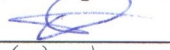


**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Кафедра теоретической физики

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета

  
(подпись)

И.С. Огнев

« 17 » мая 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Квантовая электродинамика»**

Направление подготовки  
03.04.02 Физика

Направленность (профиль)  
«Теоретическая физика»

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от «18» апреля 2022 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5 от « 11 » мая 2022 года

Ярославль

### 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Квантовая электродинамика» является изучение основ квантования взаимодействующих полей, техники вычисления вероятностей, сечений квантовых процессов и других измеряемых на опыте величин.

### 2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Дисциплина «Квантовая электродинамика» относится к части Блока Б1, формируемой участниками образовательных отношений.

Дисциплина «Квантовая электродинамика» — один из базовых курсов магистратуры направления Физика. Изложение данного курса необходимо для дальнейшего изучения теории единого электромагнитного и слабых взаимодействий в рамках модели Вайнберга-Салама-Глэшоу, а также квантовой хромодинамики.

Для освоения данной дисциплины студенты должны знать механику, квантовую теорию, электродинамику, владеть математическим аппаратом квантовой теории поля.

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП магистратуры

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>ПК-1</b> Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность по решению комплексных фундаментальных задач физики	<b>ИД-ПК-1_1</b> Знает теоретические методы проведения и анализа научных исследований	<b>Уметь:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• строить ряд теории возмущения по постоянной тонкой структуры с использованием теоремы Вика;</li><li>• вычислять вероятность процесса комптоновского рассеяния.</li></ul> <b>Владеть навыками:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• интегрирования по фазовому объему квантовых процессов;</li><li>• диаграммной техникой Фейнмана; вычисления сечения с использованием кинематических переменных Мандельштама.</li></ul>
	<b>ИД-ПК-1_2</b> Знает современные теории и модели физики	<b>Знать:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• представления операторов Шредингера, Гейзенберга и Дирака;</li><li>• лагранжиан электромагнитного взаимодействия заряженных частиц с различным спином;</li><li>• оператор эволюции и его связь с вероятностью квантовых переходов;</li></ul>

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• правила диаграммной техники Фейнмана.</li> </ul>
--	--	---

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	С е м ес т р	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			ле кц ии	пр ак ти че ск ие	ла бо ра то рн ые	ко нс ул ьт ац ии	ат те ст ац ио нн ые ис п ыт ан ия	сам осто ятел ьная раб ота	
1	Введение	1	4					4	Индивидуальные консультации
2	Оператор эволюции	1	6	1		1		16	Индивидуальные консультации
3	Вероятностная интерпретация S-матричных элементов	1	8	3		1		25	Индивидуальные консультации
4	Разложение в ряд по заряду электрона. Правила Фейнмана. Примеры	1	16	30		2		63	Индивидуальные консультации
						2	0,5	33,5	Экзамен
	<b>Всего</b>		<b>34</b>	<b>34</b>		<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>141,5</b>	

#### Содержание разделов дисциплины:

##### 1. Введение.

- 1.1. Лагранжиан взаимодействия электронов и фотонов в классической электродинамике. Классификация постоянных и однородных электромагнитных полей.
- 1.2. Представления Шредингера и Гейзенберга. Представление взаимодействия Дирака и его роль в построении теории возмущений.
2. **Оператор эволюции**
  - 2.1. Оператор эволюции. Эквивалентность представлений Гейзенберга и Дирака.
  - 2.2. Нахождение оператора эволюции в виде ряда по лагранжиану взаимодействия.
3. **Вероятностная интерпретация S-матричных элементов.**
  - 3.1. S-оператор. Вероятностная интерпретация матричного элемента.
  - 3.2. Вероятность распада одночастичного состояния. Сечение рассеяния в инвариантной форме.
  - 3.3. Фазовые объемы реакций с двумя и тремя частицами в конечном состоянии.
4. **Разложение в ряд по заряду электрона. Правила Фейнмана. Примеры**
  - 4.1. S-оператор в квантовой электродинамике. Теорема Вика.
  - 4.2. Разложение в ряд по заряду электрона. Четность ряда. Постоянная тонкой структуры. Нахождение матричного элемента комптоновского рассеяния в  $e^2$  приближении. Излучение быстро движущегося заряда.
  - 4.3. Правила Фейнмана и диаграммная техника. Вычисление сечения комптоновского рассеяния. Формула Томсона. Формула Клейна-Нишины.
  - 4.4. Переменные Мандельштама. Кроссинг симметрия.
5. **Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – это первая лекция по дисциплине. Она дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. На этой лекции рассказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой для ее освоения учебно-методической литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

6. **Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

#### **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

1. Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)

#### **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» (при необходимости), рекомендуемых для освоения дисциплины**

##### **а) основная литература**

1. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Т. IV. Квантовая электродинамика: Учеб. пособ.: для вузов. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 720 с.  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN5922100580.html>
2. Михеев Н.В. Методы вычислений электромагнитных и слабых процессов в квантовой теории поля (учебное пособие). Ярославль: ЯрГУ, 1998. 44 с.  
<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/19971702.pdf>

##### **б) дополнительная литература**

1. Боголюбов Н. Н. Квантовые поля: учебное пособие для вузов / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 384 с.  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922105804.html>
2. Вергелес С. Н. Теоретическая физика. Квантовая электродинамика: учебник для вузов. М: Издательство Юрайт, 2021. 262 с. <https://urait.ru/bcode/470996>
3. Биленький С.М. Введение в диаграммную технику Фейнмана. М.: Атомиздат, 1971. 215 с.  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=740950&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=740950&cat_cd=YARSU)

#### **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа и практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, хранящиеся на электронных носителях и обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие рабочим программам дисциплин.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации.

Число посадочных мест в лекционной аудитории больше либо равно списочному составу потока, а в аудитории для практических занятий (семинаров) – списочному составу группы обучающихся.

Автор:

Заведующий кафедры  
теоретической физики, к.ф.-м.н.

---

*должность, ученая степень*

А.Я. Пархоменко

---

*подпись*

---

*И.О. Фамилия*

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Квантовая электродинамика»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,  
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,  
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы,  
используемые в процессе текущей аттестации**

**Задания по теме №4 «Квантовая электродинамика»:**

Задания из учебного пособия Михеев Н.В. «Методы вычислений электромагнитных и слабых процессов в квантовой теории поля». – Ярославль: ЯрГУ, 1998.

**1.2 Список вопросов и (или) заданий для проведения итоговой аттестации**

**Список вопросов к экзамену:**

1. Лагранжиан взаимодействия электронов и фотонов в классической электродинамике.
2. Представления Шредингера и Гейзенберга. Представление взаимодействия Дирака. Эквивалентность представлений.
3. Оператор эволюции. Эквивалентность представлений Гейзенберга и Дирака.
4. Нахождение оператора эволюции в виде ряда по лагранжиану взаимодействия.
5. S-оператор. Вероятностная интерпретация матричного элемента.
6. Вероятность распада одночастичного состояния.
7. Сечение рассеяния в инвариантной форме.
8. Фазовые объемы реакций с двумя и тремя частицами в конечном состоянии.
9. Теорема Вика. Разложение в ряд по заряду электрона. Четность ряда. Постоянная тонкой структуры.
10. Нахождение матричного элемента комптоновского рассеяния в  $e^2$  приближении. Сечение рассеяния.
11. Правила Фейнмана и диаграммная техника.
12. Вычисление сечения комптоновского рассеяния. Формула Томсона. Формула Клейна-Нишины.
13. Переменные Мандельштама. Кроссинг симметрия.

**1.3 Правила выставления оценки на экзамене.**

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и

полное владение материалом; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует введенную терминологию.

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствуют указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагаются с использованием введенных терминов, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.



## **Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Квантовая электродинамика»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Дисциплина «Квантовая электродинамика» вырабатывает у студентов навыки постановки и аналитического решения сложных физических задач по курсу классической электродинамики, обеспечивает умение самостоятельно решать задачи и пользоваться справочной литературой по теоретической физике.

Широко практикуется индивидуальная методика решения задач, при которой студенты в большой степени самостоятельно решают задачи при индивидуальной помощи и комментариях преподавателя по ходу решения задачи каждым конкретным студентом с последующим обобщением результата и возможных методов его получения. Таким образом, на практических занятиях студенты приобретают навыки самостоятельных вычислений, анализа поставленной задачи и полученного результата.

Распределение времени для изучения данного курса лучше всего планировать, предусматривая регулярное повторение пройденного материала. Материал необходимо регулярно дополнять информацией, полученной из учебной литературы.

Для подготовки к практическим занятиям рекомендуется использовать литературу из прилагаемого списка основной и дополнительной литературы.

Важной частью самостоятельной работы студентов является подготовка к зачету. Список вопросов к зачету прилагается.