КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

Зарипова Ю.А.

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Сборник лекций для студентов по направлению подготовки
«Физические и химические науки»

Алматы

СОДЕРЖАНИЕ

Лекция 1. Источники ионизирующих излучений.

Лекция 2. Основы ядерной физики.

Лекция 3. Радиоактивность.

Лекция 4. Ядерные реакции.

Лекция 5. Взаимодействие радиоактивного излучения с веществом.

Лекция 6. Физические основы дозиметрии.

Лекция 7. Методы измерения ионизирующих излучений.

Лекция 8. Стандарты и нормативные документы в области радиационного контроля.

Лекция 9. Принцип работы радиометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 10. Принцип работы спектрометрических приборов радиационного контроля.

Лекция 11. Радиационный мониторинг.

Лекция 3. Радиоактивность.

Цель лекции: сформировать у студентов представление о природе и механизмах радиоактивности как физического явления; ознакомить с основными видами радиоактивных распадов, их характеристиками и закономерностями; изучить закон радиоактивного распада, понятия постоянной распада, периода полураспада и активности; показать роль радиоактивности в природе и её значение для науки, техники и медицины.

Введение: Большинство ядер вещества в окружающем нас мире **стабильны**, то есть существуют без изменений сколь угодно долго. Однако некоторые ядра могут быть нестабильными (**радиоактивными**): они превращаются в другие нуклиды с испусканием *излучений,* например альфа-, бета- или гамма-. Эти процессы называются *радиоактивным распадом* ядер и представляют собой простейшие ядерные реакции. Нуклиды, которые обладают свойством радиоактивности, называют **радионуклидами**.

История изучения радиоактивности начинается в конце XIX века. После открытия рентгеновских лучей Вильгельмом Рентгеном в 1895 году французский физик Анри Беккерель обнаружил, что урановые соли испускают невидимое излучение, способное засвечивать фотопластинки. Это открытие положило начало новой области физики. Вскоре Мария и Пьер Кюри выделили из урановой руды новые радиоактивные элементы – полоний и радий – и ввели сам термин «радиоактивность».

Сегодня известно около 270 стабильных изотопов и примерно 50 естественных радиоизотопов. В процессе образования Вселенной возникали как стабильные, так и нестабильные ядра, из которых к настоящему времени распались все, за исключением самых долгоживущих. В их числе калий-40, рубидий-87. Такие же долгоживущие радионуклиды, как торий-232, уран-235, уран-238, распадаясь, продолжают «генерировать» новые радионуклиды, которые также распадаются. В результате образуются цепочки превращающихся друг в друга радионуклидов или так называемые *семейства,* причем многие представители этих семейств могут иметь небольшие периоды полураспада и быть значимыми источниками радиации в окружающем нас мире. Каждая цепочка завершается определенным стабильным нуклидом. Часть радионуклидов, например тритий и углерод-14, образуется в атмосфере Земли под действием космического излучения.

Кроме того, в лабораториях синтезированы тысячи искусственных радиоактивных нуклидов. Радиоактивность может быть как естественным источником излучения, постоянно присутствующим на Земле, так и искусственным – создаваемым человеком для научных, медицинских и промышленных целей.

Несмотря на потенциальную опасность для живых организмов, радиоактивность имеет огромное практическое значение. Она используется для диагностики и лечения заболеваний, в радиометрическом датировании, в энергетике и космических технологиях, а также для исследования структуры вещества и процессов, происходящих в ядрах атомов.

Таким образом, изучение радиоактивности позволяет не только глубже понять природу материи, но и эффективно использовать это знание на благо человечества. В ходе сегодняшней лекции мы рассмотрим физическую сущность радиоактивности, её виды и характеристики.

Основная часть: Как и все процессы в микромире распад ядер носит случайный характер. Отдельно взятое радиоактивное ядро может «жить» очень долго или же распасться через короткий промежуток времени. Наука не располагает возможностью наблюдать за отдельно взятым ядром. Поэтому делать определенные выводы для времени жизни радиоактивных ядер можно лишь, изучая поведение множества ядер в некотором образце с помощью методов статистики.

Рассмотрим ряд общих понятий для радиоактивных распадов.

ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ – самопроизвольное превращение одних атомных ядер в другие, сопровождаемое испусканием альфа-частиц, бета-частиц, гамма-квантов и ионов.

Примеры:

- Явление радиоактивности состоит в самопроизвольном распаде ядер с испусканием одной или нескольких частиц. Символически это можно записать для двухчастичного процесса

$$A \rightarrow b + B.$$

При этом необходимо энергетическое условие:

$$M_a c^2 > (m_b + M_{\square}) c^2$$

т.е. Q>0 – все процессы радиоактивного распада - экзотермичны. В NZ-диаграмме стабильные ядра располагаются компактно и образуют целую "дорожку стабильности", которая в области легчайших и легких ядер располагается по оси Z=N, а в области средних и тяжелых ядер отклоняется от этой линии в сторону нейтронного избытка.

- Радиоактивный распад характеризуется видом испускаемых частиц, их энергиями. Радиоактивность - процесс статистический, одинаковые ядра распадаются за различное время. Но среднее время жизни ядер определенного вида не зависит от способа образования этих ядер, внешних условий и является мировой характеристикой распада.
- Диапазон времен жизни радиоактивных ядер очень велик: от $3*10^{-7}$ сек до 10^{15} лет.

АЛЬФА-РАСПАД (АЛЬФА-РАДИОАКТИВНОСТЬ) – самопроизвольное превращение ядер с массовым числом A_1 в ядра с $A_2 = A_1 - 4$ при одновременном испускании альфа-частиц, являющихся ядрами гелия $^4He_2$: $^AX_Z \rightarrow {}^{A-4}X_{Z-2} + {}^4He_2$.

Примеры:

- За редким исключением α-распад проявляется в основном только у ядер с Z>82: $^{238}Pu_{94} \rightarrow \alpha + {}^{234}U_{92}$. Энергетический спектр α-частичного распада линейчатый, состоит в общем случае из нескольких групп α-частиц различающихся по энергии. Наиболее интенсивная группа связана с распадом основного состояния материнского ядра и образованием основного состояния дочернего ядра. Распады возбужденных состояний материнского ядра сопровождаются испусканием более энергетичных α-частиц.

- Вероятность α-распада очень сильно зависит от энергии относительного движения α-частицы и дочернего ядра. Уменьшение энергии α-частицы на 10% приводит к уменьшению вероятности распада в 10^3 раз. Поэтому наблюдаются распады со сравнительно узким интервалом энергии вылетающих α-частиц: 2 - 4,5 МэВ для ядер в редкоземельной области и 4 - 9 МэВ для тяжелых ядер.

- Средние времена жизни α-активных ядер лежат в очень широких пределах от 10^{-4} сек до 10^5 лет. Вылетающие при распаде α-частицы создаются в самом процессе распада, а не существуют в ядре до распада. Для α-радиоактивных ядер энергия исходного ядра больше суммы энергий продуктов распада:

$$M(Z,A)c^2 > [M(Z-2,A-4)+m_\alpha]c^2$$

Избыток энергии выделяется при распаде в виде кинетической энергии, распределяемой между α-частицей и ядром-продуктом:

$$Q=[M(Z,)-M(Z-2,A-4)-m_\alpha]c^2=E_\alpha+E_{ядра};$$

$$E_\alpha = Qm_\alpha/(m_\alpha + M(Z-2,A-4)$$

БЕТА-РАСПАД (БЕТА-РАДИОАКТИВНОСТЬ) – самопроизвольное превращение ядер с порядковым номером Z_1 в ядра с $Z = Z_1 \pm 1$, сопровождаемое испусканием бета-частиц (электронов или позитронов), либо Е-захватом (e^--захватом)

$$^AX_Z \rightarrow {}^AX_{Z+1} + \beta^- + \tilde{\upsilon}_e \text{ или } {}^AX_Z \rightarrow {}^AX_{Z-1} + \beta^- + \nu_e$$

Примеры:

- Процесс электронного, или β^--распада, можно представить как превращение одного из "избыточных" нейтронов ядра в протон по схеме: $n \rightarrow p + \beta^- + \tilde{\upsilon}_e$; т.е. бета-распад - процесс не внутриядерный, а внутринуклонный. Процесс позитронного, или β^+-распада, можно представить как превращение одного из "избыточных" протонов ядра в нейтрон по схеме: $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu_e$. Таким образом, и в этом случае бета-распад процесс не внутриядерный, а – внутринуклонный.

- При β-распаде радиоактивное ядро ^AX_Z преобразуется в ядро $^AX_{Z\pm1}$ с испусканием частиц β^-(β^+) и $\tilde{\upsilon}_e(\nu_e)$. Частицы β^+ и β^- (электрон и позитрон) - есть частицы с массами покоя и зарядами, равными массе покоя электрона и его абсолютной величине заряда: $m_{\beta-} = m_{\beta+} = = m_e$ и $q_{\beta-} = -|q_e|$, $q_{\beta+} = +|q_e|$. Частицы $\tilde{\upsilon}_e(\nu_e)$ (антинейтрино и нейтрино) по современным представлениям есть частицы с нулевой массой покоя и скоростью движения, равной скорости света.

- Основной особенностью β-распада является то, что он обусловлен не ядерными (как α-распад) и не электромагнитными (как γ-распад) силами, а слабыми взаимодействиями нуклона ядра с электронно-нейтринным полем. Вследствие слабых взаимодействий нуклон переходит в другое состояние с образованием частиц β^-(β^+) и $\tilde{\upsilon}_e(\nu_e)$. Источником легких частиц являются нуклоны. Интенсивность слабых взаимодействий несравненно меньше интенсивности ядерных и электромагнитных взаимодействий и превосходит только интенсивность гравитационных взаимодействий. Слабостью β-взаимодействий объясняется относительно большие времена жизни β-радиоактивных ядер.

Слабые взаимодействия вызывают распады таких микрообъектов, которые без таких взаимодействий были бы стабильными, т.е. распад их под влиянием сильных ядерных или электромагнитных сил был бы запрещен. Если представить на миг отсутствие в природе бета-распадов, то наш мир изменился бы до неузнаваемости – обогатился такими микро- и макрообъектами, которые сейчас невозможны.

В результате распадных процессов, а также процессов столкновения ядер (ядерных реакций) конечные ядра, как правило, образуются в возбужденных состояниях. Разрядка таких состояний может реализовываться через испускание нуклонов и других тяжелых частиц, а также путем испускания гамма-квантов – в полной аналогии с испусканием света возбужденными атомами.

ГАММА-РАСПАД (γ-РАДИОАКТИВНОСТЬ) – испускание гамма-квантов в процессе бета-распада и ядерных реакций при переходах ядер из верхних возбужденных состояний в нижние возбужденные, или в основное состояние, называемых радиационными переходами.

Примеры:

- Процесс γ-излучения ядер состоит в том, что ядро испускает γ-квант без изменения зарядового Z и массового A чисел, но при этом изменяется его внутренняя энергия. Она уменьшается от значения E_i до E_0: ${}^{A}X_Z(E_i) \rightarrow {}^{A}X_Z(E_0) + \gamma(E_i - E_0)$, где E_0 - энергия основного состояния ядра, которое не подвержено γ-распаду.
- В общем случае, когда энергия возбужденного ядра перекрывает несколько возможных его возбужденных состояний E_1, E_2, E_3,… , то γ-распад происходит с излучением нескольких γ-квантов с энергиями $E_{\gamma 1} = E_1 - E_0$, $E_{\gamma 2} = E_2 - E_1$, $E_{\gamma 3} = E_3 - E_2$,… Спектр γ-излучения всегда дискретен из-за дискретности ядерных энергетических уровней.
- Гамма-излучение ядер обусловлено взаимодействием отдельных нуклонов ядра с электромагнитным полем в ядре. Изолированный свободный нуклон не может испустить или поглотить γ-квант из-за несовместного действия законов сохранения энергии и импульса. Но внутри ядра такой процесс возможен, т.к. часть импульса в этом процессе восполняется другими нуклонами ядра. Поэтому γ-излучение является внутриядерным процессом, а не внутринуклонным.

Естественная γ-радиоактивность возникает при образовании ядер в возбужденных состояниях в результате α- или β-распада. Возбужденные ядра переходят в свое основное состояние, испуская γ-излучение. При этом энергия возбуждения таких ядер недостаточна для испускания нуклона, так что γ-излучение является единственным способом снятия возбуждения.

Времена жизни γ-активных ядер в среднем значительно меньше времен жизни по отношению к α- и β-распадам, т.к. интенсивность электромагнитных взаимодействий на 4 порядка слабее ядерных. Главной задачей теории гамма-радиоактивности является вычисление *вероятностей гамма-переходов*. При этом необходимо учитывать *правила отбора*.

В последнее время открыты многочисленные новые типы распадов, когда из тяжелых ядер «отрываются» весьма массивные многонуклонные части. Такие распады названы «тяжелоионными распадами».

НУКЛОН-ИОННЫЙ РАСПАД (НУКЛОН-ИОННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ) - самопроизвольное превращение ядер с испусканием нейтрона, протона, двух протонов, легких ионов или самопроизвольное спонтанное деление ядра.

Примеры:

- Уже известны 18 радионуклидов от ^{221}Fr до ^{242}Cm, испытывающих распад с вылетом многонуклонных фрагментов от ^{14}C до ^{34}Si. В распаде

$$^{242}Cm \rightarrow {}^{34}Si + {}^{208}Pb$$

механизм либо аналогичен альфа-распаду, либо - спонтанному делению.

- Естественная нуклонная радиоактивность возникает, когда в результате β-распада какого-либо ядра образуется дочернее ядро в возбужденном состоянии, энергия возбуждения которого превышает энергию отделения нуклона из этого ядра. Тогда происходит дальнейший распад уже этого ядра с испусканием нуклона: $^{A}X_Z \rightarrow {}^{A}X_{Z+1} + \beta^- + \tilde{\upsilon} \rightarrow n + {}^{A-1}X_{Z-1}$; $^{A}X_Z \rightarrow {}^{A}X_{Z-1} + \beta^{-+} + \nu \rightarrow p + {}^{A-1}X_{Z-2}$.

- Самопроизвольное (спонтанное) деление ядер - есть процесс распада ядра на два неравных, но сравнимых по массе, ядра-осколка. Осколки, являясь β-радиоактивными, в свою очередь, каждый претерпевают последовательный ряд β-распадов с испусканием β-частиц, нейтрино, γ-квантов и запаздывающих нейтронов. В среднем на каждый акт деления испускается 2-3 нейтрона и выделяется энергия Q≈200 МэВ. Этот процесс наблюдается для ядер с массовым числом A≥232.Времена жизни спонтанно делящихся ядер уменьшается с ростом массового числа от 10^{13} лет до 0,3 с.

ПРОТОННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ - самопроизвольное превращение нейтронодефицитных ядер с испусканием протона.

Примеры:

- В 1962 г. в Дубне была зарегистрирована протонная радиоактивность нейтронодефицитных ядер вблизи границы протонной стабильности: $^{54}Fe_{26}(p,2n)^{53m}Co_{27}$. Образующиеся ядра-изомеры кобальта распадаются с испусканием протонов с энергией 1,57 МэВ.

- Были также синтезированы ядра лютеция $^{151}Lu_{71}$ и туллия $^{147}Tm_{69}$, испускающие в процессе своего распада протоны соответственно с энергиями 1,217 МэВ и 1,040 МэВ.

- В Дубне была предсказана и открыта двухпротонная радиоактивность.

КЛАСТЕРНАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ - самопроизвольное превращение ядер с испусканием ядер, тяжелее, чем ^{4}He, таких, как ^{12}C, ^{14}C, ^{16}O, ^{20}Ne.

Примеры:

- Впервые кластерная радиоактивность наблюдалась в процессах: $^{223}Ra_{88} \rightarrow {}^{211}Pb_{82} + {}^{12}C_6$ и $^{223}Ra_{88} \rightarrow {}^{209}Pb_{82} + {}^{14}C_6$. Такие процессы в 1984 г. впервые измерены в Оксфордском университете, а в 1985 г. – в Дубне.

- Отношение вероятностей распадов $\lambda(^{14}C)/\lambda(\alpha) = (6,1 \pm 1,0) \cdot 10^{-10}$.

- В настоящее время уже известно 18 радионуклидов, спонтанно испускающих тяжелые частицы.

МАТЕРИНСКОЕ ЯДРО – ядро, испытывающее радиоактивный распад.

Примеры:

- $^{219}Rn_{86} \rightarrow ^{215}Po_{84}$; ядро радона – материнское.
- $^{220}Rn_{86} \rightarrow ^{216}Po_{84}$; ядро радона – материнское.
- $^{222}Rn_{86} \rightarrow ^{218}Po_{84}$; во всех случаях изотопы радона - материнские ядра.

ДОЧЕРНЕЕ ЯДРО – ядро, рождающееся в результате радиоактивного распада материнского ядра.

Примеры:

- $^{215}Po_{84} \rightarrow ^{211}Pb_{82}$; ядро свинца – дочернее.
- $^{216}Po_{84} \rightarrow ^{212}Pb_{82}$; ядро свинца – дочернее.
- $^{218}Po_{84} \rightarrow ^{214}Pb_{82}$; во всех случаях изотопы свинца - дочерние ядра.

ВНУЧАТОЕ ЯДРО – ядро, возникающее в результате радиоактивного распада дочернего ядра.

Примеры:

- В цепочке радиоактивных распадов $^{A}X_Z \rightarrow ^{A-4}X_{Z-2} + \alpha \rightarrow ^{A-4}X_{Z-2} + \gamma_1 + \gamma_2 \rightarrow ^{A-4}X_{Z-1} + \beta^- + \tilde{\upsilon} \rightarrow ^{A-4}X_{Z-1} + \gamma$ ядро $^{A}X_Z$ является материнским; $^{A-4}X_{Z-2}$ - дочерним; $^{A-4}X_{Z-1}$ - внучатым ядрами.
- $^{219}Rn_{86} \rightarrow ^{215}Po_{84} \rightarrow ^{211}Pb_{82}$; $^{220}Rn_{86} \rightarrow ^{216}Po_{84} \rightarrow ^{212}Pb_{82}$.
- $^{222}Rn_{86} \rightarrow ^{218}Po_{84} \rightarrow ^{214}Pb_{82}$; во всех случаях изотопы свинца - внучатые ядра по отношению к изотопам радона.

В силу того, что ядерные силы носят короткодействующий характер, отдельные ядра образца практически не взаимодействуют и существуют независимо друг от друга. Поэтому **вероятность распада каждого ядра в единицу времени** λ одинакова для всех ядер одного и того же элемента, а доля распавшихся за Δt ядер пропорциональна λ и Δt. Обозначим N_0 число ядер, существовавших к моменту времени t, а N - оставшихся к концу промежутка Δt, т. е. число нераспавшихся ядер, тогда

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = \lambda \Delta t \qquad (1)$$

С учетом того, что $N_o - N = -(N - N_o) = -\Delta N$, можно записать:

$$\frac{\Delta N}{N_0} = -\lambda \Delta t. \qquad (2)$$

Последнее уравнение используя дифференциальные исчисления можно переписать в виде

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \qquad (3)$$

а решением является т. н. *убывающая экспоненциальная зависимость*

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \qquad (4)$$

где e – основание натуральных логарифмов.

Последней формуле можно придать несколько иной вид. Пусть T - **период полураспада**, то есть время, в течение которого распадается половина исходного числа ядер, тогда

$$N = N_0 2^{-t/T}, \qquad (5)$$

причем $T = \frac{ln2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda}$. Графический вид зависимости (5) представлен на рисунке 1. Из рисунка видно, что спустя два периода полураспада остается четвертая часть исходного числа ядер, через три таких периода - восьмая и т. д. Полезно знать, что спустя 10 периодов полураспада число нераспавшихся радионуклидов уменьшается в 2^{10}, то есть примерно в 1000 раз ($2^{10} = 1024$).

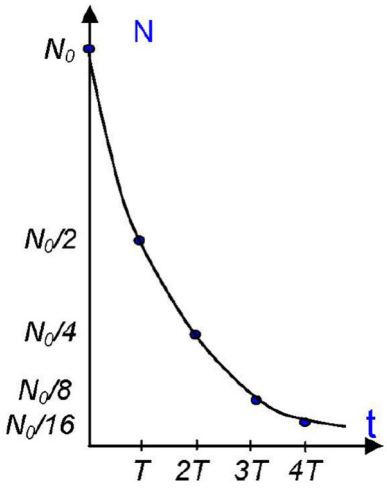

Рисунок 1 – Графическое представление закона радиоактивного распада.

ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА – самопроизвольный спонтанный распад атомных ядер по закону $N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$, где N_0 – количество радиоактивных ядер в данном объеме вещества в момент времени t= 0; N – количество радиоактивных ядер в том же объеме в момент времени t; λ – постоянная распада.

ПОСТОЯННАЯ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА λ – это вероятность распада ядра за 1 сек, то есть доля ядер, распадающаяся за 1 сек.

Примеры:

- Радиоактивный распад - явление статистическое. Нельзя предсказать, когда именно распадется конкретное нестабильное ядро, можно говорить лишь о вероятности такого события. А такое событие является свойством только энергетического состояния ядра. Следовательно, для данного вида ядра, находящегося в определенном энергетическом состоянии, *вероятность* радиоактивного распада λ за единицу времени *постоянна,* независимо от времени его существования в этом состоянии после возникновения. Для атомных ядер не существует понятия возраста и старости.

ВРЕМЯ ЖИЗНИ (СРЕДНЯЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЖИЗНИ РАДИОАКТИВНОГО ИЗОТОПА) – это величина $\tau = 1/\lambda$, то есть промежуток времени, в течение которого исходное число радиоактивных ядер уменьшается в $e=2,7182818\ldots$ раз.

ПЕРИОД ПОЛУРАСПАДА $T_{1/2}$ – это характеристика устойчивости ядер относительно распада, равная времени, в течение которого исходное количество ядер данного вещества распадается наполовину

$$T_{1/2} = \ln 2/\boldsymbol{\lambda} = \tau \ln 2. \qquad (6)$$

Примеры:

- По определению $N_0/2=N_0e^{-\lambda T1/2}$; тогда $e^{-\lambda T1/2}=1/2$; отсюда $\boldsymbol{\lambda} = \ln 2/T_{1/2}$; или $T_{1/2} = \ln 2/\boldsymbol{\lambda}= \tau \ln 2$.
- При бета-распадах периоды полураспада в изотопических рядах имеют общую закономерность уменьшения по экспоненциальному закону.
- В радиоактивных рядах периоды полураспада регулируют момент наступления секулярного равновесия.

АКТИВНОСТЬ A – это число распадов ядер данного препарата в единицу времени

$$A = \boldsymbol{\lambda}N = \boldsymbol{\lambda}N_0e^{-\lambda t}. \qquad (7)$$

Примеры:

- В эксперименте число ядер N непосредственно не определяется, и скорость распада в абсолютных единицах не измеряется. Обычно измеряют активность $A=c\boldsymbol{\lambda}N$, где коэффициент c определяется опытным путем, так как он зависит от типа детектора, геометрии излучателя и других факторов.
- Единицей активности служит 1 Беккерель= 1 распад/сек. Существуют и внесистемные единицы активности: 1 Кюри=$3,7*10^{10}$ распад/с; 1 миллиКюри=10^{-3} Кюри; 1 микроКюри=10^{-6} Кюри. Активностью в 1 Ки обладает, например, 1 г радия-226.

УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ *a* – это активность препарата, отнесенная к единице массы препарата: $\boldsymbol{a} = A/m$.

Примеры:

- Если измеряется активность жидкого препарата, то удельная активность измеряется в Бк/л; если - газового, то - в Бк/м^3.
- Если измеряется активность твердого препарата, то удельная активность измеряется в Бк/кг.
- Если измеряется активность препарата в геофизических или радиоэкологических работах, то удельная активность измеряется в Ки/км^2.

ЦЕПОЧКА РАДИОАКТИВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ (РАДИОАКТИВНЫЙ РЯД)– процесс, когда получающееся из распада материнского ядра дочернее ядро также радиоактивно и вновь распадается, получающееся внучатое ядро также распадается и т.д.

Примеры:

- Все тяжелые ядра с массовым числом A>209 нестабильны по отношению к α-распаду за счет возрастания относительной роли кулоновской энергии. При этом, когда массовое число ядра намного превышает значение A=209, то это ядро переходит в стабильное путем цепи ряда последовательных распадов: ^{236}U-α(2,4*10^7 л)→^{232}Th-α(1,4*10^{10} л)→^{228}Ra-β$^-$(6,7 л)→^{228}Ac-β$^-$(6,1 ч)→ ^{228}Th-α(1,9 л)→^{224}Ra-α(3,6 д)→^{220}Rn (торон, $T_{1/2}$=55 с)→^{216}Po-α(0,16 с)→^{212}Pb-β$^-$(10,6 ч) →^{212}Bi-α(60,5 м)→^{208}Tl-β$^-$(3,1 м)→^{208}Pb;

или →^{212}Bi- β$^-$(60,5 м)→^{212}Po- α (3*10^{-7} с)→^{208}Pb. Этот ряд $^{236}U_{92}$→$^{208}Pb_{82}$ обозначается как ряд □массовыми числами A=4n+C, где n≥52, C=0.

- Не все звенья цепи распадов являются α-распадными, так как после α-распадов зачастую образуются ядра, уже стабильные по отношению к α-распаду, но нестабильные по отношению к β-распаду. Поэтому в цепях последовательных распадов процессы α- и β-распадов чередуются друг с другом. Систематическое изучение радиоактивных элементов, встречающихся в природе, показало, что существуют отдельные различные радиоактивные цепочки распадов (радиоактивных семейств), массовые числа в которых можно описать единой формулой A=4n+□, где n≥50 - последовательные целые числа, а C=0, 1, 2, 3 - целочисленный параметр того или иного ряда (семейства). Ряд $^{238}U_{92}$→$^{206}Pb_{82}$ имеет A=4n+2, где n≥51, C=2; ряд $^{235}U_{92}$→$^{207}Pb_{82}$ имеет A=4n+3, где n≥51, C=3.
- Природные радиоактивные ряды имеют C=0, 2, 3, т.е. следующие массовые числа: A=4n; A=4n+1; A=4n+2; A=4n+3. Но радиоактивный ряд с параметром C=1 может быть создан только искусственно. Возраст Земли около 4,5 млрд лет, за это время ряд с C=1 исчез за счет радиоактивных распадов.

Заключение:

В ходе лекции были рассмотрены сущность явления радиоактивности, его историческое открытие, основные виды распадов – альфа-, бета-, гамма-, а также их физические особенности и закономерности. Изучены понятия постоянной распада, периода полураспада, активности и цепочек

радиоактивных превращений. Радиоактивность представляет собой самопроизвольный распад нестабильных ядер с испусканием частиц и излучения, приводящий к образованию устойчивых нуклидов. Несмотря на потенциальную опасность, это явление имеет большое значение для науки, медицины, энергетики и изучения структуры материи.

Контрольные вопросы:

1) Что такое радиоактивность и в чем заключается её физическая сущность?
2) В чем особенности альфа-, бета- и гамма-распадов? Приведите примеры.
3) В чём заключается закон радиоактивного распада?
4) Как определяется период полураспада и чему он равен?
5) В каких единицах измеряется активность?
6) Чем отличаются материнское, дочернее и внучатое ядра?
7) Каково практическое значение радиоактивности в науке, технике и медицине?

Список использованных источников:

1. Юшков А.В., Жусупов М.А. Физика атомных ядер. – Алматы: Парус, 2007. – 735 с.
2. Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика. – СПб.: Лань, 2009. – 384 с.
3. Гурачевский В.Л. Радиационный контроль: физические основы и приборная база: метод. пособие. – Изд. 2-е, перераб. и дополн. – Минск : Институт радиологии, 2014. – 160 с.
4. ИшхановБ.С. Радиоактивность. – М.: Университетская книга МГУ, 2011 г. – http://nuclphys.sinp.msu.ru/radioactivity/index.html
5. Касьяненко А. А. Радиоэкологическая экспертиза и радиационные измерения . – Москва: Российский университет дружбы народов, 2016. – 252 с.