



# 卢瑟福散射虚拟仿真实验设计与教学实践

田立朝, 张 湘, 姜 静, 杨晓虎, 吕中良, 赵子甲

(国防科技大学 理学院, 长沙 410073)

**摘要:** 卢瑟福散射实验是核物理学发展史中的经典实验之一。基于实验放射源使用安全的考虑, 国内外高校多以理论讲授为主, 少有实验教学, 限制了学生对原子核微观结构及射线与物质的微观相互作用的深入理解。针对以上问题, 开发了基于 Unity3D 的卢瑟福散射虚拟仿真实验, 真实再现实验场景, 通过蒙特卡罗模拟保证了实验数据的真实可靠性。实验内容涵盖半导体  $\alpha$  谱仪的使用、卢瑟福微分散射截面公式的验证、卢瑟福背散射在材料分析中的应用等内容。该虚拟仿真实验的开发为高校近代物理实验、核物理实验、材料表征等专业实验教学提供了参考, 丰富了核物理实验教学的内容。

**关键词:** 卢瑟福散射; 卢瑟福背散射; 虚拟仿真实验; 实验教学

中图分类号: O571.1.TL817+.2

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230398

## Design and Teaching Practice of the Rutherford Scattering Virtual Simulation Experiment

TIAN Lichao, ZHANG Xiang, JIANG Jing, YANG Xiaohu, LYU Zhongliang, ZHAO Zijia

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Rutherford scattering experiment is one of the classical experiments in the history of nuclear physics. In consideration of the safety of the radiation source, there is few experimental practices of Rutherford scattering theory in domestic and foreign universities, which limits the understanding of micro-structure of atomic nuclei and microscopic interactions with matters. In response to the above questions, a Rutherford scattering virtual simulation experiment was developed based on Unity3D. The experimental scenes are realistically reproduced and the reliability of the experimental data is guaranteed through Monte Carlo simulation. The experiment content covers the use of semiconductor  $\alpha$  spectrometers, verification of the differential cross-section formula of Rutherford scattering, and the application of Rutherford back-scattering in material analysis. The virtual simulation experiment provides more references for the experimental teaching of modern physics experiments, nuclear physics experiments, and materials characterization experiments, and enriches the experimental projects for the nuclear physics experimental teaching.

**Key words:** Rutherford scattering; Rutherford backscattering spectrometry; virtual simulation experiment; experiment teaching

20 世纪初期, 人们对原子结构认识逐步清晰。1909 年卢瑟福的学生盖格(H. Geiger)和马斯顿(E. Marsden)在用  $\alpha$  粒子轰击金箔的实验中, 发现  $\alpha$  粒子大约有八千分之一的概率被反射回来<sup>[1-4]</sup>。经过严谨的理论推导之后卢瑟福于 1911 年提出了原子的“核式结构模型”, 并通过著名的卢瑟福散射实验进一步在实验上验证了这一模型的正确性。卢瑟福散射实验不仅对原子核物理的发展起到了重要作用, 而且在近代物理中有着重要应用。基于卢瑟福散射原理发展而来的卢瑟福背散射分析技术在表面材料检测中具有广泛应用, 具

有灵敏度高、分析时间短、不破坏样品、分析范围广和取样量少等优点, 特别适用于痕量元素分析<sup>[5-7]</sup>。

由于卢瑟福散射实体实验中需要使用高活度  $\alpha$  放射源(与具体实验布局直接相关, 一般大于 1 mCi), 实验中为了得到单能的  $\alpha$  射线, 一般采用的放射源为电镀源, 若学生操作不当可能导致  $\alpha$  放射源污染。因此, 国内外大多数高校这部分内容多以理论讲述为主, 少有实验教学, 不利于学生深入理解较为抽象的原子核微观结构及射线与物质的微观相互作用。近几年, 国家大力发展虚

收稿日期: 2023-08-31; 修回日期: 2023-10-13

基金项目: 湖南省自然科学基金(2021JJ30772)。

作者简介: 田立朝(1984-), 男, 博士, 副教授, 主要从事核辐射探测技术方面的研究。E-mail: tianlichao\_2004@163.com

拟仿真实验建设, 成为实体实验的重要补充, 在人才培养中发挥了重要作用<sup>[8-15]</sup>。针对这种情况, 国防科技大学理学院开发了基于 Unity3D 的卢瑟福散射虚拟仿真实验, 作为理论教学补充, 可进一步加深学生对原子核式结构的理解。该虚拟仿真实验采用 3D 仿真技术, 1:1 构建了实验设备模型, 真实再现了实验场景, 通过蒙特卡罗模拟程序获得真实可信的实验结果, 并植入到虚拟实验中, 保证了实验数据的真实可靠性, 为高校核工程与核技术专业卢瑟福散射截面公式验证以及利用卢瑟福背散射技术分析表面材料成分等实验教学提供了更多参考, 丰富了核物理实验教学的内容。

## 1 实验原理

### 1.1 半导体 $\alpha$ 谱仪

$\alpha$  粒子本质上是高速运动的 He 原子核, 电荷量为 +2, 属于重带电粒子。与原子核外电子发生非弹性碰撞是  $\alpha$  粒子与物质原子的主要相互作用方式, 表现为使物质原子发生电离或激发, 而  $\alpha$  粒子自身能量降低。半导体探测器因其良好的能量分辨率广泛应用于带电粒子的能谱测量, 当  $\alpha$  粒子进入探测器灵敏体积内, 通过库仑相互作用损失能量, 产生的大量电子-空穴对在电场作用下向两端电极漂移运动, 同时在外回路形成感应信号。由于电离产生的电子-空穴对数目正比于  $\alpha$  粒子在探测器内的沉积能量, 探测器输出的脉冲信号幅度将正比于  $\alpha$  粒子能量。由于  $\alpha$  粒子在材料中的能量损失率很大, 其射程一般很短, 因此  $\alpha$  能谱测量时一般要求探测器是无窗或者薄窗的, 以尽量减少  $\alpha$  粒子在探测器入射窗中的能量损耗。通常情况下,  $\alpha$  半导体探测器对可见光敏感, 在使用时应注意避光, 实验中一般采用真空腔可以兼具避光和提供  $\alpha$  探测真空环境的作用, 以减少空气对  $\alpha$  粒子能量的吸收。

半导体  $\alpha$  谱仪的基本构成单元如图 1 所示, 包括真空腔、半导体探测器、电荷灵敏前置放大器、线性谱仪放大器、多道分析器、计算机等。当  $\alpha$  粒子入射时, 半导体探测器输出的感应电流通过电荷灵敏前置放大器转换为电压信号后再经过线性谱仪放大器、多道分析器等电子学器件进行信号处理后被记录下来, 从而实现  $\alpha$  粒子的测量。

由于  $\alpha$  粒子在 PN 结内电离过程的随机性, 导致相同能量的  $\alpha$  粒子产生的电子-空穴对数目  $N$  并

不是固定值, 而是围绕某一平均值上下波动, 一般服从法诺分布。电子-空穴对数目相对涨落越大, 探测器的能量分辨率将越差。半导体探测器的能量分辨率如下式所示:

$$\eta = 2.355 \sqrt{\frac{F}{N}} = 2.355 \sqrt{\frac{FW}{E}} \quad (1)$$

式中:  $E$  为  $\alpha$  粒子能量,  $W$  为半导体探测器的平均电离能(典型值为  $W = 3\text{eV}$ ),  $F$  为法诺因子(典型值为  $F = 0.1$ ), 为了得到更好的能量分辨率, 探测器需要工作在合理的电压范围内。

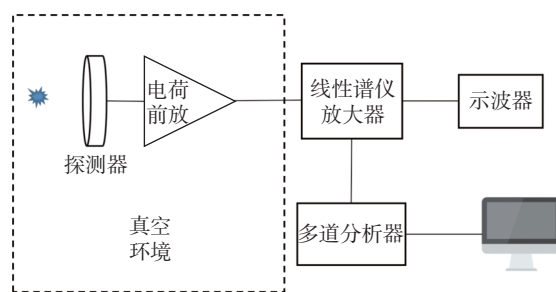


图1 半导体  $\alpha$  谱仪基本组成单元

### 1.2 卢瑟福散射

为了定量描述卢瑟福散射实验中  $\alpha$  粒子被散射到不同角度的概率大小, 定义了微分散射截面, 其物理含义为: 粒子入射到单位面积只有一个靶原子的材料时, 被散射到  $\theta$  方向单位立体角内的概率, 用  $d\sigma/d\Omega$  表示。微分散射截面与入射粒子以及靶原子的各个物理参数之间具有密切关系, 其表达式为<sup>[16]</sup>:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2mv^2}\right)^2 \frac{\left[(1-\mu^2 \sin^2 \theta)^{1/2} + \cos \theta\right]^2}{\sin^2 \theta [1-\mu^2 \sin^2 \theta]^{1/2}} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为散射角,  $Z_1$  为入射粒子电荷数,  $Z_2$  为靶原子序数,  $\mu = m/M$ ,  $m$  为入射粒子质量,  $M$  为靶材料原子质量。当  $m \ll M$ , 即  $\mu \ll 1$  时, 式(2)右边可展开为级数形式, 卢瑟福散射微分截面可表示为:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2mv^2}\right)^2 \left\{ \sin^{-4} \frac{\theta}{2} - 2\mu^2 + \dots \right\} \quad (3)$$

当入射粒子为  $\alpha$  粒子时,  $Z_1 = 2$ , 式(3)可近似为:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Z_2 e^2}{mv^2}\right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (4)$$

为了能够在实验上验证卢瑟福核式模型的正确性, 必须将理论公式中的参数转换成可以直接

测量的物理量。根据微分散射截面的物理含义, 可知:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dn}{ANt} \frac{1}{d\Omega} \quad (5)$$

式中:  $A$  为单位时间内入射到散射体的  $\alpha$  粒子数目,  $N$  为散射体原子数密度,  $t$  为散射体厚度,  $\Omega$  为空间立体角,  $\Omega$  与  $\theta$  的关系为  $d\Omega = 2\pi \sin\theta d\theta$ ,  $dn$  为单位时间内在  $d\Omega$  立体角内的散射粒子数。因此, 实验中单位立体角内的散射粒子数与散射角之间的关系可以表示为式(6), 实验用  $\alpha$  放射源释放的  $\alpha$  粒子能量通常为 4~9 MeV, 可以不考虑相对论效应:

$$\frac{dn}{d\Omega} = ANt \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{Ze^2}{2E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (6)$$

对于特定的实验布局, 放射源活度、探测器有效面积、探测器与散射点的距离均为固定值。因此, 探测器所测量的  $\alpha$  粒子计数率  $n$  与各参量 ( $\theta$ 、 $E$ 、 $Z$ 、 $t$ ) 之间的关系为:

$$n \propto ANt \left( \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left( \frac{Ze^2}{2E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta/2)} \quad (7)$$

实验中, 可通过测量探测器计数率  $n$  与各参量 ( $\theta$ 、 $E$ 、 $Z$ 、 $t$ ) 之间的关系, 验证卢瑟福微分散射截面公式的正确性, 从而验证卢瑟福提出的原子“核式结构模型”的正确性。

### 1.3 卢瑟福背散射

卢瑟福背散射是通过将一束确定能量的高能离子束(通常是质子、 $\alpha$  粒子或其他重离子)入射到待分析材料上, 检测背向反射(典型散射角为  $160^\circ \sim 180^\circ$ )的离子能量及数量分布, 即可确定靶原子的种类、浓度和深度分布。卢瑟福背散射实验分析材料属性时有 3 个基本点<sup>[17]</sup>。

#### 1) 运动学因子——质量分析

入射离子与靶原子核发生弹性碰撞, 损失一些能量, 通过对散射离子的能量测定可定性确定靶原子的质量。

#### 2) 背散射微分截面——含量分析

发生碰撞时, 靶的原子浓度和散射截面决定了散射离子的产额, 测定散射离子的产额可确定靶原子的浓度。

#### 3) 能损因子——深度分析

入射离子在散射前以及散射后离子在穿透靶物质会损失一些能量, 测定散射离子的能量分布, 可以确定靶原子的分布深度。

### 1.3.1 质量分析

通常用运动学因子  $K$  表示散射离子能量与入射离子能量之间的关系,  $K = E_1/E_0$ , 其中  $E_1$  为散射离子能量,  $E_0$  为入射离子能量。在实验室坐标内, 由能量守恒和动量守恒可得, 当  $m \ll M$  时, 运动学因子  $K$  可表示为:

$$K = \frac{E_1}{E_0} = \left[ \frac{m \cos\theta + \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2\theta}}{M + m} \right]^2 \quad (8)$$

从式(8)看, 动力学因子  $K$  只与入射离子和靶原子核的质量以及散射角度有关。在实验中, 入射离子能量  $E_0$ 、入射离子质量  $m$  和散射角  $\theta$  都是确定值。因此, 只要测定了散射离子能量  $E_1$  即可确定靶原子质量  $M$ 。

运动学因子与散射角以及靶原子质量成单一函数关系。随着散射角增加, 运动学因子  $K$  减小, 即散射离子与入射离子之间的能量差变大; 相同散射角情况下, 运动学因子  $K$  随靶原子质量增加而增加, 据此可以实现靶原子质量的定性分析, 从而确定样品中所含元素种类, 如图 2 所示。

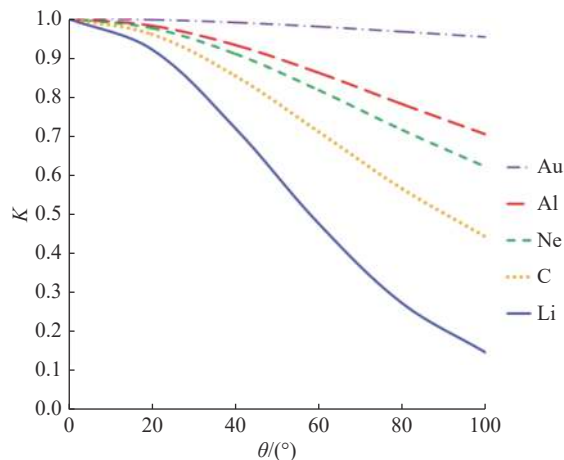


图 2 运动学因子  $K$  的变化曲线

### 1.3.2 含量分析

在卢瑟福背散射实验中, 固定的探测器有效面积对于散射点的立体角  $\Omega$  为固定值。当探测器有效面积足够小时, 可以认为探测器向散射点所张的立体角内的微分散射截面是一致的。因此, 探测器单位时间内所接收的粒子总数与平均截面的关系为:

$$n = \sigma \Omega ANt \quad (9)$$

在具体的实验中,  $A$ 、 $n$  和  $\Omega$  都可以通过测量得到,  $\sigma$  也可以算出, 因此, 单位面积的靶中的原子数  $Nt$  即可求出, 这就是卢瑟福背散射做定量分析的原理。



### 1.3.3 深度分析

当待测样品有一定的厚度时, 在样品内部发生散射的离子在到达表面前会损失部分能量, 导致探测器测量到的样品内部散射离子能量将低于样品表面散射离子能量, 因此, 探测器测量散射离子能量将具有一定的分布宽度。对于均匀分布的材料, 能谱分布宽度将正比于样品的厚度。此外, 由于入射离子到达样品内部时已损失部分能量, 根据式(4)可知, 散射截面随着离子能量降低而增加。因此, 在样品内发生背散射的概率相对于表面会大一些, 背散射离子能谱中的低能端将会略高于高能端。图 3 为 Si 基底上不同厚度 TaSi 层样品的 RBS 能谱, 通过测量 Ta 峰的宽度, 就可以得到 TaSi 层的厚度值。Ta 峰中, 能量低的一端对应着 TaSi/Si 界面, 能量高的一端对应着表面。

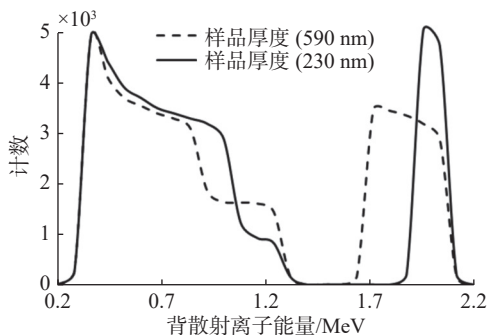


图 3 Si 片上不同厚度 TaSi 层样品的 RBS 能谱

## 2 虚拟仿真实验教学内容设计

实验设计了设备认知、辐射防护、系统搭

建、卢瑟福散射、卢瑟福背散射 5 个实验模块。通过设备认知模块使学员了解半导体探测器及常用核辐射测量电子学插件的基本功能及使用方法; 通过辐射防护模块使学员熟悉放射性实验室基本操作规章制度以及放射源操作注意事项, 强化辐射防护安全意识; 在系统搭建模块, 学员可自主完成实验平台搭建、 $\alpha$  能谱测量、半导体探测器工作电压选择、 $\alpha$  谱仪能量刻度等内容; 在卢瑟福散射实验模块, 学员可灵活改变散射体厚度、散射体材料、散射角度以及入射  $\alpha$  粒子能量, 验证卢瑟福散射截面公式的正确性, 加深学员对  $\alpha$  散射微观作用规律的理解与掌握; 卢瑟福背散射实验模块属于拓展性综合实验, 是卢瑟福散射公式的具体应用, 通过测量大角度散射的  $\alpha$  粒子能量及数量分布, 获得未知薄膜材料的元素构成、元素成分占比以及薄膜材料厚度等信息, 虚拟仿真实验内容框架如图 4 所示。

### 2.1 设备认知

该模块包含了实验所用设备的基本功能及使用方法介绍, 是正确完成实验的前提。该模块 1:1 再现了真实实验场景, 如图 5 所示。学员可对实验仪器进行旋转和放大操作, 从多角度了解设备的结构组成。卢瑟福散射实验平台包含了真空泵、真空腔、放射源安装架、散射样品台、旋转步进电机、半导体探测器、电荷灵敏前置放大器等; 插件式核电子学仪器包含了高压电源、线性谱仪放大器、多道分析器等; 除此之外, 还有示波器、放射源储存柜等通用设备。

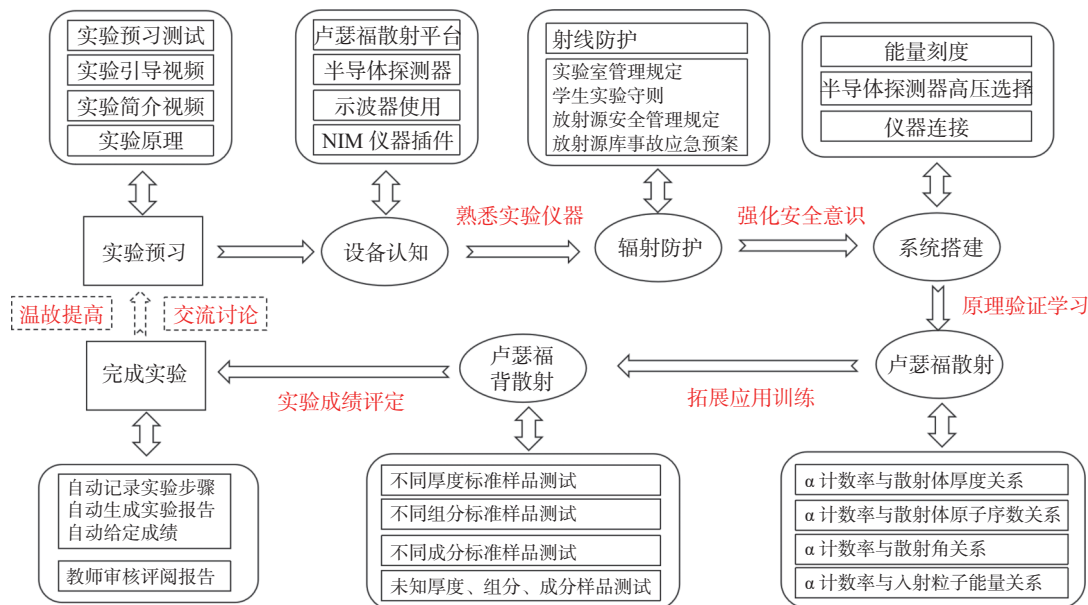


图 4 卢瑟福散射虚拟仿真实验框架图

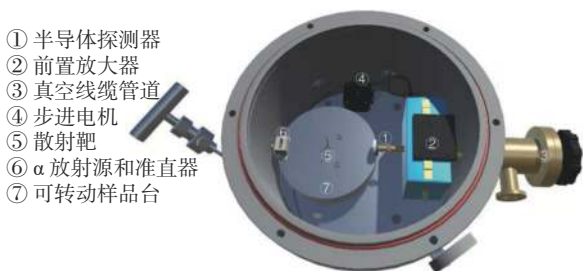


图 5 卢瑟福散射实验平台真空腔内部结构图

### 2.2 辐射防护

本实验室属于放射性实验室，具有严格的操作规范，尽管虚拟实验中不具备实验危险性，但同样要求学员树立安全意识，养成良好的实验习惯，学生必须将辐射安全牢记于心，防患于未然。通过该模块，学员可以学习《实验室管理规定》《学生实验守则》《放射源安全管理规定》《放射源库事故应急预案》等规章制度，同时可以通过点击鼠标给人体模型穿戴防护服及辐射剂量监测设备，强化学员辐射安全意识。

### 2.3 系统搭建

#### 2.3.1 仪器连接

该实验属于综合性实验，实验平台由多个设备构成。学生可利用鼠标选择每个设备进行旋转和缩放操作，完成所有实验设备之间的线路连接，了解完整的探测器输出脉冲信号处理过程，实验装置布局如图 6 所示。学生在该模块完成仪器连接后，后续实验模块系统将默认已经完成线路连接，不必再重复操作。

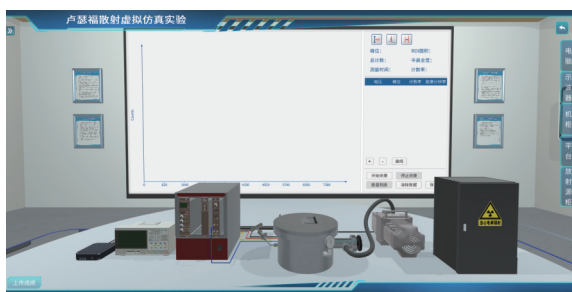
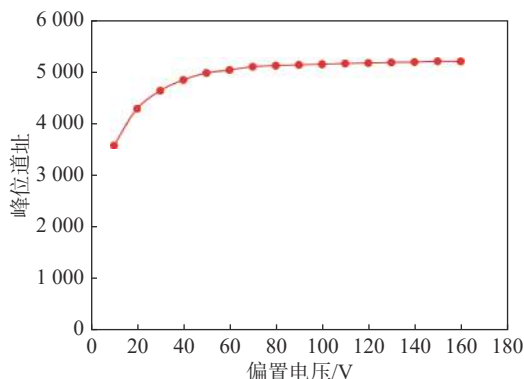


图 6 实验装置布局图

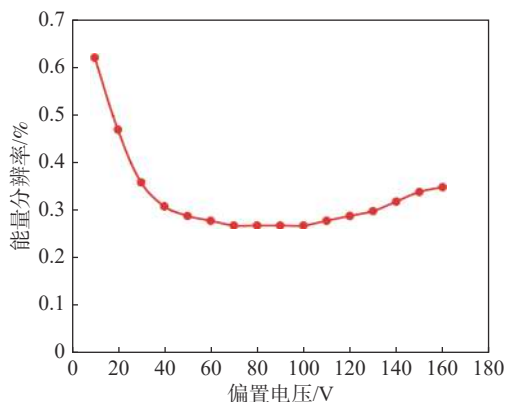
#### 2.3.2 半导体探测器的工作电压选择

实验中采用的半导体探测器本质上为反向偏置的 PN 结，提高探测器的反向偏压可以增加探测器的灵敏体积以保证粒子能量可以完全损耗在灵敏区内，同时可以降低探测器结电容，提高信噪比。但是，当偏压过高时，探测器的漏电流也会增加从而使探测器能量分辨率变差。为了得到最

佳的能量分辨率，探测器的偏压应在最佳范围内选择。实验中，通过依次测量不同偏压时的  $\alpha$  射线能谱，分别做出峰位和能量分辨率随探测器反向偏压的变化关系，如图 7 所示，选择能量分辨率最好的电压为其最佳工作电压。



(a)  $\alpha$  能谱峰位随探测器工作偏压的变化关系



(b) 能量分辨率随探测器工作偏压的变化关系

图 7  $\alpha$  能谱峰位及能量分辨率随偏置电压的变化关系

#### 2.3.3 $\alpha$ 谱仪能量刻度

$\alpha$  谱仪输出的脉冲信号幅度与  $\alpha$  粒子在探测器灵敏体积内的沉积能量成正比，通过测量脉冲信号幅度就可以实现  $\alpha$  粒子能量测量。多道分析器是核物理实验中常用的能谱测量仪器，其基本功能是将一定范围内的输入电压信号(通常是 0~10 V)等分为不同的区间(又称为道)并进行分类统计。根据其划分区间(最大道数)的不同可以分为 512、1024、2048、4096 等。对  $\alpha$  谱仪输出的大量脉冲信号进行统计分析，以道址  $x$  为横坐标，以每一道的计数  $N$  为纵坐标作图，得到探测器的脉冲幅度谱  $N \sim x$ 。通过对粒子能量  $E$  与多道分析器道址  $x$  之间的关系进行刻度，就可以得到探测器输出的能谱  $N \sim E$ 。

实验中，可通过更换不同放射源(如  $^{241}\text{Am}$ ,

$^{238}\text{U}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{210}\text{Po}$  等), 测出不同能量  $\alpha$  射线在多道分析器上所对应的道址, 作能量与道址的刻度曲线, 并表示为:

$$E = Gx + E_0 \quad (10)$$

式中:  $E$  为  $\alpha$  粒子的能量, 单位 keV;  $x$  为对应  $E$  谱峰所在的道址(道);  $G$  为直线斜率, 单位 keV/道, 称为刻度常数;  $E_0$  是直线截距, 单位 keV, 表示由于  $\alpha$  粒子穿过探测器入射窗时所损耗的能量。

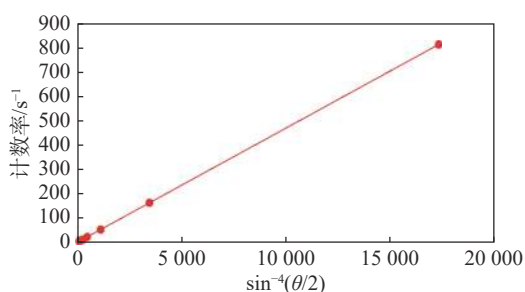
## 2.4 卢瑟福散射

根据式(7), 通过测量探测器计数率与散射角

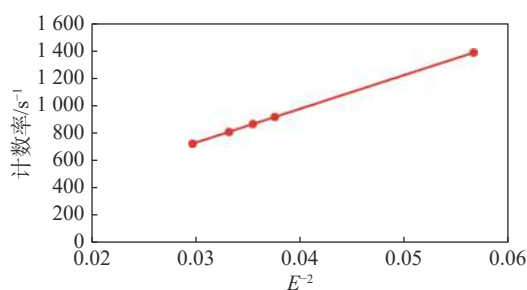
度、入射  $\alpha$  粒子能量、散射体原子序数、散射体厚度之间的关系, 可以验证卢瑟福散射微分截面公式的正确性, 从而验证原子的“核式结构模型”。

### 2.4.1 验证探测器计数率与散射角的关系

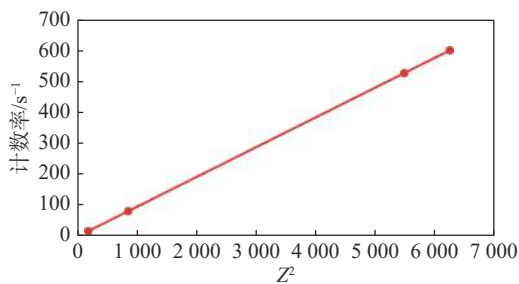
改变散射角度, 测量探测器的计数率。固定放射源、散射体材质、散射体厚度, 测量不同散射角对应的探测器计数率, 根据实验结果画出计数率  $n$  与散射角  $\sin^{-4}(\theta/2)$  的关系图, 分析实验结果, 验证散射截面与散射角之间的关系, 实验结果如图 8(a)所示。



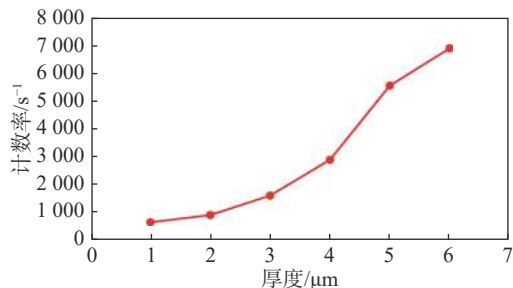
(a) 计数率与散射角之间的关系



(b) 计数率与入射  $\alpha$  粒子能量的关系



(c) 计数率与散射体原子序数的关系



(d) 计数率与散射体厚度的关系

图 8 探测器计数率与  $\theta$ 、 $E$ 、 $Z$ 、 $t$  之间的关系

### 2.4.2 验证探测器计数率与入射 $\alpha$ 粒子能量的关系

改变入射  $\alpha$  粒子能量(更换放射源), 测量探测器的计数率。固定散射体原子序数、散射体厚度、散射角度, 测量活度相同但同位素种类不同  $\alpha$  放射源对应的探测器计数率, 根据实验结果画出计数率  $n$  与入射粒子能量  $E^2$  的关系图, 分析实验结果, 验证散射截面与散射角之间的关系, 实验结果如图 8(b)所示。

### 2.4.3 验证探测器计数率与散射体原子序数的关系

改变散射体原子序数(更换材料), 测量探测器的计数率。固定放射源、散射体厚度、散射角度, 测量不同散射材料对应的探测器计数率, 根据实验结果画出计数率  $n$  与散射体原子序数  $Z^2$  的关系图, 分析实验结果, 验证散射截面与散射角

之间的关系, 实验结果如图 8(c)所示。

### 2.4.4 验证探测器计数率与散射体厚度的关系

改变散射体的厚度, 测量探测器的计数率。固定放射源、散射角度、散射体原子序数, 测量不同厚度散射体对应的探测器计数率, 根据实验结果画出计数率  $n$  与散射体厚度  $t$  的关系图, 分析实验结果, 图 8(d)所示。值得注意的是: 随着散射体厚度的增加, 靶原子数目增加,  $\alpha$  散射概率增加, 相应的散射粒子计数率将随之增加。另一方面, 当散射体厚度增加时, 由于  $\alpha$  粒子在散射体内的运动路程增加, 能量损失也随之增加, 因此测量能谱中  $\alpha$  峰位将会随着厚度增加而降低, 根据式(7)随着散射体厚度增加探测器计数率也将有所增加。



## 2.5 卢瑟福背散射

本实验模块目的侧重于理解卢瑟福背散射的实验原理及数据分析方法,加速器的操作并未作为实验内容呈现,而是直接产生固定能量的准直离子束(能量为 2.5 MeV 的  $\alpha$  粒子束)。

### 2.5.1 样品厚度测量

当靶样品具有一定的厚度时,在靶表面发生散射的粒子能量较高,在靶内部发生散射的粒子能量从靶样品出射前将在样品内部损失部分能量,因此探测器测量的内部散射粒子能量较低,散射峰的低能端即对应粒子最深层散射事件。当靶样品中元素为均匀分布时,通过测量散射峰的高能散射粒子及低能散射粒子能量即可获得样品的厚度信息。

实验中测量散射样品为 Si 衬底上的 Ti 薄膜厚度, Si 衬底厚度为 1 mm, Ti 薄膜取标准厚度(100、200、300、400、500 nm)。测量以上标准样品的散射粒子能谱,计算不同厚度情况下表面散射粒子能量、最深层散射粒子能量以及散射峰半高全宽,分析以上 3 个参数与 Ti 薄膜厚度的关系。测量未知样品时,后台随机生成一定厚度 Ti 薄膜对应的散射粒子能谱,通过测量以上 3 个参数,计算 Ti 薄膜厚度,并与后台数据进行比较。

### 2.5.2 样品成分测量

由运动学因子  $K$  可知,靶样品中的元素种类不同时,散射粒子能量也将不同。通过测量多种已知元素样品(Si、Ti、Mo、Au、C)的散射能谱,计算不同元素情况下表面散射粒子能量、最深层散射粒子能量以及散射峰半高全宽,分析以上 3 个参数与样品元素质量的关系。测量未知样品元素种类时,后台随机生成某种元素样品对应的散射能谱,通过测量以上 3 个参数,利用其与样品元素质量的关系,计算样品所含元素,并与后台数据进行比较。

### 2.5.3 样品元素含量测量

根据卢瑟福散射截面公式,散射体原子数密度越大,发生散射的概率就越大,相应的散射峰计数率将越大。通过测量 Si 衬底上的 TiMo 合金中的 Mo 含量已知(5%、15%、25%、35%)的标准样品散射能谱,计算不同含量情况下 Mo 散射峰高度(入射离子束稳定,测量时间相同时,散射峰高度与散射事例数成正比),寻找散射峰高度与 Mo 含量之间的关系。测量未知样品中 Mo 含量

时,后台随机生成一定 Mo 含量样品对应的散射能谱,通过测量散射峰高度,利用其与 Mo 含量的关系,计算样品所含 Mo 的比例,并与后台数据进行比较,结果如图 9 所示。

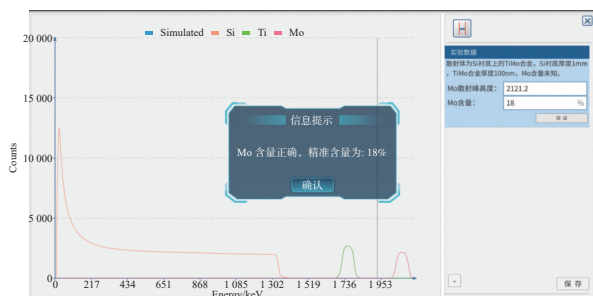


图 9 卢瑟福背散射对未知样品元素含量的测量

## 3 实验教学设计及实践

该实验建议实践学时为 6 学时,为培养学生的实验技能和探究式学习能力,可采取的具体教学方法如下。

### 3.1 问题导向, 启发学生思考

通过关键问题的设置,在寻找答案的过程中不断发现、分析、解决问题,培养学生的创新思维。如围绕“如何以宏观实验测量验证原子核微观作用规律?”以及“如何实现  $\alpha$  能谱测量?”等问题,开展资料查询、师生讨论、生生协作,培养学生文献检索、现代信息技术的使用以及交流合作的技能,调动学生学习理论和实践知识的积极性。

### 3.2 充分试错, 强化知识理解

实验数据全部来自于科研软件的仿真计算,实验结果既有随机性又服从放射性统计规律,数据真实可靠;实验创新了人机交互模式,采用开放性设计,学员可自由更改放射源种类及活度、探测器工电压、放大倍数、样品参数等,允许学员充分试错,灵活性强,有效激发学员的学习欲望;另外,通过软件中的时间加速功能,学员可在短时间内获取实验数据,从而有更多精力集中在实验方法的思考、仪器的操作、实验条件的确定以及实验数据处理等方面,提升实验效果。

### 3.3 模块设计, 适用不同层次

实验进行模块化设计,包括 4 个基础实验模块和 1 个拓展实验模块,教学内容更加丰富。不同专业、不同层次学员可以选取不同的实验模块完成实验内容。如作为物理学专业近代物理实验

项目则要求完成前4个基础实验模块,而对于核专业学员则要求完成全部模块。

### 3.4 润物无声,融入思政教育

课程思政内容贯穿课程讲授过程,培养学员树立正确的科研态度以及学以致用、知行合一的价值导向。如讲述卢瑟福通过大量实验现象的总结归纳,推翻其老师汤姆生提出的原子“葡萄干面包”模型,强调“弟子不必不如师”大胆质疑、小心求证的科研精神;通过讲述卢瑟福背散射的物理原理到技术应用的发展历史,强调学以致用、知行合一的价值导向。

### 3.5 在线评阅,创新考核方式

本实验项目的预习、操作、考核均在线上完成,实验成绩包括预习测验成绩(15%)和实验操作成绩(85%)两部分。实验特别注重过程考核,软件自带打分功能,根据学员实验参数的设置,通过后台数据分析和评分系统,可对学生的操作步骤、操作规范以及实验结果进行逻辑计算,系统自动给分,学员可实时查看当前成绩及失分原因,如图10所示。除关键实验步骤的考核外,注重实验结果的分析,实验待测样品参数由系统随机给出,学员根据实验结果自行获得该参数并与后台数据比较,每次实验结果均不相同,具有一定的挑战度。虚拟仿真实验允许学员多次重复实验,直至完全掌握相关知识点。

| 知识点            | 得分 | 备注                                |
|----------------|----|-----------------------------------|
| 设备认知 (10分)     | 10 | 已全部掌握。                            |
| 辐射防护安全 (10分)   | 10 | 已全部掌握。                            |
| 平台搭建 (20分)     | 19 | 第一次搭建设备未在规定的时间内。                  |
| 卢瑟福散射实验 (40分)  | 36 | 本模块没有数据,数据由系统随机生成,总计数据10次,数据统计误差。 |
| 卢瑟福背散射实验 (20分) | 19 | 数据统计误差中误差数据误差较大。                  |
| 总分             | 94 |                                   |

图10 实验考核成绩构成

## 4 结束语

卢瑟福散射实验是核物理发展史上的经典实验之一,对于学生理解原子微观结构具有重要意义。出于放射源安全性考虑,国内外少有高校开设相关实验。针对以上问题,国防科技大学理学院开发了卢瑟福散射虚拟仿真实验项目,内容涵

盖了半导体 $\alpha$ 谱仪的使用、卢瑟福微分散射截面公式的验证、卢瑟福背散射在材料分析中的应用等内容,为高校核工程与核技术专业卢瑟福散射截面公式验证以及利用卢瑟福背散射技术分析表面材料成分等实验教学提供更多参考,丰富了核物理实验教学的内容。

## 参考文献

- [1] 郭佳乐.  $\alpha$ 粒子散射实验[J]. 通讯世界, 2019, 26(9): 341-342.
- [2] 陈虎, 母治平, 张岩平, 等. 卢瑟福散射实验装置的研制[J]. 大学物理, 1999, 18(6): 32-34.
- [3] 孟勇. 基于Maple对Alpha粒子散射实验的仿真设计[J]. 大学物理实验, 2019, 32(4): 84-87.
- [4] 刘成明, 李爱侠, 文群刚, 等. 基于Geant4的卢瑟福散射计算机模拟[J]. 大学物理实验, 2017, 30(3): 105-109.
- [5] 张慧, 梅雪松, 关世荣, 等.  $^4\text{He}$ 离子卢瑟福背散射的Geant4模拟[J]. 黑龙江科学, 2013(1): 22-24.
- [6] 陈秀莲, 张洁, 覃雪, 等. 卢瑟福背散射分析元素浓度深度分布的计算方法研究[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(5): 102-107.
- [7] 刘运传, 周燕萍, 王雪蓉, 等.  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 晶体薄膜中铝含量的卢瑟福背散射精确测定[J]. 物理学报, 2013, 62(16): 78-82.
- [8] 刘为浒, 李刚华, 汪欢欢. 虚拟仿真实验“金课”建设的探索与实践[J]. 大学教育, 2022(5): 86-89.
- [9] 贺占魁, 黄涛. 虚拟仿真实验教学项目建设探索[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(2): 108-111.
- [10] 郭婷, 杨树国, 江永亨, 等. 虚拟仿真实验教学项目建设与应用研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 215-217.
- [11] 孙福, 孙佳怡, 刘国庆, 等. 虚拟仿真实验教学项目评价研究[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(7): 187-190.
- [12] 熊宏齐. 虚拟仿真实验教学助理理论教学与实验教学的融合改革与创新[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 1-4.
- [13] 杨智慧, 刘海林, 王晓峰, 等. 康普顿散射虚拟仿真实验设计及教学实践[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(3): 102-106.
- [14] 田立朝, 姜静, 马燕云. 虚拟仪器在核技术实验教学中的应用探索[J]. 大学物理, 2017, 36(9): 44-48.
- [15] 吴攀, 单建强, 张博. 虚拟仿真实验在核工程与核技术专业中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(4): 102-106.
- [16] 赵博. 卢瑟福散射实验数据获取系统研制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [17] 王振超.  $^4\text{He}$ 和 $^{12}\text{C}$ 离子卢瑟福背散射的Geant4模拟[D]. 长春: 吉林大学, 2013.