

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

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
теоретической физики  
наименование кафедры, отвечающей за реализацию дисциплины

 (Фролов М.В.)  
подпись, расшифровка подписи

. .2023 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Б1.В.ДВ.06.02 – Фотопроцессы в лазерном поле

*Код и наименование дисциплины в соответствии с учебным планом*

1. Код и наименование направления подготовки/специальности:

03.03.02 – физика

2. Профиль подготовки/специализация: Физика лазерных и спектральных технологий

3. Квалификация выпускника: бакалавр

4. Форма обучения: очная (дневная)

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины: 0802 – теоретической физики

6. Составители программы Мармо Сергей Иванович

ФИО

д.ф.-м.н.

доцент

ученая степень

ученое звание

7. Рекомендована: НМС физического факультета от 25.05.2023 г. протокол № 5  
(наименование recommending structure, date, protocol number)

8. Учебный год: 2026- 2027

Семестр(ы)/Триместр(ы): 8

**9. Цели и задачи учебной дисциплины:** Целью курса является формирование у студентов ясной картины о теории элементарных атомных фотопроцессов в лазерном поле и методах их теоретического описания. В ходе изучения дисциплины студент должен овладеть элементарной теорией атомных фотопроцессов, в части их применения к задачам о взаимодействии атомных систем с лазерным излучением.

**10. Место учебной дисциплины в структуре ООП:** Входит в раздел дисциплин по выбору Б1.В.ДВ. Для освоения спецкурса необходимы знания по курсам квантовой механики и электродинамики.

**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	Способность анализировать существующие технические решения для реализации параметров разрабатываемых лазерных устройств	ПК-1.1	Способность демонстрировать глубокие современные знания в области технологий приборов квантовой электроники и фотоники на основе наногетероструктур	Знать: основные положения теории взаимодействия атомных систем с электромагнитным излучением  Уметь: использовать в профессиональной деятельности знания о методах исследования воздействия электромагнитной волны на атомы, применять полученные знания для решения профессиональных задач;
		ПК-1.2	Способность критически оценивать и интерпретировать новейшие достижения теории и практики физических исследований для решения задач в области лазерных технологий	Владеть: навыками практических расчетов атомных восприимчивостей и сечений фотопроцессов
		ПК-1.3	Умение осуществлять поиск лазеров с близкими характеристиками в литературе и в других современных источниках информации согласно составленному плану, определять по результатам анализа литературных данных и других источников информации конструкции и технологии изготовления разрабатываемых лазерных устройств	
ПК-2	Способность участвовать в разработке технологических маршрутов при изготовлении	ПК-2.1	Знание основных методов физических исследований в области лазерных технологий	Знать: современные технологии и методы физических исследований фотопроцессов применительно к разработке новых устройств в предметной области;

новых моделей приборов квантовой электроники	ПК-2.2	Владение умениями в области разработки технологических маршрутов при изготовлении новых моделей приборов квантовой электроники	Уметь: применять концепции и методы физики фотопроцессов к решению задач физики лазерных систем.
	ПК-2.3	Умение анализировать возможности реализации расчетных параметров в различных вариантах конструкции разрабатываемых лазерных устройств	Владеть: навыками работы на исследовательском и технологическом оборудовании, применяемом при создании и исследовании параметров приборов на основе принципов лазерной физики.

**12. Объем дисциплины в зачетных единицах/час.** (в соответствии с учебным планом) — 3 / 108.

**Форма промежуточной аттестации**(зачет/экзамен) зачет с оценкой

### 13. Трудоемкость по видам учебной работы

Вид учебной работы	Трудоемкость			
	Всего	По семестрам		
		8		...
Аудиторные занятия	72	72		
в том числе:	Лекции	36	36	
	практические			
	лабораторные	36	36	
Самостоятельная работа	36	36		
в том числе: курсовая работа (проект)				
Форма промежуточной аттестации (экзамен – __ час.)	Зачет, с оценкой	Зачет, с оценкой		
Итого:	108	108		

#### 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	Нерелятивистская теория атома водорода	Спектр и волновые функции водорода и водородоподобных ионов. Решение кулоновского уравнения Шредингера в сферических и параболических координатах.	-
1.2	Взаимодействие атома с электромагнитным полем	Теория возмущений по полю электромагнитной волны. Формы оператора взаимодействия электрона с полем.	-
1.3	Однофотонные процессы в атоме водорода	Однофотонное поглощение и однофотонная ионизация. Формулы Гордона.	-
1.4	Кулоновская функция Грина	Мультипольное разложение функции Грина. Представления радиальной функции Грина: спектральное разложение, интегральные представления, штурмовское разложение. Функция Грина в параболических координатах.	-

1.5	Аналитический расчет двухфотонных процессов	Поляризуемость атома водорода. Двухфотонная ионизация. Двухфотонные формулы Гордона.	-
1.6	Методы численных расчетов многофотонных процессов	Многофотонные процессы при частотах, превышающих порог ионизации. Исследование сходимости штурмовских рядов и их аналитическое продолжение на область положительных энергий.	-
1.7	Радиационные переходы в непрерывном спектре кулоновского потенциала	Кулоновское тормозное излучение: классическая и квантовая теории. Формула Зоммерфельда и ее предельные случаи.	-
1.8	Двухфотонные и многофотонные переходы в кулоновском континууме	Двухфотонное тормозное излучение и поглощение. Поправки к резерфордскому рассеянию. Борновское приближение для многофотонных процессов.	-
<b>2. Практические занятия</b> <b>3. Лабораторные занятия</b>			
3.1	Нерелятивистская теория атома водорода	Свойства вырожденной гипергеометрической функции.	-
3.2	Взаимодействие атома с электромагнитным полем	Эквивалентность разных форм операторов взаимодействия электрона с электромагнитным полем.	-
3.3	Однофотонные процессы в атоме водорода	Расчет амплитуд однофотонных $ n\rangle \rightarrow  n'\rangle$ и $ n\rangle \rightarrow  E'\rangle$ переходов.	-
3.4	Кулоновская функция Грина	Разложение радиальной кулоновской функции Грина по функциям Штурма	-
3.5	Аналитический расчет двухфотонных процессов	Расчет амплитуд двухфотонных $ n\rangle \rightarrow  n'\rangle$ и $ n\rangle \rightarrow  E'\rangle$ переходов.	-
3.6	Методы численных расчетов многофотонных процессов	Методы численных расчетов функций Аппеля $F_2$ .	-
3.7	Радиационные переходы в непрерывном спектре кулоновского потенциала	Расчет амплитуд однофотонных и двухфотонных $ E\rangle \rightarrow  E'\rangle$ переходов	-
3.8	Двухфотонные и многофотонные переходы в кулоновском континууме	Аналитический расчет двойного тормозного излучения в кулоновском поле.	-

\* заполняется, если отдельные разделы дисциплины изучаются с помощью онлайн-курса. В колонке Примечание необходимо указать название онлайн-курса или ЭУМК. В других случаях в ячейки ставятся прочерки.

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

№ п/п	Наименование темы (раздела) дисциплины	Виды занятий (часов)				Всего
		Лекции	Практические	Лабораторные	Самостоятельная работа	
8 семестр						
1	Нерелятивистская теория атома водорода	2		2	2	6
2	Взаимодействие атома с электромагнитным полем	2		2	2	6
3	Однофотонные процессы в атоме водорода	6		6	6	18
4	Кулоновская функция Грина	6		6	6	18
5	Аналитический расчет двухфотонных процессов	6		6	6	18
6	Методы численных расчетов многофотонных процессов	4		4	4	12
7	Радиационные переходы в непрерывном спектре кулоновского потенциала	4		4	4	12
8	Двухфотонные и многофотонные переходы в кулоновском континууме	6		6	6	18

Итого:	36	36	36	108
--------	----	----	----	-----

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

(рекомендации обучающимся по освоению дисциплины: указание наиболее сложных разделов, работа с конспектами лекций, презентационным материалом, рекомендации по выполнению курсовой работы, по организации самостоятельной работы по дисциплине и др.)

Необходимо после каждой лекции по ее теме разбирать и осваивать лекционный материал, для его лучшего понимания читать рекомендованную основную и дополнительную литературу, готовиться к практическому занятию, разбирая соответствующий теоретический материал, систематически выполнять домашние задания, не пропускать текущие тестирования по пройденному теоретическому и практическому материалу.

#### 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	Ландау Л.Д. Теоретическая физика т.3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц - М.: Физматлит, 2016. – 800 с.

б) дополнительная литература:

№ п/п	Источник
2	Ландау Л.Д. Теоретическая физика т.4: Квантовая электродинамика / В. Б. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – М.: Физматлит, 2006. – 719 с.
3	Киселев В.В. Квантовая механика: курс лекций / В.В.Киселев.— М. : МЦНМО, 2009.— 560 с. <a href="https://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book_view&amp;book_id=62965">https://biblioclub.lib.vsu.ru/index.php?page=book_view&amp;book_id=62965</a>
4	Мармо С.И. Многофотонные переходы в кулоновском континууме: диссертация доктора физ.-мат. наук. Воронежск. гос. университет, Воронеж, 2006.
5	Запрягаев С. А. Теория многозарядных ионов с одним и двумя электронами / С. А. Запрягаев, Н. Л. Манаков, В. Г. Пальчиков. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 144 с.
6	Лабзовский Л. Н. Теория атома / Л. Н. Лабзовский. – М. : Наука, 1996. – 304 с.
7	Крыловецкий А. А. Обобщенные штурмовские разложения кулоновской функции Грина и двухфотонные формулы Гордона / А. А. Крыловецкий, Н. Л. Манаков, С. И Мармо. – ЖЭТФ. – 2001. – Т.119. – С. 45-70.
8	Крыловецкий А. А. Двухфотонные тормозные процессы в атомах: поляризационные эффекты и аналитические расчеты для кулоновского потенциала / А. А. Крыловецкий, Н. Л. Манаков, С. И Мармо. – ЖЭТФ. – 2002. – Т.122. – С. 1168-1197.

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

№ п/п	Ресурс
9	<a href="http://www.lib.vsu.ru/">http://www.lib.vsu.ru/</a>
10	<a href="https://biblioclub.lib.vsu.ru/">https://biblioclub.lib.vsu.ru/</a>
11	<a href="https://lanbook.lib.vsu.ru/">https://lanbook.lib.vsu.ru/</a>

\* Вначале указываются ЭБС, с которыми имеются договора у ВГУ, затем открытые электронно-образовательные ресурсы, онлайн-курсы, ЭУМК

#### 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	Копытин И.В. Квантовая теория. Курс лекций для вузов. Часть 1. 3-е издание / И.В.

	<i>Копытин, А.С. Корнев, Н.Л. Манаков // Воронеж. - Издательско-полиграфический центр ВГУ. - 2009. – 107 с.</i>
2	<i>Копытин И.В. Квантовая теория. Курс лекций для вузов. Часть 2. 3-е издание, исправленное и дополненное / И.В.Копытин, А.С.Корнев, Н.Л.Манаков, М.В.Фролов // Воронеж. - Издательско-полиграфический центр ВГУ. - 2013. – 76 с.</i>
3	<i>Копытин И.В. Квантовая теория. Курс лекций для вузов. Часть 3. 3-е издание / И.В. Копытин, А.С. Корнев, Н.Л. Манаков, М.В. Фролов // Воронеж. - Издательско-полиграфический центр ВГУ. - 2008. – 87 с.</i>

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

**18. Материально-техническое обеспечение дисциплины:**

Лекционная аудитория, доска, учебная литература, дисплейный класс.

**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.	Разделы 1.1 – 1.8	ПК-1	ПК – 1.1 ПК – 1.2 ПК – 1.3	Тестовые вопросы
2.	Разделы 3.1 – 3.8	ПК-2	ПК – 2.1 ПК – 2.2 ПК – 2.3	Тестовые вопросы
Промежуточная аттестация форма контроля – зачет				Список вопросов к зачету

**20. Типовые оценочные средства и методические материалы, определяющие процедуры оценивания**

**20.1. Текущий контроль успеваемости**

Тестовые вопросы

1. Классификация однофотонных процессов по типам начального и конечного состояний. Диаграммы процессов.
2. Классификация двухфотонных процессов по типам начального и конечного состояний. Диаграммы процессов.
3. Формы (калибровки) оператора взаимодействия электрона с электромагнитной волной. Связь дипольных матричных элементов первого порядка в представлении скорости и координаты.
4. Правило Ферми для сечений фотопроцессов. Сечение фотоионизации. Нормировка волновой функции непрерывного спектра. Устранение дельта-функции.
5. Сечение тормозного излучения. Какого типа функции атомного континуума следует использовать для начального и конечного состояний?



6. Кулоновские волновые функции дискретного спектра. Радиальная и угловая функции.
7. Радиальная кулоновская функция континуума с определенным орбитальным моментом.
8. Кулоновские волновые функции континуума с определенным импульсом и асимптотикой расходящихся (сходящихся) волн на бесконечности.
9. Вырожденная гипергеометрическая функция: степенной ряд, интегральное представление, преобразование Куммера, интеграл от степени, экспоненты и  ${}_1F_1$ .
10. Гипергеометрическая функция: степенной ряд, символ Похгаммера, интегральное представление.
11. Интеграл от трех сферических функций.
12. Матричные элементы от оператора  $\nabla$ .
13. Действие оператора  $\nabla$  на кулоновские функции.
14. Расчет радиальных матричных элементов связанно-связанных переходов в представлении скорости.
15. Мультипольное разложение функций  $\Psi^{(+)}_p(\mathbf{r})$  и  $\Psi^{(-)}_p(\mathbf{r})$ .

### Список вопросов для проведения зачета

*(наименование оценочного средства промежуточной аттестации)*

1. Спектр и волновые функции атома водорода (в сферических координатах).
2. Амплитуды и вероятности однофотонных переходов в одноэлектронном атоме.
3. Однофотонные формулы Гордона для возбуждения и ионизации атома водорода.
4. Мультипольное разложение кулоновских функций непрерывного спектра с асимптотикой расходящихся (сходящихся) волн.
5. Мультипольное разложение функции Грина частицы в центральном поле.
6. Разложение радиальной кулоновской функции Грина по функциям Штурма.
7. Штурмовское разложение радиальной кулоновской функции Грина со свободными параметрами.
8. Поляризуемость атома водорода.
9. Двухфотонные формулы Гордона для ионизации.
10. Многофотонные процессы в атоме водорода при частотах, превышающих порог ионизации.
11. Тормозное излучение в центральном поле: классическая теория.
12. Кулоновское тормозное излучение: классическая теория.
13. Кулоновское тормозное излучение высоких и низких частот: классическая теория.
14. Поляризация классического тормозного излучения.
15. Тормозное излучение в центральном поле: квантовая теория.
16. Формула Зоммерфельда для кулоновского тормозного излучения и ее предельные случаи.
17. Предельные случаи формула Зоммерфельда.
18. Кулоновское тормозное излучение в квазиклассической области.
19. Однофотонные переходы в континууме между состояниями с определенным орбитальным моментом.
20. Функция Грина в параболических координатах.
21. Амплитуда и сечение двухфотонного тормозного излучения в кулоновском поле.
22. Борновское приближение для многофотонных процессов.

## **Описание технологии проведения**

Экзамен проходит в устной форме. Студенту предлагается 2 вопроса из полного списка вопросов, на которые он должен дать развернутый ответ в течение одного академического часа. В случае, если студент имеет оценку «неудовлетворительно» по одной из контрольных работ текущей аттестации, ему также предлагается одна из задачи из соответствующей контрольной работы.

## **Требования к выполнению заданий, шкалы и критерии оценивания**

*«Отлично»: Подробные и безошибочные ответы на основные и дополнительные вопросы, полное понимание и свободное владение материалом, умение решать практические задачи*

*«Хорошо»: Подробные ответы на поставленные вопросы с мелкими ошибками, незначительные пробелы в знании материала, умение решать практические задачи*

*«Удовлетворительно»: Неудовлетворительные ответы на один из основных вопросов КИМа и некоторые дополнительные вопросы, неполное знание или понимание материала, низкие навыки решения практических задач*

*«Неудовлетворительно»: плохое знание материала, неудовлетворительные ответы на вопросы КИМа и большинство дополнительных вопросов, отсутствие навыков решения практических задач*