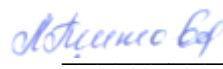


МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ФГБОУ ВО «ВГУ»)

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
ядерной физики

 / Титова Л.В./  
26.06.2024г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.В.12 Теория переноса излучений**

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

14.04.02 Ядерные физика и технологии

**2. Профиль подготовки/специализация:**

Физика атомного ядра и частиц

**3. Квалификация выпускника: магистр**

**4. Форма обучения: очная**

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

кафедра ядерной физики

**6. Составители программы:**

к.ф.м.н., доцент Долгополов Михаил Анатольевич

**7. Рекомендована:**

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №6 от 26.06.2024

**8. Учебный год: 2024/2025**

**Семестр(ы): 2**

## 9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

- ознакомление студентов с основными закономерностями распространения заряженных частиц, фотонов и нейтронов в различных средах, изучение методов расчета характеристик взаимодействия, приобретение умений выполнять расчеты характеристик прохождения ионизирующих излучений в веществе.

Задачи учебной дисциплины:

- изучить фундаментальные понятия, базовые модели, принципы и математические методы теории переноса излучений, а также границы их применимости
- научиться выделять конкретное «физическое» содержание в прикладных задачах переноса излучений, проводить анализ полученных результатов, ставить и решать конкретные задачи переноса излучений
- овладеть методами расчета характеристик потоков частиц в веществе как аналитическими, так и численными, с приложениями к решению типовых задач по переносу излучений

## 10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина входит в вариативную часть цикла Б1.В (Часть, формируемая участниками образовательных отношений).

## 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
ПК-1	Способен к созданию теоретических и математических моделей, описывающих конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие излучения с веществом.	ПК-1.1	Знает основные модели процессов в области физики атомного ядра, конденсированного состояния вещества и взаимодействия излучений с веществом.	Знать: основы теории переноса излучений  Уметь: использовать основные законы теории переноса излучений для составления математического описания объекта моделирования;  Владеть: самостоятельно выполнять теоретические расчеты при решении научных и исследовательских задач с использованием современных методов; выбирать адекватные конкретной задаче методы описания и расчета характеристик взаимодействия излучений с веществом.
		ПК-1.2	Составляет математические модели ядерно-физических процессов.	
		ПК-1.3	Осуществляет теоретическое моделирование ядерно-физических систем и процессов.	
ПК-4	Способен использовать фундаментальные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, конденсированного состояния	ПК-4.1	Знает фундаментальные понятия, базовые модели, принципы и математические методы теории переноса излучений, а также границы их применимости.	Знать: основы теории переноса излучений  Уметь: использовать основные законы теории переноса излучений для составления математического описания объекта моделирования;  Владеть: самостоятельно выполнять теоретические расчеты при решении научных и исследовательских задач с использованием современных методов; выбирать адекватные
		ПК-4.2	Выделяет	

	вещества, экологии в объеме, достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза реальных идей		конкретное «физическое» содержание в прикладных задачах переноса излучений, проводить анализ полученных результатов, ставить и решать конкретные задачи переноса излучений.	конкретной задаче методы описания и расчета характеристик взаимодействия излучений с веществом.
		ПК-4.3	Знает основные закономерности процессов генерации, распространения нейтронов, а также взаимодействия нейтронов с атомными ядрами.	
		ПК-4.4	Рассчитывает характеристики генерации, распространения нейтронов, а также взаимодействия нейтронов с атомными ядрами.	
ПК-7	Способен оценивать риск и определять меры безопасности для ядерных установок и технологий, составлять и анализировать сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать методы уменьшения риска их возникновения.	ПКВ-7.4	Знает основы диффузии нейтронов, пространственного распределения замедляющихся нейтронов.	Знать: основы теории переноса излучений  Уметь: использовать основные законы теории переноса излучений для составления математического описания объекта моделирования;  Владеть: самостоятельно выполнять теоретические расчеты при решении научных и исследовательских задач с использованием современных методов; выбирать адекватные конкретной задаче методы описания и расчета характеристик взаимодействия излучений с веществом.
ПК-7.6	Владеет методами расчета нейтронных полей с целью уменьшения риска возникновения аварийных ситуаций.			

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

**Форма промежуточной аттестации - зачет**

**13. Трудоемкость по видам учебной работы**

Вид учебной работы	Трудоемкость		
	Всего	По семестрам	
		1 семестр	2 семестр
Аудиторные занятия	84		

в том числе:	лекции	32	14	18
	практические	52	14	38
	лабораторные			
Самостоятельная работа		96	62	34
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации		Зачет		Зачет
Итого:		180	90	90

### 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	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	Активность радионуклида. Постоянная распада и период полураспада. Поточковые и токовые характеристики поля излучений и единицы их измерения. Понятие элементарной сферы. Флюенс частиц. Плотность тока частиц вдоль заданного направления. Дважды дифференциальные по углам и энергии сечения рассеяния. Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.	-
1.2	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.	Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера. Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом. Классификация нейтронов по энергиям. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов. Кинематика рассеяния нейтронов. Макроскопические сечения поглощения и деления.	-
1.3	Уравнение переноса.	Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия. Уравнение переноса для плоской, цилиндрической и сферической геометрии. Свойства уравнения переноса. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).	-
1.4	Аналитические методы решения уравнения переноса.	Элементарная теория диффузии. $N P$ - разложение. Транспортное сечение и сечение поглощения. Коэффициент и длина диффузии. Закон Фика. Функция влияния точечного источника. Сферический и цилиндрический поверхностные источники. Пределы применимости диффузной теории.	-
1.5	Особенности описания переноса нейтронов.	Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение. Приближение непрерывного замедления. Летаргия, плотность замедления и возраст. Теория возраста.	-

		Уравнение возраста. Условие применимости возрастной теории. Метод последовательных столкновений. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений. Плотности потоков одно- и двухкратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.	
1.6	Алгоритмы статистического моделирования переноса заряженных частиц.	Метод «укрупненных соударений». Многократное кулоновское рассеяние. Распределение Мольер и Гаудсмита-Саундерсона. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь. Каскады частиц. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга	-
1.7	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма излучения.	Взаимодействие фотонов с веществом. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Спектрально-угловые характеристики вторичных фотонов и электронов (позитронов).	-

### 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	Дифференциальные и интегральные характеристики излучений.	4	7		13		24
2	Элементарные акты взаимодействия излучений с веществом.	4	7		13		24
3	Уравнение переноса.	4	7		14		25
4	Аналитические методы решения уравнения переноса.	5	7		14		26
5	Особенности описания переноса нейтронов.	5	8		14		27
6	Алгоритмы статистического моделирования переноса заряженных частиц.	5	8		14		27
7	Алгоритмы статистического моделирования переноса гамма излучения.	5	8		14		27
	Итого:	32	52		96		180

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

учебно-методические пособия по организации самостоятельной работы, контрольные задания и тесты в бумажном и электронном вариантах, тестирующие системы, дистанционные формы общения с преподавателем. Контроль самостоятельной работы реализуется с помощью опросов, тестов, вопросов по темам заданий и т.д.

### 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	Черняев А.П. Ионизирующие излучения : учебное пособие / А. П. Черняев; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Физический факультет. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: КДУ, 2014. — 314 с.: ил. — Библиогр.: с. 311-313. — ISBN 978-5-906226-65-5.
2	А.П. Черняев. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. М.: Физматлит, 2004.
3	Юрасова Т.И. Основы радиационной безопасности: Учебное пособие. Изд.: АТиСО, 2008 г., 156 стр.
4	Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения): учебник. Изд.: ФИЗМАЛИТ, 2004, 443 стр.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
5	Кирсанова З.В. Радиоактивность: открытие, виды радиоактивности, основные закономерности и количественные характеристики: Учебное пособие. Изд.: Издательство МГОУ, 2006 г., С.42
6	Петров Ю.Ф., Рубин А.Б., Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения: Учебник для вузов. Изд.: ФИЗМАЛИТ, 2008 г., 184 стр.
7	Черняев А.П. Ионизирующие излучения : учебное пособие / А. П. Черняев; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (МГУ), Физический факультет. — 3-е изд., испр. и доп. — Москва: КДУ, 2014. — 314 с.: ил. — Библиогр.: с. 311-313. — ISBN 978-5-906226-65-5.
8	Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения): учебник. Изд.: ФИЗМАЛИТ, 2004, 443 стр
9	Кирсанова З.В. Радиоактивность: открытие, виды радиоактивности, основные закономерности и количественные характеристики: Учебное пособие. Изд.: Издательство МГОУ, 2006 г., С.42

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

№ п/п	Ресурс
1.	<a href="http://www.lib.vsu.ru">www.lib.vsu.ru</a> – ЗНБ ВГУ.
2.	<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:

Учебная аудитория для проведения занятий семинарского типа, текущего контроля и промежуточной аттестации г. Воронеж, площадь Университетская, дом 1, ауд. 506П	Специализированная мебель, учебный стенд для изучения основ программирования цифровых процессоров, учебный стенд для изучения моделирования экспериментальных сигналов и их обработки в реальном масштабе времени с помощью микроконтроллеров, учебный стенд для моделирования цифровой обработки сигналов в измерительных системах физического эксперимента, учебный стенд для изучения автоматизации измерений с помощью ЭВМ и программно-управляемых модульных систем, учебный стенд для изучения цифровой регистрация событий, измерения амплитудных и временных распределений, интерфейсов передачи данных в ЭВМ, учебный стенд для изучения основ компьютерной томографии, учебный стенд для изучения много-параметрических и корреляционных измерений в ядерной физике на базе МК. РС IBM
г. Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.1, ауд. 507П	Аудитория для самостоятельной работы. 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.	Тема 1-7	ПК-1	ПК-1.1 ПК-1.2 ПК-1.3	Контрольная работа
2.	Тема 1-7	ПК-4	ПК-4.1 ПК-4.2 ПК-4.3 ПК-4.4	Контрольная работа
3	Тема 1-7	ПК-7	ПК-7.4 ПК-7.6	Контрольная работа
Промежуточная аттестация форма контроля - зачет				Пункт 20.2.1 Вопросы к зачету

## 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:

Собеседование, контрольная работа

### Перечень тем контрольной работы.

1. Основные элементарные процессы взаимодействия гамма-квантов с веществом.
2. Закономерности, определяющие перенос электронов и позитронов в веществе.
3. Основные процессы взаимодействия нейтронов с веществом и их закономерности.
4. Уравнение переноса в различных системах координат (декартовой, сферической, цилиндрической).
5. Кинетическое уравнение Больцмана и граничные условия.
6. Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение.

#### Перечень тем, выносимых на собеседование.

1. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера.
2. Закон Фика. Функция влияния точечного источника.
3. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов.
4. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь.
5. Уравнение возраста. Условие применимости возрастной теории.

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Обучающийся демонстрирует полное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, свободно оперирует приобретенными знаниями, умениями, применяет их при решении практических задач	<i>Повышенный уровень</i>	<i>Зачтено</i>
Обучающийся демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, но допускает незначительные ошибки, неточности, испытывает затруднения при решении практических задач	<i>Базовый уровень</i>	
Обучающийся демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, допускает значительные ошибки при решении практических задач	<i>Пороговый уровень</i>	
Обучающийся демонстрирует явное несоответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям	–	<i>Незачтено</i>

#### 20.2 Промежуточная аттестация

Промежуточная аттестация по дисциплине осуществляется с помощью следующих оценочных средств:

Собеседование по билетам к зачету

---

##### 20.2.1. Перечень вопросов к зачету:

1. Активность радионуклида.
2. Постоянная распада и период полураспада.
3. Поточковые и токовые характеристики поля излучений и единицы их измерения.
4. Понятие элементарной сферы.



5. Флюенс частиц.
6. Плотность тока частиц вдоль заданного направления.
7. Дважды дифференциальные по углам и энергии сечения рассеяния.
8. Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.
9. Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом.
10. Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера.
11. Взаимодействие фотонов с веществом.
12. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар. Взаимодействие нейтронов с веществом.
13. Классификация нейтронов по энергиям.
14. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов.
15. Кинематика рассеяния нейтронов.
16. Макроскопические сечения поглощения и деления.
17. Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия.
18. Уравнение переноса для плоской, цилиндрической и сферической геометрии. Свойства уравнения переноса.
19. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).
20. Элементарная теория диффузии.  $N$   $P$  - разложение. Транспортное сечение и сечение поглощения.
21. Коэффициент и длина диффузии.
22. Закон Фика. Функция влияния точечного источника.
23. Сферический и цилиндрический поверхностные источники.
24. Пределы применимости диффузной теории.
25. Теория замедления. Уравнение для плотности столкновения и его решение.
26. Приближение непрерывного замедления. Летаргия, плотность замедления и возраст.
27. Теория возраста.
28. Уравнение возраста.
29. Условие применимости возрастной теории.
30. Метод последовательных столкновений.
31. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений.
32. Плотности потоков одно- и двукратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.

33. Метод «укрупненных соударений».
34. Многократное кулоновское рассеяние.
35. Распределение Мольера и Гаудсмита-Саундерсона.
36. Флуктуации ионизационных и радиационных потерь.
37. Каскады частиц.
38. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга
39. Фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование электронно-позитронных пар.
40. Спектрально-угловые характеристики вторичных фотонов и электронов (позитронов).

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Обучающийся демонстрирует полное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, свободно оперирует приобретенными знаниями, умениями, применяет их при решении практических задач	<i>Повышенный уровень</i>	<i>Зачтено</i>
Обучающийся демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, но допускает незначительные ошибки, неточности, испытывает затруднения при решении практических задач	<i>Базовый уровень</i>	
Обучающийся демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям, допускает значительные ошибки при решении практических задач	<i>Пороговый уровень</i>	
Обучающийся демонстрирует явное несоответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателям	–	<i>Незачтено</i>

Промежуточная аттестация проводится в соответствии с Положением о промежуточной аттестации обучающихся по программам высшего образования.

#### ПК-1

Способен к созданию теоретических и математических моделей, описывающих конденсированное состояние вещества, распространение и взаимодействие излучения с веществом

#### Перечень заданий для проверки сформированности компетенции:

1. Основным эффектом, определяющим распространение гамма квантов в свинце при энергии  $<100$  кэВ является
  - a. Комптоновское рассеяние
  - b. Упругое рассеяние
  - c. Фотопоглощение
  - d. Рождение пар

2. Замедление нейтронов до тепловых энергий может происходить за счет ... взаимодействия с ядрами
  - a. Упругого потенциального
  - b. Неупругого
  - c. Резонансного
  - d. Всех вышеперечисленных
3. Основным эффектом, определяющим распространение гамма квантов в воде при энергии  $>1$  МэВ является
  - e. Комptonовское рассеяние
  - f. Упругое рассеяние
  - g. Фотопоглощение
  - h. Рождение пар
4. Упругое рассеяние нейтронов на ядрах вещества является в общем случае
  - a. Симметричным, не зависящим от атомной массы
  - b. Несимметричным, не зависящим от атомной массы
  - c. Симметричным, но зависящим от атомной массы
  - d. Несимметричным, зависящим от атомной массы
5. Какие эффекты определяют распространение легких заряженных частиц (электронов, позитронов и т.д.) в веществе?
  - a. Рассеяние в поле атомного ядра и электронов оболочки атома
  - b. Потери на возбуждение атомов среды.
  - c. Потери на ионизацию атомов среды.
  - d. Множественное кулоновское рассеяние и ионизационные потери.
6. Как зависит сечение фотопоглощения от атомного номера  $Z$ ?
  - a. Пропорционально  $Z$ .
  - b. Пропорционально  $Z^{4,5}$ .
  - c. Пропорционально  $Z^2$ .
  - d. Пропорционально  $Z^3$ .
7. Как связаны величины длины диффузии нейтронов  $L$  и среднего смещения нейтрона от точки рождения  $R$ ?
  - a.  $L=R$
  - b.  $L=0.5R$
  - c.  $L^2=\frac{1}{6}R^2$
  - d.  $L^2=\frac{1}{3}R^2$
8. Как связаны величины квадрата длины замедления (возраста) нейтронов  $t$  и среднего смещения нейтрона от точки рождения  $R$ ?
  - a.  $t=R$
  - b.  $t=\frac{1}{6}R^2$
  - c.  $t=0.5R$
  - d.  $t=\frac{1}{3}R^2$
9. Плотность тока нейтронов – это
  - a. Сумма числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях, перпендикулярных поверхности, за единицу времени

- b. Разность числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях за единицу времени
  - c. Сумма числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях за единицу времени
  - d. Разность числа нейтронов, проходящих через поверхность единичной площади, в двух противоположных направлениях, перпендикулярных поверхности, за единицу времени
10. Плотность потока частиц определяет
- a. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени.
  - b. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени в определенном направлении.
  - c. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади за единицу времени и имеющих определенную энергию.
  - d. Количество частиц, проходящих через поверхность единичной площади.
11. Какой формулой описываются средние потери энергии заряженной частицы на единице длины пути в веществе?
- a. Формулой Резерфорда
  - b. Формулой Комптона
  - c. Формулой Бете-Блоха
  - d. Формулой Мольера
12. Макроскопическое сечение взаимодействия частиц с веществом – это
- a. Полное сечение взаимодействия частицы с ядром
  - b. Сечение взаимодействия со всеми ядрами в веществе.
  - c. Среднее количество взаимодействий с атомными ядрами на единице длины пути в веществе.
  - d. Среднее количество взаимодействий с атомными ядрами за единицу времени.
13. Что называют пиком Брэгга при распространении тяжелых заряженных частиц в веществе?
- a. Форму угловой зависимости при многократном упругом рассеянии.
  - b. Форму угловой зависимости при многократном неупругом рассеянии.
  - c. Резкий рост радиационных потерь
  - d. Резкое возрастание ионизационных потерь в конце пробега частиц.
14. Что содержит наиболее полную информацию о стационарном поле излучения?
- a. Плотность потока частиц
  - b. Угловая зависимость плотности потока частиц
  - c. Энергетическая зависимость плотности потока частиц.
  - d. Энергетически-угловая плотность потока частиц
15. Почему средний угол отклонения от первоначального направления для тяжелых заряженных частиц много меньше, чем у легких, при одинаковых пробегах?
- a. Легкие заряженные частицы сильнее взаимодействуют с атомами.
  - b. Тяжелые заряженные частицы сильнее взаимодействуют с атомами.
  - c. Отклонение тяжелых заряженных частиц мало в силу законов сохранения импульса и энергии.

- d. Отклонение легких заряженных частиц велико в силу большей вероятности ионизации.

### ПК-3

Способен к созданию теоретических и математических моделей, описывающих физику кинетических явлений или процессы в реакторах, ускорителях

### ПК-4

Способен использовать фундаментальные законы в области физики атомного ядра и частиц, ядерных реакторов, конденсированного состояния вещества, экологии в объеме, достаточном для самостоятельного комбинирования и синтеза реальных идей

#### Перечень заданий для проверки сформированности компетенции:

1. Направляющий вектор  $\Omega$  обычно выражают в сферической системе координат. Считая эти координаты заданными, выразить  $\Omega$  в декартовой системе и цилиндрической системах координат. Ответ  $\Omega = \sin\theta \cos\psi \cdot i + \sin\theta \sin\psi \cdot j + \cos\theta \cdot k$ .
2. Пусть в заданной точке пространства  $r$  угловая плотность потока частиц изотропна, т.е. описывается выражением  $\phi(r, \Omega) = F(r)/4\pi$ . Определить: а) плотность потока в положительную полусферу направлений (вперед); б) проекцию угловой плотности тока на направление, задаваемое единичным вектором  $k$ ; в) интегральную плотность тока. Ответ а)  $\phi(r) = F(r)/2$ ; б)  $(k, \Omega) = \cos\theta$ ; в)  $J = \int \phi(r, \Omega) \cdot k \, d\Omega = F(r) \int \cos\theta \, d\Omega = 0$ .
3. Найти угловую плотность потока частиц в произвольной точке над плоским изотропным источником, испускающим  $\nu$  част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Ответ:  $\nu/(4\pi\mu)$ ,  $\mu > 0$ ;  $0, \mu < 0$
4. Изотропный поверхностный источник, испускающий  $\nu$  част./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ , равномерно покрывает поверхность полусферы радиусом  $R$ . Предполагая отсутствие поглощения внутри сферы, найти плотности потока и тока частиц в центре сферы. Ответ  $\phi = \nu/2$ ;  $J = \nu/4$ .
5. Точечный изотропный источник  $\gamma$ -излучения, испускающий  $3,7 \cdot 10^{10}$  частиц/с, находится в непоглощающей и нерассеивающей среде на расстоянии 100 см от облучаемого образца из алюминия объемом 0,1 см<sup>3</sup>. Определить сечение некогерентного рассеяния фотонов на электронах, если в единицу времени в образце рассеивается  $1,5 \cdot 10^4$  фотонов. Ответ  $0,65 \cdot 10^{-24} \text{см}^2$ .
6. Определить максимально возможную энергию фотонов после комптоновского рассеяния на угол  $\theta = 180^\circ$ . Ответ  $E_{\text{max}} = 0,255 \text{ МэВ}$ .
7. Рассчитать полное микроскопическое сечение взаимодействия гамма-излучения для этилового спирта C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, имеющего плотность 0,79 г/см<sup>3</sup>, для энергии 0,08 МэВ. Ответ  $0,139 \text{ см}^{-1}$
8. Вычислить степень анизотропии углового распределения фотонов при комптоновском рассеянии для начальных энергий, равных 0,01; 0,1 и 10,0 МэВ, понимая под этим отношение вероятностей рассеяния на углы  $\theta$ , равные  $0^\circ$  и  $180^\circ$ . Ответ 1,24; 2,02; 83,0.
9. Найти связь между углами упругого рассеяния нейтронов на ядре водорода в лабораторной системе координат  $\theta_S$  и в системе центра инерции  $\theta_c$ . Ответ  $\cos \theta_S = \cos \theta_c/2$ .
10. Пусть нейтрон испытывает неупругое рассеяние на первом уровне возбуждения <sup>56</sup>Fe ( $Q = -0,845 \text{ МэВ}$ ). Определить: а) при какой минимальной начальной энергии возможно это рассеяние; б) при какой минимальной начальной энергии возможно рассеяние на углы  $\theta_S$ , равные  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Ответ а) 0,860 МэВ; б) 0,8602 МэВ; 0,8603 МэВ.
11. Покажите, что средние потери энергии при изотропном упругом рассеянии на ядре массой  $A$  равны  $\Delta E = 2E_0 A / (A + 1)^2$

12. Получить решение уравнения элементарной теории диффузии в бесконечной однородной среде для точечного и плоского изотропных источников единичной мощности. Ответ  $\varphi(r) = \frac{1}{4\pi B} \frac{\exp(-r/L)}{r}$ ,  $\varphi(|z|) = \frac{1}{2\Sigma_0 L} \exp(-|z|/L)$ .
13. В приближении элементарной теории диффузии найти критический размер шара из  $^{235}\text{U}$ . Считать, что нейтроны, рождающиеся при делении, имеют одну энергию, которая не изменяется в процессе диффузии. При расчетах принять  $\Sigma_a = 0,357 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Sigma_s = 0,393 \text{ см}^{-1}$ ;  $\Sigma_f = 0,193 \text{ см}^{-1}$ ;  $\nu = 2,46$ . Ответ 6,52 см;
14. Получить решение уравнения возраста для плоского моноэнергетического источника единичной поверхностной мощности в бесконечной однородной среде. Ответ  $q(z, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\tau}} \exp\left(-\frac{z^2}{4\tau}\right)$
15. Коллимированный пучок фотонов нормально падает на полубесконечную среду, в которой излучение испытывает изотропное рассеяние без изменения энергии. В приближении однократного рассеяния определить зависимость обратного выхода излучения от расстояния  $r$  до точки падения излучения на среду при условии, что  $r \gg 1/\mu$ . Ответ  $f(r) \exp(-\Sigma r)$ .