

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой
ядерной физики



/ Титова Л.В./
20.06.2025г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ
Б1.В.ДВ.03.02 Ядерные реакции**

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:

д.ф.м.н., профессор Кадменский Станислав Георгиевич

7. Рекомендована:

Научно – методическим советом физического факультета, протокол №5 от 20.06.2025г.

8. Учебный год: 2025/2026

Семестр(ы): 2

9. Цели и задачи учебной дисциплины

Целями освоения учебной дисциплины являются:

- ознакомление студентов с основными подходами, используемыми при описании различных типов ядерных реакций.

Задачи учебной дисциплины:

- изучение основных особенностей математических моделей, используемых для описания ядерных реакций: оптическая модель, испарительная модель, многочастичная теория ядерных реакций, многоступенчатые прямые статистические реакции, теория открытых Ферми-систем;
- приобретение умений эффективно применять вышеуказанные знания для решения фундаментальных и прикладных задач ядерной физики; использовать математический формализм теории ядерных реакций; владеть техникой расчета свойств атомных ядер в рамках основных моделей ядра.

-

10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:

Дисциплина относится к вариативной части 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-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.	ПК-4.5	Имеет представление о современных подходах к описанию ядерных реакций; фундаментальные законы теории ядерных реакций.	Знать: современные подходы к описанию ядерных реакций; фундаментальные законы теории ядерных реакций; Уметь: самостоятельно выполнять теоретические расчеты при решении научных и исследовательских задач с использованием современных методов; выбирать адекватные конкретной задаче методы описания и расчета ядерных реакций
		ПК-4.6	Выполняет теоретические расчеты при решении научных и исследовательских задач с использованием современных методов теории ядерных реакций.	

12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час — 2/72.

Форма промежуточной аттестации – зачет с оценкой

13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы		Трудоемкость	
		Всего	По семестрам
			2 семестр
Аудиторные занятия		36	
в том числе:	лекции	18	18
	практические		
	лабораторные	18	18
Самостоятельная работа		36	36
в том числе: курсовая работа (проект)			
Форма промежуточной аттестации		Зачет с оценкой	Зачет с оценкой
Итого:		72	72

13.1. Содержание дисциплины

п/п	Наименование раздела дисциплины	Содержание раздела дисциплины	Реализация раздела дисциплины с помощью онлайн-курса, ЭУМК *
1. Лекции			
1.1	Многочастичная Тматричная теория ядерных реакций	Потенциальное рассеяние на сферическом потенциале. Уравнение Шредингера и граничные условия. Фазы рассеяния. S-матрица для упругого рассеяния. Свойства S-матрицы. Унитарность. Условие обращения времени. Аналитические свойства S-матрицы в комплексной плоскости К. Полюса в верхней комплексной полуплоскости и вязанные состояния. Сечения упругого рассеяния в окрестности полюсов. Полюса в нижней комплексной полуплоскости. Виртуальные полюса и сечение вблизи виртуальных полюсов, (квазистационарные полюса и сечения) общее выражение для Sматрицы потенциального рассеяния в комплексной плоскости. Траектории полюсов. Многочастичная Т-матричная теория ядерных реакций. Уравнение Липпмана-Швингера для Тматрицы. Связь Т- и S- матриц. Вероятность перехода в единицу времени. Сечение ядерных реакций и Т-матрица. Оптическая теорема. Перераспределение потенциалов.	-

1.2	R-матричная теория ядерных реакций.	Внешняя и внутренние области реакций. Радиус Вигнера-Айзенбуда. Каналовые функции для открытых каналов реакции. Волновая функция системы во внешней области. Полный базис резонансных волновых функций системы и волновая функция системы во внутренней области. Сшивка внешней и внутренней функций системы на радиусе канала. Выражение Сматрицы через R- матрицу. Получение формул для сечений упругого рассеяния и ядерных реакций в R-матричной теории. Характеристики резонансного состояния - парциальные ширины и энергетический сдвиг. Приближение случайных фаз Бете. Случай сильно-перекрывающихся резонансов.	-
1.3	Оптическая модель ядерных реакций.	Усреднение сечения реакций и усредненная S- матрица. Нейтронные резонансы и нейтронная силовая функция. Модель "черного" ядра. Оптическая модель и комплексный оптический потенциал. Оптическая теорема. Описание сечений упругого рассеяния и реакции через оптический потенциал. Оптическая модель для альфа-частиц и произвольных составных частиц.	-
1.4	Теория статистических ядерных реакций	Энергетическая плотность и энтропия возбужденных состояний атомного ядра в	-
		статистической модели. Составное ядра и испарительная модель ядерных реакций. Метод Хаузера-Фешбаха для описания равновесных статистических ядерных реакций, протекающих через образования составного ядра.	
1.5	Прямые ядерные реакции	Реакции срыва и подхвата с участием дейтронов, как пример прямых ядерных реакций. Теория Батлера поверхностных ядерных реакций. Метод искаженных волн для описания одноступенчатых прямых ядерных реакций.	-
1.6	Многоступенчатые прямые и статистические ядерные реакции.	Уравнения Липпмана-Швингера для T-матрицы и теория многоступенчатых прямых ядерных реакций. Предравновесные ядерные реакции, как пример многоступенчатых статистических реакций. Метод Пригожина для описания многоступенчатых статистических ядерных реакций. Мастер-уравнения и ширины распада предравновесных состояний.	-
1.7	Ядерные реакции в приближении высоких энергий.	Приближение высоких энергий. Метод Глаубера. Расчет сечений ядерных реакций и рассеяния нуклонов и составных частиц на ядрах через амплитуды нуклон-нуклонного рассеяния.	-

13.2. Темы (разделы) дисциплины и виды занятий

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (количество часов)				
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	Всего
1	Многочастичная Тматричная теория ядерных реакций	2		2	5	9
2	R-матричная теория ядерных реакций.	2		2	5	9
3	Оптическая модель ядерных реакций.	3		3	5	11
4	Теория статистических ядерных реакций	3		3	5	11
5	Прямые ядерные реакции	3		3	6	12
6	Многоступенчатые прямые и статистические ядерные реакции.	3		3	5	11
7	Ядерные реакции в приближении высоких энергий.	2		2	5	9
	Итого:	18		18	36	72

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	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.(60 шт.)
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	Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика : учебник : [в 3 т.] / К.Н. Мухин .— Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2009- .— (Классическая учебная литература по физике / ред. совет: Ж.И. Алферов (пред.) [и др.]) .— Т.2: Физика ядерных реакций .— Изд. 7-е, стер. — 2009 .— 318 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
4	Сивухин Д.В. Общий курс физики: в 5 т. / Д.В. Сивухин. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002.— Т.5: Атомная и ядерная физика.— 2002.— 782 с.
5	Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика : учеб. для вузов : в 2 кн. / К.Н. Мухин .— 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1993.
6	Гольдбергер М. Теория столкновений / М. Гольдбергер, К. Ватсон. — М. : Мир, 1967.
7	Ситенко А. Г. Лекции по теории рассеяния : [Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов] / А.Г. Ситенко .— Киев : Вища школа, 1971 .— 259,[1] с
8	Ландау Л.Д. Квантовая механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М. : Наука, 2001.
9	Вильдермут К. Единая теория ядра / К. Вильдермут, Я. Тан. — М. : Мир, 1980.
10	Лейн А. Теория ядерных реакций при низких энергиях / А. Лейн, Р. Томас. — М. : изд.-во и иностр. лит. 1960.
11	Ситенко А.Г. Лекции по теории ядра : Учебное пособие для вузов / А.Г. Ситенко, В.К. Тартаковский .— М. : Атомиздат, 1972 .— 351 с
12	Ситенко А. Г. Теория ядерных реакций : Учебное пособие для физ. спец. вузов / А.Г. Ситенко .— М. : Энергоатомиздат, 1983 .— 135,[1] с.
13	Алейников, Алексей Николаевич. Теория атомного ядра [Электронный ресурс] : учебное пособие по курсу "Атомная физика" / А.Н. Алейников, В.А. Работкин, Д.Е. Любашевский ; Междунар. ин-т компьютер. технологий, Энергет. фак. — Электрон. текстовые дан. — Воронеж, 2013 .— Загл. с титул. экрана .— Свободный доступ из интрасети ВГУ .— Текстовый файл .— Windows 2000; Adobe Acrobat Reader .— <URL:http://www.lib.vsu.ru/elib/texts/method/vsu/m13-220.pdf>.

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

№ п/п	Ресурс
14	www.lib.vsu.ru — ЗНБ ВГУ.
	https://edu.vsu.ru — 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	Мухин К. Н. Экспериментальная ядерная физика : учеб. для вузов : в 2 кн. / К.Н. Мухин .— 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 1993.
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	Ландау Л.Д. Квантовая механика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. — М. : Наука, 2001.

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 - 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 ASUS VIVOBOK X507-EJ057, проектор BenQ MP515 ST, переносной экран для проектора на штативе SceenMedia Apllo-T Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019 LibreOffice (бесплатное и/или свободное ПО (лицензия: https://www.libreoffice.org/aboutus/licenses/) Adobe Reader (бесплатное и/или свободное ПО (лицензия: https://get.adobe.com/ru/reader/legal/licenses)
Помещение для хранения и профилактического обслуживания учебного оборудования г.Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.І, ауд. 31	Ноутбук ASUS VIVOBOK X507-EJ057, проектор BenQ MP515 ST, переносной экран для проектора на штативе SceenMedia Apllo-T Microsoft Windows 7, Windows 10 договор 3010-15/207-19 от 30.04.2019 LibreOffice (бесплатное и/или свободное ПО (лицензия: https://www.libreoffice.org/aboutus/licenses/) Adobe Reader (бесплатное и/или свободное ПО (лицензия: https://get.adobe.com/ru/reader/legal/licenses)
Аудитория для самостоятельной работы, компьютерный класс с доступом к сети «Интернет»: компьютеры (мониторы, системные блоки) (15 шт.)	г. Воронеж, площадь Университетская, д.1, пом.І, 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.	Темы 1-7	ПК-4	ПК-4.5 ПК-4.6	Контрольные работы, лабораторные работы, коллоквиум, собеседование
Промежуточная аттестация форма контроля – зачёт с оценкой				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:

Контрольные работы, лабораторные работы, коллоквиум

Отлично	Полный ответ на вопросы билета и дополнительные вопросы. Верное решение задачи билета.
Хорошо	Для полного ответа требуются наводящие вопросы. Неполные ответы на дополнительные вопросы. Неполное решение задачи билета.
Удовлетворительно	Неполный ответ на вопросы билета. Неполные ответы на дополнительные вопросы. Общий объем продемонстрированных знаний при этом не менее 75%. Решение задачи билета с ошибками.
Неудовлетворительно	Неправильный ответ на вопросы билета. Неполные ответы на дополнительные вопросы. Общий объем продемонстрированных знаний при этом менее 75%. Отсутствие решенной задачи билета.

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:

Потенциальное рассеяние на сферическом потенциале.

1. Уравнение Шредингера и граничные условия. Фазы рассеяния. S-матрица для упругого рассеяния.
2. Свойства S-матрицы. Унитарность. Условие обращения времени. Аналитические свойства S-матрицы в комплексной плоскости K.
3. Полюса в верхней комплексной полуплоскости и связанные состояния. Сечения упругого рассеяния в окрестности полюсов.
4. Полюса в нижней комплексной полуплоскости. Виртуальные полюса и сечение вблизи виртуальных полюсов, (квазистационарные полюса и сечения) общее выражение для S-матрицы потенциального рассеяния в комплексной плоскости.
5. Траектории полюсов. Многочастичная T-матричная теория ядерных реакций.
6. Уравнение Липпмана - Швингера для T-матрицы.
7. Связь T- и S- матриц. Вероятность перехода в единицу времени.
8. Сечение ядерных реакций и T-матрица. Оптическая теорема.
9. Перераспределение потенциалов.
10. Внешняя и внутренние области реакций. Радиус Вигнера-Айзенбуда.
11. Каналовые функции для открытых каналов реакции.
12. Волновая функция системы во внешней области. Полный базис резонансных волновых функций системы и волновая функция системы во внутренней области.
13. Сшивка внешней и внутренней функций системы на радиусе канала. Выражение S-матрицы через R- матрицу.
14. Получение формул для сечений упругого рассеяния и ядерных реакций в R-матричной теории.
15. Характеристики резонансного состояния - парциальные ширины и энергетический сдвиг. Приближение случайных фаз Бете.
16. Случай сильно-перекрывающихся резонансов. Усреднение сечения реакций и усредненная S- матрица.
17. Нейтронные резонансы и нейтронная силовая функция. Модель "черного" ядра. Оптическая модель и комплексный оптический потенциал.
18. Оптическая теорема. Описание сечений упругого рассеяния и реакции через оптический потенциал.
19. Оптическая модель для альфа-частиц и произвольных составных частиц.
20. Энергетическая плотность и энтропия возбужденных состояний атомного ядра в статистической модели.
21. Составное ядра и испарительная модель ядерных реакций.
22. Метод Хаузера-Фешбаха для описания равновесных статистических ядерных реакций, протекающих через образования составного ядра.
23. Реакции срыва и подхвата с участием дейтронов, как пример прямых ядерных реакций.
24. Теория Батлера поверхностных ядерных реакций. Метод искаженных волн для описания одноступенчатых прямых ядерных реакций.
25. Уравнения Липпмана-Швингера для T-матрицы и теория многоступенчатых прямых ядерных реакций.
26. Предравновесные ядерные реакции, как пример многоступенчатых статистических реакций.
27. Метод Пригожина для описания многоступенчатых статистических ядерных реакций.
28. Мастер-уравнения и ширины распада предравновесных состояний. Приближение высоких энергий. Метод Глаубера.
29. Расчет сечений ядерных реакций и рассеяния нуклонов и составных частиц на ядрах через амплитуды нуклон-нуклонного рассеяния.

30.

Отлично	Полный ответ на вопросы билета и дополнительные вопросы. Верное решение задачи билета.
Хорошо	Для полного ответа требуются наводящие вопросы. Неполные ответы на дополнительные вопросы. Неполное решение задачи билета.
Удовлетворительно	Неполный ответ на вопросы билета Неполные ответы на дополнительные вопросы. Общий объем продемонстрированных знаний при этом не менее 75%. Решение задачи билета с ошибками.
Неудовлетворительно	Неправильный ответ на вопросы билета Неполные ответы на дополнительные вопросы. Общий объем продемонстрированных знаний при этом менее 75%. Отсутствие решенной задачи билета.

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