr. phil. Copenhagen *.

PART II.—SYSTEMS CONTAINING ONLY A SINGLE NUCLEUS †.

§ 1. *General Assumptions.*

FOLLOWING the theory of Rutherford, we shall assume that the atoms of the elements consist of a positively charged nucleus surrounded by a cluster of electrons. The nucleus is the seat of the essential part of the mass of the atom, and has linear dimensions exceedingly small compared with the distances apart of the electrons in the surrounding cluster.

三、玻尔理论对氢原子光谱的解释

1、里德伯常数的计算

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^2} \quad \nu = \frac{E_n - E_m}{h}$$

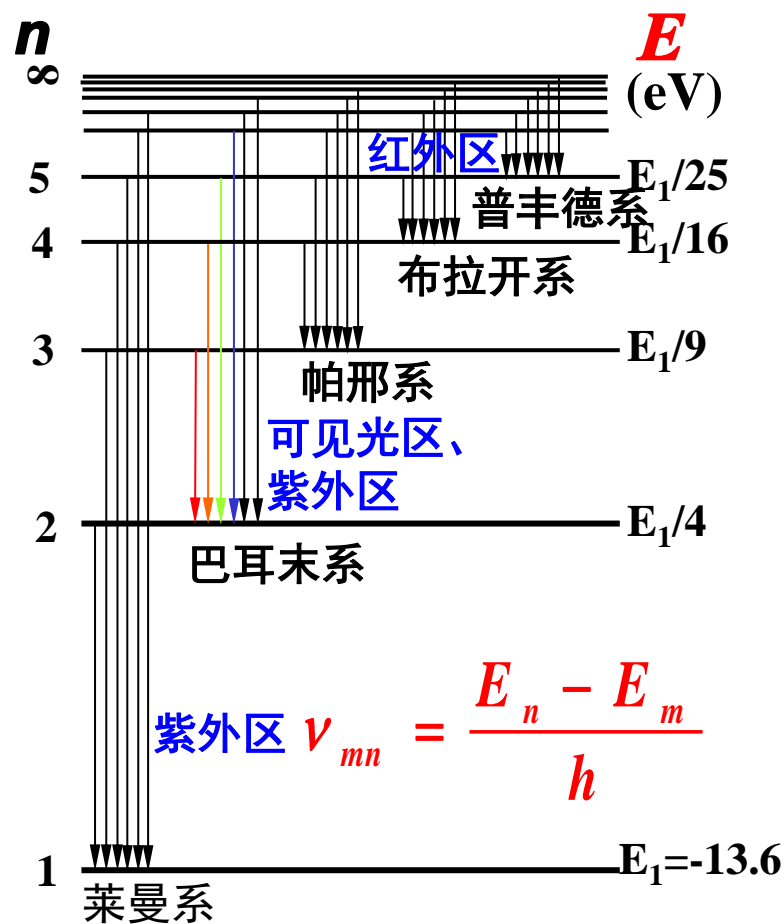
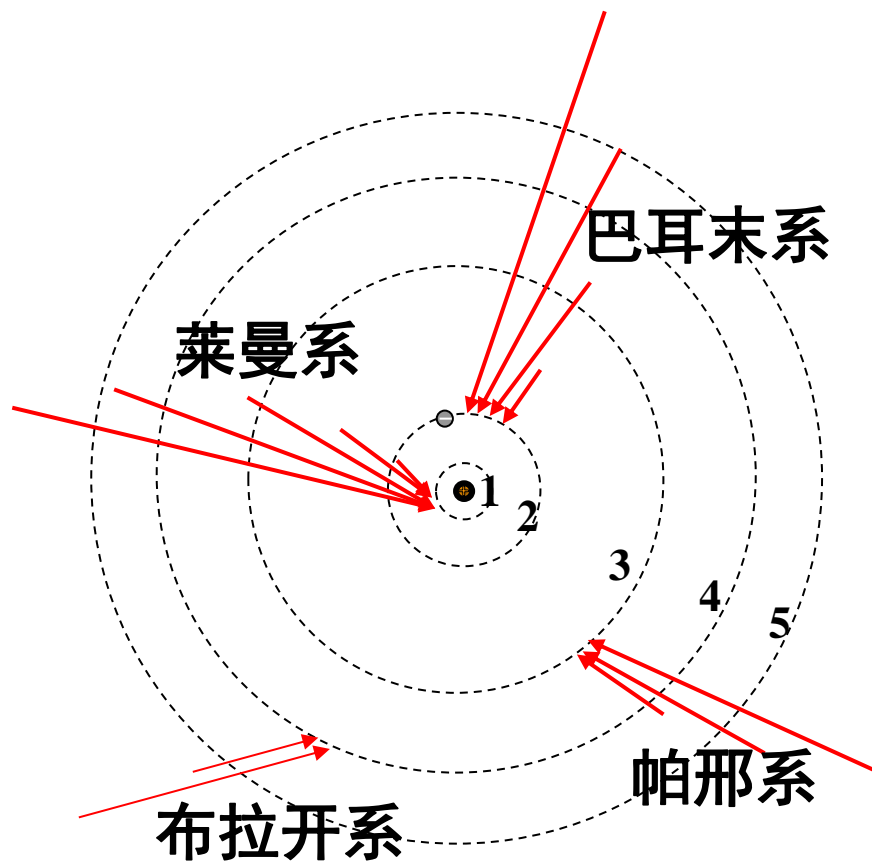
$$\nu_{nm} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$\frac{m_e e^4}{8\varepsilon_0^2 h^3 c} = 1.09737 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

氢原子光谱的里德伯公式

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad R = 1.096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

2 氢原子的能级跃迁



氢原子的能级跃迁及谱线系

讨论

大量处在**第4激发态**的氢原子向低能态跃迁时，可能产生的谱线条数是（ ）

A. 2条

B. 3条

C. 4条

 6条

例：求（1）氢原子巴耳末线系中能量最小的光子的波长

解：（1） 能量最小的光子从 $n=3$ 激发态到 $n=2$ 激发态跃迁

$$\begin{aligned}\Delta E_{\min} &= E_3 - E_2 = E_1 \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{2^2} \right) \\ &= -13.6 \text{ eV} \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{4} \right) = 1.89 \text{ eV}\end{aligned}$$

$$\Delta E_{\min} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E_{\min}} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{1.89 \text{ eV} \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot (\text{eV})^{-1}} = 0.66 \mu\text{m}$$

(2) 求巴耳末系的**极限波长**

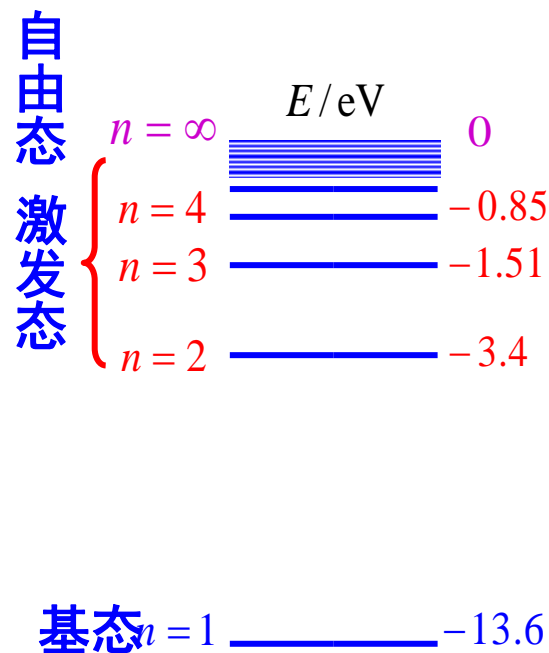
解：巴耳末系的极限波长对应于从
 $n = \infty$ 到 $n=2$ 的激发态跃迁

$$\begin{aligned}\Delta E_{\infty} &= E_{\infty} - E_2 = 0 - E_1 \cdot \frac{1}{2^2} \\ &= 13.6\text{eV} \times \frac{1}{4} = 3.40\text{eV}\end{aligned}$$

相应的波长

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E_{\infty}} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \times 3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{3.40\text{eV} \times 1.60 \times 10^{-19} \text{ J} \cdot (\text{eV})^{-1}} = 0.37 \mu\text{m}$$

氢原子能级图



四、弗兰克—赫兹实验



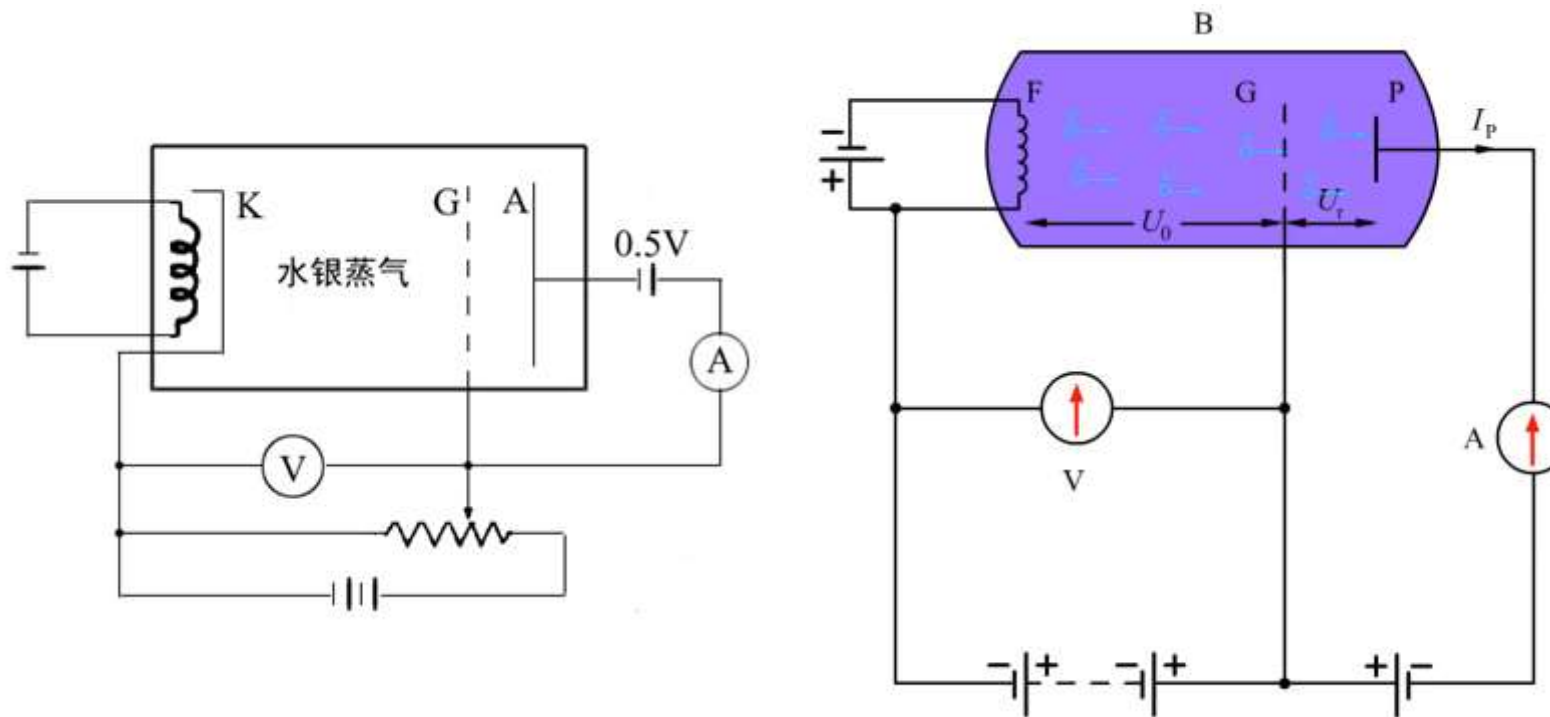
詹姆斯·弗兰克
1882年~1964年

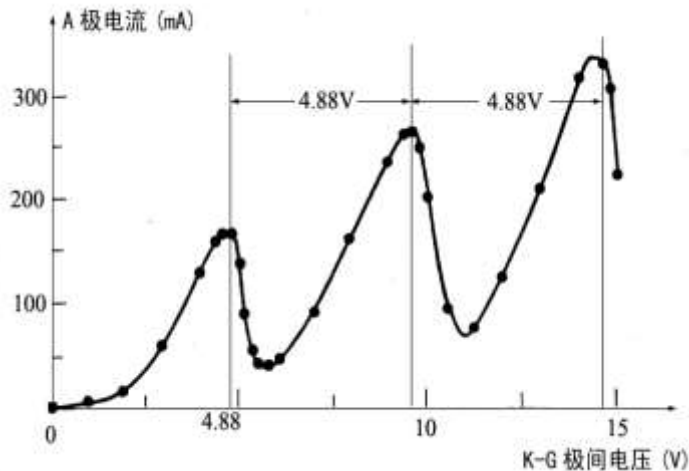


古斯塔夫·路德维希·赫兹
1887年-1975年

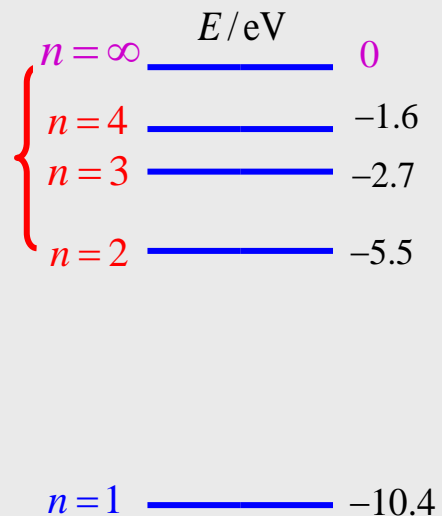
1914年，用电子轰击汞原子，将汞原子从低能级激发到高能级，从实验上第一次直接证实了原子能级的存在。

弗兰克—赫兹实验示意图





汞原子能级图



$$h\nu = h \frac{c}{\lambda} = \Delta E$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{4.9 \times 1.60 \times 10^{-19}} = 254.6(\text{nm})$$

弗兰克—赫兹实验的事实无可争议地证明了波尔氢原子理论的正确，在历史上对量子理论的建立有着重要意义，他们因此共同分享了1925年度诺贝尔物理学奖。

五、玻尔理论的成功与局限

成功： 解释了氢原子光谱，能成功地求出氢原子谱线的频率，推广到类氢原子也获得成功。

局限： 对复杂原子的光谱结构，计算的结果与实验值不符；无法计算谱线的强度、宽度和偏振等一系列问题。

原因： 是半经典半量子理论，还应用了经典物理的轨道和坐标的概念。





德布罗意

朗之万

1911年第一届索尔维会议

第22章 微观粒子的波动性和状态描述

22.1 德布罗意波

一、德布罗意假设(1924)

一切实物粒子都具有波粒二象性，与运动粒子相关联的波称为**物质波**。

二、德布罗意关系式

设静质量为 m_0 的粒子以匀速率 v 运动，则它具有的能量、动量分别为：

$$\begin{cases} E = mc^2 \\ p = mv \end{cases} \quad m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



德布罗意, L. V.
(1892-1987)

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

玻尔轨道上电子的德布罗意波经过一周后头与尾相接形成**驻波**，不辐射能量，电子的运动将处于**稳定状态**。

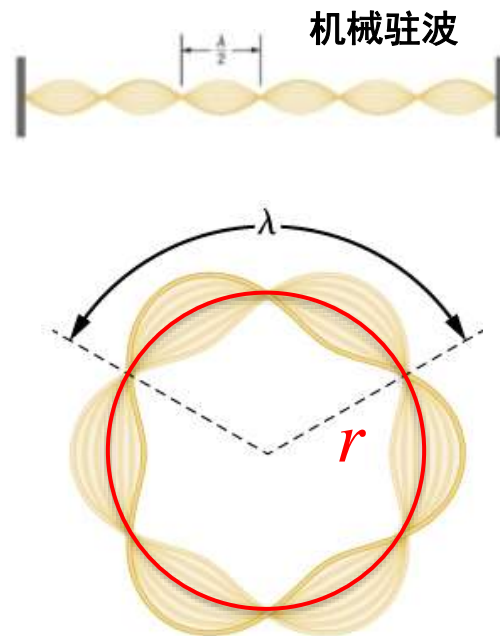
电子德布罗意波长 λ 形成**驻波**的条件：

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv} \quad r = n \frac{h}{2\pi mv}$$

$$L = mv r = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar$$

$$\therefore L = n\hbar$$

玻尔角动量量子化条件！



注意：

1. 德布罗意波只与**运动**粒子相联系 $E = mc^2 = h\nu$

若粒子处于**静止**状态，则： $E_0 = m_0c^2 \neq h\nu$

2. 物质波的**频率**对应**能量**，**波长**对应**动量**

$$\lambda \neq \frac{u}{\nu}$$

3. 在**低速的非相对论条件下** ($v \ll c$ 或 $E_k \ll m_0c^2$)

$$m \approx m_0 \quad \nu = m_0c^2 / h \quad \lambda = h / p = h / (m_0v)$$

例：一质量 $m_0 = 0.05\text{Kg}$ 的子弹， $v = 300\text{m/s}$ 。求：其物质波的波长。

解： $\because v \ll c \quad m \approx m_0$

$$\therefore \lambda = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6.63 \times 10^{-34}}{0.05 \times 300} \\ = 4.4 \times 10^{-35} \text{ m}$$

例：经过电压 U 加速后的电子的波长。

解： $eU = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{1.225}{\sqrt{U}} \text{ nm}$$

$U=1\text{V}:$ $\lambda = 1.225 \text{ nm}$

$U=100\text{V}:$ $\lambda = 0.1225 \text{ nm}$

$v = 5.9 \times 10^6 \text{ m/s}$



佩兰



朗之万



卡当

你的这些波怎么
用实验来验证？

用晶体对电子的衍射
实验是可以做到的

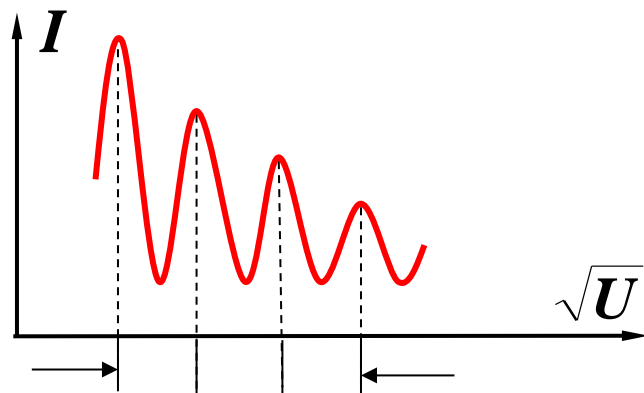


德布罗意

三、德布罗意波的实验验证

1927年戴维逊和革末利用晶体作了电子衍射实验。

用**电子束替代X射线**，做衍射实验，发现电子束也能产生衍射现象，并测得**第一级极强**的衍射角 $\theta = 50^\circ$ 。



若改变入射电子速度，相当于波长改变，电流出现周期性变化。

根据晶体衍射的布拉格公式：

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

$$\lambda = 2d \sin \varphi / k$$

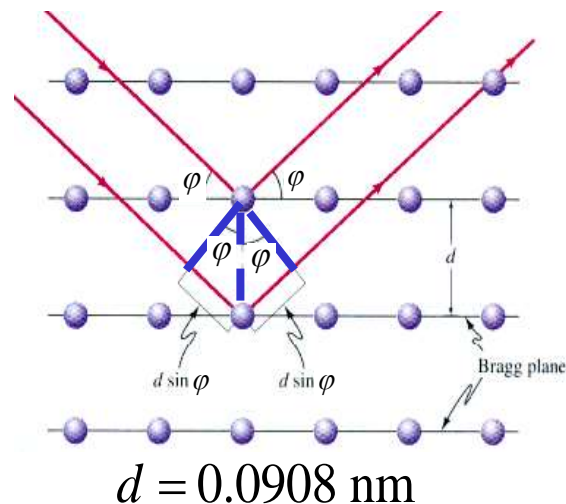
$$\lambda_{k=1} = 2d \sin \varphi = 0.165 \text{ nm}$$

按德布罗意公式推算：

具有动能 $E_k = 54 \text{ eV}$ 电子的德布罗意波长**理论值为**

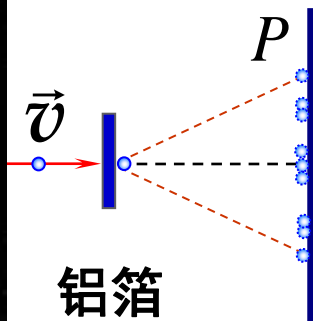
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2m_0 E_k}} = 0.167 \text{ nm}$$

显然，德布罗意公式与布拉格公式求得的波长基本一致，**该实验首次证实了电子具有波动性**。从而证实了德布罗意假设的正确性。

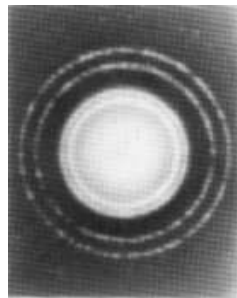


G.P.汤姆逊电子衍射实验(1927年)

用电子束通过金属片，结果发现，同X射线一样，也能得到清晰的电子衍射图样。



电子衍射



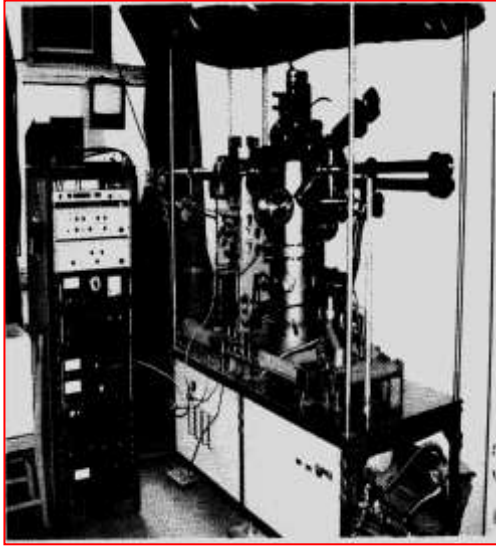
X射线衍射



路易斯·德布罗意因发现电子的波动性
而获得1929年诺贝尔物理学奖。



戴维逊和乔治·汤姆逊因实验上发现电子在晶体中的衍射现象共同获得1937年诺贝尔奖。



1932年德国人**鲁斯卡**成功研制了电子显微镜，
及其在电子光学上的成就获得1986年诺贝尔奖。



作业:

P211: 一.6 二. 6 ,7 三.5

P228:二.2 三.2