

# 原子物理学

**主讲教师：张华桥**

邮箱：[zhanghq@ihep.ac.cn](mailto:zhanghq@ihep.ac.cn)

办公室： 高能所多学科楼417

助教：陶军全 博士

邮箱：[taojq@ihep.ac.cn](mailto:taojq@ihep.ac.cn)

办公室： 高能所多学科431

答疑时间：周四上午10:00-12:00

助教：王峰 博士

邮箱：[wangfeng@ihep.ac.cn](mailto:wangfeng@ihep.ac.cn)

办公室： 高能所多学科楼426

答疑时间：周四上午10:00-12:00

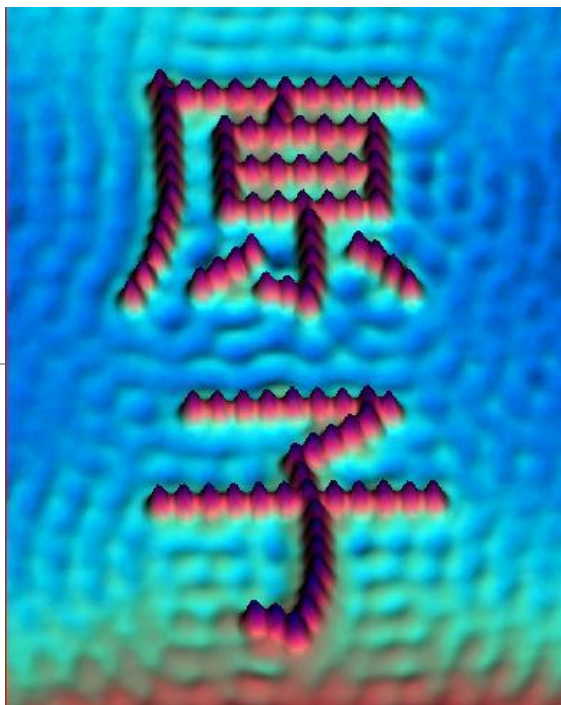
# 上堂课内容小结

---

- 课程的目的与要求
  - 掌握基本的物理图像
  - 课程的内容大纲
- 课程的特点
  - 物质的基本结构研究：实验+理论
  - 课程讲授主线：一系列关键实验的物理图像
- 课程的学习方法
  - 基本的思维方法（授课思路）
  - 建立清晰的物理图像（想象的了，描述的出）
  - 习题课
- 绪论：物质基本结构研究的图景
- 国际单位制与自然单位制

# 《原子物理学》

## 第一章 原子的核式模型



Atom manipulation  
By STM

Fe atoms on Cu(111)

# “原子”概念的形成及存在的证据

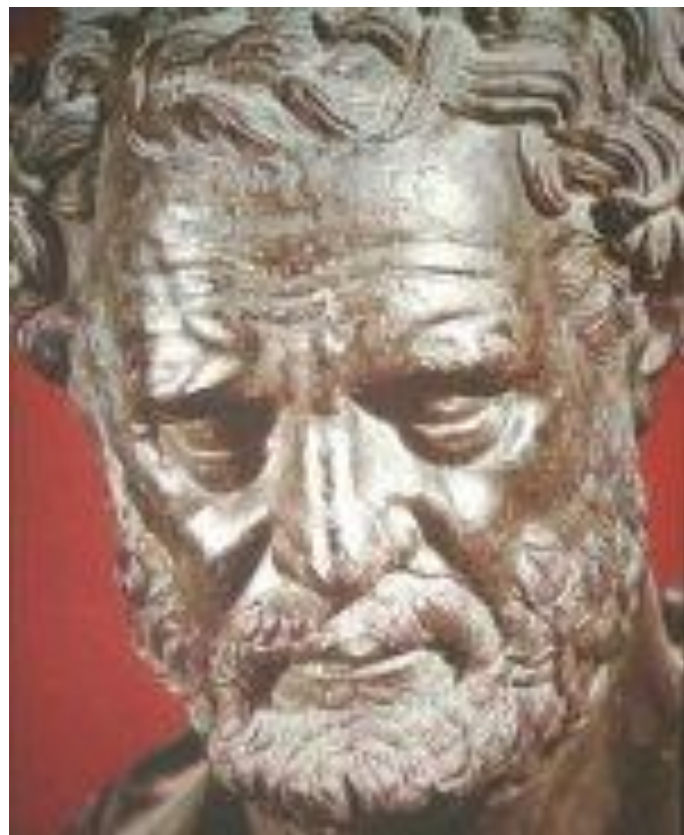
# “原子”来自于希腊文，意思为“不可分割的”

古希腊哲学家留基伯(Leucippus)和他的学生德谟克利特(Democritus)  
(about 460 BC - 370 BC):

基本观点是出于留基伯的，但是后人对他知之甚少。

德谟克利特继承和发展了留基伯(Leucippus)的原子学说，提出了“atoms”概念。ατομα，希腊文“不可分割的”

原子 ATOM ‘indivisible’.



Democritus

受水汽蒸发以及香味传递等感性直观而依赖哲学思维推测出来的

# 我们能“看见”原子吗？现代实验手段

1970年，**扫描电子显微镜**(SEM, Scanning Electron Microscopy): To image the individual atoms in molecules and in crystals.

1982年，**扫描隧道显微镜** (STM, Scanning Tunneling Microscopy): 看到并拾取原子

1982年由格尔德·宾宁 (G. Binnig) 及海因里希·罗雷尔 (H. Rohrer) 在IBM位于瑞士苏黎世的苏黎世实验室发明，两位发明者因此与恩斯特·鲁斯卡分享了**1986年诺贝尔物理学奖**。

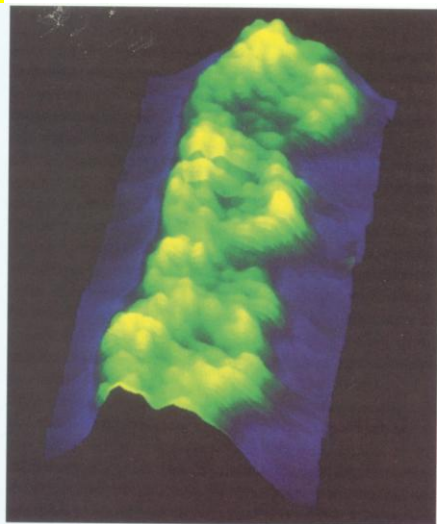
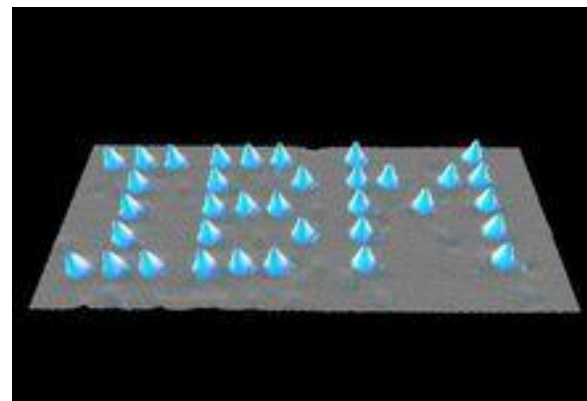


Figure  
DNA d  
color;

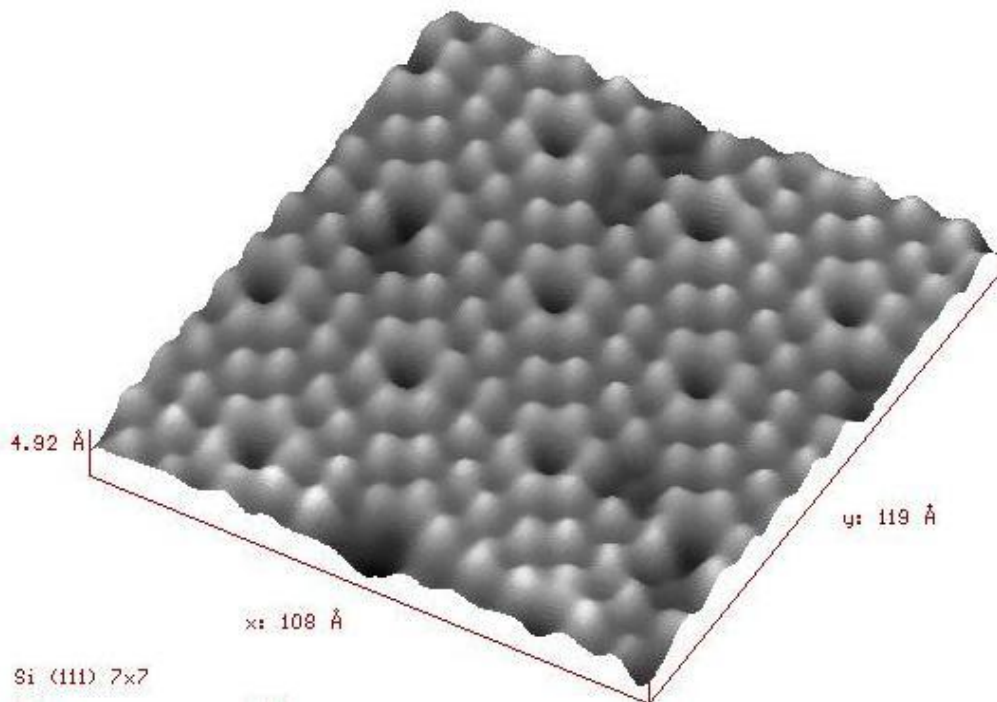
STM拍下的DNA



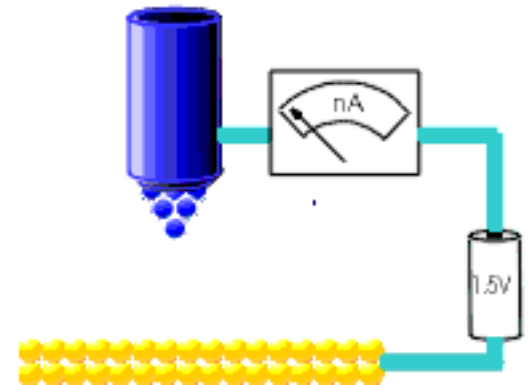
用STM移动氩原子排出的“IBM”图案

# 我们能“看见”原子吗？

- STM (Scanning Tunneling Microscopy)
  - 隧道扫描显微镜



STM image



调整位置保持隧穿电流不变，确定三维图像



# 在无法直接观测“原子”的年代

- 古代关于物质基本结构的观点

**哲学！=科学**

- 公元前四世纪，德谟克利特提出物质最小单位，不可分割；亚里士多德，物质连续
- 战国时期墨家：端，体之无序最前者也；公孙龙：一尺之棰，日取其半，万世不竭

- 近代的原子论(起源于近代化学研究)

- 道尔顿（英国化学家 John.Dalton 1766-1844）
- 阿伏伽德罗(意大利物理学家 Amedeo Avogadro 1776-1856)
- 。 。 。
- 最小单位是原子，原子是单一的，独立的，不可被分割的，在化学变化中保持着稳定的状态，同类原子的属性也是一致的。



# “原子”存在的迹象（一）

- 化学反应中元素按一定的物质比相互化合
  - 1806, 普鲁斯脱(Proust), 化合物分子的定组成定律（化合物中各元素质量比例是一定的）
    - ❖ 1815, 假设所有元素的原子都由氢原子组成
  - 1807, 道尔顿(Dalton), 倍比定律, 提出物质的原子论
    - ❖ 例如:  $14\text{g N}_2 + 16\text{g O}_2 \rightarrow 30\text{g NO}$
    - ❖ 一定质量的某种元素, 由极大数目的该元素的原子所构成;
    - ❖ 每种元素的原子, 都具有相同的质量, 不同元素的原子, 质量也不相同;
    - ❖ 两种可以化合的元素, 它们的原子可能按几种不同的比率化合成几种化合物的分子
- 1808, 盖·吕萨克(Gay-Lussac)定律
  - ❖ 一定质量的气体, 当压强保持不变时, 它的体积 $V$ 随温度 $T$ 线性地变化
- 1811, 阿伏加德罗(Avogadro): 气体的体积与其中所含的粒子数目有关

# “原子”存在的迹象（二）

- 布朗运动（Brownian motion）
  - 1827, Robert Brown(1773–1858), 苏格兰植物学家
  - 1905, 爱因斯坦, 布朗运动的理论解释  
⇒ 阿伏伽德罗常数 ⇒ 原子、分子的尺寸
  - Jean-Baptiste Perrin (1870–1942), 法国物理学家, 详细研究了布朗运动  
⇒ 精确测量了原子、分子的尺寸（1926年诺贝尔奖）

**Jean Baptiste Perrin** [ForMemRS<sup>\[1\]</sup>](#) (30 September 1870 – 17 April 1942) was a French physicist who, in his studies of the Brownian motion of minute particles suspended in liquids, verified Albert Einstein's explanation of this phenomenon and thereby confirmed the atomic nature of matter (sedimentation equilibrium). For this achievement he was honoured with the Nobel Prize for Physics in 1926.<sup>[2]</sup>



Robert Brown in 1855



# “原子”存在的迹象（三）

## 1833年法拉第(Faraday)提出的电解定律

- 析出的金属铜的质量M  
正比于电荷，即 $M = K \cdot Q$
- 电化当量K与化学当量成正比

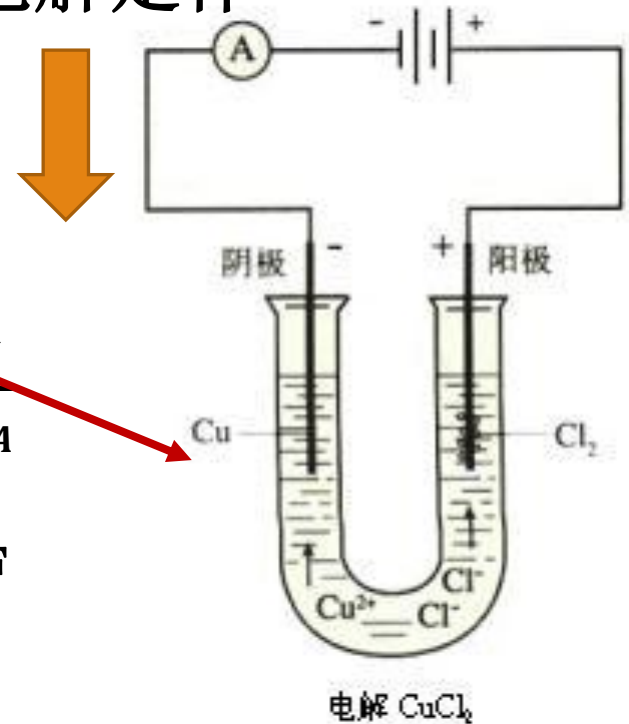
(即摩尔质量除以化学价):  $\frac{\text{摩尔质量}}{\text{化学价 } eN_A}$

因此推论:

- 1) 1摩尔单价离子的电量为法拉第常量F
- 2) 任何原子的单价离子带相同的电荷:  
 $e = F/N_A$  (电荷不连续, 有个数)

启发: 基本电荷具有原子性, 即原子所带的电荷数是不变的, 导致基本电荷的发现和建立物质的电结构。

电量Q



# “原子”存在的迹象（四）

## 1869年门捷列夫(Mendeleev)的元素周期表

Group→ ↓Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		

预言了4个未知元素，后被发现，对于周期表和道尔顿的原子理论都是重大的胜利

98号元素之后全部合成产生

# 原子物理的目标

---

- 当原子学说逐渐被人们接受以后，需要理解新的问题包括：
  - 原子有多大？
  - 原子是最基本的粒子吗？
  - 原子的内部的结构
  - 原子原子之间的相互作用
  - 原子与电场和磁场的相互作用

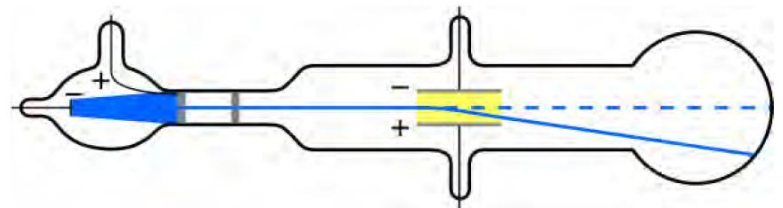
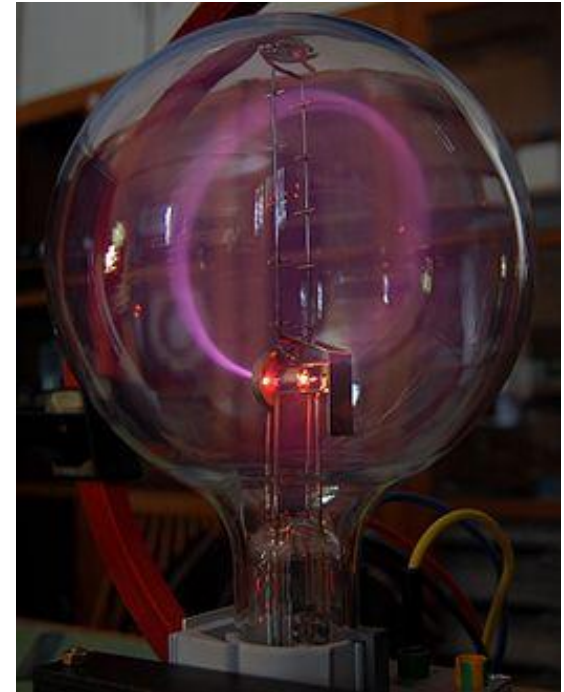
随着发现X射线(1895)、放射性(1896)和电子(1897)，物理研究进入了近代物理阶段。

# 电子(Electron)的发现



# 阴极射线(Cathode Ray)

- 1838, 法拉第, 在充满稀薄空气的玻璃管中输送电流发现在阴极和阳极之间之间有一道奇怪的光弧
- 1858, 德国物理学家普吕克尔在研究气体放电现象时发现: 从阴极会发射出一种射线
- 阴极射线管(Cathode Ray Tube)
  - ❖ 1857, 德国玻璃工盖斯勒, 发明了更好的**泵来抽真空**, 由此发明了盖斯勒管
  - ❖ 1860年左右, 英国科学家克鲁克斯发现阳极的一端的管壁也会发光, 因此发明了克鲁克斯管
  - ❖ 1876, 德国物理学家戈尔德斯坦将其命名为**阴极射线**

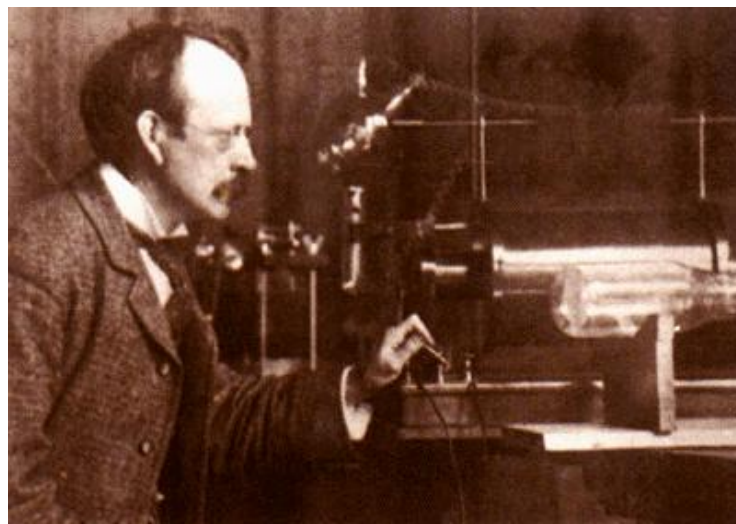




# 解释阴极射线

---

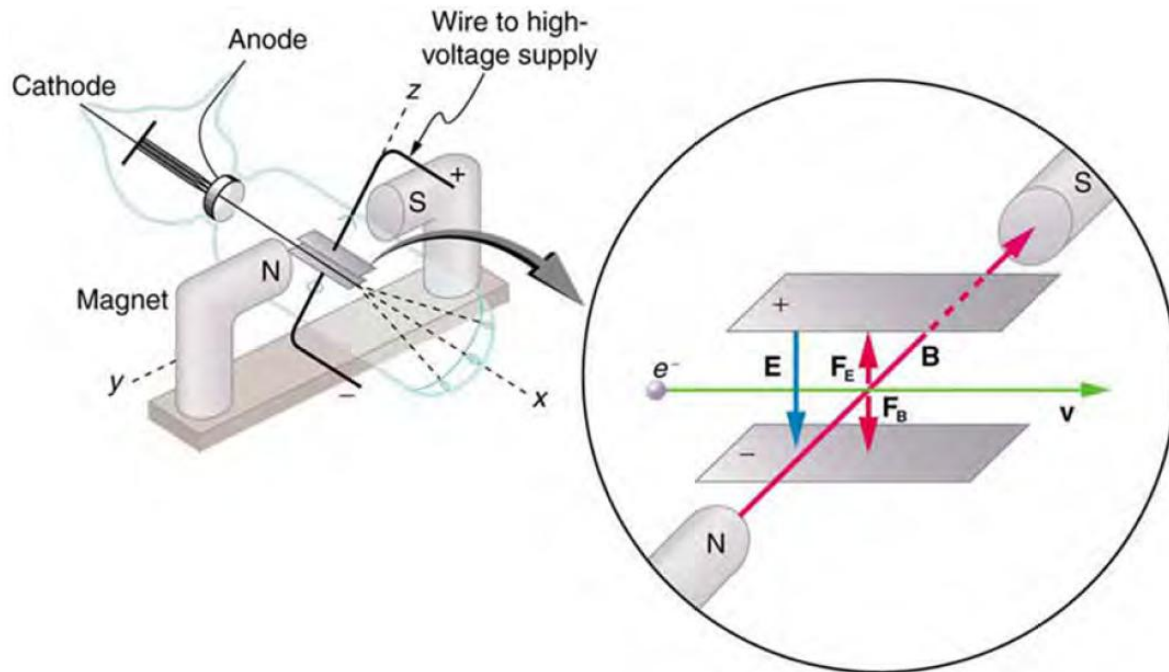
- 一种观点认为阴极射线是电磁辐射；另一种观点：带电微粒流
- 实验验证：英国物理学家汤姆孙 (J.J. Thomson, 1856-1940)
- 自1890年起开始研究, 进行了一系列的实验研究。认为阴极射线是带电粒子流



汤姆孙被誉为：“一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人。”

# 1897 汤姆孙的阴极射线管

测量带电粒子的荷质比



加电场 $E$ 后，射线偏转， $\Rightarrow$  阴极射线带负电。

再加磁场 $H$ 后，射线不偏转， $\Rightarrow qvB = qE \Rightarrow v = E/B$

去掉电场 $E$ 后，射线成一圆形轨迹 $\Rightarrow qvB = m v^2 / r$

$\Rightarrow$  求出荷质比。  $q/m = E / r B^2$

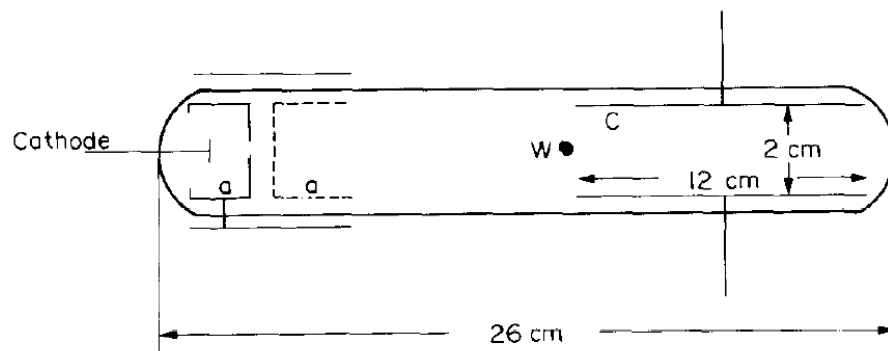
# 实验结论分析

- 用不同材料的阴极做实验，所发出射线的粒子都有相同的荷质比
  - 说明不同物质都能发射这种带电粒子，它是构成各种物质的共有成份
- 微粒的荷质比为氢离子荷质比的千倍以上
  - 汤姆孙猜测：阴极射线质量只有氢原子质量的千分之一还不到  
⇒ 电子

汤姆孙以惊人的胆识同传统观念决裂，勇敢地确认了有比氢原子小得多的微粒——电子存在，而被誉为最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人。由此他获得了1906年诺贝尔物理学奖。

# 其他人在发现电子的探索中的失误和遗憾

- 1883年，电磁波的发现者德国科学家赫兹 (H.R.Hertz) 因为放电管内的真空度不高，气体在电子作用下电离导致电场两极板之间的放电，没有观测到阴极射线的偏转，错误的认为阴极射线不带电；
- 1890年，修斯托 (A. Schuster) 测出阴极射线的荷质比为质子的千倍以上，但不敢坚持自己的结果；
- 1897年，考夫曼 (W.Kaufman) 测量的  $e/m$  比汤姆孙的要高，与现代值相差仅1%，因为不相信它为粒子，也不敢发表结果。



cathode: 阴极；

C: 产生电场的极板，22-500V

真空度至少要多高？

- 空气分子自由程约  $10^{-5}\text{cm}$  ( $\sim 1 \times 10^5$  帕)
- 真空管长度  $0.25\text{ m}$   $\leftarrow$  平均自由程
- 国家标准17049是:  $5 \times 10^{-2}$  帕

$$n = \frac{P}{kT} \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} n d^2}$$

# ✳ 1897, J.J. Thomson: The discovery of electron

---

## 1906 Nobel Laureate in Physics



SIR Joseph John Thomson (U.K, 1856.12.18~1940.8.30)

University of Cambridge, United Kingdom

"in recognition of the great merits of his theoretical and experimental investigations on the conduction of electricity by gases"

# 1898 汤姆孙测量电子电荷的水滴实验

**原理:电子在过饱和水蒸气中形成水滴**

AB: 3.6厘米的玻璃管; CD: 石英玻璃底部, 上面覆盖一层1厘米厚的水, 接地; 用来接收紫外光照的3.2厘米直径锌板位于水面之上1.2厘米处。紫外光源位于底座之下40厘米处, 向上照射。水面和锌板之间被弧光灯照亮, 以精确测量水滴的降落。

$n$  单位立方厘米水滴数;

$u_0$  标准电场强度下, 水滴的运动速度

$b$  锌板与水面之间的距离

$A$  锌板面积

$C$  带电系统的电容

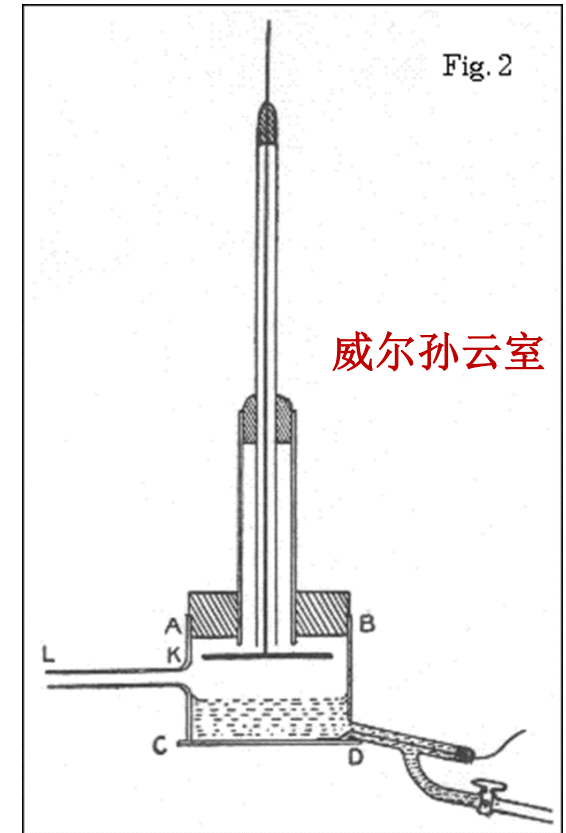
$D$  原初的电量指示

$d$  单位时间内水滴带走的电量指示

该方法测量结果不稳定, 误差大 (水滴的蒸发)

$$e = \frac{b}{nu_0} \frac{C}{A} \frac{d}{D}$$

再通过荷质比可测出电子质量 $m_e$



演化: 云室



# 威尔逊云室

其它探测器:

Nuclear emulsion

1937, Marietta Blau and Hertha Wambacher

Bubble Chamber

1952年 Donald A. Glaser 发明

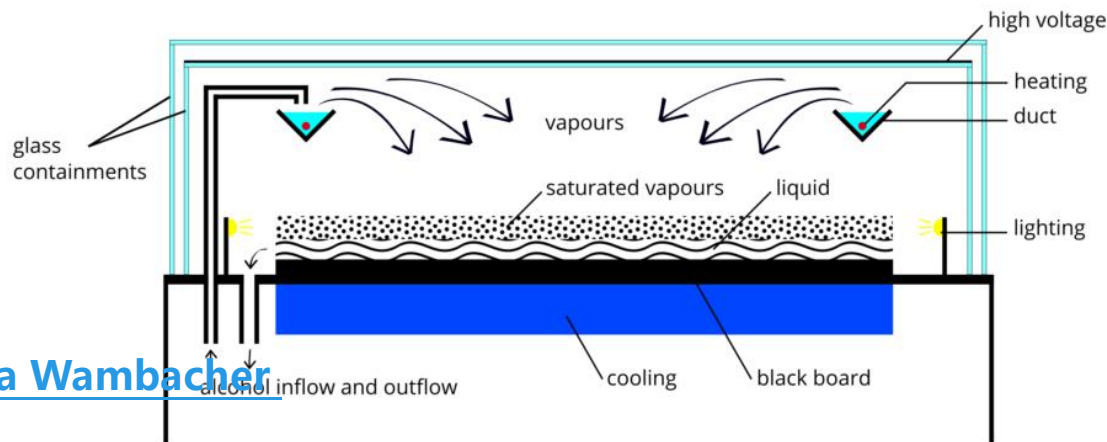
1962年诺贝尔物理奖

Spark chamber

Streamer chambers

Drift Chamber

Silicon Chamber



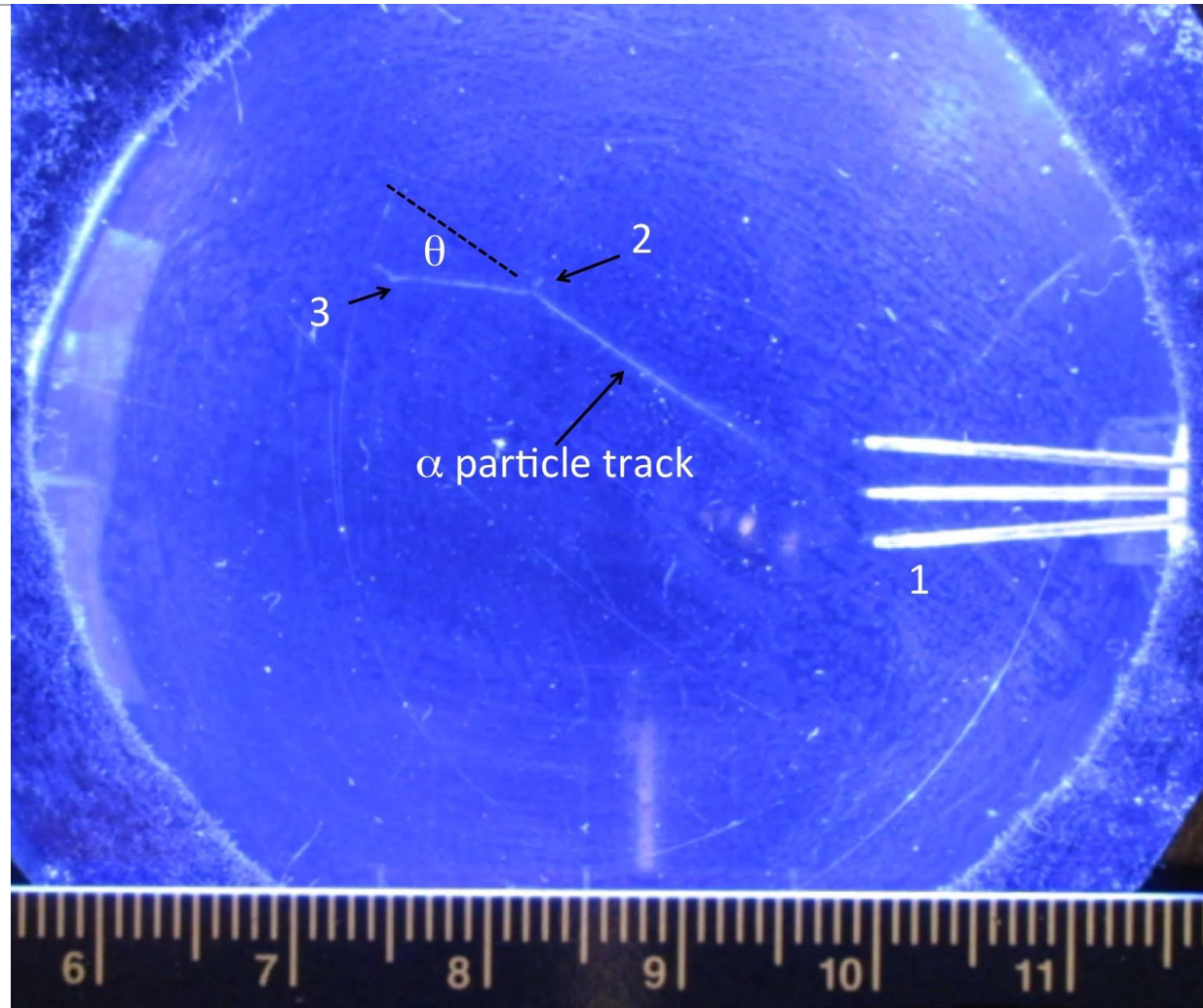
扩散型云室：酒精（通常是异丙醇）由腔室上部的管道中的加热器蒸发。冷却蒸汽下降到黑色冷藏板，在那里冷凝。由于温度梯度，在底板上方形成一层过饱和蒸汽。在这个区域，带电粒子诱导凝结并产生云轨道。

在历史上，云室对粒子物理起过重大作用，曾用它发现了 $e^+$ 、 $\mu^-$ 、 $K^0$ 和 $\Lambda$ 、 $\Xi^-$ 等粒子



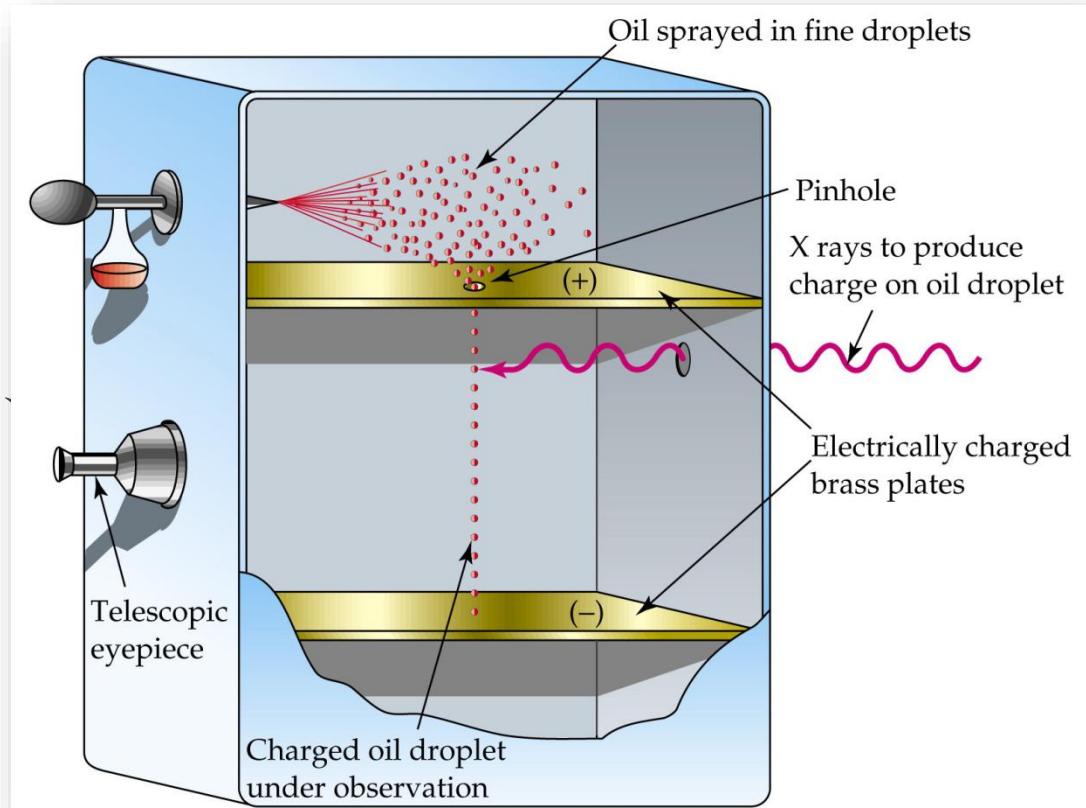
# 威尔逊云室 $\alpha$ 粒子散射

在扩散云室，来自Pb210的5.3 MeV的 $\alpha$ 粒子径迹：点（1），经历了卢瑟福散射：点（2），偏转的角度约30度。它再一次散射：点（3），最后在气体中静止。室内气体中的靶核可能是氮、氧、碳或氢原子核。在弹性碰撞中反冲核获得足够的动能，可见反冲轨道：点（2）。（刻度是厘米）。



# 电子电荷的精确测定

- 1909, 密立根(Millikan)著名的“油滴实验”
  - X光可以使由喷雾器产生的油滴带电。
  - 油滴不易挥发
  - 电场力平衡油滴的重力、浮力和空气阻力
  - 油滴质量  $\Leftarrow$  关闭电场测量油滴速度 (存在空气阻力!)
  - 最大公约数  $\Rightarrow q_e$



# 电子电荷的精确测定

测量过程中油滴受4个力量的影响：空气阻力、重力、浮力、电场力

空气阻力：

$$F = 6\pi r \eta v_1 \quad (\text{空气阻力, 方向向上})$$

$v_1$  为油滴的终端速度； $\eta$  为空气的黏滞系数； $r$  为油滴半径。

重力(假设为完美球形)：

$$W = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho \quad (\text{重力, 方向向下})$$

$\rho$  为油滴密度

浮力(假设为完美球形)：

$$B = \frac{4}{3}\pi r^3 g \rho_{air} \quad (\text{浮力, 方向向上})$$

$\rho_{air}$  为空气密度。

电场力：

$$F_E = qE \quad (\text{电场力, 方向向上})$$

$q$  为油滴电荷； $E$  为电极板之间的电场。

通过受力平衡下速度测得半径，求得电荷量

若油滴太小，空气阻力粘滞系数需要修正：

$$\eta' = \frac{\eta}{1 + \frac{b}{Pr}}$$

$Pr$  为实验时的大气压力； $b = 6.33 \times 10^{-5} \text{米} \cdot \text{毫巴}$ ，

# 电子电荷的精确测定

1911年，密立根油滴实验发表测出的单个电子的电荷为 $1.59 \times 10^{-19} \text{C}$ ；很多年来一直被认为是最精确的数值，密立根因此获得了1923年诺贝尔物理学奖，直到1929年才发现它约有1%的误差，来自对空气粘滞性测量的偏离。

• 电子电荷 $e$ 的现代值为  $1.602\,176\,6208(98) \times 10^{-19} \text{ C}$

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>

- 电荷是量子化的！
- 电子的普遍存在得到了令人信服的证明。
- 所有粒子的电荷都是量子化的，夸克带分数电荷（ $e/3$ ， $2e/3$ ），其他粒子是 $e$ 的整数倍

# Robert Andrews Millikan



★ Robert Andrews Millikan (USA,  
1868.3.22~1953.12.19)  
1923 Nobel Laureate in Physics  
"for his work on the elementary  
charge of electricity and on the  
photoelectric effect"

- 1910年测量了单个电子的电荷
- 1916年发表了光电效应实验结果

# 电子及氢离子的质量

- 根据荷质比和电荷，电子的质量  
 $m_e = 9.109\ 382\ 15\ (45) \times 10^{-31}\ \text{Kg}$
- 由法拉第电解定律，根据分解1 摩尔氢所需要的电量，可以推算出氢离子的荷质比 $e/m_p$ ，再利用测量到的 $e/m_e$ ，可以得出质子与电子的质量比：  
 $m_p/m_e = 1\ 836.152\ 672\ 47(80)$
- 电子在原子里的份额应该比较小；根据电子的质量，可得： $m_p = 1.672\ 621\ 637(83) \times 10^{-27}\ \text{kg}$
- 国际上规定 $^{12}\text{C}$ 的质量为 $12\text{u}$ （原子质量单位），由此： $m_p = 1.007\ 276\ 466\ 77(10)\text{u}$



# 阿伏伽德罗常数

- 根据法拉第常数F测定 $N_A$
- $F = 9\,648\,5.3321$  库仑/摩尔
- $N_A=1$ 摩尔的原子数

$N_A$  = 分解一摩尔物质所需电量 / 一个电价离子所带的电量

$$N_A = F/e = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} (\text{摩尔})^{-1}$$

- 原子单位u:  $1u = 1/N_A \text{ g} = 1.660\,539\,067 \times 10^{-27} \text{ kg}$
- $R = kN_A$ , R是普适气体常数, k是波尔兹曼常数
- 阿伏伽德罗常数之巨大说明了微观世界之细小!
- 注: 可见宇宙里有约 $10^{12}$ 星系, 每个星系约有 $10^{11}$ 恒星, 总恒星数量约为 $N_A$ , 总质量约 $10^{80}$ 质子 (原子单位) !



# 原子大小的一种简单估计

- 对任意一种原子 $^A\text{X}$ , A克含有 $N_A$ 个X原子, 假定其密度为 $\rho$  ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), 又假定原子是球形的, 半径为 $r$ , 每个原子占有体积为 $4/3\pi r^3$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 N_A = \frac{A}{\rho} \quad r = \sqrt[3]{\frac{3A}{4\pi\rho N_A}}$$

元素	质量数	质量密度 $\rho$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	估算的原子半径 (r/nm)
Li	7	0.7	.16
Al	27	2.7	.16
Cu	63	8.9	.14
S	32	2.07	.18
Pb	207	11.34	.19

原子的半径—  $10^{-10} \text{ m}$  (0.1nm)  
1 埃 =  $10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm}$   
化学直觉, 离子半径等

原子核半径—  $10^{-14} \text{ m}$

电子半径  $< 10^{-18} \text{ m}$

思考:

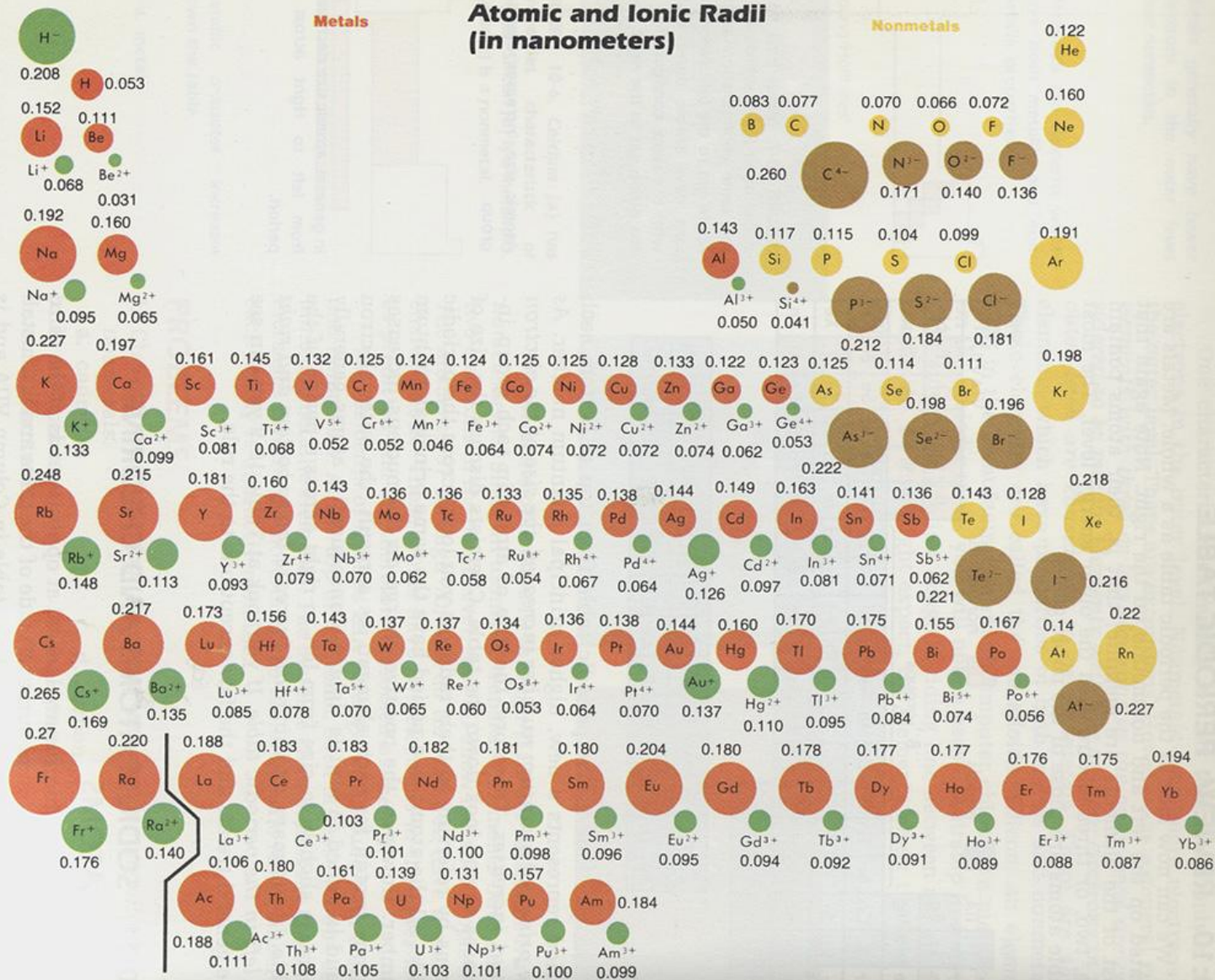
不同质量的原子为何大小相当?

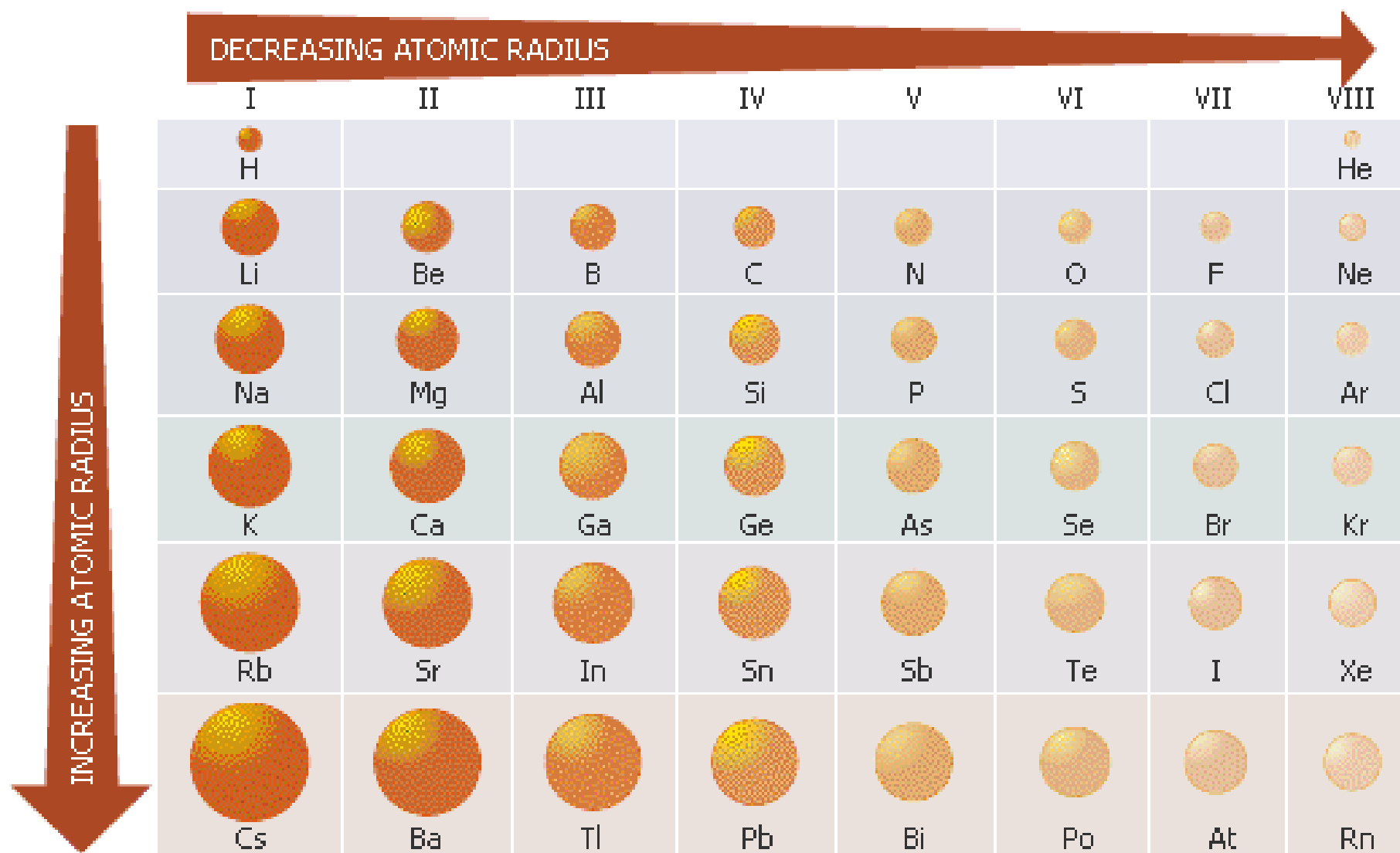
如何测量原子核的大小?

如何研究质子的内部结构?

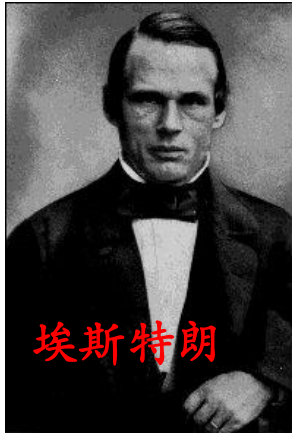
电子的大小?

Table 10-9  
Atomic and Ionic Radii  
(in nanometers)



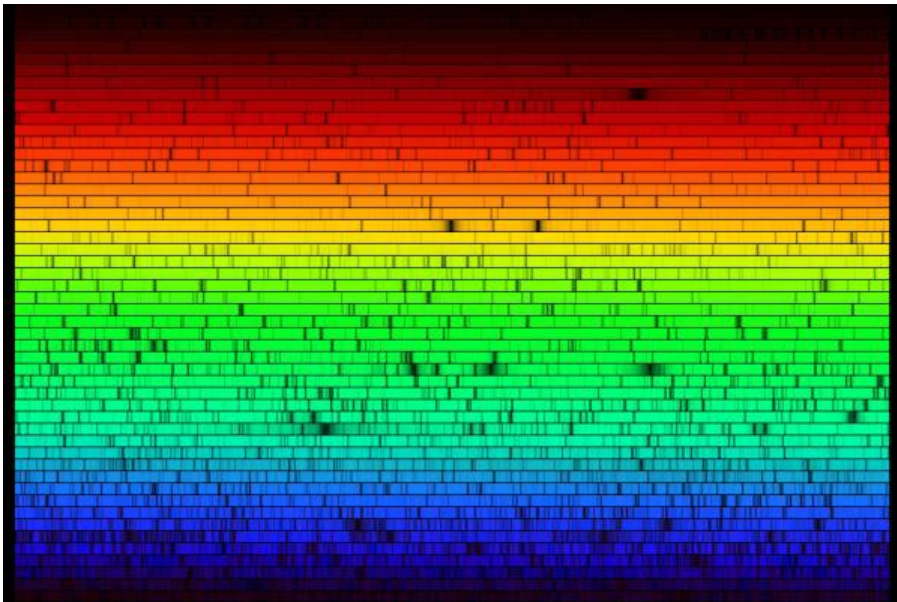


# 原子大小单位“埃”的由来



Anders Jons Angstrom (1814-1874), Swedish physicist. He is particularly noted for his study of light, especially spectrum analysis. He mapped the solar spectrum, discovered hydrogen in the solar atmosphere, and was the first to examine the spectrum of the aurora borealis. A unit of length used to measure light waves is named for him.

研究光谱学，从太阳中发现氢，研究北极光等



The radius of atom is often expressed in ångstrom units:

$$1\text{\AA} = 10^{-10} m$$

原子尺寸、电磁波长等的单位

# 电子点粒子实验检验

## BhaBha scattering :

$$e^+ e^- \rightarrow e^+ e^- \quad \text{计算假设电子是点粒子}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(e^+e^- \rightarrow e^+e^-) = \frac{\alpha^2}{8E^2} \left[ \frac{1 + \cos^4(\theta/2)}{\sin^4(\theta/2)} - \frac{2\cos^4(\theta/2)}{\sin^2(\theta/2)} + \frac{1 + \cos^2(\theta/2)}{2} \right]$$

电子有结构，当正负电子无限接近时，电子的电荷是有分布的，相当于在时空坐标对库仑势做如下修正：

$$\frac{1}{r} \rightarrow \frac{1}{r} (1 \pm e^{-\Lambda r})$$

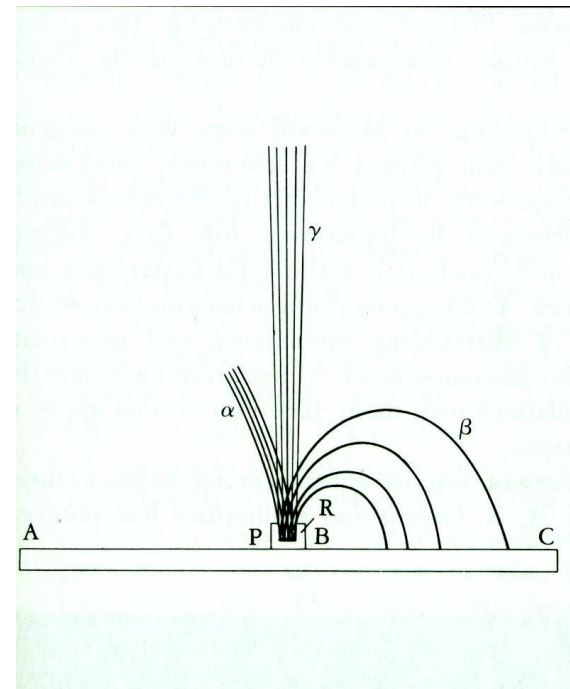
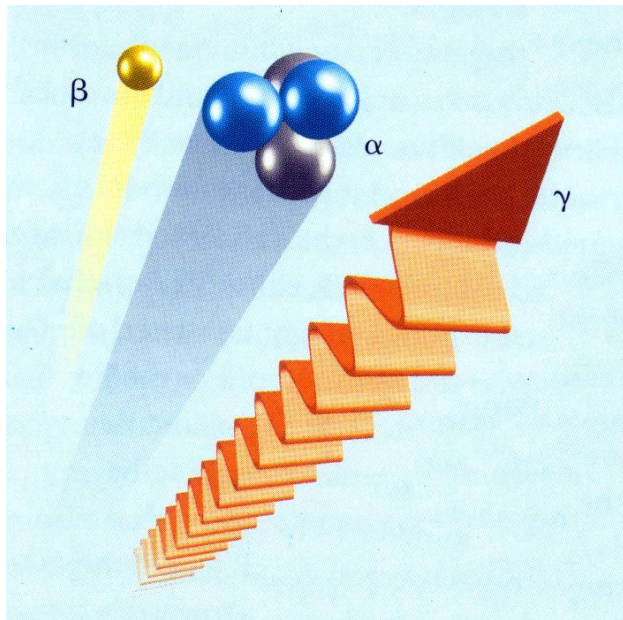
$\Lambda$ 越大相互作用越趋近库仑势，其结果越趋近于QED的预言，实验拟合结果对应的 $\Lambda$ 最小值对应电子尺度的上限 $R=1/\Lambda$ ，目前实验来自CERN LEP实验给出： $R < 1.4 \times 10^{-19} \text{ m}$     Reference: hep-ex/0212036



# 世界是连续的吗？

量	常用符号 <sup>[a]</sup>	单位名称 <sup>[b]</sup>		单位符号 <sup>[c]</sup>	量纲符号 <sup>[d]</sup>	定义 <sup>[2]</sup>
		中国大陆	台湾			
时间	<i>t</i>	秒	秒	s	T	当铯的频率 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ，即 <b>铯-133</b> 原子基态的超精细能级跃迁频率以单位 Hz，即 $\text{s}^{-1}$ ，表示时，将其固定数值取为 9 192 631 770来定义秒。
长度	<i>l</i>	米	公尺	m	L	当真空中光的速度 <i>c</i> 以 单位 m/s 表示时，将其固定数值取为 299 792 458 来 定义米，其中秒用 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义。
质量	<i>m</i>	千克	公斤	kg	M	当 <b>普朗克常数</b> <i>h</i> 以 单位 J s，即 $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ ，表示时，将其固定数值取为 $6.626\,070\,15\times10^{-34}$ 来定义千克，其中米和秒用 <i>c</i> 和 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义。
绝对温度	<i>T</i>	开 [尔文]	克耳文	K	Θ	当 <b>玻尔兹曼常数</b> <i>k</i> 以单位 $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ ，即 $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ，表示时，将其固定数值取为 $1.380\,649\times10^{-23}$ 来定义开尔文，其中千克、米和秒用 <i>h</i> , <i>c</i> 和 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义。
电流	<i>I</i>	安 [培]	安培	A	I	当 <b>基本电荷</b> <i>e</i> ，以单位 C，即 $\text{A}\cdot\text{s}$ ，表示时，将其固定数值取为 $1.602\,176\,634\times10^{-19}$ 来定义安培，其中秒用 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义。
发光强度	<i>I<sub>v</sub></i>	坎 [德拉]	烛光	cd	J	当频率为 $540\times10^{12}$ Hz的单色辐射的 <b>发光效率</b> 以单位 $\text{lm}\cdot\text{W}^{-1}$ ，即 $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{W}^{-1}$ ，或 $\text{cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^3$ ，表示时，将其固定数值取为 683 来定义坎德拉，其中千克、米、秒 分别用 <i>h</i> , <i>c</i> 和 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ 定义。
物质的量	<i>n</i>	摩 [尔]	莫耳	mol	N	1 摩尔精确包含 $6.022\,140\,76\times10^{23}$ 个基本粒子。该数即为以单位 $\text{mol}^{-1}$ 表示的 <b>阿伏伽德罗常数</b> $N_{\text{A}}$ 的固定数值，称为 <b>阿伏伽德罗数</b> 。为一个系统的物质的量，符号 <i>n</i> ，是该系统包含的特定基本粒子数量的量度。基本粒子可以是原子、分子、离子、电子，其它任意粒子或粒子的特定组合。

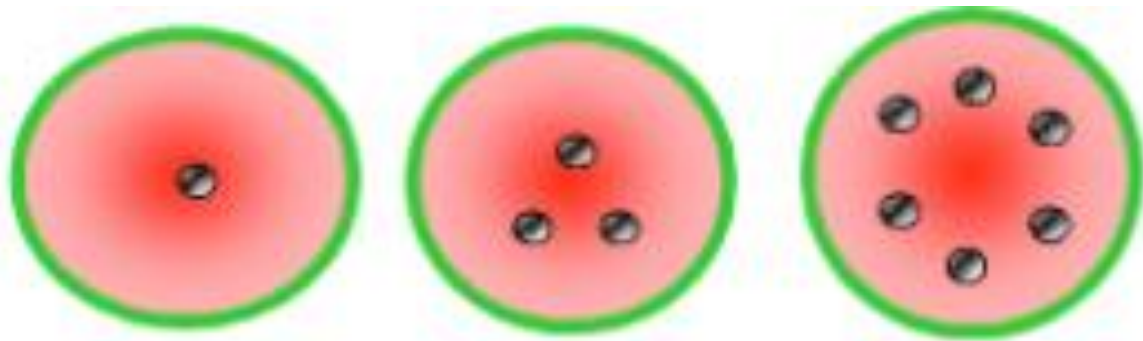
# 原子核的发现



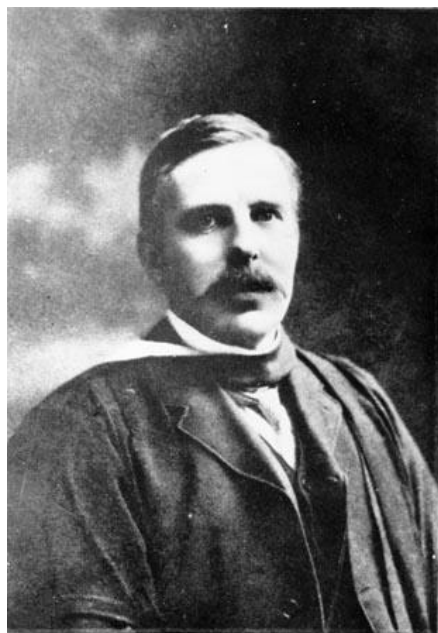


# 原子中正负电荷的分布？

- 汤姆孙发现电子后，提出了汤姆逊原子模型
  - 1903，提出“葡萄干蛋糕”式原子模型或称“西瓜”模型 --- 原子中的正电荷均匀分布在原子球体内，电子就象西瓜里的瓜子那样嵌在这个球内，处于某个平衡位置上。
  - 进一步假设：电子分布在分离的同心环上，每个环上的电子容量都不相同，电子在各自的平衡位置附近做微振动。因而可以发出不同频率的光，而且各层电子绕球心转动时也会发光。
  - 该模型对于解释当时的一些实验结果、元素的周期性及原子的线光谱等，似乎是成功的。需要实验检验其正确性！



# Rutherford, Ernest (1871-1937)



• 欧内斯特·卢瑟福 (1871 - 1937)，新西兰著名物理学家，原子核物理学之父。学术界公认他为继法拉第之后最伟大的实验物理学家。他首先提出放射性半衰期的概念，证实放射性涉及从一个元素到另一个元素的嬗变 (shan) 变。他又将放射性物质按照贯穿能力分类为  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  射线，并且证实前者就是氦离子。因为“对元素蜕变以及放射化学的研究”，他荣获1908年诺贝尔化学奖。



**名言：**科学只有物理一个学科,其他不过相当于集邮活动而已。All science is either physics or stamp collecting.

# “鳄鱼” 卢瑟福

像鳄鱼一样，在科学之海中勇往直前，从不退缩

We don't have the money, so we have to think!

- 卢瑟福培养了八位诺贝尔物理和化学奖获奖人！

1957年成立的卢瑟福实验室  
(Rutherford Appleton Laboratory, RAL)

目前发展为一个多学科、综合性的  
大型国家实验室



英国剑桥大学的卡文迪什实验室 (Cavendish laboratory)，筹建于1871年，是世界上最有声望的物理学研究和教育的中心之一；对近100年来物理学的发展起过非常出色的作用，前后培养出诺贝尔奖金获得者共达26人。

主持这个实验室的历届教授是：麦克斯韦(1871~1879)、瑞利(1879~1884)、汤姆孙(1885~1919)、卢瑟福(1919~1937)、布拉格(1938~1953)、莫特(1953~1971)、皮帕德(1971~1978)、考克(1979~1984)、爱德华(1984~)。

卡文迪什实验室的创建，标志着物理学开始了在实验室中进行系统性实验的时代。在它100多年的历史中，重要的成就有：汤姆孙发现电子、卢瑟福发现元素的转变、阿普顿发现电离层、查德威克发现中子、W.H.布拉格等发现一些重要的生物分子的结构、M.赖尔等对射电源的普查、A.休伊什等发现脉冲星。

这个实验室另一个优良传统是，实验中所用的关键性实验装置都是由实验人员自己设计和制造。例如，汤姆孙的阴极射线管、阿斯顿的质谱仪、威耳孙的云室和布莱克持的自动云室、考克饶夫和瓦耳顿的高压倍加器、考克饶夫的雷达、赖尔的综合孔径射电望远镜。

以实验为根据的理论探索，在这里同样受到重视。瑞利对声学理论的奠基性工作、克里克和沃森提出DNA分子双螺旋结构导致的遗传学理论的进展、莫特等关于固体物理学理论的系统研究等都是极有影响的理论成就。

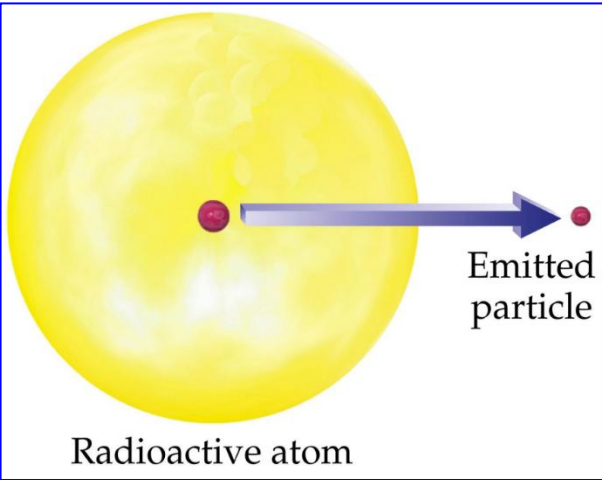




# $\alpha$ 粒子

放射性元素发射出的高速带电粒子，其速度约为光速的十分之一，带+2e的电荷，质量约为4倍的氢原子质量。

镭 氡



Radioactive atom

Emitted particle

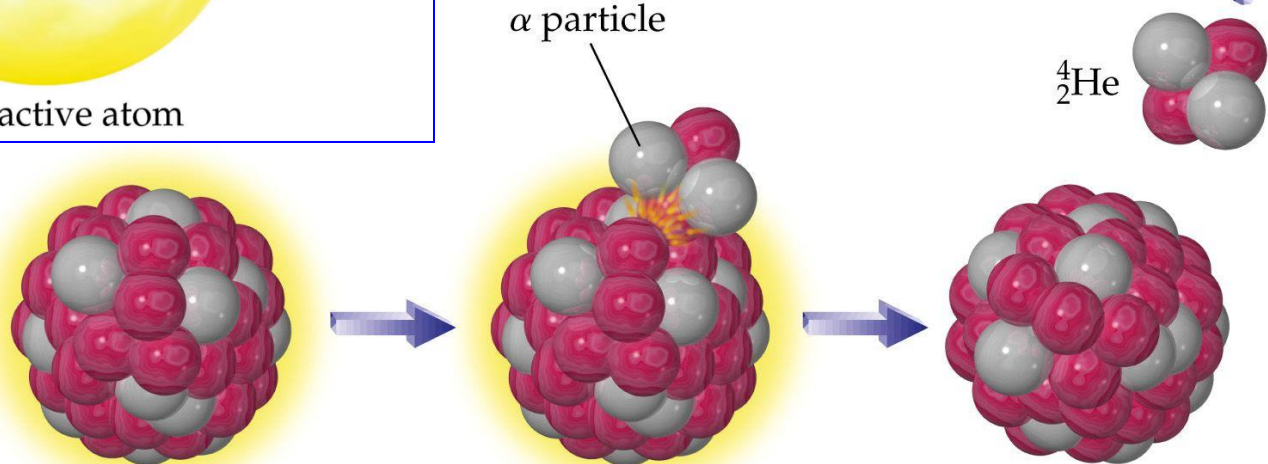
**Radium  $\rightarrow$  Radon +  $\alpha$ -particle**

**Z=88                  Z=86                  Z=2**

${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + \alpha$

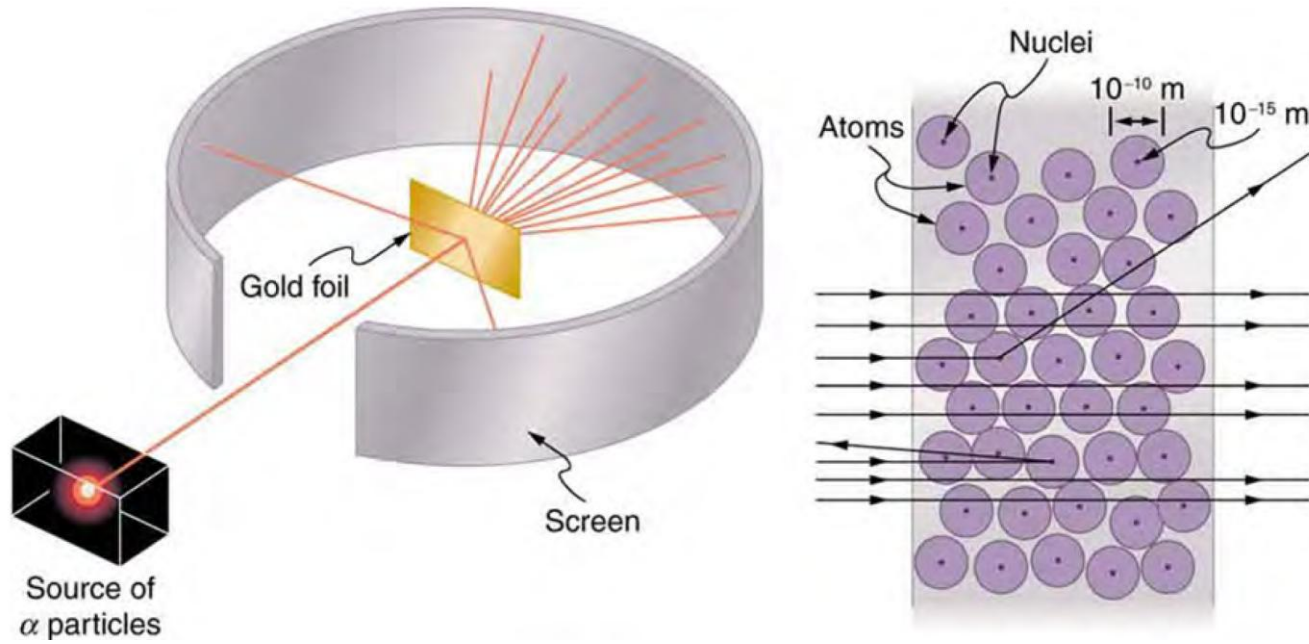
**The energy of alpha particles emitted by Ra is 5.3 MeV.**

$\alpha$  particle



${}^4_2\text{He}$

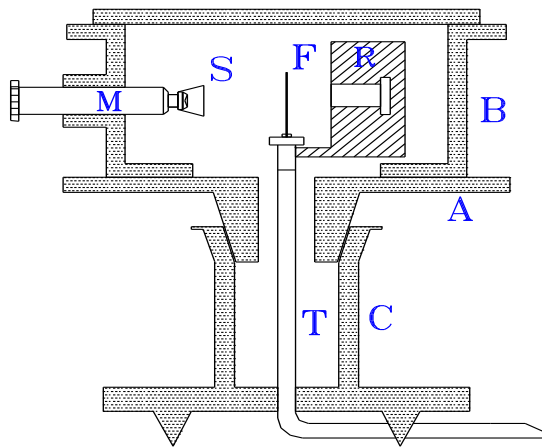
# 粒子散射实验（盖革-马斯顿实验）



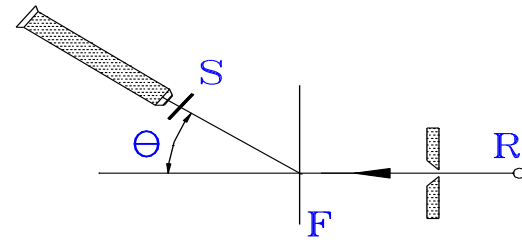
- **散射**：一个运动粒子受到另一个粒子的作用而改变原来的运动方向的现象。粒子受到散射时，它的出射方向与原入射方向之间的夹角叫做**散射角**。
- **实验结果**：大多数散射角很小，约 $1/8000$ 散射大于 $90^\circ$ ，极个别的散射角等于 $180^\circ$



# 实验装置示意图



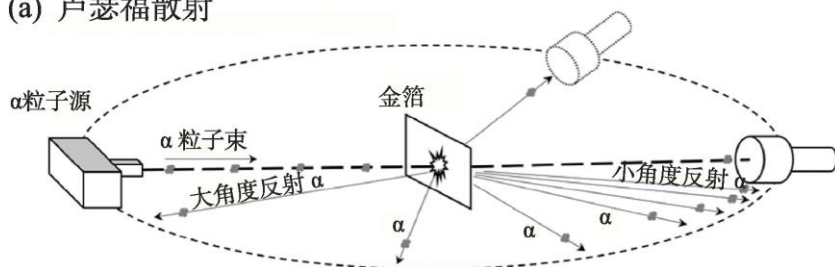
(a) 侧视图



(b) 俯视图

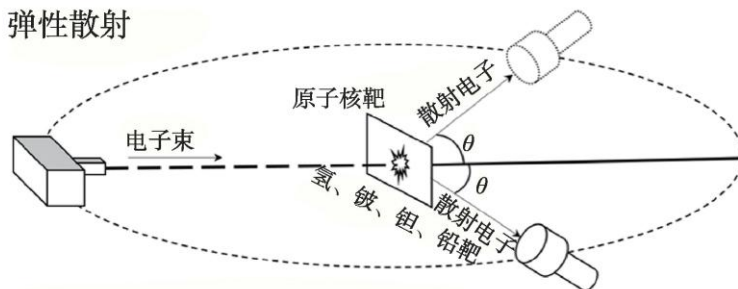
**R:**放射源;      **F:**散射箔;  
**S:**闪烁屏;      **B:**金属匣

(a) 卢瑟福散射



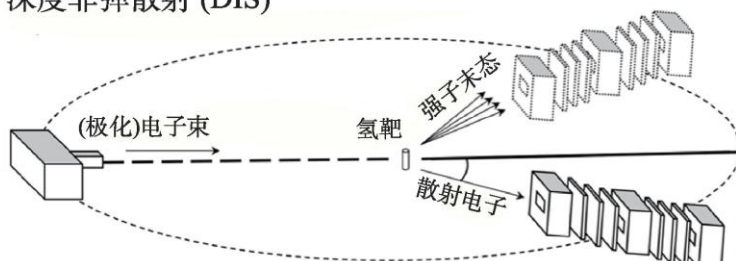
Ernest Rutherford  
(1871–1937)

(b) 弹性散射



Robert Hofstadter  
(1915–1990)

(c) 深度非弹散射 (DIS)



Jerome  
I. Friedman  
(1930–)



Henry  
W. Kendall  
(1926–1999)



Richard  
E. Taylor  
(1929–2018)

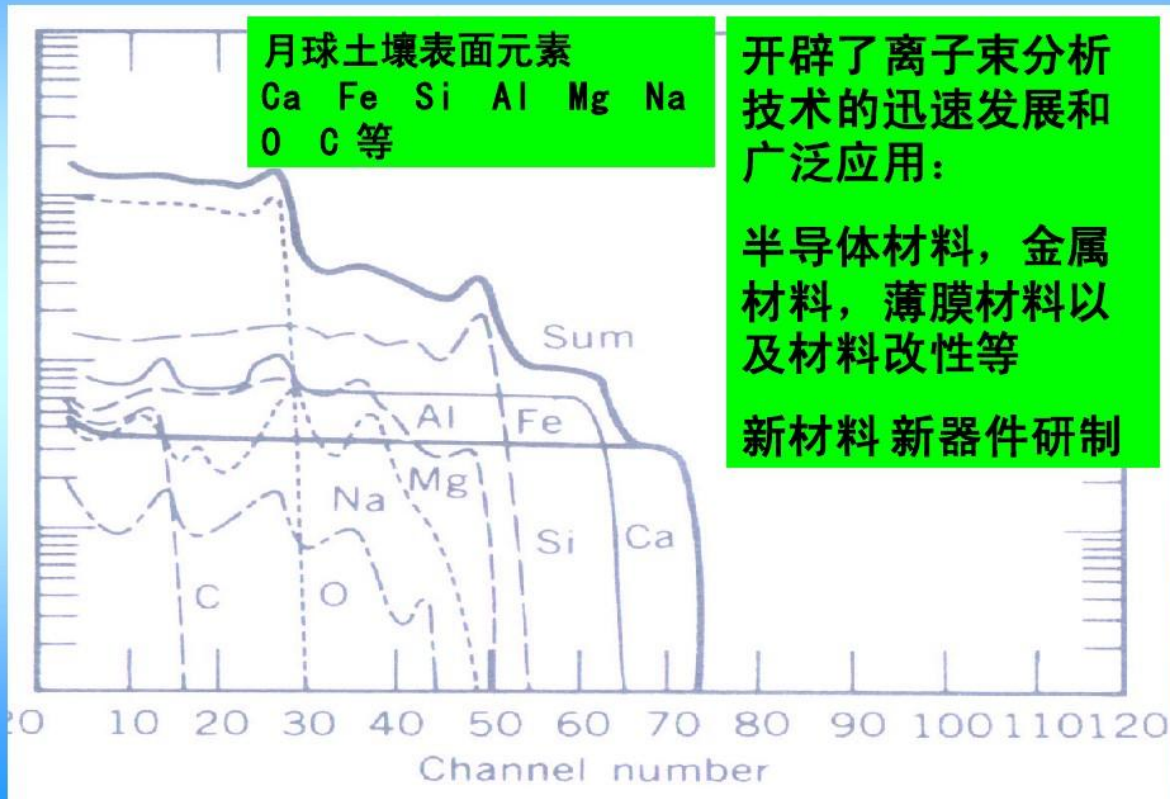
## Nobel prize in 1961

"for his pioneering studies of electron scattering in atomic nuclei and for his thereby achieved discoveries concerning the structure of the nucleons"

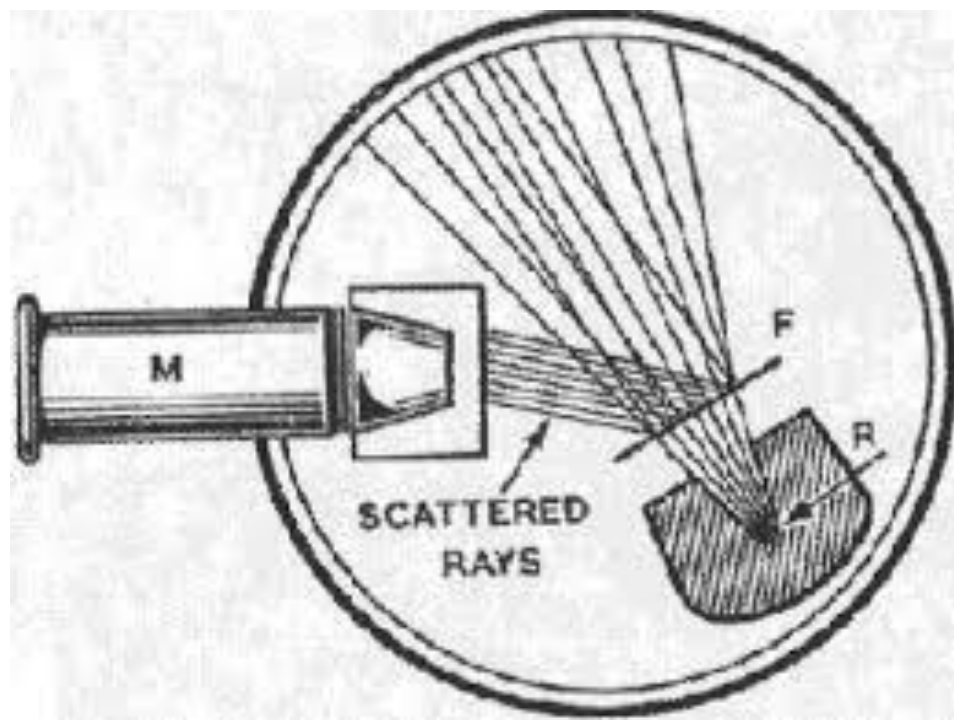
## 1990年 诺贝尔奖

"for their pioneering investigations concerning deep inelastic scattering of electrons on protons and bound neutrons, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics"

# 月球土壤表面元素分析



# 卢瑟福散射

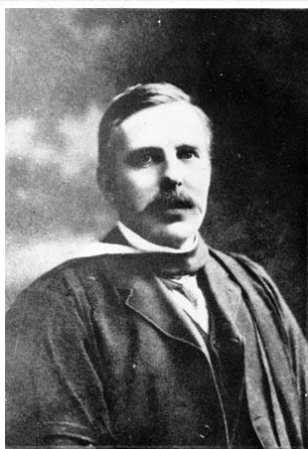
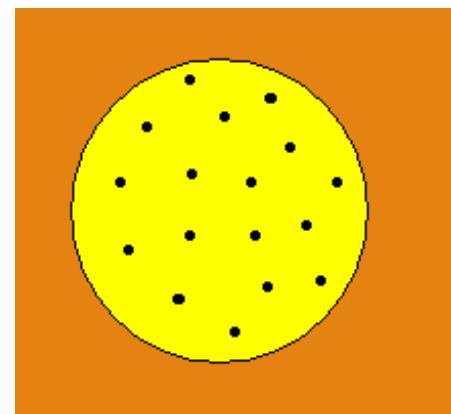


卢瑟福：这是我一生中从未有过的最难以置信的事件，它的难以置信好比你对一张白纸射出一发15英寸的炮弹，结果却被顶了回来打在自己身上。

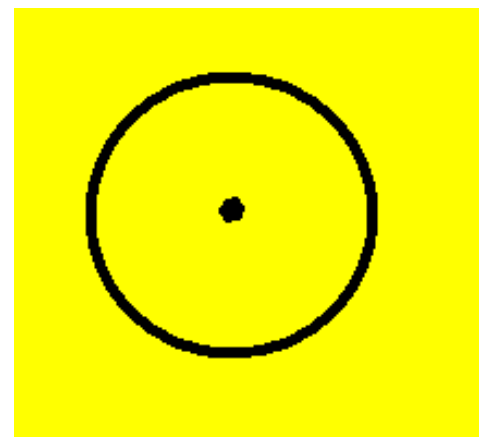
# 原子内部结构的物理图像？



汤姆孙



卢瑟福







- 可以由气体分子运动论算出

$$\bar{\lambda} \times 4\pi r^2 \times \sqrt{2}N = 1$$

原子的截面

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{4\sqrt{2}N\pi r^2} = \frac{kT}{4\sqrt{2}\pi r^2 p}$$

平均自由程

单位体积原子数

原子半径

- 
- 由 von de Waals 定律算出

$$\left(p + \frac{a}{V}\right)(V - b) = RT$$

- 其中  $b = 4V_a$

$V_a$  原子体积

$$R = k N_A$$