

# 卢瑟福散射

钱思天 2001112187

2021 年 5 月 23 日

## 摘要

本实验利用了卢瑟福散射仪器，测量了  $^{241}\text{Am}$  放射源的  $\alpha$  粒子在金箔上的不同散射角度的分布。通过对散射粒子的测量得到微分散射截面，并与理论结果比较，验证了卢瑟福散射的结论。

关键词：卢瑟福散射、步进电机、 $\alpha$  粒子

## 1 实验原理

卢瑟福散射的基本思想： $\alpha$  粒子被看做一带电质点，在核库仑场中的运动遵从经典运动方程；原子核的大小和原子相比是很小的，且原子核具有正电荷  $Ze$  和原子的大部分质量；电子的质量很小，对  $\alpha$  粒子运动的影响可忽略不计。

### 1. 瞄准距离与散射角的关系

卢瑟福把  $\alpha$  粒子和靶原子都当做点电荷，假设两者之间的静电斥力是唯一的相互作用力。这是一个两体碰撞问题，如图1，设  $\alpha$  粒子以速度  $v_0$  沿 AT 方向入射，由于受到靶核电荷的库仑场作用， $\alpha$  粒子将沿轨道 ABC 运动，即发生了散射。因原子核的质量比  $\alpha$  粒子的质量大得多，可近似认为靶核静止不动。按库仑定律，相距为  $r$  的  $\alpha$  粒子与原子核之间的库仑斥力的大小为：

$$F = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (1)$$

式中  $Z$  为靶核电荷数。 $\alpha$  粒子的轨道为双曲线的一支，如图一所示，原子核与  $\alpha$  粒子入射方向之间的垂直距离  $b$  称为瞄准距离（碰撞参数），是入射方向与散射方向之间的夹角。

由牛顿第二定律，可以导出散射角和瞄准距离之间的关系为：

$$\cos \theta = \frac{2b}{D} \quad (2)$$

其中  $D = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{mv^2/2}$ 。 $m$  为  $\alpha$  粒子质量。

### 2. 卢瑟福的微分散射截面

有散射角与瞄准距离的关系式 (2) 可见，瞄准距离  $b$  增大，散射角就小；反之， $b$  小，就大。只要瞄准距离  $b$  足够小，就可以足够大，这就解释了大角度散射的可能性。但要从实验上验证公式 (2)，显然是不可能的，因为我们无法测量瞄准距离  $b$ ，然而我们可以求出  $\alpha$  粒子按瞄准距离的分布，根据这种分布和式 (2)，就可以推出散射  $\alpha$  粒子的角分布，而这个角分布是可以直接测量到的。

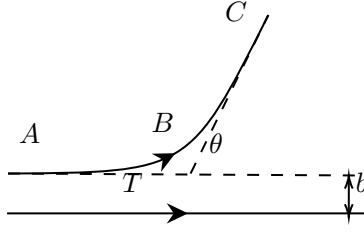


图 1: 散射角与碰撞参数的关系

设有截面为  $S$  的  $\alpha$  粒子束射到厚度为  $t$  的靶上. 其中某一  $\alpha$  粒子的通过靶时相对于靶中某一原子核的瞄准距离在之间的概率, 应等于圆周半径分别为  $b \sim b+db$  圆环面积与入射粒子截面  $S$  之比. 若靶的原子密度为  $n$ , 则  $\alpha$  粒子束所经过的这块体积内共有  $nSt$  个原子核, 因此, 该  $\alpha$  粒子相对于靶中任一原子核的瞄准距离在  $b$  与  $db$  之间的概率为:

$$d\omega = \frac{2\pi b db}{S} nSt = 2\pi n b db \quad (3)$$

这也就是该  $\alpha$  粒子被散射到  $\theta$  和  $d\theta$  之间的概率.

对 (2) 式求微分, 得到

$$b|db| = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta \quad (4)$$

于是

$$d\omega = \pi n t \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta \quad (5)$$

另外, 由角度为  $\theta$  和  $d\theta$  的两个圆锥面所围成的立体角可表示为

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = 2\pi \sin \theta d\theta \quad (6)$$

因此,  $\alpha$  粒子被散射到该范围内的单位立体角的概率为

$$\frac{d\omega}{d\Omega} = n t \left( \frac{D}{4} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (7)$$

上式除以单位面积内的靶原子数  $nt$  可得到微分散射截面

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{D}{4} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{Ze^2}{mv_0^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (8)$$

实验过程中, 设探测器的灵敏面积对靶所张的立体角为  $\Delta\Omega$ , 由卢瑟福散射公式可知在某段时间间隔内所观察到的  $\alpha$  粒子数  $N$  应为

$$N = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{Ze^2}{mv_0^2} \right)^2 \frac{\Delta\Omega}{\sin^4(\theta/2)} n t T \quad (9)$$

式中  $T$  为该时间内射到靶上的  $\alpha$  粒子总数. 由于式中  $N$ 、 $\Delta\Omega$ 、 $\theta$  等都是可观测的, 所以式 (9) 可以和实验进行比较. 由该式可见, 在  $\theta$  方向上所观测到  $\alpha$  粒子数  $N$  与散射靶的核电荷数  $Z$ 、 $\alpha$  粒子动能  $\frac{1}{2}mv_0^2$  及散射角  $\theta$  等因素都有关, 其中  $N$  正比于  $\frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$  的关系是卢瑟福理论的最有力的验证。

## 2 实验介绍

### 2.1 实验装置

卢瑟福散射实验装置主要包括散射真空室部分、电子学系统部分和步进电机的控制系统部分。下面分别介绍。

### 1. 散射真空室

2. 散射真空室主要包括有  $\alpha$  放射源、散射样品台, Au-Si 面垒半导体  $\alpha$  射线探测器、步进电机及传动装置等。放射源为  $^{241}\text{Am}$ , 主要出射  $\alpha$  粒子的能量为 5.486MeV。真空室是和机械泵相连, 开启机械泵后使靶室处于真空状态。

### 3. 电子学系统

电子学系统包括灵敏电荷前置放大器 (在靶室内)、主放大器、双路定标计数器、探测器偏压电源、低压电源等。此外, 在系统的调试过程中, 还要用到脉冲信号发生器、示波器和多道分析器等。

### 4. 步进电机及其控制系统

在实验过程中, 需在真空条件下测量不同散射角的出射  $\alpha$  粒子计数率, 这样就需要不断地转换散射角, 在本实验装置中利用步进电机是散射靶转动来控制散射角, 可使实验进行过程变得极为方便, 即只需在真空室外控制步进电机转动相应的角度, 步进电机精度可靠。可以准确定位。

## 2.2 实验操作

本实验所用放射源为  $^{241}\text{Am}$ , 活度为 0.2mCi。

1. 检查连线是否正常, 用示波器监测是否有异常信号。

2. 确定散射角  $\theta = 0^\circ$  的物理位置。

打开靶室, 转动步进电机; 确定 push 键 “按下” 与 “弹出” 对应的转动角的正负关系: 找出 + 方向, 给出大约  $0^\circ$  的位置。加上本底盘后, 盖上靶室盖, 加偏压 80V, 并抽真空。在为  $\pm 10^\circ$  范围内, 每隔  $1^\circ$  测一次数, 根据峰值确定真正的  $\theta = 0^\circ$  的物理位置。(计数时间为 30s)

3. 测量不同散射角度处本底散射  $\alpha$  粒子数。

真空下, 分别测 + 方向  $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$  时的计数。(计数时间为 600s)

4. 测量有金箔靶时不同角度对应的散射  $\alpha$  粒子数。

退掉偏压, 停止抽真空, 向靶室放气 (注意: 一定要缓慢放气); 然后打开靶室, 加上金箔靶, 盖上靶室上盖, 并抽真空, 同时加偏压到 80V。重复步骤 2, 重新确定  $\theta = 0^\circ$  的物理位置后 (避免螺旋距差), 分别测量 + 方向  $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$  时的计数。(计数时间为 600s)

5. 用加上金箔靶时的计数减去本底计数, 即得从金箔上散射的  $\alpha$  粒子计数。以散射角为横坐标, 散射计数为纵坐标作图, 以函数形式 N 对实验数据进行拟合, 并在同一坐标上画出拟合曲线。

6. 退掉偏压, 停止抽真空, 向靶室放气 (注意: 一定要缓慢放气, 以免冲破金箔), 打开靶室, 取出金箔, 关掉电源。

## 3 实验记录与数据处理

### 3.1 物理原点的确定

偏压 80V, 测量时间 30s。取逆时针旋转为正, 顺时针旋转为负。原点测定的数据如表1。通过数据可以看出, 当  $0^\circ$  时计数达到最大, 说明  $0^\circ$  对应着物理零点。

表 1: 本底测量的原点标定

Degree	Count	Degree	Count
-10	1400	1.0	29148.0
-9	3169	2.0	28206.0
-8	5460	3.0	26948.0
-7	9434	4.0	25646.0
-6	12398	5.0	23441.0
-5	17243	6.0	21836.0
-4	20354	7.0	18736.0
-3	24540	8.0	17042.0
-2	27074	9.0	13331.0
-1	28412	10.0	10628.0
0	29291	—	—

表 2: 本底测量

DegreeOrigin	DegreeReal	Count
20	20	81
25	25	16
30	30	5
35	35	1
40	40	0
45	45	1999
50	50	4914

3.2 本底计数的测量

测量时间 600s。数据记录如表2。  
在大角度时，由于存在噪声，计数出现异常（标红）。

3.3 加入金箔靶后，物理原点的确定

测量时间 30s。原点测定的数据如表3。通过数据可以看出，当 2° 时计数达到最大，说明 2° 对应着物理零点，这是由

表 3: 金箔散射测量的原点标定

Degree	Count	Degree	Count
-10	454	1.0	4228.0
-9	758	2.0	4349.0
-8	994	3.0	4005.0
-7	1480	4.0	3955.0
-6	1916	5.0	3730.0
-5	2541	6.0	3570.0
-4	2963	7.0	3048.0
-3	3494	8.0	2748.0
-2	3743	9.0	1953.0
-1	4081	10.0	1587.0
0	4107	-	-

于螺旋距差的影响。

3.4 金箔靶散射计数的测量

测量时间 600s。数据记录如表4。

表 4: 金箔散射信号测量

DegreeOrigin	DegreeReal	Count
22	20	99
27	25	25
32	30	6
37	35	10
42	40	2
47	45	9
52	50	8956

在大角度时，由于存在噪声，计数出现异常（标红）。

### 3.5 验证卢瑟福散射公式

根据 2、4 步的测量结果，计算散射  $\alpha$  粒子的计数（舍去标红的噪声较大的数据点）对其进行线性拟合，得到的拟合曲线如图2。

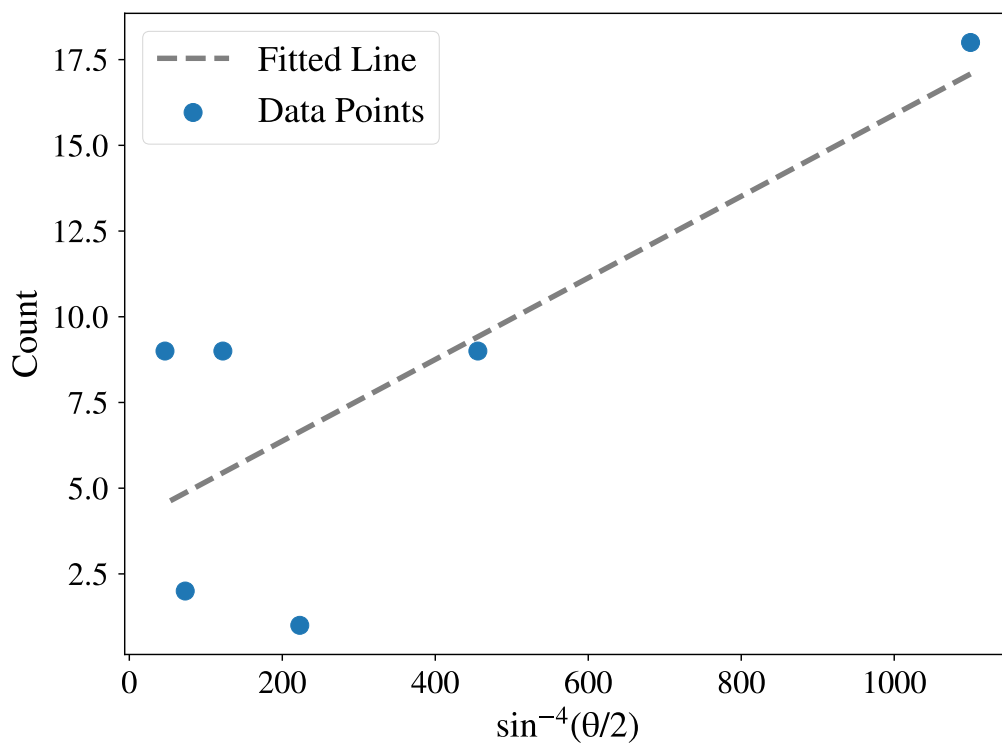


图 2: 拟合计数图

可以看出，虽然计数的误差很大，但是整体上看，散射  $\alpha$  计数  $N$  与  $\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$  基本呈线性关系，定性上验证了公式 (9)。

## 4 致谢

感谢赵捷老师的指导。

# 附录

## A 思考题: (一)

1. 散射  $\alpha$  粒子计数  $N$  与散射角  $\theta$ 。通过测量不同的散射角  $\theta$  下散射  $\alpha$  粒子计数  $N$  以确定二者的关系。
2. 实验需要验证的关系是散射  $\alpha$  粒子计数  $N$  与  $\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$  线性关系，公式中的  $\theta$  是以物理零点作为基准确定的，所以需要进行零点校准。首先打开本底盖，大致找出  $\theta = 0^\circ$  的位置，在  $\pm 10^\circ$  的范围内，每隔  $1^\circ$  测量一个散射计数，计数峰值对应的散射角度就是物理原点。同时，尽量让一次测量（本底或者信号）下步进马达沿同一个方向运动，这样可以避免螺距差。打开本底盖，在显示为 + 时按下 start，观察电机转动方向，确定逆时针为  $+\theta$  方向。
3. 散射  $\alpha$  粒子计数  $N$  与  $\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$  基本呈线性关系， $\theta$  较小时，计数太大。散射角度从  $20^\circ$  变到  $25^\circ$ ，散射计数迅速下降。
4. 可以用计数的平方根作为 Poisson 分布的误差。
5. 实验结果跟理论线符合的很差，主要是因为存在极大的噪声，几乎淹没了信号。

## B 思考题: (二)

从式 (9) 可以看出散射  $\alpha$  粒子计数  $N$  与  $\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$  的线性相关系数既与靶原子序数的平方成正比，又与单位面积上的靶原子的原子序数成正比。因此通过用  $\alpha$  粒子轰击未知靶，然后测量不同的散射角  $\theta$  下散射  $\alpha$  粒子计数  $N$ ，可以得到  $N$  与  $\frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$  的线性拟合关系。再通过与标准核（如金箔的散射结果）比较，就可以获得未知靶核的信息。