

α 粒子散射

张爽 2013301020101

(武汉大学 物理科学与技术学院 湖北 武汉 430072)

摘要： 本文主要介绍了 α 粒子散射，采用了编程语言 Python, 利用计算机的计算和作图功能对 α 粒子散射实验进行了模拟. 对不同入射位置所引起的粒子轨迹进行了模拟，以及给定不同初始速度，定性的验证理论上入射能量与散射角的关系。最终，模拟了多次散射情形下 α 的运动。

关键词： α 粒子散射 程序模拟

一 引言

1909 年 Rutherford 进行了 α 粒子散射实验，并在此基础上建立了原子的核式结构模型，开创了原子物理学的新天地，使人类对微观世界的认识进入新的里程。同样，该实验通过散射来探究物质结构的方法，给予我们启发，在近代物理学诸领域均有广泛应用。实验中用天然放射性 Ra 所发出的 α 粒子打到 Pt 箔上，发现绝大部分 α 粒子平均只偏转 $2^\circ \sim 3^\circ$ ，但大约有 $1/8000$ 的 α 粒子散射角大于 90° ，甚至接近 180° ，即发现存在大角度散射的物理现象。用当时的汤姆孙模型无法解释大角度的散射，卢瑟福认为原子中的正电荷应该是紧密地集中在一起的，当 α 粒子碰到这点时就被弹了回来。由于具有对物理现象深刻的洞察力，卢瑟福最终提出了原子的核式模型。在该模型中，原子核的半径近似为 $10^{-13}cm$ ，约为原子半径的 $1/105$ 。卢瑟福散射实验给了我们正确的有关原子结构的图像，开创了人类认识物质世界的新起点。而卢瑟福本人因对物理学的重大贡献获得诺贝尔物理学奖。

二 正文

(一) 实验原理：

取原子核为 Cu ，带电量 $+79e$ ，位置坐标： (x_i, y_i, z_i) ， α 粒子的电量为 $+2e$ ，

质量为： $6.64 \times 10^{-27}g$ ，任意时刻位置 (x, y, z) 。且结合实际实验中原子核是固定在靶上的，所以视金核的位置不变。

故 α 粒子所受的库仑力为：

$$F = k \frac{2Ze^2}{r_0^2} + k \frac{2Ze^2}{r_1^2} + k \frac{2Ze^2}{r_2^2} + \dots$$

其中：

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}, r_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}$$

则有：

$$\begin{cases} F_x = k \frac{2Ze^2(\bar{x} - \bar{x}_0)}{r_0^3} + k \frac{2Ze^2(\bar{x} - \bar{x}_1)}{r_1^3} + \dots \\ F_y = k \frac{2Ze^2(\bar{y} - \bar{y}_0)}{r_0^3} + k \frac{2Ze^2(\bar{y} - \bar{y}_1)}{r_1^3} + \dots \\ F_z = k \frac{2Ze^2(\bar{z} - \bar{z}_0)}{r_0^3} + k \frac{2Ze^2(\bar{z} - \bar{z}_1)}{r_1^3} + \dots \end{cases}$$

采用 Euler-Cromer method 进行迭代：

$$\begin{cases} a_{x,i} = \frac{F_{x,i}}{m} \\ a_{y,i} = \frac{F_{y,i}}{m} \\ a_{z,i} = \frac{F_{z,i}}{m} \end{cases} \quad \begin{cases} v_{x,i+1} = v_i + a_{x,i}\Delta t \\ v_{y,i+1} = v_i + a_{y,i}\Delta t \\ v_{z,i+1} = v_i + a_{z,i}\Delta t \end{cases} \quad \begin{cases} x_{i+1} = x_i + v_{x,i+1}\Delta t \\ y_{i+1} = y_i + v_{y,i+1}\Delta t \\ z_{i+1} = z_i + v_{z,i+1}\Delta t \end{cases}$$

有：

程序中采用高斯单位制。

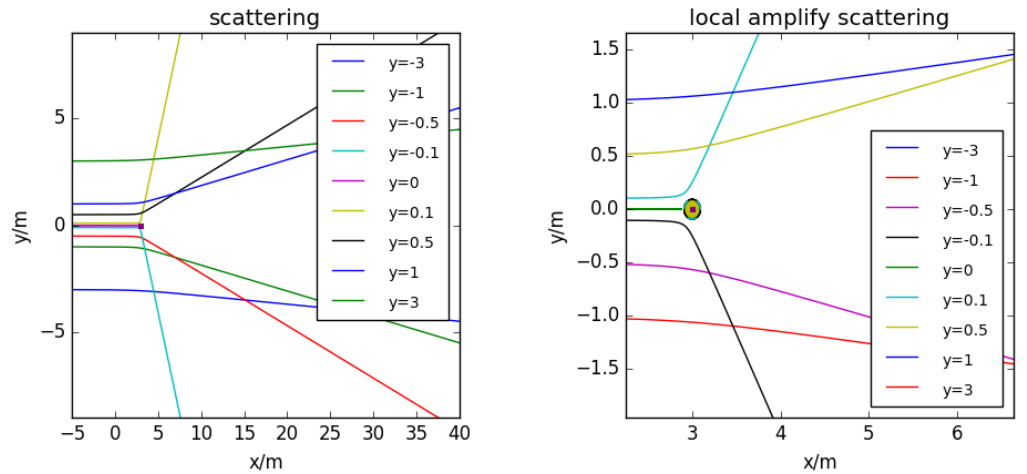
(二) 单核情形：

我们知道，一般库伦散射有四个假设：只发生单次散射；只考虑库伦相互作用；核外电子相互作用忽略；靶核静止。

这里我们先考虑单次散射。

1. 选取初始条件：Cu 核位置：(3,0,0)， α 粒子从不同位置(-100,y,0)，以

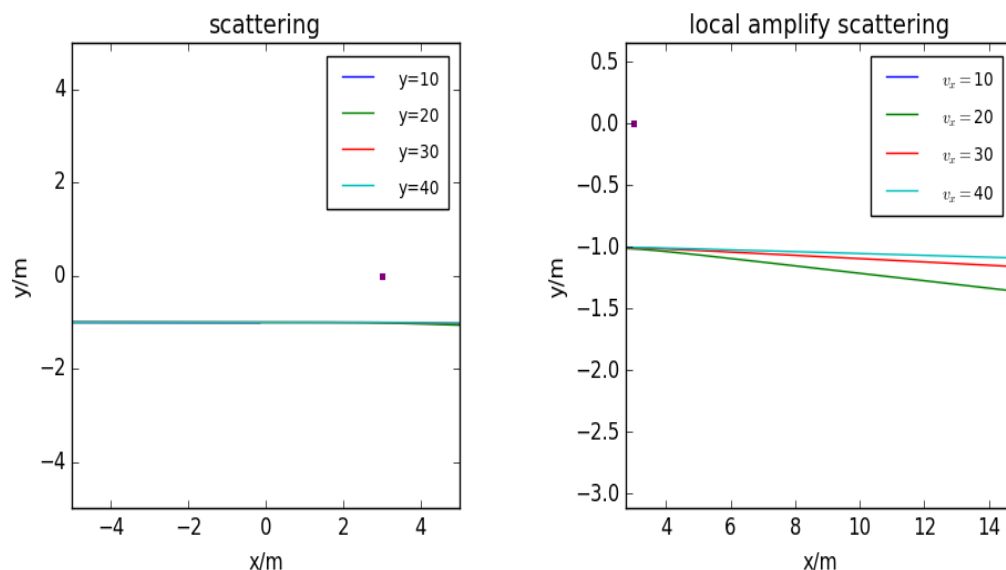
速度 $\vec{v} = (10,0,0)$ 入射：



图一：不同 y 的散射结果（右图为局部放大）

显然，图像满足当 α 粒子距原子核远时，散射角较小，距离原子核近时散射角越大，即瞄准距离 b 越大，散射角越小。

2. 选取初始速度 $\vec{v} = (v_x, 0, 0)$ ，初始位置为 $(-100, 0.5, 0)$ ；



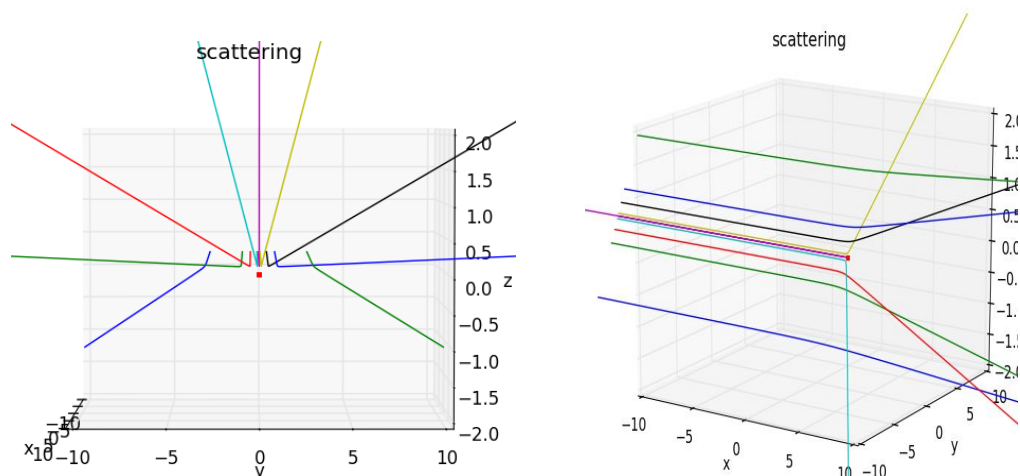
图二：不同初始速度得到的散射轨迹

显然，初速度越大，散射角越小，与理论相符合。

3. 采用 matplotlib 3d 绘制：

可有散射轨迹，试想卢瑟福实验具体到原子层面，很难观测和形象的认识，程序中则可清晰的看到粒子经不同位置所引起的散射，以及散射方向。

同样，在初始位置周围可通过引入随机数，模拟粒子入射时的分布情况，最终通过散射夹角，以及散射粒子数，可以得出对应关系，如：能量和散射角等。

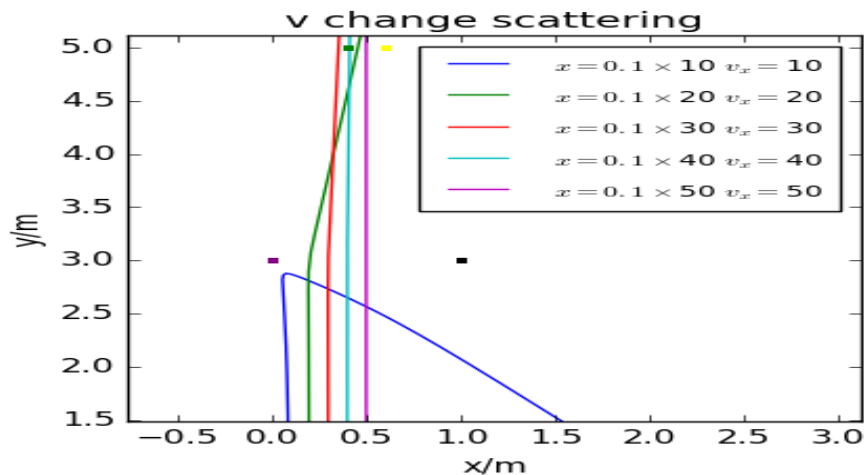


图三：左图初始位置 y 分别取 $(-3, -1, -0.5, -0.1, 0, 0.1, 0.5, 1, 3)$ ；右图 y 分别取 $(-3, -1, -0.5, -0.1, 0, 0.1, 0.5, 1, 3)$ ， z 分别取 $0.4(-3, -1, -0.5, -0.1, 0, 0.1, 0.5, 1, 3)$

(三) 多核情形

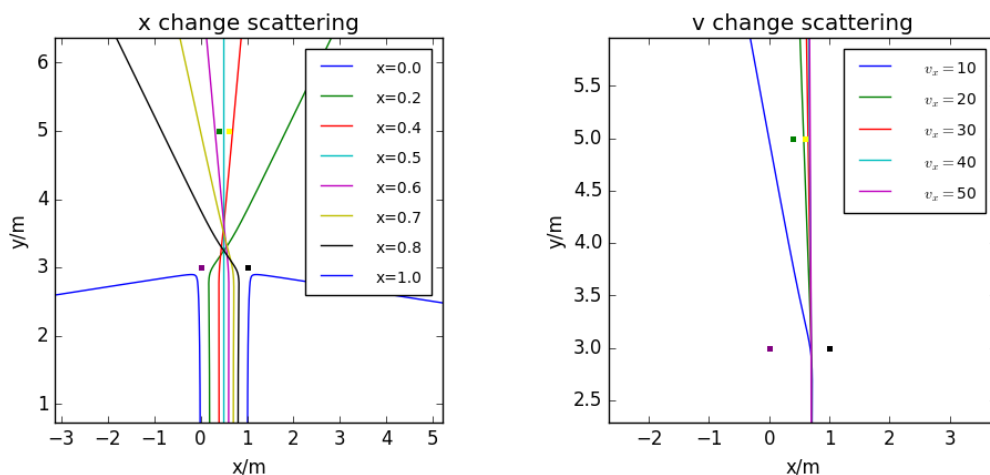
程序中，我们可以设定 α 粒子受到多核的作用，来观察粒子的运动。

1. 选取不同初始位置，以及不同初始速度的 α 粒子入射：



图四：改变入射粒子的速度以及发射位置所得轨迹

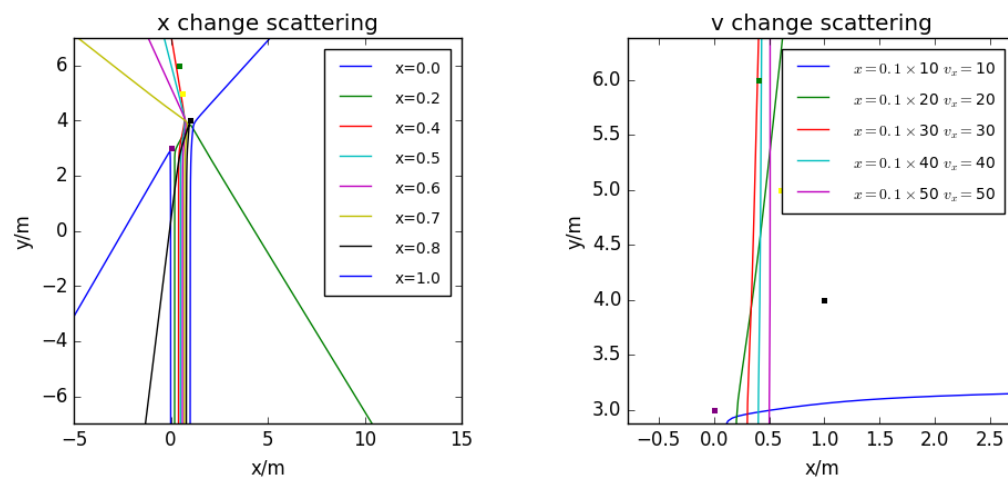
2. 选取对称的 Cu 核分布，可得到 α 轨迹也呈现对称性质。且由右图可见，粒子在具有多核的金箔穿过，会发生多次散射，在多个核的作用下，粒子轨迹将会变得更加复杂。可见金箔越厚，对实验中粒子束的准直度要求也越高。



图五：四个 Cu 核具体位置：

$\text{pos}_1 = \text{array}([0., 3., 0.])$, $\text{pos}_4 = \text{array}([0.6, 5., 0.])$, $\text{pos}_5 = \text{array}([0.4, 5.])$, $\text{pos}_3 = \text{array}([+1, 3., 0.])$ ；右图为给予不同的初速度，在多核中运动轨迹

3. 选取不对称 Cu 核初始位置：



图六： 四个 Cu 核所在位置不对称下对应的轨迹图
可以观测, 在 Cu 核所处位置无对称性时, 粒子轨迹也更加的混乱。

三 结论

1. 验证了瞄准距离 b 越大, 散射角越小, 以及定性上验证了入射粒子初速度越大, 散射角越小。
2. 发生多次散射时, 粒子轨迹的种类大大增加, 初始速度稍微有些变化, 将会对轨迹产生显著影响, 这也就要求了实验中粒子束的准直。
3. 采用计算机模拟 α 粒子散射, 加深了对物理概念和规律的理解, 利用计算机分析和解决物理问题的能力有了一定的提高。

四 参考文献

1. 计算物理. Nicholas J. Giordano, Hisao Nakanishi.
2. 杨福家. 原子物理学[M]. 高等教育出版社, 2014
3. 吴思诚、王祖铨, 《近代物理实验》第三版, 高等教育出版社, 2005