

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

Т. Ф. Миронова, Д. В. Миронов, Т. В. Миронова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Курс лекций

Издание второе, переработанное и дополненное

Кинель 2015

УДК 539.163
ББК 22.3
М-64

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой «Общая физика и физика
нефтегазового производства» ФГБОУ ВПО СамГТУ

А. М. Штеренберг;

начальник Физико-технической лаборатории
Реакторного Исследовательского комплекса ОАО «ГНЦ НИИАР»
В. В. Пименов

Миронова, Т. Ф.

М-64 Использование радиоактивных изотопов : курс лекций /
Т. Ф. Миронова, Д. В. Мионов, Т. В. Миронова. – 2-е изд.,
перераб. и доп. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2015. – 106 с.
ISBN 978-5-88575-366-1

Курс лекций содержит сведения о современных способах и методах применения радиоактивных изотопов, подробное описание приборов и новых устройств обеспечения радиационной защиты с учетом современных условий эксплуатации технических систем в различных отраслях сельского хозяйства и промышленности.

Предназначен для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия».

УДК 539.163
ББК 22.3

ISBN 978-5-88575-366-1

© Миронова Т. Ф., Мионов Д. В.,
Миронова Т. В., 2015
© ФГБОУ ВПО Самарская ГСХА, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

В конце XX века Россия вошла в состав государств-участников Болонского процесса, по итогам которого была подписана конвенция о переходе всех европейских государств к единой сфере высшего профессионального образования. Официальный переход России на двухуровневую систему высшего образования состоялся в 2009 г., о чём свидетельствуют изменения, внесенные в Федеральный закон от 22 августа 1996 г. № 125-ФЗ «О высшем и послевузовском профессиональном образовании». В связи с этим возникла необходимость актуализировать курс лекций по дисциплине «Использование радиоактивных изотопов».

Цель настоящего издания – формирование способности к обобщению и анализу, постановке цели и выбору путей ее достижения.

Второе издание существенно переработано. Введена новая лекция и новая тема: «Приборы, оборудование и средства для обеспечения радиационной защиты». Расширен круг рассматриваемых приборов и новых устройств с учетом современных условий эксплуатации технических систем в различных отраслях сельского хозяйства и промышленности.

Кроме того, учитывая грандиозный прорыв российских физиков под руководством академика Юрия Оганесяна из Лаборатории ядерных реакций имени Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований при участии американских коллег из Ливерморской национальной лаборатории в создании новых сверхтяжелых элементов, представлены новые подробные сведения о синтезе искусственных элементов периодической системы Д. И. Менделеева.

Рассмотрены вопросы создания новой совместной рабочей группы, учрежденной бюро Международного союза теоретической и прикладной химии (ИЮПАК), которая начала работу по установлению приоритета в получении других, пока безымянных сверхтяжелых элементов.

В процессе изучения курса лекций, у учащихся должна формироваться способность решать инженерные задачи с использованием основных законов атомной и ядерной физики.

Издание подготовлено заведующим кафедрой «Физика, математика и информационные технологии», кандидатом физико-математических наук, доцентом *Д. В. Мироновым*, кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры *Т. Ф. Мироновой*, и кандидатом физико-математических наук, доцентом кафедры *Т. В. Мироновой*.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность рецензентам рукописи – заведующему кафедрой «Общая физика и физика нефтегазового производства» ФГБОУ ВПО «Самарский государственный технический университет», доктору физико-математических наук, профессору *А. М. Штеренбергу* и начальнику Физико-технической лаборатории Реакторного Исследовательского комплекса ОАО «ГНЦ НИИАР» *В. В. Пименову*. Их советы позволили улучшить данное пособие. Авторы выражают также благодарность всем коллегам, сделавшим ряд весьма полезных замечаний, позволивших улучшить издание в процессе его переработки.

ТЕМА 1. ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОЕ ЯДРО

Лекция 1

1.1. *Строение атома. Модель атома Резерфорда.*

1.2. *Атом водорода по Бору.*

1.1. Строение атома. Модель атома Резерфорда

Представление об атомах как неделимых мельчайших частицах вещества возникло еще в античные времена, но только в XVIII веке трудами А. Лавуазье, М. В. Ломоносова и других ученых была доказана реальность существования атомов. Но вопрос об их внутреннем устройстве даже не возникал, и атомы по-прежнему считались неделимыми частицами. В XIX веке изучение атомистического строения вещества существенно продвинулось вперед. В 1833 г. при исследовании явления электролиза М. Фарадей установил, что ток в растворе электролита это упорядоченное движение заряженных частиц – ионов. Фарадей определил минимальный заряд иона, который был назван элементарным электрическим зарядом. Приближенное значение которого оказалось равным $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл.

На основании исследований Фарадея можно было сделать вывод о существовании внутри атомов электрических зарядов.

Большую роль в развитии атомистической теории сыграл выдающийся русский химик Д. И. Менделеев, разработавший в 1869 году периодическую систему элементов, в которой впервые был поставлен вопрос о единой природе атомов.

Важным свидетельством сложной структуры атомов явились спектроскопические исследования, которые привели к открытию линейчатых спектров атомов. В начале XIX века были открыты дискретные спектральные линии в излучении атомов водорода в видимой части спектра, и впоследствии были установлены математические закономерности, связывающие длины волн этих линий.

В 1897 г. английский физик *Джозеф Джон Томсон* открыл атом электричества – электрон – \bar{e} , который имеет следующие параметры: заряд – $q_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса – $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

Историческая справка: Джозеф Джон Томсон (Нобелевская премия присуждена в 1906 г.), автор гипотезы об электрическом составе атомов (внутриатомных e^-). В 1903 г. предложил модель атома (одну из первых). В 1904 г. ввёл представление о том, что e^- в атоме разделяются на группы, образуя различные конфигурации, которые обуславливают периодичность химических элементов.

В 1903 г. Дж. Томсон предложил модель атома (рис. 1), согласно которой атом представляет собой равномерно заполненную положительным электричеством сферу, внутри которой находится электрон (или несколько симметрично расположенных электронов). Суммарный положительный заряд сферы равен заряду электрона, так что атом в целом нейтрален.

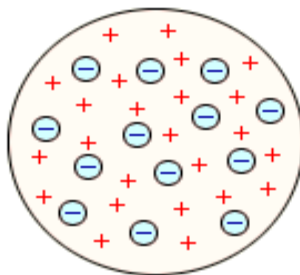


Рис. 1. Модель атома Дж. Томсона

Для объяснения линейчатых спектров испускания атомов Томсон пытался определить расположение электронов в атоме и рассчитать частоты их колебаний около положений равновесия. Однако эти попытки не увенчались успехом.

Таким образом, на основании всех известных к началу XX века экспериментальных фактов можно было сделать вывод о том, что атомы вещества имеют сложное внутреннее строение. Они представляют собой электронейтральные системы, причем носителями отрицательного заряда атомов являются легкие электроны, масса которых составляет лишь малую долю массы атомов. Основная часть массы атомов связана с положительным зарядом.

Чтобы выяснить характер распределения положительных и отрицательных зарядов в атоме, было необходимо непосредственное опытное «зондирование» внутренних областей атома. Такое зондирование осуществили **Эрнест Резерфорд** и его сотрудники из Манчестерского университета Э. Марсден и Х. Гейгер в 1909-1911 гг. с помощью α -частиц, наблюдая изменение направления их полета (рассеяние) при прохождении через тонкие слои вещества.

Историческая справка: Э. Резерфорд родился в Новой Зеландии, работал в Канаде (до 1907 г.) с 1907 – в Манчестере; с 1919 – в Кембридже. В 1909 г. открыл альфа- и бета-лучи, в 1900 – эманацию тория и ввел понятие периода полураспада. Вместе с Ф. Содди в 1902-1903 гг. разработал теорию радиоактивного распада и установил закон радиоактивных превращений, выяснив, что альфа-лучи состоят из положительно заряженных частиц.

Резерфорд предложил применить зондирование атома с помощью α -частиц, которые возникают при радиоактивном распаде радия и некоторых других элементов. Масса α -частиц приблизительно в 7300 раз больше массы электрона, а положительный заряд равен удвоенному элементарному заряду. В своих опытах Резерфорд использовал α -частицы с кинетической энергией около 5 МэВ (скорость таких частиц очень велика – порядка 10^7 м/с, но она все же значительно меньше скорости света); α -частицы – это полностью ионизированные атомы гелия. Они были открыты Резерфордом в 1899 г. при изучении явления радиоактивности. Этими частицами Резерфорд бомбардировал атомы тяжелых элементов (золото, серебро, медь и др.). Электроны, входящие в состав атомов, вследствие малой массы не могут заметно изменить траекторию α -частицы. Рассеяние, то есть изменение направления движения α -частиц, может вызвать только тяжелая положительно заряженная часть атома.

Таким образом, α -частица имеет следующие параметры: заряд – $q_\alpha = +2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, масса – $m_\alpha = 4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-27}$ кг, движется со скоростью $V = \frac{1}{15} \cdot c$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Опыт проводился следующим образом (рис. 2). Внутри полости, сделанной в куске свинца, помещалось радиоактивное вещество P , служившее источником α -частиц. Вследствие сильного торможения в свинце α -частицы могли выходить наружу

лишь через узкое отверстие. На пути узкого пучка α -частиц располагалась тонкая металлическая фольга Φ . При прохождении через фольгу α -частицы отклонялись от первоначального направления движения на различные углы ϑ . Рассеянные α -частицы ударялись об экран E , покрытый сернистым цинком, и вызываемые ими **сцинтилляции** (вспышки света, возникающие при ударе частиц о вещество, способное люминесцировать) наблюдались в микроскоп M . Микроскоп и экран можно было вращать вокруг оси и устанавливать под любым углом ϑ . Весь прибор помещался в кожух, из которого был эвакуирован воздух (чтобы устранить торможение α -частиц за счет столкновений с молекулами воздуха).

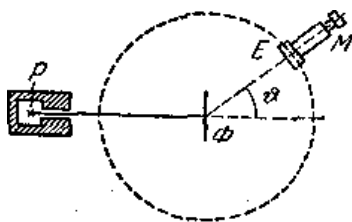


Рис. 2. Схема опыта Э. Резерфорда

Было обнаружено, что большинство α -частиц проходит через тонкий слой металла, практически не испытывая отклонения. Однако небольшая часть частиц отклоняется на значительные углы, превышающие 30° . Очень редкие α -частицы (приблизительно одна на десять тысяч) испытывали отклонение на углы, близкие к 180° .

Этот результат был совершенно неожиданным даже для Резерфорда, так как находился в резком противоречии с моделью атома Томсона, согласно которой положительный заряд распределен по всему объему атома. При таком распределении положительный заряд не может создать сильное электрическое поле, способное отбросить α -частицы назад. Электрическое поле однородного заряженного шара максимально на его поверхности и убывает до нуля по мере приближения к центру шара. Если бы радиус шара, в котором сосредоточен весь положительный заряд атома, уменьшился в n раз, то максимальная сила отталкивания, действующая на α -частицу по закону Кулона, возросла бы в n^2 раз. Следовательно, при достаточно большом значении n α -частицы

могли бы испытать рассеяние на большие углы вплоть до 180° . Эти соображения привели Резерфорда к выводу, что атом почти пустой, и весь его положительный заряд сосредоточен в малом объеме. Эту часть атома Резерфорд назвал атомным ядром.

Основываясь на этом выводе, Резерфорд предложил в 1911 г. ядерную модель атома. Согласно предположению Резерфорда атом представляет собой систему зарядов, в центре которой расположено тяжелое положительное ядро с зарядом $+Ze$, имеющее размеры, не превышающие 10^{-10} м, а вокруг ядра расположены Z штук электронов, распределенных по всему объему атома. Почти вся масса атома сосредоточена в ядре (99,95%).

Исходя из таких предположений, Резерфорд разработал количественную теорию рассеяния α -частиц. Отклонения α -частиц обусловлены, прежде всего, воздействием на них со стороны атомных ядер. Заметного отклонения из-за взаимодействия с электронами быть не может, поскольку масса электрона на четыре порядка меньше массы α -частицы. Когда частица пролетает вблизи ядра, на нее действует кулоновская сила отталкивания, которая определяется выражением:

$$f = \frac{2 \cdot Z \cdot e^2}{r^2}. \quad (1)$$

Траектория частицы в этом случае представляет собой гиперболу, асимптоты которой образуют между собой угол ϑ (рис. 3). Этот угол характеризует отклонение частицы от первоначального направления. Расстояние b от ядра до первоначального направления полета α -частицы называется *прицельным параметром*. Чем ближе пролетает частица от ядра (чем меньше b), тем, естественно, сильнее она отклоняется (тем больше угол ϑ). Между последними величинами имеется простое соотношение:

$$\operatorname{ctg} \frac{\vartheta}{2} \approx v.$$

Справедливость теории, исходящей из кулоновского взаимодействия между α -частицей и ядром атома, свидетельствует о том, что даже отбрасываемая в обратном направлении α -частица не проникает в область положительного заряда атома. Вместе с тем, летящая точно по направлению к ядру α -частица подошла бы к его центру на расстояние, которое можно определить на основе закона

сохранения энергии: кинетическая энергия α -частицы E_k (при полной ее остановке) должна быть полностью израсходована на убыль потенциальной энергии E_n :

$$W_k = -W_n, \quad (2)$$

но кинетическая энергия, как известно, выражается формулой

$$W_k = \frac{mV^2}{2}. \quad (3)$$

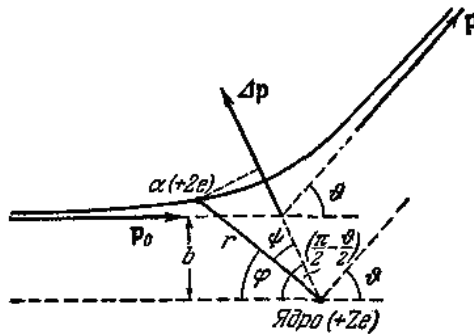


Рис. 3. Схема отклонения α -частицы вблизи ядра атома

Потенциальная энергия заряда в электрическом поле, как известно, определяется:

$$W_n = -k \frac{Z \cdot e \cdot e}{r}. \quad (4)$$

Составим уравнение

$$\frac{mV^2}{2} = -k \frac{Z \cdot e^2}{r}, \quad (5)$$

отсюда выразим расстояние

$$r = \frac{2 \cdot k \cdot Z \cdot e^2}{mV^2}. \quad (6)$$

Оценивая минимальное расстояние, на которое может подлететь α -частица, Резерфорд в 1913 г. получил значение: $r_{\min} \approx 10^{-10} \text{ м}$ (из молекулярно-кинетической теории известно $r_{\text{ат}} \approx 10^{-10} \text{ м}$).