

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА (МИИТ)»
(РУТ (МИИТ))**

Одобрено кафедрой
«ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»

Протокол № ____ от _____ 201__ г.

Автор: _____

**ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ С МЕТОДИЧЕСКИМИ
УКАЗАНИЯМИ**

ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА»

Уровень ВО: *Бакалавриат*

Форма обучения: *Заочная*

Курс: *3*

Специальность/Направление: *20.03.01 Техносферная безопасность (ТБб)*

Специализация/Профиль/Магистерская программа: *(ББ) Безопасность жизнедеятельности в техносфере*

Москва

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполнение заданий курсовой работы по "Радиационной физике" является проверкой степени усвоения студентом теоретического курса, а рецензии на работу помогают доработать и правильно освоить различные темы курса радиационной физики. Перед выполнением курсовой работы студенту необходимо внимательно ознакомиться с теоретическим материалом, уравнениями и формулами, приведенными в методических указаниях. В некоторых случаях преподаватель может дать студенту индивидуальное задание – задания, не входящие в вариант студента.

Задания выбираются по варианту, номер которого совпадает с последними двумя цифрами учебного шифра.

Например, при шифре 1012–БЖТ–5231 – студент решает в курсовой работе задания с нечетными номерами № 1, 3, 5, 7, 9 по последней цифре шифра, а задания с четными цифрами - 2, 4, 6, 8, 10 по предпоследней цифре шифра.

Курсовая работа состоит из 10 заданий, к каждому из которых даются подробные методические указания, на следующие темы:

1. Рентгеновское излучение
2. Закон Мозли
3. Энергия связи ядер атомов
4. Закон радиоактивного распада
5. Правила смещения
6. Поглощение радиоактивного излучения веществом
7. Радиодозиметрия
8. Энергетический выход ядерные реакции
9. Реакция деления ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$ под действие нейтронов
10. Ядерный реактор

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ И РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ:

1. Условия всех заданий студенты переписывают полностью без сокращений.
2. Все значения величин, заданных в условии и привлекаемых из справочных таблиц, записывают для наглядности сокращенно (столбиком) в тех же единицах, которые заданы, а затем рядом осуществляют перевод в единицы СИ.
4. В задании 4 необходимо выполнять график с обозначением всех величин.
5. Необходимо указать физические законы, которые использованы, и аргументировать возможность их применения для решения данной задачи.
6. С помощью этих законов, учитывая условие задачи, получить необходимые расчетные формулы.
7. Вывод формул и решение задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями.
8. Использованные в формулах буквенные обозначения должны быть согласованы с обозначениями, приведенными в условии задачи и на приведенном рисунке. Дополнительные буквенные обозначения следует сопровождать соответствующими объяснениями.
9. Получив расчетную формулу, необходимо проверить ее размерность.
10. Основные физические законы, которыми следует пользоваться при решении задач (вывод расчетных формул), приведены в каждом из разделов. Там же приведены некоторые формулы, которыми можно пользоваться без вывода.
11. После проверки размерности полученных формул проводится численное решение задачи.
12. Вычисления следует производить по правилам приближенных вычислений с точностью, соответствующей точности исходных числовых данных условия задачи. Числа следует записывать в стандартном виде, используя множитель 10, например не 0,000347, а $3,47 \cdot 10^{-4}$.
13. Каждая последующая задача должна начинаться с новой страницы.
14. В конце курсовой работы необходимо указать учебные пособия, учебники, использованные при ее выполнении, и дату сдачи работы и поставить подпись.
15. Если курсовая работа не допущена к зачету, то все необходимые дополнения и исправления сдают вместе с незачтенной работой. Исправления в тексте незачтенной работы не допускаются.
16. Допущенные к зачету курсовые работы с внесенными уточнениями предъявляются преподавателю на зачете. Студент должен быть готов дать во время зачета пояснения по решению всех выполненных задач.
17. Курсовая работа выполняется машинописно на листах формата А4. В Приложении дан образец оформления титульного листа.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Т. И. Трофимова. Курс физики: Учебное пособие. М.: Академия, 2008.
2. Т.И. Трофимова. Сборник задач по курсу физики с решениями М.: Высшая школа. 2008.
3. А.А. Детлаф Курс физики. Учебное пособие. М.: Высшая школа, 2000.
4. В.Ф. Дмитриева Основы физики. М. Высшая школа, 2001.
5. Ю.И. Куклев Физическая экология - М.. Высшая школа, 2001.

Дополнительная литература:

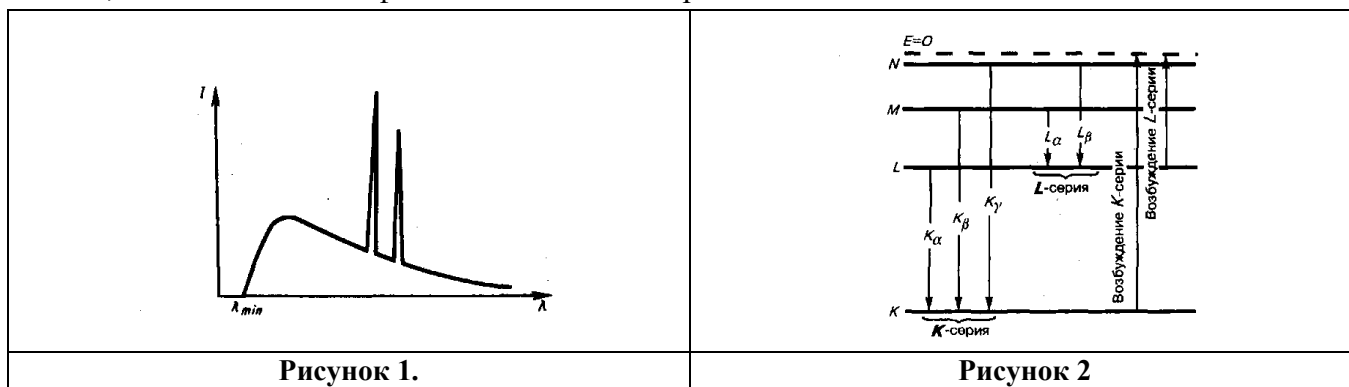
6. С.Е. Мельханов Общая физика. Конспект лекций, М.: Высшая школа, 2001.
7. В.М. Гладской Физика. Сборник задач с решениями, М.:Дрофа, 2004.
8. Т.И. Трофимова Физика.. 500 основных законов и формул. М., Высшая школа, 2003.
9. В.Ф. Дмитриева, В. Ф. Прокофьев. Основы физики. М.: Высшая школа, 2002.
10. Физический энциклопедический словарь. М.: Российская энциклопедия, 2003.

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА

1. Рентгеновское излучение

Источником рентгеновского излучения является рентгеновская трубка, в которой сильно ускоренные электрическим полем электроны бомбардируют анод (металлическая мишень из тяжелых металлов, например W или Pt), испытывая на нем резкое торможение. При этом возникает **рентгеновское излучение**, представляющее собой электромагнитные волны с длиной волны примерно 10^{-12} — 10^{-8} м

Спектр рентгеновского излучения имеет сложную структуру (рис. 1) и зависит как от энергии электронов, так и от материала анода. Спектр представляет собой наложение сплошного спектра, ограниченного со стороны коротких длин волн некоторой границей λ_{\min} , называемой **границей сплошного спектра**, и линейчатого спектра — совокупности отдельных линий, появляющихся на фоне сплошного спектра.



Характер сплошного спектра не зависит от материала анода, а определяется только энергией бомбардирующих анод электронов. Рентгеновское излучение испускается бомбардирующими анод электронами в результате их торможения при взаимодействии с атомами мишени. Сплошной рентгеновский спектр поэтому называют **тормозным спектром**.

Чем больше кинетическая энергия электронов, вызывающих тормозное рентгеновское излучение, тем меньше λ_{\min} . Это обстоятельство, а также наличие самой границы объясняются квантовой теорией. Очевидно, что предельная энергия кванта соответствует такому случаю торможения, при котором вся кинетическая энергия электрона переходит в энергию кванта, т. е.

$$E_{\max} = h\nu_{\max} = eU, \quad (1.1)$$

где U —разность потенциалов, за счет которой электрону сообщается энергия E_{\max} , ν_{\max} — частота, соответствующая границе сплошного спектра, $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Дж·с - постоянная Планка, $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость электромагнитных волн в вакууме.

Отсюда граничная длина волны

$$\lambda_{\min} = c/\nu_{\max} = ch/(eU) = ch/E_{\max}, \quad (1.2)$$

что полностью соответствует экспериментальным данным.

При достаточно большой энергии бомбардирующих анод электронов на фоне сплошного спектра появляются отдельные резкие линии — линейчатый спектр, определяемый материалом анода и называемый **характеристическим рентгеновским спектром (излучением)**.

По сравнению с оптическими спектрами характеристические рентгеновские спектры элементов совершенно однотипны и состоят из нескольких серий, обозначаемых K , L , M , и O . Каждая серия, в свою очередь, содержит небольшой набор отдельных линий, обозначаемых в

порядке убывания длины волны индексами $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ ($K_\alpha, K_\beta, K_\gamma, \dots, L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, \dots$). При переходе от легких элементов к тяжелым структура характеристического спектра не изменяется, лишь весь спектр смещается в сторону коротких волн. Особенность этих спектров заключается в том, что **атомы каждого химического элемента**, независимо от того, находятся ли они в свободном состоянии или входят в химическое соединение, **обладают определенным, присущим только данному элементу линейчатым спектром характеристического излучения**. Так, если анод состоит из нескольких элементов, то и характеристическое рентгеновское излучение представляет собой наложение спектров этих элементов.

Возникновение характеристических рентгеновских спектров связано с процессами, происходящими во внутренних, застроенных электронных оболочках атомов, которые имеют сходное строение (рис.2). Под влиянием внешнего электрона или высокоэнергетического фотона вырывается один из двух электронов K -оболочки атома. Тогда на его место может перейти электрон с более удаленных от ядра оболочек L, M, N, \dots . Такие переходы сопровождаются испусканием рентгеновских квантов и возникновением спектральных линий K -серии: K_α ($L \rightarrow K$), K_β ($M \rightarrow K$), K_γ ($N \rightarrow K$) и т. д. Самой длинноволновой линией K -серии является линия K_α . Частоты линий возрастают в ряду $K_\alpha \rightarrow K_\beta \rightarrow K_\gamma$, поскольку энергия, высвобождаемая при переходе электрона на K -оболочку с более удаленных оболочек, увеличивается. Наоборот, интенсивности линий в ряду $K_\alpha \rightarrow K_\beta \rightarrow K_\gamma$ убывают, так как вероятность переходов электронов с L -оболочки на K -оболочку больше, чем с более удаленных оболочек M и N . K -серия сопровождается обязательно другими сериями, так как при испускании ее линий появляются вакансии в оболочках L, M, \dots , которые будут заполняться электронами, находящимися на более высоких уровнях.

Исследуя рентгеновские спектры элементов, английский физик Г. Мозли (1887—1915) установил в 1913 г. соотношение, называемое **законом Мозли**:

$$\nu = R(Z - \sigma)^2 \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (1.3)$$

где $\nu = 1/\lambda$ частота, соответствующая данной линии характеристического рентгеновского излучения, λ - длина волны, R — постоянная Ридберга, σ — постоянная экранирования, $m = 1, 2, 3, \dots$ (определяет рентгеновскую серию), n принимает целочисленные значения начиная с $m+1$ (определяет отдельную линию соответствующей серии).

Смысл постоянной экранирования заключается в том, что на электрон, совершающий переход, соответствующий некоторой линии, действует не весь заряд ядра Ze , а заряд $(Z - \sigma)e$, ослабленный экранирующим действием других электронов. Например, для K_α -линии $\sigma = 1$, и закон Мозли запишется в виде

$$\nu = R(Z - 1)^2 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right). \quad (1.4)$$

Задание 1. Найти длину волны λ , определяющего коротковолновую границу непрерывного рентгеновского спектра, если известно, что уменьшение приложенного к рентгеновской трубке напряжения на ΔU увеличивает длину волны в k раз. Значения ΔU и k приведены в таблице 1.1

Таблица 1.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ΔU , кВ	20	22	22	23	24	26	28	28	30	32
К	1,6	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,4	2,5	2,6	2,8

Задание 2. Считая, что формула Мозли с достаточной степенью точности дает связь между длиной волны λ характеристических рентгеновских лучей

и порядковым номером Z , из которого сделан антикатод, найти наибольшую длину волны λ линий К-серии рентгеновских лучей даваемых трубкой с антикатодом, указанным в таблице 1.2. Для К-серии постоянная λ экранирования $\sigma = 1$

Таблица 1.2

Вариант	Материал антикатада	Порядковый номер элемента в периодической таблице
0	Железо	26
1	Никель	28
2	Медь	29
3	Молибден	42
4	Серебро	47
5	Тантал	73
6	Вольфрам	74
7	Платина	78
8	Кобальт	27
9	Олово	50

2. Размер, состав и заряд атомного ядра. Массовое и зарядовое числа. Дефект массы и энергия связи ядра

Атом состоит из положительно заряженного ядра и окружающих его электронов. Атомные ядра имеют размеры примерно $10^{-14} — 10^{-15}$ м (линейные размеры атома примерно 10^{-10} м).

Атомное ядро состоит из элементарных частиц — **протонов и нейтронов**. Протон (p) имеет положительный заряд, равный заряду электрона, и массу покоя $m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1836 m_e$, где m_e — масса электрона. Нейтрон (n) — нейтральная частица с массой покоя $m_n = 1,6749 \cdot 10^{-27}$ кг $\approx 1839 m_e$. Протоны и нейтроны называются **нуклонами** (от лат. nucleus — ядро). Общее число нуклонов в атомном ядре называется массовым числом A .

Атомное ядро характеризуется **зарядом Ze** , где Z — **зарядовое число** ядра, равное числу протонов в ядре и совпадающее с порядковым номером химического элемента в Периодической системе элементов Менделеева. Известные в настоящее время 107 элементов таблицы Менделеева имеют зарядовые числа ядер от $Z = 1$ до $Z = 107$.

Ядро обозначается тем же символом, что и нейтральный атом: ${}^A_Z X$, где X — символ химического элемента, Z атомный номер (число протонов в ядре), A — массовое число (число нуклонов в ядре).

Так как атом нейтрален, то заряд ядра определяет и число электронов в атоме. От числа электронов зависит их распределение по состояниям в атоме, от которого, в свою очередь, зависят химические свойства атома. Следовательно, заряд ядра определяет специфику данного химического элемента, т.е. определяет число электронов в атоме, конфигурацию их электронных оболочек, величину и характер внутриатомного электрического поля.

Ядра с одинаковыми Z , но разными A (т. е. с разными числами нейтронов $N=A-Z$) называются **изотопами**, а ядра с одинаковыми A , но разными Z — **изобарами**. Например, водород ($Z=1$) имеет три изотопа: ${}^1_1\text{H}$ — протий ($Z=1, N=0$), ${}^2_1\text{H}$ — дейтерий ($Z=1, N=1$), ${}^3_1\text{H}$ — тритий ($Z=1, N=2$), олово — десять, и т. д. В большинстве случаев изотопы одного и того же химического элемента обладают одинаковыми химическими и близкими физическими свойствами (исключение составляют изотопы водорода), определяющимися в основном структурой электронных оболочек, которая является одинаковой для всех изотопов данного элемента. Примером ядер-изобар могут служить ядра ${}^{10}_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{10}_6\text{C}$. В настоящее время известно более 2500 ядер, отличающихся либо Z , либо A , либо тем и другим.

Радиус ядра определяется эмпирической формулой

$$R = R_0 \sqrt[3]{A} \quad (2.1)$$

где $R_0 = (1,3 \div 1,7) \cdot 10^{-15}$ м. Из формулы (2.1) вытекает, что объем ядра пропорционален числу нуклонов в ядре. Следовательно, плотность ядерного вещества примерно одинакова для всех ядер ($\approx 10^{17}$ кг/м³).

Атомные ядра являются устойчивыми образованиями. Это означает, что в ядре между нуклонами существует определенная связь.

Масс-спектрометрические измерения показали, что **масса ядра меньше, чем сумма масс составляющих его нуклонов**. При образовании ядра должна выделяться определенная энергия. Из закона сохранения энергии вытекает и обратное: для разделения ядра на составные части необходимо затратить такое же количество энергии, которое выделяется при его образовании. Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на отдельные нуклоны, называется **энергией связи ядра**.

Энергия связи нуклонов в ядре

$$E_{\text{св}} = [Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{я}}] c^2, \quad (2.2)$$

где m_p , m_n , $m_{\text{я}}$ — соответственно массы протона, нейтрона и ядра.

Величина

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - m_{\text{я}} \quad (2.3)$$

называется **дефектом массы ядра**. На эту величину уменьшается масса всех нуклонов при образовании из них атомного ядра.

В таблицах обычно указываются массы элементов в атомных единицах массы, а энергия в ядерной физике определяется в мегаэлектронвольтах ($\text{МэВ} = 10^6 \text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{Дж}$). В этих единицах $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{м}^2/\text{с}^2 = 931 \text{МэВ/а.е.м.}$

Часто вместо энергии связи рассматривают **удельную энергию связи** $\delta E_{\text{св}}$ — энергию связи, отнесенную к одному нуклону. Она характеризует устойчивость (прочность) атомных ядер, т. е. чем больше $\delta E_{\text{св}}$, тем устойчивее ядро. Удельная энергия связи зависит от массового числа A элемента (рис. 1). Для легких ядер ($A \leq 12$) удельная энергия связи круто возрастает до $6 \div 7$ МэВ, претерпевая целый ряд скачков (например, для ${}^1_1\text{H}$ $\delta E_{\text{св}} = 1,1$ МэВ, для ${}^2_2\text{He}$ — 7,1 МэВ, для ${}^3_3\text{Li}$ — 5,3 МэВ), затем более медленно возрастает до максимальной величины 8,7 МэВ у элементов с $A = 50 \div 60$, а потом постепенно уменьшается у тяжелых элементов (например, для

${}^{238}_{92}\text{U}$ она составляет 7,6 МэВ).

Уменьшение удельной энергии связи при переходе к тяжелым элементам объясняется тем, что с возрастанием числа протонов в ядре увеличивается и энергия их **кулоновского отталкивания**. Поэтому связь между нуклонами становится менее сильной, а сами ядра менее прочными.

Наиболее устойчивыми оказываются так называемые **магические ядра**, у которых число протонов или число нейтронов равно одному из магических чисел: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126. Особенно стабильны **дважды магические ядра**, у которых магическими являются и число протонов, и число нейтронов (этих ядер насчитывается всего пять: ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$, ${}^{48}_{20}\text{Ca}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$).

Из рис. 2.1 следует, что наиболее устойчивыми с энергетической точки зрения являются ядра средней части таблицы Менделеева. Тяжелые и легкие ядра менее устойчивы. Это означает, что энергетически выгодны следующие процессы: 1) деление тяжелых ядер на более легкие; 2) слияние легких ядер друг с другом в более тяжелые. При обоих процессах выделяется огромное количество энергии; эти процессы в настоящее время осуществлены практически: реакции деления и термоядерные реакции.

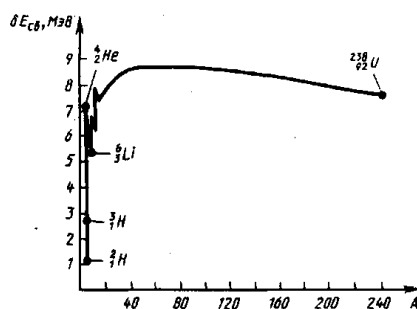


Рисунок 2.1

Задание 3. Рассчитать радиус, энергию связи и удельную энергию связи ядра, указанного в таблице 2.1

Таблица 2.1

Вариант	Изотоп	Символ	Масса(а.е.м.)
0	Литий	${}^6_3\text{Li}$	6,01512
1	Углерод	${}^{12}_6\text{C}$	12,00000
2	Азот	${}^{14}_7\text{N}$	14,00307
3	Кислород	${}^{17}_8\text{O}$	16,99931
4	Полоний	${}^{210}_{84}\text{Po}$	209,98285
5	Радон	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	222,01757
6	Радий	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	226,02540
7	Торий	${}^{230}_{90}\text{Th}$	230,033127
8	Торий	${}^{232}_{90}\text{Th}$	232,038054
9	Уран	${}^{234}_{92}\text{U}$	234,040946
	Протон		1,00783
	Нейтрон		

3. Радиоактивное излучение и его виды. Закон радиоактивного распада.

Под **радиоактивностью** понимают способность некоторых атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) превращаться в другие ядра с испусканием различных видов радиоактивных излучений и элементарных частиц. Радиоактивность подразделяется на **естественную** (наблюдается у неустойчивых изотопов, существующих в природе) и

искусственную (наблюдается у изотопов, полученных посредством ядерных реакций). Принципиального различия между этими двумя типами радиоактивности нет, так как законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы. На характер радиоактивного излучения препарата не оказывают влияния вид химического соединения, агрегатное состояние, механическое давление, температура, электрические и магнитные поля, т. е. все те воздействия, которые могли бы привести к изменению состояния электронной оболочки атома. Радиоактивные свойства элемента обусловлены лишь структурой его ядра.

Радиоактивное излучение бывает трех типов: α -, β - и γ -излучение.

α -излучение отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает высокой ионизирующей способностью и малой проникающей способностью (например, поглощается слоем алюминия толщиной примерно 0,05 мм или листом бумаги). α -излучение представляет собой поток ядер гелия; заряд α -частицы равен $+2e$, а масса совпадает с массой ядра изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$. По отклонению α -частиц в электрическом и магнитном полях был определен их удельный заряд Q/m_α

β -излучение отклоняется электрическим и магнитным полями; его ионизирующая способность значительно меньше (примерно на два порядка), а проникающая способность гораздо больше (поглощается слоем алюминия толщиной примерно 2 мм), чем у α -частиц. β -излучение представляет собой поток быстрых электронов.

γ -излучение не отклоняется электрическим и магнитным полями, обладает относительно слабой ионизирующей способностью и очень большой проникающей способностью. γ -излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение с чрезвычайно малой длиной волны $\lambda < 10^{-10}$ м и вследствие этого — ярко выраженными корпускулярными свойствами, т.е. является потоком частиц — γ -квантов (фотонов).

Радиоактивным распадом называется естественное радиоактивное превращение ядер, происходящее самопроизвольно. Атомное ядро, испытывающее радиоактивный распад, называется **материнским**, возникающее ядро — **дочерним**.

Радиоактивный распад является спонтанным процессом, подчиняющимся законам статистики. Так как отдельные радиоактивные ядра распадаются независимо друг от друга, то можно считать, что число ядер dN , распавшихся в среднем за интервал времени от t до $t+dt$, пропорционально промежутку времени dt и числу N нераспавшихся ядер к моменту времени t :

$$dN = -\lambda N dt, \quad (3.1)$$

где λ — постоянная для данного радиоактивного вещества величина, называемая **постоянной радиоактивного распада**; знак минус указывает, что общее число радиоактивных ядер в процессе распада уменьшается. Разделив переменные и интегрируя:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt, \quad \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t,$$

получим
$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (3.2)$$

где N_0 — начальное число **нераспавшихся** ядер (в момент времени $t=0$), N — число **нераспавшихся** ядер в момент времени t . Формула (3.2) выражает **закон радиоактивного распада**, согласно которому число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненциальному закону.

Интенсивность процесса радиоактивного распада характеризуют две величины: период полураспада $T_{1/2}$ и среднее время жизни τ радиоактивного ядра. **Период полураспада** $T_{1/2}$ — время, за которое исходное число радиоактивных ядер **в среднем** уменьшается вдвое. Тогда, согласно (8),

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}},$$

откуда

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = 0,693/\lambda. \quad (3.3)$$

Периоды полураспада для естественно-радиоактивных элементов колеблются от десятиллионных долей секунды до многих миллиардов лет.

Суммарная продолжительность жизни dN ядер равна $t/dN = \lambda N t dt$. Проинтегрировав это выражение по всем возможным t (т. е. от 0 до ∞) и разделив на начальное число ядер N_0 , получим **среднее время жизни** τ радиоактивного ядра:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N t dt = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 t e^{-\lambda t} dt = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.4)$$

Таким образом, среднее время жизни τ радиоактивного ядра есть величина, обратная постоянной радиоактивного распада λ .

Активностью A нуклида (общее название атомных ядер, отличающихся числом протонов Z и нейтронов N) в радиоактивном источнике называется число распадов, происходящих с ядрами образца в 1 с:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N. \quad (3.5)$$

Удельная активность показывает активность единицы массы изотопа:

$$a = A/m$$

Единица активности в СИ — **беккерель** (Бк): 1 Бк — активность нуклида, при которой за 1 с происходит один акт распада. До сих пор в ядерной физике применяется и внесистемная единица активности нуклида в радиоактивном источнике — **кюри** (Ки): 1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк.

=====

Задание 4 Радиоактивный изотоп массой m помещен в замкнутый сосуд. Период полураспада изотопа и масса указаны в таблице 3.1

Вычислить постоянную распада λ , среднее время жизни изотопа, количество атомов, активность и удельную активность в начальный момент времени и в момент времени t

$$\frac{N}{N_0}$$

Построить кривую зависимости изменения атомов изотопа N_0 в сосуде в интервале от 0 до $5T_{1/2}$ с интервалом $0,55T_{1/2}$. На графике отметить период полураспада изотопа.

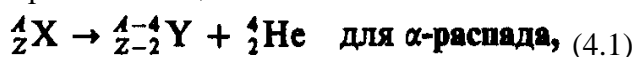
Таблица 3.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Изотоп	${}^{45}_{20}\text{Ca}$	${}^{220}_{84}\text{Po}$	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	${}^{210}_{85}\text{At}$	${}^{211}_{85}\text{At}$	${}^{77}_{35}\text{Br}$	${}^{82}_{35}\text{Br}$	${}^{48}_{23}\text{V}$	${}^{206}_{83}\text{Vi}$	${}^{210}_{83}\text{Vi}$
Период полураспада	164 сут	138 сут	3,82 сут	8,1 ч	7,2 ч	57 ч	35 сут	16 сут	6,2 сут	5 сут
Масса., г	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время t	328 сут	414 сут	7,64 сут	32,4 ч	36 ч	228 ч	350 сут	90 сут	62 сут	45 сут

4. Правила смещения

Радиоактивный распад происходит в соответствии с **правилами смещения**, позволяющими установить, какое ядро возникает в результате распада материнского ядра.

Правила смещения:



где ${}^A_Z\text{X}$ — материнское ядро, Y — символ дочернего ядра, ${}^4_2\text{He}$ — ядро гелия (α -частица), ${}^0_{-1}\text{e}$ — символическое обозначение электрона (заряд его равен -1 , а массовое число — нулю).

Правила смещения являются следствием двух законов, выполняющихся при радиоактивных распадах, — сохранения электрического заряда и сохранения массового числа: сумма зарядов (массовых чисел) возникающих ядер и частиц равна заряду (массовому числу) исходного ядра.

Возникающие в результате радиоактивного распада ядра могут быть, в свою очередь, радиоактивными. Это приводит к возникновению **цепочки**, или **ряда, радиоактивных превращений**, заканчивающихся стабильным элементом. Совокупность элементов, образующих такую цепочку, называется **радиоактивным семейством**.

Из правил смещения (4.1) и (4.2) вытекает, что массовое число при α -распаде уменьшается на 4, а при β -распаде не меняется. Поэтому для всех ядер одного и того же радиоактивного семейства остаток от деления массового числа на 4 одинаков. Таким образом, существует четыре различных радиоактивных семейства, для каждого из которых массовые числа задаются одной из следующих формул:

$$A = 4n, 4n + 1, 4n + 2, 4n + 3,$$

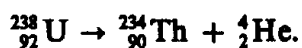
где n — целое положительное число.

Семейства называются по наиболее долгоживущему (с наибольшим периодом полураспада) «родоначальнику»: семейства тория (от ${}^{232}_{90}\text{Th}$), нептуния (от ${}^{237}_{93}\text{Np}$), урана (от ${}^{238}_{92}\text{U}$) и актиния (от ${}^{235}_{89}\text{Ac}$).

Конечными нуклидами соответственно являются ${}^{208}_{82}\text{Pb}$, ${}^{209}_{83}\text{Bi}$, ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, ${}^{207}_{82}\text{Pb}$, т.е. единственное семейство нептуния (искусственно-радиоактивные ядра) заканчивается нуклидом Bi, а все остальные (естественно-радиоактивные ядра) — нуклидами Pb.

В настоящее время известно более двухсот α -активных ядер, главным образом тяжелых ($A > 200$, $Z > 82$). Только небольшая группа α -активных ядер приходится на область с $A = 140$

± 160 (редкие земли). α -распад подчиняется правилу смещения (10). Примером α -распада служит распад изотопа урана ^{238}U с образованием Th:



Скорости вылетающих при распаде α -частиц очень велики и колеблются для разных ядер в пределах $(1,4 \cdot 10^7 - 2) \cdot 10^7$ м/с, что соответствует энергиям (4 - 8,8) МэВ. α -частицы образуются в момент радиоактивного распада при встрече движущихся внутри ядра двух протонов и двух нейтронов.

Для α -распада характерна сильная зависимость между периодом полураспада $T_{1/2}$ и энергией E вылетающих частиц. Эта взаимосвязь определяется эмпирическим **законом Гейгера — Нэттола** (1912), который обычно выражают в виде зависимости между **пробегом R_α** (расстоянием, проходимым частицей в веществе до ее полной остановки) α -частиц в воздухе и постоянной радиоактивного распада λ :

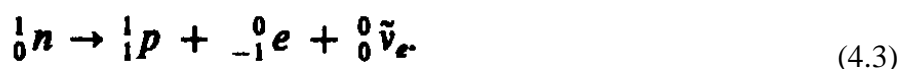
$$\ln \lambda = A + B \ln R_\alpha, \quad (11)$$

Объяснение α -распада дано квантовой механикой, согласно которой вылет α -частицы из ядра возможен благодаря туннельному эффекту — проникновению α -частицы сквозь потенциальный барьер. Из α -радиоактивного ядра α -частицы могут вылетать с энергией, меньшей высоты потенциального барьера. Этот эффект целиком обусловлен волновой природой α -частиц.

Явление β -распада подчиняется правилу смещения $^A_Z\text{X} \rightarrow ^A_{Z+1}\text{Y} + ^0_{-1}\text{e}$ и связано с выбросом электрона. При β -распаде вместе с электроном испускается еще одна нейтральная частица - **антинейтрино**.

Нейтрино имеет нулевой заряд, спин $1/2$ (в единицах \hbar) и нулевую (а скорее $< 10^{-4} m_e$) массу покоя; обозначается $^0_0\nu_e$. **Антинейтрино** - античастица по отношению к нейтрино; обозначается $^0_0\bar{\nu}_e$). Нейтрино — единственная частица, не участвующая ни в сильных, ни в электромагнитных взаимодействиях; единственный вид взаимодействий, в котором может принимать участие нейтрино, — **слабое взаимодействие**. Поэтому прямое наблюдение нейтрино затруднительно. Ионизирующая способность нейтрино столь мала, что один акт ионизации в воздухе приходится на 500 км пути. Проникающая же способность нейтрино столь огромна (пробег нейтрино с энергией 1 МэВ в свинце составляет примерно 10^{18} м!), что затрудняет удержание этих частиц в приборах.

β -электрон рождается в результате процессов, происходящих внутри ядра. Так как при β -распаде число нуклонов в ядре не изменяется, а Z увеличивается на единицу, то единственной возможностью одновременного осуществления этих условий является превращение одного из нейтронов β -активного ядра в протон с одновременным образованием электрона и вылетом антинейтрино:



В этом процессе выполняются законы сохранения электрических зарядов, импульса и массовых чисел.

γ -излучение не является самостоятельным видом радиоактивности, а только сопровождает α - и β -распады и также возникает при ядерных реакциях, при торможении заряженных частиц, их распаде и т. д. γ -спектр является линейчатым. γ -Спектр — это

распределение числа γ -квантов по энергиям. Дискретность γ -спектра является доказательством дискретности энергетических состояний атомных ядер.

γ -излучение испускается дочерним, а не материнским ядром. Дочернее ядро в момент своего образования, оказываясь возбужденным, за время $10^{-13}—10^{-14}$ с, значительно меньшее времени жизни возбужденного атома (примерно 10^{-8} с), переходит в основное состояние с испусканием γ -излучения. Возвращаясь в основное состояние, возбужденное ядро может пройти через ряд промежуточных состояний, поэтому γ -излучение одного и того же радиоактивного изотопа может содержать несколько групп γ -квантов, отличающихся одна от другой своей энергией.

При γ -излучении A и Z ядра не изменяются, поэтому оно не описывается правилами смещения. γ -излучение большинства ядер является столь коротковолновым, что его волновые свойства проявляются весьма слабо. На первый план выступают корпускулярные свойства, поэтому γ -излучение рассматривают как поток частиц — γ -квантов. При радиоактивных распадах различных ядер γ -кванты имеют энергии от 10 кэВ до 5 МэВ.

=====

Задание 5. Какой изотоп образуется из материнского ядра A_ZX после k α - распадов и n β -распадов. Исходное ядро и количество α - и β -распадов представлено в таблице 4.1. Написать схемы всех α - и β -распадов.

Таблица 4.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Изотоп	${}^{45}_{20}\text{Ca}$	${}^{220}_{84}\text{Po}$	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	${}^{210}_{85}\text{At}$	${}^{211}_{85}\text{At}$	${}^{77}_{35}\text{Br}$	${}^{82}_{35}\text{Br}$	${}^{48}_{23}\text{V}$	${}^{206}_{83}\text{Vi}$	${}^{210}_{83}\text{Vi}$
K	2	4	5	4	3	2	3	2	4	5
N	3	3	4	5	5	4	3	4	5	4

=====

5. Поглощение рентгеновского и радиоактивного излучения веществом

β -излучение представляет собой поток быстрых электронов. Поглощение потока электронов с одинаковыми скоростями в однородном веществе подчиняется экспоненциальному закону

$$N=N_0e^{-\mu x}, \quad (5.1)$$

где N_0 и N — число электронов на входе и выходе слоя вещества толщиной x , μ — коэффициент поглощения. β -излучение сильно рассеивается в веществе, поэтому μ зависит не только от вещества, но и от размеров и формы тел, на которые β -излучение падает.

Рентгеновские и γ -кванты, обладая нулевой массой покоя, не могут замедляться в среде, поэтому при прохождении γ -излучения сквозь вещество они либо поглощаются, либо рассеиваются им. При прохождении пучка γ -квантов сквозь вещество их энергия не меняется, но в результате столкновений ослабляется интенсивность, изменение которой описывается экспоненциальным законом

$$I = I_0e^{-\mu x} \quad (5.2)$$

где I_0 и I — интенсивности γ -излучения на входе и выходе слоя поглощающего вещества толщиной x , μ — линейный коэффициент поглощения.

Так как γ -излучение — самое проникающее излучение, то μ для многих веществ — очень малая величина; μ зависит от свойств вещества и от энергии рентгеновских и γ -квантов. соотношением:

Массовый коэффициент поглощения связан с линейным коэффициентом поглощения:

$$\mu_m = \mu \rho, \text{ где } \rho - \text{плотность вещества}$$

Поглощение характеризуется также толщиной половинного ослабления, то есть толщиной слоя $x_{1/2}$ уменьшающей вдвое интенсивность падающих лучей:

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

=====

Задание 6. Во сколько раз уменьшится интенсивность рентгеновских лучей, энергия которых $W = 1$ МэВ при прохождении слоя материала толщиной d см. Найдите линейный и массовый коэффициенты этих материалов. Для какой длины волны рентгеновских лучей получены эти данные? Сколько слоев половинного ослабления необходимо для уменьшения интенсивности рентгеновских лучей в k раз? Данные необходимые для расчетов приведены в таблице 5.1

Таблица 5.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
вещество	вода	алюминий	железо	Свинец	вода	алюминий	железо	свинец	железо	свинец
$x_{1/2}$, см	10,2	4,5	1,56	0,87	10,2	4,5	1,56	0,87	1,56	0,87
ρ , г/см ³	1,0	2,7	7,9	11,3	1,0	2,7	7,9	11,3	7,9	11,3
k	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55

=====

6. Основные понятия радиодозиметрии

Воздействие γ -излучения (а также других видов ионизирующего излучения) на вещество характеризуют дозой ионизирующего излучения. Различают:

Поглощенная доза излучения (D) определяется энергией ионизирующего излучения, переданной определенной массе облучаемого вещества: $D = E/m$, где E – энергия, Дж; m – масса, кг;

Единица поглощенной дозы излучения — **грей** (Гр)*: $[D] \quad 1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}$ — доза излучения, при которой облученному веществу массой 1 кг передается энергия любого ионизирующего излучения 1 Дж. $1 \text{ Гр (грей)} = 1 \text{ Дж/кг} = 100 \text{ рад}$.

Различные эффекты ионизирующего излучения определяются поглощенной дозой. Она сложным образом зависит от вида ионизирующего излучения, энергии его частиц, состава облучаемого вещества и пропорциональна времени облучения.

Эквивалентная доза облучения H равна произведению поглощенной дозы на средний коэффициент качества ионизирующего излучения K , учитывающий биологическое действие различных излучений на биологическую ткань: $H = kD \quad [H] - 1 \text{ Зв (зиверт)} = 100 \text{ бэр}$

Для оценки ущерба здоровью человека при неравномерном облучении введено понятие **эффективной эквивалентной дозы** $H_{эфф}$, применяемой при оценке возможных стохастических эффектов – злокачественных образований: $H_{эфф} = \sum W_t H_t$ где H_t – среднее значение эквивалентной дозы в органе или ткани; W_t – взвешенный коэффициент, равный отношению

ущерба облучения органа или ткани к ущербу облучения всего тела при одинаковых эквивалентных дозах.

Экспозиционная доза излучения P_e — физическая величина, равная отношению суммы электрических зарядов всех ионов одного знака, созданных электронами, освобожденными в облученном воздухе (при условии полного использования ионизирующей способности электронов), к массе этого воздуха. Она является мерой ионизирующего действия излучения. Единица экспозиционной дозы излучения P_e — кулон на килограмм (Кл/кг); внесистемной единицей является **рентген (Р)**: $1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$.

Мощность дозы (экспозиционной, поглощенной или эквивалентной) — это отношение приращения дозы за определенный интервал времени к величине этого временного интервала. Различают: 1) **мощность поглощенной дозы** (единица — грей на секунду (Гр/с)); 2) **мощность экспозиционной дозы** (единица — ампер на килограмм (А/кг)). 3) **мощность эквивалентной дозы**.

$$1 \text{ Зв/с} = 100 \text{ Р/с} = 100 \text{ бэр/с}.$$

Биологическая доза — величина, определяющая воздействие излучения на организм.

Единица биологической дозы — **биологический эквивалент рентгена (бэр)**: 1 бэр — доза любого вида ионизирующего излучения, производящая такое же биологическое действие, как и доза рентгеновского или γ -излучения в 1 Р (1 бэр = 10^{-2} Дж/кг).

Дозиметр — прибор, предназначенный в основном для измерения дозы или мощности дозы ионизирующего излучения.

Радиометр — прибор, предназначенный для измерения активности радионуклида или плотности потока частиц.

Предельно допустимая доза облучения для людей в населенных пунктах — 5 мЗв/год (или 0,5 бэр/год). Для специалистов, чья работа непосредственно связана с источниками излучения эта доза на порядок выше, т. е. 50 мЗв/год (5 бэр/год). Различные источники радиации приводят к повышенному облучению человека, превышающему как фоновое облучение (естественный фон), так и предельно допустимую дозу (табл. 6.1).

Таблица 6.1 - Дозы облучения и их воздействие на организм

Дозы облучения, бэр	Последствия
450	Тяжелая степень лучевой болезни (гибнет 50% облученных людей)
100	Нижний уровень развития легкой степени лучевой болезни
75	Кратковременные незначительные изменения состава крови
30	Облучение при рентгеноскопии желудка (местное)
25	Допустимое аварийное облучение персонала (разовое)
10 бэр	Допустимое аварийное облучение населения (разовое)
5 бэр	Допустимое облучение персонала в нормальных условиях за год
3 бэр	Облучение при рентгенографии зубов
0,5 бэр/ 5 мЗв	Допустимое облучение населения в нормальных условиях за год
0,1 бэр/	Фоновое облучение за год
1 мкбэр	Просмотр одного хоккейного матча на ТВ

Задание 7. Воздух, находящийся при нормальных условиях ($p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $T_0 = 273 \text{ К}$) в ионизационной камере объемом $V \text{ см}^3$ облучается рентгеновскими лучами. Мощность экспозиционной дозы рентгеновских лучей P_e . Какое число пар ионов N пар ионов в единицу

времени создает эта трубка на единицу массы воздуха на данном расстоянии? Найти ионизационный ток насыщения I_n . Данные необходимые для расчетов приведены в таблице 6.2

Таблица 6.2

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V \text{ см}^3$	5	6	8	10	12	14	15	16	18	20
$P_3, \text{ мР/ч}$	0,50	0,48	0,54	0,60	0,45	0,58	0,45	0,65	0,70	0,75

=====

7. Ядерные реакции и их основные типы

Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где X и Y — исходное и конечное ядра, a и b — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В любой ядерной реакции выполняются **законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел**: сумма зарядов и сумма массовых чисел ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов и сумме массовых чисел конечных продуктов (ядер и частиц) реакции. Выполняются также **законы сохранения энергии, импульса и момента импульса**.

В отличие от радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как **экзотермическими** (с выделением энергии), так и **эндотермическими** (с поглощением энергии).

Важную роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло предположение Н. Бора (1936) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:



Первая стадия — это захват ядром X частицы a , приблизившейся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м), и образование промежуточного ядра C , называемого составным (или компаунд-ядром). Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в возбужденном состоянии. При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон — ядро тяжелого изотопа водорода — дейтерия, содержащее один протон и один нейтрон) или α -частица может получить энергию, достаточную для вылета из ядра. В результате возможна вторая стадия ядерной реакции — распад составного ядра на ядро Y и частицу b .

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются **прямыми ядерными взаимодействиями** (например, реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

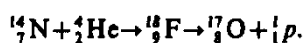
по роду участвующих в них частиц — реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

по энергии вызывающих их частиц — реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;

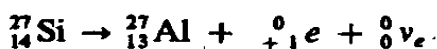
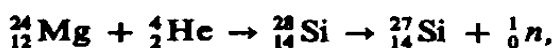
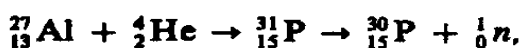
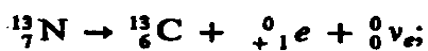
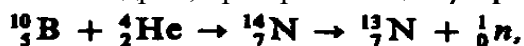
по роду участвующих в них ядер — реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);

по характеру происходящих ядерных превращений — реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько γ -квантов).

Первая в истории ядерная реакция осуществлена Э. Резерфордом (1919) при бомбардировке ядра азота α -частицами, испускаемыми радиоактивным источником:

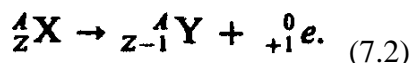


В экспериментах Фредерика и Ирен Жолио-Кюри (1934), была открыта искусственная радиоактивность, и впервые обнаружен позитронный радиоактивный распад. Жолио-Кюри, бомбардируя различные ядра α -частицами обнаружили искусственно-радиоактивные ядра, испытывающие β^- -распад, а реакции на В, Al и Mg привели к искусственно-радиоактивным ядрам, претерпевающим β^+ -распад, или **позитронный распад**:

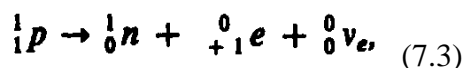


Позитрон ${}^0_{+1}\text{e}$ — частица с массой покоя, в точности равной массе покоя электрона, и спином $\frac{1}{2}$ (в единицах \hbar), несущая положительный электрический заряд $+e$.

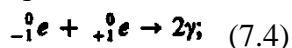
β^+ -Распад подчиняется следующему правилу смещения:



Процесс β^+ -распада протекает так, как если бы один из протонов ядра превратился в нейтрон, испустив при этом позитрон и нейтрино:



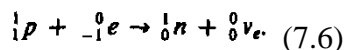
При столкновении позитрона с электроном происходит их **аннигиляция**:



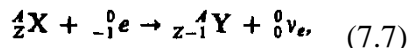
в ее процессе электронно-позитронная пара превращается в два γ -кванта, причем энергия пары переходит в энергию фотонов. Процессы возникновения и превращения электронно-позитронных пар — являются примером **взаимосвязи различных форм материи**: в этих

процессах материя в форме вещества превращается в материю в форме электромагнитного поля, и наоборот.

Для многих ядер превращение протона в нейтрон, помимо описанного процесса происходит посредством **электронного захвата**, или **e-захвата**, при котором ядро спонтанно захватывает электрон с одной из внутренних оболочек атома (*K, L* и т. д.), испуская нейтрино:



Необходимость появления нейтрино вытекает из закона сохранения спина. Схема e-захвата:



т. е. один из протонов ядра превращается в нейтрон, заряд ядра убывает на единицу и оно смещается влево так же, как и при позитронном распаде.

Электронный захват обнаруживается по сопровождающему его характеристическому рентгеновскому излучению, возникающему при заполнении образовавшихся вакансий в электронной оболочке атома (именно так e-захват и был открыт в 1937 г.). При e-захвате, кроме нейтрино, никакие другие частицы не вылетают, т. е. вся энергия распада уносится нейтрино.

=====

Задание 8. Дописать ядерную реакцию и найти энергию, выделяющуюся или поглощенную при реакции. Данные взять из таблицы 7.1

Таблица 7.1.

Вариант	Ядерная реакция
0	${}_3^7Li + {}_1^1p = {}_2^4He + ?$
1	${}_7^{14}N + {}_2^4He = ? + {}_1^1H$
2	${}_1^2H + {}_1^3H = {}_1^1H + ?$
3	${}_3^6Li + {}_1^2H = {}_2^4He + ?$
4	${}_3^6Li + {}_1^1H = {}_2^3He + ?$
5	${}_7^{14}N + {}_1^2H \rightarrow ? + {}_2^4He$
6	${}_{92}^{234}U \rightarrow {}_{90}^{230}Th + {}_2^4He$
7	${}_{88}^{226}Ra \rightarrow ? + {}_2^4He$
8	${}_7^{14}N + {}_2^4He \rightarrow {}_8^{17}O + ?$
9	${}_{90}^{230}Th \rightarrow {}_{88}^{226}Ra + ?$

=====

8. Ядерные реакции под действием нейтронов

Нейтроны, являясь электрически нейтральными частицами, не испытывают кулоновского отталкивания и поэтому легко проникают в ядра и вызывают разнообразные ядерные превращения. Изучение ядерных реакций под действием нейтронов привело к появлению ядерных реакторов.

Характер ядерных реакций под действием нейтронов зависят от их скорости (энергии). В зависимости от энергии нейтроны условно делят на две группы: **медленные** и **быстрые**. Область энергий медленных нейтронов включает в себя область **ультрахолодных** (с энергией до 10^{-7} эВ), **очень холодных** ($10^{-7} - 10^{-4}$ эВ), **холодных** ($10^{-4} - 10^{-3}$ эВ), **тепловых** ($10^{-3} - 0,5$ эВ) и **резонансных** ($0,5 - 10^4$ эВ) нейтронов. Ко второй группе можно отнести **быстрые** ($10^4 - 10^8$ эВ), **высокоэнергетичные** ($10^8 - 10^{10}$ эВ) и **релятивистские** ($\geq 10^{10}$ эВ) нейтроны.

К началу 40-х годов XX века было доказано, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины Периодической системы — лантан и барий. Этот результат положил начало ядерным реакциям совершенно нового типа — **реакциям деления ядра**, заключающимся в том, что тяжелое ядро под действием нейтронов, а как впоследствии оказалось и других частиц делится на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе.

Особенностью деления ядер является то, что оно сопровождается испусканием двух-трех вторичных нейтронов, называемых **нейтронами деления**. Так как для средних ядер число нейтронов примерно равно числу протонов ($N/Z \approx 1$), а для тяжелых ядер число нейтронов значительно превышает число протонов ($N/Z \approx 1,6$), то образовавшиеся осколки деления перегружены нейтронами, в результате чего они и выделяют нейтроны деления. Однако испускание нейтронов деления не устраняет полностью перегрузку ядер-осколков нейтронами. Это приводит к тому, что осколки оказываются радиоактивными. Они могут претерпеть ряд β^- -превращений, сопровождаемых испусканием γ -квантов. Так как β^- -распад сопровождается превращением нейтрона в протон, то после цепочки β^- -превращений соотношение между нейтронами и протонами в осколке достигнет величины, соответствующей стабильному изотопу.

Например, при делении ядра урана $^{235}_{92}\text{U}$



осколок деления $^{139}_{54}\text{Xe}$ в результате трех

актов β^- -распада превращается в стабильный изотоп лантана $^{139}_{57}\text{La}$: $^{139}_{54}\text{Xe} \rightarrow ^{139}_{55}\text{Cs} \rightarrow ^{139}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{139}_{57}\text{La}$.

Осколки деления могут быть разнообразными, поэтому реакция (не единственная приводящая к делению $^{235}_{92}\text{U}$).

Расчеты показывают, что деление ядер сопровождается т выделением большого количества энергии. Эксперименты подтверждают, что при каждом акте деления выделяется огромная энергия, которая распределяется между осколками (основная доля), нейтронами деления, а также между продуктами последующего распада осколков деления.

Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления, что делает возможным осуществление **цепной реакции деления** — ядерной реакции, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции. Цепная реакция деления характеризуется **коэффициентом размножения k нейтронов**, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. **Необходимым условием** развития цепной реакции деления является **требование $k \geq 1$** . Не все образующиеся вторичные нейтроны вызывают последующее деление ядер, что приводит к уменьшению коэффициента размножения. Коэффициент размножения зависит от природы делящегося вещества, а для данного изотопа — от его количества, а также размеров и формы активной зоны. Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно осуществление цепной реакции, называются **критическими размерами**. Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления **цепной реакция**, называется **критической массой**.

Скорость развития цепных реакций различна. Пусть T — среднее время жизни одного поколения, а N — число нейтронов в данном поколении. В следующем поколении их число равно kN , т. е. прирост числа нейтронов за одно поколение $dN = kN - N = N(k - 1)$. Прирост же числа нейтронов за единицу времени, т. е. скорость нарастания цепной реакции,

$$\frac{dN}{dt} = \frac{N(k-1)}{T} \quad (8.1)$$

Интегрируя (8.1), получим

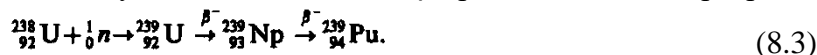
$$N = N_0 e^{(k-1)t/T}, \quad (8.2)$$

где N_0 — число нейтронов в начальный момент времени, а N — их число в момент времени t . N определяется знаком $(k-1)$.

При $k > 1$ идет **развивающаяся реакция**, число делений непрерывно растет и реакция может стать взрывной. При $k = 1$ идет **самоподдерживающаяся реакция**, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется. При $k < 1$ идет затухающая реакция.

Цепные реакции делятся на **управляемые** и **неуправляемые**. Взрыв атомной бомбы, например, является неуправляемой реакцией. Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней $^{235}_{92}\text{U}$ (или $^{239}_{94}\text{Pu}$) делится на две удаленные друг от друга части с массами ниже критических. Затем с помощью обычного взрыва эти массы сближаются, общая масса делящегося вещества становится больше критической и возникает взрывная цепная реакция, сопровождающаяся мгновенным выделением огромного количества энергии и большими разрушениями. Взрывная реакция начинается за счет имеющихся нейтронов спонтанного деления или нейтронов космического излучения. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах.

В природе имеется три изотопа, которые могут служить ядерным топливом ($^{235}_{92}\text{U}$: в естественном уране его содержится примерно 0,7%) или сырьем для его получения ($^{232}_{90}\text{Th}$ и $^{238}_{92}\text{U}$: в естественном уране его содержится примерно 99,3%). $^{232}_{90}\text{Th}$ служит исходным продуктом для получения искусственного ядерного топлива $^{233}_{92}\text{U}$, а $^{238}_{92}\text{U}$, поглощая нейтроны, посредством двух последовательных β^- -распадов — для превращения в ядро $^{239}_{94}\text{Pu}$:



=====

Задание 9. Дописать реакцию деления ядра $^{235}_{92}\text{U}$ под действием нейтронов. В какой элемент превращается более тяжелое ядро после k β^- -распадов. Данные взять из таблицы 8.1.

Таблица 8.1

Вариант	Ядерная реакция	к β - распадов
0	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{54}^{139}\text{Xe} + ? + 3{}_0^1\text{n}$	3
1	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{54}^{139}\text{Xe} + ? + 2{}_0^1\text{n}$	4
2	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{54}^{139}\text{Xe} + ? + 4{}_0^1\text{n}$	5
3	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{38}^{95}\text{Sr} + ? + 3{}_0^1\text{n}$	2
4	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{35}^{95}\text{Sr} + ? + 2{}_0^1\text{n}$	3
5	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{56}^{136}\text{Ba} + ? + 3{}_0^1\text{n}$	4
6	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{56}^{136}\text{Ba} + ? + 2{}_0^1\text{n}$	4
7	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{36}^{96}\text{Kr} + ? + 3{}_0^1\text{n}$	3
8	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{36}^{96}\text{Kr} + ? + 2{}_0^1\text{n}$	2
9	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{48}^{112}\text{Cd} + ? + 3{}_0^1\text{n}$	4

9 Ядерная энергетика

Устройства, в которых осуществляется и поддерживается управляемая цепная реакция деления, называются **ядерными реакторами**. Пуск первого реактора в мире осуществлен в Чикагском университете (1942) под руководством Э. Ферми, в России (и в Европе) — в Москве (1946) под руководством И. В. Курчатова.

Рассмотрим принцип действия реактора на тепловых нейтронах (рис. 9.1). В активной зоне реактора расположены тепловыделяющие элементы 1 и замедлитель 2, в котором нейтроны замедляются до тепловых скоростей. Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) представляют собой блоки из делящегося материала, заключенные в герметичную оболочку, слабо поглощающую нейтроны. За счет энергии, выделяющейся при делении ядер, ТВЭЛы разогреваются, а поэтому для охлаждения они помещаются в поток теплоносителя (3 — канал для протока теплоносителя). Активная зона окружается отражателем 4, уменьшающим утечку нейтронов.

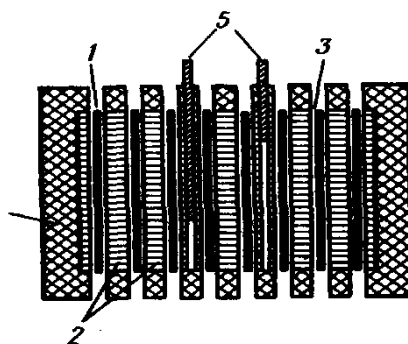


Рисунок 9.1

Управление цепной реакцией осуществляется специальными управляющими стержнями 5 из материалов, сильно поглощающих нейтроны (например, В, Cd). Параметры реактора рассчитываются так, что при полностью вставленных стержнях реакция заведомо не идет, при постепенном вынимании стержней коэффициент размножения нейтронов растет и при некотором их положении принимает значение, равное единице. В этот момент реактор начинает

работать. По мере его работы количество делящегося материала в активной зоне уменьшается и происходит ее загрязнение осколками деления, среди которых могут быть сильные поглотители нейтронов. Чтобы реакция не прекратилась, из активной зоны с помощью автоматического устройства постепенно извлекаются управляющие (а часто специальные компенсирующие) стержни. Подобное управление реакцией возможно благодаря существованию запаздывающих нейтронов, испускаемых делящимися ядрами с запаздыванием до 1 мин. Когда ядерное топливо выгорает, реакция прекращается. До нового запуска реактора выгоревшее ядерное топливо извлекают и загружают новое. В реакторе имеются также аварийные стержни, введение которых при внезапном увеличении интенсивности реакции немедленно ее обрывает.

Ядерный реактор является мощным источником проникающей радиации (нейтроны, γ -излучение), примерно в 10^{11} раз превышающей санитарные нормы. Поэтому любой реактор имеет биологическую защиту — систему экранов из защитных материалов (например, бетон, свинец, вода), располагающуюся за его отражателем, и пульт дистанционного управления.

Ядерные реакторы различаются:

по характеру основных материалов, находящихся в активной зоне (ядерное топливо, замедлитель, теплоноситель); в качестве делящихся и сырьевых веществ используются $^{235}_{92}\text{U}$, $^{239}_{94}\text{Pu}$, $^{233}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, в качестве замедлителей — вода (обычная и тяжелая), графит, бериллий, органические жидкости и т. д., в качестве теплоносителей — воздух, вода, водяной пар, He, CO₂ и т. д.;

по характеру размещения ядерного топлива и замедлителя в активной зоне: **гомогенные** (оба вещества равномерно смешаны друг с другом) и **гетерогенные** (оба вещества располагаются порознь в виде блоков);

по энергии нейтронов (реакторы на тепловых и быстрых нейтронах; в последних используются нейтроны деления и замедлитель вообще отсутствует);

по типу режима (непрерывные и импульсные);

по назначению (энергетические, исследовательские, реакторы по производству новых делящихся материалов, радиоактивных изотопов и т. д.).

В соответствии с рассмотренными признаками и образовались такие названия, как уран-графитовые, водо-водяные, графито-газовые реакторы и др.

Среди ядерных реакторов особое место занимают энергетические **реакторы-размножители**. В них наряду с выработкой электроэнергии идет процесс воспроизводства ядерного горючего. Это означает, что в реакторе на естественном или слабообогатенном уране используется не только изотоп $^{235}_{92}\text{U}$, но и изотоп $^{238}_{92}\text{U}$. В настоящее время основой ядерной энергетики с воспроизводством горючего являются реакторы на быстрых нейтронах.

Впервые ядерная энергия для мирных целей использована в СССР. В Обнинске под руководством И. В. Курчатова введена в эксплуатацию (1954) первая атомная электростанция мощностью 5 МВт. Принцип работы атомной электростанции на водо-водяном реакторе приведен на рис. 9.2. Урановые блоки 1 погружены в воду 2, которая служит одновременно и замедлителем, и теплоносителем. Горячая вода (она находится под давлением и нагревается до 300°C) из верхней части активной зоны реактора поступает через трубопровод 3 в парогенератор 4, где она испаряется и охлаждается, и возвращается через трубопровод 5 в реактор. Насыщенный пар 6 через трубопровод 7 поступает в паровую турбину 8, возвращаясь после отработки через трубопровод 9 в парогенератор. Турбина вращает электрический генератор 10, ток от которого поступает в электрическую сеть.

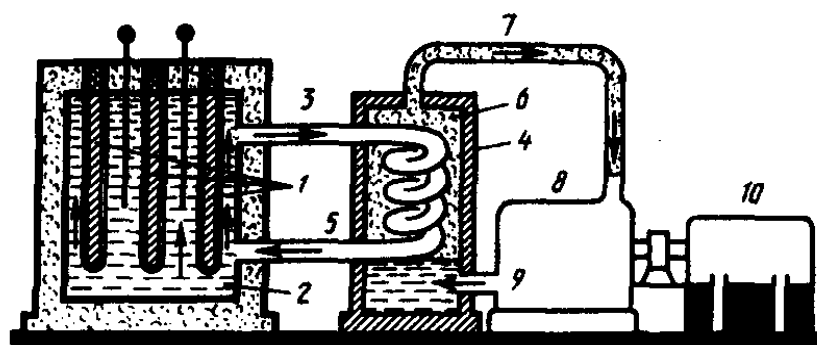


Рисунок 9.2

Создание ядерных реакторов привело к промышленному применению ядерной энергии. Энергетические запасы ядерного горючего в рудах примерно на два порядка превышает запасы химических видов топлива.

В России помимо создания мощных АЭС (Нововоронежской общей мощностью примерно 1500 МВт, первой очереди Ленинградской с двумя реакторами по 1000 МВт) большое внимание уделяется созданию небольших АЭС (750—1500 кВт), удобных для эксплуатации в специфических условиях, а также решению задач малой ядерной энергетики. Так, построены первые в мире передвижные АЭС, создан первый в мире реактор («Ромашка»), в котором с помощью полупроводников происходит непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую (в активной зоне содержится 49 кг $^{235}_{92}\text{U}$, тепловая мощность реактора 40 кВт, электрическая—0,8 кВт).

Огромные возможности для развития атомной энергетики открываются с созданием реакторов-размножителей на быстрых нейтронах (**бридеров**), в которых выработка энергии сопровождается производством вторичного горючего—плутония, что позволит кардинально решить проблему обеспечения ядерным горючим. Техника реакторов на быстрых нейтронах находится в стадии поисков наилучших инженерных решений. Первая опытно-промышленная станция такого типа мощностью 350 МВт построена в г. Шевченко на берегу Каспийского моря. Она используется для производства электроэнергии и опреснения морской воды, обеспечивая водой город и прилегающий район нефтедобычи с населением порядка 150000 человек.

Задание 10. Какая масса m урана $^{235}_{92}\text{U}$ расходуется за время t на атомной электростанции мощностью P кВт. КПД электростанции $k\%$. При каждом акте деления выделяется энергия $Q=200$ МэВ. Какую энергию W (в киловатт-часах) вырабатывает за это время электростанция? Данные взять из таблицы 9.1

Таблица 9.1

Вариант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P , кВт	6000	4000	3200	5300	6500	7700	8900	9000	7500	5000
k , %	17	20	25	23	18	21	24	20	25	20

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ОТКРЫТАЯ АКАДЕМИЯ ТРАНСПОРТА

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине

РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА

Студент: курс, группа, Ф.И.О.

Руководитель: должность, ученая степень. Ф.И.О.

Москва - 2013