

The book cover features a complex design. At the top, there are purple and blue concentric circular patterns. Below this, a central image shows a field of golden wheat in the foreground, with a blue globe of the Earth in the middle ground. The background is a bright blue sky with white clouds. Several glowing blue spheres are scattered throughout the scene, some connected by thin lines, suggesting a molecular or atomic structure. The bottom half of the cover is a solid yellow color with a subtle pattern of concentric circles.

Я.Л. Мархоцкий

**Радиационная
и экологическая
безопасность
атомной
энергетики**

Ян Л. Мархоцкий

**Радиационная и экологическая
безопасность атомной энергетики**

«Вышэйшая школа»

2009

УДК 621.039:614.876.084(075.8)

ББК 31.4я73

Мархоцкий Я. Л.

Радиационная и экологическая безопасность атомной энергетики /
Я. Л. Мархоцкий — «Вышэйшая школа», 2009

ISBN 978-985-06-1803-0

Представлены сведения об элементах ядерной физики, естественных источниках радиации, действии ионизирующих излучений на организм человека, гигиенических аспектах радиационной безопасности, ядерном топливе, экологических проблемах энергетики, радиационной безопасности предприятий ядерно-топливного цикла. Для студентов высших учебных заведений, учащихся средних специальных и общеобразовательных учебных заведений, широкого круга читателей.

УДК 621.039:614.876.084(075.8)

ББК 31.4я73

ISBN 978-985-06-1803-0

© Мархоцкий Я. Л., 2009

© Вышэйшая школа, 2009

Содержание

Предисловие	6
Элементы ядерной физики	7
Краткая история создания атомистического учения	7
Строение атома и атомного ядра	8
Изотопы	10
Радиоактивность	11
Характеристика ионизирующих излучений	12
Закон радиоактивного распада и период полураспада	14
Деление ядер	15
Конец ознакомительного фрагмента.	17

Ян Людвилович Мархоцкий

Радиационная и экологическая безопасность атомной энергетики

Рецензенты: заведующий кафедрой «Основы медицинских знаний» Белорусского государственного педагогического университета имени М. Танка, доктор медицинских наук, профессор *В.П. Сытый*; главный научный сотрудник Управления системной интеграции, академик Международной академии наук информации, информационных процессов и технологии при ООН, доктор технических наук, профессор *В.О. Чернышев*

Выпуск издания осуществлен по заказу и при финансовой поддержке Министерства информации Республики Беларусь.

Предисловие

В настоящее время атом – это не только ядерное оружие различных видов, но и работающий энергоблок на АЭС, атомные ледоколы, мощные подводные лодки, надводные корабли, спутники, аппараты для лучевой терапии, радиационные дефектоскопы, электрокардиостимуляторы. Конечно, это неполный перечень использования источников ионизирующей радиации.

Атомная энергетика – молодая отрасль науки и техники. По мнению ученых, она в недалеком будущем станет основным поставщиком энергии, в том числе и электрической.

Атомная энергетика во многих странах выросла, возмужала и вышла на широкую дорогу промышленного производства электрической энергии, например в США, Англии, Франции, Канаде, Италии, Германии, Японии, Литве. В мире насчитывается 442 ядерных реактора общей мощностью свыше 365 тыс. МВт. Они расположены более чем в 30 странах. Строятся десятки новых реакторов. По данным МАГАТЭ, более 18 % электроэнергии, вырабатываемой в мире, производится на ядерных реакторах. Такие государства как Литва (80,6 %), Франция (77 %), Словакия (57,8 %) большую часть своих потребностей в электроэнергии удовлетворяют за счет АЭС.

К настоящему времени атомная энергетика смогла продемонстрировать свою жизнеспособность, экологическую привлекательность и возможность безопасного и конкурентоспособного обеспечения энергопотребностей общества.

Беларусь относится к категории стран, не обладающих значительными собственными топливно-энергетическими ресурсами, но это не препятствие для достижения высокого уровня экономического развития. Строительство собственной АЭС позволит снизить зависимость от импорта энергоресурсов и обеспечит республику относительно дешевой электроэнергией.

Автор

Элементы ядерной физики

Краткая история создания атомистического учения

Создание атомистической теории обычно приписывают древнегреческому философу Демокриту, жившему в V в. до н. э.

Однако историки утверждают, что основателем теории является учитель Демокрита – Левкипп, который считал, что материя состоит из отдельных непрерывно движущихся частиц (атомов). Древние атомисты Греции, Китая, Индии провозгласили, хотя и в самой общей форме, основное положение материалистической философии: материя несотворима, неуничтожима, вечна и бесконечна. Гениальную идею древних подтвердил М.В. Ломоносов в 40-х гг. XVIII в., разработав атомно-молекулярную теорию строения вещества. Согласно этой теории, вещество состоит из «корпускул» (молекул), которые, в свою очередь, состоят из элементов (или «нечувствительных физических частичек» – атомов). М.В. Ломоносов утверждал, что все движения материи сводятся к движению атомов и являются причиной всех изменений в природе. Он заложил основу дальнейшего познания тайн атомов, т. е. начался период химической атомистики.

В феврале 1896 г. французский ученый А. Беккерель обнаружил, что соли оксида урана засвечивают фотографическую пластинку, завернутую в светонепроницаемую бумагу. Таким образом было открыто неизученное ранее явление природы – испускание ураном неизвестного проникающего излучения, названного *радиоактивностью*. Исследования Беккереля были продолжены М. Склодовской-Кюри и П. Кюри, которые открыли радиоактивные элементы: торий, полоний, радий, актиний. Беккерелю и супругам Кюри за исследования радиоактивности в 1903 г. была присуждена Нобелевская премия по физике.

Строение атома и атомного ядра

Природа состоит из простых и сложных веществ. К простым веществам относятся химические элементы, к сложным – их химические соединения. Мельчайшей частицей элемента, обладающей его химическими свойствами, является *атом*.

Спустя год после открытия радиоактивности английский физик Дж. Томсон установил, что элементарная частица – *электрон* — действительно существует и является составной частью вещества. Теория же атомного ядра появилась через 15 лет благодаря последователям английского ученого Э. Резерфорда и работам знаменитого датского физика Н. Бора.

В 1913 г. Н. Бор предложил модель атома, за основу которой была принята планетарная модель Э. Резерфорда. Согласно ей, атом состоит из положительно заряженного, расположенного в центре, *ядра*, вокруг которого движутся по своим строго определенным орбитам отрицательно заряженные частицы – *электроны*, точно так же, как планеты вокруг Солнца (рис. 1).

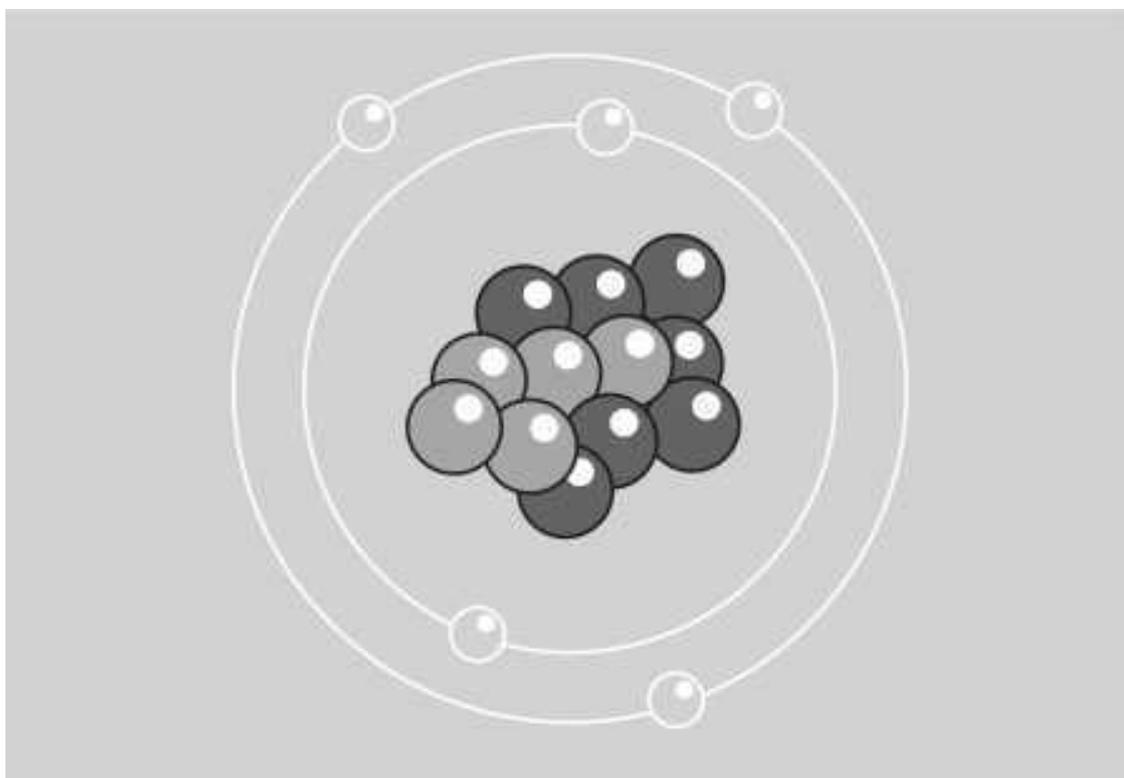


Рис. 1. Схема планетарного строения атома

Эти «летающие планеты» образуют вокруг ядра электронную оболочку. Электроны находятся на различных расстояниях от него. Их количество в атоме таково, что общий заряд нейтрализует положительный заряд ядра. Потеря электрона приводит к ионизации атома.

Кроме электронов, атомы содержат *протоны* и *нейтроны* в ядре атома. Протоны имеют положительный заряд. В связи с этим у нейтрального атома равное количество электронов и протонов. Количество протонов в ядре равно порядковому номеру элемента в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

В отличие от протонов нейтроны не обладают электрическим зарядом. В современной физике протоны и нейтроны объединяют общим названием *нуклон* (от лат. *nucleus* – ядро). Общее число нуклонов в атомном ядре соответствует массе атома. Обычно массу атомов всех

химических элементов выражают в относительных единицах, условно приняв за единицу $1/12$ часть массы основного изотопа углерода C^{12} .

Диаметр атома приблизительно равен 10^{-10} м, а его ядро имеет очень малые размеры – $10^{-15} - 10^{-14}$ м. Принадлежность атома данному элементу обусловлена количеством протонов в ядре. На рис. 2 представлены схематичные модели некоторых атомов.

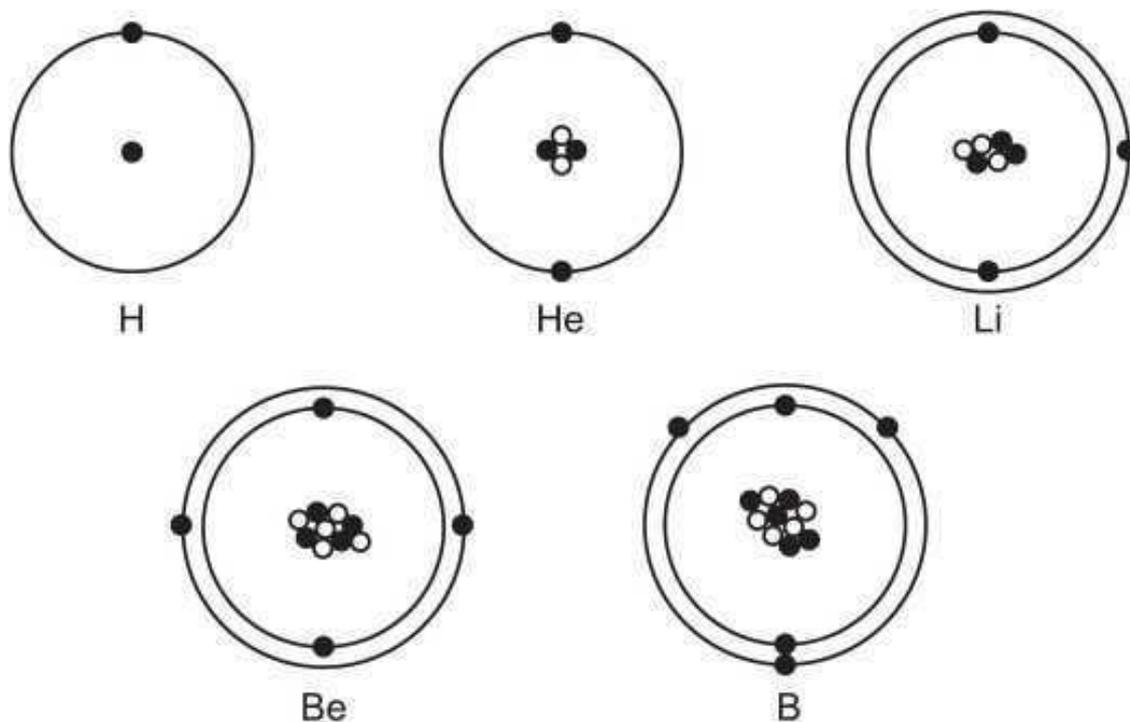


Рис. 2. Схематичные модели атомов водорода, гелия, лития, бериллия, бора

В центре расположено ядро, состоящее из протонов (черные кружки) и нейтронов (белые кружки). Вокруг ядер вращаются электроны. Число протонов в ядрах определяет, какой это элемент.

Изотопы

Изотопы – это разновидности одного и того же химического элемента. Их название (от греч. *isos* — одинаковый и *topos* – место) в дословном переводе означает «из одного места», иными словами – вещества, занимающие одно место в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева.

Атомы как материальные частицы обладают микроскопической массой. Поэтому физики выражают массу атомов не в единицах массы, а в числах протонов и нейтронов, составляющих ядро данного атома, и называют *массовым числом*.

Атомы, имеющие ядра с одинаковым числом протонов, но различающихся по числу нейтронов, являются разновидностями одно и того же химического элемента и называются его *изотопами*. На рис. 3 представлены изотопы водорода.

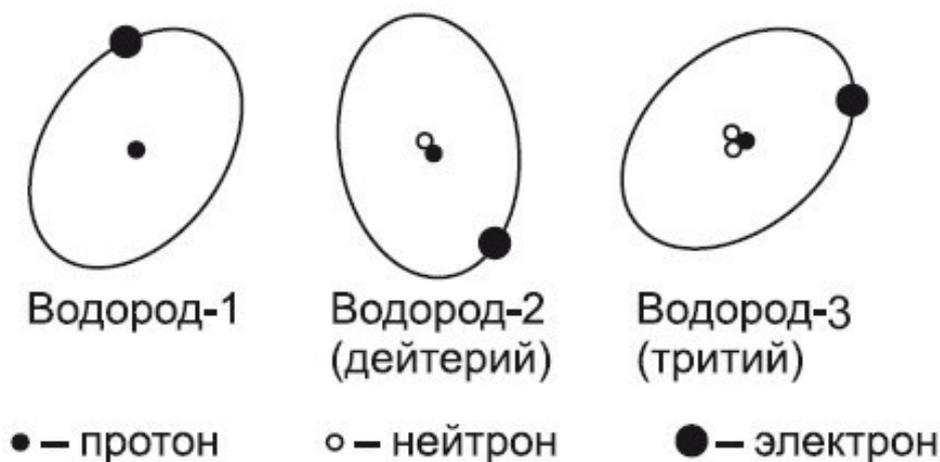


Рис. 3. Изотопы водорода

В ядре его атома либо вообще нет нейтронов, либо есть один или два. Это значит, что водород существует в виде трех изотопов, т. е. в виде трех атомов различной массы, но с одинаковым зарядом ядра. Следовательно, для того чтобы различать изотопы, их обозначают числом, равным сумме входящих в ядро протонов и нейтронов. Для водорода это соответственно водород-1 (обычный), водород-2 (дейтерий), водород-3 (тритий). В ядре цезия-137 содержится 55 протонов и 82 нейтрона (Cs_{55}^{137}), в радии-226 содержится 88 протонов и 138 нейтронов (Ra_{88}^{226}). Оказалось, что 106 элементов имеют 1600 разновидностей. Из этого числа около 365 изотопов существуют в природе, а свыше 1250 получены искусственно.

Ядра изотопов химических элементов называют нуклидами. Радионуклиды – это радиоактивные атомы с данным массовым числом и атомным номером. Большинство нуклидов нестабильно, они превращаются в другие нуклиды.

Радиоактивность

Радиоактивность – это самопроизвольное превращение (распад) атомных ядер некоторых химических элементов, приводящее к изменению их атомного номера и массового числа. Распад радиоактивных ядер сопровождается ионизирующим излучением и высокой энергией.

Ионизирующие излучения получили свое название благодаря способности вызывать ионизацию атомов и молекул в облучаемом веществе. Ионизирующие излучения подразделяются по своей природе на электромагнитные и корпускулярные.

Электромагнитное излучение – это рентгеновское излучение, γ -излучение радиоактивных элементов и тормозное излучение, возникающее при прохождении частиц. Видимый свет и радиоволны относятся также к электромагнитным излучениям. Однако они ионизирующей способностью не обладают, так как характеризуются большой длиной волны.

Корпускулярные излучения – это все остальные виды ионизирующих излучений: β -частицы (электроны, позитроны), протоны (ядра водорода), дейтроны (ядра дейтерия), α -частицы (ядра гелия), тяжелые ионы (ядра других элементов), тг-мезоны.

Радиоактивность изотопов, существующих в природе, называют *естественной*, а радиоактивность изотопов, полученных в результате различных ядерных реакций, – *искусственной*.

Характеристика ионизирующих излучений

В процессе радиоактивного распада ядра атомов радиоактивных элементов в большинстве случаев испускают α -частицы, β -частицы, γ -излучение.

Английскими физиками Э. Резерфордом и Ф. Содди было доказано, что во всех радиоактивных процессах происходят взаимные превращения атомных ядер химических элементов. Изучение свойств излучения, сопровождающего эти процессы в магнитном и электрическом полях, показало, что оно разделяется на α -частицы (ядра гелия), β -частицы (электроны, позитроны) и γ -лучи (электромагнитные излучения с очень малой длиной волны):

- α -излучение – поток положительно заряженных частиц. При распаде тяжелых ядер, например урана или радия, испускаются α -частицы – ядра гелия, состоящие из двух протонов и четырех нейтронов, т. е. несут два положительных электрических заряда (${}^4_2\text{He}$). Бывают и другие виды радиоактивных превращений. При этом важно, что соответствующий радионуклид преобразуется в изотоп другого химического элемента, испуская частицу, а часто и избыток энергии в виде γ -кванта; α -частицы движутся со скоростью 14–20 тыс. км/с в веществе прямолинейно, вызывая при этом ионизацию всех атомов на своем пути. Они обладают высокой ионизирующей способностью, т. е. на 1 см пробега образуют от 30 до 100 тыс. пар ионов. Пробег в воздухе составляет около 10 см, в биологической среде (вода, ткань) – до 0,1 мм.

Защитой от α -частиц служит тонкий слой любого вещества (одежда, лист бумаги, 10-сантиметровый слой воздуха); α -частицы обладают энергией 2–9 МэВ (за 1 эВ принимается энергия, которой обладает электрон, прошедший разность потенциалов в 1 В). В таких единицах свет, возникающий при взаимодействии молекул и воспринимаемый нами с помощью зрения, имеет энергию 2 эВ. Энергия ядерных излучений при превращениях атомных ядер в сотни тысяч и даже в миллионы раз больше. Наши органы чувств не воспринимают такие излучения, т. е. для человека они остаются невидимыми и неосязаемыми;

- β -излучение – поток отрицательно заряженных частиц (электронов) или заряженных положительно (позитронов). Позитрон – элементарная частица, имеющая массу электрона, но обладающая положительным элементарным зарядом; β -частицы, испускаемые при ядерных распадах естественных и искусственных радионуклидов, например ${}^{40}_{19}\text{K} \rightarrow {}^{40}_{20}\text{Ca}$ т. е. ядро испускает электрон, при этом возникает ядро нового элемента при неизменном массовом числе. К β -излучателям относятся фосфор-32, стронций-90, иттрий-90 и др.

Скорость движения β -частиц составляет 250–300 тыс. км/с, их масса в 1840 раз легче протонов, поэтому они испытывают многократное отклонение от первоначального направления движения и вызывают ионизацию только отдельных атомов, пробегая путь в воздухе до 15 м, а в биосреде – до нескольких сантиметров.

На 1 см пробега β -частицы могут образовывать 20–300 пар ионов. Защитой от β -частиц служит слой вещества толщиной 1–2 см;

- γ -излучение – коротковолновое электромагнитное излучение с длиной волны 0,001–0,1 λ ($\lambda \approx 10^{-10}$ м) очень высокой энергии; γ -лучи не отклоняются в электрическом и магнитном полях. Это излучение близко к рентгеновскому, но обладает большей скоростью (300 тыс. км/с) и энергией. Ионизирующая способность γ -излучения малая – 2–3 пары ионов на 1 см, но высока проникающая способность. Пробег в воздухе γ -квантов может достигать более 100 м, в мягких тканях – до 1 м. Защитой от γ -излучений могут служить слой свинца не менее и 1 см, толстые слои бетона, земли или воды.

Мягкие γ -лучи обладают энергией до 0,2 МэВ; средней жесткости – 0,2–1 МэВ; жесткие – 1–10 МэВ; сверхжесткие – более 10 МэВ.

Нейтроны – частицы, не обладающие электрическим зарядом, масса которых примерно равна массе протонов. Нейтроны были открыты в 1932 г. английским физиком Дж. Чедвиком. Они проникают в ядра атомов и вызывают ядерные реакции. Это дало возможность получить искусственные радиоактивные изотопы. В каждом ядре их ровно столько, сколько нужно, чтобы заполнить разницу между численным значением массы ядра атома и количеством протонов в нем.

В зависимости от кинетической энергии нейтроны подразделяются на быстрые – 0,15–10 МэВ, сверхбыстрые – 500 МэВ, промежуточные – 5 КэВ—0,5 МэВ, медленные – 0,1–5 КэВ, тепловые – в пределах 0,025 МэВ.

Под воздействием нейтронов элементы Na, K, C, N, P, превращаются в радионуклиды – γ -излучатели, т. е. создается наведенная радиоактивность. Если нейтронов в атоме слишком много, они могут превращаться в протоны, т. е. образуется новый химический элемент. Источником нейтронов являются атомные реакторы.

Рентгеновское излучение – электромагнитное излучение с длиной волны порядка от 80 нм до 0,001 нм.

В 1895 г. Рентгеном был открыт новый вид излучения (рентгеновские лучи). Со стороны длинных волн рентгеновское излучение граничит с ультрафиолетовым излучением, а со стороны коротких волн оно в значительной степени перекрывается ядерным γ -излучением. Как правило, в медицине используется рентгеновское излучение с длиной волны от 10 до 0,005 нм, чему соответствует энергия от 100 эВ до 0,5 МэВ.

Рентгеновское излучение невидимо и по способу возбуждения подразделяется на:

- характеристическое (жесткое, $\lambda = 0,01$ нм и меньше);
- тормозное (мягкое, λ от 0,01 нм и больше).

Проходя через тело, фотоны рентгеновского излучения взаимодействуют в основном с электронами атомов и молекул вещества, а достаточно жесткое излучение может взаимодействовать также с ядрами атомов. При этом происходят следующие первичные процессы: когерентное рассеяние, фотоэффект и комптон-эффект.

Обычно в медицинской диагностике используется рентгеновское излучение с энергией фотонов от 60 до 100–120 КэВ, а при лучевой терапии – 150–200 КэВ.

Закон радиоактивного распада и период полураспада

Как было отмечено ранее, известно, радиоактивность – это самопроизвольное превращение (распад) ядер некоторых химических элементов, приводящее к изменению их атомного номера и массового числа. Распад радиоактивных ядер сопровождается ионизирующим излучением. Спонтанный распад атомных ядер следует экспоненциальному закону:

$$N=N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где N — количество ядер в данном объеме вещества в момент времени t , N_0 — количество ядер в данном объеме вещества в момент времени $t = 0$; λ – постоянная распада (доли ядер, распадающихся за 1 с).

Величина τ , обратная λ , называется средней продолжительностью жизни радиоактивного изотопа $\tau = 1/\lambda$.

Радиоактивные излучения возникают лишь в момент самопроизвольного превращения неустойчивого радионуклида в другой изотоп. Одни радиоактивные изотопы изменяются быстро, превращаясь в обычные стабильные. Другие – очень медленно (живут долго, излучая постоянно). Скорость распада принято описывать *периодом полураспада* ($T_{1/2}$) – таким промежутком, в течение которого из всех имеющихся в наличии ядер половина подвергается самопроизвольному превращению. Чем интенсивнее идет радиоактивный распад, тем короче период полураспада. Например, период полураспада плутония-239 равен 24 410 лет, радия-226 – 1617 лет, радона-222 – 3,82 дня, некоторых элементарных частиц – миллионные доли секунды.

Деление ядер

При захвате нейтронов (рис. 4) происходит деление тяжелых ядер. При этом используются новые частицы и освобождается энергия связи ядра, передаваемая осколкам деления. Ядра тяжелых элементов урана, плутония и некоторых других радионуклидов интенсивно поглощают тепловые нейтроны. После акта захвата нейтрона тяжелое ядро делится на две неравные по массе части, называемые *осколками* или *продуктами деления*. При этом испускаются *быстрые нейтроны* (в среднем около 2,5 нейтрона на каждый акт деления), отрицательно заряженные β -частицы и нейтральные γ -кванты, а энергия связи частиц в ядре преобразуется в кинетическую энергию осколков деления, нейтронов и других частиц. Эта энергия затем расходуется на тепловое возбуждение составляющих вещество атомов и молекул, т. е. на разогревание окружающего вещества.

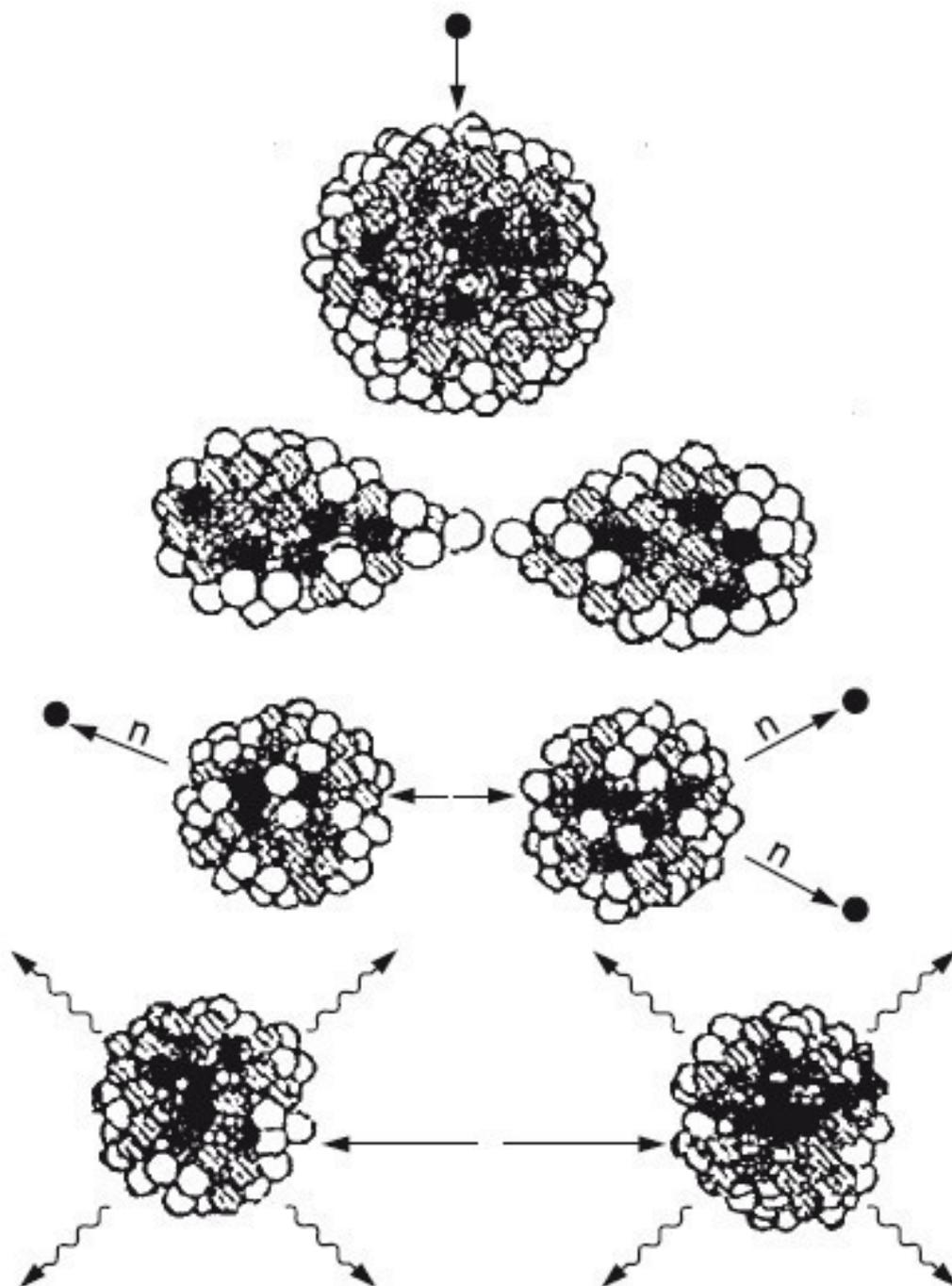


Рис. 4. Деление ядер

После акта деления ядер рожденные при этом осколки, будучи нестабильными, претерпевают ряд последовательных радиоактивных превращений и с некоторым запаздыванием испускают «запаздывающие» нейтроны, большое число α -, β - и γ -излучений. С другой стороны, некоторые осколки обладают способностью интенсивно поглощать нейтроны.

Разветвления реакций деления тяжелых ядер нейтронами, в результате которых число последних возрастает и может возникнуть самоподдерживающийся процесс деления, получили название *цепных ядерных реакций*.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.