

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

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой  
ядерной физики

*Людмила Борисовна Титова* / Титова Л.В./  
13.06.2024г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
**Б1.В.ДВ.03.02 Перенос излучений**

**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:**

к.ф.-м.н. доц., Долгополов Михаил Анатольевич

**7. Рекомендована:**

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

**8. Учебный год:** 2027/2028

**Семестр(ы):** 7

## **9. Цели и задачи учебной дисциплины**

*Целями освоения учебной дисциплины являются:*

- формирование у студентов на основе знаний о взаимодействии различных видов излучения с веществом представлений о методах расчета характеристик переноса ионизирующего и нейтронного излучения в различных гомогенных и гетерогенных средах.

*Задачи учебной дисциплины:*

- ознакомление с основными положениями теории переноса, принципами составления уравнений и пределы их применимости, основными методами решения уравнений переноса.
- приобретение умений применять различные подходы к решению уравнений переноса, анализировать определяющие перенос факторы;
- владение элементарными навыками решения инженерных задач переноса излучения.

## **10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:**

Дисциплина относится к вариативной частиц цикла Б1.В.ДВ. (Дисциплины по выбору).

## **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 использовать научно-техническую информацию, отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования, современные компьютерные технологии и информационные ресурсы в своей предметной области.	ПК-1.2 ПК-1.3	Использует основные способы анализа состояния научно-технической проблемы путем подбора.  Проводит изучение и анализ литературных и патентных источников по тематике исследований	Знать: фундаментальные понятия и представления методов вторичного квантования для Бозе- и Ферми-частиц, а также границы их применимости;  Уметь: выделить конкретное «физическое» содержание в задачах описания характеристик различных систем тождественных Бозе- и Ферми-частиц, ставить и решать конкретные задачи по описанию систем различных элементарных частиц с включением лептонов, нуклонов, кварков, гамма-квантов и мезонов;  Владеть: базовыми формализмами квантовой теории поля, используемых в современных теориях сверхтекучести жидкого гелия и сверхпроводимости металлов, а также в теориях бесконечных и конечных Ферми-систем, базирующихся на представлениях Общей физики, Высшей математики, Информатики, Математической статистики, Классической и Квантовой механики, Электродинамики с приложениями к решению типовых задач по описанию характеристик систем многих частиц.

## **12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час —4/144.**

**Форма промежуточной аттестации – экзамен.**

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость		
	Всего	По семестрам	
		7 семестр	
Аудиторные занятия	36	36	
в том числе:	лекции	36	36
	практические		
	лабораторные		
Самостоятельная работа	72	72	
в том числе: курсовая работа (проект)			
Контроль	36	36	
Форма промежуточной аттестации	Экзамен	Экзамен	
Итого:	144	144	

#### 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	Основные понятия и определения взаимодействия ионизирующих излучений с веществом	Активность радионуклида. Постоянная распада и период полураспада. Потоковые 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.	-
1.2	Дозиметрия ионизирующих излучений.	Ионизационные и радиационные потери, формула Бете-Гайтлера. Взаимодействие нейтронов с веществом.	-
1.3	Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Ионизационные потери. Потери энергии при упругих столкновениях	. Классификация нейтронов по энергиям. Стадии протекания ядерных реакций с участием нейтронов. Кинематика рассеяния нейтронов. Макроскопические сечения поглощения и деления.	-
1.4	Особенности взаимодействия электронов и позитронов с веществом. Упругое и неупругое рассеяние, аннигиляция, многократное рассеяние	Взаимодействие фотонов с веществом. Образование электронно-позитронных пар.	-
1.5	Пробег частиц в веществе. Флуктуации пробегов. Флуктуации ионизационных потерь.	Макроскопическое сечение взаимодействия (линейный коэффициент ослабления), длина свободного пробега, слой половинного ослабления.	-
1.6	Элементарные акты взаимодействия фотонов с атомами: упругое и	Фотоэффект, комптоновское рассеяние, Взаимодействие электронов и других заряженных частиц с веществом	-

	неупругое рассеяние, фотопоглощение, комптоновское рассеяние, рождение пар. Многократное рассеяние		
1.7	Радиационные потери энергии заряженных частиц. Соотношение ионизационных и радиационных потерь	Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса (кинетическое уравнение Больцмана). Граничные условия. Уравнение переноса для плоской, цилиндрической и сферической геометрии	-
1.8	Понятие о каскадных процессах и методах их анализа.	. Свойства уравнения переноса. Интегральная форма уравнения переноса (уравнение Пайерлса).	
1.9	Кинематика взаимодействия частиц,	Элементарная теория диффузии. Н Р - 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.	-
1.10	Пик Брэгга и его практическое применение. Понятие о канализации.	Флуктуации ионизационных и радиационных потерь. Каскады частиц. Особенности потерь энергии тяжелых заряженных частиц в веществе. Пик Брэгга	-
1.11	Методы расчета характеристик взаимодействия. Метод решения уравнений переноса.	Метод последовательных столкновений. Представление плотности полного потока частиц в методе последовательных столкновений. Плотности потоков одно- и двухкратно рассеянных частиц в односкоростном приближении.	-
1.12	Метод укрупнённых соударений для описания характеристик взаимодействия электронов с веществом	Метод «укрупненных соударений». Многократное кулоновское рассеяние. Распределение Мольер и Гаудсмита-Саундерсона.	-
1.13	Метод Монте-Карло для решения задачи переноса гамма-излучения. Особенности метода для каскадных процессов.	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.	-

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

№ п/ п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)					
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Контр оль	Всего
1	Основные понятия и определения взаимодействия ионизирующих излучения с веществом	2			4	2	8
2	Дозиметрия ионизирующих излучений.	2			4	2	8
3	Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Ионизационные потери. Потери энергии при упругих столкновениях	2			4	2	8
4	Особенности взаимодействия электронов и позитронов с веществом. Упругое и неупругое рассеяние, аннигиляция, многократное рассеяние	2			4	2	8
5	Пробег частиц в веществе. Флуктуации пробегов. Флуктуации ионизационных потерь.	2			4	2	8
6	Элементарные акты взаимодействия фотонов с атомами: упругое и неупругое рассеяние, фотопоглощение, комптоновское рассеяние, рождение пар. Многократное рассеяние	2			4	2	8

7	Радиационные потери энергии заряженных частиц. Соотношение ионизационных и радиационных потерь	2			4	2	8
8	Понятие о каскадных процессах и методах их анализа.	4			8	4	16
9	Кинематика взаимодействия частиц,	4			8	4	16
10	Пик Брэгга и его практическое применение. Понятие о канализации.	4			8	4	16
11	Методы расчета характеристик взаимодействия. Метод решения уравнений переноса.	4			8	4	16
12	Метод укрупнённых соударений для описания характеристик взаимодействия электронов с веществом	4			8	4	16
13	Метод Монте-Карло для решения задачи переноса гамма-излучения. Особенности метода для каскадных процессов.	2			4	2	8
	Итого:	36			72	36	144

#### **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	Тарасенко Ю. Н. Ионизационные методы дозиметрии высокоинтенсивного ионизирующего излучения/ Ю. Н. Тарасенко.– М.: Техносфера, 2013.– 264 с. // «Университетская библиотека online: электронно-библиотечная система.– URL: <a href="http://biblioclub.ru">http://biblioclub.ru</a> »
2	Давыдов, А. С. Квантовая механика : [учебное пособие для студентов ун-тов и техн. вузов] / А.С. Давыдов .— 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2011 .— 703 с.
3	Байков Ю. А. Квантовая механика: учебное пособие/Байков Ю. А. , Кузнецов В. М.– М.: БИНом. Лаборатория знаний, 2015.– 294 с.
4	Ефремов Ю. С. Квантовая механика: учебное пособие/ Ю. С. Ефремов. – М., Берлин: Директ-Медиа, 2015.– 457 с.
5	Кондратенко С. Г. Физические основы измерений характеристик ионизирующих излучений: конспект лекций/ С. Г. Кондратенко.– М.: АСМС, 2011.– 41 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
6	К.Н.Мухин «экспериментальная ядерная физика» С.-Петербург, М.,Краснодар. Лань, 2012
7	Мухин К.Н. Экспериментальная ядерная физика: учебник: в 3 т. / К.Н. Мухин.— Санкт-Петербург; Москва ; Краснодар : Лань, 2009.
8	В.Б.Бруданин и др. “Альфа распад. Взаимодействие альфа-излучения с веществом”. Воронеж, ВГУ ИПЦ, 2012,39с.
9	А.П.Черняев “Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом ”. М.Физматлит., 2004,151 с.
10	О.И.Лейпунский. “Распространение гамма-квантов в веществе”. М.Гос. издательство физ-мат. литературы,1960 - 207с..
11	В.Ф.Баранов “Дозиметрия электронного излучения”. М.Атомиздат, 1974 г.209с.
12	В.А.Астапенко "Взаимодействие излучения с атомами и наночастицами" Долгопрудный ,Интеллект, 2010, 492с..

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

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

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

№ п/п	Источник
1	Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов направления 14.03.02. Ядерные 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 лекционного типа, текущего контроля и промежуточной аттестации Специализированная мебель, ноутбук ASUS VIVOBOOK X507-EJ057, проектор BenQ MP515 ST, переносной экран для проектора на штативе SceenMedia Apollo-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> )	г.Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.1, ауд. 343
Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования Ноутбук ASUS VIVOBOOK X507-EJ057, проектор BenQ MP515 ST, переносной экран для проектора на штативе SceenMedia Apollo-T	г.Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.1, ауд. 31
Аудитория для самостоятельной работы, компьютерный класс с доступом к сети «Интернет»: компьютеры (мониторы, системные блоки) (15 шт.)	г. Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.1, ауд. 313а

## **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.	Основные понятия и определения взаимодействия ионизирующих излучения с веществом	ПК-1	ПК-1.2 ПК-1.3	Устный опрос, собеседование по билетам к экзамену
2.	Дозиметрия ионизирующих излучений.			
3.	Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Ионизационные потери. Потери энергии при упругих столкновениях			
4.	Особенности взаимодействия электронов и позитронов с	ПК-1	ПК-1.2 ПК-1.3	Устный опрос, собеседование по билетам к экзамену

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
	веществом. Упругое и неупругое рассеяние, аннигиляция, многократное рассеяние			
5.	Пробег частиц в веществе. Флуктуации пробегов. Флуктуации ионизационных потерь.			
6.	Элементарные акты взаимодействия фотонов с атомами: упругое и неупругое рассеяние, фотопоглощение, комптоновское рассеяние, рождение пар. Многократное рассеяние			
7.	Радиационные потери энергии заряженных частиц. Соотношение ионизационных и радиационных потерь			
8.	Понятие о каскадных процессах и методах их анализа.			
9.	Кинематика взаимодействия частиц,			
10.	Пик Брэгга и его практическое применение. Понятие о канализации.			
11.	Методы расчета характеристик взаимодействия. Метод решения уравнений переноса.			
12.	Метод укрупнённых соударений для описания характеристик взаимодействия электронов с веществом			
13.	Метод Монте-Карло для решения задачи переноса гамма-излучения.	ПК-1	ПК-1.2 ПК-1.3	Устный опрос, собеседование по билетам к экзамену

№ п/п	Наименование раздела дисциплины (модуля)	Компетенция(и)	Индикатор(ы) достижения компетенции	Оценочные средства
	Особенности метода для каскадных процессов.			
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:

Устный опрос

---

Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при промежуточной аттестации

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Полное знание учебно-программного материала на уровне количественной характеристики. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	Повышенный уровень	Отлично
Знание основного программного материала на основе качественной характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	Базовый уровень	Хорошо
Знание основного программного материала на основе качественной характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность скорректировать ответ под руководством преподавателя.	Пороговый уровень	Удовлетворительно
Не знание основного программного материала. Неспособность скорректировать ответ под руководством преподавателя.	–	Неудовлетворительно

### 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. Характеристики частиц в веществе: плотность, поток, ток, флюенс и др.
2. Некогерентное (комптоновское) рассеяние. Формула Клейна-Нишины-Тамма и пределы ее применимости.
3. Основные дозиметрические характеристики.
4. Рождение пар гамма-квантами.
5. Рассеяние заряженных частиц на атомах. Основные закономерности.
6. Соотношение различных эффектов взаимодействия гамма-квантов в зависимости от их энергии.
7. Тормозное излучение и его закономерности.
8. Каскадные процессы при переносе гамма-квантов в веществе
9. Соотношение радиационных и ионизационных потерь в различных областях энергий частиц.
10. Каскадные процессы при переносе электронов в веществе.
11. Теоретическое описание ионизационных потерь тяжелых заряженных частиц. Формула Бете-Блоха. Пик Брэгга.
12. Расчет характеристик взаимодействия гамма-излучения с веществом путем решения уравнения переноса.
13. Флуктуации пробега тяжелых заряженных частиц (страгглинг).
14. Метод статистических испытаний для расчета характеристик взаимодействия гамма-квантов с веществом
15. Влияние многократного рассеяния на пробег тяжелых заряженных частиц.
16. Метод «укрупненных» соударений для расчета характеристик взаимодействия электронов с веществом. «Мольеровский» слой.
17. Многократное рассеяние электронов на атомах. Теория и распределение Мольер.
18. Особенности расчета ионизационных потерь тяжелых заряженных частиц в веществе.
19. Флуктуации ионизационных потерь электронов.
20. Кинематика взаимодействия частиц.
21. Элементарные эффекты взаимодействия гамма-квантов с веществом.
22. Моделирование каскадных процессов в веществе.
23. Основные закономерности когерентного (упругого) рассеяния гамма-квантов. Понятие форм-фактора.
24. Аннигиляция позитронов в веществе.
25. Основные закономерности фотоэффекта.
26. Основные закономерности когерентного (упругого) рассеяния гамма-квантов. Понятие форм-фактора.

Описание критериев и шкалы оценивания компетенций (результатов обучения) при промежуточной аттестации

Критерии оценивания компетенций	Уровень сформированности компетенций	Шкала оценок
Полное знание учебно-программного материала на уровне количественной характеристики. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	Повышенный уровень	Отлично
Знание основного программного материала на основе качественной характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность самостоятельно ответить на дополнительные корректирующие вопросы преподавателя.	Базовый уровень	Хорошо

Знание основного программного материала на основе качественной характеристики, допускающее погрешности в ответах. Способность скорректировать ответ под руководством преподавателя.	<i>Пороговый уровень</i>	Удовлетворительно
Не знание основного программного материала. Неспособность скорректировать ответ под руководством преподавателя.	–	Неудовлетворительно