

Министерство сельского хозяйства и продовольствия
Республики Беларусь

Витебская ордена «Знак Почета» государственная
академия ветеринарной медицины

Кафедра радиологии и биофизики

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОГИИ

Учебно-методическое пособие для студентов факультетов ветеринарной
медицины и биотехнологического по специальностям:
1-74 03 02 «Ветеринарная медицина», 1-74 03 04 «Ветеринарная
санитария и экспертиза», 1-74 03 05 «Ветеринарная фармация», слушателей
факультета повышения квалификации и переподготовки кадров

Витебск
ВГАВМ
2020

УДК 619:614.876(07)

ББК 48.66

Ф50

Рекомендовано к изданию методическими комиссиями факультетов ветеринарной медицины от 5 ноября 2019 г. (протокол № 13) и биотехнологического от 26 сентября 2019 г. (протокол №1) УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины»

Авторы:

кандидат ветеринарных наук, доцент *Е. Л. Братушкина*; кандидат ветеринарных наук, доцент *К. П. Клименков*; кандидат ветеринарных наук, доцент *О. С. Мехова*; старшие преподаватели *Н. П. Коваленок*; *И. О. Петроченко*

Рецензенты:

доктор ветеринарных наук, профессор *А. П. Курдеко*; кандидат сельскохозяйственных наук, доцент *Л. В. Шульга*

Физические основы радиологии : учеб.-метод. пособие для студентов факультетов ветеринарной медицины и биотехнологического по специальностям: 1-74 03 02 «Ветеринарная медицина», 1-74 03 04 «Ветеринарная санитария и экспертиза», 1-74 03 05 «Ветеринарная фармация», слушателей факультета повышения квалификации и переподготовки кадров / *Е. Л. Братушкина* [и др.]. – Витебск : ВГАВМ, 2020. – 44 с.

Учебно-методическое пособие подготовлено с соответствии с учебной программой и включает основы ядерной физики, понятие о явлении радиоактивности, свойствах излучений и их взаимодействии с веществом.

УДК 619:614.876(07)

ББК 48.66

© УО «Витебская ордена «Знак Почета» государственная академия ветеринарной медицины», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Элементы ядерной физики	5
1.1. Строение атома: атом, ядро, характеристика частиц, электронная оболочка	5
1.2. Стабильность ядер атомов: ядерные силы, дефект массы	8
1.3. Ионизация и возбуждение атомов	10
1.4. Разновидности химических элементов	11
2. Явление радиоактивности	13
2.1. Основные виды радиоактивных излучений и их характеристика	14
2.2. Типы ядерных превращений	18
2.3. Ядерные реакции	23
2.4. Закон радиоактивного распада	25
2.5. Естественная радиоактивность и радиоактивные семейства	27
2.6. Искусственная радиоактивность	30
3. Взаимодействие радиоактивных излучений с веществом	33
3.1. Взаимодействие корпускулярного излучения с веществом	35
3.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом	38
Литература	43

ВВЕДЕНИЕ

Процесс познания окружающего нас мира бесконечен. В мире все явления, как и все тела, неразрывно связаны. В основе строения тел живой и неживой природы лежит вещество. Тела могут состоять из одинаковых или разных веществ, простых и сложных. В свою очередь вещества состоят из мельчайших частиц – атомов и молекул. Все огромное многообразие веществ связано с различным сочетанием атомов в молекулах.

Мысль о превращении одних веществ в другие не давала покоя человечеству в течение многих веков. Учение древнегреческого философа Аристотеля основывалось на том, что четыре первоначала (огонь, земля, вода и воздух) могут переходить одно в другое, так как связаны первовеществом – квинтэссенцией (*quintaessentia* – пятая сущность).

Алхимики пытались осуществить превращение неблагородных металлов в благородные. Даже Исаак Ньютон, открывший основные законы движения в физике, был алхимиком и немало времени потратил на бесплодные попытки превратить в золото неблагородные металлы. В настоящее время это вполне возможно (получить искусственным путем радиоизотоп золота). В то же время оказалось, что в природе переход одних атомов химических элементов в другие уже существовал (естественный радиоактивный распад).

1 марта 1896 года Антуан Анри Беккерель обнаружил, что уран самопроизвольно испускает невидимые лучи, вызывающие ионизацию газов, свечение некоторых веществ и потемнение фотографической пластинки. Так произошло открытие радиоактивности. «Лучи Беккереля» стали для многих исследователей началом научных изысканий.

Наиболее значительные достижения в области исследования радиоактивности связаны с именами Марии Склодовской-Кюри и Пьера Кюри. В апреле 1898 года Мария и Пьер Кюри определили, что источником «лучей Беккереля» может быть не только уран, но и торий. А открытие ими радиоактивных элементов полония и радия (1898 г.) положило начало научным исследованиям радиоактивности.

По предложению Марии Кюри, все вещества, способные испускать «лучи Беккереля», стали называться радиоактивными, а само явление испускания этих лучей – радиоактивностью.

Таким образом, явление самопроизвольного излучения получило название радиоактивности, а вещества, которые испускали излучение, – радиоактивными (от лат. *radius* – луч и *activus* – действенный).

Представленный в учебно-методическом пособии материал имеет важное значение в связи со строительством в Республике Беларусь АЭС.

1. ЭЛЕМЕНТЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

1.1. Строение атома: атом, ядро, характеристика частиц, электронная оболочка

Все в природе состоит из веществ. Вещество - это любая совокупность атомов и молекул, находящихся в определенном агрегатном состоянии. Вещества бывают простые и сложные. В состав простых веществ входят атомы только одного элемента. Сложные вещества, или химические соединения, содержат атомы нескольких элементов.

Атом - мельчайшая частица химического элемента, которая является носителем его химических свойств (от греч. *atomos* - неделимый, термин предложил древнегреческий ученый Демокрит, IV век до н. э.).

В природе только инертные газы обнаруживаются в виде атомов, так как их внешние оболочки замкнутые, а все остальные вещества существуют в виде молекул.

В начале XX века было выдвинуто несколько теорий строения атома, которые называли моделями атома. При помощи моделей ученые пытались объяснить различные *физические свойства атомов* — линейность спектра излучения газов при высокой температуре, электрическую нейтральность, устойчивость атома и др.

До конца XIX века считали, что атом неделим и является элементарной мельчайшей частицей. И только в 1911 году Э. Резерфорд после обнаружения существования атомного ядра предположил, что атом делим и по строению схож с планетарной системой. В центре атома находится положительно заряженное ядро (Солнце), вокруг которого вращаются отрицательно заряженные электроны (планеты), образующие электронную оболочку атома. В 1913 году Нильс Бор предложил усовершенствованную модель строения атома. Он выдвинул квантовую теорию строения электронных оболочек атома. В 1932 году ученые физики Д.Д. Иваненко и В. Гейзенберг независимо друг от друга создали теорию атомного ядра, по которой в состав ядра наряду с протонами входят нейтроны (протонно-нейтронная модель ядра). В последующем модель атома уточнялась и конкретизировалась другими учеными-физиками (Луи де Бройль, А. Зоммерфельд, М. Борн, П. Дирак и др.).

По современным представлениям, *атом* – сложная система, размер которой составляет в диаметре примерно 10^{-10} м. Атом состоит из положительно заряженного ядра (в центре) размером 10^{-15} м и отрицательно заряженных электронов, находящихся на орбитах. Атом является нейтральным, так как положительный заряд ядра равен отрицательным зарядам электронов на орбитах атома. Практически вся масса атома сосредоточена в его ядре – 99,95-99,98%. Масса электронов на оболочках незначительна, она составляет около 0,02%. В настоящее время массы атомов измерены с большой точностью (до шестого и седьмого десятичных знаков) с помощью современных масс-спектрометров.

Атомное ядро имеет сложное строение и состоит из элементарных частиц: протонов, нейтронов и пи-мезонов. Протоны и нейтроны имеют общее

название *нуклоны*, так как они в ядре могут превращаться друг в друга.

Когда говорят о конкретном атомном ядре, также используют термин «нуклид». **Нуклид** — любое атомное ядро с заданным числом протонов и нейтронов. Ядро атома имеет положительный заряд, носителем которого является протон (рисунок 1). Каждый атом любого элемента содержит в ядре определенное число протонов, которое постоянно и определяет в основном химические свойства элемента.

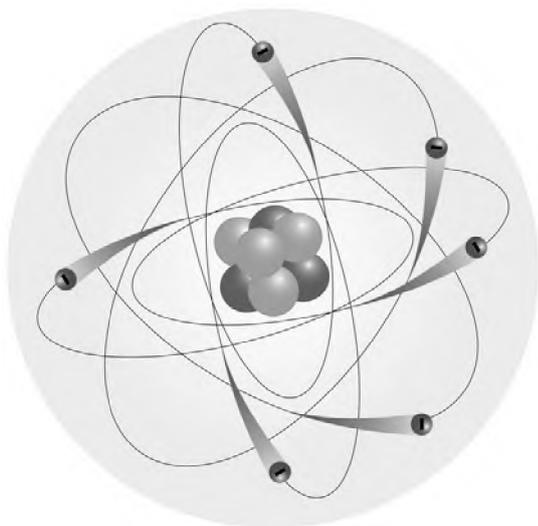


Рисунок 1- Планетарная модель атома

Число протонов в ядре называют **атомным номером**, или **зарядовым числом**, оно соответствует порядковому номеру элемента в периодической системе Д.И. Менделеева.

Суммарное число протонов и нейтронов в ядре называют **массовым**

числом и обозначают буквой A .

Символ химического элемента обозначается ${}_Z^AX$.

Число нейтронов N_n в ядре равно разности между массовым числом и атомным номером Z элемента: $N_n = A - Z$.

Итак, атом любого элемента можно разделить на **элементарные частицы**, и в этом случае он утратит свойства, характерные для данного элемента. К элементарным частицам относят **электроны, протоны, нейтроны, пи-мезоны и др.**

Вместе с тем изучение атомов всех элементов, входящих в периодическую систему, в конечном итоге сводится к изучению свойств и взаимодействию трех частиц — **электронов, протонов и нейтронов**. Один элемент отличается от другого только числом и расположением этих частиц.

Основными характеристиками элементарных частиц являются электрический заряд, масса и устойчивость.

Масса ядер и элементарных частиц обычно выражается в атомных единицах массы (а. е. м.):

$$1 \text{ а. е. м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Атомная единица массы показывает, во сколько раз атом данного элемента тяжелее $1/12$ части атома изотопа ${}^{12}_6\text{C}$.

Протон (от греч. protos – первый) – устойчивая элементарная частица, имеющая положительный единичный заряд ($1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл), равный по величине заряду электрона.

Протон открыт в 1919 году Э. Резерфордом. Обозначается символом ${}_1^1\text{p}$. Масса его составляет 1,00758 а. е. м., или $1,6721 \cdot 10^{-27}$ кг, что в 1836 раз больше массы электрона. Среднее значение жизни протона в свободном виде более 10^{30} лет.

Нейтрон (от лат. *neutrum* – ни то, ни другое) – неустойчивая электрически нейтральная элементарная частица.

Нейтрон открыт в 1932 году Д. Чедвиком. Обозначается символом 1_0n . Масса покоя его незначительно превышает массу протона и составляет 1,00898 а. е. м., или $1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг. Нейтроны устойчивы только в составе стабильных атомных ядер. Свободные нейтроны распадаются на протоны и электроны. Период полураспада его примерно равен 12,8 минуты. Вследствие электрической нейтральности нейтрон не участвует в кулоновских взаимодействиях с атомными ядрами и электронами. Сталкиваясь с тяжелыми атомами, отскакивает, почти не теряя энергии, а при столкновении с легкими атомами передает им часть своей энергии и замедляет движение. Нейтрон в свободном состоянии нестабилен. Нейтрон не отклоняется в магнитном поле, обладает большой проникающей способностью, что создает серьезную опасность как фактор биологического действия излучения.

В ядрах атомов наряду с нуклонами имеются и более мелкие частицы пи-мезоны (пионы).

Пи-мезоны (пионы) – нестабильные элементарные частицы (открыты в 1947 г). Своё название пи-мезоны получили от греческого слова «*mesos*» – средний, промежуточный. Они обозначаются символом π . Пи-мезоны обладают массой $0,18835 \cdot 10^{-27}$ кг, промежуточной между массами протона и электрона. Пи-мезоны представлены группой из трех частиц: двух заряженных (π^+ и π^-) и одной нейтральной (π^0). Пи-мезоны в ядре осуществляют связь между нуклонами.

Количество электронов на орбитах определяют по атомному номеру Z элемента.

Электрон – устойчивая элементарная частица, имеющая малую массу покоя 0,000548 а. е. м., или $9,1095 \cdot 10^{-31}$ кг.

Электрон обозначают символом ${}_{-1}^0e$ или e^- . Электрон имеет один отрицательный единичный заряд ($-1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл). Энергетический эквивалент электрона составляет 0,511 МэВ. Электроны открыл в 1897 году Д. Томсон.

В зависимости от энергии, которая удерживает электроны при вращении вокруг ядра, они группируются на той или иной электронной **орбите**. Иначе

электронную орбиту называют **уровнем**, или **слоем**. Число слоев у различных атомов неодинаковое. В атомах с большой атомной массой число орбит достигает семи. Их обозначают буквами латинского алфавита: **K, L, M, N, O, P, Q**.

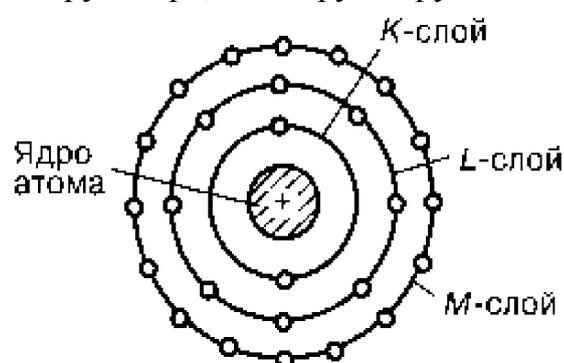


Рисунок 2 – Орбиты атома

Ближайший к ядру K-слой. Число электронов в каждом слое строго определенное. Так, K-слой имеет не более двух электронов, L-слой - до 8, M-слой - до 18, N-слой - 32 электрона и т. д. (рисунок2).

Максимально возможное число электронов на каждой орбите определяется по формуле:

$$N_e = 2 \cdot n^2,$$

где n - номер орбиты.

На каждый из движущихся вокруг ядра электронов действуют две равные, но противоположно направленные силы: *кулоновская сила* притягивает электроны к ядру, а равная ей *центробежная сила* инерции стремится вырвать электрон из атома. Кроме того, электроны, вращаясь по орбите, одновременно имеют собственный момент количества движения, т. е., подобно волчку, вращаются вокруг собственной оси. Собственный момент количества движения носит название *спин*. Спины отдельных электронов могут быть ориентированы параллельно или антипараллельно друг другу. Все это обеспечивает устойчивое положение электронов в атоме.

Однако на связь электрона с ядром действуют не только кулоновская сила притяжения и центробежная сила инерции, но и сила отталкивания других электронов. Этот эффект называют *экранировкой*. Чем дальше электронная орбита от ядра, тем сильнее экранировка электронов и тем слабее энергетическая связь этих электронов с ядром.

1.2. Стабильность ядер атомов: ядерные силы, дефект массы

Как объяснить устойчивость ядер? Казалось бы, одноименно заряженные протоны согласно закону Кулона, отталкиваясь друг от друга, должны были бы разлететься в разные стороны. Однако в действительности ядра атомов — очень прочные образования. Следовательно, внутри ядра должны действовать **ядерные силы**, представляющие собой новый вид сил, природа которых изучена еще недостаточно.

Считают наиболее вероятным, что ядерные силы возникают в процессе непрерывного обмена между нуклонами и пи-мезонами (пионами).

Ядерные силы обладают зарядовой независимостью, т. е. силы взаимодействия разноименных зарядов примерно такие же, как и между одноименно заряженными частицами.

Ядерные силы короткодействующие. Они значительны только на очень малых расстояниях 10^{-15} м. С увеличением расстояния между ядерными частицами ядерные силы очень быстро уменьшаются и становятся практически равными нулю.

Ядерные силы обладают свойством насыщения, т. е. каждый нуклон взаимодействует только с ограниченным числом соседних нуклонов. Поэтому при увеличении числа нуклонов в ядре ядерные силы значительно ослабевают. Этим объясняется меньшая устойчивость ядер тяжелых элементов, в которых содержится значительное количество протонов и нейтронов.

Чтобы разделить ядро на составляющие его протоны и нейтроны и удалить их из поля действия ядерных сил, надо совершить работу, т. е. затратить энергию. Эту энергию называют **энергией связи ядра**.

При образовании ядра из нуклонов выделяется **энергия связи**:

$$E_{\text{св}} = (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_{\text{я}}) \cdot c^2 = \Delta m \cdot c^2,$$

где Δm – дефект массы ядра;

c – скорость света в вакууме ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с).

При расчете массы ядер фактическая масса оказывается меньше расчетной. У атома гелия масса ядра равна 4,033 а. е. м.

Масса ядра определяется по формуле:

$$m_{\text{я}} = m_{\text{p}} \cdot N_{\text{p}} + m_{\text{n}} \cdot N_{\text{n}},$$

где $m_{\text{я}}$ – масса ядра;

m_{p} – масса протонов;

N_{p} – число протонов;

m_{n} – масса нейтронов;

N_{n} – число нейтронов.

Рассчитаем: $m_{\text{я}} = 1,00758 \cdot 2 + 1,00898 \cdot 2 = 4,033$ а. е. м.

На самом деле фактическая масса ядра гелия меньше и равна 4,003 а. е. м. Разница составляет 0,03 а. е. м., следовательно, ядро гелия имеет дефект (недостаток) массы.

*Разницу между фактической и расчетной массой называют **дефектом массы***. Дефект массы показывает, насколько прочно связаны частицы в ядре, и сколько энергии выделилось бы при образовании ядра из отдельных нуклонов.

В ядерной физике за единицу энергии принят электрон-вольт (эВ).

Энергетический эквивалент 1 а. е. м. составляет 931 МэВ.

Тогда энергия, которая выделится при образовании ядра гелия:

$$E_{\text{св}} = 0,03 \cdot 931 = 28 \text{ МэВ}$$

*Средняя энергия связи, приходящаяся на один нуклон, называется **удельной энергией связи***. Для гелия она составит $28:4 = 7$ МэВ.

Следовательно, зная дефект массы, можно легко вычислить энергию связи ядра. Энергия связи ядер соразмерно возрастает с увеличением числа нуклонов, однако не строго пропорционально их числу.

Например, энергия ядра дейтерия составляет 2,2 МэВ, азота — 104,56, а урана — 1800 МэВ. Если не считать самых легких ядер (дейтерий, тритий), то энергия связи на один нуклон составляет для всех ядер примерно 8 МэВ.

Для сравнения необходимо напомнить, что химическая энергия связи атомов в молекулах в расчете на один атом равна нескольким электрон-вольтам (2...5 эВ). Именно этим объясняется, что ядерные реакции характеризуются в миллион раз большими энергиями, чем обычные химические реакции.

Таким образом, закон взаимосвязи массы и энергии показывает, откуда возникает та колоссальная энергия, которая выделяется при синтезе и делении ядер.

Итак, **стабильность атома зависит от количества нуклонов в ядре**.

Наиболее стабильными являются изотопы легких элементов.

У элементов с атомным номером более 82 количество нейтронов значительно преобладает над количеством протонов, и ядерные силы притяжения уже не способны обеспечить устойчивость ядер, в результате происходят процессы их внутренней перестройки. Не существует устойчивых ядер с $Z > 83$.

Для ядер атомов начала и середины Периодической системы элементов Д.И. Менделеева оптимальным соотношением с точки зрения устойчивости

является равенство протонов и нейтронов. Если оно нарушается, происходит радиоактивный распад ядер.

1.3. Ионизация и возбуждение атомов

При сообщении электронам извне дополнительной энергии (например, энергии ионизирующего излучения) они могут переходить с одного энергетического уровня (орбиты) на другой или даже покидать пределы данного атома.

В зависимости от энергии ионизирующего излучения будет возникать либо процесс ионизации (рисунок 3 а), либо процесс возбуждения (рисунок 3 б).

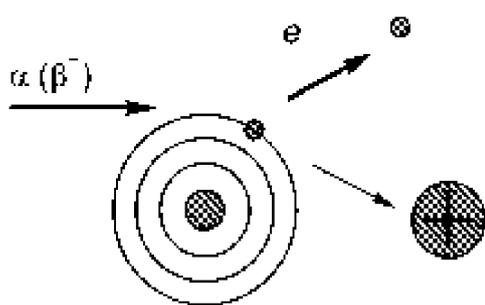


Рисунок 3 а – Процесс ионизации

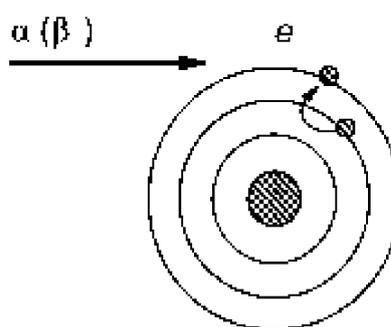


Рисунок 3 б - Процесс возбуждения

Так, если воздействие будет слабее энергии связи электрона с ядром ($E_{изл} < E_{св}$), то электрон перейдет, лишь с одного энергетического уровня на другой, более отдаленный от ядра атома. Такой атом остается нейтральным, однако он отличается от остальных нейтральных атомов этого химического элемента *избытком энергии*.

Атомы, обладающие избытком энергии, называют **возбужденными**, а переход электронов с одного энергетического уровня на другой, более удаленный от ядра, — **процессом возбуждения**.

Поскольку в природе всякая система стремится перейти в положение, при котором ее энергия будет наименьшей, то и атом из возбужденного состояния возвращается в первоначальное. Возвращение атома в первоначальное состояние происходит через малый промежуток времени порядка 10^{-8} с. При этом электроны с внешних орбит переходят на внутренние с выделением избытка энергии в виде рентгеновского излучения с длиной волны, характерной для каждого энергетического уровня данного атома. Такое рентгеновское излучение называют *характеристическим*.

Переходы электронов в пределах наиболее удаленных от ядра орбит дают оптический спектр, который состоит из ультрафиолетовых, световых и инфракрасных лучей.

При воздействии на электроны извне энергии, *превышающей энергию связи электронов с ядром* ($E_{изл} > E_{св}$), они вырываются из атома и удаляются за его пределы. Атом, лишившийся одного или нескольких электронов, превращается в положительно заряженный ион, а присоединивший к себе один или несколько электронов — в отрицательный. Следовательно, на каждый

положительный ион образуется один отрицательный ион. Таким образом, возникает пара ионов.

Процесс образования ионов из нейтральных атомов называют **ионизацией**. В состоянии иона атом существует в обычных условиях чрезвычайно короткий промежуток времени. Свободное место на орбите положительного иона заполняется свободным электроном, и атом вновь становится электрически нейтральной системой. Этот процесс носит название **рекомбинации ионов** (деионизации) и сопровождается выделением избыточной энергии в виде излучения.

Энергия, выделяющаяся при рекомбинации ионов, количественно равна энергии, затраченной на ионизацию. Процесс ионизации атомов имеет важное практическое значение для обнаружения и дозиметрии излучений, а также для понимания биологического действия ионизирующей радиации.

1.4. Разновидности химических элементов

Большинство химических элементов в природе представляют собой определенные смеси атомов с ядрами различных масс. Различие масс обусловлено наличием в ядрах разного числа нейтронов.

Понятие об изотопах ввел в 1910 году английский ученый-радиохимик Фредерик Содди. К концу 20-х гг. XX века изотопы были найдены у многих стабильных элементов, в том числе у всех редкоземельных.

Атомы с одинаковым числом протонов, но различные по числу нейтронов, называют **изотопами** (*isos*— одинаковый, *topos*— место).

Такие элементы имеют одинаковый номер в таблице Д.И. Менделеева, но разное массовое число A .

Например, изотопы водорода (рисунок 4).

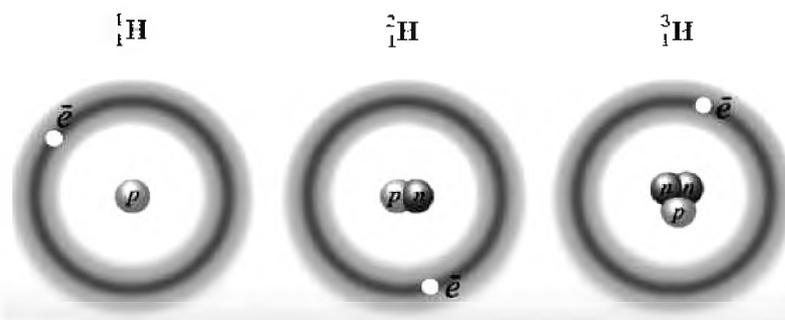


Рисунок 4 – Изотопы водорода

Поскольку заряды ядер этих атомов одинаковые, электронные оболочки их имеют почти однотипное строение, а атомы с такими ядрами чрезвычайно близки по химическим свойствам и спектрам.

Изотопы бывают стабильные и нестабильные. Стабильные изотопы со временем не претерпевают никаких изменений, если нет воздействия извне. Нестабильные или радиоактивные изотопы за счет процессов, протекающих внутри ядра, со временем превращаются в изотопы других химических элементов, испуская при этом ионизирующее излучение.

Радионуклиды – это радиоактивные атомы химических элементов. Например, радионуклиды: ${}_{38}^{90}\text{Sr}$ и ${}_{55}^{137}\text{Cs}$.

Стабильные изотопы встречаются только у элементов с $Z < 83$.

Известно около 300 стабильных и более 2000 радиоактивных изотопов. Для всех элементов периодической системы Д.И. Менделеева синтезированы радиоактивные изотопы на ускорителях и в реакторах.

Большинство (более 90) химических элементов представляют собой смесь от двух до десяти изотопов. Причем обычно преобладает какой-то один изотоп, а остальные составляют доли процентов. Водород представлен тремя изотопами (против ${}^1_1\text{H}$ – на него приходится 99,985%, дейтерий ${}^2_1\text{H}$ – 0,0148%, тритий ${}^3_1\text{H}$ – $5 \cdot 10^{-16}\%$). Природный калий также имеет три изотопа: ${}_{19}^{39}\text{K}$, ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{19}^{41}\text{K}$. Соотношение их составляет соответственно 93,08%, 0,0119% и 6,9%. Часть изотопов являются радиоактивными. Среди трех изотопов водорода только один является радиоактивным – это тритий ${}^3_1\text{H}$. Среди трех изотопов калия также только один радиоактивный – ${}_{19}^{40}\text{K}$. В то же время уран имеет 11 изотопов и все они являются радиоактивными.

Наряду с радиоактивными изотопами, существует понятие «изомеры».

Изомеры – атомы одного и того же химического элемента с одинаковым массовым числом, но ядра которых имеют разное энергетическое состояние.

Они имеют разный период полураспада, разную энергию и в ряде случаев – вид излучения. Например, изомеры: ${}_{27}^{60}\text{Co}$ ($T_{1/2} = 5,3$ года) и ${}_{27}^{60}\text{Co}$ ($T_{1/2} = 10,7$ мин).

Изомер с избытком энергии находится в метастабильном состоянии, которое обозначается символически латинской буквой *m* (ставится рядом с массовым числом – ${}^{80m}\text{Br}$).

Метастабильный изомер, отдавая излишек энергии, совершает изомерный переход в основное состояние. Изомеры метастабильный и основной могут быть радиоактивными, но они имеют разные периоды полураспада (например, ${}^{110m}\text{Ag}$ имеет $T_{1/2} = 250$ суток, а ${}^{110}\text{Ag}$ имеет $T_{1/2} = 25$ с). Встречаются изомеры, из которых один является радиоактивным (например, ${}^{137m}\text{Ba}$ имеет $T_{1/2} = 2,55$ мин, а ${}^{137}\text{Ba}$ – стабильный).

В природе существуют *атомные ядра разных элементов с одинаковым массовым числом (A), но с различным атомным номером (Z)*. Такие атомы называют **изобарами** (например, ${}_{18}^{40}\text{Ar}$, ${}_{19}^{40}\text{K}$, ${}_{20}^{40}\text{Ca}$).

Понятно, что такие атомы имеют в ядре разное количество протонов и нейтронов. Можно сказать, что изобарами называются атомы разных химических элементов, которые содержат разные количества протонов и нейтронов, однако имеют одинаковые массовые числа.

В 1934 году немецкий физик Иосиф Мотоух сформулировал правило: «Не может быть двух стабильных изобаров у элементов, заряды ядер которых отличаются на единицу; один из них обязательно будет радиоактивным».

Так, из двух изобаров ${}_{18}^{40}\text{Ar}$ и ${}_{19}^{40}\text{K}$ изобар ${}_{19}^{40}\text{K}$ является радиоактивным.

Атомные ядра разных элементов с равным количеством нейтронов называют **изотонами**, например ${}^6_{13}\text{C}$ и ${}^7_{14}\text{N}$. В ядрах углерода и азота по

семьнейтронов, но разное количество протонов.

Изотопы обладают разными химическими свойствами, но близки по физическим свойствам.

2. ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ

Радиоактивность – свойство ядер одних химических элементов самопроизвольно превращаться в ядра атомов других химических элементов с испусканием ионизирующего (в том числе радиоактивного) излучения.

Можно сказать, что **радиоактивность** – это самопроизвольное превращение неустойчивых ядер в более устойчивые, при котором изменяется заряд, масса либо энергия и испускается ионизирующее излучение. Так же при этом дополнительно происходит выделение энергии в виде тепла.

Самопроизвольное превращение ядер называют радиоактивным распадом.

Из 2500 нуклидов, известных в настоящее время, стабильными являются только 271. Остальные нуклиды нестабильны; они превращаются путем одного или нескольких последовательных распадов.

В 1903 году Пьер Кюри обратил внимание на то, что радий не только является источником невидимой радиации, но и нагревается во время этого процесса. Оказалось, что 1 г радия за время своего существования выделяет в 400 тысяч раз больше энергии, чем освобождается при сгорании 1 г каменного угля. Один килограмм урана оказался энергетически эквивалентным 20 т каменного угля. При радиоактивном распаде 1 г атома ^{14}C выделяется $12,57 \cdot 10^9$ Дж, или $3 \cdot 10^9$ калорий (1 кал = 4,19 Дж), что гораздо больше, чем при сгорании 1 г атома ^{14}C до CO_2 (39,43 Дж, или 9,410 кал).

Радиоактивность обусловлена процессами, происходящими в ядре атома. И повлиять на эти процессы внешними условиями (изменением температуры, давления, химическими реакциями, электрическими и магнитными полями и др.) не удастся. Распад ядер атомов обусловлен их строением (составом) и внутренним состоянием. Стабильность или устойчивость ядра атома определяется соотношением числа протонов и нейтронов. У большинства стабильных изотопов легких элементов это соотношение составляет 1:1 или близко к нему, в тоже время у урана (радиоактивен) оно составляет 1:1,6. Более устойчивыми считаются ядра с четным числом нейтронов, значительная часть радиоактивных ядер имеет нечетное число нейтронов и протонов.

При недостатке или избытке нейтронов (протонов), относительно оптимального для конкретного элемента соотношения, ядра оказываются неустойчивыми и возможен их радиоактивный распад.

Радиоактивность как явление может происходить в природе, то есть в естественных условиях. Такое явление получило название «естественная радиоактивность». Явление радиоактивности, которое регистрируется в веществах, полученных искусственным путем и не встречающихся в природе, получило название «искусственная радиоактивность».

По своей природе радиоактивные излучения оказались неоднородными.

А. Беккерель и независимо от него ученые С. Мейер и Э. Швейдлер обнаружили, что радиоактивные излучения радия и полония отклоняются в магнитном поле от прямолинейного направления. Это показывало, что в состав излучения входят компоненты, несущие электрический заряд различного знака.

Э. Резерфорд в 1900 году установил, что часть радиоактивного излучения отклоняется в магнитном поле подобно катодным лучам – потоку электронов. А. Беккерель определил, что отношение заряда этих частиц к их массе (E/m) такое же, как и у электронов, движущихся с большой скоростью. Стало ясно, что эта часть радиоактивного излучения, названная β -излучением, представляет собой поток электронов. Тогда же Э. Резерфорд отметил, что часть излучения, хотя и очень слабо, отклоняется магнитным полем в направлении, противоположном β -излучению. Эта часть излучения была названа α -излучением.

Гамма-лучи были открыты французским физиком П. Вилларом в 1900 году при изучении испускаемого радием излучения. Виллар обнаружил, что если исключить альфа-частицы, останавливаемые тонким слоем свинца, то в магнитном поле остающиеся «лучи» делятся на две фракции: отклоняющиеся известные к тому моменту бета-частицы и не отклоняющиеся новые лучи (примерно 0,01%). Этот вид излучения был назван гамма-лучами (γ -лучами) Резерфордом в 1903 году. Позже оказалось, что они представляют собой кванты (порции) электромагнитного излучения (электромагнитные волны).

Данные названия видов радиоактивных излучений учеными были предложены по первым буквам греческого алфавита (α , β , γ).

2.1. Основные виды радиоактивных излучений и их характеристика

Радиоактивное излучение по природе неоднородно и представлено двумя группами: корпускулярными и электромагнитными (квантовыми) излучениями. Радиоактивными корпускулярными излучениями являются протоны, нейтроны, альфа-частицы, бета-частицы (электроны и позитроны), нейтрино (антинейтрино), осколки ядер и др. Электромагнитные излучения представлены радиоактивным гамма-излучением и ионизирующим рентгеновским излучением (не радиоактивное), которое может быть тормозным и характеристическим. Однако это деление излучений на корпускулярные и электромагнитные несколько условно, так как фотон является в одинаковой мере квантом энергии, проявляющим волновые свойства, и частицей. В 1924 году Луи де Бройль обосновал, что электрон может проявлять корпускулярные и волновые свойства. Двойственность природы микрочастиц в дальнейшем была подтверждена экспериментально.

Радиоактивными излучениями являются потоки частиц и квантов, испускаемые атомами в результате внутриядерных превращений (таблица 1).

Для характеристики свойств радиоактивных излучений используют следующие параметры: скорость, энергия и ее спектр, пробег, проникающая способность, ионизация и ее плотность и др.

***Пробегом** называется путь, пройденный частицей в веществе до ее полной остановки.*

Плотность ионизации определяется числом пар ионов, образующихся на единицу длины пути частицы.

К основным видам радиоактивного излучения относят альфа-, бета- и гамма-излучения.

Таблица 1 –Виды радиоактивных излучений

<i>Корпускулярные излучения</i>	<i>Электромагнитные излучения</i>
Альфа-частицы ($\alpha \rightarrow \frac{4}{2}\alpha$) – ядра атома гелия	Гамма-кванты
Бета-частицы ($\beta \rightarrow \pm\beta$) – электроны и позитроны	
Нейтроны (1_0n)	
Протоны (1_1p)	
Нейтрино (ν^-) и антинейтрино ($\bar{\nu}$)	
Мезоны (π^-, π^+, π^0)	
Осколки ядер тяжелых элементов	

Альфа-излучение – поток альфа-частиц.

Альфа-частицы – это дважды ионизированные атомы гелия или ядра атомов гелия. Состоят они из двух протонов и двух нейтронов, имеют положительный двойной заряд (заряд двух протонов) и массу, равную четырем (4,003 а. е. м. – сумма массы двух протонов и двух нейтронов). Масса их превышает массу электрона в 7300 раз. Обозначаются альфа-частицы символом ${}^4_2\alpha$ или символом ${}^4_2\text{He}$ (в ядерных реакциях). Альфа-частицы появляются при радиоактивном альфа-распаде ядер. Изотопы, распадающиеся по альфа-распаду, называются α -активными.

Альфа-частицы имеют ядерное происхождение. Из ядра вылетают со скоростью 14 тыс. км/с – 24 тыс. км/с (от $1,4 \cdot 10^7$ до $2,4 \cdot 10^7$ м/с). Альфа-частицы – тяжелые частицы, летят прямолинейно и имеют значительную энергию от 2 до 11 МэВ. Энергия α -распада всегда связана с разностью масс и уровнями возбуждения исходного и конечного ядер, а потому спектр испускаемых α -частиц всегда является не сплошным, а линейчатым. Для конкретного радиоизотопа энергия альфа-частиц почти постоянная, поэтому такой спектр по энергии носит название «моноэнергетический»(монохроматический). В воздухе пробег альфа-частиц составляет (в зависимости от их скорости и энергии) от 2 до 11 см (максимум – 22,4 см), в воде – 30-50 мкм, в металлах – 10-20 мкм, в биологических тканях – 5-100 мкм (в среднем – 50-70 мкм), в стекле – $4 \cdot 10^{-3}$ см, а в алюминии – 0,01 мм. Например, пробег α -частицы с типичной энергией $E_\alpha=6$ МэВ составляет примерно 5 см в воздухе.

Имея значительную массу и энергию, α -частицы вызывают большую ионизацию атомов и молекул среды. В воздухе на 1 см пути α -частицы образуют 100-250 тыс. пар ионов (+ и -), или 3000-4000 пар ионов на 1 мкм пробега в биологических тканях. У α -частиц наибольшая по сравнению с

другими видами излучений плотность ионизации. Причем к концу пробега альфа-частицы резко возрастает плотность ионизации.

Альфа-частицы вследствие малой проникающей способности полностью задерживаются листом бумаги, спецодеждой и роговым слоем эпидермиса. Поэтому внешнее облучение от альфа-источников излучения практически не создает опасности для биологического объекта. Наиболее опасны α -излучатели, если они попадают внутрь организма. Альфа-частицы, обладая малым пробегом, передают клеткам и тканям организма всю свою энергию за счет ионизации и возбуждения атомов и молекул.

Растратив энергию на ионизацию и возбуждение атомов и молекул, потеряв скорость, альфа-частицы захватывают два свободных электрона из окружающей среды и становятся атомами гелия.

Альфа-частицы используются для осуществления ряда ядерных реакций, в частности для получения нейтронов и некоторых радиоактивных изотопов.

Бета-излучение – поток бета-частиц.

Бета-частицы представлены электронами или позитронами, испускаемыми ядрами атомов при их бета-распаде. Бета-частицы обозначаются символом β^- или e^- (электроны), β^+ или e^+ (позитроны). Физическая характеристика электронов (β -частиц) ядерного происхождения (масса, заряд, устойчивость) такая же, что и у электронов атомной оболочки. Позитроны отличаются от электронов только наличием положительного заряда.

Бета-частицы испытывают рассеивание на электронах и ядрах облучаемого вещества. При этом они теряют свою энергию, ионизируют и возбуждают атомы, вызывают тормозное рентгеновское излучение.

Скорость полета β -частиц в вакууме составляет от 87 тыс. км/с до 298 тыс. км/с ($87 \cdot 10^8$ м/с – $298 \cdot 10^8$ м/с), т. е. приближается к скорости света. Бета-частицы имеют значительную энергию: мягкое β -излучение от 0,015-0,5 МэВ и жесткое – до 3-12 МэВ. Энергия β -распада (E_β) делится между тремя частицами: электроном (позитроном), антинейтрино (нейтрино) и остаточным ядром. В результате β -частицы, в отличие от α -частиц, не обладают строго определенной энергией, и спектр их является не линейчатым, а сплошным – от нуля до E_{\max} , если остаточное ядро оказывается в возбужденном состоянии.

Нейтрино (ν) – стабильная незаряженная элементарная частица, имеющая массу покоя (масса нейтрино меньше 0,0005 массы электрона), движется со скоростью света. Нейтрино участвует в гравитационном взаимодействии, чрезвычайно мало взаимодействует с веществом и для живых организмов опасности не представляет. Экспериментально нейтрино была обнаружена в 1956 году американскими физиками Ф. Райнесом и К. Коуэном. Существует электронное нейтрино (ν_e) и антинейтрино ($\bar{\nu}_e$), выступающие в паре с электроном и позитроном.

Длина пути пробега β -частиц зависит от их энергии. В воздухе может составлять десятки сантиметров, несколько метров (максимально до 25 м), в биологических тканях – в среднем 10 мм. Например, пробег β -частиц с энергией 5 МэВ в воздухе составляет 22,3 м, в биологической ткани – 1-22 мм. Путь пробега частиц извилист, так как они, имея малую массу и отрицательный

заряд, легко отклоняются в электронном облаке встречных атомов и под действием электрического и магнитного полей изменяют направление движения. В воздухе на 1 мкм пути образуют 50-100 пар ионов. Отдав энергию на процессы ионизации и возбуждения атомов и потеряв скорость, β -частицы (электроны) становятся «свободными» электронами и могут присоединяться к атомам вещества или участвовать в рекомбинации ионов. Защитой от бета-частиц могут служить материалы, состоящие из элементов с малым порядковым номером: оконное стекло, органическое стекло и плексиглас толщиной 0,5 см, алюминий – 3 мм и др.

Так как массы выбрасываемых электрона, позитрона, нейтрино и антинейтрино крайне малы по сравнению с массой протонов и нейтронов, то массовое число атома можно считать неизменным.

Гамма-излучение (кванты, фотоны) – фотонное излучение, возникающее при ядерных превращениях или аннигиляции частиц.

Гамма-излучение это коротковолновое (длина волны $\leq 10^{-6}$ мкм или 10^{-10} м – 10^{-13} м) электромагнитное излучение. Природа гамма-излучения аналогична природе рентгеновских, ультрафиолетовых, инфракрасных лучей, видимого света (γ -лучи обладают меньшей длиной волны, большей частотой колебания и более высокой энергией). Фотоны существуют только в движении, их масса покоя равна нулю. Фотон – элементарная частица энергии, обладающая как свойствами частицы, так и волны: фотон не имеет заряда и массы, но обладает импульсом. Энергия света, рентгеновских лучей, гамма-лучей и т.д. переносится фотонами. Массу движущегося фотона можно определить, исходя из его кинетической энергии по формуле: $E = m \cdot c^2$. При энергии гамма-кванта, равной 1 МэВ, масса фотона составляет 0,001 а.е.м.

Гамма-кванты имеют ядерное происхождение (за исключением аннигиляционного гамма-излучения, которое образуется в электронных оболочках атома). При альфа- и бета-распаде появившиеся дочерние ядра могут иметь избыток энергии (дочерние ядра возбуждены), и эта энергия мгновенно высвечивается и покидает ядро в виде гамма-квантов. Они лишены массы покоя, в электрическом и магнитном полях не отклоняются и имеют большую проникающую способность. Распространяются от источника прямолинейно и во все стороны со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с).

Энергия гамма-кванта (E_γ) пропорциональна частоте колебания и определяется по формуле:

$$E_\gamma = h\nu,$$

где h – постоянная Планка;

ν – частота колебаний.

Чем меньше длина волны и больше частота колебаний излучения, тем больше его энергия и проникающая способность.

Энергия гамма-квантов может составлять от нескольких килоэлектронвольт (кэВ) до 2-3 МэВ и редко – 5-6 МэВ, поэтому различают мягкое и жесткое γ -излучение. Гамма-излучатели имеют иногда моноэнергетический спектр, чаще – линейчатый спектр (набор квантов различной энергии для каждого изотопа постоянен).

Пробег гамма-квантов в воздухе составляет 100-150, максимум до 600 м. Обладают высокой проникающей способностью. Биологические объекты гамма-кванты проходят насквозь. Ионизационная способность их низкая – до 3000 пар ионов на всем пути движения в воздухе. Гамма-кванты могут вызывать вторичную ионизацию, чем, наряду с большой проникающей способностью, объясняется их опасность для биологических объектов. Они представляют основную опасность как источник внешнего облучения. После взаимодействия со средой гамма-кванты рассеиваются и прекращают свое существование.

***Рентгеновское излучение** – фотонное излучение, атомного происхождения.*

Рентгеновское излучение по способу возбуждения бывает тормозным и характеристическим. Занимает спектральную область между гамма- и ультрафиолетовым излучением в пределах длин волн 10^{-12} - 10^{-5} см). Энергетический диапазон 100 эВ - 0,1 МэВ. Иногда выделяют рентгеновские лучи с более короткой длиной волны – до 10^{-14} м. Условно рентгеновское излучение с длиной волны менее $2 \cdot 10^{-12}$ м называют жестким, с длиной волны более $2 \cdot 10^{-12}$ м – мягким. Отличается рентгеновское излучение от гамма-излучения не только характеристикой волны, но и своим происхождением, так как образуются в атомах, а не в ядрах элементов. Рентгеновское излучение относится к ионизирующему излучению и по биологическому действию близко к гамма-излучению.

*Рентгеновское излучение возникает при переходе электронов с внешних на внутренние оболочки атома (электронный захват, внутренняя конверсия, переход атомов в невозбужденное состояние) – **характеристическое рентгеновское излучение.***

*Рентгеновское излучение, возникающее при торможении электронов в электрическом поле ядер атомов вещества – **тормозное рентгеновское излучение.***

Рентгеновское излучение генерируется и в рентгеновских установках рентгеновскими трубками.

***Протонное излучение** – это поток протонов, составляющих основу космического излучения, а также наблюдаемых при ядерных взрывах. Их пробег в воздухе и проникающая способность занимают промежуточное положение между альфа- и бета-излучением.*

***Нейтронное излучение** – поток нейтронов, наблюдаемых при ядерных взрывах, особенно нейтронных боеприпасов и работе ядерного реактора. Последствия его воздействия на окружающую среду зависят от начальной энергии нейтрона, которая может меняться в пределах 0,025-300 МэВ.*

2.2. Типы ядерных превращений

Ионизирующие (радиоактивные) излучения появляются в результате ядерных превращений. Существуют следующие основные типы ядерных превращений: альфа-распад, бета-распад (электронный и позитронный), электронный захват, внутренняя конверсия.

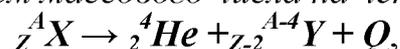
Альфа-распад – испускание ядрами атомов α -частиц в процессе радиоактивного распада.

К альфа-распаду склонны химические элементы, стоящие в основном после 82 номера Периодической системы Д.И. Менделеева и имеющие ядра с $A > 200$ (т.е. малыми энергиями связи). Для данных элементов характерно несоответствие в ядре числа протонов и нейтронов. Наблюдается нейтронная перегрузка ядра. Например, радиоизотоп ${}_{92}^{238}\text{U}$ (количество протонов – 92, нейтронов – 146 или соотношение между ними составляет 1:1,6). Такие ядра химических элементов неустойчивы (возбуждены) и претерпевают радиоактивные самопроизвольные превращения, когда ядро атома материнского элемента превращается в ядро атома дочернего (другого) элемента.

Альфа-распаду подвергается более 10% радиоактивных изотопов.

В процессе альфа-распада различают две стадии: образование альфа-частицы из нуклонов ядра и испускание альфа-частицы ядром. Из ядра радиоактивного изотопа урана (${}_{92}^{238}\text{U}$) вылетает альфа-частица, унося два протона и два нейтрона, и как следствие вместо ядра урана появляется ядро дочернее, заряд которого на 2 меньше, а массовое число – на 4. Появляется новый химический элемент, который занимает место на два номера влево от исходного элемента – торий (${}_{90}^{234}\text{Th}$).

Немецкий ученый (физик и химик) Казимеж Фаянс и независимо от него английский радиохимик Фредерик Содди в 1913 году сформулировали правило (закон) смещения: «Образующийся при альфа-распаде дочерний элемент смещен влево относительно исходного на два номера Периодической системы Д.И. Менделеева с уменьшением массового числа на четыре единицы».



где X – символ химического элемента материнского ядра;

${}^4_2\text{He}$ – альфа-частица;

Y – символ химического элемента дочернего ядра;

Q – освобожденная энергия.



При данном типе ядерного превращения (альфа-распад) выделяется дополнительно энергия в виде тепла (Q).

Известно около 200 альфа-активных видов ядер. Ядра с порядковым номером, меньшим 82, считаются в основном стабильными по отношению к альфа-распаду. Несколько альфа-активных ядер (например, ${}_{62}^{146}\text{Sm}$ – самарий) имеется в области редкоземельных элементов.

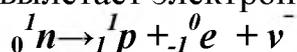
Бета-распад – радиоактивный распад атомного ядра, сопровождающийся вылетом из ядра электрона или позитрона, которые носят общее название бета-частиц.

Бета-распад имеет место у элементов всех частей Периодической системы Д.И. Менделеева, преимущественно средних и тяжелых ядер. Различают электронный и позитронный бета-распад.

Электронный бета-распад присущ естественным и искусственным химическим элементам, у которых в ядре число нейтронов больше требуемого

для его стабильности (нейтронная перегрузка ядра) и превышает число протонов. Электронному β -распаду подвергается около 46% всех радиоактивных изотопов.

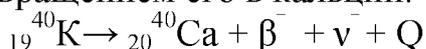
При этом типе ядерного превращения один из нейтронов ядра превращается в протон, а из ядра вылетает электрон и антинейтрино:



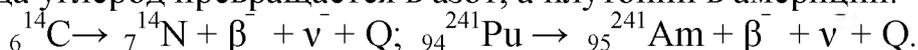
Положительный заряд появившегося протона при электронном распаде уравнивается отрицательным зарядом электрона. При этом появляется новый, дочерний элемент, который в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева стоит на один номер вправо. Массовое число не изменяется.



Примером электронного бета-распада является распад радиоактивного изотопа калия-40 (${}_{19}^{40}\text{K}$) с превращением его в кальций:



Или когда углерод превращается в азот, а плутоний в америций:



На рисунках 5 и 6 приведены схемы распада наиболее значимых (дозообразующих) после аварии на ЧАЭ радионуклидов стронция-90 и цезия-137.

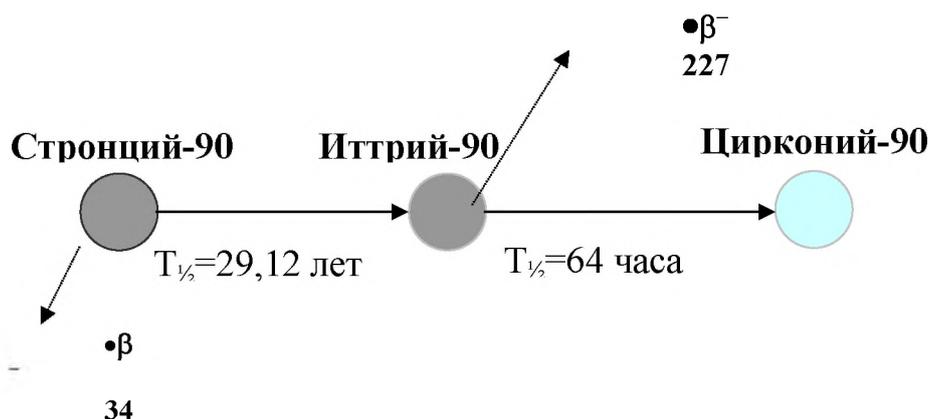


Рисунок 5 - Схема распада стронция-90

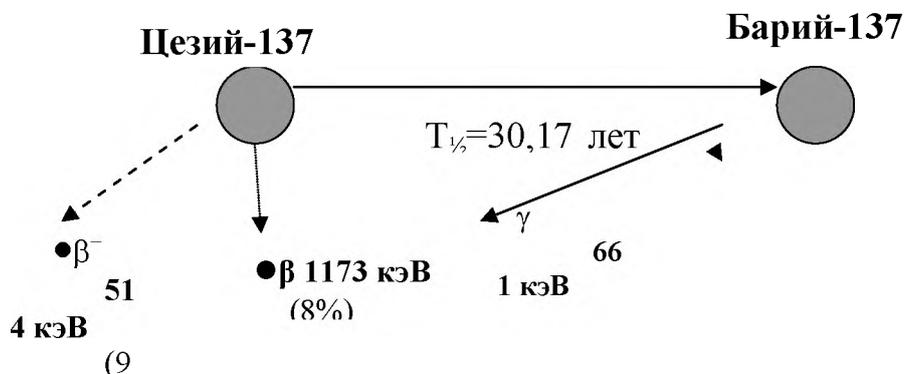
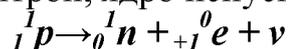


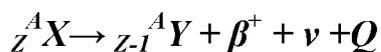
Рисунок 6 - Схема распада цезия-137

Позитронный бета-распад происходит у некоторых искусственно полученных изотопов, ядра которых содержат больше протонов (протонная перегрузка ядра), чем нейтронов, или это соотношение может быть равным.

Ядра такие неустойчивы и претерпевают позитронный бета-распад. Один из протонов ядра превращается в нейтрон, ядро испускает позитрон и нейтрино:

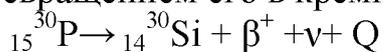


Вместо положительного заряда исчезнувшего протона появляется позитрон:

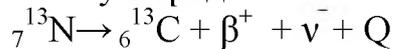


Заряд ядра и, соответственно, атомный номер элемента уменьшится на единицу, появившийся новый дочерний элемент в Периодической системе элементов Д.И. Менделеева стоит на один номер влево. Массовое число не изменяется. Позитронный бета-распад характерен для 11% радиоактивных изотопов, преимущественно с $Z < 45$.

Примером позитронного бета-распада является распад радиоактивного изотопа фосфора-30 (${}_{15}^{30}\text{P}$) с превращением его в кремний:

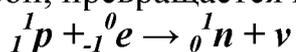


Или когда из азота появляется углерод:



Позитрон, вылетев из ядра, срывает с оболочки атома «лишний» электрон или взаимодействует со свободным электроном, образуя пару «позитрон-электрон», которая мгновенно аннигилирует, то есть превращается в два гамма-кванта с энергией, эквивалентной массе частиц. Такое гамма-излучение получило название аннигиляционного гамма-излучения. Таким образом, происходит превращение одной формы материи (частиц) в другую (гамма-фотоны) – волновую. В итоге при позитронном бета-распаде ядро атома покидает позитрон, а атом обычно покидают два гамма-кванта.

Электронный захват, или К-захват. Электронный К-захват характерен для 25% всех радиоактивных ядер. Преимущественно для искусственных радиоактивных изотопов, имеющих излишек протонов ($Z = 45-105$). Только три изотопа естественных химических элементов претерпевают К-захват: калий-40 (${}_{19}^{40}\text{K}$), лантан-139 (${}_{57}^{139}\text{La}$), лютеций-176 (${}_{71}^{176}\text{Lu}$). Превращение ядер протонного наполнения может происходить путем захвата протоном ядра электрона с электронных оболочек атома – К или L (К- или L-захват). Наиболее вероятен захват электрона с ближайшей к ядру оболочки – К-слоя, реже (в 100 раз) – с L-слоя, поэтому чаще его называют К-захватом. Захват электрона ядром с последующих оболочек M, N, O, P, Q не наблюдался. Один из протонов ядра, захватив электрон, превращается в нейтрон:



Заряд ядра и атомный номер элемента уменьшаются на единицу (при этом появляется новый химический элемент, стоящий на один номер влево по Периодической системе элементов Д.И. Менделеева), массовое число не изменяется, а сам атом остается нейтральным:



Например, ${}_{19}^{40}\text{K} + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{19}^{40}\text{Ar} + \nu$ или ${}_{25}^{54}\text{Mn} + {}_{-1}^0e \rightarrow {}_{24}^{54}\text{Cr} + \nu$.

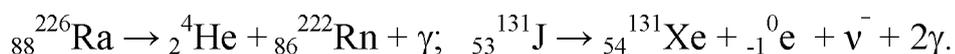
Избыточная энергия ядра излучается в виде нейтрино. В атоме на свободное место электрона К- или L-слоя приходит и становится электрон с более отдаленных электронных орбит (более высоких энергетических уровней),

как следствие, такой переход сопровождается выделением избытка энергии из атома в виде характеристического рентгеновского излучения.

Некоторые ядра могут распадаться несколькими способами (двумя-тремя), например, естественный радиоизотоп калия-40 подвергается электронному бета-распаду (88%) и К-захвату (12%).

Некоторая часть возбужденных ядер, обладающих избытком энергии, переходит в невозбужденное нормальное, с меньшей энергией, состояние путем не только испускания каких-либо частиц (альфа-, бета-частиц, нейтрино и др.), излучения гамма-квантов, но и путем внутренней конверсии, или конверсии с образованием электронно-позитронных пар.

Испускание гамма-излучения не является самостоятельным видом радиоактивного распада, так как при этом не происходит превращение элементов. Гамма-излучение представляет собой поток электромагнитных волн, возникающих при альфа- и бета-распаде ядер атомов (как естественных, так и искусственных радиоактивных изотопов), когда в дочернем ядре существует избыток энергии. И эта энергия мгновенно высвечивается в виде гамма-квантов:



Внутренняя конверсия. Явление внутренней конверсии осуществляется в передаче ядром энергии возбуждения одному из электронов внутренних слоев (К-, L- или M-слоя), который, получив энергию, разрывает свою связь с ядром и покидает пределы атома. Такой электрон получил название электрона внутренней конверсии. Электроны внутренней конверсии имеют линейчатый спектр энергии в отличие от бета-частиц, имеющих сплошной спектр энергии. На свободное место, вместо вылетевшего конверсионного электрона, осуществляет квантовый переход один из электронов с более отдаленных слоев. Из атома при этом происходит высвобождение энергии в виде характеристического рентгеновского излучения.

Если энергия возбуждения ядра превосходит 1,022 МэВ, то может происходить переход ядра в невозбужденное состояние путем образования пары «электрон-позитрон» с последующей их аннигиляцией (излучением двух гамма-квантов).

Наряду с рассмотренными основными видами радиоактивных превращений ядер существуют и другие виды.

Спонтанное (самопроизвольное) деление открыто в 1940 году Г.Н. Флёрвым и К.А. Петржаком. **Спонтанное деление атомных ядер (нейтронный распад)** – это самопроизвольное деление некоторых тяжелых ядер (уран-238, 235, калифорний-240, 248, 249, 250; кюрий-244, 248 и др.). Процесс самопроизвольного деления ядер происходит из-за того, что ядра сами по себе нестабильны. При таком распаде возбуждение ядра приводит к его разрыву на две примерно равные части (на два осколка – ядра, близких по массе), что сопровождается выбросом нуклонов (чаще нейтронов – обычно 2–3 на акт деления), бета-частиц, гамма-квантов и выделением огромной энергии (200 МэВ). При самопроизвольном делении имеет место неравенство:

$$m_{\text{яд}} > m_1 + m_2,$$

где $m_{\text{яд}}$ – масса ядра;

m_1 и m_2 – массы ядер-осколков, образующиеся в результате распада ядра.

Кинетическая энергия ядер-осколков во много раз больше энергии альфа-частиц. Продукты деления являются радиоактивными. Вероятность самопроизвольного деления ядер незначительна по сравнению с альфа-распадом.

Протонная радиоактивность как тип распада открыта в 1970 году Дж. Черны. В ядрах, где нейтронов мало (нейтронодефицитные ядра), энергия связи протонов невелика и может даже оказаться отрицательной. В результате протон может вылететь из ядра.

В 1960 году В.И. Гольданским теоретически предсказана *двупротонная радиоактивность*.

2.3. Ядерные реакции

Ядерные реакции – превращение ядер атомов, вызванное взаимодействием с элементарной частицей или другим ядром.

Впервые ядерную реакцию получил в 1919 году Э. Резерфорд. При бомбардировке ядер азота альфа-частицами, образующимися при распаде радия, происходит превращение ядер азота в ядра изотопа кислорода с выбрасыванием протонов:



Представления о механизме ядерной реакции были сформулированы в 1930-х годах Н. Бором. Основным условием осуществления ядерной реакции является высокая кинетическая энергия частицы, достаточная, чтобы при соударении частица сблизилась с ядром на расстояние действия ядерных сил. При этом она поглощается ядром и образуется промежуточное ядро, которое существует порядка 10^{-14} - 10^{-12} с. В промежуточном ядре происходит перестройка нуклонов, в результате которой они образуют новый устойчивый комплекс (ядро нового элемента), а частицы, оказавшиеся при этом лишними, выбрасываются из ядра.

Основным правилом при составлении уравнения ядерной реакции является равенство в обеих его частях суммы верхних (массовых чисел) и нижних (атомных номеров) индексов. Это является выражением законов сохранения массы и заряда частиц, участвующих в реакции.

Ядерные реакции, вызываемые альфа-частицами, имеют только исторический интерес. В настоящее время ядерные реакции осуществляют с использованием искусственно полученных частиц, в частности протонов и дейтронов (ядра тяжелого водорода). Реакции осуществляются путем воздействия потока ускоренных частиц на тонкий слой вещества.

В результате поглощения ядром гамма-фотона с высокой энергией может произойти фотоядерная реакция или ядерный фотоэффект, при которой из ядра выбрасывается нуклон или альфа-частица и ядро превращается в ядро другого элемента.

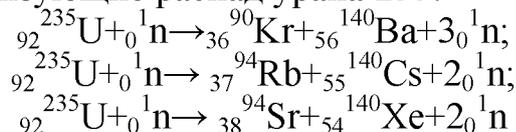
Большая вероятность ядерных реакций возникает при действии нейтронов. Не имея электрического заряда, нейтроны свободно проходят через электронные оболочки атома, соударяясь с ядрами, вызывают ядерные реакции. При столкновении потока медленных нейтронов со стабильными ядрами наблюдаются *реакции радиационного захвата или реакции активизации* – превращение стабильных ядер в собственный радиоактивный изотоп. Именно такая реакция активизации наблюдается у стабильных элементов крови и других органов при нейтронном облучении, вызывая наведенную радиоактивность организма.

При ядерных реакциях может происходить как выделение энергии, так и ее поглощение. Если общая кинетическая энергия частиц, образовавшихся в результате реакции, больше общей кинетической энергии частиц, вступивших в нее, то энергетический баланс реакции считается положительным. Если наоборот, то – отрицательным.

Деление ядер происходит у радиоактивных элементов с большим атомным номером при захвате их ядрами медленных нейтронов.

При делении ядер урана-235 образуются осколки деления, которые представляют собой ядра элементов со средними массовыми числами в соотношении 2:3, а также свободные нейтроны и гамма – излучение. При этом происходит выделение значительной энергии около 200 МэВ.

Уравнения, характеризующие распад урана-235:



Ядра урана-238 делятся только быстрыми нейтронами.

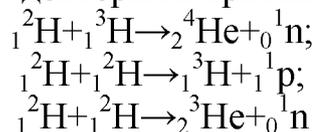
После захвата ядром нейтрона образуется новое ядро с массовым числом, большим на единицу. Новое ядро энергетически неустойчиво и мгновенно делится. Вследствие деления ядер тяжелых элементов образуются осколки, дочерние ядра элементов ${}_{36}^{90}\text{Kr}$ ${}_{56}^{140}\text{Ba}$, имеющие избыточное количество нейтронов. Всего образуется порядка 80 различных осколков, которые разлетаются со скоростью, равной скорости света. Такие осколки ядер неустойчивы и претерпевают несколько последовательных бета – распадов.

Возникающие ядра легких элементов имеют большую энергию связи, приходящуюся на одну частицу. Как следствие, выделяется ядерная энергия, соответствующая разнице энергии связи частиц в ядрах тяжелых и легких элементов. Если нейтроны, которые появились в результате деления одного ядра, используются вновь для последующего деления, то реакция будет цепной.

Когда цепная реакция нарастает лавинообразно в течение короткого промежутка времени, выделяется огромная энергия и происходит взрыв. Это происходит при условии, когда масса способного к делению материала достигает критической величины. *Наименьшее количество вещества, в котором возможна цепная реакция деления, называется критической массой.* Для урана-235 это десятки килограмм, для урана-238 – 5-6 кг. На этом основано устройство атомной бомбы.

Термоядерные реакции (реакция синтеза) – реакции, происходящие при температурах, достигающих порядка десятков миллионов градусов и характеризующиеся взаимодействием ядер легких элементов.

При высоких температурах ядра легких элементов, двигаясь с большими кинетическими энергиями, сближаются на малые расстояния (около 10^{-15} м) и объединяются в ядра более тяжелых элементов. Примером служит синтез ядер гелия из ядер изотопа водорода – дейтерия и трития:



Есть основания полагать, что термоядерные реакции протекают в недрах Солнца и являются источником пополнения громадных запасов энергии, которую оно теряет в результате излучения.

На этом принципе основана работа термоядерных реакторов (водородная бомба). Основой термоядерных зарядов служит плутониевый запал (атомная бомба), для создания высокой температуры, и смесь изотопов легкого элемента (дейтерия и трития). В водородной бомбе термоядерная реакция носит неконтролируемый характер.

2.4. Закон радиоактивного распада

Количество любого радиоактивного изотопа со временем уменьшается вследствие радиоактивного распада. Особенностью радиоактивного распада является то, что ядра одного и того же элемента распадаются не все сразу, а постепенно. В каждую единицу времени распадается лишь некоторая часть от общего числа ядер радиоактивного элемента. Иными словами, распад ядер происходит неравномерно – то большими, то меньшими порциями. Скорость распада определяется только строением ядра и ее нельзя замедлить или ускорить никакими внешними воздействиями (температурой, давлением и т. д.). Момент распада ядра не может быть указан заранее и носит вероятностный характер. Однако средняя скорость распада ядер одного и того же изотопа постоянна и можно теоретически установить вероятность распада одного ядра за единицу времени.

Постоянная распада λ – величина, которая показывает, какая доля ядер радионуклидов распадается в единицу времени.

Размерность постоянной распада выражается в обратных единицах времени: с^{-1} , мин^{-1} , ч^{-1} и т.д., чтобы показать, что количество радионуклидов не растет, а убывает.

Постоянная распада является справочной величиной и строго определена для каждого типа радионуклидов. Она также характеризует относительную скорость распада.

Величину, обратную постоянной распада называют **продолжительностью жизни ядра (среднее время жизни радиоактивного изотопа)**:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Продолжительность жизни ядра выражается в единицах времени.

Радиоактивное превращение одного из ядер никак не влияет на превращение соседних ядер, то есть процессы распада различных ядер протекают абсолютно независимо друг от друга. Бесмысленно говорить о времени жизни одного радиоактивного ядра. При использовании этого термина подразумевают усредненные величины, справедливые при достаточно большом количестве ядер. Когда говорят о времени жизни ядра, то понимают под этим среднее время жизни ядер в каком-либо образце, содержащем эти ядра.

Закономерности распада проявляются только для большого числа радионуклидов, как правило, больше чем 100 ядер. Скорость распада зависит только от числа радиоактивных ядер в данный момент времени. Такие процессы описываются экспоненциальным соотношением. Математически **закон радиоактивного распада** выражается следующим уравнением и устанавливает, что за единицу времени распадается всегда одна и та же доля имеющихся ядер элемента:

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

где N_t – количество ядер, оставшихся через промежуток времени;

N_0 – начальное количество ядер в момент времени;

$e = 2,72$ – основание натурального логарифма;

λ – постоянная распада;

t – время распада.

Для характеристики скорости распада элементов в практике вместо понятия «постоянная распада» используют понятие «период полураспада».

Период полураспада $T_{1/2}$ – время в течение, которого распадается половина исходного количества радиоактивных ядер.

Период полураспада выражается в единицах времени.

Период полураспада и продолжительность жизни ядра связаны соотношением:

$$T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2 = \tau \cdot 0,693$$

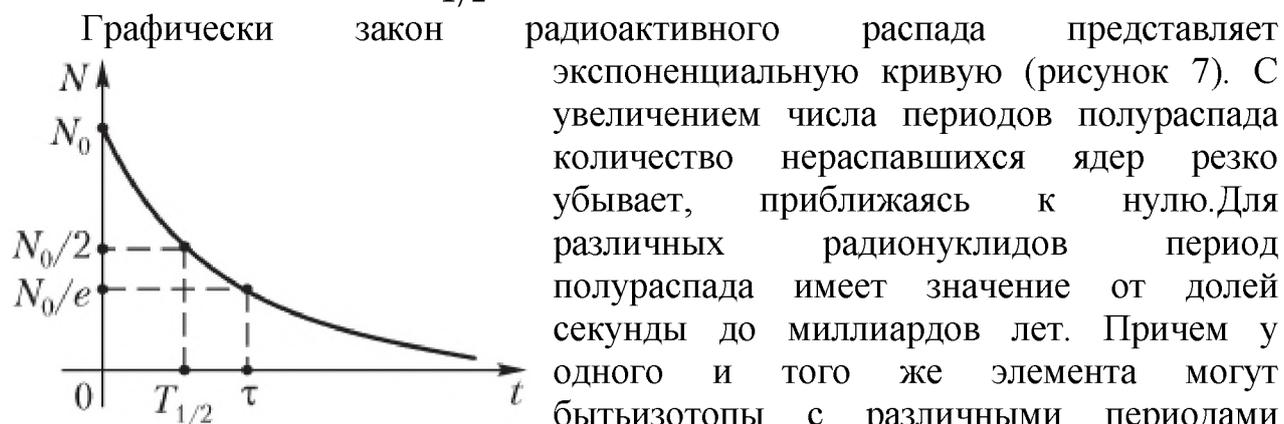


Рисунок 7 – Закон радиоактивного распада

Зная период полураспада или постоянную распада, всегда можно идентифицировать радионуклид, т.е. указать, какой именно радионуклид присутствует в данном продукте.

Период полураспада связан со средним временем жизни ядра и постоянной распада формулами:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Это соотношение показывает, что между двумя постоянными существует обратная зависимость, то есть чем больше значение постоянной распада, тем меньше период полураспада и, соответственно, распад протекает быстрее; и наоборот. Используя связь между постоянными, можно получить еще одно математическое выражение *закона радиоактивного распада*:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\frac{0,693}{T_{1/2}} \cdot t}$$

В 1907 году Мария Склодовская-Кюри подарила Парижскому радиевому институту 1 г радия. За 91 год его количество уменьшилось примерно на 35 мг. Лишь к 3947 году от подаренного грамма останется половина. Пройдет 10 периодов полураспада и от радиоактивного вещества останется менее 0,1%. Считается, что до полного распада химического элемента требуется 20 периодов полураспада.

Однако, исходя из вида экспоненциальной кривой, которая всегда стремится к нулю, но его не достигает, постоянно существует вероятность, что хотя бы мизерное количество данных радионуклидов может не распасться через это время.

2.5. Естественная радиоактивность и радиоактивные семейства

Природная радиоактивность Земли обусловлена радионуклидами и радиоизотопами естественного происхождения, присутствующими во всех оболочках Земли: литосфере, гидросфере, атмосфере и биосфере. Известно около 300 радионуклидов, имеющих естественное происхождение. Они образовались и постоянно образуются без участия человека. Нестабильные ядра их распадаются. Образовавшиеся дочерние ядра могут быть радиоактивными и стабильными, радиоактивные ядра продолжают распадаться. И такой процесс может иметь длительный период, пока не появится конечное стабильное (устойчивое к распаду) ядро. Главным источником поступления в окружающую среду естественных радионуклидов являются горные породы, в состав которых вошли все радиоактивные элементы, возникшие в период формирования и развития планеты. В результате метеорологических, гидрологических, геохимических и вулканических процессов они подверглись широкому рассеиванию. Многие радиоактивные элементы можно обнаружить только в виде следов, а в целом ряд элементов в природе содержится в рассеянном виде или сконцентрированы в виде месторождений (уран, торий). Уран и торий имеют важное значение для атомной промышленности. В тоже время надо учитывать, что естественные радиоактивные элементы и их изотопы могут быть получены искусственным путем.

В биосфере Земли содержится более 60 естественных радионуклидов, которые условно могут быть разделены на три группы:

1. Радионуклиды, входящие в состав трех радиоактивных семейств – урана-радия, тория, актиния – и продукты их распада.

2. Радиоактивные элементы (11), не входящие в семейства, но находящиеся в земной коре и объектах внешней среды с момента образования Земли.

3. Космогенные радионуклиды (14), непрерывно образующиеся в результате взаимодействия космического излучения в атмосфере с ядрами атомов азота, водорода, кислорода и др., а затем поступающие на земную поверхность с атмосферными осадками.

В естественных условиях постоянно происходят процессы распада ядер естественных радиоактивных элементов. Образующиеся при их распаде дочерние ядра могут быть радиоактивными и стабильными. Радиоактивные изотопы элементов продолжают превращаться, образуя цепочку до последнего конечного, устойчивого элемента. Эта цепочка получила название **радиоактивного семейства (радиоактивного ряда)**. Радиоактивные семейства – группы генетически связанных радионуклидов, в которых каждый последующий возникает в результате альфа или бета-распада предыдущего. Каждое радиоактивное семейство имеет родоначальника – радионуклид с наибольшим для данного ряда периодом полураспада ($T_{1/2}$).

В случае если изотоп принадлежит к естественному радиоактивному семейству, то он обязательно присутствует в природе, даже если скорость распада его ядер очень велика. Связано это с тем, что в радиоактивных семействах с течением времени устанавливается так называемое *вековое равновесие*.

Время достижения такого равновесия во всем ряду приблизительно равно 10 периодам полураспада самого долгоживущего промежуточного члена ряда. При вековом равновесии скорости образования изотопа и его распада равны. По этой причине содержание такого изотопа остается практически неизменным в течение столетий. Оно с неизмеримо малой скоростью уменьшается лишь по мере распада родоначальника ряда. Установлением векового равновесия в естественных семействах объясняется присутствие в природе таких относительно малоустойчивых радиоактивных химических элементов, как *протактиний, актиний, радий, франций, радон, астат и полоний*.

В настоящее время в природе существуют три естественных радиоактивных семейства: урана-радия, тория и актиния. Еще одно семейство (четвертое) нептуния было получено искусственным путем.

Родоначальники семейств характеризуются самыми большими массовыми числами и относятся к наиболее долгоживущим. В радиоактивных семействах образуются 45 радионуклидов с периодами полураспада от $3 \cdot 10^{-7}$ с до $2,5 \cdot 10^5$ лет. Во всех случаях в результате распада образуются все более легкие элементы. В первой половине цепи превращений каждого семейства распад сопровождается преимущественно испусканием α -частиц, во второй половине преобладает β -распад. В середине цепи превращений каждого

семейства имеются радиоактивные газы – эманации, относящиеся к группе инертных: радон (${}_{86}^{222}\text{Rn}$) – в семействе урана-238, торон (${}_{86}^{220}\text{Rn}$) – в семействе тория-232 и актинон (${}_{86}^{219}\text{Rn}$) – в семействе урана-235.

За эманациями следуют группы короткоживущих элементов, часть атомов которых распадается с испусканием α -частиц, а другая часть – β -частиц. Эти элементы образуют разветвления рядов – «вилки». Необходимо отметить, что α - и β -распады сопровождаются испусканием γ -квантов различных энергий.

Семейство урана-радия. Родоначальником этого семейства является ${}_{92}^{238}\text{U}$ ($T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет).

Уран как элемент был открыт в 1789 году немецким химиком Мартином Клапротом и назван им в честь планеты Уран.

Семейство получило название урана-радия, так как наиболее важным в радиологическом плане его представителем является изотоп радия (${}_{88}^{226}\text{Ra}$). В цепочке этого семейства 14 превращений: 8 – α - и 6 – β . Конечными элементами в цепочке превращений этого семейства является стабильный изотоп свинца – ${}_{82}^{206}\text{Pb}$.

Семейство тория. Родоначальником этого семейства является ${}_{90}^{232}\text{Th}$ ($T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ лет).

Торий был открыт в 1828 году шведским химиком Йенсом Берцелиусом.

В цепочке 10 превращений: 6 – α и 4 – β . Конечным элементом в цепочке превращений этого семейства является стабильный изотоп свинца ${}_{82}^{208}\text{Pb}$.

Семейство актиния (Ac). Родоначальником этого семейства является ${}_{92}^{235}\text{U}$ ($T_{1/2} = 7,07 \cdot 10^8$ лет). Это семейство еще называют семейство мактиноурана. В цепочке 11 превращений: 7 – α - и 4 – β . Конечным элементом в цепочке превращений этого семейства является стабильный изотоп свинца ${}_{82}^{207}\text{Pb}$.

Учеными было предсказано (воссоздано искусственно) существование четвертого радиоактивного семейства, которого уже нет в природе, так как элементы его в цепочке превращений распались (период полураспада элементов семейства оказался меньше возраста Земли). Это семейство получило название семейства нептуния. Период полураспада нептуния равнялся $2,14 \cdot 10^6$ лет.

Нептуний был первым из открытых трансурановых элементов и назван в честь планеты Нептун. В виде изотопа Np^{239} он впервые был получен Эдвином Макмилланом и Филиппом Эйблсоном (Абельсоном) в 1940 году.

Конечным элементом в цепочке превращений семейства нептуния является не свинец, а стабильный изотоп таллия – ${}_{81}^{205}\text{Tl}$. Из этого семейства только два нуклида встречаются в природе – висмут-209 (${}_{83}^{209}\text{Bi}$) и таллий-205 (${}_{81}^{205}\text{Tl}$).

В результате ядерных испытаний и радиационных аварий на АЭС в окружающую среду попали радионуклиды, такие как плутоний-241 и америций-241, которые также могут быть отнесены по массовому числу к началу ряда нептуния. Слабая альфа-активность висмута-209 была обнаружена лишь в 2003 году, поэтому в более ранних работах его называли конечным (и единственным сохранившимся в природе) нуклидом ряда.

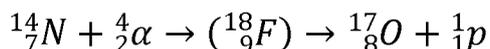
К числу радиоактивных элементов, не входящих в состав рассмотренных семейств (вторая группа), относятся изотопы калия (^{40}K), рубидия (^{87}Rb), индия (^{115}In), самария (^{147}Sm), лютеция (^{176}Lu), рения (^{187}Re) и других (таблица 6). Они вошли в состав Земли с момента ее образования. Для них характерен весьма большой период полураспада ($T_{1/2} > 10^9$ лет). За исключением самария и вольфрама они распадаются путем K -захвата и β -распада, превращаясь в устойчивый изотоп нового элемента. Содержание в природе большинства из перечисленных радиоактивных изотопов, как правило, очень мало. Наибольший интерес среди них представляют радиоактивные изотопы калия (^{40}K) и рубидия (^{87}Rb).

Другие радиоактивные элементы, не входящие в семейства, за исключением вольфрама, относятся к группе редкоземельных, и их вклад в естественную радиоактивность пород незначителен.

Третья группа радионуклидов – космогенные радионуклиды, непрерывно образующиеся в результате взаимодействия космического излучения в атмосфере с ядрами атомов азота, водорода, кислорода и др., а затем поступающие на земную поверхность с атмосферными осадками. К ним всего относится 14 радионуклидов, включая ^3H , ^7Be , ^{13}C , ^{14}C , ^{32}P , ^{33}P , ^{22}Na , ^{35}S , ^{35}Cl .

2.6. Искусственная радиоактивность

Искусственную радиоактивность открыли в 1934 году французские ученые-физики супруги Фредерик Жолио-Кюри и Ирен Кюри. Но первым искусственным путем превратил один элемент в другой в 1919 году английский физик Эрнест Резерфорд. Им в опыте при облучении атомов азота альфа-частицами в камере Вильсона получен изотоп кислорода с выделением частицы протона:



Из этой реакции видно, что альфа-частица захватывается ядром азота и превращается в составное неустойчивое ядро фтора, которое немедленно распадается с образованием ядра кислорода и испусканием протона.

При проведении опыта камера Вильсона была заполнена азотом и пересыщенным водяным паром. Поток альфа-частиц, попадая в камеру, вызывал ионизацию молекул газа. Образующиеся ионы способствовали конденсации молекул воды из пересыщенного водяного пара. Мельчайшие капельки сконденсированной воды создавали видимый след на пути движения ионизирующего излучения.

Э. Резерфорд наблюдал, как при попадании альфа-частиц в газовую среду через какое-то время след некоторых альфа-частиц исчезал, и вместо него появлялись два новых следа: короткий и широкий и длинный и узкий. Он предположил, что происходит превращение ядер азота и как результат образуются ядра атомов кислорода (^{17}O), оставляют короткий и широкий след, и ядра атомов водорода ($^1\text{H} - \frac{1}{1}p$), дающие длинные и узкие следы.

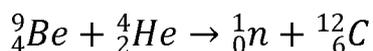
Полученный результат в опыте Э. Резерфорда подтвердил возможность осуществления искусственных ядерных реакций и вместе с тем непосред-

ственно показал, что протоны входят в состав атомных ядер и могут быть выделены (выбиты) из этих ядер.

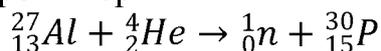
Лишь немногие альфа-частицы попадают в ядро и вызывают ядерную реакцию. Атомные ядра расположены сравнительно далеко друг от друга и между положительно заряженным ядром и альфа-частицей возникают (при их сближении) очень большие кулоновские силы отталкивания; поэтому в ядро может вклиниться только альфа-частица, обладающая достаточно высокой энергией.

Альфа-частицы, имея положительный заряд и массу, равную 4,003, возбудить и вызвать превращение атомов тяжелых элементов не могли. Требовался иной снаряд, не имеющий заряда (нейтральный) и с большой энергией. Им впоследствии стал нейтрон.

В 1930 году немецкие исследователи профессора В. Ботте и Э. Беккер обнаружили, что облучение бериллия альфа-частицами сопровождается неизвестным излучением. При бомбардировке бериллиевой пластинки альфа-частицами ядро бериллия, захватывая ее, испускает нейтрон и превращается в ядро углерода:

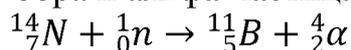


Это же излучение наблюдали при облучении алюминия альфа-частицами Фредерик Жолио-Кюри и Ирен Кюри:

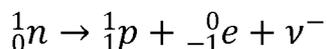


Но только Джейм Чедвик, ученик Э. Резерфорда, в 1932 году доказал, что наблюдаемые излучения являются потоками нейтронов (так были открыты нейтроны – 1_0n).

В опыте нейтроны, вылетающие из бериллия, были направлены в камеру Вильсона, наполненную азотом. Было определено, что при попадании нейтрона в ядро азота образуются ядро бора и альфа-частица:



Свободный нейтрон существует недолго. Нейтрон либо вступает в ядерную реакцию с каким-нибудь атомным ядром, либо, находясь в состоянии свободном, испускает электрон и антинейтрино и превращается в протон:



Нейтрон радиоактивен. Период полураспада его примерно равен 12,8 минуты.

В 1934 году Фредерик Жолио-Кюри и Ирен Кюри, проведя исследования, определили, что в результате бомбардировки альфа-частицами ядер легких элементов образуются другие элементы, являющиеся радиоактивными. Стабильные элементы – алюминий, магний, бор – превращались в радиоактивные элементы ${}^{30}_{15}\text{P}$, ${}^{27}_{14}\text{Si}$, ${}^{13}_7\text{N}$. Это открытие позволило сделать принципиальный вывод о том, что радиоактивные вещества могут создаваться искусственным путем.

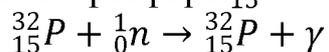
Фредерик Жолио-Кюри писал: «Мы не делаем искусственно ядро радиоактивным, а превращаем это ядро в другое, которое является естественно неустойчивым».

За открытие искусственной радиоактивности Фредерик и Ирен Жолио-Кюри получили Нобелевскую премию в 1938 году.

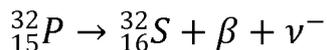
Мощным толчком для получения искусственных радионуклидов явилась возможность бомбардировки ядер потоками нейтронов.

В 1934 году 34-летний академик Энрико Ферми в Риме подверг бомбардировке нейтронами все известные элементы на тот период: от водорода до урана. И у девятого элемента (фтора) уже была обнаружена искусственная радиоактивность. В дальнейшем было выяснено, что 37 элементов обладали искусственной радиоактивностью.

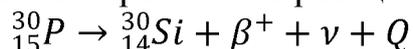
Примером получения радиоактивных изотопов может служить реакция захвата нейтронов фосфором ${}_{15}^{31}\text{P}$. При этом захвате испускается гамма-квант и образуется радиоактивный изотоп фосфора ${}_{15}^{32}\text{P}$:



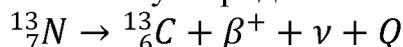
Период полураспада изотопа фосфора $T_{1/2} = 14,3$ дня; распад ядра изотопа, сопровождающийся испусканием β -частицы, ведет к образованию стабильного изотопа серы ${}_{16}^{32}\text{S}$:



Как и естественным радиоактивным веществам, искусственным радиоактивным изотопам свойственны альфа- и электронные бета-распады. Однако имеются и такие искусственно радиоактивные изотопы, которые обладают позитронным бета-распадом. Примером позитронного бета-распада является распад искусственного радиоактивного изотопа фосфора-30 (${}_{15}^{30}\text{P}$). Средняя продолжительность жизни радиоактивного изотопа ${}_{15}^{30}\text{P}$ составляет 3 мин 15 с, и он распадается с образованием кремния по реакции:



Или когда из азота появляется углерод:



Открытие возможности искусственного превращения атомных ядер одних химических элементов в атомные ядра других химических элементов открыло путь к искусственному получению самых разных атомных ядер, в том числе радиоактивных.

К настоящему времени известно более 1500 радиоизотопов, полученных искусственным путем. Большинство их получают в ядерных реакторах, где создаются мощные потоки нейтронов, в ускорителях (циклотронах) и при ядерных взрывах (при ядерных взрывах образуется около 250 изотопов 35 химических элементов).

Практически можно получить огромное количество радионуклидов всех без исключения элементов Периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева. Были получены трансурановые элементы, т. е. элементы, которые стоят за ураном. Они все радиоактивные и, что важно, в природе не встречаются. По-видимому, при образовании Солнечной системы в результате

ядерных и термоядерных реакций все химические элементы имели своих радиоактивных аналогов с разными периодами полураспада. С течением времени радионуклиды с коротким периодом полураспада распались, а долгоживущие радионуклиды сохранились до наших дней.

Искусственные радионуклиды можно разделить на три группы:

1. Радиоактивные продукты ядерного деления. Они возникают при реакциях деления ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu и др., которые происходят в результате действия на них нейтронов. Источники этой группы радионуклидов в атмосфере – испытания ядерного оружия, работа предприятий ядерного топливного цикла и атомной промышленности (ядерно-энергетические установки, радиохимические заводы и т.д.). К радиоактивным продуктам деления относятся: ^{131}I , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{140}Ba , ^{133}Xe и многие другие. Период полураспада их от нескольких секунд до нескольких десятков лет.

Большинство образующихся радионуклидов являются бета- и гамма-излучателями (^{131}I , ^{137}Cs , ^{140}Ba), остальные испускают, или только бета-частицы (^{90}Sr , ^{135}Cs) или альфа-частицы (^{144}Nd , ^{147}Sm).

2. Радиоактивные трансурановые элементы, возникающие в ядерно-энергетических установках и при ядерных взрывах в результате последовательных ядерных реакций с ядрами атомов делящегося вещества и последующего радиоактивного распада образующихся сверхтяжелых ядер. К этим радионуклидам относятся ^{237}Np , ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{242}Cm и др. В основном они альфа-активны, характеризуются очень большим периодом полураспада, отсутствием стабильных изотопов.

3. Продукты наведенной радиоактивности, образующиеся в результате ядерных реакций элементарных частиц. Нейтроны, образующиеся при цепной реакции деления урана или плутония, воздействуют на ядра стабильных элементов окружающей среды, превращая их в радиоактивные (реакция активации). К этим радионуклидам относятся: ^{45}Ca , ^{24}Na , ^{27}Mg , ^{29}Al , ^{31}Si , ^{65}Zn , ^{54}Fe и др. Большая часть их распадается с испусканием бета-частиц и гамма-квантов.

3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ С ВЕЩЕСТВОМ

Ионизирующие излучения, проходя через вещество, взаимодействуют с его атомами и молекулами. Их взаимодействие зависит от типа излучения, заряда, массы и энергии. Также характер взаимодействия ионизирующего излучения зависит от плотности вещества, его атомного номера.

Заряженные частицы при взаимодействии с орбитальными электронами вызывают ионизацию и возбуждение атомов вещества. Нейтроны и гамма-кванты, сталкиваясь с частицами в веществе, передают им свою энергию, вызывая ионизацию за счет вторичных заряженных частиц. Процессы, которые возникают при прохождении излучения через вещество, имеют важное практическое значение. Знание таких процессов необходимо, во-первых, для понимания принципа работы дозиметрической и радиометрической

аппаратуры, а во-вторых, для способов защиты населения от ионизирующих излучений.

Заряженные частицы и гамма – фотоны, распространяясь в веществе, взаимодействуют с электронами и ядрами, в результате чего изменяется состояние, как вещества, так и частиц.

Взаимодействие излучений на вещество можно разделить на два вида:

а) взаимодействие частиц с атомными электронами, в результате которого энергия частицы передается одному из электронов атома, что приводит к возбуждению или ионизации атома. Этот вид взаимодействия является *неупругим столкновением (рассеянием)*. При неупругом столкновении имеет место выделение или поглощение энергии, изменение внутреннего состояния частиц, с превращением в другие частицы, или рождение новых частиц. Неупругое взаимодействие характерно для заряженных частиц.

б) взаимодействие частиц с атомами приводит к изменению направления их движения, но при этом не изменяется природа частиц, и их суммарная энергия остается постоянной до и после взаимодействия, происходит только перераспределение энергии между взаимодействующими частицами. Возможен и такой вариант, когда не изменяется энергия каждой из взаимодействующих частиц, а происходит только изменение направления их движения. Такое взаимодействие является *упругим столкновением (рассеянием)*. При упругом рассеянии частицы не претерпевают превращения, а изменяют состояние своего движения.

Упругое взаимодействие аналогично столкновению бильярдных шаров и в основном характерно для нейтральных частиц (нейтронов) и фотонов, не имеющих заряда.

В результате взаимодействия излучения с веществом излучение постепенно растрчивает свою энергию. Потери энергии могут быть двух видов: ионизационные и радиационные.

Ионизационные потери – это энергия излучения, растрчиваемая на ионизацию и возбуждение атомов вещества. Если энергия излучения меньше 34 эВ и ее не хватает на ионизацию, то возникают возбужденные атомы и молекулы.

Ионизационные потери тем больше, чем больше заряд частицы и меньше ее скорость. В итоге кинетическая энергия, теряемая заряженными частицами, превращается в тепловую.

Радиационные потери – процесс потери энергии излучения на торможение в электрическом поле ядра встреченных электронов. При этом тормозящаяся частица изменяет направление своего движения. Радиационные потери тем выше, чем больше порядковый номер атомов среды и энергия частицы. При торможении частицы происходит излучение большого количества энергии в виде тормозного рентгеновского излучения.

3.1. Взаимодействие корпускулярного излучения с веществом

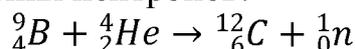
Взаимодействие альфа-частиц с веществом

Альфа-частицам присущи оба вида взаимодействий: неупругое взаимодействие с орбитальными электронами и упругое рассеивание на атомных ядрах.

Имея большую массу и значительную энергию, альфа-частица расходует ее в основном на неупругое рассеяние на электронах атомов, следствием такого взаимодействия является ионизация и возбуждение атомов вещества. При этом одна частица, в зависимости от ее энергии, может ионизировать не один атом, а несколько.

Упругое рассеяние альфа-частиц на ядрах атомов вещества маловероятно, так как, во-первых, масса ядра значительно больше массы частицы, во-вторых, ядро и альфа-частицы имеют одинаковый (положительный) электрический заряд. В процессе упругого столкновения альфа-частицы с ядром она отклоняется на малый угол. Таким образом, путь альфа-частицы в веществе практически прямолинеен.

В редких случаях, когда энергия альфа-частицы превышает кулоновские силы отталкивания, она может проникнуть в ядро и вызвать ядерную реакцию. Вследствие этого образуется промежуточное ядро, которое распадается с испусканием заряженных частиц, нейтронов и гамма-квантов. На практике этого используют для получения нейтронов:



К концу пробега альфа-частиц ионизация увеличивается. Это связано с тем, что при прохождении через вещество энергия альфа-частицы, а значит, и ее скорость уменьшаются. В результате увеличивается вероятность ее взаимодействия с электронами атома. Это приводит к увеличению ионизации вещества, достигая максимума в конце пробега.

В конце пробега альфа-частица присоединяет два электрона (из свободных электронов, имеющих в любом веществе) и превращается в атом гелия.

Радиационная защита от внешних потоков альфа-частиц не представляет особых трудностей вследствие их небольшого пробега и малой проникающей способности. Для защиты от внешнего облучения альфа-частицам специальных мер можно не применять. Поглощающим экраном для альфа-частиц является любой материал (спецодежда, лист бумаги и др.). Основную опасность альфа-частицы представляют при попадании на слизистые оболочки дыхательных или пищеварительных (при приеме с пищей) путей.

Взаимодействие бета-частиц с веществом

По сравнению с альфа-частицами прохождение бета-частиц через вещество имеет свои особенности. Основная особенность обусловлена малой массой бета-частиц (электрона и позитрона) по сравнению с массой альфа-частицы.

Для бета-частиц характерны все варианты взаимодействия. Если кинетическая энергия бета-частиц незначительна, то может происходить упругое рассеивание на электронах атома, которое проявляется изменением

направления движения частиц. Также наблюдается упругое взаимодействие бета-частиц с ядрами атомов вследствие притяжения к положительному ядру. В результате происходит изменение направления движения частиц, и этот вид взаимодействия называют упругим многоатомным рассеиванием бета-частиц на атомных ядрах. Поэтому траектория движения бета-частицы в веществе представляет собой ломаную линию. Бета-частица расходует свою энергию до тех пор, пока общий запас не уменьшится до такой степени, что она не может взаимодействовать с атомами и молекулами вещества.

Бета-частица в виде *позитрона*, попадая в отрицательное электрическое поле орбитальных электронов, в результате взаимодействия с одним из электронов атома образует пару «электрон – позитрон», которая в дальнейшем аннигилирует с образованием двух фотонов, а атом превращается в положительный ион.

Бета-частица в виде *электрона*, имея высокую энергию, попадая в отрицательное электрическое поле орбитальных электронов, начинает тормозиться и теряет часть своей энергии. Следствием такого взаимодействия является возникновение тормозного рентгеновского излучения. Интенсивность рентгеновского излучения определяется энергией бета-частицы и атомным номером поглотителя. В практике это используется для получения рентгеновского излучения в рентгеновских трубках.

В конце пути отрицательная бета-частица в виде электрона остается в свободном состоянии или присоединяется к какому-либо атому или иону вещества. Положительная бета-частица позитрон соединяется со свободным электроном и превращается в два гамма – фотона.

Для защиты от бета-излучений целесообразно применять экраны, изготовленные из материалов с малым атомным номером (стекло, оргстекло, алюминий), что связано со степенью поглощения бета-частиц, которая пропорциональна атомному номеру материала. Если работать приходится с жестким бета-излучением, то защита устраивается двойная (двойное экранирование). Для 1-го защитного слоя, обращенного непосредственно к бета-излучателю, применяют легкие материалы с небольшим атомным номером (органическое стекло, пластмассу или алюминий). Это дает возможность полностью поглотить бета-частицы и снизить генерацию (образование) тормозного рентгеновского излучения. 2-й защитный слой, обращенный к персоналу, - это экран из свинца или другого металла для защиты от тормозного рентгеновского излучения.

Взаимодействие нейтронов с веществом

Вследствие того что нейтроны не имеют заряда, а масса их намного больше массы электронов, то они обладают значительной проникающей способностью и практически не взаимодействуют с электронами атомных оболочек. Проходя через вещество, нейтроны вызывают различные ядерные реакции, а также упругое и неупругое рассеивание на ядрах. Нейтроны теряют свою энергию практически только при соударении с ядрами атомов. Поэтому атомные характеристики среды не играют практически никакой роли в распространении нейтронов в веществе.

Нейтроны, проходя через вещество, непосредственно не вызывают ионизацию атомов и молекул, как заряженные частицы. Нейтроны обнаруживаются по вторичным эффектам, возникающим при их взаимодействии с ядрами.

При неупругом воздействии изменяется природа соударяющихся частиц и наблюдается деление тяжелых ядер.

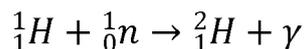
При упругом рассеивании нейтрон, взаимодействуя с атомами, может в соответствии с законами классической механики передать ему часть энергии. Если это атом тяжелого элемента, то передается только часть энергии и при этом нейтрон замедляется, а далее вступает в ядерные реакции. Ударяя в атом, нейтрон может передать такое количество энергии, которого достаточно, чтобы ядро «выскочило» из электронной оболочки. В этом случае образуются заряженные частицы, обладающие значительной скоростью, которые способны осуществлять ионизацию среды. Результатом упругого взаимодействия может быть и смещение атомов с узлов кристаллической решетки.

Явления, происходящие при взаимодействии нейтронов с ядрами, зависят от кинетической энергии нейтронов. В связи с этим нейтронное излучение условно разделяют на энергетические диапазоны, отличающиеся методами получения и регистрации этих частиц:

- ультрахолодные нейтроны с энергией менее 10^{-7} эВ;
- холодные нейтроны с энергией меньше $5 \cdot 10^{-3}$ эВ;
- теплые нейтроны с энергией до 0,025 эВ;
- медленные нейтроны с энергией от 0,1 эВ до 0,5 кэВ;
- промежуточные нейтроны, обладающие энергией от 0,5 кэВ до 0,2 МэВ;
- быстрые нейтроны с энергией от 0,2 МэВ до 20 МэВ;
- сверхбыстрые нейтроны с энергией выше 20 МэВ.

Ультрахолодные и холодные нейтроны отличаются аномально большой проникающей способностью при прохождении через поликристаллические вещества.

Медленные нейтроны захватываются ядрами атомов, в результате чего образуются новые стабильные или радиоактивные изотопы. В водородсодержащих веществах ядро водорода захватывает медленные нейтроны и превращается в ядро тяжелого водорода – дейтерия. Радиационный захват нейтронов сопровождается испусканием жесткого гамма-излучения с энергией, равной 2,18МэВ:



Тепловые нейтроны, также как и медленные, захватываются поглощающей средой.

Для *промежуточных нейтронов* наиболее типичным является упругое рассеивание.

Для защиты от нейтронов с небольшой энергией необходимо использовать кроме поглотителя (воды, бора, кадмия) и экраны из тяжелых

материалов (свинец, барий) для защиты от испускаемого гамма-излучения при образовании новых ядер.

Взаимодействие *быстрых нейтронов* может быть как упругим, так и неупругим рассеиванием. При соударении с ядрами атомов нейтроны передают им часть своей энергии, образуя ядра отдачи, движущиеся с высокими скоростями. Ядра отдачи производят ионизацию и возбуждение среды. Доля передаваемой энергии возрастает с уменьшением массы ядра. Так, при соударении нейтронов с ядрами водорода, то есть с протонами, им передается в среднем до 60% энергии нейтрона, так как массы этих частиц практически равны. При взаимодействии с ядрами нейтроны постепенно замедляются до тепловых скоростей, то есть до скорости движения молекул среды. Быстрые нейтроны быстро растрачивают свою энергию и замедляются легкими веществами, содержащими большое количество атомов водорода (вода, парафин). В то же время они свободно проходят через толщу тяжелых веществ, включая свинец.

При взаимодействии *сверхбыстрых нейтронов* с тяжелыми элементами происходит деление ядер с образованием двух-трех осколков, вылетом большого количества частиц (чаще 2-3 нейтронов) и выделением колоссальной энергии (около 200 МэВ). Образовавшиеся свободные нейтроны способны вызвать деление других ядер. Так возникает цепной процесс деления ядер. Из большого числа ядерных осколков и их дочерних продуктов особый интерес для радиологии в первые месяцы после ядерных взрывов представляют йод-131, барий-140, стронций-89, а в последующем – стронций-90, цезий-137.

3.2. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом

Фотоны электромагнитных излучений самостоятельно не способны ионизировать среду, но в результате первичных процессов взаимодействия с атомами и молекулами вещества они выбивают электроны, которые и производят ионизацию среды. Таким образом, электромагнитные излучения способны косвенно ионизировать вещество.

Взаимодействие гамма-излучения с веществом

При радиоактивном распаде ядра испускаются гамма-кванты, которые, проходя через вещество, теряют свою энергию за счет взаимодействия с электронами атомов среды. При этом имеет место три основных эффекта взаимодействия гамма-квантов с веществом: фотоэффект, комптоновское рассеивание и образование пар.

Фотоэффект наблюдается, когда энергия гамма-квантов больше или равна работе выхода электронов:

$$h\nu \geq A_{\text{вых}},$$

где $h\nu$ - энергия фотона излучения;

h - постоянная Планка, равная $6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

ν - частота излучения;

$A_{\text{вых}}$ - работа выхода электрона.

Гамма-квант, сталкиваясь с электроном внутренней оболочки (чаще К-слоя), прочно связанным с ядром, полностью передает ему свою энергию, сам

при этом исчезает, а электрон приобретает кинетическую энергию и покидает пределы атома (рисунок 8).

На освободившееся место в орбите К-слоя перескакивает электрон L-слоя, на L-слой – электрон с M-слоя и т.д. При этом испускается мягкое характеристическое рентгеновское излучение (флуоресцентное излучение).

Таким образом, следствием фотоэффекта является интенсивная ионизация и возбуждение атомов и молекул вещества и образование мягкого характеристического рентгеновского излучения.

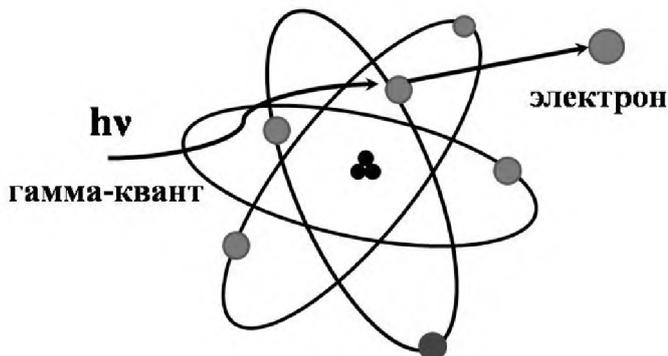


Рисунок 8 - Фотоэффект

Фотоэффект невозможен на валентных, слабосвязанных с ядром, и свободных электронах, так как они не могут поглощать гамма-кванты. Фотоэффект преобладает, когда энергия гамма кванта не превышает 1 МэВ, а поглотитель представляет вещество с высоким атомным номером (например, свинец). В воздухе, воде и мягких тканях фотоэффект составляет 50% при энергии фотонов порядка 60 кэВ. При энергии излучения около 120 кэВ его доля составляет около 10%, а начиная с 200 кэВ этим процессом можно пренебречь

Комptonовское рассеивание (эффект Комптона) происходит в случае, если энергия фотона во много раз превышает работу выхода электрона:

$$h\nu \gg A_{\text{вых.}}$$

Комptonовское рассеивание наблюдается при взаимодействии фотона со

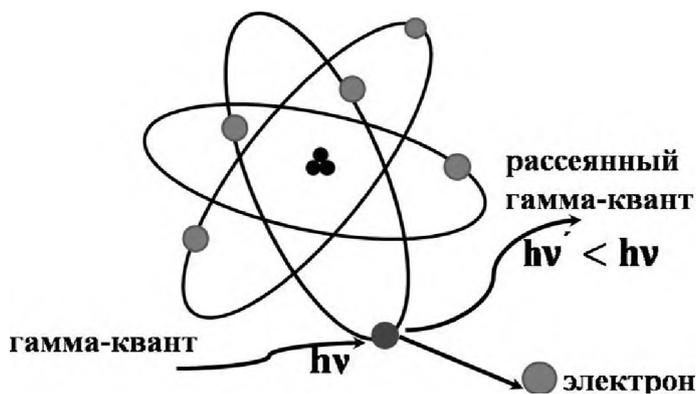


Рисунок 9 - Комptonовское рассеивание

первоначального движения, то есть рассеивается.

Образующееся таким образом излучение с увеличенной длиной волны (энергия фотона уменьшилась) называется вторичным, и оно рассеивается по всевозможным направлениям.

Таким образом, в результате эффекта Комптона образуется вторичное рассеянное излучение и происходит ионизация (частично и возбуждение) атомов и молекул облученного вещества.

В отличие от фотоэффекта эффект Комптонавозможен и на свободных электронах.

Реакция образования пары возможна только, если энергия гамма-квантов, не меньших, чем энергия, эквивалентна массе обеих частиц (электрона и позитрона). Так как массы частиц одинаковы, то для их образования без сообщения им дополнительной кинетической энергии энергия гамма-квантов должна удовлетворять соотношению взаимосвязи массы и энергии:

$$E_{\gamma} = h\nu \geq 2 \cdot m_e \cdot c^2 \approx 1,022 \text{ МэВ},$$

где m_e - масса электрона или позитрона;
 c - скорость света в вакууме.

Таким образом, данный вид взаимодействия излучения с веществом возможен только при энергиях гамма – квантов, не меньших **1,022 МэВ**.

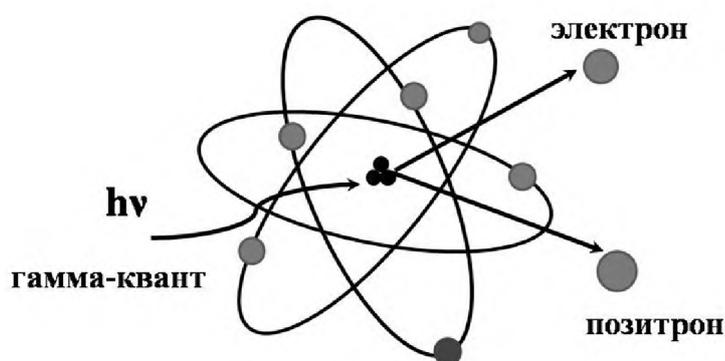
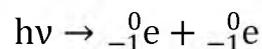


Рисунок 10- Реакция образования пары

Реакция образования пары заключается в том, что гамма-квант достаточно высокой энергии, проходя через вещество, под действием сильного электрического поля вблизи ядра атома превращается в пару «электрон-позитрон» (рисунок 10):



В этом случае одна форма материи – гамма-излучение преобразуется в другую – в частицы вещества.

Если энергия гамма-квантов больше 1,022 МэВ, то ее избыток передается частицам.

Образовавшаяся пара в дальнейшем исчезает (аннигилирует), превращаясь в два вторичных гамма-кванта, с энергией, равной энергетическому эквиваленту массы покоя частиц (0,511 МэВ). Вторичные гамма-кванты способны вызвать лишь комптонэффект или фотоэффект, то есть теряют свою энергию только при взаимодействии с электронами.

Вероятность процесса образования пар увеличивается с возрастанием энергии гамма-квантов и плотности поглотителя.

Гамма-кванты высоких энергий (более 8 МэВ) могут взаимодействовать с ядрами, вызывая ядерный эффект. Вероятность такого эффекта мала, и этот вид взаимодействия практически не ослабляет излучение в веществе.

При прохождении гамма-излучения через вещество происходит непрерывное его поглощение с увеличением толщины слоя поглотителя, но его интенсивность не обращается в нуль, ни при каких толщинах слоя поглотителя. Это значит, что какова бы не была толщина поглотителя, нельзя полностью поглотить поток гамма-излучения, а можно только ослабить интенсивность излучения. В этом состоит существенное отличие гамма-излучения от альфа- и бета-излучения, для которых всегда можно подобрать такой слой вещества, в котором они полностью поглотятся.

Ослабление интенсивности гамма-излучения подчиняется *закону Бугера*:

$$I_d = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d},$$

I_d - интенсивность гамма-излучения, прошедшего через слой поглотителя толщиной d ;

I_0 - интенсивность падающего излучения;

e - основание натурального логарифма;

μ - линейный коэффициент ослабления;

d - расстояние.

Линейный коэффициент ослабления для гамма-излучения будет состояться из суммы трех коэффициентов, характеризующих ослабление излучения в результате фотоэффекта, эффекта Комптона и реакции образования пары:

$$\mu = \mu_{\phi} + \mu_{\kappa} + \mu_p$$

Линейный коэффициент ослабления зависит от природы вещества, главным образом от плотности и атомного номера и от длины волны или энергии фотонов излучения.

Изменение интенсивности гамма-излучения можно также выражать через **слой половинного ослабления** – *такая толщина поглощающей среды, при прохождении которой интенсивность излучения уменьшается в два раза.*

Слой половинного ослабления измеряется в миллиграмм на сантиметр квадратный:

$$[\Delta_{1/2}] = \frac{\text{мг}}{\text{см}^2}$$

Слой половинного ослабления зависит от энергии излучения и плотности поглотителя.

Между линейным коэффициентом ослабления и слоем половинного ослабления существует связь, которая выражается следующим отношением:

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,693}{\mu}$$

Зная слой половинного ослабления, можно довольно легко определить, какой нужно взять слой поглотителя, чтобы ослабить интенсивность излучения в определенное число раз. Например, один слой уменьшает интенсивность излучения в 2 раза, два слоя - в 4 раза, три слоя - в 8 раз и т.д., n слоев – в 2^n раз.

Слой половинного ослабления для свинца составляет 1,1 см, для бетона – 7-10 см, кирпича – 12 см, земли – 12-15 см, воды – 20 см, полиэтилена – 22 см, дерева – 25-30 см.

Лучшими для защиты гамма-излучения являются материалы с большим порядковым номером (свинец, уран). Можно использовать экраны и из более легких материалов - свинцованного стекла, железа, бетона, железобетона и даже воды.

Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом

При попадании рентгеновского излучения на вещество оно в небольшом количестве отражается от его поверхности, а основная часть проходит вглубь. В теле излучение частично поглощается и рассеивается, частично проходит насквозь. Проходя через вещество, фотоны рентгеновского излучения

взаимодействуют в основном с электронами атомов и молекул вещества. Достаточно жесткое рентгеновское излучение может взаимодействовать также с ядрами атомов. При этом могут происходить следующие первичные процессы: когерентное рассеивание, фотоэффект и эффект Комптона.

Когерентное рассеивание наблюдается, когда энергия рентгеновского кванта меньше работы выхода электрона из вещества:

$$h\nu \leq A_{\text{вых.}}$$

При взаимодействии квантов с электронами внутренних оболочек, крепко связанных с ядром, у фотонов, имеющих энергию, недостаточную для отрыва электрона, происходит только изменение направления движения, но энергия, а, следовательно, и длина волны не изменяются (рисунок 11).

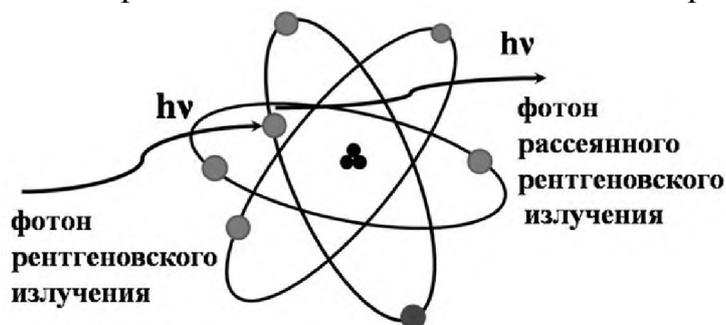


Рисунок 11 - Когерентное рассеивание

Таким образом, результатом когерентного рассеивания является изменение направления распространения излучения.

Образование фотоэффекта и эффекта Комптона аналогично действию гамма-излучения, описанному выше.

Интенсивность рентгеновского излучения при прохождении через вещество ослабляется. Так как действие излучения на вещество, в частности, на ткани организма связано с поглощением части излучения, то линейный коэффициент ослабления удобно представлять в виде суммы двух коэффициентов:

$$\mu = \tau + \sigma,$$

где τ - коэффициент ослабления, обусловленный истинным поглощением; σ - коэффициент ослабления, обусловленный рассеиванием.

Коэффициент истинного поглощения характеризует интенсивность процессов фотоэффекта и частично – эффекта Комптона.

С учетом вышесказанного, закон ослабления рентгеновского излучения, который описывается **закон Бугера**, принимает вид:

$$I_d = I_0 \cdot e^{-(\tau+\sigma) \cdot d}$$

Например, для воды, близкой по свойствам к мягким тканям тела, можно указать следующее соотношение первичных процессов рентгеновского излучения (таблица 2).

Таблица 2 - Соотношение первичных процессов

Энергия фотонов, кэВ	Фотоэффект	Эффект Комптона
10	100%	0%
40	75%	25%
80	50%	50%
200	1%	99%

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешкевич, Н. А. Радиационные измерения : практическое пособие / Н. А. Алешкевич, В. Е. Гайшун, Д. Л. Коваленко ; ГГУ им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 56 с.
2. Белов, А. Д. Ветеринарная радиобиология : учебник для высших учебных заведений по специальности «Ветеринария» / А. Д. Белов, В. А. Киршин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 287 с.
3. Клименков, К. П. Дозиметрия ионизирующих излучений : учебно-методическое пособие для студентов по специальности «Ветеринарная медицина», «Зоотехния», слушателей ФПК и переподготовки кадров, ветеринарных специалистов подразделений радиационного контроля / К. П. Клименков, В. П. Гурин ; Витебская государственная академия ветеринарной медицины. – Витебск : ВГАВМ, 2007. – 25 с. – Библиогр.: с. 24.
4. Постник, М. И. Защита населения и хозяйственных объектов в чрезвычайных ситуациях : учебник для студентов технических специальностей вузов / М. И. Постник. – Минск : Вышэйшая школа, 2003. – 398 с.
5. Радиобиология : учебник для вузов / А. Д. Белов [и др.] ; ред. А. Д. Белов. – Москва : Колос, 1999. – 384 с.
6. Чернуха, Г. А. Радиационная безопасность : учебное пособие для студентов сельскохозяйственных вузов / Г. А. Чернуха, Н. В. Лазаревич, Т. В. Лаломова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – 236 с.
7. Фокин, А. Д. Сельскохозяйственная радиология: учебник для вузов / А. Д. Фокин, А. А. Лурье, С. П. Торшин. – М.: Дрофа, 2005. – 367 с.

Учебное издание

Братушкина Елена Леонидовна
Клименков Константин Петрович
Мехова Ольга Сазоновна и др.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАДИОЛОГИИ

Учебно-методическое пособие

Ответственный за выпуск Е. Л. Братушкина
Технический редактор О.В. Луговая
Компьютерный набор Н.П. Коваленок
Компьютерная верстка Т. А. Никитенко
Корректор Е. В. Морозова

Подписано в печать 07.09.2020. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 2,75. Уч.-изд. л. 2,56. Тираж 150 экз. Заказ 2075.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Витебская ордена «Знак Почета»
государственная академия ветеринарной медицины».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/ 362 от 13.06.2014.
ЛП №: 02330/470 от 01.10.2014 г.
Ул. 1-я Доватора, 7/11, 210026, г. Витебск.
Тел.: (0212) 51-75-71.
E-mail: rio_vsavm@tut.by
<http://www.vsavm.by>