

**КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ**

Е.Н. ДУЛОВ, Р.Р. ГАЙНОВ, Н.Г. ИВОЙЛОВ

ПРОХОЖДЕНИЕ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО

Казань

2013

УДК 539.164

Печатается по решению
Редакционно-издательского совета
ФГАУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»
Учебно-методической комиссии Института физики
Протокол №4 от 17 июня 2013 г.
Заседания кафедры физики твёрдого тела
Протокол №16 от 7 июня 2013 г.

Авторы:

канд. физ.-мат. наук, асс. Дулов Е.Н.
канд. физ.-мат. наук, асс. Гайнов Р.Р.
канд. физ.-мат. наук, доцент Ивойлов Н.Г.

Рецензент:

к.ф.-м.н., с.н.с КИББ КазНЦ РАН Манапов Р.А.

ПРОХОЖДЕНИЕ АЛЬФА-ИЗЛУЧЕНИЯ ЧЕРЕЗ ВЕЩЕСТВО. Учебно-методическое пособие / Е.Н. Дулов, Р.Р. Гайнов, Н.Г. Ивойлов // Казань: Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2013. – 15 с.

Аннотация

Учебно-методическое пособие предназначено для студентов института физики дневного и вечернего отделений, приступивших к изучению курсов «Ядерная физика», «Физика атомного ядра и частиц», «Физика атомов, атомных явлений, атомного ядра и частиц». Задачей настоящей лабораторной работы, предназначенной для общего физического практикума по ядерной физике, является знакомство с закономерностями взаимодействия заряженных частиц с веществом.

© Казанский федеральный университет, 2013
© Е.Н. Дулов, Р.Р. Гайнов, Н.Г. Ивойлов, 2013

Введение	3
1. Потери энергии альфа-частиц	3
2. Схема экспериментальной установки	9
3. Порядок выполнения работы.....	10
4. Анализ и представление результатов.....	12
5. Вопросы для самоподготовки.....	13
Справочные и дополнительные материалы.....	14
Литература.....	15

Введение

Цель настоящей работы - знакомство с механизмом потерь энергии альфа-частиц, основными закономерностями и теорией Бора, описывающей потери энергии нерелятивистских заряженных частиц в веществе. Практическая часть работы содержит эксперимент по прохождению альфа-частиц препарата ^{241}Am в воздухе и в алюминии, проверяется согласие эксперимента и теории.

Предполагается знакомство с техникой альфа-спектроскопии.

1. Потери энергии альфа-частиц

Альфа-частицы, ядра атомов гелия-4, несут двойной положительный элементарный заряд и имеют массу, примерно на 4 порядка превосходящую массу электрона. Взаимодействие альфа частиц с веществом приводит к образованию большого числа ионизованных атомов. Так, 5 МэВ частица производит в воздухе при нормальных условиях около 1.4×10^5 пар ион-электрон. Это значение соответствует средней энергии образования пары 34 эВ для воздуха при нормальных условиях, в точности такой же, как и в случае ионизации электронами.

Благодаря сравнительно высокой ионизирующей способности, треки альфа-частиц легко наблюдаются в камере Вильсона (см. приложение 1).

Взаимодействие с веществом подавляющим образом происходит за счёт кулоновских сил. При этом альфа-частица может взаимодействовать как с электронами, так и с ядрами. Из-за значительно большей массы, при взаимодействии с единичным электроном альфа-частица практически не изменяет направление своего движения, а также теряет малую часть энергии. Образно, но грубо, торможение альфа-частиц электронами можно сравнить с торможением пушечного ядра большим количеством теннисных шаров. Потребуется огромное количество столкновений, пока пушечное ядро потеряет свой импульс и остановится. Взаимодействие с ядрами напротив, может значительно изменить траекторию альфа-частиц. Однако, из-за малых размеров ядер и самой альфа-частицы это сравнительно редкий процесс, как можно видеть из фотографий треков альфа-частиц, а также из экспериментов по наблюдению Резерфордского рассеяния.

Кроме ионизации атомов, альфа-частицы могут также переводить их в возбужденное состояние, и, таким образом, также терять свою энергию. Для некоторых поглотителей возбуждённые атомы могут сразу переходить в основное состояние с выделением энергии в виде фотонов видимого диапазона. Этот эффект, флуоресценция под действием

ионизирующих частиц или сцинтилляции, впервые наблюдался Вильямом Круксом в 1903 году на соединении ZnS под действием альфа-частиц радия-226. Он лёг в основу устройства, названного сцинтиллятором Крукса (см. приложение 1), наглядно демонстрирующим явление радиоактивности, а также многократно использовался впоследствии для регистрации альфа частиц, в том числе в историческом опыте по рассеянию Резерфорда.

Альфа-частицы имеют сравнительно небольшие пробеги даже в воздухе при нормальных условиях. Так, альфа-частицы с энергией 5.5 МэВ от америция-241, используемого в настоящей работе, проходят в сухом воздухе при н.у. около 4 см. Существует множество эмпирических соотношений, связывающих пробег R альфа-частицы в воздухе и её энергию T , среди которых следует отметить упрощённый вариант Феникса и Хаймана (1969) для наиболее часто встречающихся энергий 4-7 МэВ альфа-частиц, испущенных естественными радиоактивными изотопами:

$$R[cm] = 0.318T^{3/2}[MeV]. \quad (1)$$

Типичный пробег альфа-частиц в воздухе показан на рис.1. На этом графике нет резкого скачка, как можно было подумать из формулы (1). Плавное уменьшение числа частиц с увеличением их пробега возникает из-за случайного характера взаимодействий, а так же из-за того, что альфа-частица способна подхватывать электроны и пребывать часть времени в однозарядном или нейтральном состоянии. Эти факторы приводят к вероятностному закону для длины пробега, который хорошо описывается нормальным распределением.

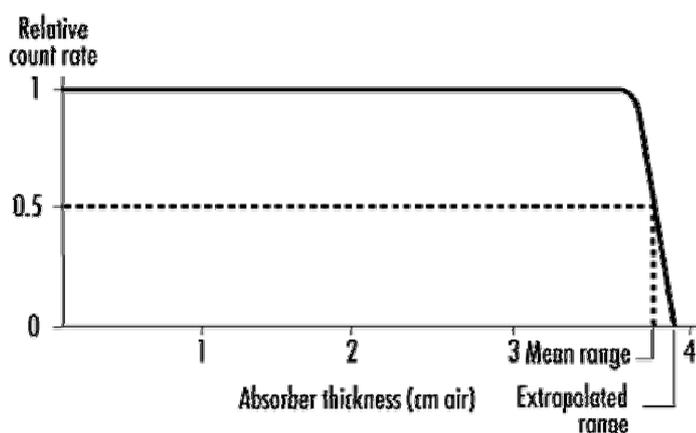


Рисунок 1. Прохождение альфа-частиц через вещество.

Впервые полуклассическая модель потерь энергии альфа-частиц в веществе была предложена Бором. Эта модель в дальнейшем легла в основу расчётов потерь энергии на единицу длины пути всех заряженных частиц в веществе, в том числе электронов (формула Бете, выводится с помощью нестационарной теории возмущений Ферми).

В боровской модели вначале вводится несколько приближений и решается следующая упрощённая задача. Нерелятивистская альфа-частица пролетает около свободного электрона таким образом, что минимальное сближение между ними составляет b . Это минимальное расстояние называется прицельным расстоянием или прицельным параметром. Поскольку масса альфа частицы много больше массы электрона, полагается, что альфа-частица не испытывает заметного изменения модуля и направления вектора скорости, т.е. движение альфа-частицы считается приближённо эквивалентным движению свободной частицы. Полагается также, что в течение времени, когда происходит передача энергии от альфа-частицы электрону, последний не успевает сместиться на сколько-нибудь заметное расстояние, т.е. пренебрегают движением электрона во время взаимодействия. Сам процесс взаимодействия показан схематично на рис.2. Результат взаимодействия можно найти, пользуясь вторым законом Ньютона в дифференциальной форме:

$$\begin{aligned}\vec{f} &= ma = m \frac{d\vec{v}}{dt}, \\ \vec{f}dt &= m d\vec{v} = d(m\vec{v}) = d\vec{p},\end{aligned}\tag{2}$$

где m - масса электрона, v - его скорость (до взаимодействия нулевая), p - импульс.

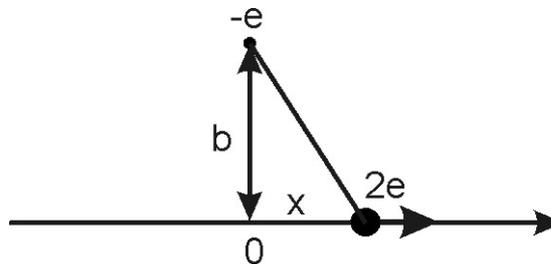


Рисунок 2. Передача свободному электрону энергии.

При этом суммарный импульс, переданный электрону:

$$\vec{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f}_x dt + \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f}_y dt.\tag{3}$$

Положим, что момент времени $t = 0$ соответствует $x = 0$. Рассматривая симметричные относительно $x = 0$ положения альфа-частицы, можно сделать вывод, что соответствующие им x -компоненты импульса компенсируются, а значит результирующий импульс, который получит электрон, будет направлен по оси y , или перпендикулярно траектории альфа-частицы:

$$\vec{p} = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f}_y dt = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f}_y \frac{dt}{dx} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \vec{f}_y \frac{1}{u} dx,\tag{4}$$

где u - скорость альфа-частицы.

Взаимодействие при этом будет походить на удар ракеткой по теннисному мячу. Наиболее эффективно передача импульса будет происходить с характерным временем взаимодействия порядка b/u , в течение которого альфа-частица и электрон максимально сближены, и силой порядка $k2e^2/b^2$, где $k=1/4\pi\epsilon_0$. Это простое рассуждение позволяет оценить порядок величины передаваемого электрону импульса, как $k2e^2/(ub)$, без вычисления интеграла (4).

Преобразуя (4) следующим образом:

$$p_y = \int_{-\infty}^{+\infty} k \frac{2e^2}{x^2 + b^2} \frac{b}{\sqrt{x^2 + b^2}} \frac{1}{u} dx = k \frac{2e^2}{ub} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(1 + (x/b)^2)^{3/2}} d\left(\frac{x}{b}\right) = k \frac{2e^2}{ub} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(1 + \tau^2)^{3/2}} d\tau, \quad (5)$$

Получаем интеграл от безразмерной величины, табличный, который находится заменой τ гиперболическим синусом. Его численная величина равна 2, т.о. в результате получаем:

$$p_y = k \frac{4e^2}{ub}. \quad (6)$$

Поскольку в результате кулоновского взаимодействия электрон получает импульс, это означает, что он также получает связанную с этим импульсом кинетическую энергию:

$$w = \frac{p_y^2}{2m} = \frac{8}{m} \left(\frac{ke^2}{ub} \right)^2, \quad (7)$$

которая, согласно закону сохранения энергии, отнимается у альфа-частицы.

Введём объемную концентрацию электронов в поглотителе n и рассмотрим прохождение альфа-частицей слоя поглотителя толщиной dx (рис.3).

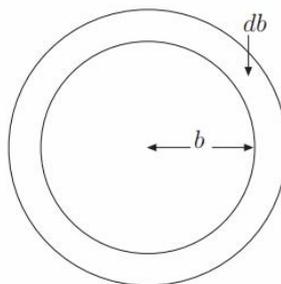


Рисунок 3. К взаимодействию альфа частицы с электронами вещества.

Число электронов dN в интервале прицельных расстояний $(b, b + db)$:

$$dN = n \cdot 2\pi b \cdot db \cdot dx. \quad (8)$$

Потеря энергии альфа-частицы на всех электронах слоя dx :

$$dE = -dx \int_0^{\infty} \frac{8}{m} \left(\frac{ke^2}{ub} \right)^2 n \cdot 2\pi b \cdot db. \quad (9)$$

Или, отсюда, потеря энергии на единицу длины пути:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{16\pi M k^2 e^4}{m M u^2} n \int_0^{\infty} \frac{db}{b}. \quad (10)$$

Здесь M это масса альфа-частицы, на которую умножены числитель и знаменатель с целью выделить её кинетическую энергию.

В выражении (10) получается расходящийся интеграл. Следовательно, в рассмотрение модели должны быть введены причины, ограничивающие возможные значения прицельного параметра. Рассмотрим эти причины.

Ионизация и возбуждение атомов имеет пороговый характер, требуется некоторое минимальное значение переданной электрону энергии. Это значение монотонно уменьшается с увеличением прицельного расстояния, т.е. начиная с некоторого b_{\max} процесса передачи энергии альфа-частицы электронам происходить не будет.

Бор предложил сделать эту оценку, опираясь на свою модель атома («старая» квантовая теория), в которой электроны находятся на стационарных орбитах, причём частота их обращения ν и энергия ионизации I связаны простым соотношением:

$$I = h\nu. \quad (10)$$

Бор сравнивает период обращения h/I с характерным временем взаимодействия b/u , упомянутым выше. При этом в случае

$$\frac{b}{u} \gg \frac{h}{I} \quad (11)$$

взаимодействие, согласно Бору, будет адиабатическим, подобным медленному наложению на атом электрического поля, в котором электронные оболочки деформируются, и затем, после снятия поля, восстанавливаются в исходном виде.

В обратном случае

$$\frac{b}{u} \ll \frac{h}{I} \quad (12)$$

передача импульса происходит за короткое время, электрон получает добавку к энергии на малом участке траектории, благодаря чему атом способен перейти в возбуждённое или ионизованное состояние.

Из этих соображений оценка максимального прицельного параметра:

$$b_{\max} = \frac{hu}{I}. \quad (13)$$

Для оценки минимального прицельного параметра b_{\min} нужно принять во внимание, что приближение точечных частиц будет справедливым до некоторого предела, определяемого законами квантовой механики, а именно – соотношением неопределённостей

Гейзенберга. Неточечность будет проявляться в первую очередь для лёгкой частицы – электрона. Для оценки этого эффекта перейдём в систему отсчета покоящейся альфа-частицы. В этой системе отсчета электрон движется со скоростью u и имеет импульс mu . При этом, опираясь на представление де-Бройля о частице, как о волновом пакете, получаем оценку размеров этого волнового пакета в виде длины волны де-Бройля:

$$\lambda = b_{\min} = \frac{h}{p} = \frac{h}{mu}. \quad (14)$$

Подставляя найденные пределы для прицельного параметра в (10), получаем:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{E} \frac{8\pi M k^2 e^4}{m} n \int_{b_{\min}}^{b_{\max}} \frac{db}{b} = -\frac{1}{E} \frac{8\pi M k^2 e^4}{m} n \ln \frac{b_{\max}}{b_{\min}} = -\frac{1}{E} \frac{8\pi M k^2 e^4}{m} n \ln \frac{mu^2}{I}. \quad (15)$$

Отсюда получаем формулу Бора для потерь на ионизацию и возбуждение:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{1}{E} \frac{8\pi M k^2 e^4}{m} n \ln \frac{2mE}{MI}. \quad (16)$$

Формула Бора позволяет рассчитывать длину пути, проходимого альфа-частицей до торможения:

$$R = \int_0^R dR = \int_E^0 \frac{dE}{dE/dx}. \quad (17)$$

Аналитически интеграл, записанный с учётом (16), не разрешим. В качестве упрощения можно воспользоваться аппроксимацией логарифма в формуле Бора некоторой функцией с целью получить интегрируемую функцию. Так, например, наилучшим приближением логарифма (хотя и довольно грубым) функцией вида \sqrt{E} для случая воздуха и интервала энергий 0..10 МэВ будет:

$$\ln \frac{2mE}{MI} \approx 1.6E^{1/2}. \quad (18)$$

Здесь энергия подразумевается в МэВ-ах.

Отсюда может быть получена эмпирическая формула (1).

2. Схема экспериментальной установки

Основные узлы экспериментальной установки показаны на рис. 4.

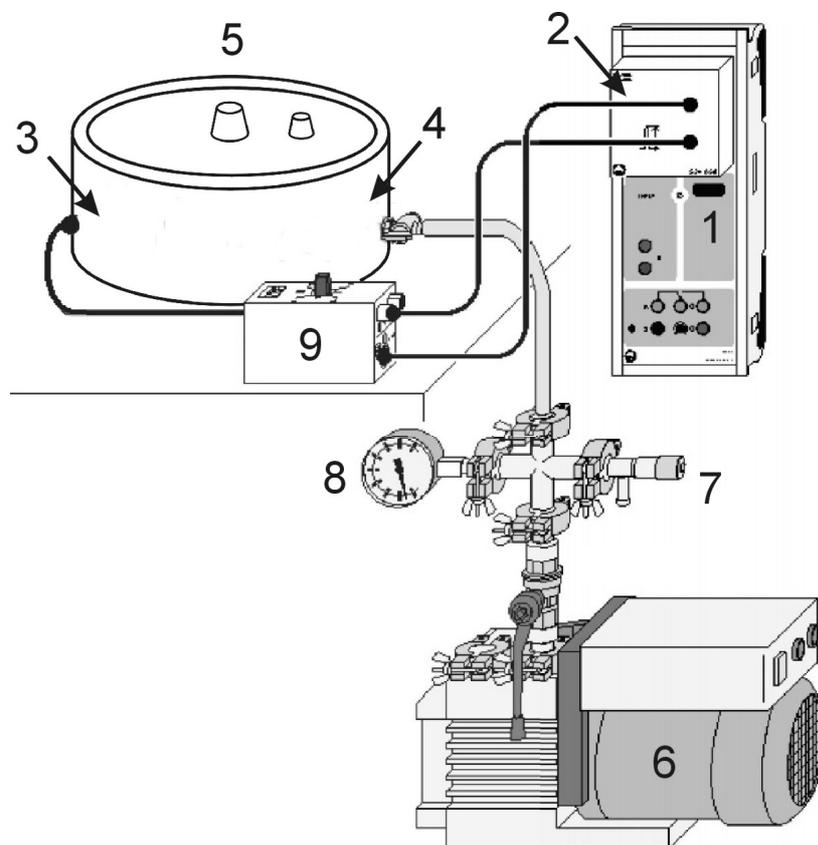


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки.

В работе используется универсальный узел 1 сбора данных Cassy Lab 2 с модулем 2 многоканального анализатора МСА и соответствующее программное обеспечение. Источник альфа-частиц 3 и полупроводниковый детектор 4 размещены в герметичной вакуумной камере 5, которая откачивается форвакуумным насосом 6. На форвакуумном насосе 6 размещен игольчатый клапан 7, позволяющий плавно регулировать остаточное давление в камере 5. Значение остаточного давления индицируется манометром 8 в миллибарах (бар – внесистемная единица измерения давления, примерно равная 1 атм, составляет 10^5 Па). Детектор подключён кабелем с малой ёмкостью к предусилителю 9, формирующему сигнал с амплитудой порядка 1 В для многоканального анализатора 2.

Вакуумная камера позволяет в процессе работы, при откачанной до заданного давления камере, устанавливать источник альфа частиц под разными углами, а также крепить сменный рассеиватель и поглотитель. В данной работе установка источника под разными углами не требуется.

3. Порядок выполнения работы

Перед началом работы убедитесь в наличии всех необходимых узлов установки и соединений между ними в соответствии с предыдущим разделом.

Убедитесь, что источник располагается точно напротив детектора, о чём свидетельствует значение указателя угла отклонения 0 на верхней крышке вакуумной камеры.

Оборудование может использоваться в нескольких лабораторных работах, например, в изучении поглощения альфа частиц в алюминии и золоте или при изучении резерфордовского рассеяния. При наличии в вакуумной камере кассеты с поглотителем, вращением соответствующей ручки добейтесь того, чтобы он не мешал попаданию альфа частиц в детектор.

При наличии в вакуумной камере рассеивателя обратитесь к лаборанту, который его извлечёт из камеры.

Внимание! Самостоятельное вскрытие вакуумной камеры запрещено и является нарушением законодательства РФ в области радиационной безопасности. Доступ к содержимому камеры, включающему альфа-радиоактивный источник, имеет только персонал лаборатории, относящийся к группе А.

Включите компьютер, запустите программное обеспечение CASSY Lab 2 и через пункт Help загрузите настройки к работе «Spectroscopy of alpha-radioactive samples».

Убедитесь, что игольчатый клапан 7 на выходе форвакуумного насоса б закрыт, проверив его на свободное вращение по часовой стрелке. В противном случае без усилий вращайте его по часовой стрелке до появления незначительного сопротивления. В закрытом положении показания грубой и точной шкалы на игольчатом клапане примерно равны нулю.

Внимание! Строго соблюдайте последовательность пяти описанных ниже действий, до отключения насоса. Появление давлений ниже атмосферного в вакуумной магистрали при отключенном насосе может привести к выдавливанию вакуумного масла из насоса в камеру атмосферным давлением. В этом случае работа окажется временно выведенной из строя.

Включите форвакуумный насос б и убедитесь, что вакуумная магистраль герметична, а насос исправен. В этом случае манометр покажет процесс вакуумирования магистрали, длящийся не более минуты, при этом показания манометра не должны превышать 10мбар. При невыполнении этих условий обратитесь к лаборанту.

Не выключая насос 6, откройте клапан на входе в вакуумную камеру 5 и откачайте объем камеры до давления 10 мбар.

Закройте клапан на входе в вакуумную камеру 5.

Откройте игольчатый клапан 7, вращая его против часовой стрелки до изменений показаний манометра. Добейтесь показаний манометра примерно 1000мбар, что соответствует выравниванию атмосферного давления и давления в вакуумной магистрали.

Отключите насос 6.

Запустите измерения в программном обеспечении CASSY Lab 2, выбрав соответствующий пункт меню или нажав F9 в активном окне программы.

Варьируя в программном обеспечении CASSY Lab 2 усиление модуля многоканального анализатора МСА, добейтесь, чтобы спектр покрывал все свободные каналы. Типичное значение коэффициента усиления, при котором это происходит, равно -3. Отрицательный знак при коэффициенте усиления означает изменение полярности импульсов, поступающих с детектора.

Обратите внимание, что ППД чувствительны к искусственным источникам освещения. При наличии в спектре артефактов, зависящих от прямого попадания света на детектор, выключите на время проведения эксперимента ряд ламп дневного освещения над альфа-спектроскопическими установками в лаборатории.

Выполните регистрацию спектра и сохраните его для последующей обработки в формате «\Рабочий стол\Номер_группы\Фамилия_ИО». При отсутствии на рабочем столе папки с номером вашей группы создайте её.

Вращением ближней к детектору ручки на вакуумной камере 5 разместите поглотитель из алюминиевой фольги между источником и детектором. Зарегистрируйте и сохраните спектр под новым именем.

Включите форвакуумный насос и плавной регулировкой игольчатого клапана 7 добейтесь остаточного давления 100мбар. Зарегистрируйте и сохраните спектр под новым именем.

Повторяйте предыдущий шаг, каждый раз увеличивая давление на 100мбар до величины, при которой спектр уже не наблюдается.

По окончании работ обязательно уравнийте давление игольчатым клапаном 7 в вакуумной магистрали сразу же после выключения насоса.

4. Анализ и представление результатов

При обработке результатов примите во внимание, что две основные спектральные линии используемого в работе источника ^{241}Am - это $T=5486$ кэВ и $T=5443$ кэВ. Соотношение числа частиц, испускаемых в единицу времени в среднем и соответствующих этим двум спектральным линиям, примерно равно 84:13.

Обработайте полученный спектр средствами CASSY Lab 2, обосновав выбор формы спектральной линии. Определите экспериментальное соотношение числа частиц от двух основных переходов ^{241}Am .

Выполните калибровку энергетической шкалы спектрометра. При калибровке примите во внимание, что источник альфа-лучей в целях радиационной безопасности имеет покрытие, преодолевая которое альфа-частицы теряют 1-2 МэВ энергии.

Определите цену деления канала спектрометра в кэВ.

Определите зависимость потерь энергии альфа-частиц от остаточного давления в вакуумной камере. Сравните с формулой Бора, построив по последней теоретическую зависимость.

Оцените толщину алюминиевой фольги по величине потерь энергии альфа-частиц в ней.

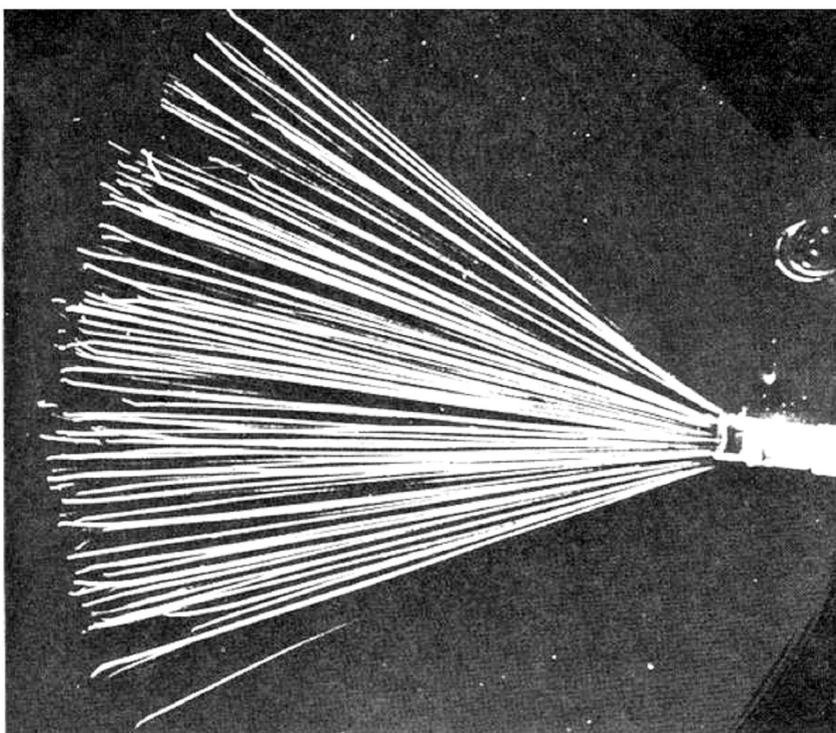
Представьте результаты в печатной форме, с включением всех описанных выше оценок и графиков спектров.

5. Вопросы для самоподготовки

1. Каков порядок величины пробега альфа-частиц от природных радиоактивных изотопов в воздухе и твёрдых телах?
2. Каким образом альфа частица теряет энергию?
3. Будет ли формула Бора справедливой для искусственно ускоренной альфа-частицы с энергией 10 ГэВ?
4. Оцените количественно диапазон прицельных расстояний, в которых альфа-частица с энергией 5 МэВ будет производить ионизацию воздуха.
5. Какой участок трека альфа-частицы в камере Вильсона будет более плотным, начало или окончание?
6. Как будет отличаться движение электрона и альфа-частицы в веществе?
7. Какое количество заряженных частиц производит альфа частица с энергией 5 МэВ, двигаясь в воздухе при н.у.?
8. Во сколько раз увеличится пробег альфа-частицы при увеличении её энергии вдвое?
9. Какая заряженная частица имеет большие удельные потери энергии, быстрая или медленная?

Справочные и дополнительные материалы

Треки альфа-частиц в камере Вильсона:



Спинтарископ:



Литература

1. Капитонов, И.М. Введение в физику ядра и частиц [Текст] / И.М.Капитонов // М.: УРСС, 2004. – 383 с.
2. Колпаков, П.Е. Основы ядерной физики [Текст]: учебное пособие для пед. инс-тов / П.Е. Колпаков // Москва: Просвещение, 2001. – 401 с.
3. Мухин, К. Н. Экспериментальная ядерная физика. Кн. 1. Физика атомного ядра [Текст]: Учеб. для вузов / К.Н. Мухин // 5-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1993. – 408 с.
4. Ишханов, Б.С. Модели атомных ядер [Текст] / Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, В.Н. Орлин // М.:Изд. МГУ, 1997. – 211 с.
5. Широков, Ю.М. Ядерная физика [Текст] / Ю.М. Широков, Н.П. Юдин // М.:Наука, 1980.- 783 с.
6. Povh, V. Particles and Nuclei [Text] / V. Povh, K. Rith, C. Scholz, F. Zetsche // Springer, 2006 – p. 391.

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № 4

от 17 июня 2013

заседания Учебно-методической комиссии Института физики КФУ

ПРИСУТСТВОВАЛИ: проф. Таюрский Д.А. (председатель комиссии), доц. Шерстюков О.Н. (зам. председателя комиссии), Хуснутдинов Н.Р., Ильясов К.А., Воронина Е.В., Тюрин В.А., Корчагин П.А., Дуглав А.В., Мокшин А.В., Гарнаева Г.И., Шиманская Н.Н., Соколова М.Г.

СЛУШАЛИ: рекомендацию в печать учебно-методического пособия «Прохождение альфа-излучения через вещество» (авторы: Дулов Е.Н., Гайнов Р.Р., Ивойлов Н.Г.)

ПОСТАНОВИЛИ: на основании положительной рецензии к.ф.-м.н., с.н.с. КИББ КНИЦ РАН Манапова Р.А. рекомендовать вышеуказанное учебно-методическое пособие к опубликованию в электронном виде на сайте Института физики.

Председатель Учебно-методической комиссии
Института физики, профессор



Таюрский Д.А.