

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Университетский колледж
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Н.В.Тесля

УЧЕБНЫЕ ЗАНЯТИЯ ПО ФИЗИКЕ АТОМНОГО ЯДРА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам среднего профессионального образования

Оренбург
2018

УДК 53(076.32)
ББК 22.3я73
Т36

Рецензент – кандидат технических наук, доцент кафедры общей физики ОГУ Ф.Г. Узенбаев

Т36 **Тесля, Н.В.**
Учебные занятия по физике атомного ядра: методические указания / Н.В.Тесля; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2018.

Основное содержание: освоение знаний о фундаментальных физических законах по физике атомного ядра и принципах, лежащих в основе современной физической картины мира; наиболее важных открытиях в области атомной физики, оказавших определяющее влияние на развитие техники и технологии; методах научного познания природы.

Методические указания предназначены для учебных занятий по дисциплине «Физика» в Университетском колледже ОГУ в первом и втором семестрах для обучающихся первого курса. Методические указания составлены с учетом Федеральных государственных образовательных стандартов среднего профессионального образования.

УДК 53(076.32)
ББК 22.3я73

© Тесля Н. В., 2018
© ОГУ, 2018

Содержание

Введение.....	4
1 Строение атомного ядра.....	6
1.1 Способы наблюдения и регистрации заряженных частиц.....	6
1.2 Радиоактивность.....	10
1.3 Понятие о превращении химических элементов.....	14
1.4 Энергия и проникающая способность радиоактивного излучения.....	15
1.5 Открытие искусственного превращения атомных ядер.....	18
1.6 Открытие нейтрона.....	19
1.7 Состав атомного ядра. Запись ядерных реакций.....	22
1.8 Изотопы.....	24
1.9 Понятие о ядерных силах.....	27
1.10 Дефект массы атомных ядер. Энергия связи.....	30
2 Радиоактивные излучения.....	35
2.1 Элементарные частицы.....	35
2.2 Открытие позитрона.....	39
2.3 Нейтрино.....	40
3 Атомная энергия и ее использование.....	43
3.1 Деление тяжелых атомных ядер.....	43
3.2 Цепная реакция деления. Ядерный взрыв.....	44
3.3 Ядерный реактор.....	48
3.4 Понятие о термоядерной реакции. Энергия Солнца и звезд.....	52
3.5 Состав оценочных материалов.....	54
Список использованных источников.....	61

Введение

В современных условиях особенно актуально организовать процесс обучения так, чтобы его образовательный результат проявлялся в развитии собственной внутренней мотивации обучения, мышления, воображения, творческих способностей, устойчивого познавательного интереса обучающихся, в формировании системы жизненно важных, практически востребованных знаний и умений, экологической культуры, что позволяет обучающимся адаптироваться к жизни и относиться к ней активно, творчески.

Цели обучения в современном профессиональном образовании предусматривают не только усвоение знаний, но и общее развитие обучающихся. Для этого разрабатываются все новые и новые технологии: программированного обучения, поэтапного формирования умственных [действий](#)[3]

Для прочного усвоения знаний по тому или иному предмету требуется сформировать позитивное отношение, интерес обучающихся к изучаемому материалу. Интересный, знакомый и лично значимый материал обычно воспринимается ими как менее трудный. Поэтому методические указания способствуют решению задачи: организовать учебный процесс так, чтобы он стал познавательным, творческим процессом, в котором учебная деятельность обучающихся становится успешной, а знания востребованными. В методических указаниях используются творческие задания, обучающиеся получают возможность обращаться к своей фантазии, к творчеству.

В основе учебной дисциплины Физика лежит установка на формирование у обучающихся системы базовых понятий физики и представлений о современной физической картине мира, а также выработка

умений применять физические знания как в профессиональной деятельности, так и для решения жизненных задач.

Многие положения, развиваемые физикой, рассматриваются как основа создания и использования информационных и коммуникационных технологий (ИКТ) — одного из наиболее значимых технологических достижений современной цивилизации.

Физика дает ключ к пониманию многочисленных явлений и процессов окружающего мира (в естественно-научных областях, социологии, экономике, языке, литературе и др.). В физике формируются многие виды деятельности, которые имеют метапредметный характер. К ним в первую очередь относятся: моделирование объектов и процессов, применение основных методов познания, системно-информационный анализ, формулирование гипотез, анализ и синтез, сравнение, обобщение, систематизация, выявление причинно-следственных связей, поиск аналогов, управление объектами и процессами. Именно эта дисциплина позволяет познакомить студентов с научными методами познания, научить их отличать гипотезу от теории, теорию от [эксперимента](#). [3]

Задействованы современные информационно-коммуникативные технологии: мультимедийный комплекс, электронные учебники и энциклопедии, современные образовательные Интернет-ресурсы.

В методических указаниях даны общие положения об организации деятельности обучающихся. Приведен перечень основным вопросам лекционных занятий, описаны рекомендации по изучению разделов дисциплины, которые выносятся на самостоятельное изучение. В методические указания включено содержание, направленное на формирование у обучающихся компетенций, необходимых для качественного освоения образовательной программы на базе основного общего образования с получением среднего общего образования; программы подготовки квалифицированных рабочих, служащих, программы

подготовки специалистов среднего звена (ППССЗ). Количество часов, предусмотренных для изучения дисциплины 137.

1Строение атомного ядра

1.1 Способы наблюдения и регистрации заряженных частиц

В начале 20 века были разработаны методы исследования явлений атомной физики и созданы приборы, позволившие не только выяснить основные вопросы строения атомов, но и наблюдать превращения химических элементов.

Трудность создания таких приборов заключалась в том, что используемые в экспериментах заряженные частицы представляют собой ионизированные атомы каких-либо элементов или, например, электроны, и прибор должен регистрировать попадание в него лишь одной частицы или делать видимой траекторию ее движения.

В качестве одного из первых и простейших приборов для регистрации частиц был использован экран, покрытый люминесцирующим составом. В той точке экрана, куда попадает частица с достаточно большой энергией, возникает вспышка – сцинтилляция (от латинского «сцинтилляцио» - сверкание, вспышка).

Первый основной прибор для регистрации частиц был изобретен в 1908 г. Г. Гейгером. После того, как этот прибор был усовершенствован В. Мюллером, он мог подсчитывать число попадающих в него частиц. Действие счетчика Гейгера – Мюллера основано на том, что пролетающие через газ заряженные частицы ионизируют встречающиеся на их пути атомы газа: отрицательно заряженная частица, отталкивая электроны, выбивает их из атома, а положительно заряженная частица притягивает электроны и вырывает из [атомов](#). [1]

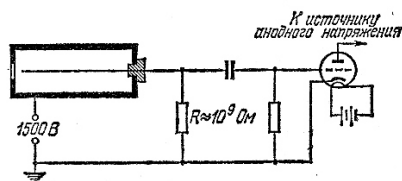


Рисунок 1.1- Счетчик Гейгера – Мюллера

Счетчик состоит из полого металлического цилиндра, диаметром около 3 см (рисунок 1.1), с окном из тонкого стекла или алюминия. По оси цилиндра проходит изолированная от стенок металлическая нить. Цилиндр (камера) заполняется разряженным газом, например аргоном. Между стенками цилиндра и нитью создается напряжение порядка 1500 В, недостаточное для образования самостоятельного разряда. Нить заземляется через большое сопротивление R . При попадании в камеру частицы с большой энергией происходит ионизация атомов газа на пути этой частицы, и между стенками и нитью возникает разряд. Разрядный ток создает большое падение напряжения на сопротивлении R , и напряжение между нитью и стенками сильно уменьшается. Поэтому разряд быстро прекращается. После прекращения тока все напряжение вновь сосредоточивается между стенками камеры и нитью, и счетчик подготовлен к регистрации новой частицы. Напряжение с сопротивления R подается на вход усилительной лампы, в анодную цепь которой включается счетный механизм.

Способность частиц большой энергии ионизировать атомы газа используется и в одном из самых замечательных приборов современной физики – в камере Вильсона. В 1911 г английский ученый Ч. Вильсон построил прибор, с помощью которого можно было видеть и фотографировать траектории заряженных частиц.

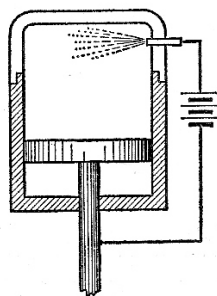


Рисунок 1.2- Камера Вильсона

Камера Вильсона (рисунок 1.2) состоит из цилиндра с поршнем; верхняя часть цилиндра сделана из прозрачного материала. В камеру вводится небольшое количество воды или спирта, и внутри нее образуется смесь паров и воздуха. При быстром опускании поршня смесь адиабатически расширяется и охлаждается, поэтому воздух в камере оказывается пересыщенным парами.

Если воздух очищен от пылинок, то превращение избытка пара в жидкость затруднено из-за отсутствия центров конденсации. Однако центрами конденсации могут служить и ионы. Поэтому, если через камеру пролетает в это время заряженная частица, ионизирующая на своем пути молекулы воздуха, то на цепочке ионов происходит конденсация паров и траектория движения частицы внутри камеры получается отмеченной нитью тумана, т.е. становится видимой. Тепловое движение воздуха быстро размывает нити тумана, и траектории частиц видны отчетливо лишь около 0,1 с, что, однако, достаточно для [фотографирования](#). [1]

Вид траектории на фотоснимке часто позволяет судить о природе частицы и величине ее энергии. Так, альфа-частицы оставляют сравнительно толстый сплошной след, протоны – более тонкий, а электроны – пунктирный след. Одна из фотографий альфа-частиц в камере Вильсона показана на рисунке 1.3.

Чтобы подготовить камеру к действию и очистить ее от оставшихся ионов, внутри нее создают электрическое поле, притягивающее ионы к электродам, где они нейтрализуются.

Как говорилось выше, в камере Вильсона для получения следов частиц используется конденсация пересыщенного пара, т.е. превращение его в жидкость. Для этой же цели можно использовать обратное явление, т.е. превращение жидкости в пар. Если жидкость заключить в замкнутый сосуд с поршнем и при помощи поршня создать повышенное давление, а затем резким перемещением поршня уменьшить давление в жидкости, то при соответствующей температуре жидкость может оказаться в перегретом состоянии.

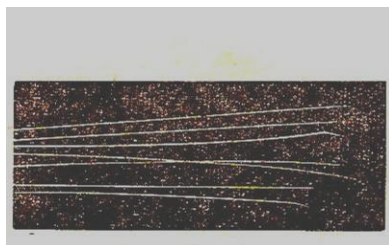


Рисунок 1.3- Фотографии альфа-частиц в камере Вильсона

Если через такую жидкость пролетит заряженная частица, то вдоль ее траектории жидкость закипит, поскольку образовавшиеся в жидкости ионы служат центрами парообразования. При этом траектория частицы отмечается цепочкой пузырьков пара, т.е. делается видимой. На этом принципе основано действие пузырьковой камеры.

При изучении следов частиц с большой энергией пузырьковая камера удобнее камеры Вильсона, так как при движении в жидкости частица теряет значительно больше энергии, чем в газе. Во многих случаях это позволяет значительно точнее определить направление движения частицы и ее энергию. В настоящее время имеются пузырьковые камеры диаметром около

2 м. Они заполняются жидким водородом. Следы частиц в жидком водороде получаются очень отчетливыми.

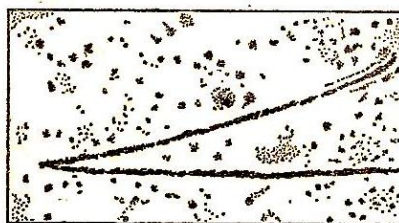


Рисунок 1.4- Видимый след после проявления фотопластинки

Для регистрации частиц и получения их следов служит также метод толстослойных фотопластинок. Он основан на том, что пролетающие сквозь фотоэмульсию частицы действуют на зерна бромистого серебра, поэтому оставленный частицами след после проявления фотопластинки становится видимым (рисунок 1.4) и его можно исследовать с помощью микроскопа. Чтобы след был достаточно длинным, используются толстые слои фотоэмульсии.

1.2 Радиоактивность

В 1896 г. А.Беккерель обнаружил с помощью фотопластинки, что одна из солей урана является источником излучения, природа которого была неясна. Беккерель установил, что открытое им излучение испускается всеми соединениями урана и самим металлическим ураном, т.е. что источником излучения являются атомы урана.

Оказывается, излучение урана происходит непрерывно и никакие внешние воздействия (температура, давление и т.д.) не оказывают на него влияния, т.е. атомы урана излучают самопроизвольно (спонтанно). Излучение урана было названо радиоактивным, а само явление – радиоактивностью.

Исследования Беккереля, Резерфорда, Пьера Кюри, Марии Склодовской-Кюри и других ученых показали, что радиоактивное излучение имеет сложный состав и в магнитном поле разделяется на лучи трех видов, которые назвали α -, β -, γ -лучами (рисунок 1.5), магнитное поле направлено на читателя).

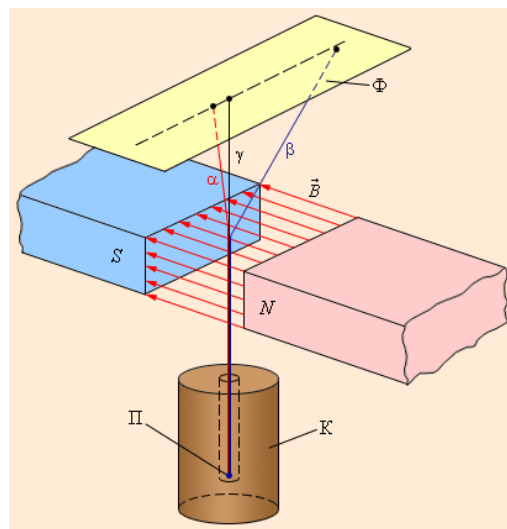


Рисунок 1.5- Радиоактивное излучение в магнитном поле разделяется на лучи трех видов

Оказалось, что α -лучи представляют собой поток положительно заряженных частиц (α -частиц); β -лучи – поток быстро летящих электронов (β -частиц); γ -лучи, не отклоняющиеся в магнитном поле, представляют собой очень короткие электромагнитные волны.

Радиоактивное излучение было обнаружено и у некоторых других тяжелых элементов, находящихся в конце таблицы Менделеева. В 1898 г. М. Кюри и П. Кюри обнаружили радиоактивность тория и в этом же году открыли два новых химических элемента, содержащиеся в урановых рудах и оказавшиеся также радиоактивными. Один из них, радиоактивность которого

примерно в миллион раз сильнее радиоактивности урана, был назван радием, а другой – полонием. В 1908 г. Резерфорд с помощью спектрального анализа обнаружил радиоактивный газ – радон.

Открытие радиоактивности поставило перед физиками вопрос: как возникает радиоактивное излучение? Особенно загадочной казалась его спонтанность. В 1903 г. Резерфорд и Содди высказали гипотезу о том, что радиоактивное излучение образуется при самопроизвольном распаде атомов. При этой гипотезе атомы радиоактивных элементов, в отличие от атомов обычных элементов, неустойчивы и время от времени то один, то другой атом самопроизвольно распадается. Дальнейшие исследования подтвердили правильность этой [гипотезы](#). [1]

Когда была установлена структура атомов, стало ясно, что радиоактивное излучение возникает при распаде ядер атомов радиоактивных элементов, поскольку положительно заряженные α -частицы могут выбрасываться только из ядер. В дальнейшем выяснилось, что и β -частицы образуются тоже при распаде ядер.

Атомное ядро — центральная часть атома, в которой сосредоточена основная его масса (более 99,9 %). Ядро заряжено положительно, заряд ядра определяет химический элемент, к которому относят атом. Размеры ядер различных атомов составляют несколько фемтометров, что более чем в 10 тысяч раз меньше размеров самого атома. Атомные ядра изучает ядерная физика. [8]

Природа α -частиц была окончательно установлена в 1908 г. Результаты многих экспериментов показали, что α -частицы представляют собой дважды ионизированные атомы гелия, т.е. ядра гелия. Под руководством Резерфорда был выполнен прямой опыт: α -частицы в течение нескольких дней впускались в откаченный сосуд сквозь очень тонкое окошко, и спектральный анализ показал присутствие в сосуде гелия.

Если некоторое количество радона поместить в запаянную ампулу, то интенсивность его радиоактивного излучения со временем уменьшается. Это объясняется тем, что по мере распада атомных ядер радона не распавшихся ядер остается все меньше, т.е. количество радиоактивного вещества, оставшегося в ампуле, уменьшается. Очевидно, что чем быстрее происходит распад ядер, тем быстрее должна падать интенсивность излучения. Различные радиоактивные элементы различаются скоростью их распада. Кроме того, некоторые элементы имеют несколько радиоактивных изотопов с различной скоростью распада.

Величина, характеризующая быстроту распада радиоактивного изотопа, называется периодом полураспада и обозначается буквой T . Период полураспада измеряется временем, в течение которого число атомов радиоактивного изотопа уменьшается наполовину. Период полураспада радия, например, равен 1620 годам. Значит, если взять какое-то количество радия, например 1 г, то через 1620 лет от него останется половина (0,5 г), через 3240 лет – [четверть \(0,25 г\)](#) и т.д.[7]

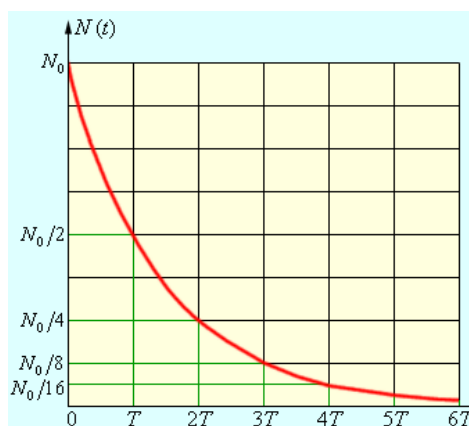


Рисунок 1.6- Иллюстрация закона радиоактивного распада

Период полураспада урана измеряется миллиардами лет, в то время как у радона он составляет 3,82 дня. Ядра некоторых радиоактивных элементов

настолько неустойчивы, что их период полураспада измеряется [микросекундами](#). [7] Смотри рисунки 1.6 и 1.7.

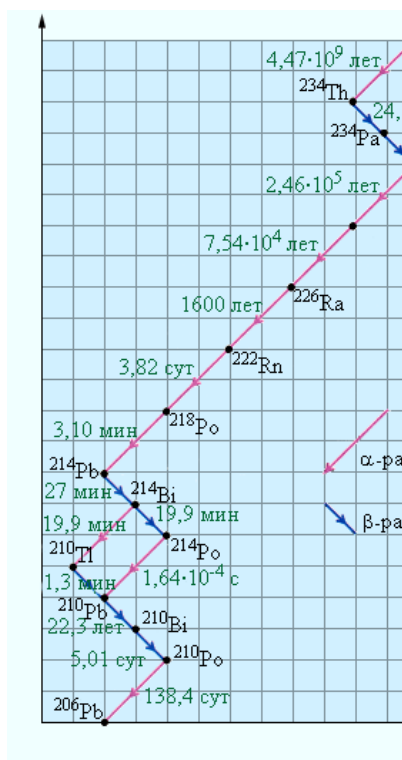


Рисунок 1.7- Схема распада радиоактивной серии ${}_{92}\text{U}^{238}$. Указаны периоды полураспада

1.3 Понятие о превращении химических элементов

При распаде атомных ядер радиоактивного изотопа какого-либо элемента образуются ядра изотопов других элементов, например, при распаде радия образуются радон и гелий. Таким образом, радиоактивный распад сопровождается превращением одного химического элемента в другой.

Известно, что химическая природа атомов определяется их ядрами. Для того чтобы атом одного химического элемента превратился в атом другого элемента, должен измениться заряд Z ядра атома. Так, при испускании α -частицы заряд Z ядра уменьшается на две единицы и становится равным $Z - 2$; и при испускании β -частицы заряд увеличивается на единицу и становится

равным $Z+1$. Таким образом, из ядер атомов радия при испускании α -частиц образуются ядра атомов радона; из ядер атомов актиния при испускании β -частиц получаются ядра атомов тория. Подобные превращения можно выразить правилом смещения: при испускании α -частиц химический элемент перемещается в таблице Менделеева на два места влево, а при испускании β -частиц – на одно место [вправо](#). [2]

Что касается γ -излучения, то оно обычно возникает вследствие α - и β -излучением. После испускания α - или β -частиц атомное ядро часто оказывается в возбужденном состоянии, т.е. обладает избытком энергии, и, переходя на более низкий энергетический уровень (в нормальное состояние), излучает γ -квант.

Образовавшиеся в результате радиоактивного распада новые ядра могут оказаться также радиоактивными и распадаться с образованием ядер изотопов других элементов и т.д., пока на каком-нибудь этапе в цепи последовательных превращений одного радиоактивного элемента в другой не образуется устойчивый элемент. Так, из радиоактивного урана и тория в конце концов получается нерадиоактивный свинец. Самопроизвольный распад атомных ядер радиоактивных элементов, встречающихся в естественных условиях, называется естественной радиоактивностью.

Так как радиоактивные процессы не зависят от внешних условий, то можно определить возраст урановой руды по соотношению в ней количества урана и конечного продукта – свинца. Возраст урановых руд в различных рудниках получается примерно одинаковым: около $4 \cdot 10^9$ лет. Это позволяет заключить, что земная кора образовалась около 4 млрд. лет назад.

1.4 Энергия и проникающая способность радиоактивного излучения

Представление об энергии α -частиц, испускаемых ядрами радиоактивных элементов, можно получить, измерив длину их пробега в

веществе. Выброшенные из ядер с огромной начальной скоростью (до 20000 км/с) α -частицы растрачивают энергию на ионизацию встречающихся на пути атомов вещества и останавливаются. В воздухе при нормальных условиях α -частицы образуют в среднем примерно 50000 пар ионов на 1 см пути.

Чем больше энергия α -частицы, тем больше и ее длина пробега. Длину пробега α -частиц удобно изучать с помощью камеры Вильсона. Энергия α -частиц, испускаемых ядрами при естественной радиоактивности, лежит в пределах от 4 до 9 МэВ ($1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$). Если длина пробега α -частиц в воздухе составляет от 2 до 12 см, то в твердых веществах и жидкостях – лишь несколько микрометров. Поэтому α -частицы задерживаются тонкой металлической фольгой и даже просто листом бумаги.

Длину пробега α -частиц в воздухе можно определить с помощью спинтарископа (рисунок 1.8). Спинтарископ состоит из люминесцирующего экрана, иглы с радиоактивным препаратом и лупы. Через лупу наблюдают сцинтилляции, создаваемые α -частицами на экране. Отодвигая иглу от экрана, добиваются исчезновения сцинтилляций. Тогда расстояние от иглы до экрана можно считать максимальной длиной пробега α -частиц. С помощью спинтарископа удалось установить, что в одном грамме радия каждую секунду распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомных ядер.

Число распадов в единицу времени характеризует активность различных радиоактивных препаратов. В СИ за единицу активности принята активность препарата, в котором за 1 с распадается одно атомное ядро (1 расп./с). На практике часто используются единицы активности Кюри и Резерфорд.

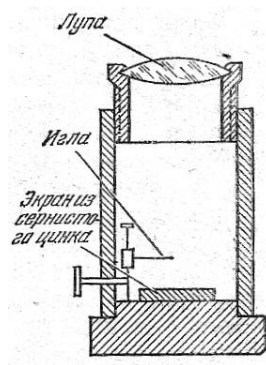


Рисунок 1.8- Спintарископ для определения длина пробега α -частиц в воздухе

Кюри (Ки) называется активность препарата, в котором за 1 с распадается $3,7 \cdot 10^{10}$ атомных ядер: $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ расп./с.}$ Таким образом, активность 1 г радия составляет 1 Ки.

Резерфордом (Рд) называется активность, соответствующая 10^6 расп./с: $1 \text{ Рд} = 10^6 \text{ расп./с.}$ [5]

Скорости электронов в β -лучах доходит почти до скорости света, а их энергия колеблется в широких пределах: примерно от 0,01 до 2,3 МэВ. Длина пробега электронов в веществе значительно больше, чем α -частиц, т.к. электроны создают значительно меньше ионов на своем пути и не так быстро растрачивают свою энергию; в воздухе при нормальном давлении β -а частицы создают в среднем около 50 пар ионов на 1 см пути. Чтобы задержать β -излучение, нужен слой металла толщиной около 3 мм. [1]

Энергия γ -квантов изменяется примерно от 0,02 до 2,6 МэВ. Проникающая способность γ -лучей значительно больше, чем рентгеновских. Для поглощения наиболее жестких γ -лучей требуется слой свинца толщиной более 20 см. Интенсивность γ -лучей изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от источника излучения.

Интенсивность облучения рентгеновскими и γ -лучами определяется поглощенной веществом энергией радиации. За единицу поглощения

радиации принимается Рентген (Р). 1 Р соответствует радиационной энергии, поглощение которой в 1 см³ воздуха при нормальных условиях создает ионы с общим зарядом каждого знака в $\frac{1}{3 \cdot 10^9}$ Кл. При кратковременном облучении человека доза в 20 – 50 Р вызывает изменения в крови, доза в 100 – 250 Р вызывает лучевую болезнь, доза в 600 Р смертельна.

1.5 Открытие искусственного превращения атомных ядер

Исследуя пробег α -частиц в различных газах, Резерфорд в 1919 г сделал важное открытие. В спинарискоскопе, наполненном воздухом, сцинтилляции наблюдались и в том случае, когда расстояние от источника α -частиц до экрана было значительно больше длины пробега α -частиц в воздухе. При замене воздуха кислородом или углекислым газом сцинтилляции исчезали, а при наполнении азотом появлялись снова.

Резерфорд предположил, что сцинтилляции вызываются какими-то частицами, испускаемыми ядрами азота при попадании в них α -частиц. Исследования подтвердили это предположение, а опыты по отклонению в магнитном поле показали, что частицы, вылетающие из ядер азота, представляют собой протоны. Оказалось, что α -частица при прямом столкновении с ядром атома азота проникает в него; ядро азота после поглощения α -частицы становится неустойчивым и, выбрасывая протон, превращается в ядро атома кислорода. Таким образом, Резерфорд наблюдал превращение ядра гелия и азота в ядра кислорода и [водорода](#). [4]

Превращение ядер атомов одних элементов в ядра других получило название ядерных реакций. Большая заслуга Э. Резерфорда заключается в том, что он показал возможность осуществления искусственных ядерных реакций. Позднее английский физик Г. Блэкет сделал в камере Вильсона более 20000 фотографий следов α -частиц в азоте, и на восьми из них оказались заснятыми описанные ядерные реакции. Одна из таких фотографий показана на рисунке 1.9: след одной из α -частиц заканчивается вилкой;

короткий жирный след принадлежит ядру кислорода, а более тонкий и длинный – протону.

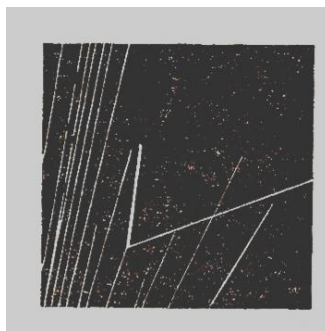


Рисунок 1.9 - След одной из α -частиц заканчивается вилкой; короткий жирный след принадлежит ядру кислорода, а более тонкий и длинный – протону

Э. Резерфорд и Д. Чэдвик обнаружили и другие ядерные реакции, вызываемые α -частицами. В некоторых из них энергия вылетающих протонов оказалась больше энергии поглощенных α -частиц. Это свидетельствует об освобождении энергии при такой ядерной реакции. Примером подобной реакции может служить превращение ядра атома алюминия при захвате α -частицы в ядро атома кремния с выбрасыванием протона высокой [энергии](#). [1]

Испускание протонов из атомных ядер различных элементов в описанных реакциях и кратность заряда ядер заряду протона свидетельствует о том, что протоны являются одними из тех элементарных частиц, из которых построены ядра. Однако, если бы ядра состояли только из протонов, то массы ядер были бы в Z раз больше массы протона, где Z – зарядовое число (атомный номер элемента). В действительности массы ядер значительно больше. Следовательно, кроме протонов в атомных ядрах имеются и другие частицы.

1.6 Открытие нейтрона

Опыты по облучению легких элементов α -частицами показали, что не во всех случаях протекают ядерные реакции с испусканием протонов.

Немецкие ученые В. Боте и Г. Беккер в 1930 г обнаружили, что при бомбардировке бериллия α -частицами возникает новое излучение, обладающее очень высокой проникающей способностью, названное вначале бериллиевыми лучами. Это излучение не оставляло следов в камере Вильсона и не вызывало сцинтилляций, не испытывало отклонения в электрическом и магнитных полях, но выбивало ядра водорода (протоны) из веществ, содержащих водород, а также ядра других атомов, например азота из его соединений. Аналогичное излучение было обнаружено затем и при облучении α -частицами бора и ряда других элементов.

Первоначально предполагали, что бериллиевые лучи представляют собой γ -излучение. Однако эти лучи проникали сквозь такие толстые слои свинца, которые задерживали все другие известные γ -лучи. Кроме того, расчеты показывали, что энергия фотонов, соответствующая этому излучению, получалась неправдоподобно большой, да еще и неодинаковой в случае выбивания протона, ядра атома азота и ядер других ядер. Все это вызывало сомнение в том, что бериллиевые лучи являются γ -[излучением](#). [1]

В 1932 г Чэдвик предположил, что бериллиевые лучи состоят из нейтральных частиц с массой, близкой к массе протона. Эти частицы он назвал нейтронами. Дальнейшие исследования подтвердили предположения Чэдвика. Так была открыта еще одна элементарная частица – нейтрон. Его масса покоя равна $1,6747 \times 10^{-27}$ кг, т.е. чуть больше массы протона. Впоследствии на многих снимках в камере Вильсона были зафиксированы столкновения нейтронов с ядрами различных атомов. Одна из таких фотографий показана на рисунке 10. На ней виден след протона, выбитого из парафина нейтроном (сам нейтрон следа не оставляет).



Рисунок 1.10- Снимок в камере Вильсона, виден след протона, выбитого из парафина нейтроном

Поскольку нейтроны не имеют заряда, они не взаимодействуют с электронами атомов и не образуют ионов на своем пути (прямое попадание в электрон происходит очень редко). Этим и объясняется высокая проникающая способность потока нейтронов. Нейтрон летит прямолинейно до тех пор, пока не столкнется с атомным ядром. При упругом столкновении с тяжелыми ядрами нейтрон почти не теряет энергии, а отскакивая от них, подобно тому как мячик отскакивает от стены. При столкновении же с легкими ядрами нейтрон передает им заметную часть своей энергии, а сам после удара движется медленнее. После ряда столкновений его кинетическая энергия становится близкой к энергии теплового движения частиц окружающей среды. Такие медленно движущиеся нейтроны называются тепловыми. Наиболее эффективными замедлителями нейтронов являются вещества, содержащие водород, например парафин, вода и т.п. Хорошим замедлителем является [углерод](#). [6]

Вероятность столкновения нейтронов с ядрами атомов значительно больше, чем у заряженных частиц, так как нейтроны не испытывают электростатического отталкивания со стороны ядер, как, например, α -частицы. При неупругих столкновениях с ядрами нейтроны легко проникают в ядра и вызывают ядерные превращения очень многих элементов.

1.7 Состав атомного ядра. Запись ядерных реакций

Открытие нейтронов позволило немецкому ученому В. Гейзенбергу и советскому физику Д. Д. Иваненко создать гипотезу строения атомных ядер, согласно которой все атомные ядра состоят только из протонов и нейтронов, которые получили общее название нуклонов.

Поскольку масса нуклона, выраженная в относительных единицах, очень близка к единице (масса протона составляет 1,007276, а масса нейтрона – 1,008665), то и масса атомного ядра в относительных единицах близка к целому числу, равному числу нуклонов в ядре. Это число называют массовым числом и обозначают буквой A . Так как число протонов в ядре выражается зарядовым числом Z , то число нейтронов равно $A - Z$.

Поскольку почти вся масса атома сосредоточена в ядре, относительная масса атома должна быть близка к целому числу A . Однако в действительности для многих элементов наблюдаются отклонения от этого правила. Причины таких отклонений будут рассмотрены в следующем [параграфе](#). [1]

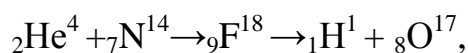
При записи ядерных реакций применяются удобные обозначения, указывающие состав ядра и его положение в таблице Менделеева. Для обозначения атомного ядра используется символ соответствующего химического элемента. Внизу слева от символа ставится зарядовое число Z , а вверху справа – массовое число A . Например, символ ${}^4_2\text{He}$ обозначает ядро гелия, содержащее четыре нуклона, два из которых протоны, а два других – нейтроны.

Для свободного нейтрона, находящегося вне ядра, применяется символ ${}_0^1\text{n}$, т.к. его заряд равен нулю, а для протона – символ ${}_1^1\text{H}$. Электрон обозначается символом β^- или ${}_{-1}^0\text{e}$. Нуль наверху означает, что масса электрона мала по сравнению с массой нуклона и не может изменять значения массовых чисел в ядерных реакциях.

Используя эти обозначения, радиоактивный распад урана с образованием α -частиц можно записать следующим образом:
 ${}_{92}\text{U}^{238} \rightarrow {}_{90}\text{Th}^{234} + {}_2\text{He}^4$.

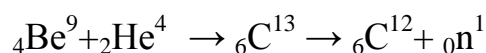
Такая запись показывает, что при распаде урана получаются торий и гелий. Следует помнить, что в ядерных реакциях сохраняется число нуклонов и заряд; происходит только их перераспределение между ядрами. Поэтому суммы верхних индексов в левой и правой частях уравнения ядерной реакции должны быть одинаковыми. Это же относится и к нижним [индексам](#). [2]

Реакция образования протонов при поглощении α -частиц ядрами азота записывается так:

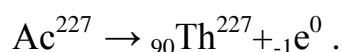


т.е. ядро азота, поглощая α -частицу, превращается в нестабильное ядро фтора, которое, испуская протон, в свою очередь превращается в ядро кислорода.

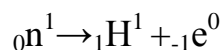
Уравнение ядерной реакции, происходящей при облучении бериллия α -частицами, записывается следующим образом:



В реакции превращения актиния в торий образуются β -частицы:



Возникает вопрос: как могут вылетать отрицательно заряженные электроны из ядер, содержащих только положительные и нейтральные частицы? Оказывается, электрон возникает в момент распада ядра, в результате превращения одного из внутриядерных нейтронов в протон:



(это уравнение не совсем полно отражает распад нейтронов). В ядрах нерадиоактивных элементов нейтроны не подвержены такому распаду.

1.8 Изотопы

Изучение радиоактивных превращений показало, что в природе встречаются атомные ядра с одинаковыми зарядовыми числами Z , но с различными массовыми числами A , которые английский физик Ф. Содди предложил называть изотопами, т.к. они занимают одно и то же место в таблице Менделеева. Было установлено, что при радиоактивных превращениях изотопы встречаются часто, например, атомные ядра радона бывают трех типов: с массовыми числами 219, 220, 222. Несколько изотопов имеют уран, радий, [торий и др.](#)[1]

Однако оставалось неясным, имеются ли изотопы у других, нерадиоактивных химических элементов. Не объясняется ли дробное значение относительных атомных масс наличием изотопов? Например, относительная атомная масса хлора равна 35,5; не означает ли это, что хлор состоит из смеси двух или более изотопов?

Поиски изотопов среди нерадиоактивных элементов были начаты английским ученым Дж. Томсоном. В 1912 г он, исследуя каналовые лучи в заполненной неоном трубке, обнаружил атомы неона двух типов: с массовыми числами 20 и 22. Это доказывало, что изотопы могут быть и у нерадиоактивных элементов. Продолжая работы Дж. Томсона, В. Астон в 1919 г построил прибор, позволивший определять массы атомов с точностью до 0,01% и давший возможность установить наличие изотопов у многих элементов. Приборы для определения масс атомов получили название масс-спектрографов.

Схема одного из масс-спектрографов показана на рисунке 11. Прибор состоит из конденсатора с пластинами П и магнитов, которые на рисунке не показаны. Верхние диафрагмы D_1 и D_2 пропускают в конденсатор узкий пучок положительных ионов исследуемого химического элемента. Внутри

конденсатора создается электрическое поле, которое отклоняет пролетающие ионы вправо, и магнитное поле с индукцией B (направленное на читателя), отклоняющее ионы влево. При таком действии полей только ионы, имеющие строго определенную скорость, летят прямолинейно, все остальные отклоняются вправо или влево. Таким образом, через щель диафрагмы D_3 пролетают только ионы, обладающие одинаковыми скоростями. Внизу они попадают в магнитное поле с индукцией B' (также направленное на читателя), под действием которого начинают двигаться по окружности, причем радиус окружности тем больше, чем больше масса иона.

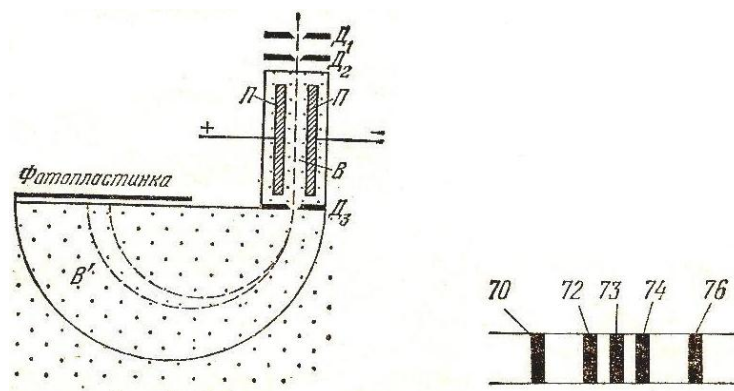


Рисунок 1.11- Схема из масс-спектрографа и спектрограмма масс изотопов германия

Описав полуокружность, ионы попадают на фотопластинку. В зависимости от массы ионы изотопов движутся по разным окружностям и попадают в различные места фотопластинки. Число изображений щели D_3 на фотопластинке соответствует числу изотопов, а положение изображений позволяет определить массы изотопов с высокой точностью. Такие фотографии называются спектрограммами масс [ИЗОТОПОВ](#). [1]

На рисунке 1.11, справа изображена спектрограмма масс изотопов германия. Германий имеет пять изотопов с массовыми числами 70, 72, 73, 74

и 76. Очевидно, моль смеси этих изотопов в зависимости от их процентного содержания может оказаться равным любому числу в пределах от 70 до 76. В действительности их процентное содержание в земной коре таково, что относительная атомная масса германия составляет 72,6.

Хлор оказался смесью двух изотопов с массовыми числами 35 (около 75%) и 37 (25%). Понятно, почему относительная атомная масса хлора 35,5.

Масс-спектроскопические исследования показали, что изотопы имеются у всех химических элементов. Некоторые из них радиоактивны, другие – стабильны. Ряд тяжелых элементов имеет только радиоактивные изотопы с различными периодами [полураспада](#). [8]

Когда было установлено, что ядра атомов состоят из протонов и нейтронов, стало ясно, что атомные ядра изотопов какого-либо химического элемента имеют одинаковое число протонов, но отличаются количеством нейтронов и поэтому имеют разные массы. Поскольку зарядовые числа Z у них одинаковы, атомы изотопов имеют одинаковые электронные оболочки и обладают одинаковыми химическими и почти одинаковыми физическими свойствами. Поэтому химическим путем изотопы не разделяются; для их разделения используются возникающие за счет разной массы атомов небольшие различия в скоростях испарения, диффузии.

Большое практическое значение имеют изотопы водорода. Кроме изотопа ${}^1_1\text{H}$ существует так называемый тяжелый водород или дейтерий. Его атомные ядра ${}^2_1\text{H}$ состоят из одного протона и одного нейтрона, их называют дейтронами и обозначают иногда буквой D. Доля ${}^2_1\text{H}$ составляет 1/6000 часть атомов водорода.

Соединение дейтерия с кислородом D_2O называется тяжелой водой. Она имеет плотность $1,108 \cdot 10^3$ кг/м³, замерзает при 3,8⁰С и кипит при 101,4⁰С. В небольшом количестве молекулы D_2O всегда имеется в природной воде. Тяжелую воду можно отделить с помощью электролиза. При электролизе преимущественно разлагаются молекулы H_2O , поскольку ионы

D^+ тяжелее и менее подвижны, чем ионы H^+ . Поэтому остающаяся после электролиза вода обогащается тяжелой [водой](#). [1]

Имеется и третий изотоп водорода – тритий, обозначаемый буквой T, ядро которого 3_1H состоит из протона и двух нейтронов. Он радиоактивен и имеет период полураспада 12,26 года.

С помощью масс-спектрографа были обнаружены изотопы и у самого тяжелого из известных в то время элементов – урана. Природный уран в основном состоит из смеси двух изотопов: ${}_{92}U^{238}$ (с периодом полураспада $4,5 \cdot 10^9$ лет) и ${}_{92}U^{235}$ ($7 \cdot 10^8$ лет), причем на долю ${}_{92}U^{238}$ приходится 99,3%, а на долю ${}_{92}U^{235}$ – лишь около 0,7%.

1.9 Понятие о ядерных силах

Если атомные ядра состоят только из протонов и нейтронов, то как объяснить устойчивость ядер? Одноименно заряженные протоны, находясь на очень малых расстояниях в атомном ядре, должны с огромной силой отталкиваться друг от друга. Несмотря на это, ядра атомов – чрезвычайно прочные образования.

Так, например, чтобы разорвать ядро гелия на отдельные протоны и нейтроны, необходимо затратить в сотни тысяч раз больше энергии, чем для отрыва обоих его электронов от ядра. Значит, внутри ядра действуют чрезвычайно большие силы притяжения между нуклонами, во много раз превышающие электрические силы. Такими силами не могут быть гравитационные силы, действующие в соответствии с законом всемирного тяготения, т.к. их величина во много раз меньше сил электрического отталкивания протонов. Следовательно, ядерные силы представляют собой новый вид сил. Это самые сильные из всех известных взаимодействий в природе.

Уже из описанных выше опытов Резерфорда по рассеянию α -частиц атомными ядрами следует, что ядерные силы действуют только на очень малых расстояниях, не более 10^{-14} м. Взаимодействие между нуклонами изучают по рассеянию нуклонов на нуклонах. Бомбардируя ядра атомов водорода протонами или нейтронами и исследуя отклонения летящих частиц, изучают силы взаимодействия между двумя протонами и между протоном и нейтроном. Исследования показали, что ядерные силы притяжения действуют между любыми двумя нуклонами на расстояниях между центрами частиц около $2 \cdot 10^{-15}$ м и резко спадают при увеличении расстояния; при расстояниях более $3 \cdot 10^{-15}$ м они уже практически равны нулю. Когда же нуклоны при столкновении сближаются до расстояния $0,5 \cdot 10^{-15}$ м, ядерные силы переходят в силы отталкивания. Таким образом, взаимодействие двух нуклонов внешне напоминает взаимодействие двух молекул, но силы и энергия взаимодействия нуклонов в миллионы раз больше, а расстояния в миллионы раз меньше.

Очень малый радиус действия ядерных сил означает, что внутри ядра, содержащего несколько нуклонов, каждый из них может взаимодействовать только с ближайшими к нему нуклонами, а не со всеми нуклонами ядра. Если это так, то плотность вещества во всех ядрах должна быть примерно одинаковой и не должна возрастать по мере увеличения числа нуклонов в ядрах. Действительно, плотность ядерного вещества, как легких, так и тяжелых ядер почти одинакова и составляет около 10^{17} кг/м³, т.е. 1 см³ ядерного вещества весил бы [100млн. т.](#)[1]

Можно заметить некоторое сходство атомного ядра с каплей жидкости. Нуклоны в ядре, как и молекулы в жидкости, взаимодействуют только со своими ближайшими соседями. Плотность ядра, как и капли, не зависит от размера. Поверхностные нуклоны односторонне связаны с внутренними, и под действием сил поверхностного натяжения ядро, как и капля, должно принимать сферическую форму.

В возбужденном ядре нуклоны колеблются, подобно молекулам в нагретой капле. Многочисленные столкновения могут привести к тому, что какой-нибудь из них получит энергию, достаточную для преодоления ядерных сил, и вылетит из ядра, подобно молекуле жидкости при испарении. Когда заряженная частица, например протон α -частица, находится на расстоянии, превышающем радиус действия ядерных сил, ядро действует на нее просто как положительно заряженная капля; на нейтрон же при этом ядро не действует. Капельная модель ядра позволяет рассчитывать радиусы ядер и наглядно объяснить некоторые свойства ядер.

Опыт показывает, что ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ обладают особенно большой прочностью. Поэтому при радиоактивном распаде из ядер тяжелых элементов часто выбрасываются α -частицы. Следовательно, внутри ядра наибольшие силы притяжения действуют между двумя протонами и двумя нейтронами. Вообще, ядра, состоящие из равного числа протонов и нейтронов, оказываются наиболее прочными, если число протонов в них не слишком велико. При большом числе протонов в ядре силы электрического отталкивания, действующие, в отличие от ядерных сил, между всеми протонами ядра (а не только между ближайшими), делают его менее прочным. Более устойчивыми оказываются ядра, в которых нейтронов больше, чем протонов.

В настоящее время природа ядерных сил недостаточно ясна. Установлено, что они являются так называемыми обменными силами. Обменные силы носят квантовый характер и не имеют аналогии в обычной физике. Нуклоны связываются между собой третьей частицей, которой они постоянно обмениваются. В 1935 г японский физик Х. Юкава показал, что теоретические значения сил взаимодействия нуклонов совпадают с данными экспериментов, если предположить, что нуклоны обмениваются частицами, масса которых примерно в 250 раз больше массы электрона. Эти частицы впоследствии были названы π -мезонами или пионами.

Предсказанные частицы, действительно удалось обнаружить в 1947 г с помощью толстослойных фотопластинок английскому физику С. Пауэллу при изучении космических лучей на больших высотах.

Масса покоя пиона примерно в 270 раз больше массы электрона. Пионы бывают трех видов: положительные π^+ , отрицательные π^- и нейтральные π^0 . Взаимодействие между однородными нуклонами осуществляется нейтральными π -мезонами, а взаимодействие между различными нуклонами – заряженными π -мезонами. Обмениваясь заряженными π -мезонами, протон и нейтрон непрерывно превращаются друг в друга. Протон, отдавая нейтрону положительный π -мезон сам превращается в нейтрон, а исходный нейтрон, поглощая этот π -мезон, превращается в протон. Аналогично происходит взаимодействие посредством отрицательного π -мезона. Взаимные превращения нейтрона и протона подтверждаются опытами по рассеянию потока нейтронов на [протонах](#). [1]

Свободные пионы могут образоваться в результате столкновения протона высокой энергии с другим протоном или нейтроном. Они возникают при бомбардировке атомных ядер космическими частицами и в ускорителях при бомбардировке ядер протонами. Однако менее чем за 10^{-7} с свободные пионы распадаются на другие частицы.

1.10 Дефект массы атомных ядер. Энергия связи

Нуклоны в атомном ядре связаны между собой ядерными силами; поэтому чтобы разделить ядро на составляющие его отдельные протоны и нейтроны, необходимо затратить большую энергию. Эта энергия называется энергией связи ядра.

Такая же по величине энергия освобождается, если свободные протоны и нейтроны соединяются и образуют ядро. Следовательно, согласно

специальной теории относительности Эйнштейна масса атомного ядра должна быть меньше суммы масс свободных протонов и нейтронов, из которых оно образовалось. Эта разность масс Δm , соответствующая энергии связи ядра $E_{\text{св}}$, определяется соотношением Эйнштейна:

$$E_{\text{св}} = c^2 \Delta m, \quad (1)$$

где c - скорость электромагнитных волн в вакууме равна $3 \cdot 10^8$ м/с²;

Δm – дефект массы атомного ядра.

Энергия связи атомных ядер настолько велика, что эта разность масс вполне доступна непосредственному измерению. С помощью масс-спектрографов такая разность масс действительно обнаружена для всех атомных ядер.

Разность между суммой масс покоя свободных протонов и нейтронов, из которых образовано ядро, и массой ядра называется дефектом массы ядра.

Энергию связи обычно выражают в мегаэлектронвольтах (МэВ) (1 МэВ = 10^6 эВ). Поскольку атомная единица массы (а. е. м.) равна $1,66 \cdot 10^{-27}$ кг, можно определить соответствующую ей энергию:

$$E = mc^2,$$

$$E_{\text{а.е.м.}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж},$$

или

$$E_{\text{а.е.м.}} = \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж/МэВ}} = 931,4 \text{ МэВ}.$$

Энергию связи можно измерять непосредственно по балансу энергии в реакции расщепления ядра. Так впервые была определена энергия связи дейтрона при его расщеплении γ -квантами. Однако из формулы (1) энергию связи можно определить гораздо точнее, поскольку с помощью масс-спектрографа можно измерить массы изотопов с точностью $10^{-4}\%$.

Подсчитаем, например, энергию связи ядра гелия ${}^4_2\text{He}$ (α -частицы). Его масса в атомных единицах равна $M({}_2\text{He}^4)=4,001523$; масса протона $m_p=1,007276$, масса нейтрона $m_n=1,008665$. Отсюда дефект массы ядра гелия

$$\Delta m=2m_p+2m_n-M({}_2\text{He}^4),$$

$$\Delta m=2\cdot 1,007276+2\cdot 1,008665-4,001523=0,030359.$$

Умножив на $E_{\text{а.е.м.}}=931,4$ МэВ, получим

$$E_{\text{св}}=0,030359\cdot 931,4 \text{ МэВ}\approx 28,3 \text{ МэВ}.$$

С помощью масс-спектрографа были измерены массы всех изотопов и определены значения дефекта массы и энергии связи ядер.

Если суммарная масса ядер и частиц, образовавшихся в какой-либо ядерной реакции, меньше суммарной массы исходных ядер и частиц, то в такой реакции освобождается энергия, соответствующая этому уменьшению массы. Когда общее число протонов и общее число нейтронов сохраняется, уменьшение суммарной массы означает, что в результате реакции увеличивается общий дефект массы и в новых ядрах нуклоны еще сильнее связаны друг с другом, чем в исходных ядрах. Освобождающаяся энергия равна разности между суммарной энергией связи образовавшихся ядер и суммарной энергией связи исходных ядер, и ее можно найти с помощью таблицы, не вычисляя изменение общей массы. Эта энергия может выделяться в окружающую среду в виде кинетической энергии ядер и частиц или в виде γ -квантов. Примером реакции, сопровождающейся выделением энергии, может служить любая самопроизвольная [реакция](#). [1]

Проведем энергетический расчет ядерной реакции превращения радия в радон:

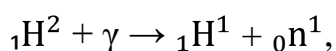


Энергия связи исходного ядра составляет 1731,6 МэВ, а суммарная энергия связи образовавшихся ядер равна $1708,2+28,3=1736,5$ МэВ и больше энергии связи исходного ядра на 4,9 МэВ. Следовательно, в этой реакции

освобождается энергия 4,9 МэВ, которая в основном составляет кинетическую энергию α -частицы.

Если в результате реакции образуются ядра и частицы, суммарная масса которых больше, чем у исходных ядер и частиц, то такая реакция может протекать только с поглощением энергии, соответствующей этому увеличению массы, и самопроизвольно никогда не произойдет. Величина поглощенной энергии равна разности между суммарной энергией связи исходных ядер и суммарной энергией связи образовавшихся в реакции ядер. Таким путем можно рассчитать, какой кинетической энергией должна обладать при столкновении с ядром-мишенью частица или другое ядро, чтобы осуществить такого рода реакцию, или вычислить необходимую величину γ -кванта для расщепления какого-либо ядра.

Так, минимальная величина γ -кванта, необходимая для расщепления дейтрона, равна энергии связи дейтрона 2,2МэВ, поскольку в этой реакции:



образуются свободные протон и нейтрон ($E_{\text{св}}=0$).

Хорошее совпадение подобного рода теоретических расчетов с результатами опытов показывает правильность приведенного выше объяснения дефекта массы атомных ядер и подтверждает установленный теорией относительности принцип пропорциональности массы и энергии.

Следует заметить, что реакции, в которых происходит превращение элементарных частиц (например, β -распад), также сопровождаются выделением или поглощением энергии, соответствующей изменению общей массы частиц.[1]

Важной характеристикой ядра служит средняя энергия связи ядра, приходящаяся на один нуклон, $E_{\text{св}}/A$. Чем она больше, тем сильнее связаны между собой нуклоны, тем прочнее ядро. Из табл. 37.1 видно, что для

большинства ядер величина $E_{св}/A$ равна примерно 8 МэВ на нуклон и уменьшается для очень легких и очень тяжелых ядер. Среди легких ядер выделяется ядро гелия.

Зависимость величины $E_{св}/A$ от массового числа ядра A показана на рисунке 1.12.

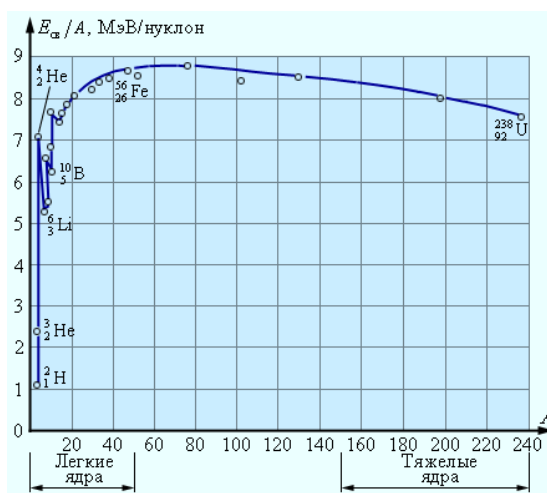


Рисунок 1.12- Зависимость величины энергии связи от массового числа ядра A

У легких ядер большая доля нуклонов находится на поверхности ядра, где они не полностью используют свои связи, и величина $E_{св}/A$ невелика. По мере увеличения массы ядра отношение поверхности к объему уменьшается и уменьшается доля нуклонов, находящихся на поверхности. Поэтому $E_{св}/A$ растет. Однако по мере увеличения числа нуклонов в ядре возрастают кулоновские силы отталкивания между протонами, ослабляющие связи в ядре, и величина $E_{св}/A$ у тяжелых ядер уменьшается. Это можно наблюдать при работе с интерактивной моделью, рисунок 1.13. Таким образом, величина $E_{св}/A$ максимальна у ядер средней массы (при $A=50\div 60$), следовательно они отличаются наибольшей прочностью. [9]

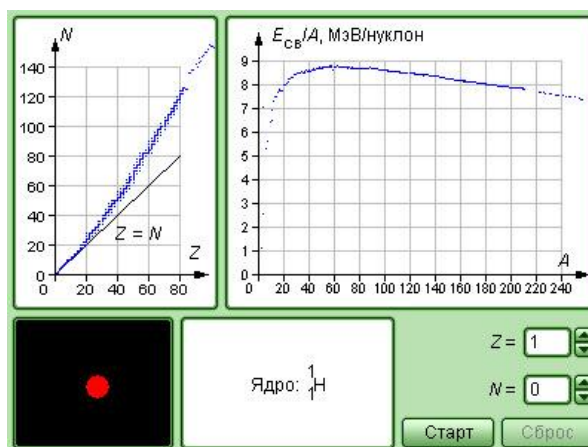


Рисунок 1.13- Модель. Энергия связи ядер

Отсюда следует важный вывод. В реакциях деления тяжелых ядер на два средних ядра, а также при синтезе среднего или легкого ядра из двух более легких ядер получают ядра прочнее исходных (с большей величиной $E_{св}/A$). значит, при таких реакциях освобождается энергия. На этом основано получение атомной энергии при делении тяжелых ядер и термоядерной энергии – при синтезе ядер.

2 Радиоактивные излучения

2.1 Элементарные частицы

Если в воздухе нет ионов, то заряженный электроскоп должен сохранять свой заряд неопределенно долгое время. Однако опыт показывает, что электроскоп постепенно разряжается.

Вначале это явление объясняли ионизирующим действием радиоактивного излучения Земли. Если это так, то по мере удаления от поверхности Земли ионизирующее воздух излучение должно ослабевать. Еще в 1912 г с помощью воздушных шаров было установлено, что интенсивность ионизирующего излучения возрастает с увеличением высоты.

Следовательно, это излучение возникает не на Земле, а где-то в мировом пространстве. Поэтому его стали называть космическими лучами.

Изучение космических лучей в высокогорных областях показало, что они состоят из пионов, протонов, нейтронов и других частиц, среди которых были обнаружены и многие не известные ранее частицы. Эти частицы были названы вторичными частицами, т.к. выяснилось, что они образуются в верхних слоях атмосферы при взаимодействии первичных космических частиц, летящих из мирового пространства, с ядрами атомов атмосферы.

Исследования показали, что интенсивность космических лучей вблизи магнитных полюсов Земли примерно в 1,5 раза больше, чем на экваторе. Изучение отклоняющего действия магнитного поля Земли на первичное космическое излучение показало, что оно состоит из положительно заряженных частиц. Много ценных сведений о первичном космическом излучении получено с помощью искусственных спутников и космических кораблей. В настоящее время установлено, что первичное космическое излучение состоит из стабильных частиц высоких энергий, летящих в самых различных направлениях в космическом пространстве. Интенсивность космического излучения в районе Солнечной системы составляет в среднем 2 – 4 частицы на 1 см^2 за 1 с. Оно состоит в основном из протонов (~91%) и α -частиц (6,6%); небольшая часть приходится на ядра других элементов (менее 1%) и электроны (~1,5%).

Среднее значения энергии космических частиц – около 10^4 МэВ, а энергия отдельных частиц достигает чрезвычайно высоких значений: 10^{12} МэВ и более. Где возникают космические частицы и как они ускоряются до таких огромных энергий, еще точно неизвестно. Предполагают, что они выбрасываются при взрывах новых и сверхновых звезд и ускоряются при взаимодействии с неоднородными магнитными полями в межзвездном [пространстве](#). [1]

Солнце периодически (во время вспышек) испускает солнечные космические лучи, которые состоят в основном из протонов и α -частиц, имеют небольшую энергию, но высокую интенсивность, что приходится учитывать при планировании космических полетов. Вторичные частицы также обладают очень высокой энергией и при столкновении с ядрами вызывают дальнейшее размножение частиц.

На рисунке 2.1 показана зафиксированная на толстослойной фотопластине увеличенная картина разрушения атомного ядра при попадании в него частицы большой энергии (около $2 \cdot 10^3$ МэВ). След ударившей в ядро частицы невидим (по-видимому, это нейтрон). Ядро распалось на 17 частиц, разлетевшихся в разные стороны.

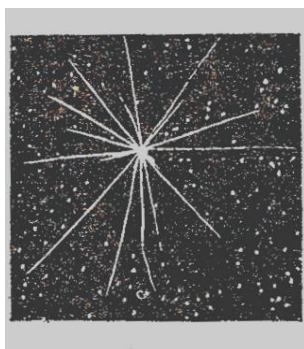


Рисунок 2.1- Картина разрушения атомного ядра при попадании в него частицы большой энергии

В результате лавинообразного размножения частиц в верхних слоях атмосферы образуется каскадный ядерный ливень. На рисунке 2.2 изображен искусственный каскадный ливень, полученный в камере Вильсона, перегороденной свинцовыми пластинами. Частицы высокой энергии, проходя через слой свинца, создает ливень частиц, которые при прохождении следующих слоев свинца создают новые ливни.

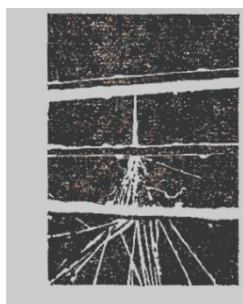


Рисунок 2.2- Снимок в камере Вильсона, изображен искусственный каскадный ливень

Ядерный ливень в атмосфере затухает, когда энергия частиц снижается до нескольких десятков мегаэлектронвольт. Остаток энергии протоны тратят на ионизацию воздуха; нейтроны поглощаются ядрами, вызывая различные ядерные реакции, а пионы, составляющие основную часть ливневых частиц, распадаются. Образующиеся в большом количестве фотоны и электроны сильно поглощаются атмосферой.

Нейтральные пионы очень быстро превращаются в два фотона высокой энергии. При распаде заряженных пионов образуются новые частицы – μ -мезоны, или мюоны, которые были открыты К. Андерсоном в 1935 г при изучении космических лучей, задолго до открытия пионов. Масса мюона в 207 раз больше массы электрона, т.е. составляет около $3/4$ массы пиона. Существуют мюоны только двух видов – положительно и отрицательно заряженные; они обозначаются μ^+ и μ^- . При распаде π^+ -мезонов образуются μ^+ -мезоны, а при распаде π^- -мезонов – μ^- -[мезоны](#). [1]

Оказывается, что, в отличие от пионов, мюоны не участвуют в ядерных взаимодействиях и расходуют энергию только на ионизацию. Поэтому они обладают высокой проникающей способностью и составляют так называемую жесткую компоненту космического излучения. Мюоны пролетают сквозь атмосферу, и их обнаруживают даже на значительной глубине под поверхностью Земли. Мюоны нестабильны, они существуют всего несколько микросекунд и распадаются на другие частицы.

На уровне моря космическое излучение имеет примерно в сто раз меньшую интенсивность, чем на границе атмосферы, и состоит в основном из мюонов. Остальную часть составляют электроны и фотоны и незначительное количество ливневых частиц. Из первичного космического излучения только отдельные частицы, с исключительно высокой энергией (более 10^7 МэВ), пробиваются сквозь атмосферу.

В космических лучах мюоны, как и пионы, летят со скоростями, близкими к скорости света, и поэтому благодаря релятивистскому замедлению времени успевают до своего распада пролететь большие расстояния.

2.2 Открытие позитрона

В 1928 г английский ученый П. Дирак на основе развитой им релятивистской квантовой теории предсказал существование частицы, подобной электрону, но с положительным зарядом, названной позже позитроном.

В 1932 г К. Андерсон при изучении космического излучения обнаружил следы позитронов. Он применил в камере Вильсона сильное магнитное поле и обнаружил слабо искривленные следы, которые можно было приписать неизвестной положительно заряженной частице высокой энергии. Чтобы проверить это предположение, нужно было точно установить направление движения частицы, т.к. только в этом случае по ее отклонению в магнитном поле можно установить знак ее заряда. Андерсон перегородил камеру свинцовой пластиной: пройдя сквозь нее, частица должна уменьшить свою скорость и двигаться по более искривленной траектории. На одной из фотографий он снова обнаружил след этой частицы (рисунок 2.3); магнитное поле направлено от читателя). Направление движения частицы и положительный знак ее заряда теперь уже сомнений не вызывали.

(Подумайте, какой след мог бы оставить электрон, имевший такую же энергию?).

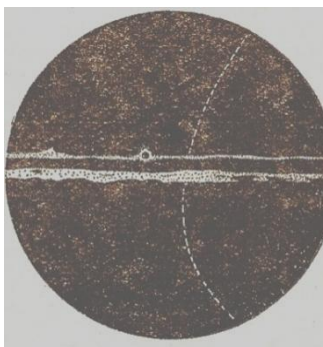


Рисунок 2.3- Снимок в камере Вильсона, виден след позитрона в сильном магнитном поле

Расчет показал, что масса и абсолютная величина заряда новой частицы точно такие же, как у электрона. Дальнейшие исследования подтвердили, что позитрон по своим свойствам подобен электрону, но отличается от него знаком заряда. В ядерных реакциях позитрон обозначается ${}_{+1}e^0$, β^+ или e^+ .

Заряд ядра при β^+ -распаде уменьшается на единицу, и элемент перемещается в таблице Менделеева на одно место [влево](#). [1]

2.3 Нейтрино

Из опытов было установлено, что при α -распаде какого-либо изотопа вылетающие из его ядер α -частицы обладают определенной энергией, характерной для данного изотопа, величину которой можно вычислить.

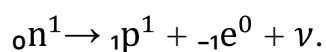
При β -распаде наблюдается иная картина. Вылетающие при распаде одинаковых ядер β -частицы обладают самыми различными энергиями, не превышающими, однако, характерной для данного изотопа максимальной величины. Эта максимальная энергия соответствует той энергии электронов, которая получается при расчете ядерной реакции на основании закона сохранения энергии. Возникает вопрос: куда исчезает часть энергии, когда электроны вылетают с меньшей скоростью? В 1930 г швейцарский физик В.

Паули высказал гипотезу о том, что при β -распаде из ядра вылетают две частицы: электрон и легкая нейтральная частица, уносящая часть освобождающейся энергии. Эта частица не оставляет следов, и ее не удавалось [обнаружить](#). [1]

В 1933 г Э. Ферми разработал теорию β -распада и назвал эту частицу нейтрино, т.е. «маленький нейтрон». Позднее были обнаружены ядерные реакции с образованием позитронов – β^+ -распад. В этом случае одновременно с позитроном из ядра также должно вылетать нейтрино, получившее обозначение ν . Та частица, которая вылетает из ядра вместе с электроном при β^- -распаде, была переименована в антинейтрино ($\bar{\nu}$).

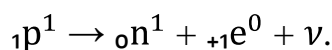
Нейтрино и антинейтрино подобны друг другу, но отличаются тем, что спин (вектор собственного момента количества движения) антинейтрино направлен в сторону его поступательного движения (т.е. это «правовинтовая» частица), а спин нейтрино направлен в сторону, противоположную движению («левовинтовая» частица). Обе частицы, как и фотон, движутся со скоростью света и имеют массу покоя, равную нулю.

Нейтрино и антинейтрино образуются при распаде внутриядерных нуклонов. При β^- -распаде один из нейтронов внутри ядра превращается в протон, электрон и антинейтрино:



Электрон и антинейтрино вылетают из ядра, а протон и оставшиеся нуклоны образуют новое ядро.

При β^+ -распаде ядра, содержащего избыток протонов, один из них превращается в нейтрон и одновременно испускаются позитрон и нейтрино:



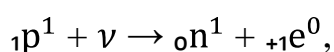
Эта реакция протекает с поглощением энергии, поскольку масса протона меньше массы нейтрона, и поэтому может происходить только в ядре. В свободном состоянии протон – стабильная [частица](#). [1]

В отличие от протонов, свободные нейтроны подвержены самопроизвольному β^- -распаду, поскольку масса нейтрона больше суммы масс протона и электрона. Период полураспада свободных нейтронов составляет около 12 мин.

Возникновение антинейтрино при β^- -распаде свободных нейтронов подтверждается не только законом сохранения энергии, но и законом сохранения количества движения (импульса). Действительно, если бы нейтрон распадался только на две частицы – протон и электрон, то при распаде неподвижного (или движущегося медленно) нейтрона они должны были бы разлетаться по одной прямой в противоположные стороны. В действительности следы протона и электрона в камере Вильсона составляют какой-то угол. Следовательно, одновременно с ними образуется третья частица.

Теория β^- -распада хорошо согласовывалась со всеми экспериментальными результатами. Однако обнаружить нейтрино и антинейтрино очень долго не удавалось. Дело в том, что эти очень маленькие нейтральные частицы практически совсем не взаимодействуют с веществом: пролетая мимо нуклона или сквозь него, они находятся в контакте с нуклоном столь короткое время, что в подавляющем большинстве случаев просто не успевают вступить с ним во взаимодействие. Поэтому они обладают огромной проникающей способностью, легко пронизывая Землю, [Солнце](#). [1]

Антинейтрино было обнаружено только в 1956 г. Американские физики Ч. Коуэн и Ф. Рейнес зарегистрировали захват антинейтрино протоном:



с образованием нейтрона и позитрона.

Источником антинейтрино служил ядерный реактор. Хотя вероятность захвата антинейтрино протоном ничтожно мала, при работе ядерного

реактора антинейтрино образуются в таком большом количестве (порядка 10^{18} за 1 с), что изредка такие события все же наблюдаются. Вскоре было зарегистрировано и нейтрино.

3 Атомная энергия и ее использование

3.1 Деление тяжелых атомных ядер

В лабораториях многих стран в 30-х годах проводились опыты по облучению природного урана нейтронами. В 1938 г. немецкие ученые О. Хан и О. Штрассман при анализе химически чистого урана, облученного нейтронами, обнаружили барий и лантан. Поскольку эти элементы находятся в середине таблицы Менделеева, их появление было непонятным.

Датские физики Л. Мейтнер и О. Фриш объяснили появление этих элементов распадом ядер урана на две примерно равные части.

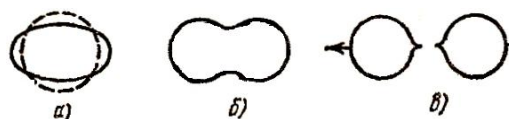


Рисунок 3.1- Распад ядер урана на две примерно равные части

Это явление получило название деления ядер, а образующиеся ядра – осколков деления. При делении тяжелых ядер должна освобождаться энергия. Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, $E_{св}/A$ у тяжелых ядер за счет кулоновских сил отталкивания между протонами почти на 1 МэВ ниже, чем у ядер со средней массой. Поскольку в каждом акте деления участвует более 200 нуклонов, общая энергия, освобождающаяся при делении одного тяжелого ядра, составляет около 200 МэВ. Это соответствует опытным данным.

Н. Бор приписал деление ядер природного урана изотопу ${}_{92}\text{U}^{235}$, что было подтверждено в 1940 г. Ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$, поглощая нейтроны, превращаются

в ядра ${}_{92}\text{U}^{236}$, которые за очень короткое время распадаются на две примерно одинаковые [части](#). [1]

Наглядную физическую картину деления дает представление ядра в виде положительно заряженной капли жидкости (капельная модель ядра). Ядро, поглотившее нейтрон, находится в возбужденном состоянии, поскольку при захвате нейтрона освобождается его энергия связи в новом ядре (7,6 МэВ для ${}_{92}\text{U}^{236}$); при поглощении быстрого нейтрона ядро получает еще и кинетическую энергию. Возбужденное ядро, подобно капле ртути при толчке, начинает колебаться, изменяя свою форму. Когда энергия возбуждения невелика, силам поверхностного натяжения удастся вернуть ядро к сферической форме (рисунке 3.1, а), если же ядро сильно возбуждено, то его деформация при колебаниях может быть настолько большой (рисунке 3.1, б), что в какой-то момент кулоновские силы отталкивания между двумя частями ядра начнут преобладать над ядерными силами сцепления между ними и ядро разорвется на две части, разлетающиеся в противоположные стороны (рисунке 3.1, в). Осколки деления редко бывают одинаковыми, чаще всего один из них примерно в полтора раза больше другого.

Оказалось, что ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$ также могут делиться, но для этого нужны быстрые нейтроны, обладающие энергией более 1,1 МэВ, иначе энергия возбуждения образовавшихся ядер ${}_{92}\text{U}^{239}$ оказывается недостаточной для деления, и тогда вместо деления происходят ядерные реакции, описанные в предыдущем параграфе.

3.2 Цепная реакция деления. Ядерный взрыв

В тяжелых атомных ядрах процентное содержание нейтронов значительно больше, чем в ядрах средней части таблицы Менделеева, осколки деления оказываются сильно перегруженными нейтронами. Поэтому при делении тяжелых ядер освобождаются нейтроны. Опыты показали, что

при делении одного ядра ${}_{92}\text{U}^{235}$, захватившего нейтрон, освобождается два-три нейтрона (в среднем 2,5 нейтрона на один акт деления). Эти вторичные нейтроны могут вызывать деление других ядер, и может возникнуть цепная реакция деления (рисунок 3.2), которая будет поддерживаться без внешнего облучения урана [нейтронами](#). [1]

Однако в реальных условиях далеко не все образующиеся при делении нейтроны участвуют в делении других ядер. Часть их захватывается неделящимися ядрами посторонних атомов, другие вылетают из куска урана наружу (утечка нейтронов).

Отношение числа делений, вызванных вторичными нейтронами, к числу делений, при которых сами они образовались, называется эффективным коэффициентом размножения нейтронов ($K_{\text{эфф}}$). Для ${}_{92}\text{U}^{235}$ он был бы равен 2,5, если бы все вторичные нейтроны участвовали в делении новых ядер.

При $K_{\text{эфф}} < 1$ каждое новое поколение нейтронов вызывает все меньшее и меньшее число делений и реакция без внешнего источника нейтронов быстро затухает. При $K_{\text{эфф}} = 1$ число делений поддерживается на постоянном уровне. Такой режим самоподдерживающейся цепной реакции называется критическим и создается в ядерных реакторах. При $K_{\text{эфф}} > 1$ каждое новое поколение нейтронов вызывает все большее число делений и цепная реакция лавинообразно нарастает. Поскольку нейтроны деления очень быстро (через $10^{-7} - 10^{-8}$ с) захватываются другими ядрами урана и вызывают их деление, такая цепная реакция очень быстро нарастает и имеет характер взрыва, сопровождающегося огромным выделением энергии и повышением температуры окружающей среды до нескольких миллионов градусов. Цепная реакция такого рода происходит при взрыве атомной бомбы.

Легко подсчитать, что если при делении одного ядра освобождается 200 МэВ энергии, то при делении $2,6 \cdot 10^{21}$ ядер, содержащихся в 1 грамме урана, освободится около $8,3 \cdot 10^{10}$ Дж энергии, что равноценно энергии, выделяемой при сжигании 3 тонн каменного угля.

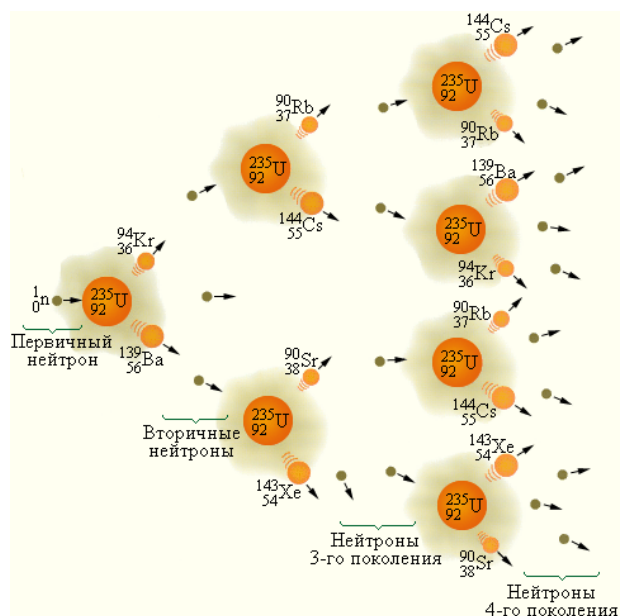


Рисунок 3.2- Схема развития цепной ядерной реакции

Цепная ядерная реакция может осуществляться на изотопах ${}_{92}\text{U}^{235}$, и ${}_{92}\text{U}^{233}$ и ${}_{94}\text{Pu}^{239}$. Эти вещества получили название ядерного горючего, или расщепляющихся материалов. Деление ядер этих изотопов вызывают нейтроны любой энергии, в том числе и медленные (тепловые) нейтроны.

Только один из расщепляющихся материалов, ${}_{92}\text{U}^{235}$, имеется в природе. Его содержание в природном уране составляет 0,7%. Основной изотоп природного урана ${}_{92}\text{U}^{238}$ не способен к цепной реакции. При делении каждого ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$, захватившего быстрый нейтрон, образуется 2–3 нейтрона, в среднем 2,5 нейтрона (как и при делении ${}_{92}\text{U}^{235}$). Однако в среднем один из них имеет энергию, недостаточную для деления, а из

оставшихся только 1/5 часть успевает вызвать деление новых ядер ${}_{92}\text{U}^{238}$, не растеряв свою энергию при столкновениях. Легко подсчитать, что для ${}_{92}\text{U}^{238}$ коэффициент размножения нейтронов не может быть больше 0,3, и цепная реакция невозможна.

Два других расщепляющихся материала получают искусственно: ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ – из ${}_{92}\text{U}^{238}$ при последовательных превращениях, а ${}_{92}\text{U}^{233}$ – в результате аналогичных превращений из тория ${}_{90}\text{Th}^{232}$. Эти превращения осуществляются в ядерных реакторах. Изотопы ${}_{90}\text{Th}^{232}$ и ${}_{92}\text{U}^{238}$, которые используются для получения расщепляющихся материалов, называются ядерным [сырьем](#). [8]

Как говорилось выше, для осуществления цепной реакции деления необходимо выполнение условия $K_{\text{эфф}} \geq 1$. Величина $K_{\text{эфф}}$ зависит от массы ядерного горючего. При малой массе большая доля нейтронов деления вылетает в окружающую среду, не вызвав деления новых ядер, и $K_{\text{эфф}} < 1$.

Для каждого типа ядерного горючего существует критическая масса, при которой поддерживается цепная реакция деления ($K_{\text{эфф}}=1$). Так, для чистого урана ${}_{92}\text{U}^{235}$ критическая масса составляет несколько десятков кг. Превышение критической массы в одном куске приводит к ядерному взрыву. На этом и основан принцип действия атомной бомбы. Она состоит из двух (или трех) кусков расщепляющегося материала, каждый из которых имеет массу меньше критической, но их общая масса превышает критическую. Для осуществления взрыва куски очень быстро сближаются (с помощью специального взрывателя) и соединяются. Небольшое количество нейтронов, обеспечивающие начало цепной реакции, всегда имеется в расщепляющемся материале вследствие спонтанного деления его ядер. При взрыве атомной бомбы успевает произойти расщепление примерно 5% ядерного горючего. Ясно, что хранить расщепляющиеся материалы можно только в виде небольших кусков, разделенных значительными [промежутками](#). [1]

Величина критической массы определяется многими факторами. В частности, она зависит от формы: у куска урана в виде шара наименьшая поверхность, а значит, и наименьшая утечка нейтронов.

Утечку нейтронов можно уменьшить, используя замедлители нейтронов, а также оболочки, отражающей нейтроны (например, из бериллия). С помощью таких средств можно снизить критическую массу ${}_{92}\text{U}^{235}$ до четверти килограмма.

3.3 Ядерный реактор

Чтобы цепная реакция деления поддерживалась на неизменном уровне, необходимо иметь возможность непрерывно регулировать ход этой реакции, поскольку даже незначительное превышение коэффициента размножения нейтронов над единицей немедленно приведет к взрыву, а при $K_{\text{эфф}} < 1$ цепная реакция быстро затухает. Это достигается в управляемой цепной реакции деления, впервые осуществленной в 1942 г. в США под руководством Э. Ферми и независимо в СССР в 1946 г. под руководством И. В. Курчатова. Установка, в которой осуществляется управляемая цепная ядерная реакция, называется ядерным реактором.

Главной частью реактора (рисунок 3.3) является активная зона, в которой протекает самоподдерживающаяся цепная реакция деления и выделяется энергия. В активной зоне размещены тепловыделяющие элементы (ядерное топливо) 1. Для уменьшения утечки нейтронов активная зона окружена отражателем нейтронов 2. Реакцией управляют с помощью регулирующих стержней 4, сделанных из материала, сильно поглощающего нейтроны (кадмий и бор). При определенной глубине погружения стержней в активную зону реакция деления протекает с постоянной интенсивностью ($K_{\text{эфф}}=1$). Этот критический режим непрерывно поддерживается с помощью автоматического устройства, которое управляет перемещением стержней и

мгновенно реагирует даже на незначительное увеличение или уменьшение интенсивности реакции.

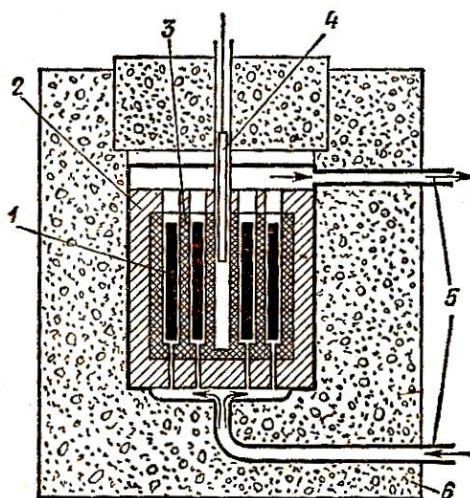


Рисунок 3.3- Схема устройства главной части ядерного реактора

Можно построить ядерный реактор на чистом расщепляющемся материале, однако проще и дешевле использовать смеси изотопов. Часто в качестве ядерного топлива используется природный уран, в котором на один атом ${}_{92}\text{U}^{235}$ приходится 140 атомов ${}_{92}\text{U}^{238}$, или уран, несколько обогащенный изотопом ${}_{92}\text{U}^{235}$.

Как говорилось выше, ядра изотопа ${}_{92}\text{U}^{238}$ захватывают нейтроны в большинстве случаев без последующего деления. Поэтому, казалось бы, в среде с большим содержанием ${}_{92}\text{U}^{238}$ цепная реакция деления невозможна. Однако оказывается, что ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$ очень слабо поглощают медленные (тепловые) нейтроны, в то время как ядра делящегося изотопа ${}_{92}\text{U}^{235}$, наоборот, гораздо эффективнее поглощают медленные нейтроны, чем быстрые. Поэтому, если нейтроны, образующиеся при делении, замедлять, цепная реакция становится возможной и на природном уране. Сам уран плохо замедляет нейтроны, поскольку у него очень тяжелые ядра. Наиболее

эффективно замедляют нейтроны вещества, состоящие из легких атомов. Необходимо, чтобы замедлитель сам слабо поглощал нейтроны. Хорошими замедлителями являются гелий, не поглощающий нейтроны, и тяжелая вода. На практике обычно используют в качестве замедлителей углерод (в виде графита) или обычную воду. Схема цепной реакции на медленных нейтронах изображена на рисунке 3.4.

Активная зона реактора на тепловых нейтронах заполнена замедлителем, внутри которого размещены стержни или пластины из ядерного топлива. Выделяющееся при реакции тепло отводится из активной зоны теплоносителем, циркулирующим по специальным каналам. Чаще всего эту роль выполняет вода под большим давлением; применяются также газы и жидкий натрий. Это тепло используют для получения водяного пара, приводящего в действие турбогенератор АЭС или двигательные [установки](#). [9]

Поскольку ядерный реактор является мощным источником сильнопроникающего нейтронного и γ -излучения, его помещают в толстую защитную оболочку.

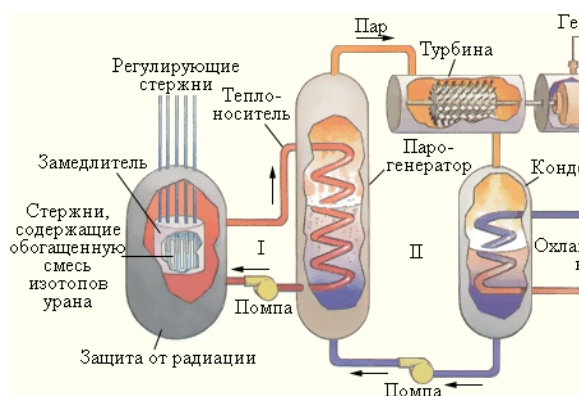


Рисунок 3.4 - Схема устройства ядерного реактора на медленных нейтронах

В реакторе, работающем на смеси изотопов ${}_{92}\text{U}^{235}$ и ${}_{92}\text{U}^{238}$, одновременно с цепной реакцией деления происходит превращение ядер

${}_{92}\text{U}^{238}$, захвативших нейтроны, в ядра ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, т.е. происходит переработка ядерного сырья в расщепляющийся материал. Образующийся плутоний участвует в реакции. Таким образом, идет частичное воспроизводство истраченного ядерного горючего. Плутоний после остановки реактора можно получить и в чистом виде, выделив его химическим путем. Такой способ получения чистого расщепляющегося материала проще трудоемкого разделения изотопов урана. Таким же путем при переработке тория ${}_{90}\text{Th}^{232}$ получают ${}_{92}\text{U}^{233}$.

Если природный уран обогатить изотопом ${}_{92}\text{U}^{235}$, повысив его содержание до 15–20%, то цепная реакция становится возможной и без замедления нейтронов. Такой реактор без замедления нейтронов называется реактором на быстрых нейтронах. При его работе расщепляющиеся материалы производятся в большем количестве, чем тратятся. Это объясняется тем, что отсутствуют бесполезные потери нейтронов в замедлителе; кроме того, ядра ${}_{92}\text{U}^{238}$, захватившие быстрые нейтроны, сами делятся и вносят некоторый вклад в размножение нейтронов.

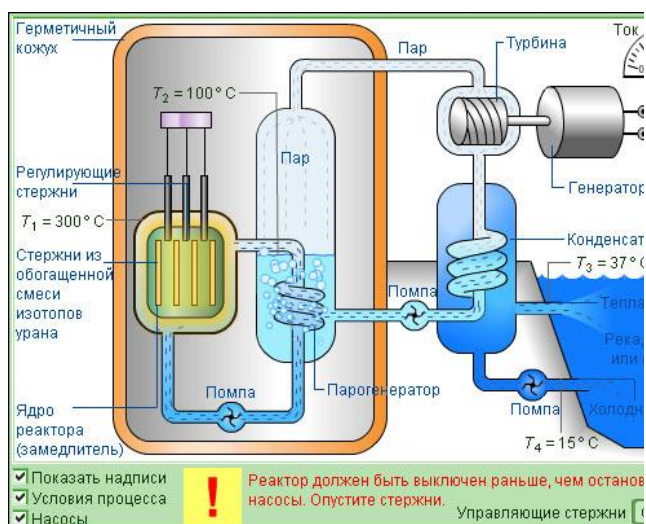


Рисунок 3.5 - Модель. Ядерный реактор

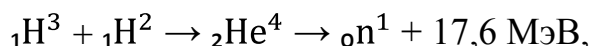
Реакторы на быстрых нейтронах вырабатывают энергию и при этом в целом не только не расходуют, но и производят расщепляющиеся материалы; тратится только ядерное сырье. Работа реактора показана на интерактивной модели,[9] рисунок 3.5.

Активная зона реактора на быстрых нейтронах очень мала, и отводить тепло сложно; приходится использовать жидкий натрий – самый эффективный теплоноситель, но и самый неудобный из-за его химической активности.

3.4 Понятие о термоядерной реакции. Энергия Солнца и звезд

Средняя энергия связи нуклона в ядре $E_{св}/A$ растет с ростом A до $A \approx 50 - 60$. Поэтому, когда образуется среднее или легкое ядро при слиянии более легких ядер, должна освобождаться энергия, поскольку в новом ядре нуклоны сильнее связаны, чем в исходных ядрах.

Особенно велико должно быть выделение энергии при синтезе легких ядер, т.к. величина $E_{св}/A$ при малых A растет очень быстро. Так, при образовании ядра гелия из ядер дейтерия и трития:



выделяется энергия: $28,3 - (8,5 + 2,2) = 17,6$ МэВ. В расчете на один нуклон, участвующий в реакции, получается $\frac{17,6}{5} \approx 3,5$ МэВ, что в 4 раза больше, чем в реакции деления ядер урана. Таким образом, при полном преобразовании 1 кг смеси дейтерия и трития в гелий выделяется в 4 раза больше энергии, чем при полном распаде 1 кг урана.

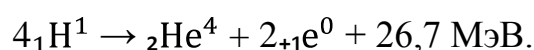
Чтобы сблизиться на расстояние, достаточное для вступления в реакцию, ядра должны обладать большой кинетической энергией, поскольку сближению одноименно заряженных ядер препятствуют электростатические силы отталкивания. При нагреве смеси реагирующих ядер до очень высоких температур кинетическая энергия теплового движения ядер становится

достаточно высокой для осуществления реакций ядерного синтеза, получивших название термоядерных реакций. Смотри интерактивную [модель](#)[9], рисунок 3.6.



Рисунок 3.6- Модель. Синтез гелия

Такие условия существуют на Солнце и других звездах. В центре Солнца температура достигает примерно 13 млн. градусов. При такой температуре атомы полностью ионизированы и вещество представляет собой плазму, содержащую «голые» ядра (без электронной оболочки) и электроны. В недрах Солнца происходит цикл термоядерных реакций, в результате которого ядра водорода превращаются в ядра гелия:



В этом цикле освобождается энергия, почти равная энергии связи ядра $\text{}^4_2\text{He}$ (она несколько меньше $E_{\text{св}}$, т.к. на превращение двух протонов в нейтроны и позитроны затрачивается энергия). Смотри интерактивную модель, [рисунок 7](#). [9]

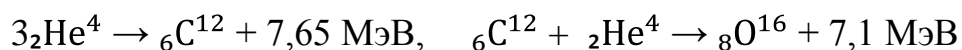


Рисунок 3.7- Модель. Ядерные превращения

Приблизительный состав Солнца таков: около 70% водорода, 29% гелия и 1% более тяжелых элементов. Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг. Можно подсчитать, что если Солнце и впредь, как и сейчас, будет излучать энергию $4 \cdot 10^{26}$ Дж в секунду, то водорода хватит на 10^{11} лет.

По составу и физическим свойствам Солнце является типичной средней звездой, и цикл термоядерных реакций превращения водорода в гелий является главным источником энергии большинства звезд.

В недрах звезд могут протекать и другие реакции синтеза. По мере «выгорания» водорода в центре звезды образуется гелиевое ядро, в котором при температуре около 100 млн. градусов могут происходить превращения:



и другие термоядерные реакции.

3.5 Состав оценочных материалов

Подбор, изучение, анализ и, при необходимости, конспектирование рекомендованных источников; подготовка к домашней проверочной работе.

Выяснение наиболее сложных, непонятных вопросов и их уточнение через интернет - источники; общение с преподавателем по электронной почте работа в виртуальной лаборатории; чтение рекомендуемой литературы по разделу

Вопросы для собеседования по теме: Радиоактивность

- 1) Каковы свойства радиоактивных излучений?
- 2) Что такое радиоактивный распад?
- 3) В чем состоит правило радиоактивного смещения?
- 4) Что такое материнское ядро и дочернее ядро?
- 5) Напишите закон радиоактивного распада.
- 6) Что такое период полураспада?
- 7) Назовите методы наблюдения и регистрации элементарных частиц.
- 8) Какие существуют приборы для регистрации радиоактивных излучений и частиц?
- 9) Что такое счетчик Гейгера?
- 10) Каково устройство и принцип действия счетчика Гейгера?
- 11) Каково устройство и принцип действия камеры Вильсона?
- 12) В чем состоит метод толстослойных фотоэмульсий?
- 13) Можно ли с помощью камеры Вильсона регистрировать незаряженные частицы?
- 14) Какие из известных вам законов сохранения выполняются при радиоактивных превращениях?

Коллоквиум по теме: Строение атома и атомного ядра

- 1) Что представляет собой нуклонная модель ядра?
- 2) Что такое нуклон?
- 3) Чему равен заряд ядра?
- 4) Что называется массовым числом ядра?
- 5) Что такое изотопы?
- 6) Назовите изотопы водорода.
- 7) Каковы основные свойства изотопов?
- 8) Какие силы называются ядерными?
- 9) Каковы свойства ядерных сил?
- 10) Что называется энергией связи ядра?

- 11) Что такое дефект массы ядра атома?
- 12) Напишите формулу энергии связи нуклонов в ядре.
- 13) Что такое протон?
- 14) Что такое нейтрон?
- 15) Напишите формулу дефекта массы ядра.
- 16) Делим ли атом? Докажите.
- 17) Делим ли электрон? Ответ обоснуйте.
- 18) Существует ли заряд, меньший заряда электрона?
- 19) Чему равен заряд электрона в кулонах?
- 20) Чему равна масса электрона в системе СИ?
- 21) Каков порядок величины размера атома?
- 22) Каков порядок величины размеров атомного ядра?
- 23) Из каких частиц построены атомы?
- 24) Можно ли утверждать, что в нейтральном атоме число электронов равно числу протонов в атомном ядре?
- 25) Какие явления говорят о сложности строения атома?
- 26) Какая связь существует между порядковым номером элемента в таблице элементов Менделеева и количеством электронов у атома?
- 27) Какой из электронов атома обладает большей энергией: близкий или далекий от ядра?
- 28) Как называются электроны, которые атом может отдавать или присоединять?
- 29) Из каких частиц состоят ядра всех атомов?
- 30) Как можно вычислить число нейтронов в ядре атома?
- 31) В чем отличие в строении ядер изотопов одних и тех же элементов?
- 32) Зависит ли устойчивость атомного ядра от количества нейтронов в нем? Как зависит?
- 33) Что происходит с атомом, поглотившим квант энергии?

- 34) Что происходит с атомом, когда электрон переходит из слоя более отдаленного от ядра в слой менее удаленный от ядра? Чем этот процесс сопровождается?
- 35) Что обуславливает движение электрона в атоме по круговой орбите?
- 36) Может ли атом потерять все электроны? Что для этого необходимо?
- 37) Что представляет собой поток альфа-частиц?
- 38) Что представляет собой поток бета-частиц?
- 39) Что представляет собой поток гамма-лучи?
- 40) Какие из компонентов распада радия обладают наибольшей проникающей способностью?
- 41) Что понимают под периодом полураспада радиоактивного вещества?

Домашняя проверочная работа по теме: Ядерные реакции

- 1) Что называется ядерными реакциями?
- 2) Какова схематическая запись ядерной реакции?
- 3) Какие известные вам законы сохранения выполняются в ходе ядерной реакции?
- 4) Напишите исторически первую ядерную реакцию превращения азота в кислород.
- 5) Назовите виды распада ядер тяжелых элементов.
- 6) Что такое реакция деления ядра?
- 7) Что такое цепная ядерная реакция?
- 8) Что называется критической массой?
- 9) Что представляет собой коэффициент размножения нейтронов?
- 10) Что представляет собой ядерный реактор?
- 11) Что такое активная зона? Где используются ядерные реакторы?
- 12) Что представляют собой реакции синтеза атомных ядер?
- 13) Напишите реакцию синтеза дейтерия и трития.
- 14) Что такое термоядерная реакция?
- 15) Каково биологическое действие радиоактивного излучения?

- 16) Что такое доза излучения?
- 17) Как осуществить защиту от радиоактивного излучения?
- 18) Где применяется атомная энергия?
- 19) Какие условия необходимы для осуществления управляемой термоядерной реакции?

Проверочный тест по физике атомного ядра

1) Какие вещества из перечисленных ниже обычно используют в ядерных реакторах в качестве поглотителей нейтронов: а) уран; б) графит, в) кадмий, г) тяжелая вода, д) бор, е) – плутоний?

2) Активность некоторого препарата уменьшается в 2,5 раза за 7 суток. Найдите период полураспада. а) 5,3 суток; б) 5,8 суток; в) 6,3 суток; г) 6,8 суток; д) 7,3 суток

3) Элемент ZXA испытал два α - распада и один β -распад. Какое массовое и зарядовое числа будут у нового элемента Y? а) $Z-1YA-4$; б) $Z-8YA$; в) $Z-3YA-8$; г) $Z+4YA-4$; д) $Z-3YA-4$

4) Какой из приборов используют для регистрации альфа – частиц? а) спектрограф; б) циклотрон; в) фотоэлемент; г) камера Вильсона; д) лазер

5) Ядро какого элемента получается при взаимодействии нейтрона с протоном (сопровождающимся выделением γ - кванта)? а) неона; б) гелия; г) трития; д) лития; е) дейтерия

6) Период полураспада радиоактивного элемента 2 часа. Какая доля радиоактивных атомов распадется через 4 часа? а) 50 %; б) 25 %; в) 75 %; г) 12,5%; д) 0 %

7) Определите неизвестную частицу X, участвующую в реакции:

$7N14 + X \rightarrow 5B11 + \alpha$ а) протон; б) γ -квант; в) позитрон; г) нейтрон; д) α -частица

8) Какая доля радиоактивных атомов остается не распавшейся через интервал времени в два периода полураспада? А) 16 %; В) 25 %; С) 50 %; Д) 75 %; Е) 0 %

9) Любой химический элемент обозначают символом A_ZX , где Z – это:
а) зарядовое число (атомный номер, число протонов в ядре); б) массовое число (атомная масса элемента, число нуклонов в ядре); г) число нейтронов в ядре; д) нет правильного ответа

Список тем рефератов

- Атомная физика. Изотопы. Применение радиоактивных изотопов.
- Величайшие открытия физики.
- Игорь Васильевич Курчатов — физик, организатор атомной науки и техники.
- Методы наблюдения и регистрации радиоактивных излучений и частиц.
- Модели атома. Опыт Резерфорда.
- Рентгеновские лучи. История открытия. Применение.
- Управляемый термоядерный синтез.
- Ускорители заряженных частиц.

Самостоятельное изучение разделов дисциплины: получение радиоактивных изотопов и их применение; биологическое действие радиоактивного излучения; общие сведения об элементарных частицах.

Для проведения лабораторно-практических работ, лекционных занятий и комбинированных уроков установлены диски - Козел С.М. «Открытая физика» Полный интерактивный курс физики. Более 80 компьютерных экспериментов, Видеозаписи экспериментов, звуковые пояснения. Установлен проектор, экран, компьютер. Версия 2.6 «Открытая физика», соответствующая программе для общеобразовательных учреждений России применяется в обучении всего первого курса. Это полный мультимедийный курс физики: Учебник, задачи, интерактивные модели, тесты, лабораторные

работы, методические материалы, учебник с грифом «Допущено» Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

Локальная версия, предусматривающая возможность применения для занятий в компьютерных классах. Лекционный материал, порядок выполнения расчетно-графических работ, с множеством схем, рисунков, опытов демонстрируется на экране с компьютера через проектор.

Работа с интерактивными моделями, изучение тем: Ядерные превращения; Синтез гелия; Ядерный реактор. Выполнение индивидуальных заданий для работы в виртуальных лабораториях.

Список использованных источников

1. Дмитриева, В.Ф. Физика для профессий и специальностей технического профиля [Электронный ресурс] : учебник для учреждений сред. проф. образования / В.Ф. Дмитриева. - 7-е изд., стер. - М. : Академия, 2014. - 448 с.- (Профессиональное образование). - Режим доступа: <http://www.academia-moscow.ru/reader/?id=81671>.
2. ВИКИПЕДИЯ: Свободная энциклопедия - Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>
3. Федеральный портал Российское образование- Режим доступа: <http://www.edu.ru>
4. Сайт поддержки ЕГЭ- Режим доступа: <http://ege.edu.ru>
5. Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов - Режим доступа: <http://school-collection.edu.ru>
6. Подготовка к ЕГЭ - Режим доступа: <http://college.ru/>
7. Радиоактивный распад - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Радиоактивный_распад
8. Физика атомного ядра, видеоуроки- Режим доступа: https://www.youtube.com/results?search_query
9. Интерактивные модели - Режим доступа: https://physics.ru/courses/op25part2/content/chapter6/section/paragraph8/theory.html#.W4fs6tQS_vY