

КАФЕДРА ФИЗИКИ

Физический практикум 5-го семестра

53
Л12

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

Работа поставлена Б. Пименовым

Описание составлено: И. Е. Иродовым

Редактор: М. К. Романовский

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ОПЫТ РЕЗЕРФОРДА

- Цель работы: 1. Исследовать экспериментально рассеяние альфа-частиц металлической фольгой.
2. Убедиться в справедливости формулы Резерфорда.

Введение

Опыты по рассеянию альфа-частиц привели Резерфорда к выводу о ядерном строении атомов. Наблюдавшиеся в этих опытах отклонения альфа-частиц на углы, достигающие в некоторых случаях почти до 180° возможных, как указал Резерфорд, только в том случае, если внутри атома имеется чрезвычайно сильное электрическое поле, которое создается положительным зарядом, связанным с большой массой и сконцентрированным в очень малом объеме /то есть создается ядром атома/.

Исходя из представления о кулоновском взаимодействии альфа-частиц с ядрами атомов, Резерфорд развил теорию рассеяния альфа-частиц, которая приводит к выражению, известному как "формула Резерфорда".

Формула Резерфорда относится к случаю рассеяния тонким слоем вещества узкого параллельного пучка альфа-частиц.

К этой формуле можно прийти следующим образом. Решение задачи о кулоновском взаимодействии налетающей альфа-частицы с неподвижным ядром тяжелого атома дает определенную зависимость между углом отклонения альфа-частицы θ и так называемым "прицельным параметром" ρ /при неизменности других параметров/:

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \left(\frac{2Ze^2}{mv^2} \right) \frac{1}{\rho}.$$

Смысл величин, входящих в эту формулу поясняет рис. I.

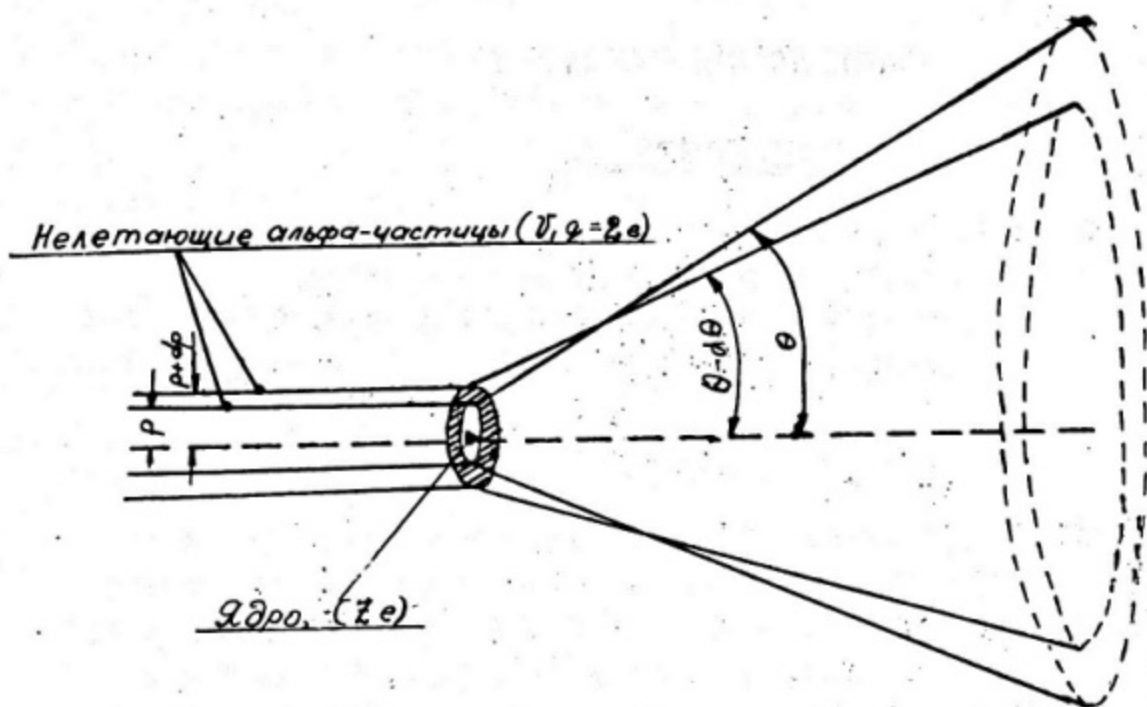


Рис. I. Схема рассеяния альфа-частиц.

Эта формула, однако, не может быть проверена экспериментально из-за наличия в ней недоступного измерения параметра R .

Резерфорд с целью обойти указанную трудность положил эту формулу в основу, созданной им статистической теории рассеяния альфа-частиц, содержание которой вкратце таково. Очевидно, что альфа-частицы, имеющие одинаковые прицельные параметры, отклонятся на один и тот же угол, образуя конусы рассеянных альфа-частиц, как показано схематично на рис. I.

Из этого рисунка видно, что альфа-частицы, имеющие прицельные параметры в интервале от R до $R + dp$, рассеются после взаимодействия с ядром в телесный угол $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$, образуемый двумя коаксиальными конусами.

Число альфа-частиц, рассеянных в указанный телесный угол, очевидно, прямо пропорционально плотности потока налетающих частиц $I \frac{1}{\text{см}^2 \text{сек}}$ / площади "кольца" $2\pi R dp$ и числу таких колец, то есть числу рассеивающих ядер, приходящихся на 1 см^2 поверхности рассеивающего вещества $(n \frac{1}{\text{см}^2})$:

$$dN = N \cdot n 2\pi R dp.$$

Подстановка в эту формулу вместо pdp соответствующего выражения, найденного из формулы /1/, приводит к окончательной формуле Резерфорда:

$$dN = N \cdot n \left(\frac{Ze^2}{mv^2} \right)^2 \frac{d\Omega}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad /2/$$

Из нее видно, что при сохранении величин $N, n, v, d\Omega$ неизменными имеет место постоянство следующего произведения:

$$dN \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2} = \text{Const.} \quad /3/$$

Это последнее выражение и служит для экспериментальной проверки формулы Резерфорда, а вместе с тем и тех гипотез, которые были положены в основу ее вывода.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Принципиальная схема установки показана на рис.2. В центре металлической цилиндрической коробки /А/, откачиваемой форвакуумным насосом до давления порядка 10^{-2} мм рт.ст., находится рассеивающее вещество в виде очень тонкой фольги /В/. Радиоактивное вещество, испускающее альфа-частицы, расположено в специальной оболочке /С/, чем обеспечивается создание узкого пучка частиц, падающих на мишень /В/. Альфа-частицы, рассеянные на тот или иной угол регистрируются прибором /Д./ — сцинтилляционным счетчиком.

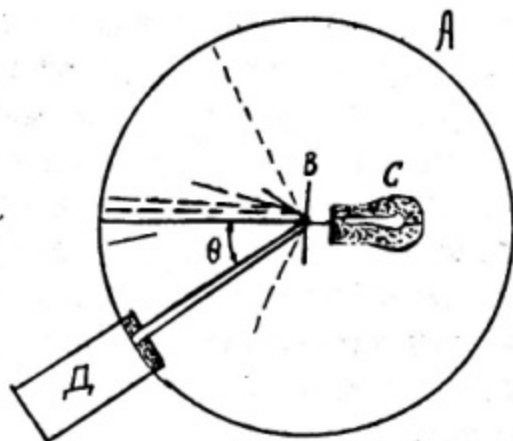


Рис.2. Принципиальная схема установки для излучения рассеяния частиц.

Угол рассеяния, при котором ведутся измерения, можно менять или поворотом коробки /А/ - в одном варианте установки, или поворотом фольги /В/ и излучателя /С/, смонтированных жестко относительно друг друга - в другом варианте установки.

РЕГИСТРИРУЮЩАЯ СХЕМА СО СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ СЧЕТЧИКОМ

Регистрирующая схема состоит из полупрозрачного сцинтиллирующего экрана и фотоумножителя:

Сцинтилляторами называются вещества, способные давать световые вспышки при поглощении быстрых частиц или γ -квантов. В классической работе Резерфорда подсчет сцинтилляций велся визуально через микроскоп. В настоящее время для подсчета сцинтилляций используют фотоумножители и электронные пересчетные устройства.

Фотоэлектронный умножитель представляет собой комбинацию фотоэлемента с прозрачными или полупрозрачными фотокатодом и электронного умножителя, основанного на использовании вторичной электронной эмиссии /динатронного эффекта/. Под действием фотона от сцинтиллятора с катода фотоэлектронного умножителя /ФЭУ/ вырываются фотоэлектроны. Эти первичные электроны ускоряются электрическим полем и попадают на первый динатронный электрод умножителя. Материал электрода, величина и форма электрического поля подбираются так, чтобы каждый электрон выбил больше одного вторичного электрона. Пучок вторичных электронов направляется на следующий электрод /количество выбитых из него электронов снова больше числа попавших/ и т.д. Полное число электронов в пучке быстро растет, так что на анод ФЭУ приходит до $10^7 + 10^8$ электронов на каждый первичный фотоэлектрон. В настоящее время ФЭУ применяются очень широко во всех областях, связанных с регистрацией или измерением радиоактивных излучений /см. рис. 3/.

Усиленные ФЭУ импульсы поступают на пересчетное устройство ПС-64, представляющее собой ламповую схему, способную кратно двум уменьшать частоту следования импульсов. Такое уменьшение частоты поступления импульсов /скорости счета/ необходимо для того, чтобы электромеханический счетчик, могущий считать не более 100 импульсов в секунду, успевал сосчитать все, поступающие от сцинтиллятора, импульсы.

Измерения и расчеты

Для проверки формулы Резерфорда необходимо экспериментально снять зависимость $\Delta N = f(\nu)$ и затем, как было сказано выше, проверить постоянство произведения:

$$\Delta N = \sin^4 \frac{\nu}{2}.$$

Постановка задачи по существу простая, однако ее решение усложняется прежде всего двумя обстоятельствами, которые необходимо учесть для получения верного результата.

Во-первых, изучаемый эффект рассеяния α -частиц искажается наличием фона частиц, который обусловлен в основном загрязнением камеры радиоактивным веществом. Если через $\Delta N_{\tau}^{\text{эф}+\varphi}$ обозначим суммарное число α -частиц, попадающих в счетчик за время τ при определенном положении, а через $\Delta N_{\tau}^{\varphi}$ - число частиц, образующих фон за то же время τ , то, очевидно, искомый эффект будет

$$\Delta N_{\tau}^{\text{эф}} = \Delta N_{\tau}^{\text{эф}+\varphi} - \Delta N_{\tau}^{\varphi}.$$

Во-вторых, величины $\Delta N_{\tau}^{\text{эф}}$, $\Delta N_{\tau}^{\text{эф}+\varphi}$ и $\Delta N_{\tau}^{\varphi}$ не постоянны при заданных условиях, а испытывают некоторые флуктуации, обусловленные природой радиоактивного распада, протекающего по законам случая. Теория показывает, что квадратичная ошибка отдельного измерения равна:

$$\delta(\Delta N)_i = +\sqrt{\Delta N} \approx \pm \sqrt{\Delta N}$$

при достаточно больших ΔN . Отсюда легко подсчитать.

Каково должно быть ΔN , чтобы его относительная погрешность равнялась заданной величине.

Имея в виду сказанное, в данном опыте необходимо сначала проверить суммарный эффект $N_{\tau}^{\text{эф}+\varphi}$ с точностью не ниже 10% и затем фон $N_{\tau_2}^{\varphi}$ с точностью не ниже 20%.

Измерения провести для углов, начиная с $\vartheta \approx 15^\circ$ и далее, например, через 3 градуса до $\vartheta_2 = 30^\circ$. При меньших углах будет сильно сказываться на результате неточность в определении ϑ / в опыте следует ожидать систематической ошибки порядка 1 градуса/. При больших же углах изучаемый эффект станет сравнимым и даже меньшим величине фона, что требует очень большого времени для его определения с той же степенью точности /уже для случая $\Delta N^{\text{эф}} = \Delta N^{\varphi}$ необходимо зарегистрировать $\Delta N^{\text{эф}+\varphi} = 6 N^{\text{эф}}$ частиц, чтобы получить ту же точность $\frac{\delta \Delta N^{\text{эф}}}{\Delta N^{\text{эф}}} = \frac{1}{\sqrt{\Delta N^{\text{эф}}}}$.

Результаты измерений внести в следующую таблицу:

ϑ_i°	$\sin 4 \frac{\vartheta}{2}$	$\frac{\Delta N_{\tau}^{\text{эф}+\varphi}}{\tau (\text{сек})}$	$\Delta N^{\text{эф}+\varphi} (\text{сек}^{-1})$	$\frac{\Delta N_{\tau_2}^{\varphi}}{\tau_2 (\text{сек})}$	$\Delta N^{\varphi} (\text{сек}^{-1})$	$\Delta N^{\text{эф}} (\text{сек}^{-1})$	$\Delta N^{\text{эф}} \cdot \sin 4 \frac{\vartheta}{2}$
---------------------	------------------------------	---	--	---	--	--	---

Например:

18°	0,0006	$\frac{1026}{15}$	68,4	$\frac{103}{40}$	2,6	65,8	0,0395
------------	--------	-------------------	------	------------------	-----	------	--------

По данным таблицы построить график

$$\Delta N^{\text{эф}} = f(\vartheta),$$

в интервале исследуемых углов. Экстраполяцию в сторону меньших и больших углов провести пунктирной линией.

Порядок работы

I. Ознакомиться с назначением частей установки.

в частности, с расположением деталей внутри откачиваемой камеры.

2. Освоить включение и управление пересчетным устройством ПС-64 и высоковольтным выпрямителем /см. ниже инструкцию/. С выпрямителем ВСЭ-2000 можно работать лишь при закрытой камере, чтобы на фотоумножитель не попадал свет. Подача высокого напряжения на освещенный фотоумножитель, как правило выводит его из строя.

3. Включить форвакуумный насос и откачать камеру до возможно лучшего вакуума.

4. Проверить исправность установки для чего: включить пересчет на 64, выключить электромеханический счетчик, включить и установить нужное высокое напряжение и, медленно вращая источник /в другом варианте - камеру/, убедиться, что при направлении пучка α -частиц прямо на экран идет очень много импульсов /горят все лампочки на ПС-64/, а по мере поворота, импульсов становится все меньше /лампочки мигают реже и реже/.

5. Провести измерения.

6. Измерить фон, для чего: выключить ВСЭ-2500, закрыть вакуумный кран, медленно напустить в камеру воздух, вскрыть камеру, закрыть источник колпачком, закрыть камеру, перекрыть напускной кран, начать откачивать систему. ВСЭ можно включать при любом давлении, но закрытой камере.

7. Произвести расчеты.

Инструкция пользования ВСЭ-2500

а/ Ручку регулятора вывести влево до упора;

б/ включить тумблер "ВКЛ" и дать прогреться лампам схемы /2 - 3 минуты/;

в/ медленно вращая ручку регулятора, установить нужное напряжение и подождать 3-5 минут установления равновесия во всех высоковольтных цепях. Вести измерения с ФЭУ ранее, чем через 5 минут после установления /по шкале ВСЭ/ нужного напряжения не следует, так как не все детали успевают прогреться и имеются утечки, дающие ложные импульсы на ФЭУ.

Напряжение узнать у лаборанта, так как для разных ФЭУ оно различно от ~ 800 до ~ 1300 В.

Инструкция пользования пересчетным устройством ПС-64

1. Поставить тумблер "пуск" в положение "выкл."
2. Выключить тумблер "сеть" и дать прогреться схеме 1-2 мин.
3. Установить максимальную кратность счета /х64/.
4. Нажать кнопку "сброс" и отпустить ее. Должны гореть все неоновые лампочки только в нижнем ряду.
5. Тумблером "проверка работа" можно подать на вход ПС-64 импульсы переменного тока сети /50 Гц / положение "проверка" или импульсы с ФЭУ /положение "работа"/.
6. Включение схемы для измерения производить тумблером "пуск" /а не электромеханического счетчика/.
7. При работе не включать одновременно 2 разных кратности счета. Это сбивает счет и портит установку.

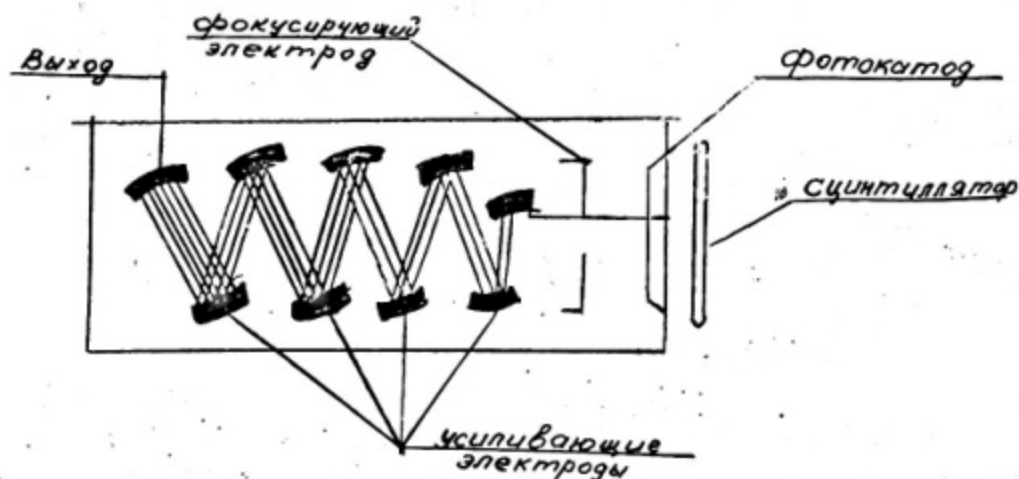


Рис.3.

Технические данные пересчетной схемы

1. ПС-64 способен разделять импульсы через 50 мксек. при среднем количестве до 6400 импульсов в секунду.

2. ПС-64 срабатывает от подаваемых на его вход положительных импульсов с амплитудой от 2 до 100 вольт и длительностью от 10 мксек.

3. ПС-64 состоит из блока, формирующего импульсы /положительный прямоугольный импульс/. 6 пересчетных ячеек /триггеров/ и выходного усилительного каскада, питающего электромеханический счетчик.

Контрольные вопросы

1. Дать подробный вывод формулы Резерфорда на основании формулы /1/.
2. Какие выводы можно сделать из постоянства произведения /3/?
3. В каких случаях и почему наблюдаются отступления от формулы Резерфорда?
4. Почему для данного опыта необходимо брать рассеивающее вещество в виде очень тонкого слоя?
5. Чему равно эффективное сечение ядра урана для альфа-частиц с кинетической энергией в 5 Mev?
/Ответ дать в барнах, 1 барн = 10^{-24} см²/.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шисольский, Атомная физика, том I, гл. "Ядерное строение атома".
2. Семах, Введение в атомную физику.
3. С.Ю. Лукьянов, Фотоэлементы.