

课前须知

1、课前在手机端完成进门测

2、实验操作和数据记录

参考实验室配备的《实验操作页》。

3、出门测

4、第二周同一时间到教室提交纸质版实验报告（也可以是电子版报告）

数据处理时不需进行不确定度分析，完成本电子讲义上的思考题 2、3。



国家级实验教学示范中心

中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部

卢瑟福散射实验

卢瑟福散射实验是近代物理科学发展史中最重要的实验之一。在 1897 年汤姆逊(J.J.Thomson)测定电子的荷质比,提出了原子模型,他认为原子中的正电荷分布在原子整个空间,即在一个半径 $R \approx 10^{-10}\text{m}$ 区间,电子则嵌在布满正电荷的球内。电子处在平衡位置上作简谐振动,从而发出特定频率的电磁波。简单的估算可以给出辐射频率约在紫外和可见光区,因此能定性地解释原子的辐射特性。但是很快卢瑟福(E.Rutherford)等人的实验否定这一模型。1909 年卢瑟福和他的助手盖革(H.Geiger)及学生马斯登(E.Marsden)在做 α 粒子和薄箔散射实验时观察到绝大部分 α 粒子几乎是直接穿过铂箔,但有大约 1/8000 的 α 粒子的散射角大于 90° ,这一实验结果根本无法用公认的汤姆逊原子模型解释。在汤姆逊模型中正电荷分布于整个原子,根据对库仑力的分析, α 粒子离球心越近,所受库仑力越小,而在原子外,原子是中性的, α 粒子和原子间几乎没有相互作用力。在球面上库仑力最大,也不可能发生大角度散射。卢瑟福等人经过两年的分析,于 1911 年提出原子的核式模型:原子中的正电荷集中在原子中心很小的区域内,而且原子的全部质量也集中在这个区域内。原子核的半径近似为 10^{-15}m ,约为原子半径的千万分之一。卢瑟福散射实验确立了原子的核式结构,为近代物理的发展奠定了基石。

实验目的

- 1、复习用卢瑟福核式模型,推导 α 粒子散射公式
- 2、了解卢瑟福散射谱仪的结构与工作原理
- 3、用实验验证卢瑟福散射公式

实验原理

现从卢瑟福核式模型出发,先求 α 粒子散射中的偏转角公式,再求 α 粒子散射公式。

1. α 粒子散射理论

(1) 库仑散射偏转角公式

设原子核的质量为 M ,具有正电荷 $+Ze$,并处于点 O ,而质量为 m ,能量为 E ,电荷为 ze 的 α 粒子以速度 v 入射,在原子核(靶核)的质量比 α 粒子的质量大得多的情况下,可以认为前者不会被推动,

α 粒子则受库仑力的作用而改变了运动的方向,偏转 θ 角,如图 3.3-1 所示。图中

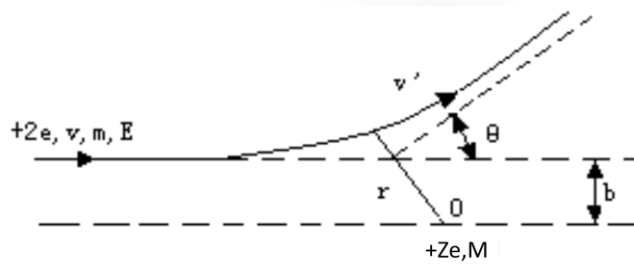


图 3.3-1 α 粒子在靶核库仑场中的偏转

v 是 α 粒子原来的速度, b 是原子核离 α 粒子原运动路径延长线的垂直距离, 即入射粒子与原子核无作用时的最小直线距离, 称为瞄准距离。

当 α 粒子进入靶核库仑场时, 一部分动能将转化为库仑势能。设 α 粒子最初的动能和角动量分别为 E 和 L , 由能量和动量守恒定律可知:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{zZe^2}{r} + \frac{m}{2} \left(\dot{r}^2 + r^2 \dot{\varphi}^2 \right) \quad (1)$$

$$mr^2 \dot{\varphi} = m\dot{r}b = L \quad (2)$$

由 (1) 式和 (2) 式可以证明 α 粒子的路径是双曲线, 偏转角 θ 与瞄准距离 b 有如下关系:

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = 4\pi\epsilon_0 \frac{2Eb}{zZe^2} \quad (3)$$

设 $a = \frac{zZe^2}{2\pi\epsilon_0 E}$, 则可得到库仑散射偏转角公式:

$$\operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} = \frac{2b}{a} \quad (4)$$

(2) 卢瑟福散射公式

在上述库仑散射偏转公式中有一个实验中无法测量的参数 b , 因此必须设法寻找一个可测量的量代替参数 b 的测量。

事实上, 某个 α 粒子与靶核散射的瞄准距离可大可小, 但是大量 α 粒子散射都具有一定的统计规律。由散射公式 (4) 可见, θ 与 b 有对应关系, b 大,

θ 就小, 如图 3.3-2 所示。那些瞄准距离在 b 到 $b+db$ 之间的 α 粒子, 经散射后必定向 θ 到 $\theta-d\theta$ 之间的角度散出。因此, 凡通过图中所示以 b 为内半径, 以 $b+db$ 为外半径的那个环形 ds 的 α 粒子, 必定散射到角 θ 到 $\theta-d\theta$ 之间的一个空心圆锥体内。

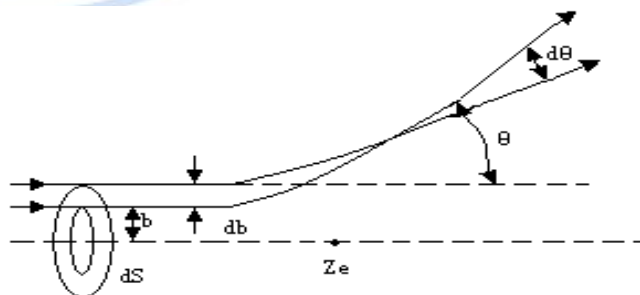


图 3.3-2 α 粒子的散射角与瞄准距离和关系

设靶是一个很薄的箔, 厚度为 t , 面积为 s , 则图 3.3-2 中的 $ds = 2\pi b|db|$, 一个 α 粒子被一个靶原子散射到 $(\theta, \theta-d\theta)$ 范围内的几率, 也就是 α 粒子打在环 ds 上的概率, 即

$$ds = 2\pi b|db| = \frac{\pi a^2 \cos \frac{\theta}{2}}{4 \sin^3 \frac{\theta}{2}} d\theta \quad (5)$$

若用立体角 $d\Omega$ 表示,

$$d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta = 4\pi \sin\frac{\theta}{2} \cos\frac{\theta}{2} d\theta$$

则有

$$ds = \frac{a^2 d\Omega}{16 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (6)$$

为求得实际的散射 α 粒子数，以便与实验进行比较，还必须考虑靶上的原子数和入射的 α 粒子数。由于薄箔有许多原子核，每一个原子核对应一个这样的环，若各个原子核互不遮挡，设单位体积内原子数为 n ，则体积 st 内原子数为 nst ， α 粒子打在这些环上的散射角均为 θ ，因此一个 α 粒子打在薄箔上，散射到 θ 方向且在 $d\Omega$ 内的概率为 $\frac{ds}{s} n \cdot t \cdot s$ 。

若单位时间有 N_0 个 α 粒子垂直入射到薄箔上，则单位时间内 θ 方向且在 $d\Omega$ 立体角内测得的 α 粒子为：

$$dn = N_0 \frac{ds}{s} nt \cdot s = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 n N_0 t \left(\frac{zZe^2}{4E} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (7)$$

经常使用的是微分散射截面公式：

$$\frac{ds(\theta)}{d\Omega} = \frac{dn}{n N_0 t d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{2Ze^2}{4E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (8)$$

其物理意义为：单位面积内垂直入射一个粒子（ $N_0=1$ ）时，被这个面积内一个靶原子（ $nt=1$ ）散射到 θ 角附近单位立体角内的概率，这就是著名的卢瑟福散射公式。其中， $\frac{ds}{d\Omega}$ 的单位为 mb/sr ， E 的单位为 MeV。

2. 卢瑟福理论的实验验证方法

为验证卢瑟福散射公式成立，即验证原子核式结构成立，实验中使用了金硅面垒探测器。设探测器的灵敏区面对靶所张的立体角为 Ω ，由卢瑟福散射公式可知单位时间内所记录到的 α 粒子总数 N 应是：

$$N = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{zZe^2}{4E} \right)^2 n N_0 t \frac{\Omega}{\sin^4 \theta/2} \quad (10)$$

式中 N_0 、 t 、 Ω 、 θ 等都是可测的，相关常数见附录 I。由该式可知，在 θ 方向上 Ω 内所观察到的 α 粒子数 N 与散射靶的核电荷 Z 、靶厚 t 、 α 粒子动能 E 及散射角 θ 等因素都有关。

上述推导过程实际上作了如下假设：1、 α 粒子只发生单次散射；2、 α 粒子与靶核之间只有库仑作用；3、核外电子的作用可以忽略；4、靶核是静止的。因此使用公式（10）时需要按照实际情况作必要的修正。

对卢瑟福散射公式（10），可以从以下几个方面加以验证。

- （1） 固定散射角，改变靶的厚度，验证散射计数率与靶厚度的线性关系 $N \propto t$ ；
- （2） 改变散射角，验证 $N \propto \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$ 。这是卢瑟福散射中最突出和最重要的特征；
- （3） 更换 α 粒子源以改变 α 粒子能量 E ，验证 $N \propto 1/E^2$ ；
- （4） 固定散射角，使用厚度相等而材料不同的散射靶，验证散射计数率与靶材料核电荷数的平方关系 $N \propto Z^2$ 。由于很难找到厚度相同的散射靶，而且需要对原子数密度 n 进行修正，这一实验内容的难度较大。

由于实验条件的限制，本实验只涉及（1）、（2）两部分的实验内容。

3. 卢瑟福散射实验装置

卢瑟福散射实验装置包括散射真空室、步进电机的控制系统和数据采集系统。实验装置的机械结构如图 3.3-3 所示，图 3.3-4 是散射真空室的实物图。

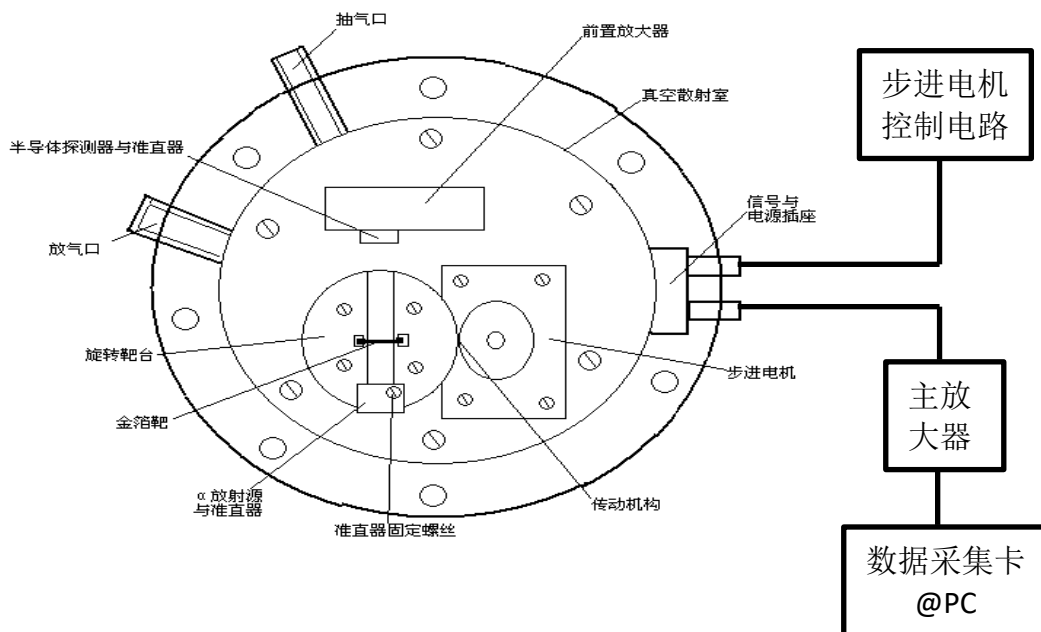


图 3.3-3 卢瑟福散射实验装置原理图

（1）散射真空室的结构

散射真空室中主要包括有 α 放射源、散射样品台、 α 粒子探测器、步进电机及转动机构等。放射源为 ^{241}Am 源， ^{241}Am 源主要的 α 粒子能量为 5.486MeV 。

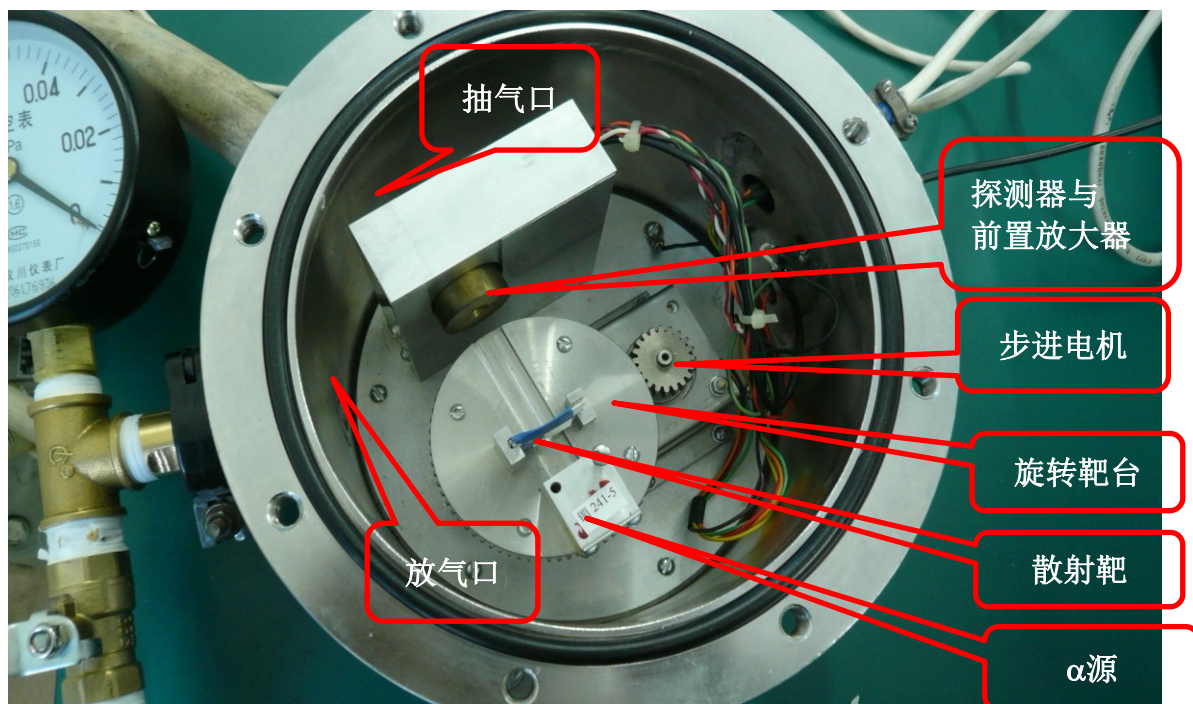


图 3.3-4 散射真空室

(2) 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出射的 α 粒子计数率，这样就需要经常地变换散射角度。在本实验装置中利用步进电机来控制散射角 θ ，可使实验过程变得极为方便。不用每测量一个角度的数据便打开真空室转换角度，只需在真空室外控制步进电机转动相应的角度即可。

(3) 数据采集系统

数据采集系统前端的 α 粒子探测器为金硅面垒 Si(Au) 探测器，此外还有电荷灵敏前置放大器、主放大器、探测器电源、NIM 机箱与数据采集卡。其中前置放大器和主放大器用于将探测器输出的信号放大到合适的幅度，再由数据采集卡对信号进行分析处理。

实验内容（相关参数见附录）

1、观察真空室结构及靶台的旋转控制

打开真空室上盖，观察真空室内部结构，注意观察放射源、靶和半导体探测器的相对位置。开启电源，有两路电压输出，确认左边电压为 9.0V ，右边电压为 5.0V 。改变步进电机控制器的 PUSH+ 键的位置，按 START 键，观察样品台的转动状况。改变步进角控制旋钮位置和步进电机控制器的其它按键，了解它们的作用，观察它们对样品台旋转的控制状况。将样品台转到

$\theta=0^\circ$ 附近位置（即放射源准直孔大致对准探测器准直孔），将步进电机控制器上显示的角度用 RESET 键清 0.，此时放射源发出的 α 粒子应能穿过靶进入探测器。

2、测量 α 粒子束的强度及在空气中的射程，计算 α 粒子的能量 E

- 将空靶插入卡槽，测量靶到探头的距离 l_1 和源到探头的距离 l_2 ，并记录室温 T ，其中 α 源的位置在红色刻线中间；
- 盖上真空室上盖，开启机械泵电源将真空室抽真空（注意：开始抽真空时，用力将真空室上盖往下压，以吸紧上盖）；
- 打开测量软件，选择感兴趣区(ROI)为 200~1000 道，从 -5° 测到 5° ，以 1° 为步长测 α 粒子能谱峰区计数，每个角度测 60s，确定物理 0° 角；

θ	-5°	-4°	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°	4°	5°
N											

- 靶台转至物理 0° 角，测 ROI 计数 120s；
- 关闭电磁阀 2，缓慢放气至 6.0kPa 左右后停止放气。
- 在 6~30kPa 范围测气压对计数的影响，至少测 4 个点（连同气压为 0 的点共至少 5 个点），每点测 120s。

P(kPa)					
N					

绘制 P~N 曲线，从图中求出初始强度 N_0 。

- 计数率下降一半对应的射程是平均射程，从上述数据拟合并参考附录 II 求出从源出射的 α 粒子在标准大气压空气中的射程 R 。
- 由前人经验公式有：

$$R = (0.285 + 0.005E)E^{1.5} \quad (11)$$

式中 R 的单位是 cm， E 的单位为 MeV。请根据以上经验公式估算从源出射的 α 粒子能量 E 。

3、验证 $N \propto \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}$ 关系

- 缓慢放完气后，打开真空室盖子，换上金靶，注意将金箔朝探头放置。合上盖子抽真空，感兴趣区设为 200~1000 道。

卢瑟福散射实验

- b) 在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 范围以 1° 为步长测 α 粒子能谱峰区计数，每个角度测 90s，确定物理 0° 角；

θ	-3°	-2°	-1°	0°	1°	2°	3°
N							

- c) 在 $10^\circ \sim 25^\circ$ 范围测散射计数。要求测 5 个角度，每个角度可根据计数率调整测量时间；

θ	10°	13°	16°	19°	22°
t (s)	200	300	600	900	1200
N					

绘制 $\theta \sim N/t$ 曲线并验证卢瑟福散射公式。

根据公式 (10) 及本实验测得的 E, N_0, l_1 值，取国际单位制，合并各常数可求出 K 的理论值：

$$K = 4.8065 \times 10^{-34} \frac{N_0}{E^2 l_1^2} \quad (12)$$

将上述理论值与实验值 $K = N \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}$ 进行比较，绘制 $\theta \sim K$ 曲线。

4、测气压对散射计数的影响（选作内容）

- a) 装上空靶，转动靶台至 $\theta \sim -5^\circ$ ，盖上真空室的盖子，开机械泵抽真空。
- b) 在 $-5^\circ \sim 5^\circ$ 范围以 1° 为步长测 α 粒子能谱峰区计数，每个角度测 90s。

θ							
N							

绘制 $\theta \sim N$ 曲线，确定物理 0° 。

- c) 将靶台转至 9° 附近，改变气压，在 $0 \sim 18 \text{ kPa}$ 范围内测散射计数 vs 气压。至少测 5 个点，每点计数大于 200。

P(kPa)				
N				

绘制 $P \sim N$ 曲线，讨论空气质量厚度与 N 的关系。

5、参考机械泵操作说明关机，实验结束。

6、完成电子讲义思考题 2、3。

思考题

1. 卢瑟福散射实验中的实验数据误差应如何计算？
2. 根据卢瑟福公式 $N \sin^4(\frac{\theta}{2})$ 应为常数，本实验的结果有偏差吗？试分析原因。
3. 若人体肌肉组织的密度为 1.10 g/cm^3 ，根据实验内容 4 的结果估算本实验中的 α 粒子在人体肌肉组织中的射程，单位取 cm 。
4. 结合附录 III 的内容，讨论在小角度散射时实验结果与理论值的偏离原因。

参考资料

1. 徐克尊，陈宏芳，周子舫. 近代物理学. 北京：高等教育出版社，1993
2. 褚圣麟，原子物理学，北京：人民教育出版社，1979

(张道元 霍剑青 张宪锋)

附录 I：公式 (10) 中的相关常数

$$\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1} \quad e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \quad \phi_{\text{Detector}} = 5.0 \text{ mm}$$

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad t_{\text{Au}} = 5.0 \mu\text{m} \quad z = 2$$

$$Z_{\text{Au}} = 79 \quad M_{\text{Au}} = 197 \quad \rho_{\text{Au}} = 19.3 \text{ g/cm}^3$$

$$Z_{\text{Ag}} = 49 \quad M_{\text{Ag}} = 108 \quad \rho_{\text{Ag}} = 10.5 \text{ g/cm}^3$$

$$Z_{\text{Air}} = 14.5 \quad M_{\text{Air}} = 29$$

附录 II：空气密度换算关系

在 0°C 、一个标准大气压下，空气密度为 1.293 kg/m^3 ，其余条件下的空气密度换算关系为：

$$\text{空气密度} = 1.293 \times \frac{P}{101.325} \times \frac{273}{T}$$

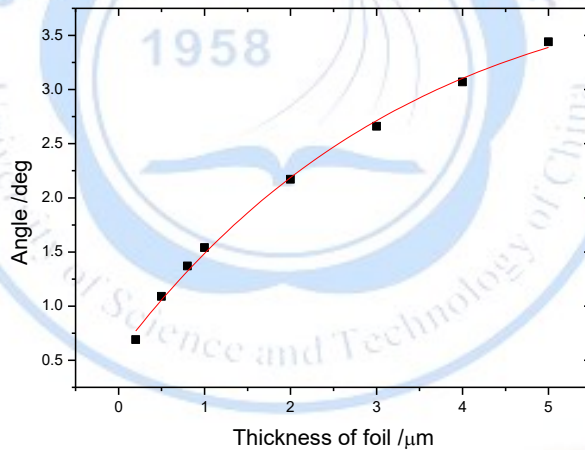
其中 P 、 T 分别为气压(kPa)、绝对温度。

附录 III：最小散射角

根据散射公式 (10)，当 $\theta=0^\circ$ 时， $N=\infty$ ，这显然不符合实际。事实上，对于小角度散射，公式 (10) 会失效。20 世纪 70 年代，Kruse 和 Mantri 对这个问题进行了详细探讨，并提出了一个卢瑟福散射公式失效的临界角公式：

$$\theta_0 = 2 \arcsin \sqrt{\frac{N_0 t Z^2 e^4}{N_0 t Z^2 e^4 + 16 \pi \epsilon_0^2 E^2}}$$

由上式可知，临界角 θ_0 既与靶的厚度 t 有关，也与 α 粒子的能量 E 有关。本实验中靶厚与临界角的关系如下图所示。



国家级实验教学示范中心

中国科学技术大学物理实验教学中心

中华人民共和国教育部