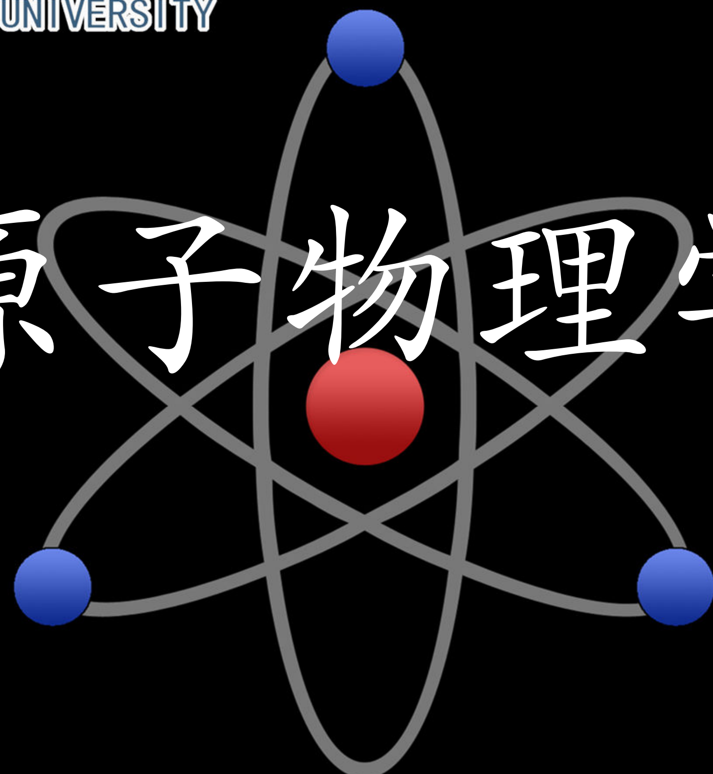
盐城师范学院
YANCHENG TEACHERS UNIVERSITY

原子物理学



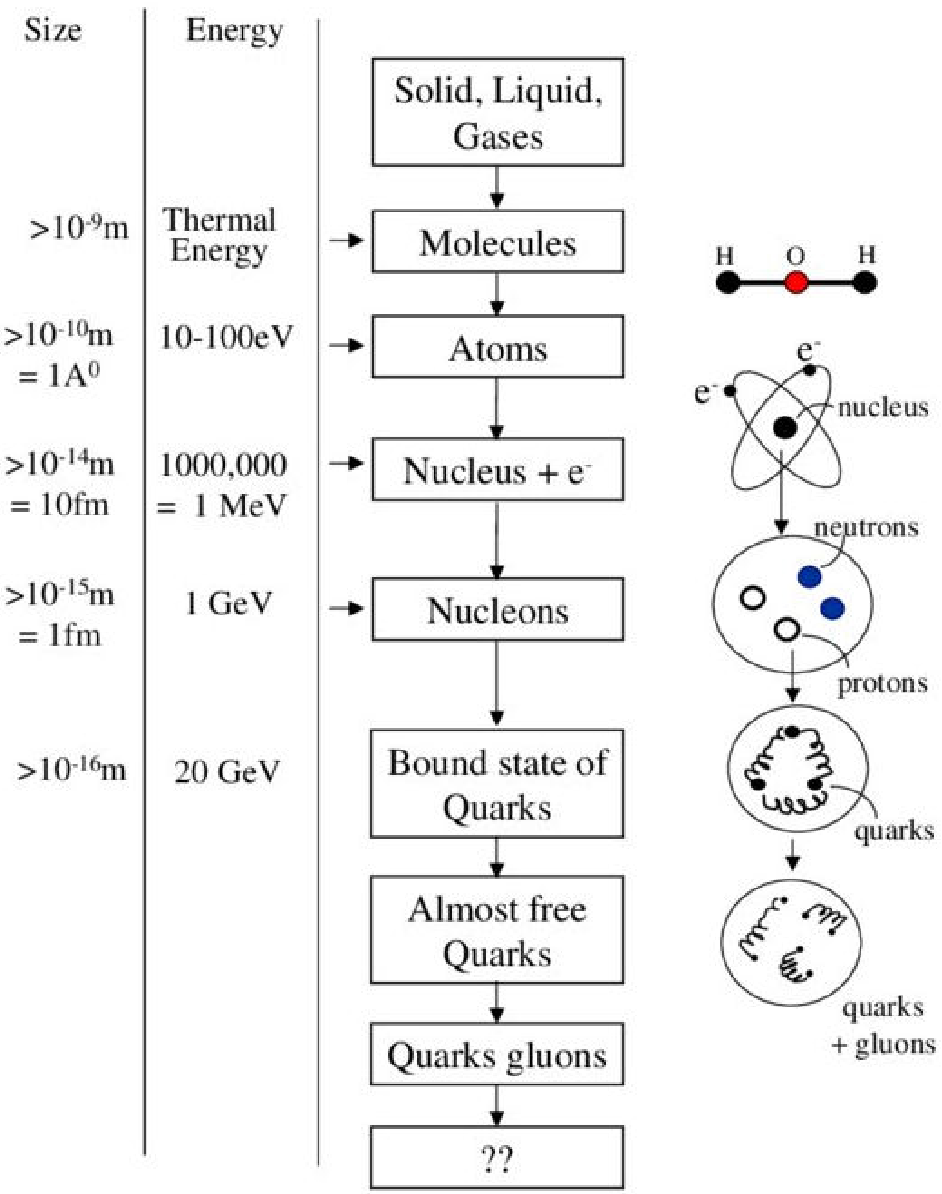
叶 润

Email: yer@yctu.edu.cn

办公室： 物电学院407

一、什么是原子物理学

原子物理学是原子的结构、运动规律及相互作用的物理学分支。

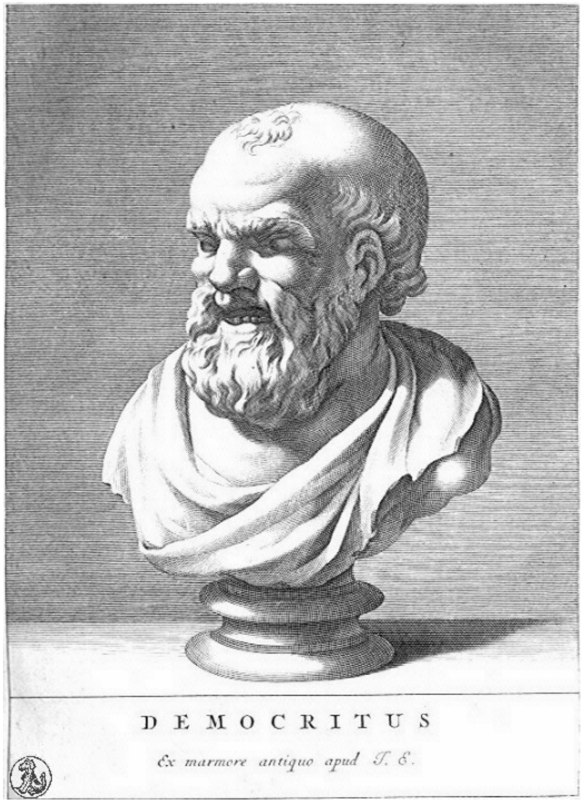


研究内容

- 原子的电子结构
- 原子光谱
- 原子之间的碰撞过程和相互作用
- 原子与其他物质的碰撞和相互作用

……

二、原子的“前世今生”



德谟克利特
(前460-前370)

“原子” 希腊文，
“不可分割”

原子观

伽利略
笛卡尔
牛顿

端：体之无序
最前者也

物质连续
无限止分割

反对派

亚里士多德
阿那萨古腊

一尺之棰，
日取其半，
万世不竭

二、原子的“前世今生”

19世纪以来重要发现

- 1807 道尔顿发现倍比定律，提出原子论
- 1811 阿伏伽德罗 阿伏伽德罗定律
- 1826 英国布朗 布朗运动
- 1869 门捷列夫 元素周期表
- 1895 伦琴 X射线
- 1896 贝克勒尔 天然放射性
- 1897 汤姆逊 电子
- 1911 卢瑟福 核式模型
- 1913 玻尔 玻尔模型（原子量子理论）

……

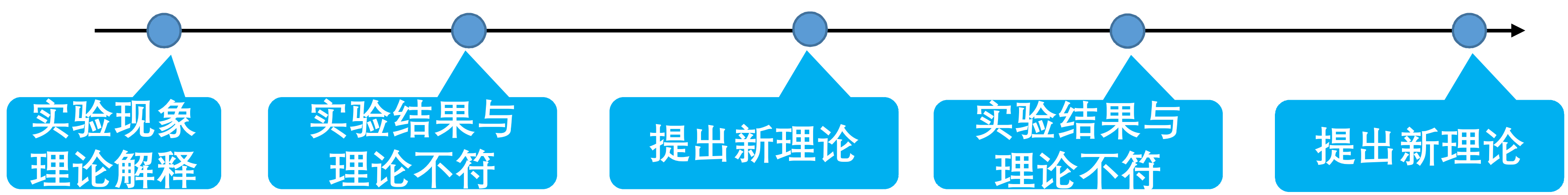
三、原子物理学的特点

- 正在发展的学科

- 实验学科

  以实验现象为核心，不断修正理论模型

- 讲授方式按照时间顺序



四、原子物理学讲授的内容

- 1. 讲述原子是由什么组成的
- 2. 讲述原子内电子是怎么运动的
- 3. 简单介绍量子力学
- 4. 介绍电子的自旋运动以及与轨道运动的耦合
- 5. 讲述原子核外多个电子的分布及组成原子后的外壳层精细结构
- 6. 介绍原子内壳层能级以及X射线的产生
- 7. 介绍原子核的基本性质及规律

第一章　原子的位形：卢瑟福模型

§1 背景知识

§2 卢瑟福模型的提出

§3 卢瑟福散射公式

§4 卢瑟福公式的实验验证

§5 行星模型的意义及困难

重点： 原子的核式结构　　卢瑟福散射公式

§1　背景知识

一、原子的质量

1mol物质的含有的粒子数：阿伏伽德罗常数。

$$N_A = 6.022\times10^{23}mol^{-1}$$

已知该原子的摩尔质量为 A

原子质量　$$\boxed{M_A = \frac{A}{N_A}}$$

氢原子的质量：　$1.67\times10^{-27}kg$

原子质量的数量级：$10^{-27}kg$——$10^{-25}kg$

二、原子的大小

设半径为*r*的球形原子紧密排列

已知物质的质量密度为ρ

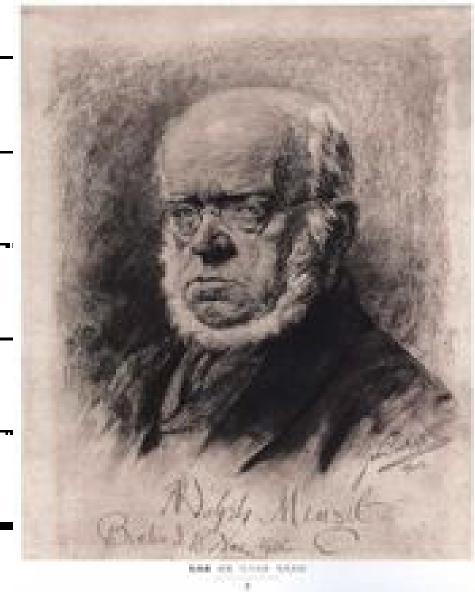
$$\rho\cdot\frac{4}{3}\pi r^{3}N_{A}=A$$

原子半径

$$\boxed{r=\left(\frac{3A}{4\pi N_{A}\rho}\right)^{1/3}}$$

元　　素	质量数A	质量密度ρ (g/cm^3)	原子半径r(Å)
Li	7	0.7	1.6
Al	27	2.7	1.6
Cu	63	8.9	1.4
S	32	2.07	1.8
Pb	207	11.34	1.9

其中 1Å(埃) = 10^{-10} m，是原子领域中常用的长度单位。



Anders Ångström

瑞典科学家　　安德斯·埃格斯特朗

原子的半径 — $10^{-10}m = 0.1nm$

原子核半径 — $10^{-15}m = 1fm$

三、电子的发现

1833年，法拉第提出电解定律，据此可以推得

1*mol*任何原子的单价离子永远带有相同的电量。

$$\boxed{q = \frac{F}{N_A}}$$

法拉第常量 F

阿伏伽德罗常数N_A

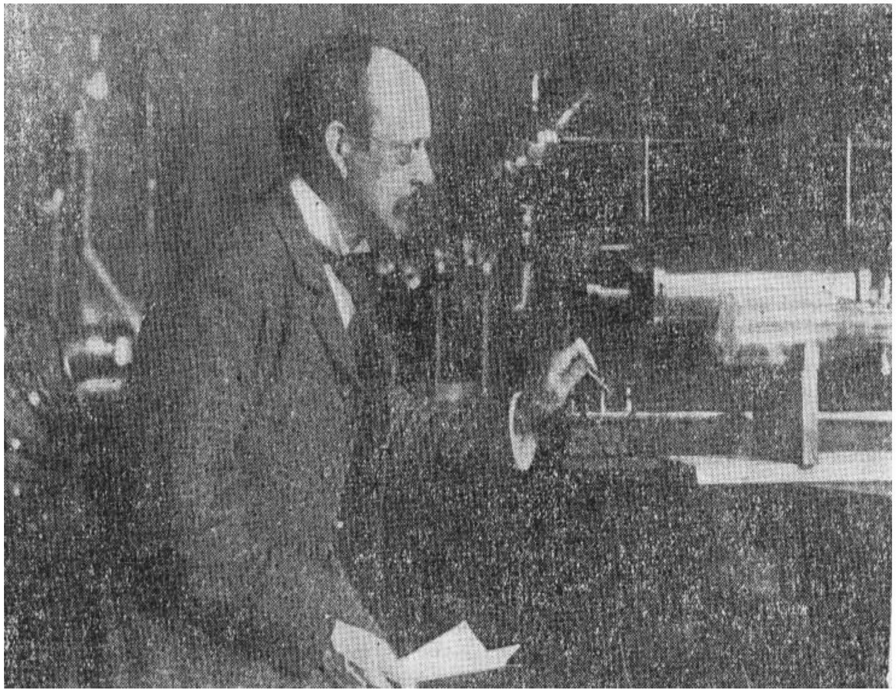
推论：电荷存在最小单元。

1874年，斯通尼（*G. J. Stoney*）

原子所带电荷为某一<u>元电荷</u>的整数倍。

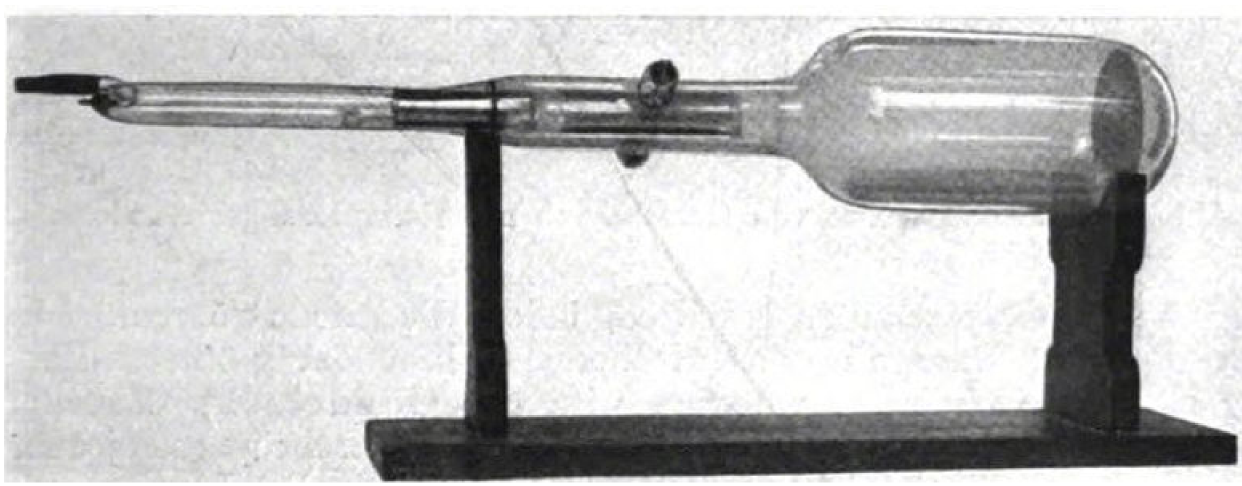
1881年，用“电子”命名电荷的最小单位。

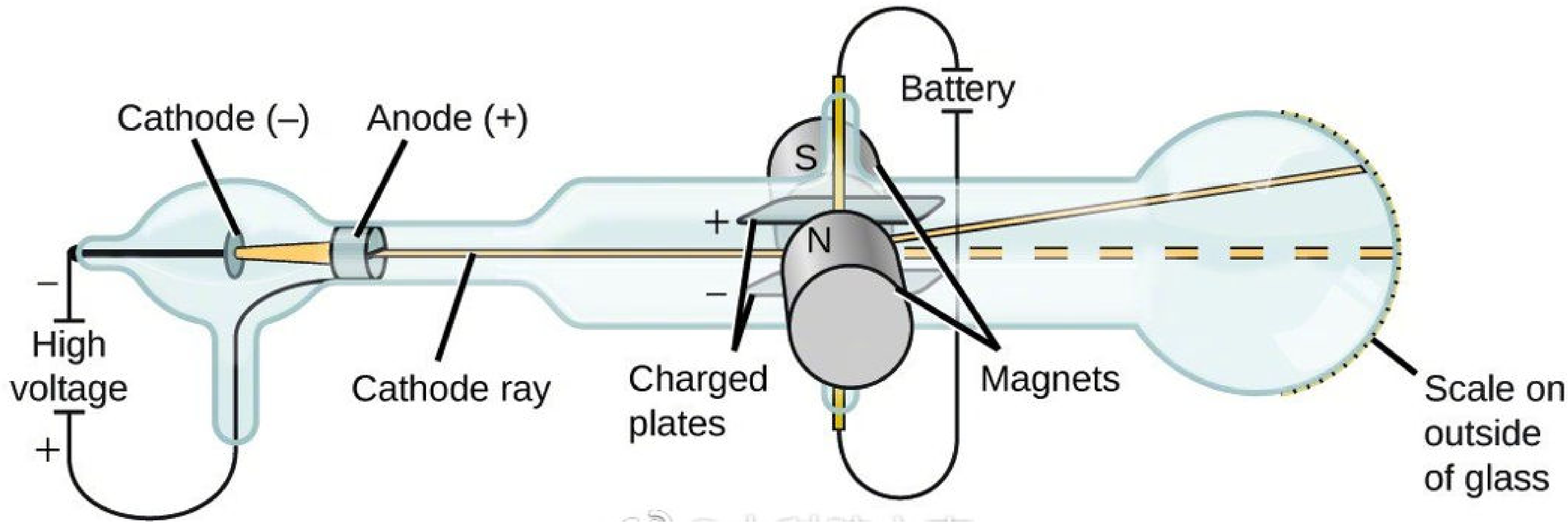
J. J. Thomson



1897年，汤姆孙，阴极射线管实验，测出电子的荷质比。

汤姆孙:“最先打开通向粒子物理学大门的人。”





加电场E后射线偏转 ⇒ 阴极射　　线带负电

再加磁场后射线不偏转⇒　$q\upsilon B = qE \;\Rightarrow\; \upsilon = E/B$

去掉电场后射线成圆形轨迹⇒　$q\upsilon B = m\upsilon^2/r$

阴极射线微粒荷质比 ⇒　$q/m = E/rB^2$

阴极射线微粒荷质比为氢离子荷质比的千倍

⇒ 阴极射线质量约为氢原子质量的千分之一 ⇒ 电子

1910年, *R. Millikan* "油滴实验" 精确测定电子电荷。

$$e = 1.59 \times 10^{-19}\mathrm{C}$$

$$e = 1.60217648 \times 10^{-19}\mathrm{C}$$

$$m_e = 9.1093897 \times 10^{-31}\mathrm{kg}$$

电 荷 量 子 化

1923年获诺贝尔物理学奖

R. Millikan（美）
(1868-1953)

电荷为何呈量子化分布的机制至今仍未解决！！！

$m_e = 9.10938215 \times 10^{-31} kg$

$m_p / m_e = 1836.15267247$

原子物理学中两个重要的无量纲常数之一

$m_p = 1.672621637 \times 10^{-27} kg$

$= 1.007276466 \ u$

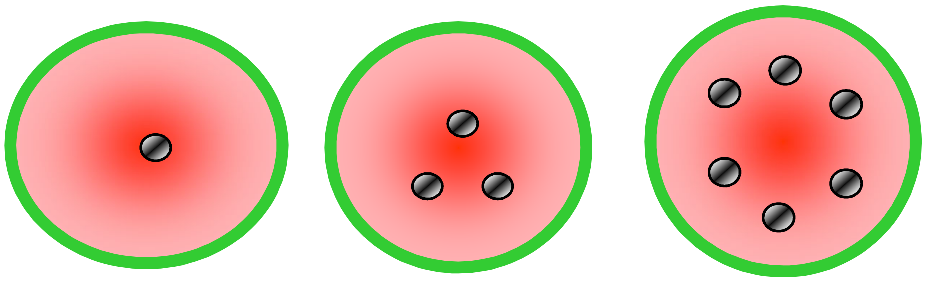
$$\boxed{E = mc^2}$$

$$\boxed{m_e = 0.510\,998 MeV / c^2}$$

$$\boxed{m_p = 938.272\,013 MeV / c^2}$$

§2　卢瑟福模型的提出

一、汤姆孙“西瓜”原子模型　1898，1903，1907



正电荷和质量<u>均匀分布</u>在原子大小的弹性实心球内，电子象西瓜里的瓜子那样嵌在球内。

- 带负电的电子一颗一颗地镶嵌在球内各处的一个个同心环上，第一个环上可放5个电子，第二个环上可放10个，……原子中正负电荷总量相等。原子处于最低能态时，电子在平衡位置不动。当原子被激发到高能态时，电子在平衡位置上作简谐振动，并发射电磁辐射。
- 汤姆孙模型在解释元素的周期性方面取得了一定的成功，也能定性地解释原子的光辐射，例如，对于氢原子，根据汤姆孙模型，可有一个远紫外频率的光辐射，但不能解释实验观测到的大量不同频率的氢原子光谱。

The Nobel Prize in Physics 1906

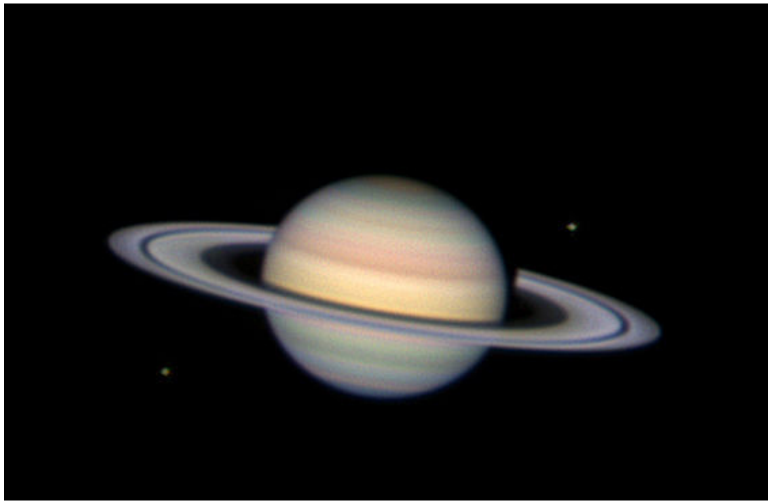
Joseph John Thomson

(1856-1940)

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

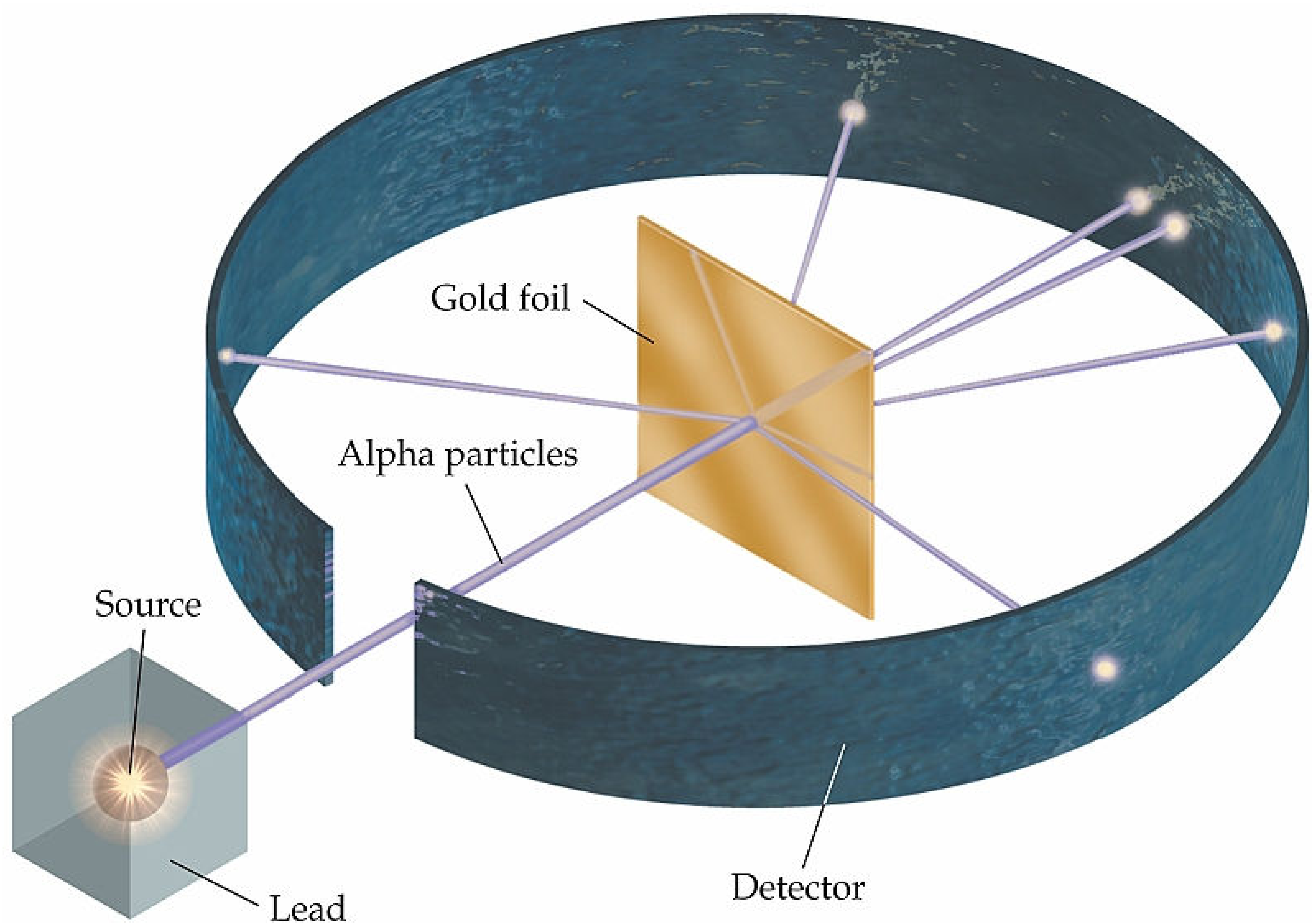
1903年，林纳在研究阴极射线被物质吸收实验里发现：原子内部是十分空虚的。

1904年，长冈半太郎提出原子的土星模型。认为原子内正电荷集中于中心，电子均匀分布着在绕正电球旋转的圆环上。

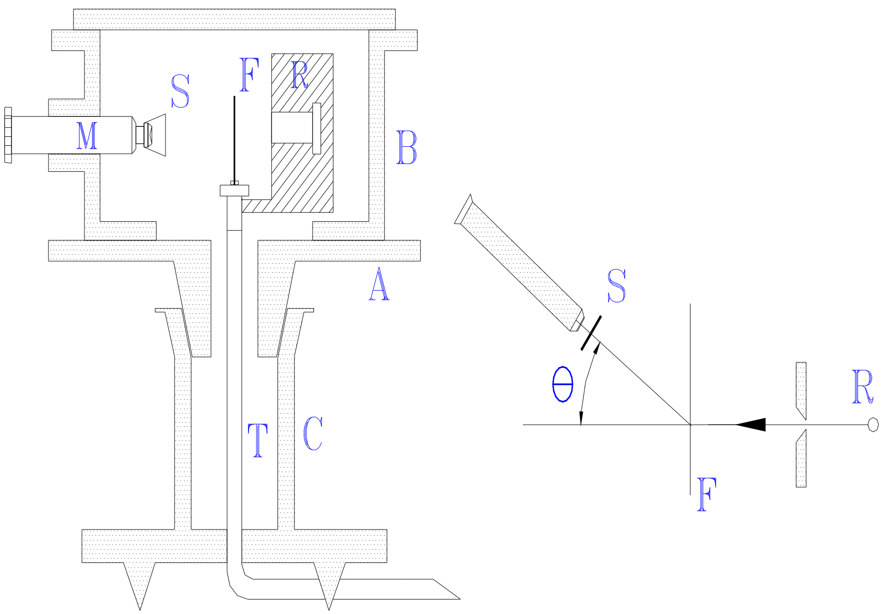


但他没有做进一步深入研究。

二、α粒子散射实验



α粒子散射实验 (盖革－马斯顿)



(*a*) 侧视图　　　(*b*) 俯视图

α粒子：放射性元素发射的带电粒子，速度约为$c/10$，$+2e$的电荷，质量约为$4M_H$。

散射：运动粒子受到另一粒子的作用而改变运动方向的现象。

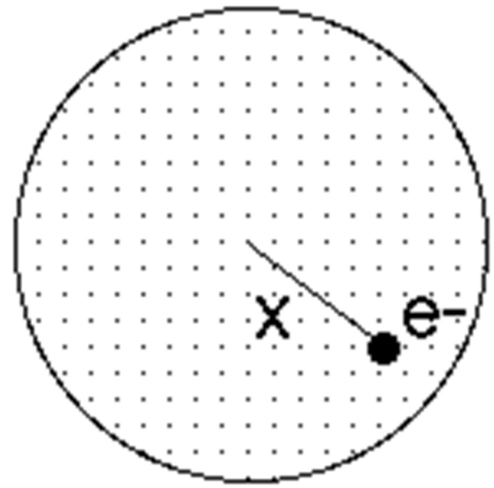
散射角:散射粒子出射方向与入射方向之间的夹角。

R:放射源；*F*:散射箔；*S*:闪烁屏；*B*:金属匣

实验结果：大多数散射角很小，约1/8000散射大于90°；极个别的散射角等于180°。

“就像一枚15英寸的炮弹打在一张纸上又被反射回来一样”

三、汤姆孙模型的困难



近似1：忽略粒子散射受电子的影响。

近似2：只考虑原子中带正电而质量大的部分对粒子的库仑力的作用影响。

$r > R$，粒子受的库仑斥力

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Ze^2}{r^2}$$

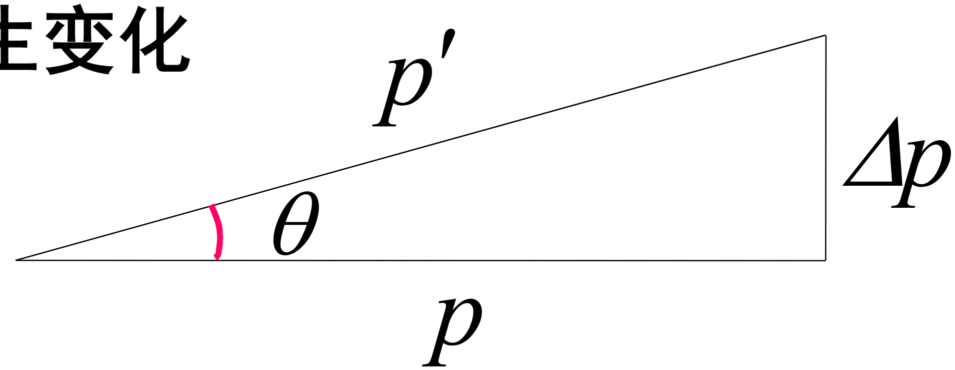
$r < R$，粒子受的库仑斥力

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Ze^2}{R^3}r$$

$r = R$，粒子受的库仑斥力最大

$$\boxed{F_{\max} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Ze^2}{R^2}}$$

粒子受原子作用后动量发生变化



$$\Delta p = F_{\max} \cdot \Delta t = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{2Ze^2}{R^2}\cdot\frac{2R}{v} = \frac{4Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 R v}$$

散射角满足 $$\tan\theta = \frac{\Delta p}{p} = \frac{4Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 R\upsilon M_\alpha \upsilon} = \frac{4Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 R M_\alpha \upsilon^2}$$

$$\boxed{\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = 1.44\, fm \cdot MeV}$$

发现： $\theta \sim 10^{-4}$

结论：

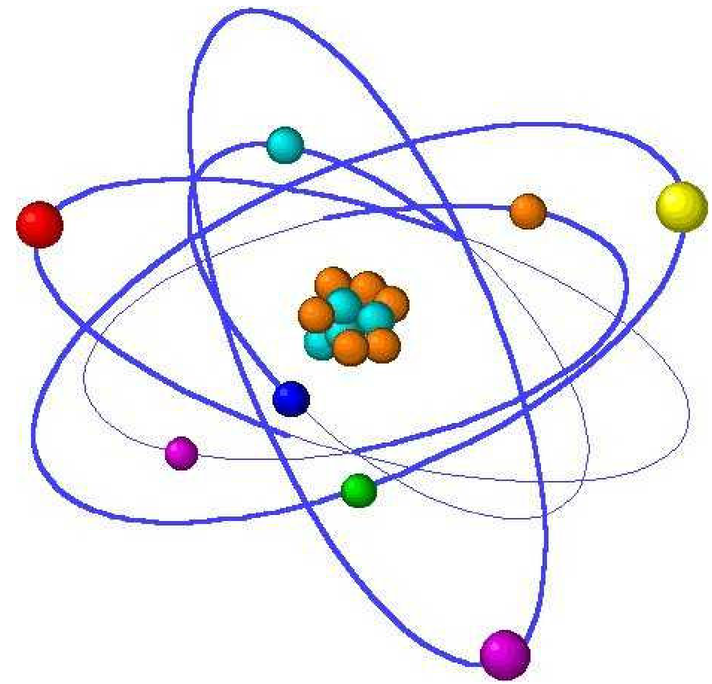
大角散射<u>不可能</u>在汤姆孙模型中发生。

散射角大于3°的比1%少得多；散射角大于90°的约为10^{-3500}。必须重新寻找原子的结构模型。

困难：作用力F太小，不能发生大角散射。

解决方法：减少带正电部分的半径R，使作用力增大。

四、卢瑟福的原子核式模型

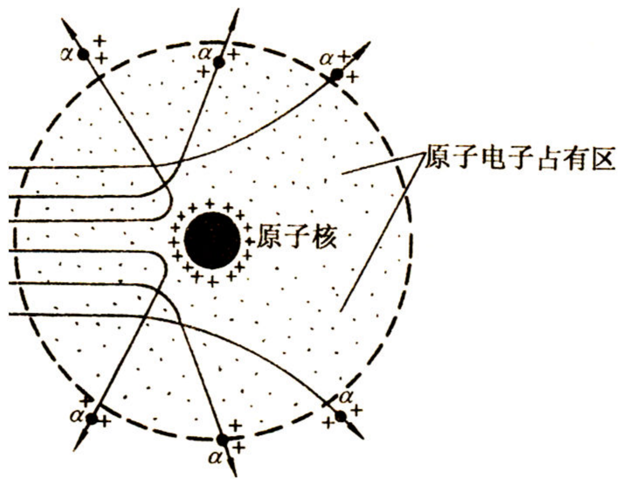


原子序数为Z的原子的中心有一个带正电荷的原子核。

核带正电荷Ze。核的体积极小但质量很大，几乎等于整个原子的质量。

核外有Z个电子围绕它运动。

五、核式结构模型对α粒子散射实验的定性解释



核很小，绝大部分α粒子从原子核周围穿过，原子核的作用力不大，偏转很小。

少数α粒子从原子核附近通过，r较小，受的作用力较大，有较大的偏转。

极少数正对原子核入射的α粒子，由于r很小，受的作用力很大，有可能反弹回来。

【例题1】1911年，卢瑟福根据____α____粒子在原子内的____大角____散射现象，而提出了原子的____核式____结构模型。

【例题2】在认识原子结构，建立原子模型的过程中，____α粒子散射____实验起了重大作用。

【例题3】原子核式结构的提出是根据α粒子的散射（　　　）。

A、以大角散射为主，也存在小角散射

B、以小角散射为主，也存在大角散射

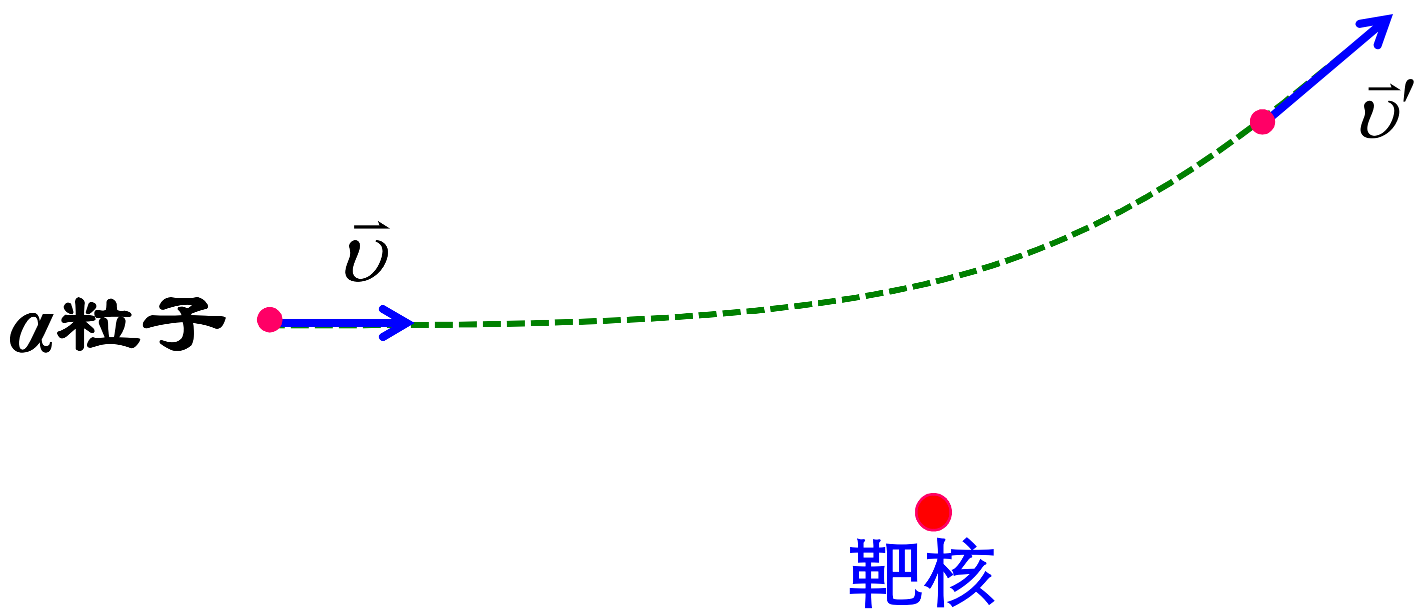
C、 α粒子只偏2° - 3°

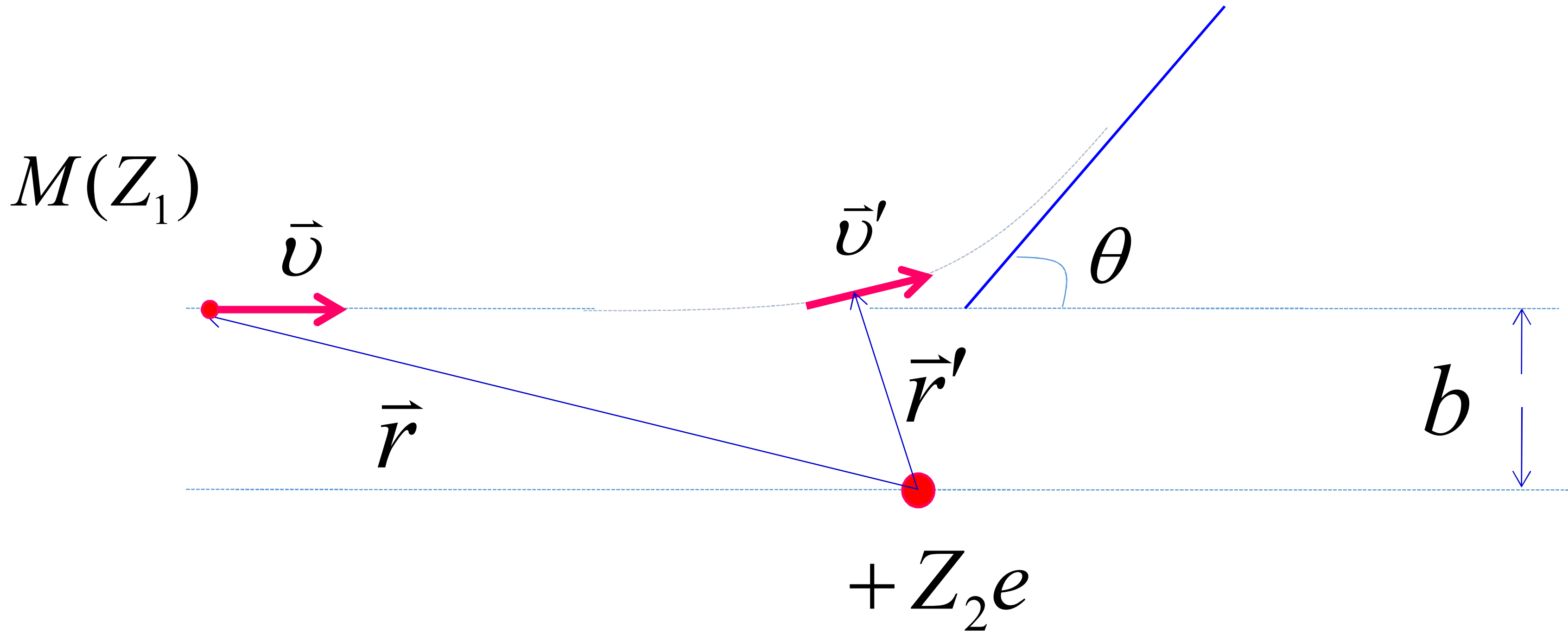
D、绝大多数接近180°

§3 卢瑟福散射公式

一、库仑散射公式

1、库仑散射： 带电粒子穿过物质时，在原子核的库仑场作用下发生偏转的现象。





有心力作用下，机械能、角动量都守恒。

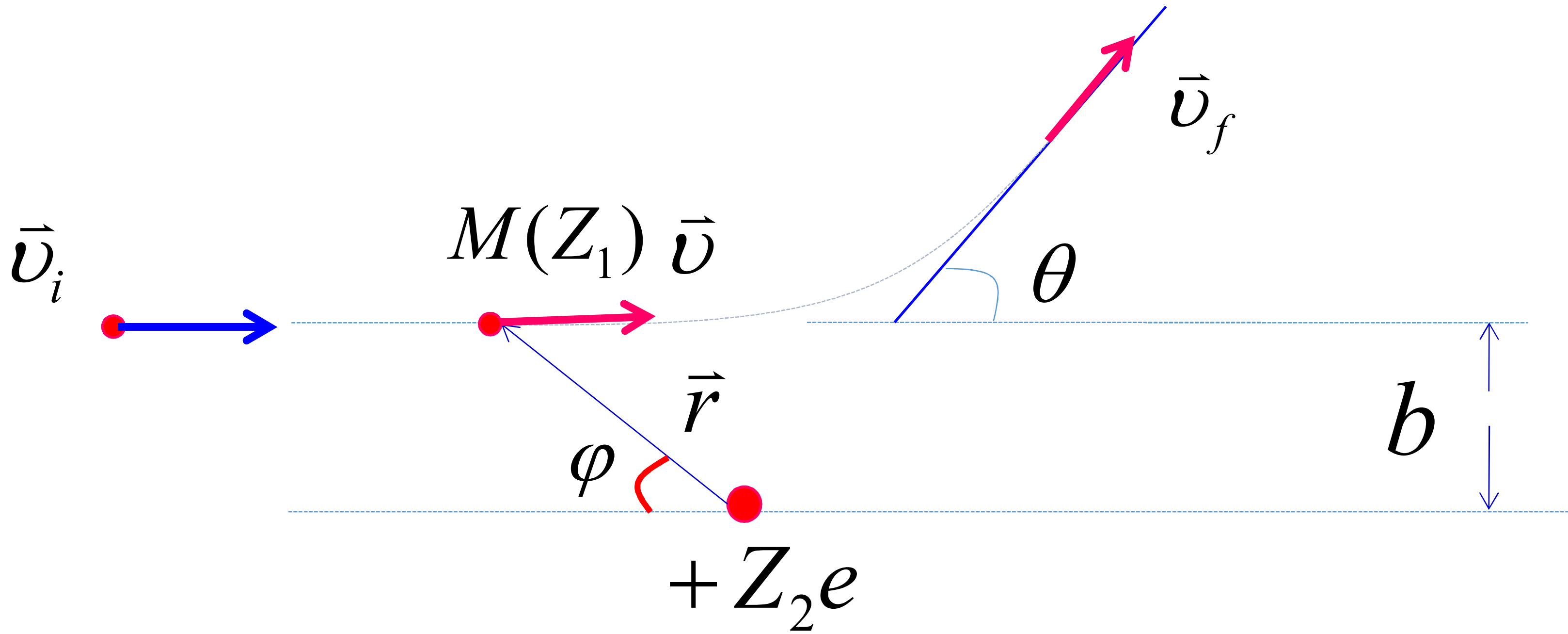
$$\begin{cases} \dfrac{1}{2}M\upsilon^2 = \dfrac{1}{2}M\upsilon'^2 + \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0}\dfrac{Z_1Z_2e^2}{r'} \\ \vec{r} \times M\vec{\upsilon} = \vec{r}' \times M\vec{\upsilon}' \qquad \boxed{(L = M\upsilon b)} \end{cases}$$

2、库仑散射公式的推导

$$b=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{2E}cot\frac{\theta}{2}$$

四个假设

- 只发生单次散射　（原子内部空旷）
- 只有库仑相互作用　（忽略万有引力）
- 核外电子作用可忽略
- 靶核静止

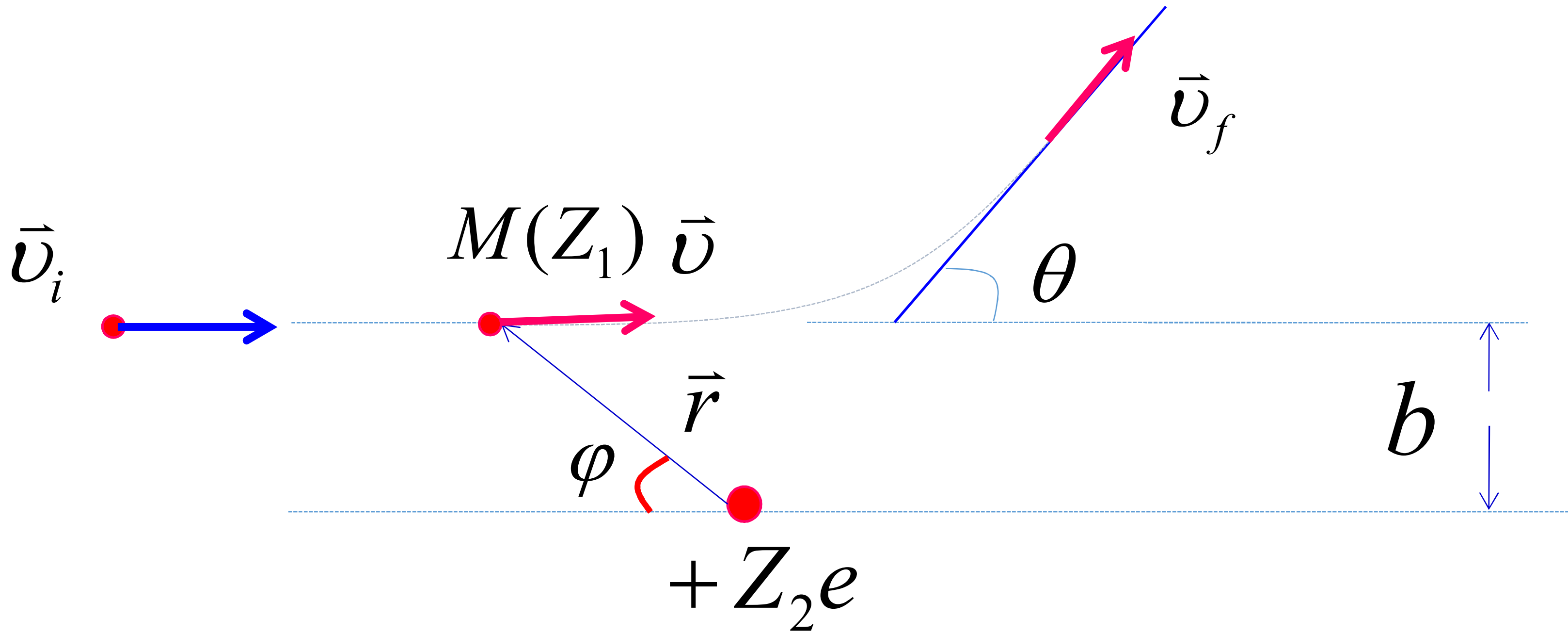


牛顿第二定律

$$\vec{F} = m\vec{a} \Rightarrow \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{r^2}\vec{e}_r = m\frac{d\vec{\upsilon}}{d\varphi}\boxed{\frac{d\varphi}{dt}}$$

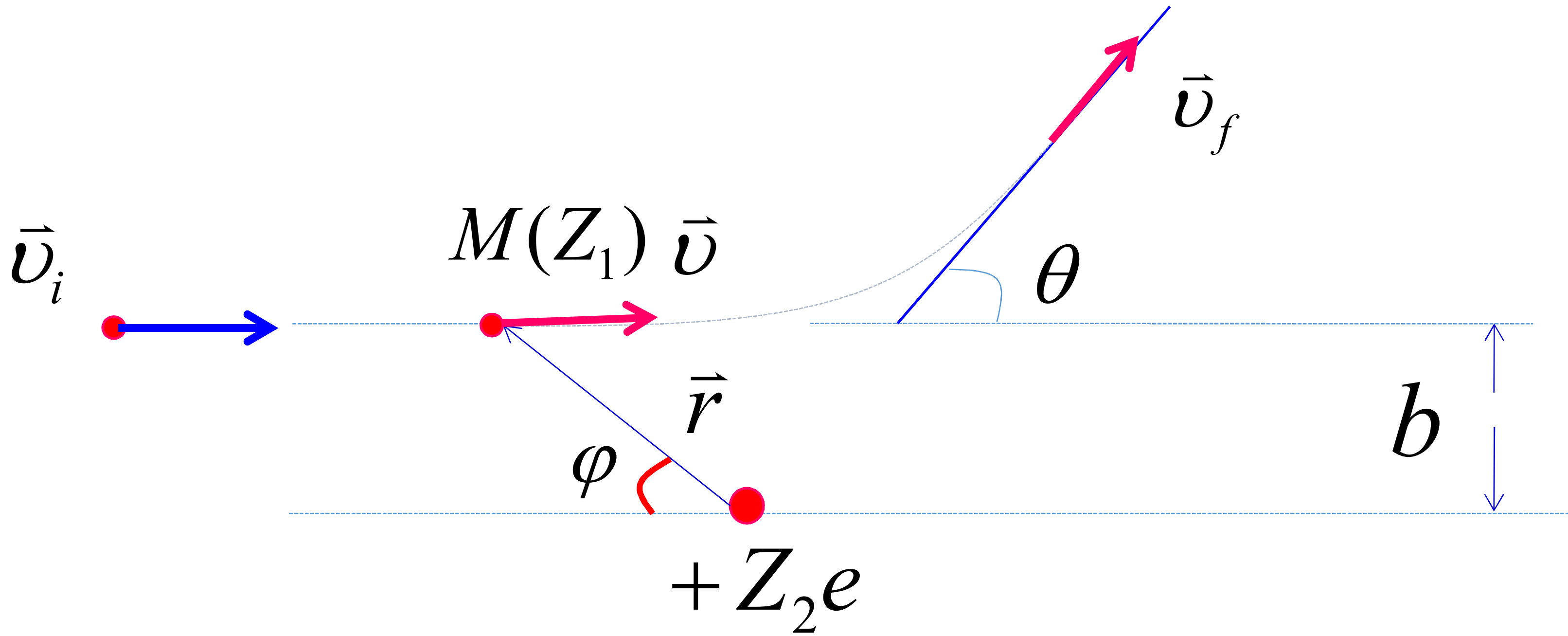
角动量守恒

$$L = J\omega = mr^2\omega = mr^2\boxed{\frac{d\varphi}{dt}}$$



$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1 Z_2 e^2}{\cancel{r^2}}\vec{e}_r = \cancel{m}\frac{d\vec{\upsilon}}{d\varphi}\frac{L}{\cancel{m}\cancel{r^2}}$$

$$d\vec{\upsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1 Z_2 e^2}{L}\vec{e}_r d\varphi$$



两边积分

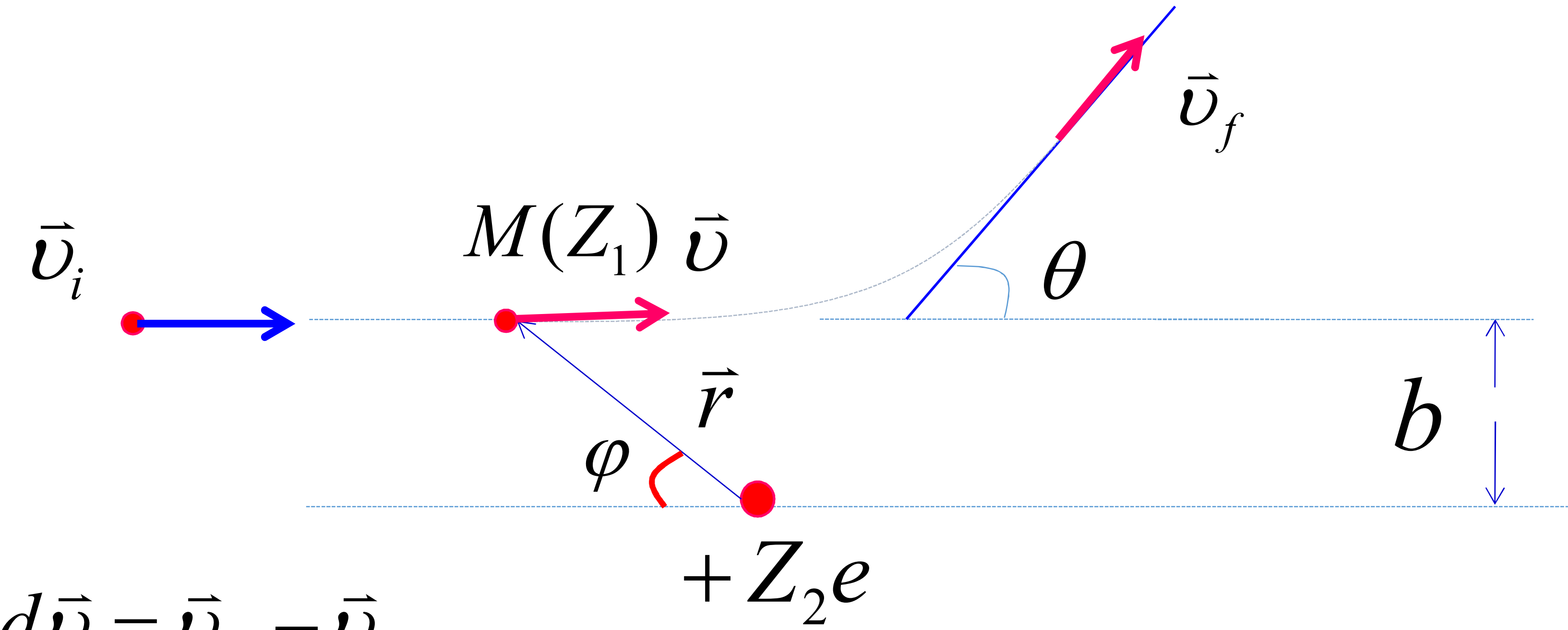
$$\int d\vec{\upsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{L}\int \vec{e}_r d\varphi$$

$$\int d\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_f - \vec{\upsilon}_i$$

能量守恒

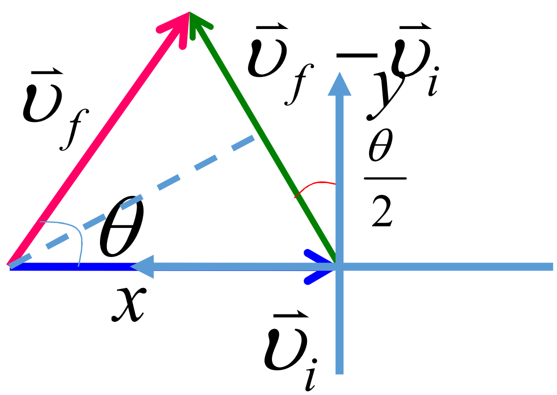
$$\frac{1}{2}M\upsilon_f^{\ 2} = \frac{1}{2}M\upsilon_i^{\ 2}$$

$$\boxed{\upsilon_f = \upsilon_i = \upsilon}$$



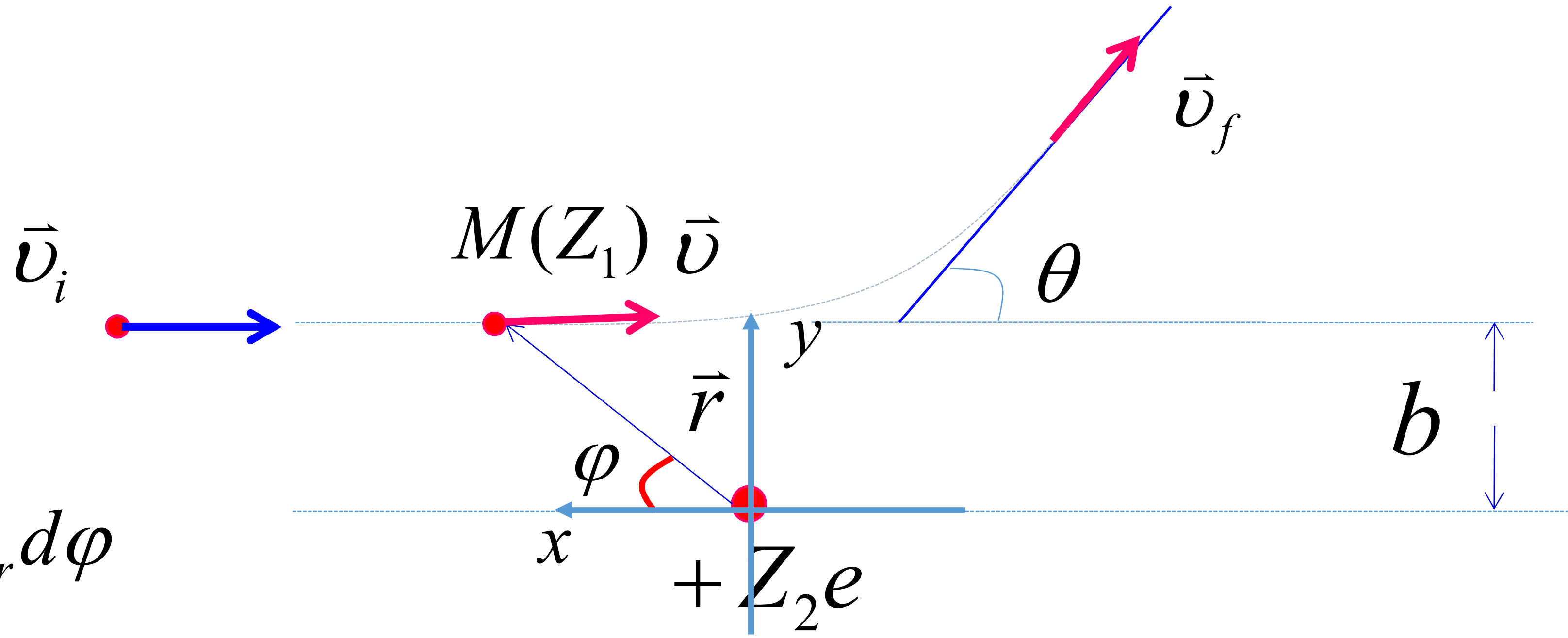
$$\int d\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_f - \vec{\upsilon}_i$$

$$\left|\vec{\upsilon}_f - \vec{\upsilon}_i\right| = 2\upsilon\, sin\frac{\theta}{2}$$



$$\int d\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_f - \vec{\upsilon}_i = 2\upsilon \sin\frac{\theta}{2}\vec{e}_u$$

$$\int d\vec{\upsilon} = \vec{\upsilon}_f - \vec{\upsilon}_i = 2\upsilon \sin\frac{\theta}{2}\left(\sin\frac{\theta}{2}\vec{i} + \cos\frac{\theta}{2}\vec{j}\right)$$



$$\int \vec{e}_r d\varphi$$

$$\int \vec{e}_r d\varphi = \int_0^{\pi-\theta} \left(\cos\varphi\ \vec{i} + \sin\varphi\ \vec{j}\right) d\varphi$$

$$= \left(\sin\varphi\ \vec{i} - \cos\varphi\ \vec{j}\right)\Big|_0^{\pi-\theta}$$

$$= \sin\theta\ \vec{i} + \left(\cos\theta + 1\right)\vec{j}$$

$$= 2\cos\frac{\theta}{2}\left(\sin\frac{\theta}{2}\vec{i} + \cos\frac{\theta}{2}\vec{j}\right)$$

$$\boxed{\int d\vec{\upsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{L}\int \vec{e}_r d\varphi}$$

$$\int d\vec{\upsilon} = 2\upsilon \sin\frac{\theta}{2}\left(\sin\frac{\theta}{2}\vec{i} + \cos\frac{\theta}{2}\vec{j}\right)$$

$$\int \vec{e}_r d\varphi = 2\cos\frac{\theta}{2}\left(\sin\frac{\theta}{2}\vec{i} + \cos\frac{\theta}{2}\vec{j}\right)$$

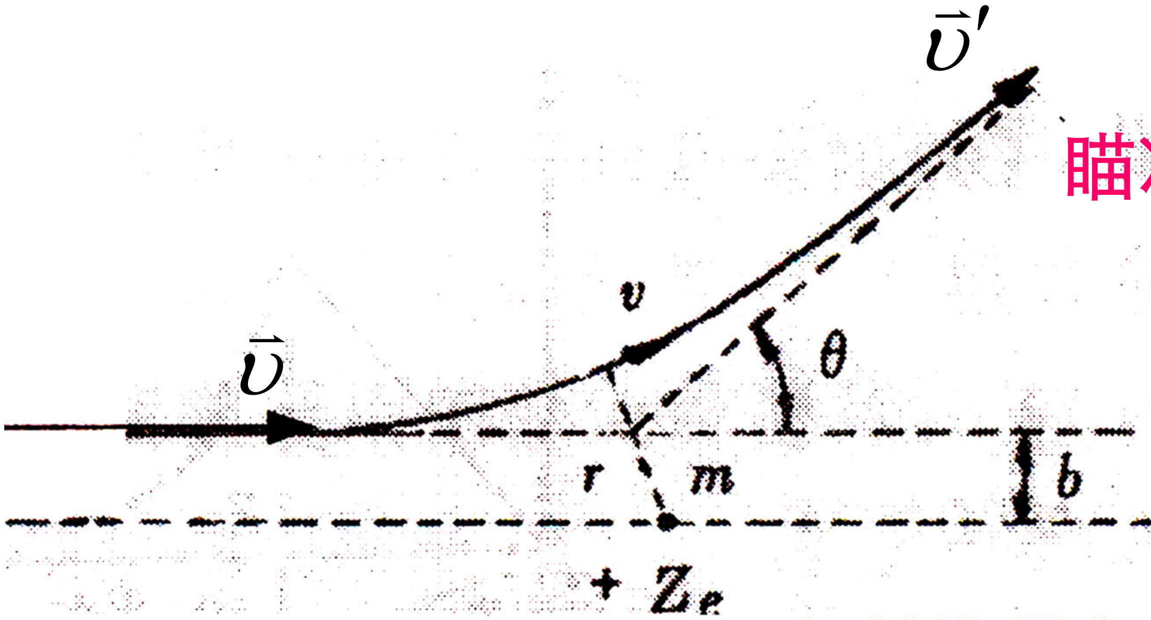
$$2\upsilon \sin\frac{\theta}{2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{\boxed{M\upsilon b}}2\cos\frac{\theta}{2} \qquad \boxed{(L = M\upsilon b)}$$

$$b = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{M\upsilon^2}\cot\frac{\theta}{2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{2E}\cot\frac{\theta}{2}$$

库仑散射公式

$$\boxed{b=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Z_1Z_2e^2}{2E}\cot\frac{\theta}{2}}$$

$$\boxed{a\equiv\frac{Z_1Z_2e^2}{4\pi\varepsilon_0 E}}\qquad\boxed{b=\frac{a}{2}\cot\frac{\theta}{2}}$$



瞄准距离（碰撞参数）

$$\boxed{b = \frac{a}{2}\cot\frac{\theta}{2}}$$

入射粒子与固定散射体无相互作用情况下的最小直线距离。

库仑散射因子

$$\boxed{a \equiv \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 E}}$$

入射粒子的动能

$$\boxed{E = \frac{1}{2}M\upsilon^2}$$

$$\boxed{b = \frac{a}{2}\cot\frac{\theta}{2}} \qquad \boxed{a \equiv \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 E}}$$

若靶核不动这个假设不成立，则可引入质心系能量

$$\boxed{E_c = \frac{1}{2} m_\mu \upsilon^2} \qquad \boxed{m_\mu = \frac{mm'}{m+m'}}$$ 折合质量

相对运动动能

$$\boxed{E_c = \frac{m'}{m+m'} E_L}$$

入射粒子的实验室动能

$$\boxed{E_L = \frac{1}{2} m \upsilon^2}$$

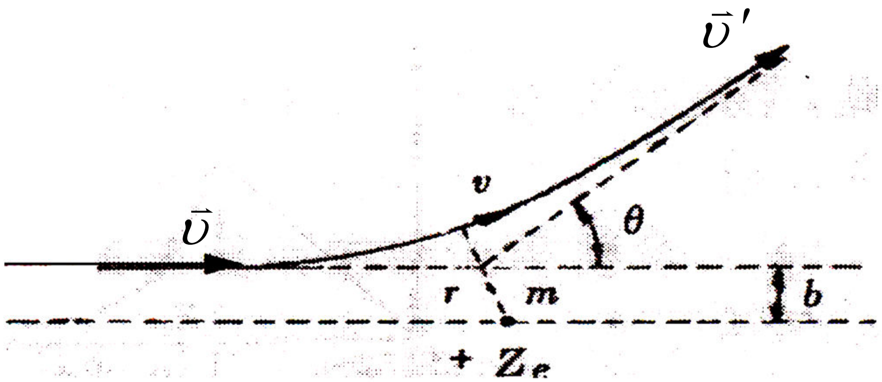
$$\boxed{m' >> m, E_c = E_L}$$

例：$^{214}Po(RaC')$放射出 α 粒子，其能量为 7.68 MeV，当它在金箔上散射时(满足 $m \ll M$ 条件)，按式(3 - 1)可求出 b 与 θ 的关系 * * * ：

瞄准距离 b/fm	散 射 角 θ
10	112°
100	16.9°
1 000	1.7°

$$\boxed{b = \frac{a}{2}\cot\frac{\theta}{2}, a = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\varepsilon_0 E}}$$

$$\boxed{\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} = 1.44\, fm \cdot MeV}$$



$$b = \frac{a}{2}\cot\frac{\theta}{2}$$

b和θ的关系：b小，θ大；b大，θ小。

缺点：

b 是不可控制的微观量，无法测量，

公式无法被实验检验。

如何解决？

卢瑟福完成了这项工作，

并推导出了著名的卢瑟福公式。