

# 卢瑟福散射

卢瑟福散射实验是近代物理学发展史上具有重大影响的实验，它的作用在于由此发现并提出了原子的核式模型，使人类对微观世界的认识进入了新的里程。后来，人们进而创造了一种用粒子的散射来研究物质结构的新实验方法——卢瑟福散射。现在该方法成为材料科学，特别是微电子应用领域的重要实验方法之一。

19 世纪末 20 世纪初，原子结构开始成为物理学研究的前沿，人们对原子模型曾有各种猜测和设想，其中比较有影响的是美国物理学家汤姆孙 (*J. J. Thomson*) 的电子分布模型，该模型认为正电荷均匀地分布在整个原子球内，一定数目的电子“镶嵌”在这个球体或球面上，电子可以在它们的平衡位置附近振动，从而发出特定频率的电磁波。这个模型似乎可以解释当时已观察到的原子光谱，但很多其它实验不能解释，事实很快否定了这一模型。

1909 年，卢瑟福 (*Lord Ernest Rutherford*) 和其合作者盖革 (*H. Geiger*) 与马斯顿 (*E. Marsden*) 用天然放射性 Ra 所发出的  $\alpha$  粒子打到 Pt 箔上，发现绝大部分  $\alpha$  粒子平均只偏转  $2^\circ \sim 3^\circ$ ，但大约有 1/8000 的  $\alpha$  粒子散射角大于  $90^\circ$ ，甚至接近  $180^\circ$ ，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  $\alpha$  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  $10^{-13} \text{ cm}$ ，约为原子半径的  $1/10^5$ 。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。

## 一 实验目的

测量  $^{241}\text{Am}$  (或  $^{239}\text{Pu}$ ) 放射源的  $\alpha$  粒子在金箔上不同角度散射的分布，并与理论结果比较，从而验证卢瑟福散射的理论。

## 二 实验原理

卢瑟福散射的基本思想： $\alpha$  粒子被看作一带电质点，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  $\alpha$  粒子和靶原子都当作点电荷，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。设一个  $\alpha$  粒子以速度  $v_0$  沿 AT 方向运动，由于受到靶核电场的库仑场作用， $\alpha$  粒子将沿轨道 ABC 运动，即发生散射。因靶原子的质量比  $\alpha$  粒子质量大得多，可近似认为靶核静止不动。按库仑定律，相距为  $r$  的  $\alpha$  粒子和原子核之间库仑斥力的大小为：

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

式中  $Z$  为靶核电核数。 $\alpha$  粒子的轨迹为双曲线的一支，如图 1 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）， $\theta$  是入射方向与散射方向之间的夹角。

由牛顿第二定律，可导出散射角与瞄准距离的关系为：

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

其中,

$$D = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2Ze^2}{mv_0^2/2} \quad (3)$$

式中  $m$  为  $\alpha$  粒子质量。

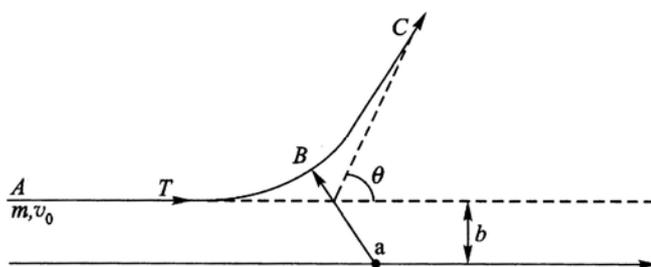


图1 散射角与瞄准距离的关系

## 2. 卢瑟福微分散射截面

由散射角与瞄准距离的关系式 (2) 可见, 瞄准距离  $b$  大, 散射角  $\theta$  就小; 反之,  $b$  小,  $\theta$  就大。只要瞄准距离  $b$  足够小,  $\theta$  就可以足够大, 这就解释了大角度散射的可能性。但从实验上来验证式 (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  $b$  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的。

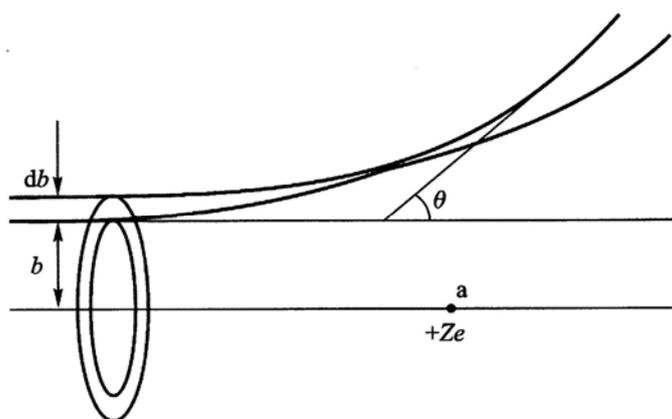


图2 入射  $\alpha$  粒子散射到  $d\theta$  角度范围内的概率

设有截面为  $S$  的  $\alpha$  粒子束射到厚度为  $t$  的靶上。其中某一  $\alpha$  粒子在通过靶时相对于靶中某一原子核  $a$  的瞄准距离在  $b \sim b + db$  之间的概率, 应等于圆心在  $a$  而圆周半径分别为  $b$ 、 $b + db$  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  $b + db$  之间的概率为

$$dw = \frac{2\pi b db}{S} nSt = 2\pi n t b db \quad (4)$$

这也就是该  $\alpha$  粒子被散射到  $\theta$  到  $\theta + d\theta$  之间的概率, 即落到角度为  $\theta$  和  $\theta + d\theta$  的两个圆锥面之间的概率。

由式 (2) 求微分可得:

$$b | db | = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{2} \right)^2 \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta \quad (5)$$

于是

$$dw = \pi \left( \frac{D}{2} \right)^2 nt \frac{\cos(\theta/2)}{\sin^3(\theta/2)} d\theta$$

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

$$d\Omega = \frac{dA}{r^2} = \frac{2\pi r \sin\theta \cdot r d\theta}{r^2} = 2\pi \sin\theta d\theta$$

因此， $\alpha$  粒子被散射到该范围内单位立体角的概率为：

$$\frac{dw}{d\Omega} = \left( \frac{D}{4} \right)^2 nt \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (6)$$

上式两边除以单位面积的靶原子数  $nt$  可得微分散射截面：

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left( \frac{D}{4} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} = \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{Ze^2}{mv_0^2} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (7)$$

这就是著名的卢瑟福  $\alpha$  粒子散射公式。

代入各常数数值，以  $E$  代表入射  $\alpha$  粒子的能量，得到公式：

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = 1.296 \left( \frac{2Z}{E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (8)$$

其中， $d\sigma/d\Omega$  的单位为  $mb/sr$ ， $E$  的单位为  $MeV$ 。

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  $N$  应是：

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

式中  $T$  为该时间内射到靶上的  $\alpha$  粒子总数。由于式中  $N$ 、 $\Delta\Omega$ 、 $\theta$  等都是可测的，所以式 (9) 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  $\frac{1}{2}mv_0^2$  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。

### 三 实验装置

卢瑟福散射实验装置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。

#### 1. 散射真空室

散射真空室中主要包括有  $\alpha$  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  $^{241}\text{Am}$  (或  $^{239}\text{Pu}$ )，主要出射  $\alpha$  粒子的能量为  $5.486\text{ MeV}$ 。有些实验用  $^{239}\text{Pu}$  作  $\alpha$  放射源，其主要  $\alpha$  粒子能量为  $5.155\text{ MeV}$ 。真空室机械装置的结构见图 3。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。

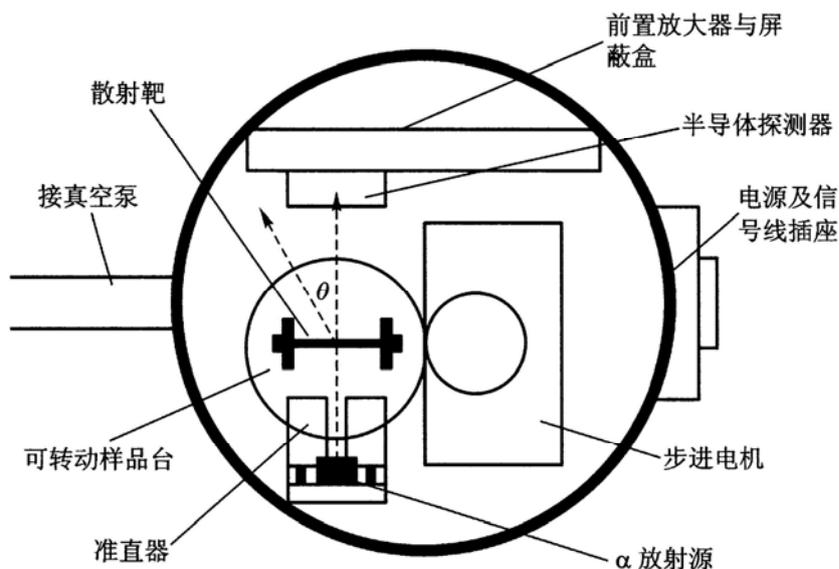


图3 卢瑟福散射实验装置的机械结构

## 2. 电子学系统

电子学系统包括电荷灵敏前置放大器（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。电子学系统的结构如图4。

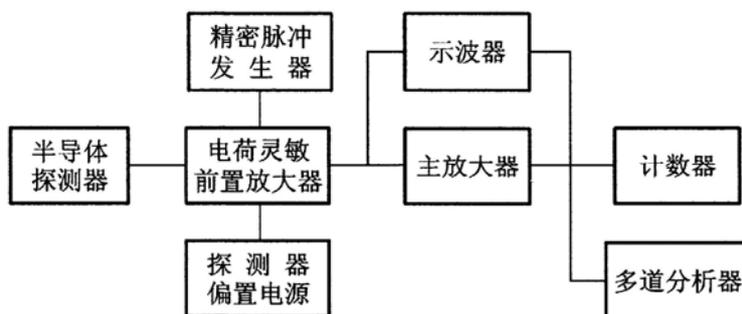


图4 卢瑟福散射装置中的 $\alpha$ 粒子探测系统框图

## 3. 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度。在本实验装置中利用步进电机使散射靶转动来控制散射角 $\theta$ ，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。

## 四 实验内容

1. 观察真空室中样品台的旋转状态（参考仪器使用说明书）
2. 检查电子学系统的工作状态（参考仪器使用说明书）
3. 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 $\theta$ 角的正负关系；找出 $+\theta$ 方向，定出大约 $\theta = 0^\circ$ 的位置。盖上靶室上盖，缓慢加偏压至推荐值，并抽真空。

在 $\theta$ 为 $\pm 10^\circ$ 范围内，每隔 $1^\circ$ 测一次计数，根据峰值确定真正的 $\theta = 0^\circ$ 物理位置，固定之并清零。此后控制器上显示的角度就是转动样品台的实际角度。（计数时间定为30s）

#### 4. 测量不同散射角度处本底散射计数

不加散射金靶，设置合适测量时间，在真空条件下，分别测量不同间隔角度处的散射本底计数。建议分别取 $+\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 。

#### 5. 测量有散射金箔靶时与步骤3相同角度下的散射 $\alpha$ 粒子数

退掉偏压，停止抽真空，向靶室缓慢放气；然后打开靶室，加上金箔靶，盖上靶室上盖，并抽真空，调节探测器偏压到推荐值。分别测量与步骤3对应的各个角度下的 $\alpha$ 散射粒子计数，测量时间也与步骤3相同。

#### 6. 数据处理

在同一角度下，用有金箔靶时的计数减去本底计数，即得实际的散射 $\alpha$ 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 $N = \frac{P}{\sin^4(\theta/2)}$ 进行曲线拟合（P

为常数），并在同一坐标上画出拟合曲线，找出散射计数与角度的关系。

#### 思考题

1. 本实验主要是验证哪两个物理量之间的关系？如何验证？
2. 为什么要寻找物理零点？怎样操作较为恰当？怎样寻找和确认方向？
3. 本实验的实验数据误差应如何估算？
4. 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。

#### 参考文献

- [1] 吴思诚、王祖铨，《近代物理实验》第三版，高等教育出版社，2005
- [2] 清华大学物理系核物理实验室编，卢瑟福散射实验指示书，1997
- [3] 王正行，《近代物理学》，北京大学出版社，1995
- [4] 北京大学、复旦大学合编，《核物理实验》，原子能出版社，1989