

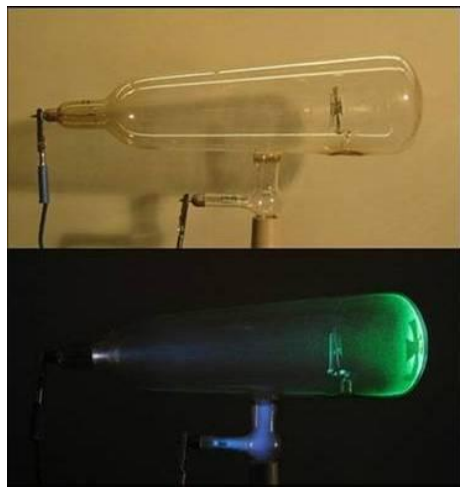
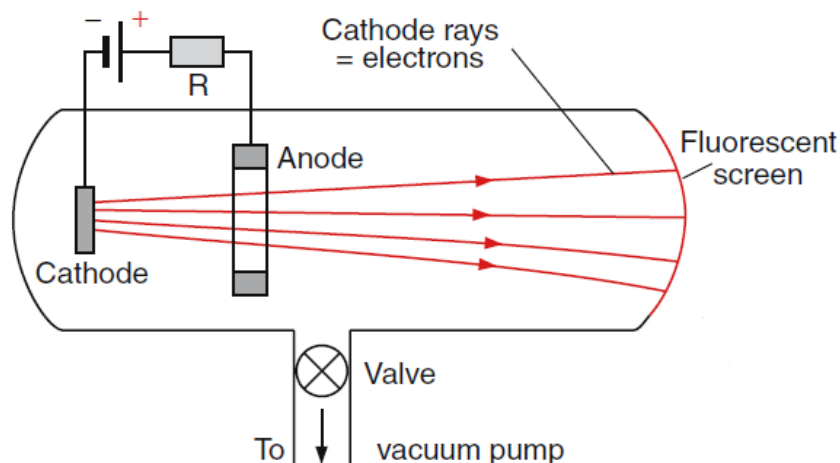
§ 1.2 电子—电子的发现



(1) 阴极射线的发现

19世纪末在研究气体放电现象时发现了阴极射线。

在低气压下($<1\text{mm}$ 汞柱), 发生辉光放电的同时, 发射阴极射线。



克鲁克斯管

争论: (1) 电磁波;
(2) 带电原子(即离子)。

§ 1.2 电子—电子的发现



(2) 阴极射线的性质

➤ 克鲁克斯(W. Crookes, 1832-1919)和列纳德(P. Lenard, 1862-1947)在19世纪末研究了这些射线的特性，发现射线沿直线传播、可以投射影子并且还携带充足的动量可使很轻的小转轮转动。



➤ 1895年，佩兰用验电器(electrometer)收集电荷证明射线带负电。

§ 1.2 电子—电子的发现



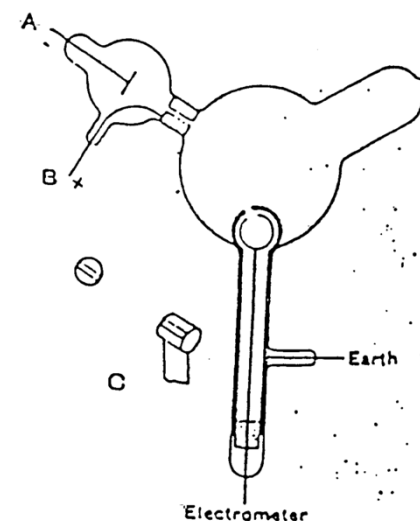
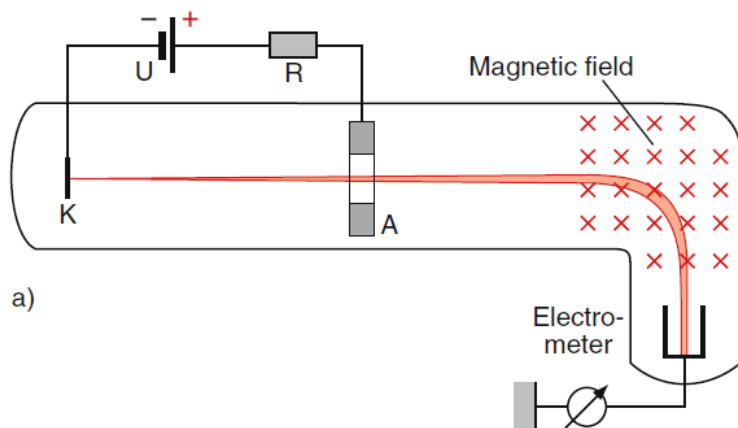
J.J. Thomson的实验

➤ 利用旋转镜法测量了速度， $1.9 \times 10^5 \text{ m/s} \ll \text{光速}$ 。

➤ 类似佩兰的验电器实验，证明带负电。



J. J. Thomson
(1856-1940)



争论: (1) ~~电磁波~~;
(2) 带电原子(即离子)?
新的带电粒子?

电荷量 q ? 质量 m ?

§ 1.2 电子—电子的发现

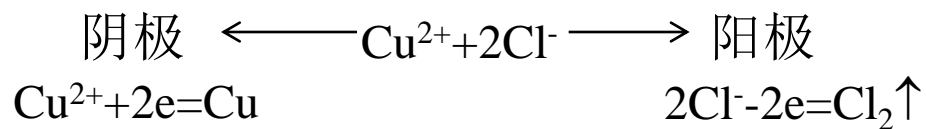
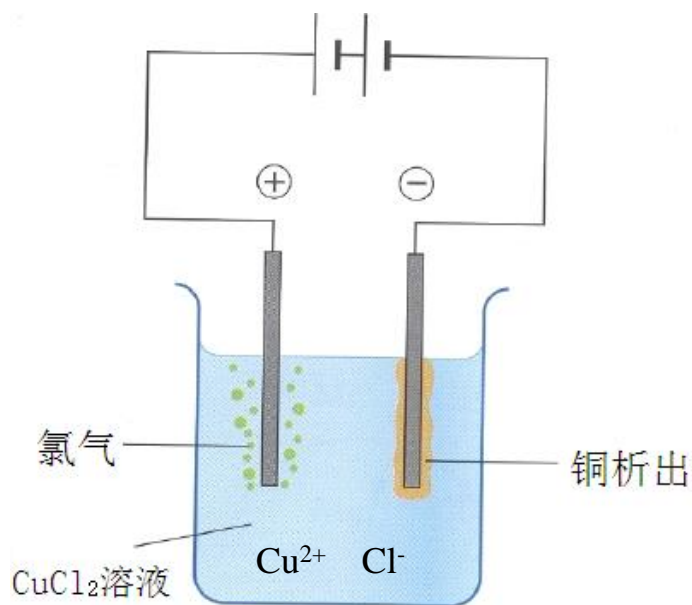


(3) 法拉第电解实验

当时，对带电粒子的了解基本上来自电解实验。



M. Faraday
(1791 -1867)



§ 1.2 电子—电子的发现



设电极上析出的物质质量为**M**，通过的电量为**q**，发现：

$$M \propto q$$

$$A' \leftrightarrow F$$

克当量 $A' = A / \nu$

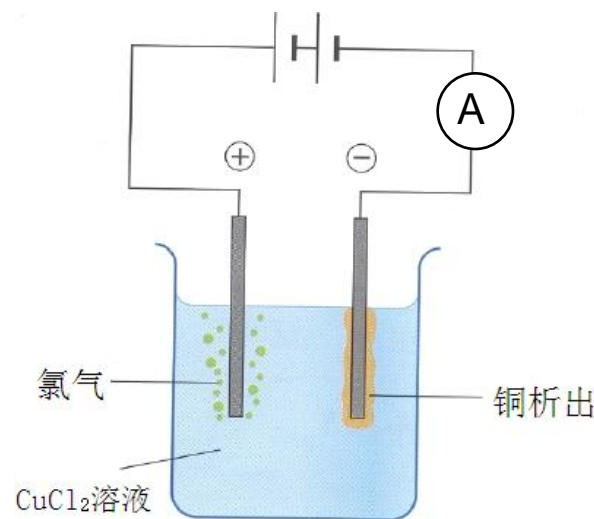
A是克原子量(1摩尔物质质量)， ν 是化学价。

$$F = 96484.6 \text{ C} = 1 \text{ 法拉第}$$

法拉第电解定律

电解**1克当量**的任何物质，所需的电量都相同，约为**96484.6 C**。

$$\text{有} \quad M = \frac{q}{F} A' = \frac{q}{F} \frac{A}{\nu}$$



§ 1.2 电子—电子的发现



若令 $\nu = 1$ ，即单价离子，则有： $A \leftrightarrow F$

析出1摩尔单价离子所需的电量为96484.6 C。



1摩尔任何单价离子所携带的总电量均为96484.6 C。

按照原子分子假说1摩尔任何物质，粒子数都是 N_A



有理由相信，每个单价离子所携带的电量均相等，设为 e 。

$$\text{且有： } e = F / N_A$$

而 ν 价的离子所携带的电量为 e 的整数倍，即 νe 。

§ 1.2 电子—电子的发现



"atom of electricity"

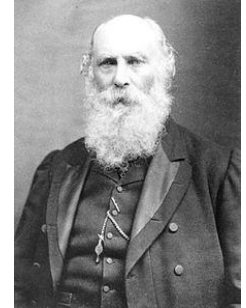
1874年，斯托尼利用按照分子运动论对 N_A 的估计值，推算出

$$e \sim 10^{-20} \text{ C}$$

并指出应将电解实验中一个单价离子所带的电荷量作为一个“基本电荷”。

1880年，亥姆霍兹指出， e 是一个不可分割的电荷单元，“电荷的原子”。

1891，斯托尼引入“electron”一词称谓“基本电荷”



G. J. Stoney
(1826 -1911)



H. Helmholtz
(1821-1894)

§ 1.2 电子—电子的发现



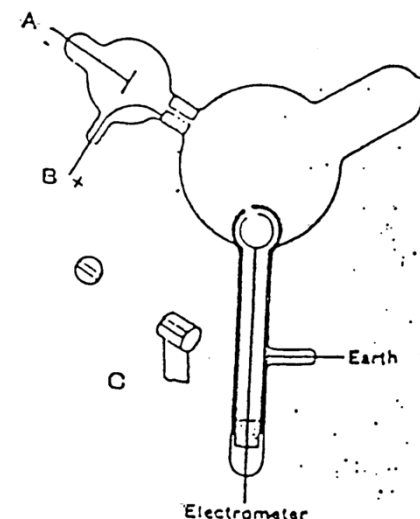
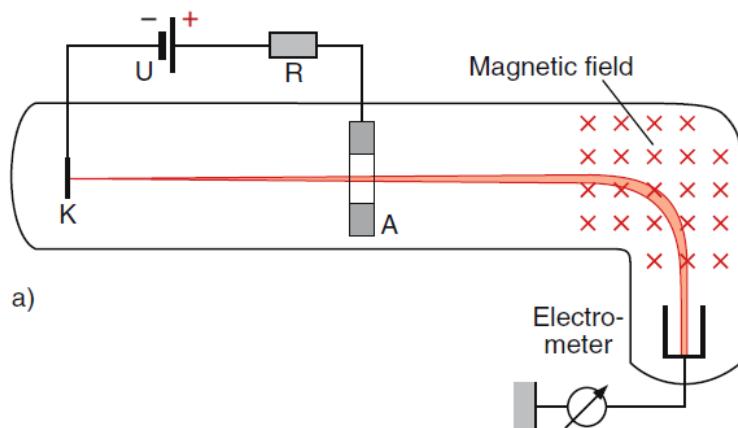
J.J. Thomson的实验

▶ 利用旋转镜法测量了速度， $1.9 \times 10^5 \text{ m/s} \ll \text{光速}$ 。

▶ 类似佩兰的验电器实验，证明带负电。



J. J. Thomson
(1856-1940)



争论: (1) ~~带电波~~;
(2) 带电原子(即离子)?
新的带电粒子?

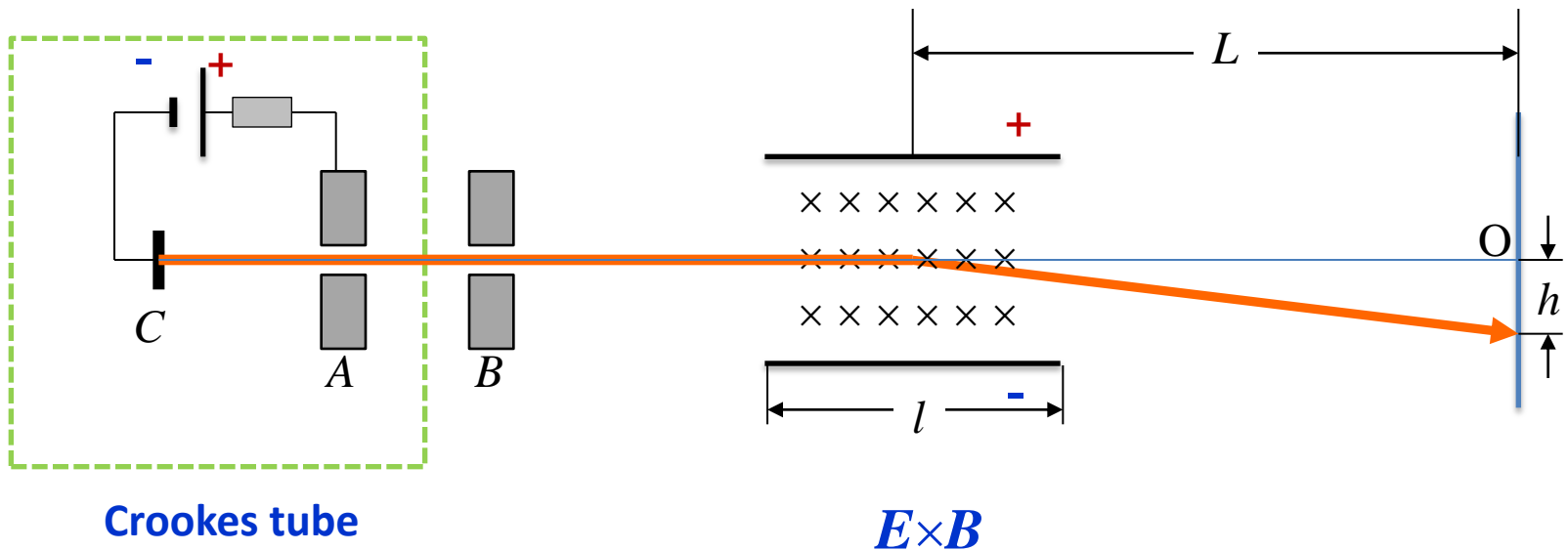
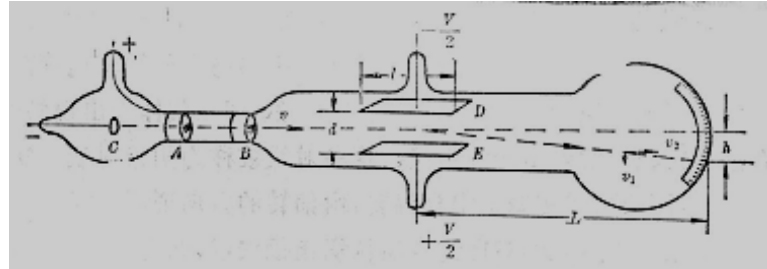
电荷量 q ? 质量 m ?

电荷质量比 q/m ?

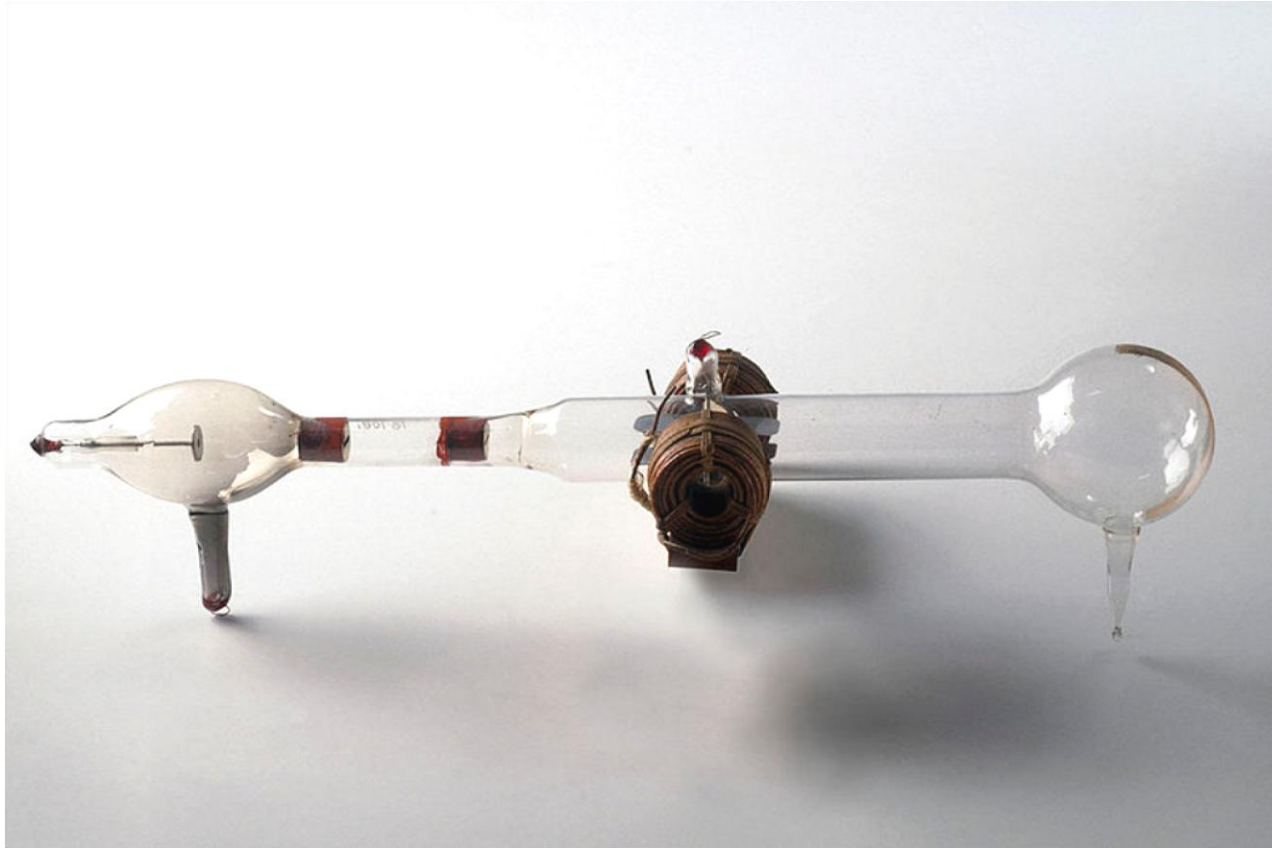
§ 1.2 电子—电子的发现



(4) J.J. Thomson 的荷质比 q/m 测量



(4) J.J. Thomson 的荷质比 q/m 测量

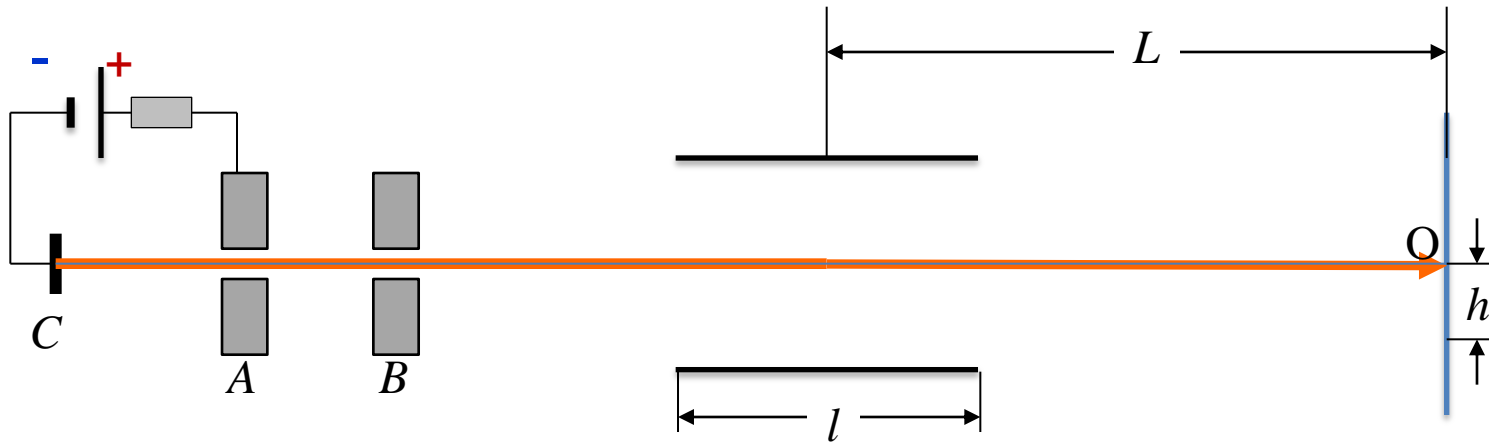


J J Thomsons cathode ray tube with magnet coils, 1897

§ 1.2 电子—电子的发现



(4) J.J. Thomson 的荷质比 q/m 测量

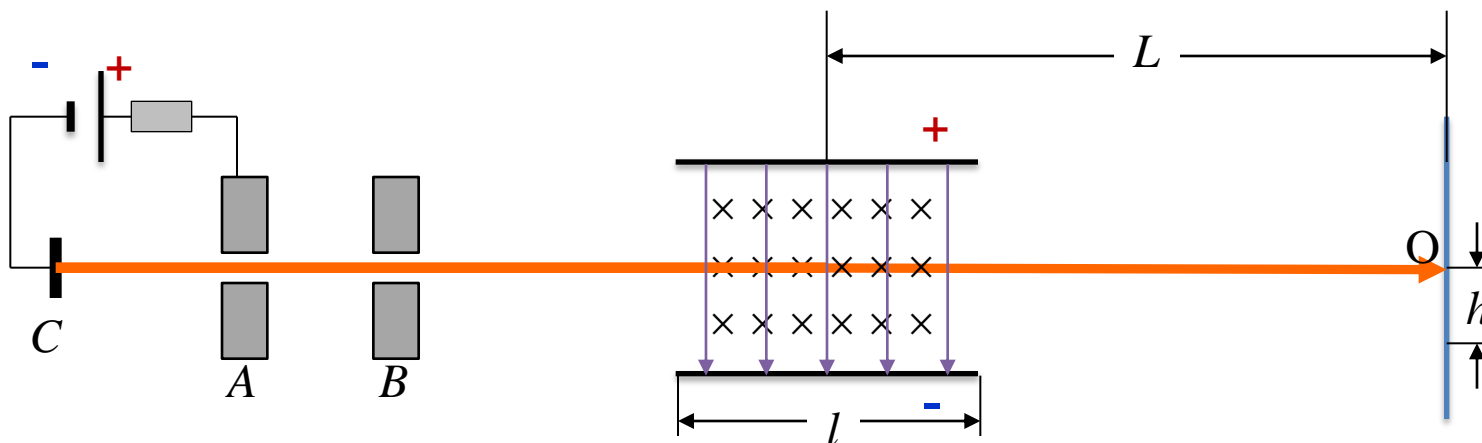


$E = 0, B = 0$ 射线打在标尺的零点

§ 1.2 电子—电子的发现



(4) J.J. Thomson 的荷质比 q/m 测量

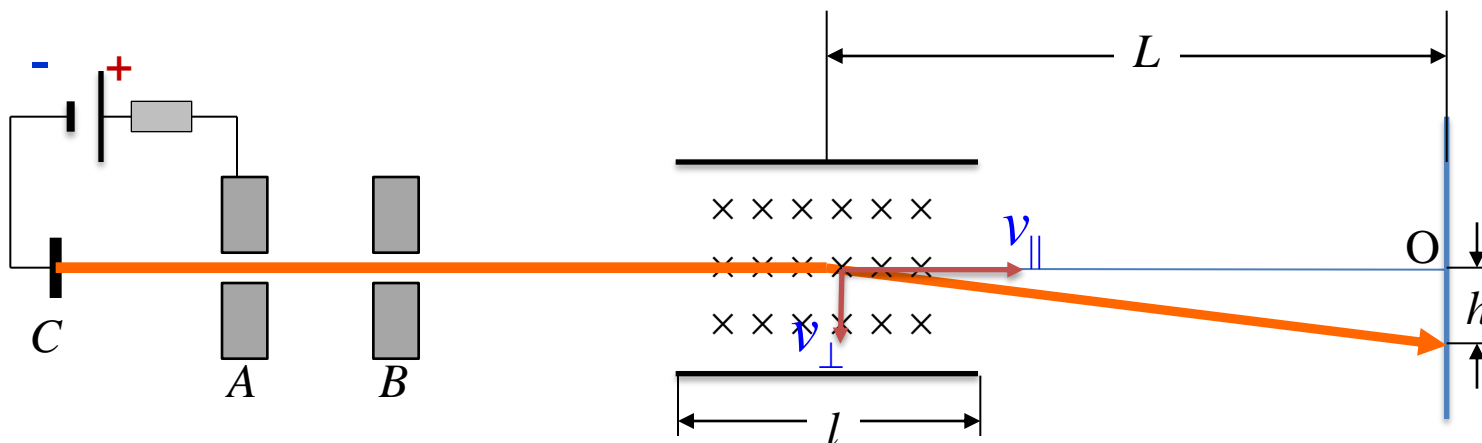


$E \neq 0, B \neq 0$ 加上垂直纸面向里的**磁场**和由上而下的**电场**，调节大小，使电场力和磁场力抵消，射线仍然打在零点。

$$\left. \begin{array}{l} F_E = qE \\ \parallel \\ F_B = qvB \end{array} \right\} v = E / B = v_{\parallel} \quad v \text{ 是阴极射线粒子的速度}$$



(4) J.J. Thomson 的荷质比 q/m 测量



$E = 0, B \neq 0$ 撤掉电场，只加磁场，射线向下偏转，偏转量为 h 。

经过偏转板，粒子获得垂直速度：
$$v_{\perp} = at = \frac{qv_{\parallel}B}{m} \frac{l}{v_{\parallel}} = \frac{qlB}{m}$$

所以
$$\frac{h}{L} = \frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} = \frac{qlB}{m} \frac{1}{B} = \frac{qlB^2}{mE} \quad \Rightarrow \quad \frac{q}{m} = \frac{hE}{lLB^2} = \frac{hV}{dlLB^2}$$



§ 1.2 电子—电子的发现

(4) J.J. Thomson 的荷质比 q/m 测量

1897年, J.J. Thomson测量结果:

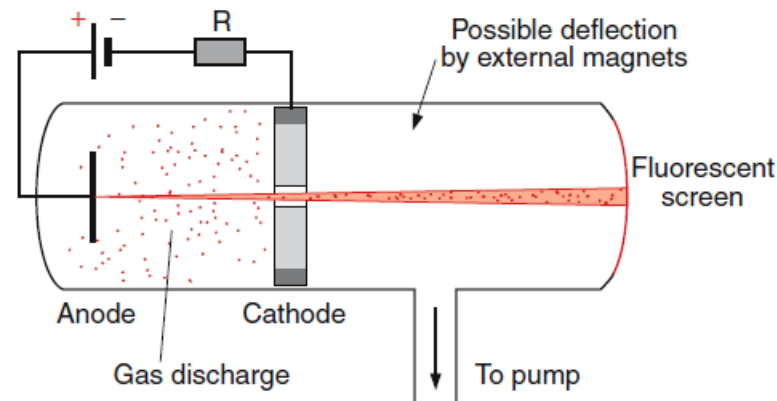
$$q/m=7.6\times 10^{10} \text{ C/kg}$$

现代值

$$q/m=1.759\times 10^{11} \text{ C/kg}$$

带电原子(离子)的荷质比, 如 H^+

$$q/m_H=9.57\times 10^7 \text{ C/kg} \sim 1/1000(q/m)$$

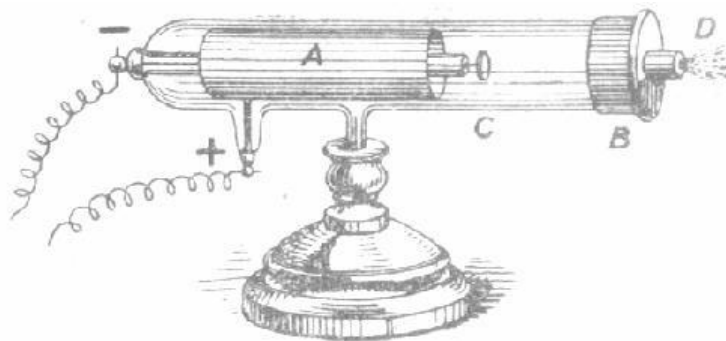


阳极射线管

阴极射线粒子

带有千倍基本电荷 e 的负带电原子。

全新的粒子，带 $-e$ 电荷，质量是氢原子的千倍。



P. Lenard
(1862 -1947)

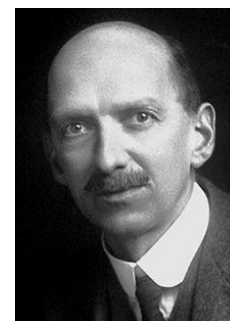
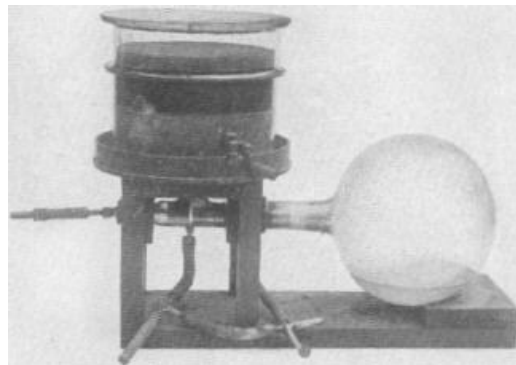
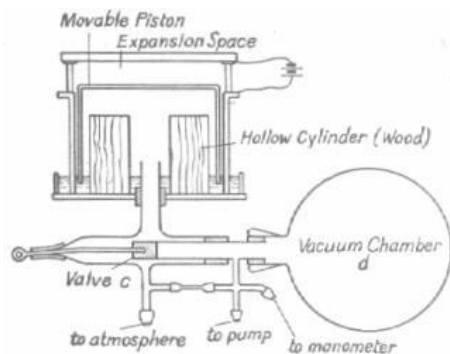
1893年，列纳德在阴极射线末端镶嵌了一块 μm 厚度的铝箔作窗口，发现射线可以穿透，并使几厘米外的荧光屏发光。

阴极射线粒子是一种全新的粒子，所带的电荷量与H正离子的电荷量大小相等而符号相反，即 $-e$ ，而其质量是H原子质量的约千分之一，这就是“电子”。



获得了1906年诺贝尔物理奖

§ 1.2 电子—电子的电荷量(基本电荷 e 的测量)



C. Wilson
(1869-1959)



J.S. Townsend
(1868-1957)

1899年，Thomson和他的学生汤森德和威尔逊利用威尔逊刚刚开始研制的云室，测量了基本电荷 e 。

离子穿过云室中的过饱和蒸汽，在其路径上形成大量的雾滴，测定了雾滴的数目和总电量，就可以确定 e 的值。但这样得到的电荷值只是大量离子电荷的平均值。

§ 1.2 电子—电子的电荷量(基本电荷 e 的测量)

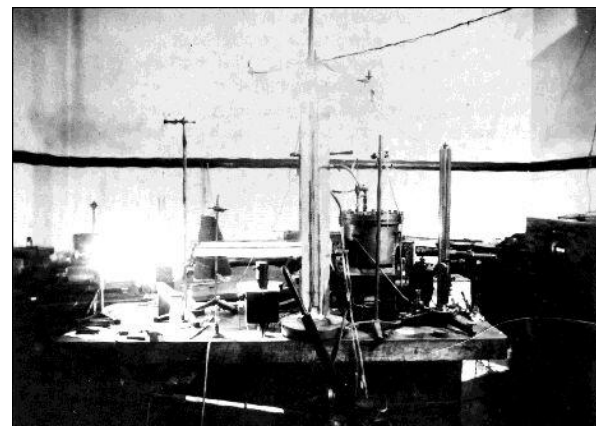
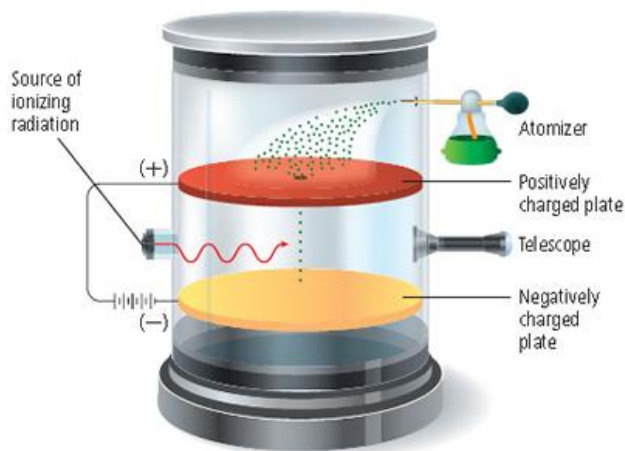
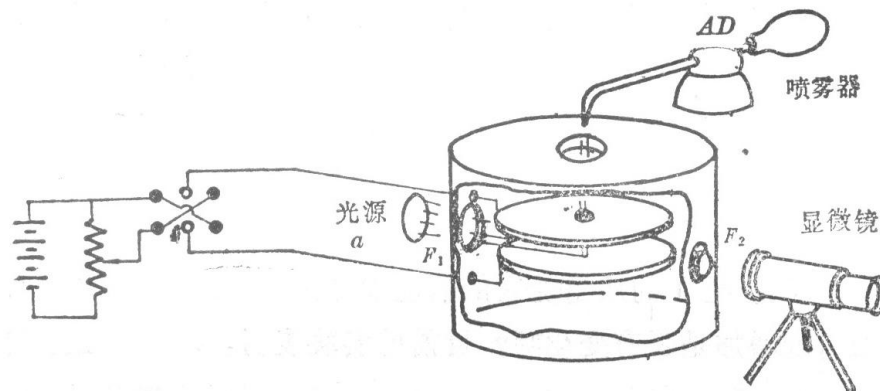


密立根油滴实验

Millikan, The isolation of an Ion, a Precision Measurements of its Charge, and the Correction of Stokes's Law, Science 30 (1910) 436-448



R. A. Millikan
(1868-1953)



§ 1.2 电子—电子的电荷量(基本电荷 e 的测量)



密立根油滴实验

跟踪一个油滴，设油滴半径 r ，密度 ρ ；空气密度 ρ_0 ，粘滞系数 η 。

① 电容器上不加电压。

Stokes定律 $F_{\text{阻}} = 6\pi\eta r v$

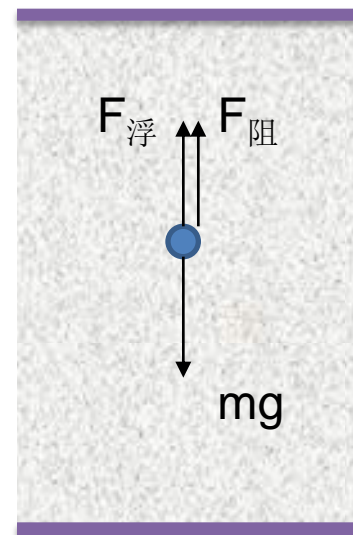
v 是下降速度

达到平衡时，油滴达到一个收尾速度 v_g

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g = 6\pi\eta r v_g + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_0 g$$

测量收尾速度 v_g ，得到

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_g}{2(\rho - \rho_0)g}}$$



密立根油滴实验

设油滴带负电荷 e_k

- ② 电容器上加电压 $+V$ ，电容器板间距为 l 。
油滴在电场力的作用下会掉头往上运动。

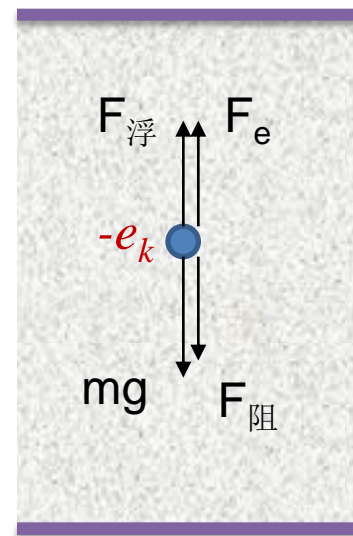
$$\text{电场力} \quad F_e = e_k \frac{V}{l}$$

达到平衡时，油滴达到一个收尾速度 v_e

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g + e_k \frac{V}{l} = 6\pi\eta r v_e + \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g$$

测量收尾速度 v_e ，得到

$$e_k = \frac{l}{V} \left[6\pi\eta r v_e + \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho - \rho_0) g \right] = \frac{6\pi\eta r l}{V} (v_e + v_g)$$



§ 1.2 电子—电子的电荷量(基本电荷 e 的测量)



$$e_k = ne$$

最初测量值:

$$e = 1.591 \times 10^{-19} \text{C}$$

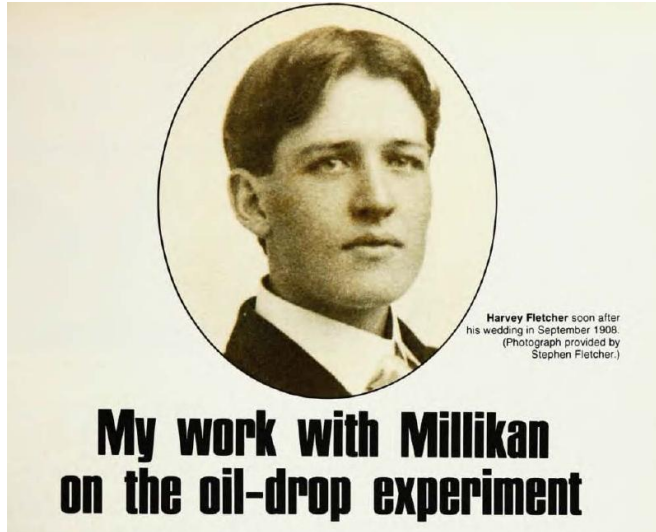
1929年, 发现1%误差来自粘滞系数 η

修正后: $e = 1.601 \times 10^{-19} \text{C}$

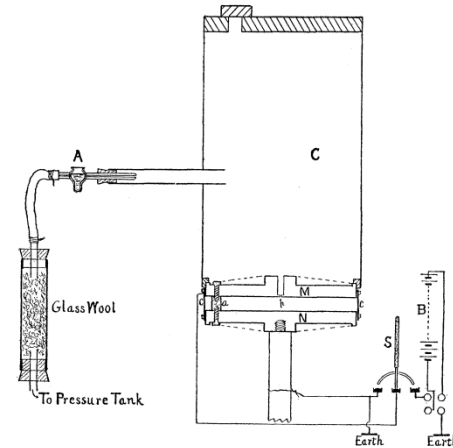
现代值: $e = 1.602176462(63) \times 10^{-19} \text{C}$

	$G \text{ sec.}$	$F \text{ sec.}$	n	$e_n \times 10^{10}$	$e_1 \times 10^{10}$	
$G = 22.28$ $V = 7950$	22.8	29.0	7	34.47	4.923	
	22.0	21.8	8	39.45	4.931	
	22.3	17.2	9	44.42	4.936	
	22.4	—				
	22.0	17.3				
	22.0	17.3	10	49.41	4.941	
	22.0	14.2				
$V = 7920$ $G = 22.80$	22.7	21.5	8	39.45	4.927	
	22.9	11.0	12	59.12		
	22.4	17.4	9	44.42		
	22.8	14.3	10	49.41		
	22.8	12.2	11	53.92		4.902
	22.8	12.3				
	23.0	—	10	49.41		4.941
22.8	14.2					
$F = 14.17$	—	—	10	49.41	4.941	
22.8	14.0					

§ 1.2 电子—电子的电荷量(基本电荷 e 的测量)



...I went out to the drug store that afternoon and bought an atomizer and some watch oil. Then I came back to the laboratory and set up the following apparatus:



... I saw a most beautiful sight. The field was full of little starlets....

Millikan, The isolation of an Ion, a Precision Measurements of its Charge, and the Correction of Stokes's Law, Science 30 (1910) 436

意义:

- (1) 直接测量了基本电荷量 e ;
- (2) 直接证明了电荷的原子化(量子化), 即总是基本电荷量的整数倍。

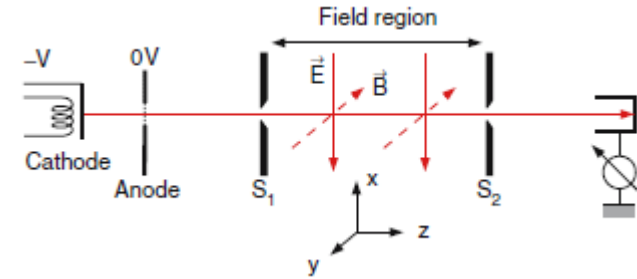


获得了1923年诺贝尔物理奖



§ 1.2 电子—电子的电荷量(基本电荷 e 的测量)

$$e/m = 1.758820174 \times 10^{11} \text{ C/kg}$$



$$e = 1.602176462(63) \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9.10938188(72) \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.510998902(21) \text{ MeV}/c^2$$

$$M_H \approx m_p = 1.67262158 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$m_e / M_H \approx 1/1836.15$$

复合常数

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44 \text{ eV} \cdot \text{nm}$$

电子的大小:

电子的经典半径(Lorentz半径):

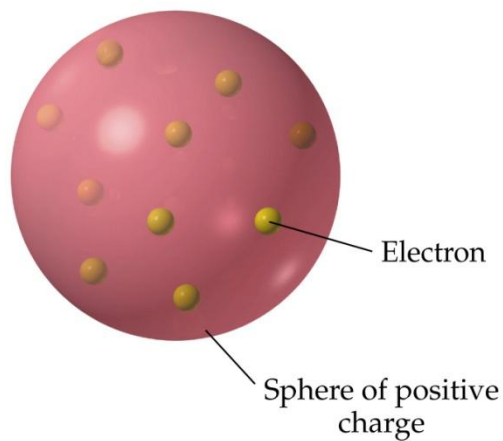
$$m_e c^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_c} \quad \rightarrow \quad r_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e c^2} = 1.44 \text{ eV} \cdot \text{nm} \frac{1}{0.511 \text{ MeV}} \\ \sim 2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$$

量子电动力学(QED)假设电子是点粒子。高能正、负电子对撞实验表明, 到目前为止, 电子在 10^{-18} m 范围外仍可以看作是点粒子。

§ 1.2 电子—Thomson原子模型

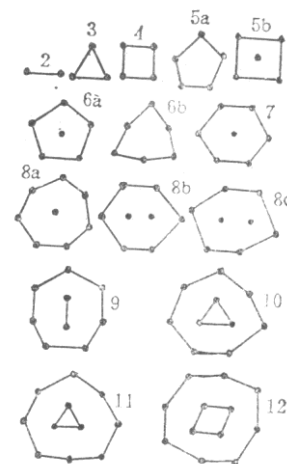


plum-pudding model



Thomson原子模型

原子中带正电($+Ze$)的物质均匀分布在整个原子空间 ($r \approx 10^{-10} \text{m}$)，而 Z 个电子则处在原子球内的平衡位置上。



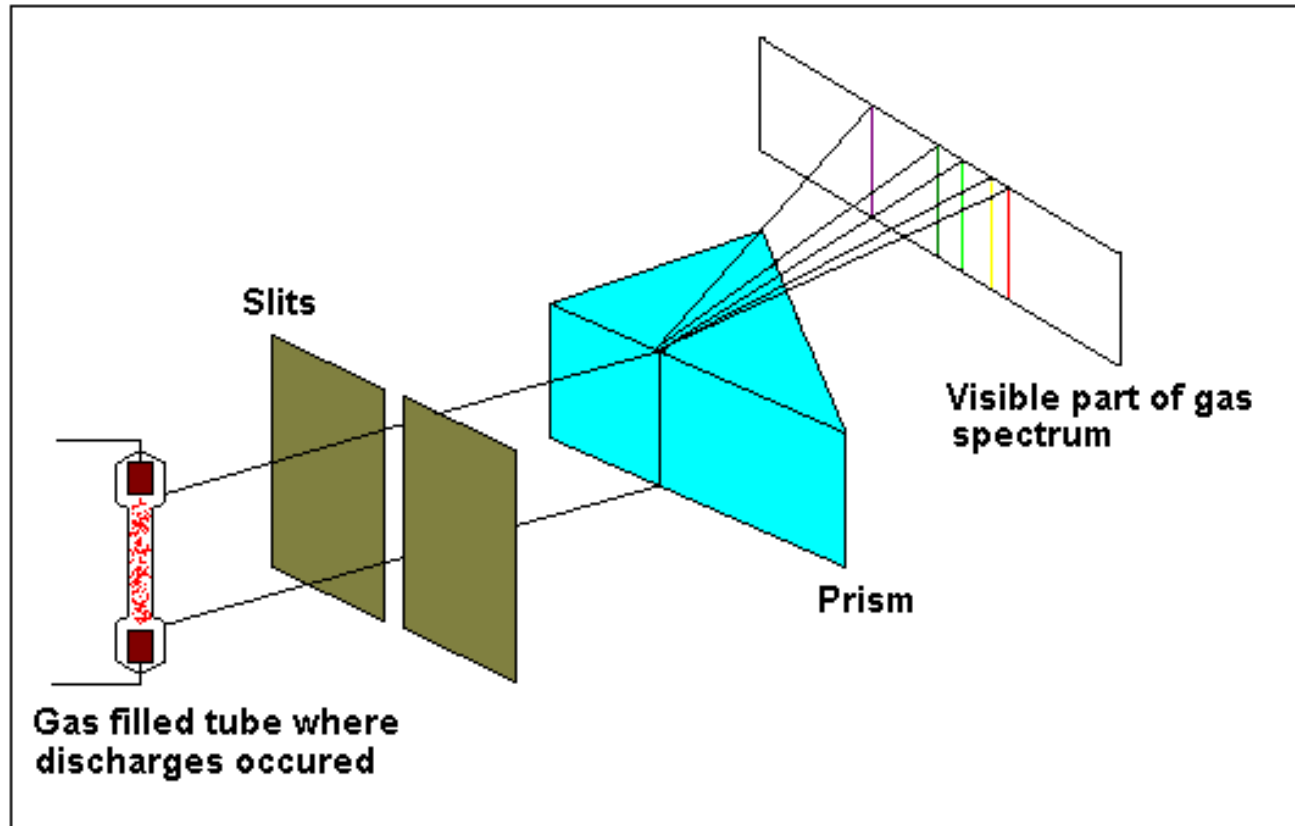
电子围绕原子中心作简谐振动，辐射电磁波。

- (1) 原子的电中性；
- (2) 稳定性；
- (3) 定性解释辐射特性。

§ 1.2 电子—Thomson原子模型



19世纪中叶，基尔霍夫和本森等人发展了光谱分析技术。

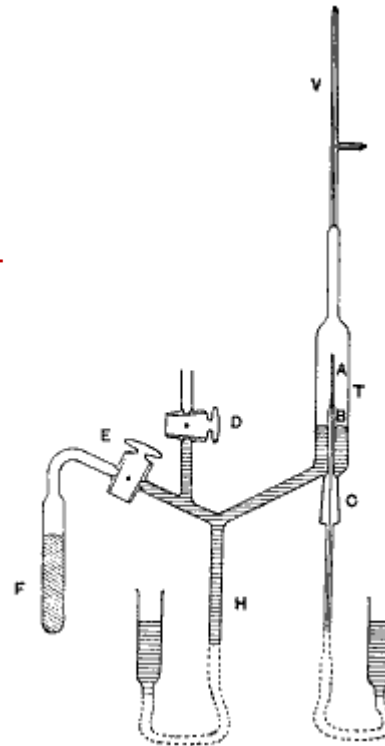
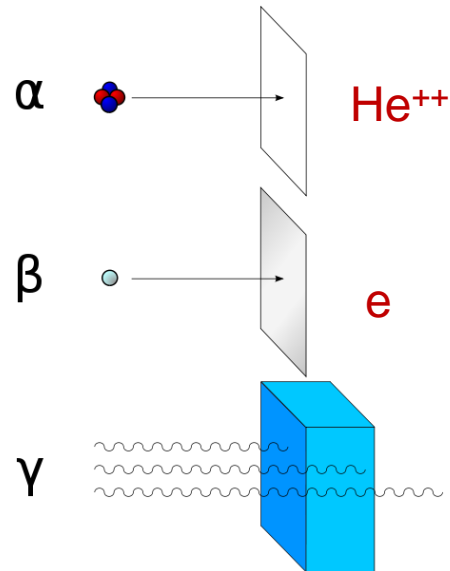
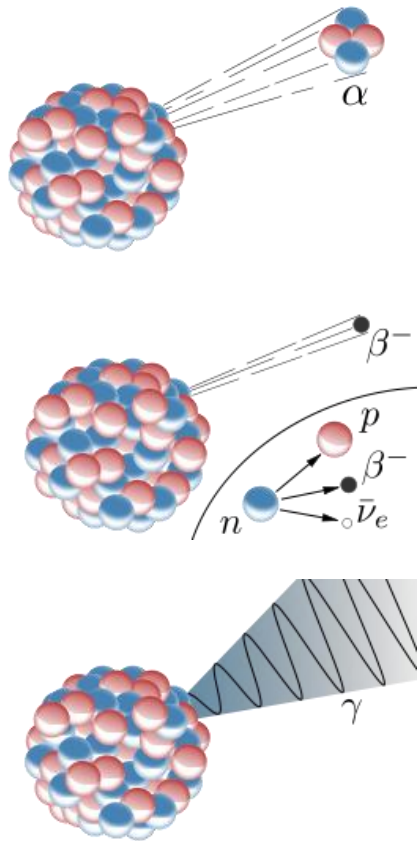


Discharges in the low - pressure gas filled tube are sources of light, which undergo refraction on a prism. We see the line spectrum of the gas.

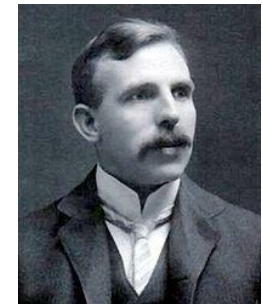
§ 1.3 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型-- α 粒子散射实验



1896年，贝克勒尔发现了放射性现象。



H. Becquerel
(1852-1908)



E. Rutherford
(1871-1937)



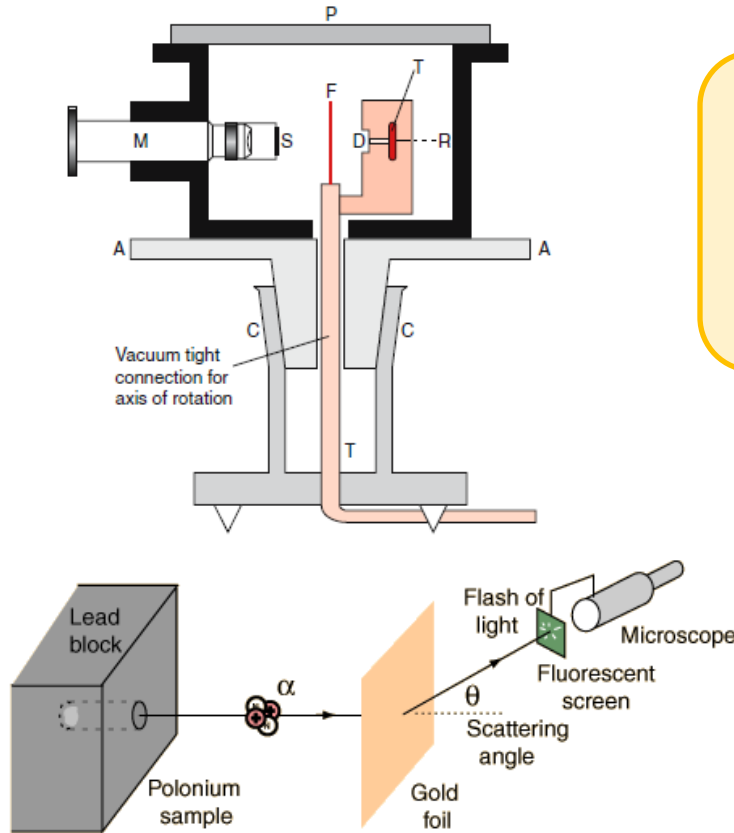
The Nobel Prize in Chemistry 1908

"for his investigations into the disintegration of the elements, and the chemistry of radioactive substances"

§ 1.3 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型-- α 粒子散射实验



1909年，卢瑟福和他的助手盖革和马斯登做了 α 粒子与铂箔(μm)的散射实验。



结果：绝大部分 α 粒子几乎直接穿透，但有约1/8000的 α 粒子散射角度大于 90° 。

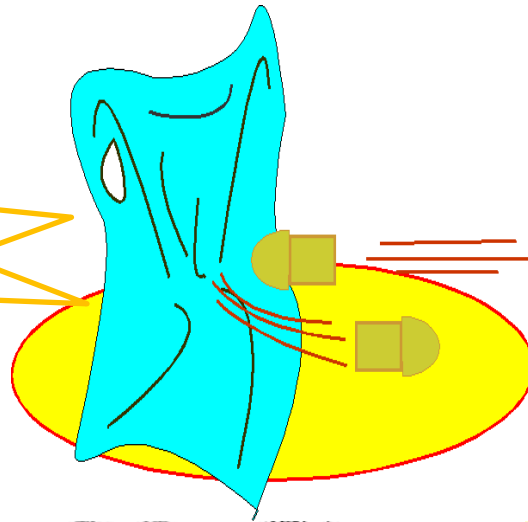
Geiger H. & Marsden E. (1909). "On a Diffuse Reflection of the α -Particles". Proceedings of the Royal Society, Series A 82: 495-500

§ 1.3 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型-- α 粒子散射实验

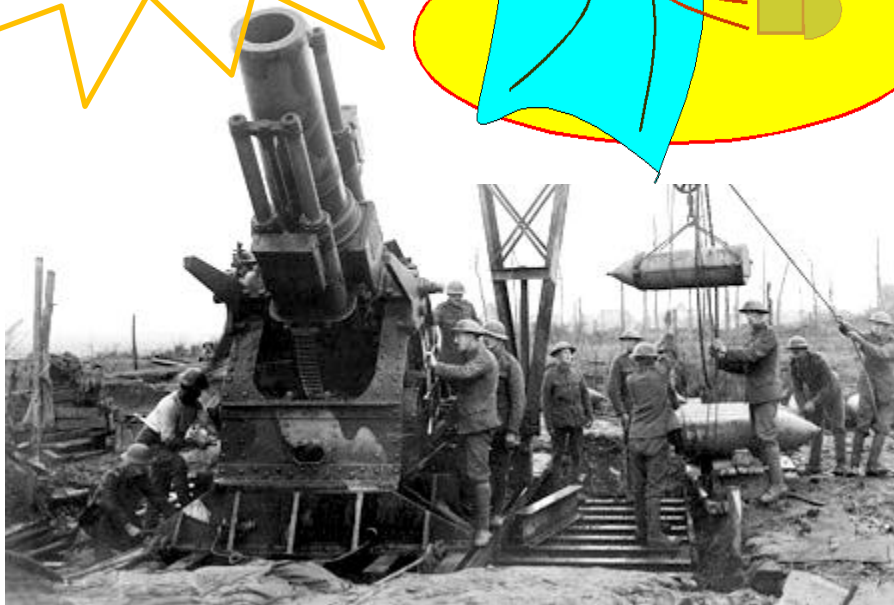


“It was quite the most incredible event that has ever happened to me in my life. It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.”

Why?



—Ernest Rutherford



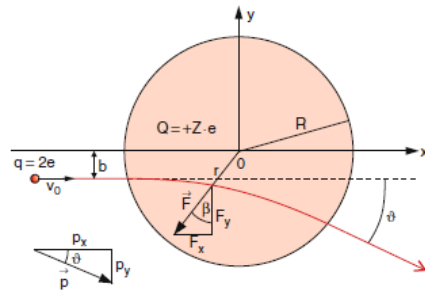
§ 1.3 α 粒子散射实验和卢瑟福原子模型-- α 粒子散射实验



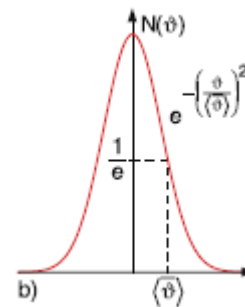
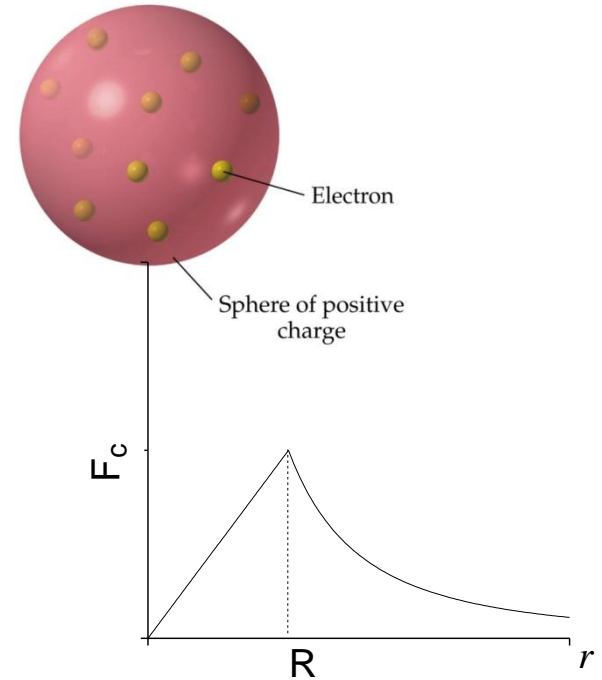
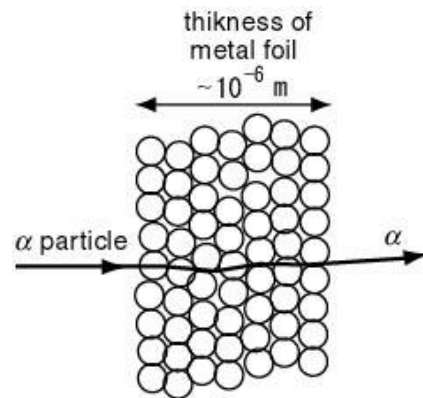
[例] 设入射 α 粒子的能量为5MeV，散射体是厚度为 $1\mu\text{m}$ 的铂箔，利用Thomson模型估计散射 α 粒子的偏转角，以及发生大于 90° 散射的概率。

解：(略)。

单次散射



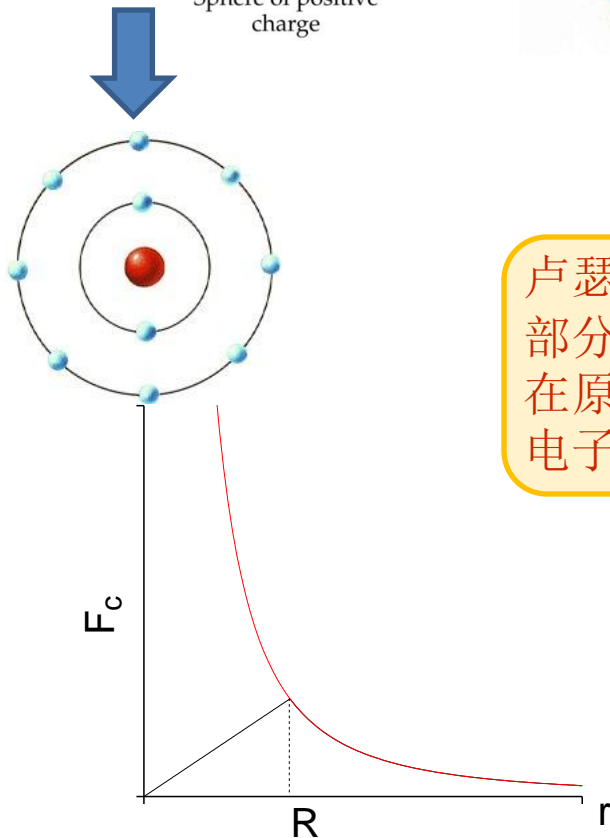
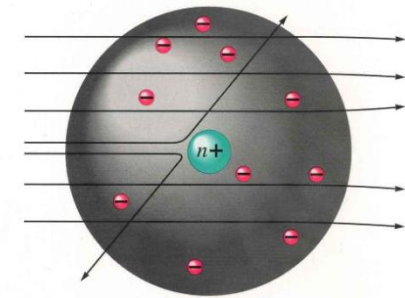
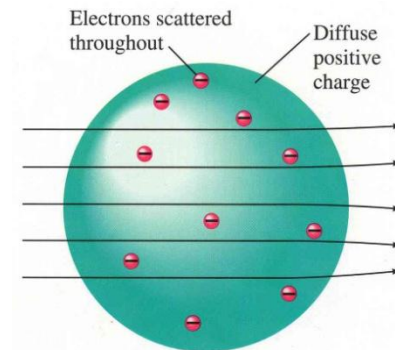
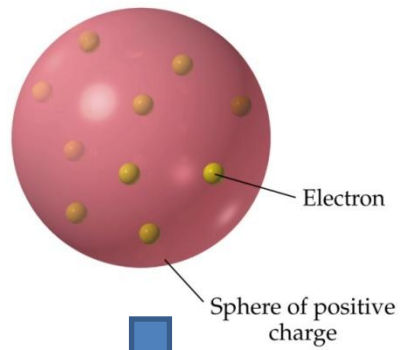
多次散射



大于 90° 散射的概率 $\sim 10^{-2000} = 0$

发生大角度散射几乎不可能！！

§ 1.3.2 卢瑟福原子模型和散射公式--卢瑟福原子模型



卢瑟福原子模型(核式模型): 原子中带正电部分不是均匀分布在原子内, 而是集中在原子中心很小的区域内, 被称为原子核, 电子围绕在原子核外。

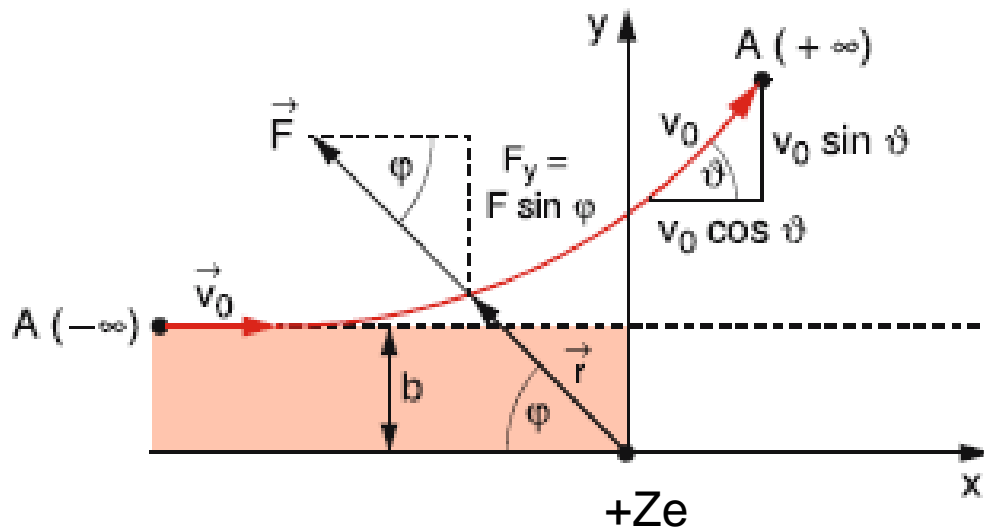
§ 1.3.2 卢瑟福原子模型和散射公式--库仑散射公式



- 假设：(1) 忽略核外电子的作用 ($m_e \ll m_\alpha$)；
(2) 只有库仑相互作用；
(3) 靶核静止 ($M \gg m_\alpha$)。

单次散射

设靶原子核的质量为 M ，具有 $+Ze$ 。质量为 m_α (推导过程中略去下标)，能量为 E ，带有 $+2e$ 正电荷的 α 粒子以初始速度 v_0 从无穷远处以瞄准距离 b 入射靶原子核，并散射到 θ 角方向无穷远处。



E. Rutherford, *The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom*, Philosophical Magazine. Series 6, vol. 21. May 1911

§ 1.3.2 卢瑟福原子模型和散射公式--库仑散射公式

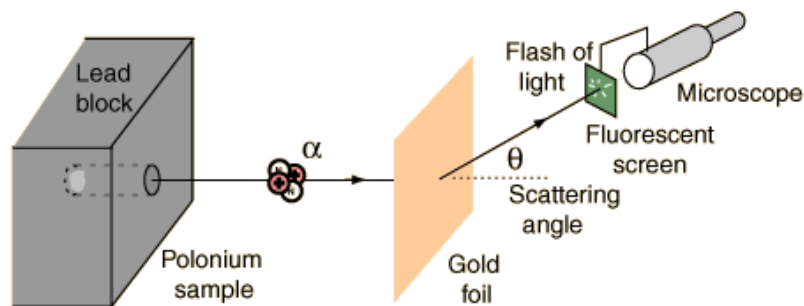


库仑散射公式

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{2b}{D}$$

其中 $D = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \left(\frac{2Ze^2}{\frac{1}{2}mv_0^2} \right) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{E}$ 库仑散射因子

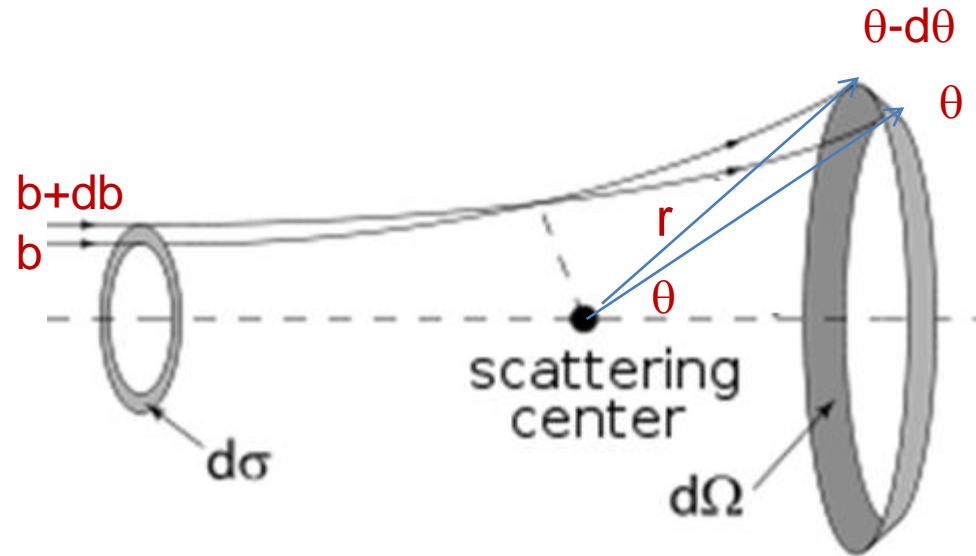
散射公式含有实验上无法测量的量**b**。



实验上测量的是：对应一定数目 n 的入射 α 粒子，散射到角度 θ 方向上，探测器所张的立体角 $d\Omega$ 内的粒子数 dn 。散射的概率

散射的概率 $\frac{dn}{nd\Omega}$

§ 1.3.2 卢瑟福原子模型和散射公式--卢瑟福散射公式

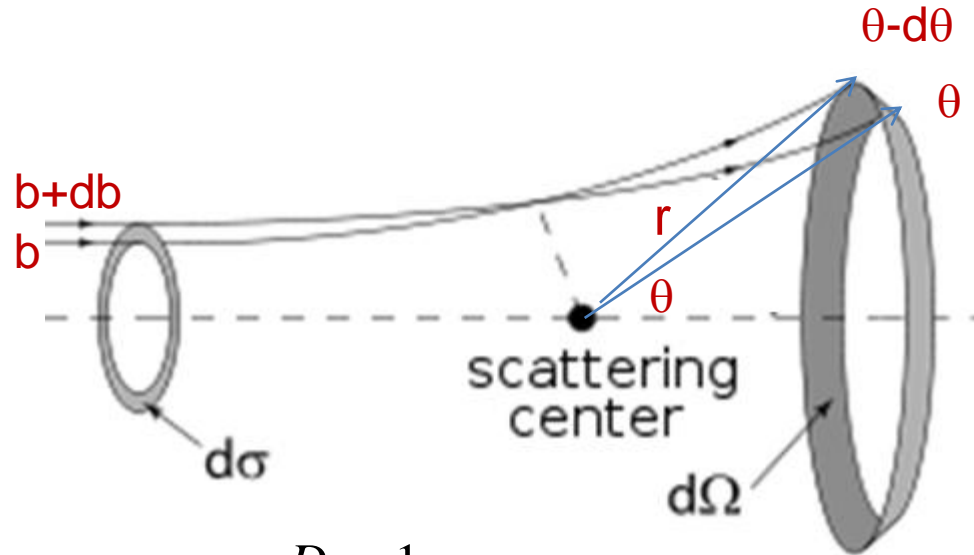


一个 α 粒子如果入射到面积元 $d\sigma$ 内，就会散射到 θ 角方向的 $d\theta$ 内

$$d\sigma = 2\pi |db|$$

描述了概率 α 粒子散射到 θ 方向的概率。

§ 1.3.2 卢瑟福原子模型和散射公式--卢瑟福散射公式



$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{2b}{D} \quad \longrightarrow \quad db = -\frac{D}{4} \frac{1}{\sin^2 \frac{\theta}{2}} d\theta$$

所以 $d\sigma = 2\pi |db| = \frac{\pi D^2}{4} \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta$

又 $d\Omega = \frac{S}{r^2} = \frac{2\pi r \sin \theta \cdot r d\theta}{r^2} = 2\pi \sin \theta d\theta = 4\pi \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}$

得 $d\sigma = \frac{D^2}{16} \frac{1}{\sin^4 \theta/2} d\Omega$



卢瑟福散射公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{2Ze^2}{E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

表征了 α 粒子散射到 θ 角方向上，单位立体角内每个原子的有效**散射截面**。反映了散射到 θ 角方向上单位立体角内的概率。

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ 称为微分散射截面，其量纲是面积。