

# 卢瑟福散射实验

李昊润\*

北京大学物理学院 学号: 2200011477

(实验日期: 2025 年 10 月 14 日)

## I. 理论原理

在卢瑟福实验中, 我们把  $\alpha$  粒子和靶原子都当作点电荷, 并假设两者之间的静电斥力是唯一的相互作用力. 考虑其微分截面及角分布, 得到著名的卢瑟福  $\alpha$  粒子散射公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{D}{4}\right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Ze^2}{mv_0^2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)}. \quad (1)$$

实验过程中, 设探测器的灵敏面积对靶所张的立体角为  $\Delta\Omega$ , 由卢瑟福散射公式式 (1) 可知在某段时间间隔内所观察到的  $\alpha$  粒子数  $N$  应是

$$N = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Ze^2}{mv_0^2}\right)^2 nt \frac{\Delta\Omega}{\sin^4(\theta/2)} T \quad (2)$$

式中  $T$  为该时间内射到靶上的  $\alpha$  粒子总数. 由于式中  $N$ 、 $\Delta\Omega$  和  $\theta$  等都是可测的, 所以式 (2) 可和实验进行比较. 由该式可见, 在  $\theta$  方向上  $\Delta\Omega$  内所观察到的  $\alpha$  粒子数  $N$  与散射靶的核电荷数  $Z$ 、 $\alpha$  粒子动能  $E = 1/2mv_0^2$  及散射角  $\theta$  等因素都有关, 其中  $N \propto 1/\sin^4(\theta/2)$  的关系是卢瑟福理论最有力的验证. 此外,  $N$  与散射体  $Z^2$ ,  $\alpha$  粒子动能  $1/E^2$ , 靶厚度  $t$  的正比关系, 也是卢瑟福散射理论的有力验证.

## II. 实验条件

本次实验基于模拟仿真, 使用路由器连接放射源模拟器、多功能数字多道和电脑, 使用电脑连接与放射源模拟器相连的卢瑟福散射谱仪, 并连接放射源模拟器和多功能数字多道. 随后可以使用 VirtulLab 软件在电脑进行模拟实验的操控和数据分析.

分别使用  $^{241}\text{Am}$  源、 $^{239}\text{Pu}$  源和  $^{244}\text{Cm}$  源的分支比最大的能量峰来完成能量刻度, 下面在具体的卢瑟福散射的测量实验中, 均使用 1 000 000 Bq 的放射源活度.

## III. 实验结果及讨论

### A. 设置不同散射体厚度

使用  $^{241}\text{Am}$  放射源, 使用金箔作为散射靶, 设置散射角度为  $20^\circ$ , 测量时间为 60 s.

\* lhr@stu.pku.edu.cn; (86)15645049990

表 I. 散射计数 (率) 与散射体厚度 ( $t$ ) 的关系

散射体厚度 $t$ ( $\mu\text{m}$ )	散射计数 (率) (ROI)
2	150032
3	224082
4	297828
5	372270

### B. 设置不同放射源

使用厚度为  $2 \mu\text{m}$  的金箔作为散射靶，设置散射角度为  $20^\circ$ ，测量时间为 60 s.

表 II. 散射计数 (率) 与  $\alpha$  粒子能量的平方 ( $E^2$ ) 的关系

放射源	$\alpha$ 粒子能量的平方 $E^2$ (MeV $^2$ )	散射计数 (率) (ROI)
$^{241}\text{Am}$	30.034	150032
$^{239}\text{Pu}$	26.563	169003
$^{244}\text{Cm}$	33.585	134021

### C. 设置不同的散射角度和散射体

使用  $^{241}\text{Am}$  放射源，测量时间为 60 s.

表 III. 散射计数 (率) 与散射角度  $\theta$  的  $1/\sin^4(\theta/2)$  和散射体  $Z^2$  的关系

散射角度 $\theta$ ( $^\circ$ )	$1/\sin^4(\theta/2)$	散射计数 (率) (ROI)			
		$2 \mu\text{m}$ 金箔	$5 \mu\text{m}$ 金箔	$5 \mu\text{m}$ 铜箔	$5 \mu\text{m}$ 铝箔
20	1099.814	150032	372270	72674	10343
22	754.405	103058	256441	50256	7227
24	535.161	73398	182429	35545	5104
26	390.524	53593	133530	26005	3761
30	222.851	30615	75908	14831	2102
35	122.302	16906	42156	8191	1116
40	73.079	10094	25122	8162	666
45	46.627	6459	16065	3143	432
50	31.348	4353	10705	2062	NaN
55	21.998	3056	6912	1441	NaN
60	16.000	2186	2514	934	NaN

不同散射靶的谱图随角度变化的相同之处：随着角度的增大，散射后的能量峰位减小，能量分布的半高宽增大，散射计数 (率) 减小.

**物理解释：**根据卢瑟福散射原理计算可得，散射后能量和散射计数（率）随着角度的增大而减小。而因为散射后能量减小，但是同时导致能量展宽的各项效应普遍存在，所以能量分布的半高宽增大。

不同散射靶的谱图随角度变化的不同之处： $2\text{ }\mu\text{m}$  金箔的峰位比  $5\text{ }\mu\text{m}$  金箔更高且半高宽更窄，散射计数（率）更小；不同散射靶种类的散射计数（率）显著不同。

**物理解释：**  $\alpha$  粒子通过  $2\text{ }\mu\text{m}$  金箔和  $5\text{ }\mu\text{m}$  金箔的散射后， $2\text{ }\mu\text{m}$  金箔导致的能量损失更小，所以峰位更高且半高宽更窄；不同散射靶种类的散射计数（率）根据卢瑟福散射原理计算可得不同。

#### D. 画图分析结果及讨论

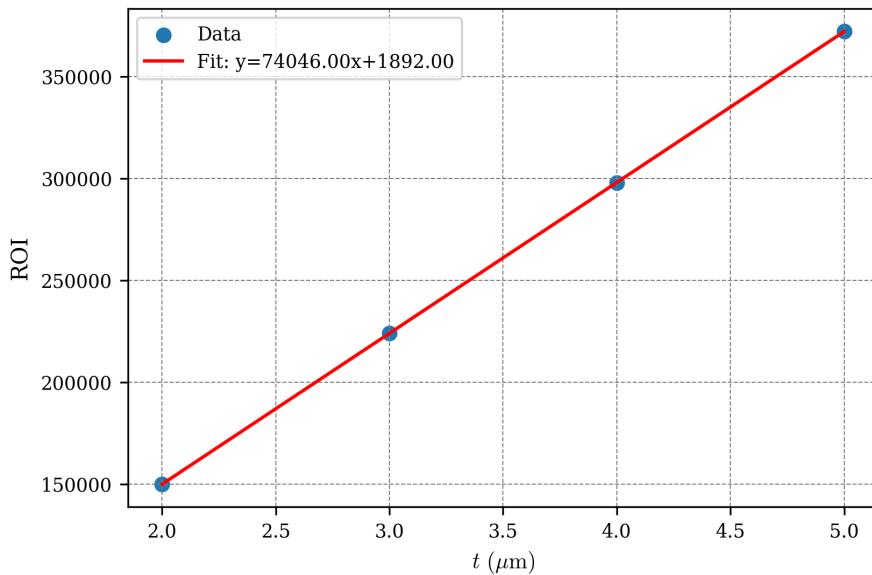


图 1. 散射计数（率）与散射体厚度 ( $t$ ) 的关系

如图 1 所示，拟合相关系数  $R = 0.9999984$ ，可以说散射计数（率）与散射体厚度 ( $t$ ) 成正比关系。

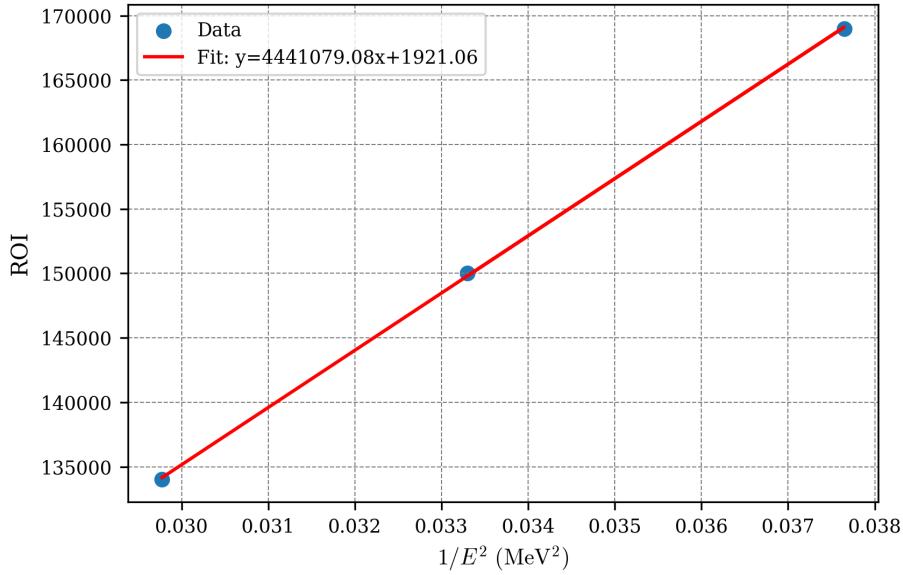


图 2. 散射计数（率）与  $\alpha$  粒子能量的平方的倒数 ( $1/E^2$ ) 的关系

如图 2 所示，拟合相关系数  $R = 0.999928$ ，可以说散射计数（率）与  $\alpha$  粒子能量的平方 ( $E^2$ ) 成反比关系。

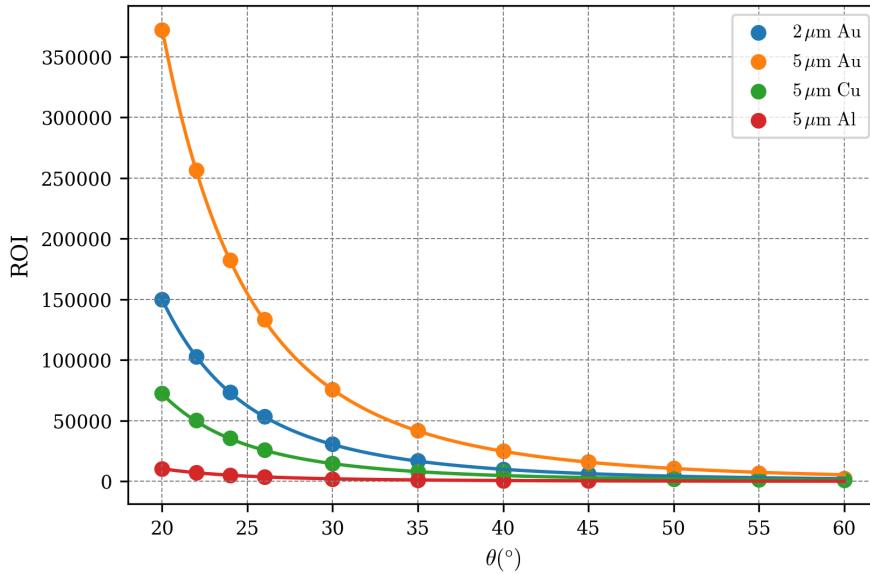


图 3. 散射计数（率）与散射角度  $\theta$  的  $1/\sin^4(\theta/2)$  和散射体  $Z^2$  的关系

首先，通过将实验数据与理论数据拟合，得到图 3，相关系数  $R$  均大于 0.999，能够看出散射计数（率）与散射角度  $\theta$  的  $1/\sin^4(\theta/2)$  成正比关系。再考虑与散射体  $Z^2$  的关系，得到表 IV，拟合相关系数  $R = 0.9983$ ，可以说散射计数（率）与散射体  $Z^2$  成正比关系。

表 IV. 散射计数 (率) 与散射体  $Z^2$  的关系

散射体 $Z^2$	散射计数 (率) (ROI) 拟合系数
6241	339.669
841	65.677
169	9.478

综上，验证了卢瑟福散射公式式 (2)， $N$  与  $t, 1/E^2, 1/\sin^4(\theta/2), Z^2$  均成正比。

### 致谢

感谢潘悦同学协力完成了本实验，感谢许金艳老师在实验中的讲解和指导。

## 附录 A: 思考题

### 1. 本实验如何验证了卢瑟福散射？

本实验通过模拟仿真，验证了散射计数（率）与散射体厚度 ( $t$ )、 $\alpha$  粒子能量的平方的倒数 ( $1/E^2$ )、散射角度  $\theta$  的  $1/\sin^4(\theta/2)$  和散射体  $Z^2$  成正比关系，进而验证了卢瑟福散射公式式 (2).

### 2. 本实验的实验数据误差应如何估算？

通过计算统计误差耦合本底计数误差传递与系统误差，估算本实验的实验数据误差.

### 3. 如果有未知元素的散射靶，如何利用现有的装置用实验方法确认该元素？试设计实验方法和步骤。

可以依旧利用本实验中小节 III C 中的方法进行确认，利用多组和现有的金箔、铜箔和铝箔的厚度相同的未知元素的散射靶，收集不同角度时的散射计数数据。可以也通过将不同角度时的散射计数的实验数据与理论数据线型的进行拟合，对于拟合系数对于  $Z^2$  进行正比例拟合，确认该元素的核电荷数  $Z$ .

### 4. 同一散射靶，峰位/半高宽为什么会随着角度发生变化？不同厚度的同一种类散射体，在相同角度下，峰位/半高宽为什么会发生变化？为什么大角度会变化更剧烈？

见小节 III C 中的物理解释.

### 5. 虚拟仿真实验与实际仪器的实验，有什么异同？

**相同点：**实验考虑的核心物理模型一致，实验的流程和框架相似，关键的参数设置相同.

**不同点：**虚拟仿真实验无具体的放射源，无相关的辐射风险；虚拟仿真实验基本可忽略探测器相应和角度控制的系统误差和本底的涨落带来的实验误差；虚拟仿真实验的实验操作更加简单，可以通过计算机统一控制.