

Лабораторная работа № 52

Опыт Резерфорда (Зондирование вещества быстрыми альфа-частицами)

Москва - 2018

Лабораторная работа № 52

Опыт Резерфорда (Зондирование вещества быстрыми альфа-частицами)

Теоретическое введение

Зондирование вещества заряженными частицами является основным современным методом исследования структуры частиц и свойств микромира. Суть этого метода состоит в изучении закономерностей рассеяния (упругого и неупругого) частиц мишенью. Полученные закономерности представляют собой макроскопические следствия процессов взаимодействия на микроуровне. Правильная интерпретация этих процессов дает возможность реконструировать картину микромира – определить структуру частиц; поля, окружающие их; свойства симметрии микромира и т.д.

Объекты исследования методом зондирования весьма разнообразны – это поверхности твердых тел, молекулы, атомы, атомные ядра, элементарные частицы.

Энергии связи для этих объектов существенно различны, от долей эВ до тысяч МэВ. Поскольку предметом исследования является выявление законов взаимодействия и структура частиц, то ясно, что энергия пучка должна охватывать весь диапазон возможных энергий связи частиц в исследуемых объектах. Это требование приводит к классификации физики столкновений по энергии падающих частиц, так например, исследования атомных ядер лежат в области средних и высоких энергий от 10^6 (МэВ) до 10^9 (ГэВ) и выше, а исследования электронной структуры атомов – в области низких энергий от долей эВ до десятков тысяч. Экспериментальная техника существенно зависит от энергии пучка, так если установка для исследования электронной структуры атомов уместается на лабораторном столе, то для исследования ядер и элементарных частиц строятся огромные ускорители заряженных частиц. Эти принципы определяют обязательное присутствие в установке как минимум трех элементов:

- 1) Источника зондирующих частиц (это может быть радиоактивный источник, электронная пушка, ускоритель).
- 2) Мишени («тонкой», «толстой», металлической, газовой и т.д.).
- 3) Детектора рассеянных (выбитых) частиц.

Исследования обычно сводятся к изучению угловых и энергетических закономерностей, зарядовому и массовому составу выбитых частиц. Именно по этим результатам исследователь восстанавливает свойства частиц и окружающих полей.

Физические основы явлений

1. Изучение структуры атома (опыт Резерфорда)

Известно, что, по крайней мере, две модели атома претендовали на правильное описание структуры атома. Модель Томсона – капельная модель и планетарная или ядерная модель – модель Резерфорда.

В соответствии с классическими представлениями модель Томсона была предпочтительнее, однако, она не была в состоянии описать адекватно спектральные закономерности излучения атома. Необходимо было найти экспериментальный метод, который, отличаясь от спектральных методов, ответил бы прямо на вопрос об истинной структуре атома. Таким методом стал метод зондирования вещества альфа-частицами, предложенный Резерфордом в 1911 году.

Задача, поставленная Резерфордом, состояла в том, чтобы по угловому распределению рассеянных альфа-частиц ответить на вопрос, как распределены масса и заряд атома. С этой целью золотая фольга толщиной в 1 мкм обстреливалась пучком альфа-частиц с энергией в несколько МэВ. Результаты опыта можно свести к двум наиболее важным пунктам: 1) большая часть альфа-частиц отклонялась на малые углы, в среднем $2^\circ - 3^\circ$ и распределение по углам этих частиц соответствовало нормальному закону; 2) некоторое число частиц отклонялось на большие углы, а отдельные частицы изредка рассеивались даже на углы, близкие к 180° .

Выводы, сделанные Резерфордом, сегодня общеизвестны: вся масса атома практически целиком сосредоточена в положительно заряженном малом объеме, называемом ядром. Размеры ядра на 4-5 порядков меньше размеров атома. Атом, по модели Резерфорда, представляет собой систему электронов,двигающихся вокруг ядра наподобие планет вокруг Солнца. Эти выводы были получены Резерфордом в результате тщательного и нетривиального анализа экспериментальных результатов.

2. Постановка эксперимента и основные параметры

В предлагаемой лабораторной работе изучается упругое рассеяние альфа-частиц с энергией в несколько МэВ мишенью из золота.

Цель исследования: проверка формулы Резерфорда.

Экспериментальная установка для реализации этой программы этой программы представляет собой вакуумированную камеру, в которой находится (см. рис. 1):

1. Источник (радиоактивный) альфа-частиц с энергией в несколько МэВ,
2. Мишень толщиной ~ 1 мкм,
3. Детектор полупроводниковый с необходимой эффективностью.

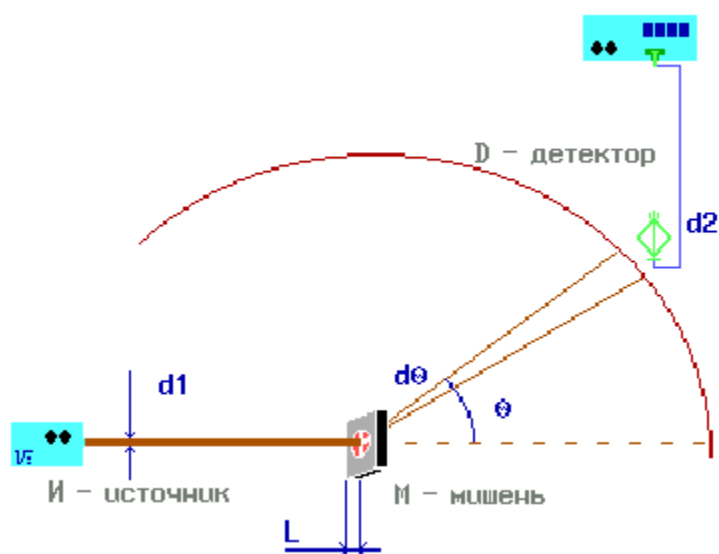


Рис. 1. Схема опыта Резерфорда.

Выбор в качестве источника альфа-частиц радиоактивного источника дает возможность создать компактную установку, при этом, однако, приходится мириться, по крайней мере, с двумя недостатками: а) неуправляемостью энергией пучка альфа-частиц; б) с относительно малой интенсивностью (число частиц, испускаемых в единицу времени) источника, что реально не дает возможности производить измерения под большими углами.

Экспериментальная установка является прототипом установки Резерфорда, на которой были проведены знаменитые опыты, установившие ядерное (или, планетарное) строение атома. В отличие от резерфордовской, предлагаемая установка фиксирует рассеянные частицы высокоэффективным полупроводниковым детектором и оборудована Измерительным Комплексом (ИК) на базе персонального компьютера.

Дифференциальное сечение $d\sigma$

Основной величиной, определяемой в любом столкновительном эксперименте, является дифференциальное сечение рассеяния (упругого или неупругого) – величина, характеризующая вероятность рассеяния, как функцию угла рассеяния.

Пусть под углом θ к оси падающего на мишень пучка альфа-частиц в элементе телесного угла $d\Omega$ расположен детектор (см. рис. 1). Если j – плотность потока пучка, n – число рассеивающих центров, то есть число частиц, находящихся в объеме мишени, занимаемом пучком, то число частиц, рассеянных в единицу времени в элемент телесного угла $d\Omega$ будет равно

$$dA = d\sigma \cdot j \cdot n, \quad (1)$$

где $d\sigma$ и есть дифференциальное сечение.

Если бы в эксперименте определялось бы просто число рассеянных в единицу времени частиц dA , то в разных опытах эта величина была бы разная (для заданного угла θ), поскольку она зависит от плотности потока j , которая обычно разная в разных опытах. Гораздо удобнее измерять дифференциальное сечение, которое не содержит этого недостатка.

$$d\sigma = \frac{dA}{j \cdot n} \quad [\text{см}^2] \quad (2)$$

Однако, эта величина уже имеет размерность площади ($dA \sim [t^{-1}]$, $j \sim [t^{-1}, s]$). Она зависит от угла рассеяния θ (не зависит от n , так как $dA \sim n$) и характеризует вероятность упругого рассеяния под данным углом, выраженную в единицах площади. Дифференциальное сечение пропорционально элементу телесного угла $d\Omega$, занимаемого детектором, поэтому, чтобы избежать разнозначности в разных экспериментах, обычно используют дифференциальное сечение, приведенное к единичному телесному углу:

$$I(\theta) = \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} \quad (3)$$

Таким образом, для того, чтобы измерить $I(\theta)$, необходимо измерить две величины – j и dA и рассчитать число рассеивающих центров

$$n = n_0 \cdot L \cdot S_m, \quad (4)$$

(n_0 – концентрация атомов мишени, L – ее толщина, S_m – площадь поперечного сечения пучка, ограниченная отверстием коллиматора) и элемент телесного угла

$$d\Omega = \frac{S_d}{R^2}, \quad (5)$$

(S_d – площадь детектора, R – расстояние от мишени до детектора).

3. Теория Опыта Резерфорда

Выше мы дали общие определения величин, определяемых в опытах по рассеянию. Теперь мы вернемся к основной нашей проблеме, к рассеянию альфа-частиц и еще раз опишем исторический опыт Резерфорда.

Итак, пучок альфа-частиц, вылетающих из радиоактивного источника со скоростью $\sim 10^9$ см/с направлялся на мишень, представляющую собой

тонкую золотую фольгу толщиной в 1 мкм, что составляет примерно 104 атомных слоев.

Флуоресцирующий экран, поставленный за мишенью, вспышками отсчитывал число альфа-частиц, прошедших через мишень и рассеявшихся на угол θ . Как уже раньше отмечалось, подавляющее число альфа-частиц отклонялось на малые углы, в среднем $2^\circ - 3^\circ$.

Однако, примерно одна альфа-частица из 104 падающих на мишень, отклонялась на большой угол, в том числе были и такие альфа-частицы, которые рассеивались назад, почти на 180° . Было также замечено, что рассеяние на малые углы происходит в соответствии с законом нормального распределения случайных величин.

Теперь, следуя рассуждениям Резерфорда, объясним полученные закономерности и, в частности, ответим на вопрос о том, какая модель соответствует действительности, Томсона или Резерфорда. Ясно, что если бы мишень состояла из твердых шариков, то ни одна из альфа-частиц не могла бы пройти через 104 слоев такого вещества.

Рассмотрим два случая: а) мишень построена из атомов Томсона, б) мишень построена из атомов Резерфорда.

Модель Томсона. Атом Томсона - это положительно заряженная "капелька", в которую вкраплены электроны, поэтому эта система уже на небольшом расстоянии от нее нейтральна, как и положено атому. Альфа-частицы могут проникнуть в такую каплю. Они могут рассеяться как на положительном заряде капли, с максимумом электрической напряженности на ее поверхности, так и на электронах внутри этой "капли". Каждая "капля" имеет радиус $R \sim 10^{-8}$ см.

Расчеты показывают, что средний угол рассеяния альфа-частицы с энергией 5 МэВ на атоме Томсона составит очень малую величину $\sim (0,02 - 0,03)^\circ$.

Если в мишень из 104 слоев атомов Томсона пустить альфа-частицу, то в результате многократных столкновений (в каждом слое она будет испытывать столкновения, равновероятно отклоняющие ее вправо и влево, вверх и вниз), по вылете из мишени альфа-частица "наберет" средний угол \gg угла рассеяния в одном столкновении. Большая часть пучка альфа-частиц будет вылетать под углами $2^\circ - 3^\circ$.

Резерфорд вычислил вероятность рассеяния альфа-частицы в такой среде на угол 180° (то есть учел столь невероятный случай, когда почти при каждом столкновении альфа-частица отклоняется все время в одну сторону). Вероятность такого случая составляет величину $\sim 10^{-3000}$. Таким образом, ожидать хотя бы и редких, но больших углов в мишени Томсона бессмысленно.

Модель Резерфорда. Атом Резерфорда представляет собой малый тяжелый ядро, окруженный облаком электронов. Следует подчеркнуть, что на момент постановки эксперимента постулаты Бора еще не

были сформулированы, поэтому такая модель вызывала определенные сомнения.

Если рассмотреть рассеяние альфа-частицы на атоме Резерфорда, то следует учесть возможность рассеяния как на внешних электронах, так и на ядре. Рассеяние на электронах столь же мало, что и на атоме Томсона, то есть составляет $2^0 - 3^0$ на отдельном атоме. Рассеяние на ядре (если масса ядра \gg массы альфа-частицы) может привести к большим углам, в том числе и 180^0 .

Проследим движение альфа-частицы в мишени из атомов Резерфорда. Поскольку размеры атома составляют величину $\sim 10^{-8}$ см, то мишень из 104 слоев должна быть полностью перекрыта атомами. Однако, поскольку альфа-частица движется с большой скоростью, то она испытывает лишь еле заметные отклонения в электронной оболочке атома. Таким образом, если альфа-частица случайно не натолкнулась на ядро, то она движется также, как и в мишени Томсона, многократно рассеиваясь и набирая средний по вылету из мишени угол рассеяния $2^0 - 3^0$. Однако, в отличие от мишени Томсона, альфа-частица может столкнуться с тяжелым ядром. Такое столкновение значительно менее вероятно, чем столкновение с атомом в целом, потому что ядро (как выяснилось) на 4-5 порядков меньше атома. В то же самое время вероятность столкновения с ядром и отклонение на большой угол значительно больше, чем вероятность отклонения на большой угол в мишени Томсона. Таким образом, все экспериментальные результаты полностью объяснились с позиций модели Резерфорда.

Мы рассмотрели качественно свойства модели Резерфорда, и уже из этого описания видно, что доказательства правильности этой модели не столь просты, как кажется на первый взгляд. Ниже мы весьма кратко обсудим математическую модель рассеяния быстрой альфа-частицы, поскольку эти задачи подробно описываются в ряде книг [1, 2, 3].

Рассеяние на одном центре. Формула Резерфорда. Важным условием проведения эксперимента является требование на толщину L мишени. Мишень должна быть "тонкой". Это означает, что средняя длина свободного пробега λ при рассеянии на ядрах должна удовлетворять требованиям:

$$\lambda \gg L \quad (6)$$

Это условие обеспечивает однократность столкновения альфа-частицы с ядрами мишени (хотя в мишени имеется 104 атомных слоя). Следует подчеркнуть, что величина дифференциального сечения $I(\theta)$, как отмечалось ранее, не зависит от числа рассеивающих центров, поэтому эту величину мы будем рассматривать в случае рассеяния альфа-частицы на одном рассеивающем центре.

Важнейшим элементом в теории рассеяния является выбор потенциала рассеяния $U(r)$. Эта величина является характеристикой свойств вещества мишени и не зависит от условий эксперимента. Резерфорд выбрал кулоновский потенциал, положив $U(r) = Ze/r$. Для простоты в качестве рассеивающего центра мы примем ядро золота, масса которого много больше

массы альфа-частицы, поэтому отдачей ядра можно будет пренебречь.

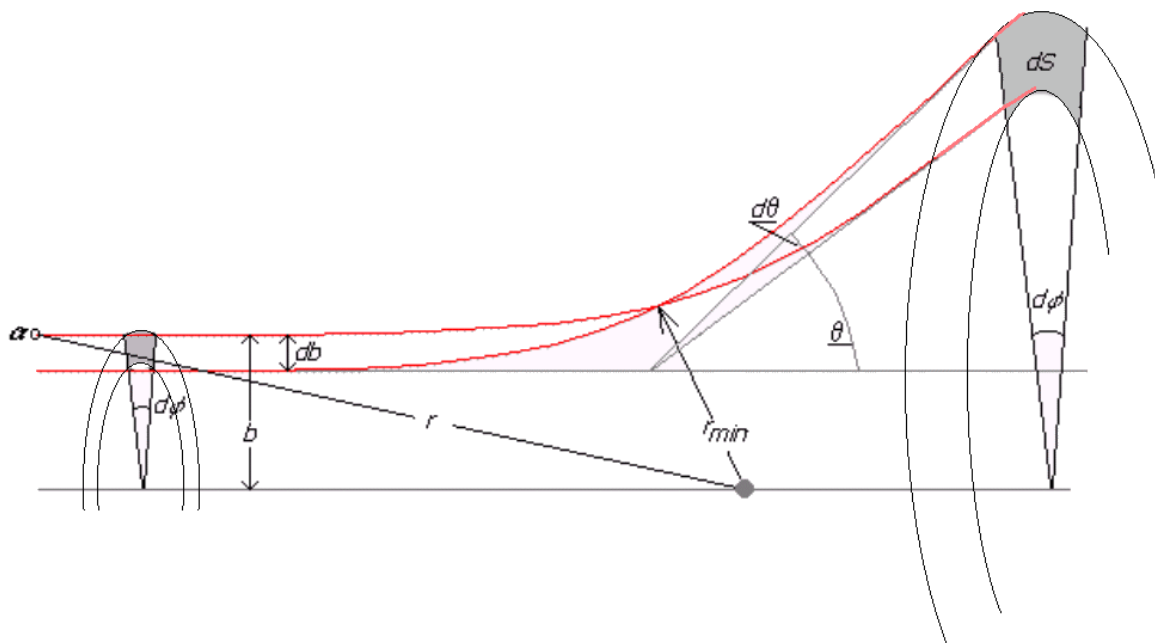


Рис. 2. Схема рассеяния альфа-частицы на ядре.

На рис.2 изображены две близкие траектории альфа-частицы в поле ядра (заряд $+Ze$), находящегося в начале координат. Траектории отличаются значениями прицельного параметра b - расстояния до оси слева на рисунке, соответствующего положению альфа-частицы, когда она находится вдали от ядра. θ - угол рассеяния. Задача имеет цилиндрическую симметрию с азимутальным углом φ .

Расчет траектории движения альфа-частицы в кулоновском поле показывает, что ее траектория - гипербола, при этом прицельный параметр b связан с углом рассеяния θ формулой:

$$b = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E} \right) \operatorname{ctg} \left(\frac{\theta}{2} \right), \quad (7)$$

где $Z_2 e$ - заряд частицы-мишени (неподвижный рассеивающий центр), $Z_1 e$ - заряд альфа-частицы ($Z_1 = 2$), E - энергия альфа-частицы.

Минимальное расстояние при сближении альфа-частицы с рассеивающей частицей (рис.2):

$$r_{\min} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{2E} \left(1 + \operatorname{csc} \frac{\theta}{2} \right) \quad (8)$$

Теперь вернемся к определению дифференциального сечения (3) и преобразуем его к виду рассеяния на одном центре:

$$I(\theta) = \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} = \frac{dA}{j \cdot n \cdot d\Omega} = \frac{dA_1}{j \cdot d\Omega}, \quad (9)$$

где $dA_1 = \frac{dA}{n}$, то есть число рассеянных альфа-частиц в единицу времени на одном центре. Такое представление нам удобно для того, чтобы связать измеренный макроскопический параметр - угол рассеяния θ с микроскопическим (неизмеряемым) параметром - прицельным параметром b .

Нетрудно видеть, что частицы, попавшие в площадку dS , обязательно пройдут через элемент площади $b \cdot db$ кольца, расположенного на расстоянии b от оси, на которой находится рассеивающий центр. Число частиц, прошедших через этот элемент площади в единицу времени, равно

$$dA_1 = j b \cdot db \cdot d\varphi \quad (10)$$

Отсюда

$$I(\theta) = \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dA_1}{j \cdot d\Omega} = \frac{b \cdot db \cdot d\varphi}{d\Omega} \quad (11)$$

Если проинтегрировать по φ от 0 до 2π , то $d\sigma$ будет представлять собой площадь пояса, изображенного слева на рис. 2. Поскольку b - микроскопический, неизмеряемый параметр, воспользуемся формулой (7) и выразим $d\sigma$ через измеряемую величину - угол рассеяния θ . В результате будем иметь:

$$I(\theta) = \frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{Ze^2}{2E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}, \quad (12)$$

где $d\Omega = \frac{dS}{R^2} = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi$, а R - расстояние до площадки dS . Здесь учтено, что $Z_1 = 2$, а $Z_2 = Z$ - атомный номер ядра мишени. Соотношение (12) есть известная формула Резерфорда.

Полученная формула определяет зависимость дифференциального сечения от угла рассеяния. Качественные рассуждения о роли многократных столкновений дают возможность восстановить картину движения альфа-частицы в веществе мишени. Альфа-частица всегда испытывает многократные столкновения, приводящие к разбросу в среднем в $2^\circ - 3^\circ$. В этой области углов рассеяние по Резерфорду практически не дает вклада. Начиная с углов рассеяния в $5^\circ - 6^\circ$, наоборот, резерфордовское рассеяние становится преобладающим. Таким образом, до столкновения с ядром и после столкновения альфа-частица движется практически прямолинейно. Поскольку ядра очень малы, то мишень почти прозрачна для альфа-частиц, которые лишь изредка (и в силу условия $\lambda \gg L$ однократно) сталкиваются с ядрами.

Экспериментальная часть

Учебный лабораторный комплекс «Опыт Резерфорда (УЛК ОР)»

Учебный лабораторный комплекс «Опыт Резерфорда» (УЛК ОР) работает в режиме of-line. Это означает, что комплекс включает в себя обширную базу экспериментальную данных. Аппаратная (приборная) часть комплекса служит для управления **получением** необходимой информации из базы данных в виде спектров рассеяния альфа-частиц. Она выполнена в виде, наиболее приближенном к научно-исследовательской аппаратуре, используемой для управления экспериментом (см. рис. 4). УЛК ОР предоставляет возможность пользователю работать с использованием и без использования компьютера. Программное обеспечение УЛК позволяет контролировать выполнение эксперимента и обрабатывать его результаты.

Базовая установка

Базовая установка представляет собой вакуумированную камеру (камера рассеяния), в которой находится в соответствии со схемой (рис.1) источник альфа-частиц (Pu^{238}), энергетический спектр которого состоит из двух тесно расположенных линий от 5000 до 6000 кэВ (рис.3). Первая по интенсивности составляет $\sim 65\%$, а вторая - 35% . Мишенью служит золотая пленка толщиной ≈ 1 мкм. Подвижный полупроводниковый детектор регистрирует попадающие в него альфа-частицы. Сигналы с детектора через зарядо-чувствительный усилитель попадают либо на пересчетную схему, либо на специальную спектрометрическую плату, вмонтированную в системный блок компьютера. На экран компьютера выводится спектр рассеянных частиц.

Приборная часть УЛК ОР

На рис.4 представлен внешний вид установки. Цифрами на рисунке обозначены: 1) источник альфа-частиц, 2) коллиматор, формирующий пучок альфа-частиц, 3) мишень, 4) подвижный детектор, 5) кнопки управления поворотом детектора, 6) кнопка включения детектора, 7) кнопка установки мишени, 8) кнопка вакуум.

УЛК ОР состоит из прибора и персонального компьютера. Компьютер

управляет прибором, его различными блоками и предлагает пользователю математический инструмент для обработки результатов эксперимента, проведения расчетов и построения таблиц и графиков.

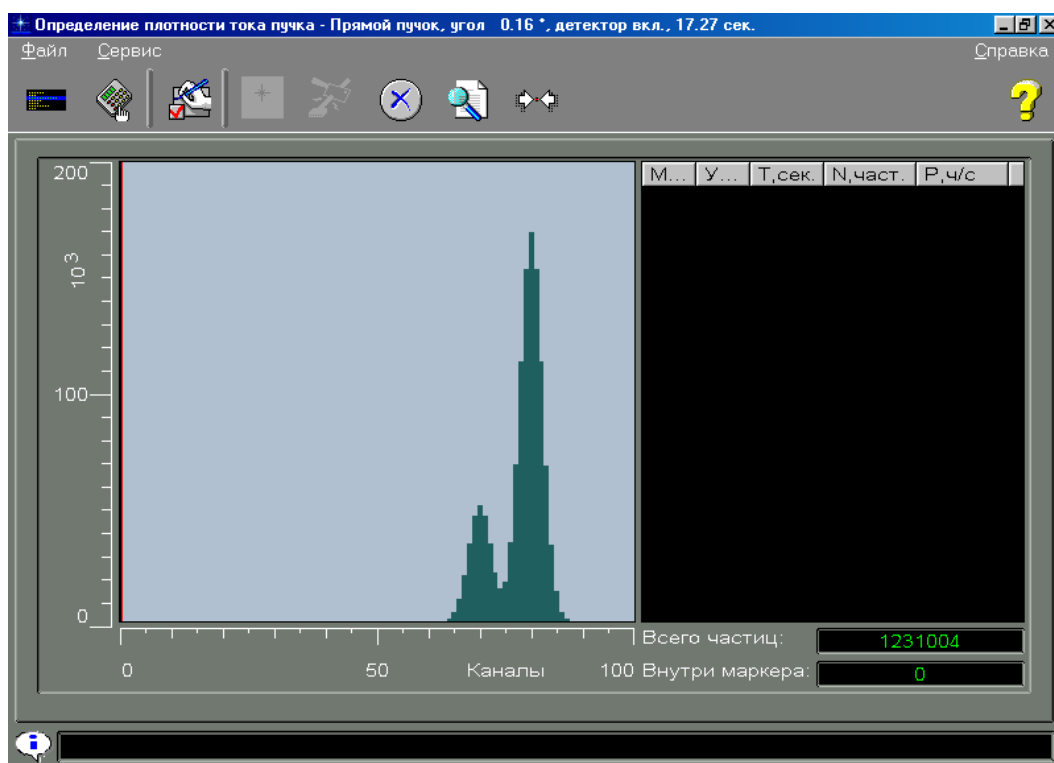


Рис. 3. Спектр альфа-линий (Pu^{238}).



Рис. 4. Внешний вид УЛК «Опыт Резерфорда».

Компьютерно-программная часть

Как указывалось выше, управлять проведением эксперимента возможно при помощи компьютера, который содержит, программу управления экспериментом и обработки результатов эксперимента, а также дополнительную информацию.

Приводим путеводитель по программной части:

<i>Вход (ярлык на рабочем столе или в одной из папок)</i>	<i>Методическое руководство (распечатать?)</i>	<i>Да</i>
		<i>Нет</i>
	<i>Эксперимент</i>	<i>Данные пользователя</i>
	<i>Выход</i>	<i>Схема эксперимента</i>
		<i>Определение плотности потока</i>
		<i>Рассеяние на мишени</i>
		<i>Обработка результатов эксперимента</i>



Следует отметить, что вся программа, каждый ее раздел снабжен контекстно-зависимой справкой, в которой даются подробные пояснения, поэтому, если после прочтения методического описания что-то остается неясным или не запомнится, в "Справке" можно найти необходимые разъяснения.



В нижней части экрана имеется информационная строка, которая постоянно предоставляет краткую информацию на данный момент времени.

Работа начинается с включения компьютера!

Запрещается подключение или отключение соединительных кабелей при включенных в сеть приборе или компьютере!

Запрещается выключать компьютер иначе, чем через пункт «Завершение работы» в меню «Пуск»!

На рабочем столе Windows либо в одной из папок (по указанию пользователя) имеется значок «Опыт Резерфорда» - вход в программу. Войдя в нее, пользователь может попасть в любой пункт, указанный на дереве. Если нас интересует пункт «Эксперимент», наведем на него курсор и нажмем «Enter» или дважды левую клавишу мыши. Откроется программа и появится оглавление, соответствующее содержанию этого пункта.

Описание экрана программы

В верхней части экрана расположена панель инструментов – это значки для выполнения различных действий в данном разделе. Всплывающие окна указывают на функцию значка, которая выполняется при наведении на него курсора и нажатии левой клавиши мыши.

Список значков инструментальной панели

Значок	Пояснения	Значок	Пояснения
	Переход в список разделов.		Записать спектр источника.
	Занести результаты в таблицу		Построение графика.
	Ввести в программу результаты расчетов		Вернуться к проведению эксперимента, очистить результаты расчетов
	Распечатка результатов работы		Вызов контекстно-зависимой справки

Главное меню программы проведения и обработки эксперимента:

1. Схема Опыта Резерфорда.

2. Определение энергии альфа-частиц.
3. Определение плотности потока пучка.
4. Рассеяние на мишени.
5. Обработка экспериментальных данных.
6. Выход.

С левой стороны экрана (в экспериментальных разделах программы) расположена панель, на которой указываются параметры эксперимента, а в информационной строке приведены необходимые действия.

На каждом экране в панели инструментов приводится значок, открывающий таблицы, в которые необходимо внести вычисленные значения. В правой части экрана расположен счётчик частиц. При изменении положения детектора или мишени следует **выключать детектор**.



Полученные результаты кнопкой "В таблицу" вводятся в таблицу экспериментальных результатов.



После проведения расчетов нажатие на кнопку "График" приводит к построению графиков дифференциального сечения.

Эксперимент

Главная задача состоит в определении углового распределения рассеянных альфа-частиц. Из формул (1) и (2) следует, что для измерения дифференциального сечения рассеяния необходимо:

- 1) измерить величины:

dA – число рассеянных частиц, зарегистрированных в единицу времени детектором под углом рассеяния θ ; ($dA=dN/t$ – интенсивность излучения, dN - полное число частиц, попавших в детектор за время t);

j – плотность потока частиц прямого пучка, то есть частиц, зарегистрированных детектором без мишени

$$j = \frac{N}{t \cdot S_m}, \quad (13)$$

где N – число частиц в прямом пучке, S_m – площадь отверстия коллиматора, определяющая сечение пучка, t – время измерения в секундах;

- 2) рассчитать величины:

n - число рассеивающих ядер мишени, находящихся на пути альфа-частиц (формула (4));

$d\Omega$ - элемент телесного угла, занимаемого детектором (формула (5)).

Параметры установки:

1. Источник альфа-частиц: Pu^{238} . Измерению энергии альфа-частиц Pu^{238} посвящено задание 1 данной работы.
2. Мишень: Золотая фольга толщиной $L = 1$ мкм и плотностью $\rho = 19,3$ г/см³. Число Авогадро $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Атомный вес золота $A_{Au} = 197,2$. Заряд ядра золота $Z_{Au} = 79$.
3. Отверстие коллиматора: Диаметр $D_n = 0,4$ см.
4. Детектор: Диаметр $D_d = 0,5$ см.
5. Расстояние от центра мишени до детектора $R = 12$ см.

Время экспозиции

Основная погрешность в данных экспериментах возникает из-за случайного характера распада ядер и возникающего при этом разброса в измерении интенсивности (числа частиц в единицу времени), регистрируемой детектором. Для достижения требуемой статистической точности необходимо выбрать такое время набора (время эксперимента), при котором выполнялась бы заданная экспериментатором точность (относительная ошибка составляла бы заданный процент точности, указанный в задании).

$$\delta I = \frac{dI(\theta)}{I(\theta)} = \frac{1}{\sqrt{dA \cdot t}} = \frac{1}{\sqrt{dN}}, \quad (14)$$

где δI - относительная статистическая ошибка дифференциального сечения $I(\theta)$, $dI(\theta)$ – абсолютная ошибка, dA - интенсивность рассеянных под углом θ альфа-частиц, t - время экспозиции. Таким образом, с ростом t ошибка уменьшается и, следовательно, при увеличении угла θ следует увеличивать и время t , если экспериментатор стремится не изменять ошибку с изменением угла рассеяния.

Порядок выполнения лабораторной работы

До включения компьютера проверить, соединены ли интерфейсные разъемы компьютера и установки!

Работа начинается с включения компьютера!

Запрещается подключение или отключение соединительных кабелей при включенных в сеть приборе или компьютере!




Запрещается выключать компьютер иначе, чем через пункт «Завершение работы» в меню «Пуск»!

Задание 1. Определение энергии альфа-частиц, испускаемых

Указания!





- 1) Расчеты по п.5 задания 1, п.7 задания 3, а также расчет числа n рассеивающих центров из п. 2 задания 4 необходимо провести заранее (дома).**

- 2) Формула (12) представлена в системе СГСЭ.**

1. Включите компьютер. Включите «сеть» установки **УЛК ОР**, нажав на красную кнопку (см. рисунок 4). Найдите на рабочем столе папку "Опыт Резерфорда" и откройте ее.
2. Откройте значок «Эксперимент» и впишите свои данные в окно запроса.
3. Войдите в меню  и выберите пункт «Схема опыта Резерфорда».
4. Ознакомьтесь со схемой эксперимента и геометрией проведения опыта Резерфорда.
5. Используя формулу (5) и параметры установки (см. с. 15) рассчитайте элемент телесного угла $d\Omega$, внутри которого детектор регистрирует рассеянные альфа-частицы.
6. Нажав кнопку «Расчет»  введите в программу полученное значение $d\Omega$.
7. Войдите в «Меню»  и выберите пункт «Определение энергии альфа-частиц».
8. Нажмите кнопку «Загрузить». На экране появится эталонный спектр из 4 линий. В этом спектре самый маленький пик (слева) не используется. На экране приводятся энергии двух линий (это линии Pu^{239} и Cm^{244}). Третий пик – это интересующая нас линия Pu^{238} . Необходимо определить положение всех трех линий в каналах.
9. Установите при помощи мыши маркер в окне со спектром на альфа-линию Pu^{239} , имеющую энергию 5165 кэВ (это самая высокая линия в спектре). Нажмите соответствующую кнопку «>» для запоминания номера канала, соответствующего данной линии.

10. Установите при помощи мыши маркер в окне со спектром на альфа-линию Sm^{244} , имеющую энергию 5790 кэВ (это крайняя правая линия). Нажмите соответствующую кнопку «>» для запоминания номера канала, соответствующего данной линии.
11. Установите при помощи мыши маркер в окне со спектром на альфа-линию Pu^{238} (это вторая справа линия, энергию которой надо определить). Нажмите соответствующую кнопку «>» для запоминания номера канала, соответствующего данной линии.
12. Рассчитайте значение энергии альфа-линии Pu^{238} по двум опорным точкам, используя линейное приближение (графически либо аналитически). (То есть считаем, что зависимость энергии спектральной линии от номера канала зависит линейно). Проведенные расчеты приложите к отчету по выполнению лабораторной работы.
13. Нажмите кнопку «Ввести» и введите в открывшемся окне найденное значение энергии. Нажмите кнопку «Ок». Теперь можно переходить к выполнению эксперимента.

Задание 2. Определение плотности потока пучка

1. Войдите в «Меню»  и выберите пункт «Определение плотности потока пучка»
2. Отключите кнопку «Вакуум» установки УЛК ОР.
3. Убедитесь, что детектор выключен. (**Изменять положение детектора и мишени можно только при выключенном детекторе!**)
4. Кнопкой «Мишень» установите мишень в положение «Мишени нет».
5. Кнопками «Поворот детектора» установите детектор в положение, близкое к нулевому (то есть менее 1 градуса).
6. Включите детектор.
7. Убедитесь, что кнопка «Регистрация»  в панели инструментов стала активной.
8. Нажмите кнопку «Регистрация»  и укажите время экспозиции ($t = 10$ с).
9. Измерьте число частиц N прямого потока за указанное время. Во время подсчета частиц можно остановить подсчет кнопкой «Стоп» и возобновить его кнопкой «Регистрация».
10. Вычислите плотность потока пучка j (формула 13). Проведенные расчеты приложите к отчету по выполнению лабораторной работы.
11. Нажмите кнопку «Расчет»  и введите рассчитанное значение плотности потока пучка j и ее относительную погрешность в появившемся окне (ввести 0,4%). Нажмите кнопку «Ок».

Задание 3. Рассеяние на мишени






1. Войдите в «Меню»  и выберите пункт «Рассеяние на мишени».
2. Убедитесь, что детектор выключен. (**Изменять положение детектора и мишени можно только при выключенном детекторе!**)
3. Кнопкой «Мишень» установите мишень под пучок.
4. Установите детектор на угол не менее 10^0 .
5. Включите детектор.
6. Убедитесь, что кнопка «Регистрация»  в панели инструментов стала активной.
7. Проведите измерение числа рассеянных частиц dN с учетом 10% точности ($\delta I = 10\%$). Для этого по формуле (14) предварительно вычислите полное число частиц dN , попадающих в детектор за время t . Так как, исходя из формулы (14), dN изменяться в опыте не будет, измерение рассеянных частиц будет сводиться к фиксации промежутка времени t , за которое в детектор попадет число частиц dN .
8. Нажмите кнопку «Регистрация»  и укажите время экспозиции «неограниченное». Кнопку «Стоп» необходимо нажать в тот момент, когда зарегистрируется dN частиц.
9. Внесите соответствующей кнопкой  полученные результаты в таблицу, а также в таблицу 1 отчета по выполнению лабораторной работы.
10. Кнопкой «Возврат»  вернитесь к исходному состоянию рассеяния частиц.
11. Повторите пп. 2-10 для углов рассеяния $\theta = 20^0, 30^0$ и 40^0 .

Таблица 1

Угол, градусы	t, с	dN	Эксп. значение диф. сечения $I_d, \times 10^{-23} \text{ см}^2$	Абс. погреш- ность $\Delta I, \times 10^{-23} \text{ см}^2$	Теор. значение диф. сечения $I_T, \times 10^{-23} \text{ см}^2$
10					
20					
30					
40					

Задание 4. Обработка экспериментальных результатов



1. Войдите в «Меню» и выберите пункт «Обработка экспериментальных результатов».
2. Выделите строку в таблице экспериментальных результатов и рассчитайте для нее экспериментальное и теоретическое значения дифференциального сечения рассеяния, а также погрешность (абсолютную) экспериментального расчета.

Формула расчета экспериментального значения дифференциального сечения (15):

$$I(\theta) = \frac{dN}{j \cdot n \cdot t \cdot d\Omega}, \quad (15)$$

где j – плотность потока пучка,

n – число рассеивающих центров, то есть число частиц, находящихся в объеме мишени: $n = n_0 \cdot L \cdot S_m$;

n_0 – концентрация атомов мишени ($n_0 = 5 \cdot 10^{22} \text{ 1/см}^2$),

L – толщина фольги ($L = 1 \text{ мкм}$),

S_m – площадь отверстия коллиматора (диаметр отверстия коллиматора ($D_n = 0,4 \text{ см}$)).

Формула расчета теоретического значения дифференциального сечения (см. формулу 12):

$$I(\theta) = \left(\frac{Ze^2}{2E} \right)^2 \frac{1}{\sin^4 \frac{\theta}{2}},$$

где Z – атомный номер ядра мишени ($Z = 79$),

e – заряд электрона,

E – энергия альфа-частицы.

Замечание! Формула расчета теоретического значения дифференциального сечения представлена в системе СГСЭ.





Таблица перевода единиц СИ в единицы СГСЭ

Величина	СИ	СГСЭ
Энергия	1 Дж	1 эрг
Электрический заряд	1 Кл	1 заряд СГСЭ
1 Кл = $3 \cdot 10^9$ заряд СГСЭ		

$1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$

Погрешность (абсолютную) экспериментального расчета (ввести значение погрешности – 10% от измеренного значения).

Все рассчитанные данные поместите также в таблицу 1 отчета по выполнению лабораторной работы.

3. Нажмите кнопку «Расчет»  и в открывшемся диалоговом окне введите рассчитанные значения. Расчет необходимо произвести для двух строчек таблицы, после чего значения для остальных строк будут рассчитаны программой. Для того чтобы очистить таблицу необходимо нажать кнопку «Возврат»  .
4. Нажмите кнопку «График»  . Вместо таблицы будут изображены графики зависимости дифференциального сечения от угла рассеяния (линией изображены значения, полученные по формуле Резерфорда, крестиками - экспериментальные значения с указанием погрешностей). Для возврата к таблице нажмите кнопку «Таблица»  .
5. Таблицу полученных расчетных значений и график распечатайте и приложите к отчету по выполнению лабораторной работы.
6. Выключите установку **УЛК ОР** и компьютер.

Контрольные вопросы

1. Первая модель атома (модель Томсона) и ее недостатки.
2. Опыт Резерфорда. Ядерная (планетарная) модель атома и ее недостатки.
3. Постулаты Бора. Теория атома водорода по Бору: а) получить формулу радиуса стационарных орбит; б) получить формулы для кинетической, потенциальной и полной энергии электрона на стационарных орбитах; в) получите обобщенную формулу Бальмера и постоянную Ридберга.
4. Опыты Франка и Герца.
5. Корпускулярно-волновой дуализм свойств вещества. Гипотеза де Бройля.
6. Соотношения неопределенностей.

7. Волновая функция и ее статистический смысл. Вероятность нахождения микрочастицы. Нормировка волновой функции.
8. Уравнение Шредингера. Уравнение Шредингера для стационарных состояний.
9. Уравнение Шредингера для атома водорода. Квантовые числа.
10. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спиновое квантовое число.
11. Основное (1S) состояние атома водорода: уравнение Шредингера и его решение, анализ полученных результатов.
12. Влияние магнитного поля на спектры излучения атомов. Гиромагнитное отношение. Магнетон Бора.
13. Распределение электронов в сложных атомах. Принцип Паули.
14. Периодическая система элементов Д.И.Менделеева.
15. Рентгеновские спектры: тормозное и характеристическое излучение, закон Мозли.