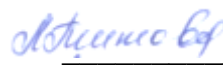


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
ядерной физики

 / Титова Л.В./  
13.06.2024г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.О.12.06 Физика атомного ядра и элементарных частиц**

**1. Код и наименование направления подготовки/специальности:**

14.03.02 Ядерные физика и технологии

**2. Профиль подготовки/специализация:**

Физика атомного ядра и частиц

**3. Квалификация выпускника: бакалавр**

**4. Форма обучения: очная**

**5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:**

кафедра ядерной физики

**6. Составители программы:**

д.ф.м.н., проф. Кадменский Станислав Георгиевич, к.ф.-м.н, доц. Титова Лариса  
Витальевна.

**7. Рекомендована:**

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №6 от 13.06.2024

**8. Учебный год: 2026/2027**

**Семестр(ы): 6**

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

- ознакомление с современными представлениями физики атомного ядра, получение знаний теории атомного ядра.

Задачи учебной дисциплины:

- освоить законы и теоремы, знания основных методов решения практических и модельных задач по ядерной физике;
- приобретение умений практически применять соответствующий математический аппарат к решению задач ядерной физики;
- овладение системой понятий и основных положений ядерной физики; знаниями, необходимыми для решения различных задач ядерной физики.

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Обязательная дисциплина вариативной части цикла Б1 (Физика).

## 11. Планируемые результаты обучения по дисциплине/модулю (знания, умения, навыки), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями) и индикаторами их достижения:

Код	Название компетенции	Код(ы)	Индикатор(ы)	Планируемые результаты обучения
ОПК-1	Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования	ОПК-1.1	Знает основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.	Знать: теоретические основы, основные понятия и законы физики атомного ядра и элементарных частиц; связь явлений в микромире исходя из характеристик типичных масштабов; основные экспериментальные данные и теоретические представления о свойствах атомных ядер, основные модели ядер, законы сохранения; свойства ядерных сил; связь законов сохранения со свойствами симметрии; основные экспериментальные данные и теоретические основы оболочечной модели ядер; основные экспериментальные данные и теоретические представления о свойствах частиц - сечения и пороги реакций, диаграммы Фейнмана, законы сохранения и взаимодействия;  Уметь: решать задачи по курсу физики атомного ядра и частиц по определению основных характеристик атомного ядра и частиц, расчету энергии и порогов реакций, кинематических характеристик продуктов реакций; пользоваться основными понятиями, законами, моделями физики атомного ядра и элементарных частиц  Владеть: методами расчета сечений процессов рассеяния, энергии связи, масс ядер, основных характеристик распада ядер; методами измерения статистических характеристик потоков излучения, определение периода полураспада изотопов
		ОПК-1.2	Составляет математические модели ядерно-физических процессов.	
		ОПК-1.3	Владеет навыками использования основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применения методов математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования.	

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час —5/180.

Форма промежуточной аттестации – экзамен, зачет (6 семестр)

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость	
	Всего	По семестрам
		6 семестр
Аудиторные занятия	120	120
в том числе:	лекции	30
	практические	30
	лабораторные	60
Самостоятельная работа	24	24
в том числе: курсовая работа (проект)	12	12
Контроль	36	36
Форма промежуточной аттестации	Экзамен	Экзамен
Итого:	180	180

#### 13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
<b>1. Лекции</b>			
1.1	Введение	Сохранение качества. Квантовая лестница Вайскопфа. Характерные размерные параметры ядерной физики.	-
1.2	Основные свойства атомных ядер	Статические свойства атомных ядер. Состав атомных ядер. Изотопии. Спины ядер. Размеры атомных ядер. Опыты Хофштадтера.	-
1.3	К. модель ат. ядра	Капельная модель атомного ядра. Формула Вайцзеккера.	-
1.4	Статические свойства атомных ядер	Электрические и магнитные моменты ядер. Квадрупольные моменты атомных ядер. Форма ядер. Дипольные моменты ядер. Магнитные дипольные моменты ядер. Ядерный магнитный резонанс и его применение. Четность. Несохранение четности. Статистика атомных ядер.	-
1.5	Вращение ядер.	Моменты инерции.	-
1.6	модели атомного ядра.	Оболочечная модель атомного ядра. Магические числа. Обобщенная модель ядра. Пределы сильной и слабой связи в обобщенной модели ядра. Коллективные колебания а атомных ядрах. Спаривание нуклонов в атомных ядрах. Сверхтекучесть.	-
1.7	Взаимодействие излучения с веществом.	Взаимодействие легких заряженных частиц с веществом. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Потери энергии. Длина пробега частицы в веществе.	-
1.8	Радиоактивные распады атомных ядер.	Альфа-распад. Законы сохранения при альфа-распаде ядер. Теории альфа-распада. Бета-распад атомных ядер. Классификация. Законы сохранения при бета-распаде ядер.	-

		Электронные спектры. Гамма-распад атомных ядер. Законы сохранения при гамма-распаде ядер. Длинноволновое приближение. Ядерная изомерия. Эффект Мёссбауэра. Деление атомных ядер. Изомеры формы.	
1.9	Понятие о ядерных силах и их основные свойства	Понятие о ядерных силах и их основные свойства: короткодействие, зарядовая независимость, зависимость от ориентации спинов и орбитальных моментов нуклонов, свойство насыщения, нецентральный и обменный характер. Теория Юкавы, взаимопревращаемость нуклонов. Нейтрино. Мезоны. Обменное взаимодействие нуклонов в ядре. Основные схемы обмена виртуальными мезонами между нуклонами в ядре. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Постоянная распада, период полураспада, время жизни радиоактивного вещества.	-
1.10	Основы физики элементарных частиц.	Частицы и античастицы. Характеристики и свойства лептонов. Основные пути распада нестабильных лептонов. Кварки, их физические характеристики, Ад-роны, кварковая модель адронов. Заключение. Некоторые современные научные данные об истории развития Вселенной и возможных механизмах рождения ядер различных химических элементов.	-
1.11	Основы ядерной энергетики.	Цепная реакция деления. Замедление и диффузия нейтронов в веществе. Ядерные реакторы.	-

### 13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)					Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Контроль	
1	Капельная модель атомного ядра. Формула Вайцзеккера.	2	2	4	1	2	11
2	Сохранение качества. Квантовая лестница Вайскопфа. Характерные размерные параметры ядерной физики.	2	2	4	1	2	11
3	Статические свойства атомных ядер. Состав атомных ядер. Изотопии. Спины ядер. Размер атомных ядер. Опыты Хофштадтера.	2	2	4	2	2	12
4	Электрические и магнитные моменты ядер. Квадрупольные моменты атомных ядер. Форма ядер	2	2	4	2	2	12
5	Дипольные моменты	2	2	4	2	2	12

	ядер. Магнитные дипольные моменты ядер. Ядерный магнитный резонанс и его применение.						
6	Четность. Несохранение четности. Статистика атомных ядер.	2	2	4	1	2	11
7	Вращение ядер. Моменты инерции.	2	2	4	1	2	11
8	Взаимодействие излучения с веществом. Классификация элементарных частиц. Кварки и глюоны. Виды взаимодействий в природе. Цвет.	2	2	4	2	2	12
9	Альфа-распад атомных ядер. Законы сохранения при альфа-распаде ядер. Теории альфа-распада.	2	2	4	2	4	14
10	Бета-распад атомных ядер. Классификация. Законы сохранения при бета-распаде ядер. Электронные спектры.	2	2	4	2	4	14
11	Гамма-распад атомных ядер. Законы сохранения при гамма-распаде ядер. Длинноволновое приближение. Ядерная изомерия. Эффект Мёссбауэра	2	2	4	2	4	14
12	Оболочечная модель атомного ядра. Магические числа. Обобщенная модель ядра. Пределы сильной и слабой связи в обобщенной модели ядра.	2	2	4	2	4	14
13	Коллективные колебания а атомных ядрах. Ядерные реакции. Законы сохранения в ядерных реакциях. Сечение ядерной реакции. Классификация ядерных реакции.	4	4	8	2	2	20
14	Ядерные силы. Теория Юкавы.	2	2	4	2	2	12
	Итого:	30	30	60	24	36	180

#### 14. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Изложение материала преподавателем необходимо вести в форме, доступной для понимания. Для улучшения усвоения учебного материала необходимо применять традиционные и современные технические средства обучения. Для самостоятельного изучения отведено время на все разделы курса.

Студентам на лекциях необходимо вести подробный конспект и стараться понять материал курса, не стесняться задавать преподавателю вопросы для углубленного понимания конкретных проблем курса. Для полного понимания материала следует активно использовать консультации. Для самостоятельного изучения разделов курса, рекомендованных преподавателем, необходимо пользоваться основной и дополнительной литературой, интернет-ресурсами.

#### 15. Перечень основной и дополнительной литературы, ресурсов интернет, необходимых для освоения дисциплины (список литературы оформляется в соответствии с требованиями ГОСТ и используется общая сквозная нумерация для всех видов источников)

а) основная литература:

№ п/п	Источник
1	Ишханов Б. С. Частицы и атомные ядра : учебник по дисциплине "Физика атом. ядра" для студ. вузов, обуч. по специальностям 010701 - "Физика", 010705 - "Физика атом. ядра и частиц" и направлению 010700 - "Физика" / Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, Н.П. Юдин ; Моск. гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М. : URSS : Изд-во ЛКИ, 2007. — 581 с
2	Капитонов И. М. Введение в физику ядра и частиц : учебное пособие для студ. физ. фак. класс. ун-тов и других вузов, обуч. по специальности "Ядер. физика" и направлению "Физика" / И. М. Капитонов. — Изд. 3-е, испр. и доп. — М. : КомКнига, 2006. — 327с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4	Иродов И. Е. Атомная и ядерная физика : Сборник задач : Учебное пособие для студ. физ. специальностей вузов / И.Е. Иродов. — 8-е изд., испр. — СПб. : Лань, 2002. — 287 с.
5	Сивухин Д. В.. Общий курс физики : учебное пособие для студ. физ. специальностей вузов : в 5 т. / Д.В. Сивухин. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. — Т.5: Атомная и ядерная физика. — 2002. — 782 с.
6	Детлаф А.А., Курс физики/ А.А. Детлаф, Б.М. Яворский.— М.: Высш. шк.,2000.
7	Ишханов Б.С. Физика ядра и частиц XX век / Б.С. Ишханов, Э.И. Кэбин. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000.
8	Грибков Л.А. Основы физики: учебник для ст. естеств. научн. Факультетов/ Л.А. Грибков - М.: Физматлит, 1995
9	Бланк А.Я. Физика: учеб. пособие для ст. нефизич. спец. Вузов/ А.Я. Бланк.— Харьков: Каравелла,1996.
10	Савельев И.В. Курс физики: Учебник для втузов/ И.В.Савельев. — М.: Физматлит, 1998. Т.3

в) информационные электронно-образовательные ресурсы (официальные ресурсы интернет)\*:

№ п/п	Ресурс
11	<a href="http://www.lib.vsu.ru">www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ
12	<a href="https://edu.vsu.ru">https://edu.vsu.ru</a> – Электронный университет ВГУ

#### 16. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы (учебно-методические рекомендации, пособия, задачки, методические указания по выполнению практических (контрольных), курсовых работ и др.)

№ п/п	Источник
1	Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов направления 14.04.02. Ядерная физика и технологии, - Вахтель В.М., Титова Л.В. – ВГУ. 2018. – 17 с.

## 17. Образовательные технологии, используемые при реализации учебной дисциплины, включая дистанционные образовательные технологии (ДОТ), электронное обучение (ЭО), смешанное обучение):

При проведении занятий по дисциплине используются следующие образовательные технологии:

- активные и интерактивные формы проведения занятий;
- компьютерные технологии при проведении занятий;
- презентационные материалы и технологии при объяснении материала на лекционных и практических занятиях;
- специализированное оборудование при проведении лабораторных работ;
- разбор конкретных ситуаций при постановке целей и задач к разработке прикладных программ, при выборе программного обеспечения по установленным критериям, при разработке программ по предусмотренным алгоритмам и методам

Для самостоятельной работы используется ЭБС Университетская библиотека online - [www.lib.vsu.ru](http://www.lib.vsu.ru) - ЗНБ ВГУ. Программное обеспечение, применяемое при реализации дисциплины – Microsoft Windows, LibreOffice, CodeBlocks, Adobe Reader, Mozilla FireFox.

Дистанционные образовательные технологии (ДОТ) применяются с использованием образовательного портала «Электронный университет ВГУ».

## 18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:

Большая физическая аудитория им. М.А. Левитской (для проведения занятий лекционного типа, текущего контроля и промежуточной аттестации) г.Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.І, ауд. 428	Специализированная мебель, ноутбук 15,6" DNS (0164925), проектор EPSON EB-X11, переносной экран для проектора на штативе SceenMedia Aplo-T Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019. LibreOffice (бесплатное и/или свободное ПО (лицензия: <a href="https://www.libreoffice.org/about-us/licenses/">https://www.libreoffice.org/about-us/licenses/</a> ) Adobe Reader (бесплатное и/или свободное ПО (лицензия: <a href="https://get.adobe.com/ru/reader/legal/licenses">https://get.adobe.com/ru/reader/legal/licenses</a> )
Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования г.Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.І, ауд. 31	Ноутбук 15,6" DNS (0164925), проектор EPSON EB-X11, переносной экран для проектора на штативе SceenMedia Aplo-T
Лаборатория (для проведения занятий семинарского типа, текущего контроля и промежуточной аттестации) г.Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.І, ауд. 30, 33	1) лаб.30 Установка для регистрации альфа-излучения различных источников (измерений скорости счета альфа-частиц в воздухе лаборатории при нормальных условиях). 2) лаб.33 Устройство для наблюдения распада мезонов космического излучения и оценки их средней энергии на поверхности Земли.
Аудитория для самостоятельной работы. г. Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.І, ауд. 507П	Специализированная мебель, компьютеры Pentium-II, III (10 шт.), объединенные в локальную сеть с возможностью подключения к сети «Интернет».

## 19. Оценочные средства для проведения текущей и промежуточной аттестаций

Порядок оценки освоения обучающимися учебного материала определяется содержанием следующих разделов дисциплины:

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
1.	Темы 1-14	ОПК-1	ОПК-1.1 ОПК-1.2 ОПК-1.3	Контрольные работы, собеседование по билетам к экзамену
Промежуточная аттестация форма контроля - экзамен				Пункт 20.2.1 Вопросы к экзамену

## 20 Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания

### 20.1 Текущий контроль успеваемости

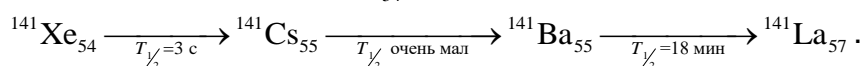
Контроль успеваемости по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Контрольные работы

#### Контрольная работа 1

Вариант 1.

1. Вычислить энергию связи, приходящуюся на 1 нуклон, в ядре  ${}^4\text{He}$ .
2. Вычислить минимальную энергию, необходимую для разделения  ${}^{12}\text{C}$  на три  $\alpha$ -частицы. Удельные энергии связи  $\epsilon_{\text{св}}(\text{C})=7,68$  МэВ,  $\epsilon_{\text{св}}(\alpha)=7,06$  МэВ.
3. Определить постоянную распада радиоактивного изотопа  ${}^{55}\text{Co}$ , если известно, что число атомов этого изотопа уменьшается в час на 3,8 %. Продукт распада не радиоактивен.
4. Распаде нуклида  ${}^{141}\text{Xe}_{54}$  происходит по схеме:



Найти количество ядер бария, которые образуются за 1 час в 1 г ксенона, если в начальный момент времени препарат содержит только ксенон.

5.  $\beta^-$ -Распад ядра  ${}^{27}\text{Mg}$  происходит на возбужденные состояния дочернего ядра  ${}^{27}\text{Al}$  с энергиями 1,013 и 0,842 МэВ. Найти максимальные энергии вылетающих при распаде электронов.
6. Найти энергию отдачи ядра свинца  ${}^{206}\text{Pb}$ , полученного при  $\alpha$ -распаде  ${}^{210}\text{Po}$ , находящегося в основном состоянии.

Вариант 2.

1. Вычислить энергию связи, приходящуюся на 1 нуклон, в ядре  ${}^9\text{Be}$ .
2. Найти энергию, необходимую для разделения ядра  ${}^{16}\text{O}$  на 4 альфа-частицы, если известно, что энергия связи ядер  ${}^{16}\text{O}$  и  ${}^4\text{He}$  равны 127,62 и 28,3 МэВ соответственно.
3. Активность радиоактивного препарата за 24 часа уменьшилась в 8 раз. Найти период полураспада  $T$  препарата. Определить, какая часть радиоактивных ядер этого препарата распадется за время, равное четвертой части периода полураспада?
4. Радионуклид  ${}^{138}\text{Xe}_{54}$ , образующийся с постоянной скоростью  $q=10^{10}$  ядро/с, испытывает превращение по схеме:  ${}^{138}\text{Xe}_{54} \xrightarrow{T_{1/2}=17 \text{ мин}} {}^{138}\text{Cs}_{55} \xrightarrow{T_{1/2}=32 \text{ мин}} {}^{138}\text{Ba}_{55}$ . Вычислить активность

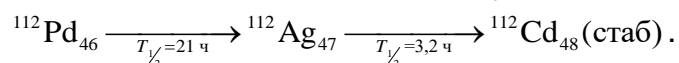
${}^{138}\text{Cs}_{55}$  через 60 мин после начала распада  ${}^{138}\text{Xe}_{54}$ .



5. Определить энергию отдачи ядра  ${}^7\text{Li}$ , образующегося при К-захвате в ядре  ${}^7\text{Be}$ . Даны энергии связи ядер  $E_{\text{св}}(\text{Be})=37,6$  МэВ,  $E_{\text{св}}(\text{Li})=39,3$  МэВ.
6. Распад ядер  ${}^{226}\text{Th}$  происходит из основного состояния и сопровождается испусканием  $\alpha$ -частиц с энергиями 6,33; 6,23; 6,10; 6,03 МэВ. Рассчитать и построить схему уровней дочернего ядра.

Вариант 3.

1. Вычислить энергию связи, приходящуюся на 1 нуклон, в ядре  ${}^{197}\text{Au}$ .
2. Вычислить энергию, необходимую для разделения ядра  ${}^9\text{Be}$  на 2  $\alpha$ -частицы и нейтрон. Энергии связи, приходящиеся на 1 нуклон, в ядрах  ${}^9\text{Be}$  и  ${}^4\text{He}$  равны 6.45 МэВ и 7,06 МэВ, соответственно.
3. Во сколько раз число распадов ядер радиоактивного йода  ${}^{131}\text{I}$  в течение первых суток больше числа распадов в течение вторых суток? Период полураспада изотопа  ${}^{131}\text{I}$  равен 193 часам.
4. Радиоактивный нуклид  ${}^{112}\text{Pd}_{46}$  испытывает распад по схеме:



Найти отношение активности серебра через 2 часа к первоначальной активности препарата, если в начальный момент препарат содержал только нуклид Pd.

5. а) Может ли ядро  ${}^{114}\text{In}$  испытывать  $\beta^+$ -распад? Избытки масс  $\Delta({}^{114}\text{Cd})=-90,021$  МэВ,  $\Delta({}^{114}\text{In})=-88,379$  МэВ;  $\Delta({}^{114}\text{Sn})=-90,558$  МэВ.

б) Может ли возникнуть ядро  ${}^{36}\text{Cl}_{17}$  путем позитронного распада  ${}^{36}\text{Ar}_{18}$ ?

6. Распад ядра  ${}^{210}\text{Po}$  происходит из основного состояния и сопровождается испусканием двух групп  $\alpha$ -частиц: основной - с энергией 5,3 МэВ, и слабой с энергией 4,5 МэВ. Найти энергию  $\alpha$ -распада этих ядер и энергию  $\gamma$ -квантов, испускаемых дочерними ядрами.

Вариант 4.

1. Вычислить энергию связи, приходящуюся на 1 нуклон, в ядре  ${}^{27}\text{Al}$ .
2. Определить энергию, выделяющуюся при образовании двух  $\alpha$ -частиц в результате синтеза ядер  ${}^2\text{H}$  и  ${}^6\text{Li}$ , если известно, что энергии связи на один нуклон в ядрах  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$  и  ${}^6\text{Li}$  равны 1,11; 7,08; 5,33 МэВ соответственно.
3. Вычислить активность 1 г изотопа  ${}^{226}\text{Ra}$  и время, через которое активность упадет на 10 %, если известно, что период полураспада радия составляет 1620 лет.
4. Радионуклид  ${}^{27}\text{Mg}$  образуется с постоянной скоростью  $q=5 \cdot 10^5$  ядро/с и испытывает  $\beta^-$ -распад. Определить активность препарата через 30 мин, если период полураспада  ${}^{27}\text{Mg}$  равен 8,5 мин.
5. Рассчитать энергию электронов, вылетающих при распаде основного состояния ядра  ${}^{34}\text{P}_{15}$  на основное и возбужденные состояния ядра  ${}^{34}\text{S}_{16}$  с энергиями 2,13 и 4,07 МэВ. Избыток массы  ${}^{34}\text{P} = (-0,026638)$  а.е.м.
6. Альфа-радиоактивный изотоп плутония  ${}^{239}\text{Pu}_{94}$  распадается по схеме  ${}^{239}\text{Pu}_{94} \rightarrow {}^{235}\text{U}_{92}^* + \alpha$ , дочернее ядро  ${}^{235}\text{U}_{92}^*$  переходит в основное состояние путем испускания  $\gamma$ -кванта с энергией 0,09 МэВ. Найти скорость  $\alpha$ -частиц, вылетающих при распаде плутония.

## Контрольная работа 2

Вариант 1

Задачи из Сборника задач «Атомная и ядерная физика», Иродов И.Е. (12.10; 12.18; 12.37)

1. Сравнить удельные ионизационные потери энергии альфа-частиц с энергией 5,3 МэВ при прохождении через алюминий и свинец, плотности которых равны 2,7 и 11,3 г/см<sup>3</sup> соответственно.

2. Поток электронов с энергией 100 МэВ падает на железную пластинку толщиной 1 см. Посчитать энергию электронов после прохождения пластинки, если радиационная длина электрона в железе равна 13,8 г/см<sup>2</sup>. Плотность железа 7,9 г/см<sup>3</sup>.
3. Монохроматическое гамма-излучение с энергией 0,411 МэВ исследуется с помощью медного фильтра толщиной 2 см. Рассчитать линейный коэффициент ослабления, если известно, что фильтр уменьшает интенсивность первоначального потока в 5 раз. Плотность меди 8,9 г/см<sup>3</sup>.

#### Вариант 2

Задачи из Сборника задач «Атомная и ядерная физика», Иродов И.Е. (12.11; 12.19; 12.39)

1. Сравнить удельные ионизационные потери энергии альфа-частиц с энергией 4,7 МэВ и дейтронов той же энергии при прохождении через алюминий, плотность которого равна 2,7 г/см<sup>3</sup>.
2. Во сколько раз удельные радиационные потери энергии для электронов в висмуте больше, чем в железе?
3. Поток монохроматического гамма-излучения с энергией 1 МэВ проходит через алюминиевый рассеиватель толщиной 12 г/см<sup>2</sup>. Найти толщину (в г/см<sup>2</sup>) пластинки из свинца, дающей такое ослабление пучка гамма-квантов.

#### Вариант 3

Задачи из Сборника задач «Атомная и ядерная физика», Иродов И.Е. (12.14; 12.22; 12.49)

1. Сравнить удельные ионизационные потери энергии альфа-частиц с энергией 5,3 МэВ и протонов той же энергии при прохождении через алюминий, плотность которого равна 2,7 г/см<sup>3</sup>.
2. Во сколько раз удельные потери энергии для электронов с кинетической энергией много большей энергии покоя на тормозное излучение в висмуте больше, чем в железе? (Плотность висмута 9,8 г/см<sup>3</sup>, алюминия – 2,7 г/см<sup>3</sup>).
3. Вычислить толщину слоя половинного ослабления пучка рентгеновского излучения с энергией 200 кэВ для воздуха.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Полное и глубокое знание учебно-программного материала на уровне количественной характеристики, владение основными понятиями дисциплины. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	<i>Повышенный уровень</i>	<i>Отлично</i>
Полное знание учебно-программного материала на основе качественной характеристики. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	<i>Базовый уровень</i>	<i>Хорошо</i>
Знание основных понятий, рассматриваемых в рамках данного курса.	<i>Пороговый уровень</i>	<i>Удовлетворительно</i>
Знание основного программного материала на основе феноменологической характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность скорректировать ответ под руководством преподавателя.	–	<i>Неудовлетворительно</i>

## 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Собеседование по билетам к экзамену

---

### 20.2.1. Перечень вопросов к экзамену:

1. Сохранение качества. Квантовая лестница Вайскопфа. Характерные размерные параметры ядерной физики.
2. Статические свойства атомных ядер. Состав атомных ядер. Изотопии. Спины ядер. Размеры атомных ядер. Опыты Хофштадтера.
3. Капельная модель атомного ядра. Формула Вайцзеккера.
4. Электрические и магнитные моменты ядер.
5. Квадрупольные моменты атомных ядер. Форма ядер.
6. Дипольные моменты ядер. Магнитные дипольные моменты ядер. Ядерный магнитный резонанс и его применение. Четность. Несохранение четности. Статистика атомных ядер.
7. Моменты инерции.
8. Оболочечная модель атомного ядра. Магические числа. Обобщенная модель ядра. Пределы сильной и слабой связи в обобщенной модели ядра. Коллективные колебания, а атомных ядрах.
9. Спаривание нуклонов в атомных ядрах. Сверхтекучесть.
10. Взаимодействие легких заряженных частиц с веществом. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Потери энергии. Длина пробега частицы в веществе.
11. Альфа-распад. Законы сохранения при альфа-распаде ядер. Теории альфа-распада.
12. Бета-распад атомных ядер. Классификация. Законы сохранения при бета-распаде ядер. Электронные спектры.
13. Гамма-распад атомных ядер. Законы сохранения при гамма-распаде ядер. Длинноволновое приближение.
14. Ядерная изомерия. Эффект Мёссбауэра.
15. Деление атомных ядер.
16. Изомеры формы.
17. Понятие о ядерных силах и их основные свойства: короткодействие, зарядовая независимость, зависимость от ориентации спинов и орбитальных моментов нуклонов, свойство насыщения, нецентральный и обменный характер.
18. Теория Юкавы, взаимопревращаемость нуклонов. Нейтрино. Мезоны. Обменное взаимодействие нуклонов в ядре. Основные схемы обмена виртуальными мезонами между нуклонами в ядре.
19. Естественная радиоактивность. Закон радиоактивного распада. Постоянная распада, период полураспада, время жизни радиоактивного вещества.
20. Частицы и античастицы. Характеристики и свойства лептонов. Основные пути распада нестабильных лептонов. Кварки, их физические характеристики.
21. Адроны, кварковая модель адронов.
22. Некоторые современные научные данные об истории развития Вселенной и возможных механизмах рождения ядер различных химических элементов.
23. Цепная реакция деления.
24. Замедление и диффузия нейтронов в веществе.
25. Ядерные реакторы.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Полное и глубокое знание учебно-программного материала на уровне количественной характеристики, владение основными понятиями дисциплины. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	<i>Повышенный уровень</i>	<i>Отлично</i>
Полное знание учебно-программного материала на основе качественной характеристики. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	<i>Базовый уровень</i>	<i>Хорошо</i>
Знание основных понятий, рассматриваемых в рамках данного курса.	<i>Пороговый уровень</i>	<i>Удовлетворительно</i>
Знание основного программного материала на основе феноменологической характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность скорректировать ответ под руководством преподавателя.	–	<i>Неудовлетворительно</i>

### ОПК-1

Способен использовать базовые знания естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования

#### Перечень заданий для проверки сформированности компетенции:

1. Из каких частиц состоит атомное ядро:
  - 1) **Нейтронов и протонов**
  - 2) Электронов и протонов
  - 3) Протонов и антипротонов
  - 4) Позитронов и нейтронов
  
2. Какое основное свойство ядерных сил?
  - 1) Дальнодействующие
  - 2) Зависят от заряда взаимодействующих частиц
  - 3) **Короткодействующие**
  - 4) Действуют только между протонами
  
3. В каких единицах измеряется заряд атомного ядра?
  - 1) **Кл**
  - 2) А
  - 3) В
  - 4) Эрг
  
4. Укажите закон радиоактивного распада ядер.

1)  $N = N_0 e^{-\lambda t}$

2)  $I = I_0 e^{-\mu x}$

3)  $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$

4)  $a = \frac{dN}{dt}$

5. Сколько нейтральных частиц в ядре  ${}^7_3\text{Li}$

- 1) 4      2) 10      3) 3      4) 7

6. Ядро  ${}^A_Z\text{X}$  претерпело радиоактивное превращение с испусканием позитрона. Каковы характеристики дочернего ядра Y.

- 1)  ${}^A_{Z-1}\text{Y}$       2)  ${}^{A-1}_{Z-1}\text{Y}$       3)  ${}^{A-2}_Z\text{Y}$       4)  ${}^{A-1}_{Z+1}\text{Y}$

7. Укажите зарядовое Z и массовое A числа частицы X, образовавшейся в ядерной реакции  ${}^{44}_{20}\text{Ca} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{41}_{19}\text{K} + \text{X}$

- 1) **Z = 2, A = 4**      3) Z = 4, A = 2  
 2) Z = 0, A = 4      4) Z = 1, A = 2

8. Активностью радиоактивного препарата называется...

- 1) **число распадов, происходящих в препарате за единицу времени**  
 2) суммарная энергия частиц, излучаемых препаратом за единицу времени  
 3) время, за которое распадается половина первоначального количества ядер  
 4) среднее время жизни радиоактивного ядра

9. Ниже перечислены некоторые свойства известных в природе сил:

- 1 - Силы уменьшаются с расстоянием, дальнодействующие  
 2 - Обладают свойством насыщения  
 3 - Уменьшаются с расстоянием, короткодействующие  
 4 - Центральные силы

Какие из указанных свойств присущи ядерным силам.

- 1) **2 и 3**      2) 1 и 2      3) 3 и 4      4) 1 и 4

10. Энергия связи нуклонов в ядре равна

1) **работе, которую нужно совершить, чтобы разделить ядро на составляющие его нуклоны**

2) энергии связи, приходящейся на один нуклон

3) количеству энергии, выделяющейся в ядерной реакции.

4) разности между массой данного изотопа и его массовым числом, т.е. числом нуклонов в ядре

5) сумме масс всех частиц, составляющих ядро

11. Какой заряд Z и массовое число A будет иметь атомное ядро, получившееся из изотопа полония  ${}^{214}_{84}\text{Po}$ , после  $\alpha$ -распада.

- 1) Z=82, A=210      2) Z=84, A=210      3) Z=80, A=214  
 4) Z=80, A=210

12. Что называется цепной реакцией?



23. Правило смещения при радиоактивном альфа-распаде имеет вид...

${}_Z X^A$  – материнское ядро

$Y$  – символ дочернего ядра

${}_2 He^4$  – ядро гелия

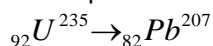
${}_{-1} e^0$  – символ электрона

- 1)  ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 He^4$       2)  ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^A + {}_{-1} e^0$       3)  ${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-4} Y^{A-2} + {}_2 He^4$   
4)  ${}_Z X^A \rightarrow {}_Z Y^A + {}_{-1} e^0$

24. Ядро состоит из 90 протонов и 144 нейтронов. После испускания двух бета-частиц и одной альфа-частицы, это ядро будет иметь ... .

- 1) 90 протонов и 140 нейтронов      2) 85 протонов и 140 нейтронов  
3) 87 протонов и 140 нейтронов      4) 90 протонов и 142 нейтронов

25. В результате ряда радиоактивных превращений ядро урана превратилось в ядро свинца. Укажите число альфа- и бета-распадов, в результате которых это произошло.



- 1)  $7\alpha$  – и  $4\beta$  – распадов      3)  $4\alpha$  – и  $7\beta$  – распадов  
2)  $7\alpha$  – и  $3\beta$  – распадов      4)  $8\alpha$  – и  $3\beta$  – распадов

26. При поглощении ядром марганца одного протона образовалось другое ядро и нейтрон. Какое это ядро?  ${}_{25} Mn^{55}$

- 1)  ${}_{26} Fe^{55}$       2)  ${}_{25} Mn^{56}$       3)  ${}_{24} Cr^{34}$       4)  ${}_{25} Mn^{54}$

27. Какое взаимодействие носит универсальный характер:

- 1) ядерное  
2) электромагнитное  
3) **гравитационное**  
4) слабое

28. Реальность превращения превращения вещества в электромагнитное поле:

- 1) подтверждается на опыте аннигиляции электрона и протона  
2) подтверждается на опыте аннигиляции протона и нейтрона  
3) **подтверждается на опыте аннигиляции электрона и позитрона**  
4) все варианты верны

29. Частица и античастица имеют:

- 1) разный по модулю заряд  
2) **одинаковый по модулю заряд**  
3) одинаковое время жизни в вакууме  
4) разные массы покоя

30. Какие элементарные частицы называют стабильными:

- 1) частицы, которые не могут существовать в свободном состоянии неограниченное время
- 2) частицы, которые могут существовать в свободном состоянии ограниченное время
- 3) **частицы, которые могут существовать в свободном состоянии неограниченное время**
- 4) частицы, которые имеют большие времена жизни

**Перечень заданий для проверки сформированности компетенции:**

1. Какие основные параметры характеризуют атомное ядро?  
 Ответ: заряд, массовое число, число протонов и нейтронов в ядре, радиус ядра, спин ядра, четность
2. Какие ядра называются изотопами? Ответ: ядра, с одинаковым зарядом, но разным числом нейтронов (массовым числом)
3. Дайте определение энергии связи ядра. Ответ: Энергия связи ядра определяется разностью суммы энергий покоя входящих в ядро протонов  $m_p c^2$  и нейтронов  $m_n c^2$  и энергии покоя  $M_{\text{ядра}}(A, Z)c^2$  самого атомного ядра
4. Определить энергию, выделяющуюся при образовании двух  $\alpha$ -частиц в результате синтеза ядер  ${}^2\text{H}$  и  ${}^6\text{Li}$ , если известно, что энергии связи на один нуклон в ядрах  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$  и  ${}^6\text{Li}$  равны соответственно 1,11; 7,08 и 5,33 МэВ. 9: 22,44 МэВ

5. Найти энергию связи ядра  ${}^{16}_8\text{O}$ :

$$E_{\text{св}}({}^{16}_8\text{O}) = [8\Delta_{\text{H}} + 8\Delta_{\text{n}} - \Delta({}^{16}_8\text{O})]u = [8 \cdot 7,289 + 8 \cdot 8,071 - (-4,737)] = 127,617 \text{ МэВ},$$

6. Из сравнения энергий связи зеркальных ядер  ${}^{11}_5\text{B}$  и  ${}^{11}_6\text{C}$  оценить радиусы этих ядер.  
 Зеркальными называются ядра изобар, у которых число протонов в одном из ядер равно числу нейтронов в другом.

Решение. Энергии связи двух ядер-изобар  $E_{\text{св}}(A, Z)$  и  $E_{\text{св}}(A, Z + 1)$  отличаются кулоновскими энергиями отталкивания протонов в этих ядрах  $E_{\text{кул}}(A, Z)$  и  $E_{\text{кул}}(A, Z + 1)$ .

В ядре  $(A, Z + 1)$  она ниже из-за более сильного отталкивания:

$$\Delta E_{\text{св}} = E_{\text{св}}(A, Z) - E_{\text{св}}(A, Z + 1), \Delta E_{\text{кул}} = E_{\text{кул}}(A, Z + 1) - E_{\text{кул}}(A, Z), \Delta E_{\text{св}} = \Delta E_{\text{кул}}.$$

Для однородно заряженной сферы радиуса  $R$ , состоящей из  $Z$  единичных зарядов  $e$ , кулоновская энергия имеет вид:



$$E_{\text{кул}} = \frac{3}{5} e^2 \frac{Z(Z-1)}{R}.$$

Тогда разность кулоновских энергий ядер-изобар равна:

$$\Delta E_{\text{кул}} = E_{\text{кул}}(A, Z+1) - E_{\text{кул}}(A, Z) = \frac{6}{5} e^2 \frac{Z}{R} = \Delta E_{\text{св}}.$$

Учитывая, что  $\Delta E_{\text{св}} \approx 2,8$  МэВ, получаем оценку радиуса ядра  $R$ :

$$R = \frac{6}{5} e^2 \frac{Z}{\Delta E_{\text{св}}} = \frac{6}{5} e^2 \frac{Z \hbar c}{\Delta E_{\text{св}} \hbar c} = \frac{6 \cdot 197,5 \text{ МэВ} \times \text{Фм} \cdot 5}{5 \cdot 137 \cdot 2,8 \text{ МэВ}} \approx 3,0 \text{ Фм}.$$

7. Найти возможные значения полного момента  $j$  нейтрона с орбитальным моментом  $l = 3$ . Определить для каждого значения полного момента все возможные значения проекции на выделенную ось.

Решение.

$$\vec{j} = \vec{l} + \vec{s} = \vec{3} + \frac{\vec{1}}{2} = \frac{\vec{5}}{2} \text{ или } \frac{\vec{7}}{2}. \text{ Для } j = \frac{5}{2} \text{ имеем } m_j = -\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{3}{2}, +\frac{5}{2} \text{ (всего}$$

$$\text{шесть значений: } 6 = \left( 2 \cdot \frac{5}{2} + 1 \right).$$

$$\text{Для } j = \frac{7}{2} \text{ имеем } m_j = -\frac{7}{2}, -\frac{5}{2}, -\frac{3}{2}, -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}, +\frac{3}{2}, +\frac{5}{2}, +\frac{7}{2}, \text{ т.е. всего восемь значений:}$$

$$8 = \left( 2 \cdot \frac{7}{2} + 1 \right).$$

8. На сколько отличается энергия отделения одного нейтрона от ядра  ${}^9\text{Be}$  и удельная энергия связи этого ядра. Ответ: 1,67 МэВ

9. Какая доля первоначального количества ядер  ${}^{90}\text{Sr}$  останется через 10 лет. Период полураспада стронция 28 лет.

Решение.

Постоянную распада  $\lambda = \ln 2 / T_{1/2}$  определим через период полураспада. Доля оставшихся ядер  ${}^{90}\text{Sr}$  равна  $\eta_a(t_1) = \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) = \exp\left(-\frac{\ln 2}{28} 10\right) = 0,78$ .

10. Какая доля первоначального количества ядер  ${}^{90}\text{Sr}$  распадется за одни сутки? Период полураспада стронция 28 лет?

$$\text{Доля распавшихся ядер } {}^{90}\text{Sr} \text{ равна } \eta_o(t) = (1 - e^{-\lambda t}) = \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) \right];$$

$$\eta_6(t_1) \cong \frac{\ln 2}{28 \cdot 365,25} \cdot 1 = 6,8 \cdot 10^{-5}.$$

11. Определить массу свинца, который образуется из 1,0 кг  $^{238}\text{U}$  за время, равное возрасту горных пород ( $2,5 \cdot 10^9$  лет).

Решение.

Ядро  $^{206}\text{Pb}$  является конечным и стабильным элементом в радиоактивном семействе урана, родоначальником которого является  $^{238}\text{U}$ . Поскольку суммарный период полураспада всех последующих звеньев семейства много меньше, чем период полураспада ядер  $^{238}\text{U}$ , то можно считать, что период полураспада, приводящий к образованию ядер  $^{206}\text{Pb}$ , равен периоду полураспада  $^{238}\text{U}$ . Искомая масса свинца  $^{206}\text{Pb}$  будет равна  $M(^{206}\text{Pb}) = M_{\text{ат}}(^{206}\text{Pb}) \cdot N(^{206}\text{Pb}) = M_{\text{ат}}(^{206}\text{Pb}) \cdot N_{\text{п}}(^{238}\text{U})$ , где  $N_{\text{п}}(^{238}\text{U})$  – количество распавшихся ядер  $^{238}\text{U}$  за время  $t$ , которые превратились в ядра  $^{206}\text{Pb}$ . Если первоначальное количество ядер  $^{238}\text{U}$  равнялось

$$N_0(^{238}\text{U}) = \frac{M(^{238}\text{U})}{M_{\text{ат}}(^{238}\text{U})},$$

то количество распавшихся ядер  $^{238}\text{U}$  за время  $t$  составит

$$N(^{238}\text{U}) = N_0(^{238}\text{U}) \cdot (1 - e^{-\lambda t}) = \frac{M(^{238}\text{U})}{M_{\text{ат}}(^{238}\text{U})} (1 - e^{-\lambda t}).$$

Получим

$$M(^{206}\text{Pb}) = M(^{238}\text{U}) \frac{M_{\text{ат}}(^{206}\text{Pb})}{M_{\text{ат}}(^{238}\text{U})} (1 - e^{-\lambda t});$$

$$M(^{206}\text{Pb}) = 1 \cdot \frac{206}{238} [1 - \exp(-1,5 \cdot 10^{-10} \cdot 2,5 \cdot 10^9)] = 0,27 \text{ кг}.$$

12. Активность некоторого радионуклида уменьшается в 2,5 раза за 7 суток. Найти его период полураспада. Ответ: 5,3 суток

13. Чем обусловлен широкий диапазон периодов альфа-распада атомных ядер?

Ответ: Широкий диапазон периодов полураспада, а также большие значения этих периодов для многих  $\alpha$ -радиоактивных ядер объясняются тем, что  $\alpha$ -частица не может «мгновенно» покинуть ядро, несмотря на то, что это энергетически выгодно. Для того чтобы покинуть ядро,  $\alpha$ -частица должна преодолеть потенциальный барьер – область на

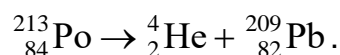
границе ядра, образующуюся за счёт потенциальной энергии электростатического отталкивания  $\alpha$ -частицы и конечного ядра и сил притяжения между нуклонами. С точки зрения классической физики  $\alpha$ -частица не может преодолеть потенциальный барьер, так как не имеет необходимой для этого кинетической энергии. Однако квантовая механика допускает такую возможность –  $\alpha$ -частица имеет определённую вероятность пройти сквозь потенциальный барьер и покинуть ядро. Это квантовомеханическое явление называют «туннельным эффектом» или «туннелированием». Чем больше высота и ширина барьера, тем меньше вероятность туннелирования, а период полураспада соответственно больше. Большой диапазон периодов полураспада  $\alpha$ -излучателей объясняется различным сочетанием кинетических энергий  $\alpha$ -частиц и высот потенциальных барьеров. Если бы барьера не существовало, то  $\alpha$ -частица покинула бы ядро за характерное ядерное время  $\approx 10^{-21} - 10^{-23}$  с.

14. Покоящееся ядро  $^{213}\text{Po}$  испустило  $\alpha$ -частицу с кинетической энергией  $T_\alpha = 8,34$  МэВ.

При этом дочернее ядро оказалось непосредственно в основном состоянии. Найти полную энергию  $Q_\alpha$ , освобождаемую в этом процессе. Какую долю этой энергии составляет кинетическая энергия дочернего ядра?

**Решение.**

Запишем схему  $\alpha$ -распада ядра  $^{213}\text{Po}$ :



Поскольку высвобождаемая энергия  $Q_\alpha$  выделяется в виде кинетической энергии продуктов распада, то при распаде покоящегося ядра  $^{213}\text{Po}$ :  $Q_\alpha = T_\alpha + T_\text{я}$ , закон сохранения импульса:  $\vec{P}_\alpha + \vec{P}_\text{я} = 0$ ,  $P_\alpha = P_\text{я}$ , т.к. исходное ядро покоится. Поскольку  $T_\alpha \ll m_\alpha$ , а следовательно, и  $T_\text{я} \ll m_\text{я}$ , то можно использовать классическую связь между кинетической энергией и импульсом:

$T = \frac{P^2}{2m}$ . В этом случае  $T_\text{я} = T_\alpha \frac{m_\alpha}{M_\text{я}}$ . Энергия альфа-распада:

$Q_\alpha = T_\alpha \frac{m_\alpha + M_\text{я}}{M_\text{я}} = 8,34 \frac{4 + 209}{209} \cong 8,5$  МэВ. Доля кинетической энергии  $T_\text{я}$  ядра  $^{213}\text{Po}$  от

полной энергии  $Q_\alpha$ , высвобождаемой при  $\alpha$ -распаде ядра  $^{213}\text{Po}$ , составит

$$\frac{T_\text{я}}{Q_\alpha} = T_\alpha \frac{m_\alpha}{M_\text{я}} : T_\alpha \frac{m_\alpha + M_\text{я}}{M_\text{я}} = \frac{m_\alpha}{m_\alpha + M_\text{я}} = \frac{4}{4 + 209} \cong 0,02.$$

15. Возможен ли  $\alpha$ -распад полония  $^{210}\text{Po}$  и железа  $^{56}\text{Fe}$ ? (Ответ: да, нет)
16. Определить энергию, выделяющуюся при  $\alpha$ -распаде  $^{239}\text{Pu}$  в течение одной секунды. Количество плутония  $^{239}\text{Pu}$  составляет один грамм. Энергия распада 5,14 МэВ. Ответ:  $1,19 \cdot 10^{10}$  МэВ
17. Почему энергетический спектр электронов в бета-распаде непрерывный? Ответ: Объяснение непрерывного характера  $\beta$ -спектра было дано В. Паули, который высказал гипотезу, что при  $\beta$ -распаде вместе с электроном рождается ещё одна частица с маленькой массой, т.е.  $\beta$ -распад – трехчастичный процесс. В конечном состоянии образуется ядро  $(A, Z \pm 1)$ , электрон и лёгкая нейтральная частица – нейтрино (антинейтрино). Т.к. масса ядра  $(A, Z \pm 1)$  гораздо больше масс электрона и нейтрино, энергия  $\beta$ -распада уносится лёгкими частицами. Распределение энергии  $\beta$ -распада  $Q_\beta$  между электроном и этой нейтральной частицей приводит к непрерывному  $\beta$ -спектру электрона.
18. Вычислить суммарную кинетическую энергию частиц, возникающих при  $\beta$ -распаде покоящегося нейтрона.  
Решение. Распад свободного (изолированного от действия ядерных сил) нейтрона происходит по схеме  $n \rightarrow p^+ + \beta^- + \bar{\nu}$ . Энергия  $Q_\beta$ , высвобождаемая при  $\beta$ -распаде нейтрона, выделяется в виде кинетической энергии образовавшихся частиц:  

$$Q_\beta = T = m_n - m_p - m_e - m_\nu = m_n - m_p - m_e =$$

$$= 939,57 - 938,28 - 0,511 = 0,78 \text{ МэВ},$$
 , т.к.  $m_\nu < 18 \text{ эВ}$  и ей можно пренебречь.
19. Энергии связи ядер  $^{114}_{48}\text{Cd}$ ,  $^{114}_{49}\text{In}$  и  $^{114}_{50}\text{Sn}$  равны соответственно 972,63 МэВ, 970,42 МэВ и 971,61 МэВ. Определить возможные виды  $\beta$ -распада ядра  $^{114}_{49}\text{In}$ . (Ответ: все виды  $\beta$ -распада возможны)
20. Для  $\gamma$ -переходов ядра  $^{60}_{28}\text{Ni}$  с энергиями около 1 МэВ оценить отношение радиуса ядра к приведенной длине волны.  
Решение. Приведенная длина волны  $\gamma$ -кванта равна  $\lambda = \frac{\hbar c}{E_\gamma} \approx \frac{200 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}}{1 \text{ МэВ}} = 200 \text{ Фм}$ ,
- $$R(^{60}\text{Ni}) = (1,0 \div 1,1) A^{1/3} \text{ Фм} \approx 4 \text{ Фм}, \quad \frac{R}{\lambda} \approx 0,02.$$
21. Определить энергию  $\gamma$ -кванта и кинетическую энергию отдачи ядра при излучении  $\gamma$ -кванта ядром  $^{12}\text{C}$ , находящимся в первом возбужденном состоянии  $2^+$  с энергией  $E = 4,43 \text{ МэВ}$ .  
Решение. Речь идет о распаде,  $^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$ , где верхний индекс \* отмечает возбужденное ядро. Пренебрегая энергией связи ядра  $^{12}\text{C}$  получаем

$$T(^{12}\text{C}) \approx \frac{E^2}{2M(^{12}\text{C})c^2} \approx \frac{(4,43\text{МэВ})^2}{2(6 \cdot 938,3 + 6 \cdot 939,6)\text{МэВ}} =$$

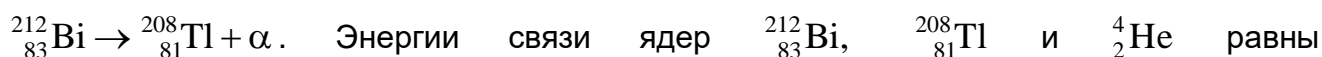
$$= 0,87 \cdot 10^{-3} \text{МэВ} = 0,87 \text{кэВ}.$$

$$E_\gamma = E - T(^{12}\text{C}) \approx 4,43 \text{МэВ} - 0,00087 \text{МэВ}.$$

22. Какие законы сохранения выполняются в бета-распаде атомных ядер?

Ответ: Наряду с законами сохранения энергии, импульса, момента количества движения в процессе  $\beta$ -распада выполняются законы сохранения барионного  $B$  и электронного лептонного  $L_e$  квантовых чисел.

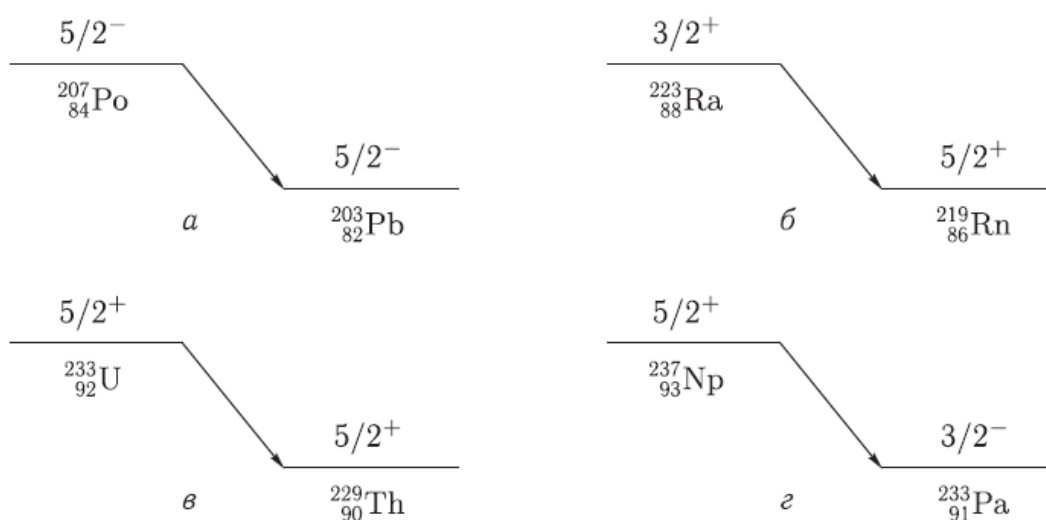
23. Определить кинетические энергии  $\alpha$ -частицы и конечного ядра при  $\alpha$ -распаде



$$E_{\text{св}}(^{212}_{83}\text{Bi}) = 1654,37 \text{МэВ}, \quad E_{\text{св}}(^{208}_{81}\text{Tl}) = 1632,28 \text{МэВ} \quad \text{и} \quad E_{\text{св}}(^4_2\text{He}) = 28,30 \text{МэВ}.$$

(Ответ: 6,09 МэВ; 0,12 МэВ)

24. При использовании законов сохранения момента количества движения и четности определить орбитальный момент  $l$ , уносимый  $\alpha$ -частицей в следующих распадах:



Ответ: а) 0, 2, 4; б) 2, 4; в) 0, 2, 4; г) 1, 3

25. Какие типы бета-распада вы знаете? Ответ: существуют три типа  $\beta$ -распада:  $\beta^-$ -распад,  $\beta^+$ -распад и  $e$ -захват:

$$\beta^- : (A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e,$$

$$\beta^+ : (A, Z) \rightarrow (A, Z - 1) + e^+ + \nu_e,$$

$$e : (A, Z) + e^- \rightarrow (A, Z - 1) + \nu_e.$$

26. Главной особенностью  $\beta$ -распада является то, что он обусловлен слабым взаимодействием.

27. Запишите закон сохранения момента количества движения и четности в гамма-переходах в атомных ядрах. Ответ: Гамма-переходы происходят между ядерными состояниями, характеризующимися определенными значениями энергии, спина  $J$  и четности  $P$ . Поэтому  $\gamma$ -переходы между ними, а следовательно, и испускаемые (поглощаемые) фотоны также имеют определенные значения полного момента  $J_\gamma$  и четности  $P_\gamma$ . Из закона сохранения полного момента количества движения и четности следует  $\vec{J}_f = \vec{J}_i + \vec{J}_\gamma$  или по правилу треугольника  $|J_i - J_\gamma| \leq J_f \leq J_i + J_\gamma$ ,  $P_f = P_i P_\gamma$  или  $P_\gamma = P_i P_f$ .

28. Определить тип и мультипольность гамма-перехода  $1^- \rightarrow 0^+$  Ответ: E1

29. Определить тип и мультипольность гамма-перехода  $0^- \rightarrow 0^+$  Ответ: переход невозможен

30. Определить тип и мультипольность гамма-перехода  $2^+ \rightarrow 3^-$  Ответ: E1, M2, E3, M4, E5