



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ФГБОУ ВО «ИГУ»  
**Кафедра теоретической физики**

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев  
«17» марта 2026 г.



**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.03.01 Квантовая электродинамика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная физика и физика Космоса

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета  
Протокол №53 от «17» марта 2026 г.

Председатель \_\_\_\_\_  
Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:  
Протокол №7  
От «12» марта 2026 г.  
Зав. кафедрой \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
С.В. Ловцов

**Иркутск 2026 г.**

## Содержание

I. Цели и задачи дисциплины.....	3
II. Место дисциплины в структуре ОПОП.....	3
III. Требования к результатам освоения дисциплины.....	3
IV. Содержание и структура дисциплины (модуля).....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	4
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.....	4
4.3. Содержание учебного материала.....	5
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий, лабораторных работ.....	5
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС).....	6
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	7
4.5. Примерная тематика курсовых работ.....	7
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	7
а) список литературы.....	7
б) периодические издания.....	8
в) список авторских методических разработок.....	8
г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.....	8
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	8
VII. Образовательные технологии.....	8
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации.....	9
Приложение: фонд оценочных средств	

## I. Цели и задачи дисциплины

Квантовая электродинамика является наиболее развитой теорией поля, которая имеет применения для широкого круга физических явлений и предсказания которой проверены с рекордной точностью. Кроме того, она является относительно простым полигоном для изучения методов, применимых для неабелевых калибровочных полей.

В этом курсе впервые встречаются многие понятия, такие, как диаграммы Фейнмана, лагранжиан взаимодействия и т.д.

### Цели курса

Целью курса «Квантовая электродинамика» является изучение методов квантовой теории поля и основных квантовоэлектродинамических явлений. Знания, полученные при изучении курса «Квантовая электродинамика» формируют физическую культуру.

### Задачи курса

Данный курс призван решать следующие задачи:

- изучение методов квантовой теории поля
- знакомство с основными физическими явлениями, описываемыми квантовой электродинамикой
- формирование у студентов умений и навыков самостоятельного вычисления КЭД эффектов;
- изучение методов высших порядков теории возмущений;

Программа ориентирована на развитие у студентов интереса к самостоятельному изучению фундаментальных основ науки.

## II. Место дисциплины в структуре ОПОП

«Квантовая электродинамика» относится к дисциплинам, формируемым участниками образовательного процесса. При изучении курса «Квантовая электродинамика» используются знания, приобретенные при изучении основных физических и математических курсов, а также спецкурсов по релятивистской квантовой теории и теории излучения. Курс «Квантовая электродинамика» является базовым для изучения такого курса как «Слабые взаимодействия», а также курсов по физике частиц и астрофизике.

## III. Требования к результатам освоения дисциплины

### Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Компетенция	ПК-1: Способен использовать специализированные знания в области физики и астрофизики для освоения профильных физических дисциплин.
Индикаторы компетенции	ИДК <sub>ПК 1.1</sub> Способен проводить анализ научных данных, результатов экспериментов и наблюдений, используя специализированные знания в области физики и астрофизики. ИДК <sub>ПК1.2</sub> Способен проводить анализ новых направлений исследований и опытно-конструкторских разработок в соответствующей области знаний.
Результаты обучения	<b>Знает:</b> основные типы взаимодействий и методы вычислений в квантовой теории поля, основные проблемы квантовой теории поля. <b>Умеет:</b> использовать математический аппарат для решения задач КЭД. <b>Владеет:</b> навыками вычисления сечений и вероятностей распадов, методами вычислений петлевых поправок.

#### IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единиц, 144 ч., в том числе 95 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов через ЭИОС факультета. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 50 часов.

Форма промежуточной аттестации: экзамен.

#### 4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов

№ п/п	Раздел дисциплины/темы	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися				
					Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия	Консультации		
1	1-18	7	144	50	34	50	1	23	Практическое задание; вопросы к экзамену
Итого:			144	50	34	50	1	23	

#### 4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
7	Тема 1-18	Задание в виде задачи	После пройденных тем	23	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.

### 4.3. Содержание учебного материала

#### Содержание разделов и тем дисциплины

##### Раздел 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

1. Правила Фейнмана КЭД
2. Комптон-эффект, вычисление матричного элемента.
3. Сечение Комптон-эффекта для неполяризованных частиц.
4. Сечение  $e^+e^-$
5. Тормозное излучение на ядре.
6. Тормозное излучение на ядре. Формфакторы.
7. Метод эквивалентных фотонов.

##### Раздел 2. ВЫСШИЕ ПОРЯДКИ ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

8. Альфа-представление.
9. Методы регуляризации.
10. Аналитические свойства собственно-энергетической части, правило вычисления скачка.
11. Вычисление поляризационного оператора.
12. Тождество Уорда, теорема Фарри.

##### Раздел 3. ПЕРЕНОРМИРОВКИ В КЭД

13. Уравнения Дайсона-Швингера.
14. Расходимости в КЭД.
15. Мультипликативная перенормировка.
16. Логарифмическая асимптотика фейнмановских интегралов.
17. Главное логарифмическое приближение, уравнение Гелл-Мана – Лоу.
18. Ренормгрупповые уравнения.

#### 4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий, лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Раздел 1, Тема 1	Правила Фейнмана КЭД	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
2.	Раздел 1, Тема 2	Вычисление квадрата амплитуды Комптон-эффекта. Знакомство с REDUCE	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
3.	Раздел 1, Тема 3	Вычисление сечения. Учет поляризации фотонов.	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
4.	Раздел 1, Тема 4	Сечение рождения мюонов. Угловые распределения.	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
5.	Раздел 2, Тема 5	Предел мягких фотонов в тормозном излучении.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
6.	Раздел 2, Тема 6	Структура мишени и формфактор.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
7.	Раздел 2, Тема 7	Метод эквивалентных фотонов: рождение тормозного фотона на ядре.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1

8.	Раздел 3, Тема 8	Петлевые вклады, виды регуляризаций.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
9.	Раздел 3, Тема 9	Методы вычислений: фейнмановская параметризация.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
10.	Раздел 3, Тема 10	Вычисление скачка амплитуды и унитарность.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
11.	Раздел 3, Тема 11	Поляризационный оператор и размерная регуляризация.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
12.	Раздел 4, Тема 12	Теорема Фарри для 3-фотонной амплитуды, проверка.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
13.	Раздел 4, Тема 13	Поправка к закону Кулона	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
14.	Раздел 4, Тема 14	Контрольная работа	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
15.	Раздел 4, Тема 15	Константы перенормировки и калибровочная инвариантность.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
16.	Раздел 4, Тема 16	Асимптотика петлевых вкладов в вершину и пропагаторы.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
17.	Раздел 5, Тема 17	Решение ренормгрупповых уравнений в 1-петлевом приближении.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
18.	Раздел 5, Тема 18	Контрольная работа.	3	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1

#### 4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Правила Фейнмана	Внеаудиторная, решение задач	Правила Фейнмана для различных теорий	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю,	2
2	Правила Фейнмана		Учет поляризации		2
3	Квадрат амплитуды		Знакомство с REDUCE, использование для вычислений.		2
4	Амплитуда в КЭД		Мнимые части графиков		2
5	Кинематика		Инвариантные переменные и физические области		2
6	Процессы КЭД		Позитроний, квантовые числа, моды распада.		1

7	Процессы КЭД		Образование пар фотоном в поле ядра.	предоставляем ым Научной библиотекой ИГУ и Сторонние сайты	1
8	Процессы КЭД		Метод эквивалентных фотонов, спектр фотонов.		1
9	Процессы КЭД		Аннигиляция позитрония		1
10	Процессы КЭД		Разложение по парциальным волнам.		1
11	Процессы КЭД		Электрон в поле плоской электромагнитной волны.		1
12	Процессы КЭД		Вычисление 4-мерных интегралов		1
13	Высшие порядки ТВ		Аналитические свойства поляризаационного оператора.		1
14	Высшие порядки ТВ		Вычисление индекса расходимости диаграммы		1
15	Высшие порядки ТВ		Перенормировка на массовой поверхности.		1
16	Высшие порядки ТВ		Контрчлены в лагранжиане.		1
17	Высшие порядки ТВ		Свойства размерной регуляризации		1
18	Высшие порядки ТВ		Ренормгрупповые уравнения		1

#### 4.4 Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Студентам для самостоятельного углубленного изучения дисциплины (параллельно с лекциями) предлагаются задачи по изучаемым разделам и график их изучения. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительные параграфы по пройденной теме, а затем решит предложенные задачи, методы решения которых частично обсуждаются на семинарах. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде контрольных опросов на практических занятиях.

#### 4.5. Примерная тематика курсовых работ

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ.

### V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

#### а) список литературы

основная литература

1. Топтыгин И.Н. Современная электродинамика / И. Н. Топтыгин. - Ижевск: Регулярная и хаотич. динамика. Ч.2: Теория электромагнитных явлений в веществе: учеб. пособие. - 2005. - 848 с. (3)
2. [Ландау, Лев Давидович](#). Теоретическая физика: учеб. пособие : в 10 т. / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. - 4-е изд., испр. - М. : Наука. Физматлит, 2006.  
Т.4 : Квантовая электродинамика [Электронный ресурс] / Б. В. Берестецкий, Е. М. Лифшиц, Л. П. Питаевский. – 2006. - 720 с. : ил. - (Теоретическая физика ; том IV). – Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ.

дополнительная литература:

1. [Ландау, Л.Д.](#) Теоретическая физика: В 10 т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. - М. : Наука. - Т. 4 : Квантовая электродинамика / В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский и др. - 3-е изд., испр. . - 1989. - 723 с. - ISBN 5-02-014422-3 (20 экз.)

**б) периодические издания**

- нет

**в) список авторских методических разработок**

- нет

**г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

<http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;

Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ:

- <https://isu.bibliotech.ru/> - ЭЧЗ «БиблиоТех»;
- <http://e.lanbook.com> - ЭБС «Издательство «Лань»;
- <http://rucont.ru> - ЭБС «Рукопт» - межотраслевая научная библиотека, содержащая оцифрованные книги, периодические издания и отдельные статьи по всем отраслям знаний, а также аудио-, видео-, мультимедиа софт и многое другое;
- <http://ibooks.ru/> - ЭБС «Айбукс» - интернет ресурсы в свободном доступе.

**VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Учебная аудитория для проведения занятий. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук. Использование глобальной компьютерной сети позволяет обеспечить доступность интернет-ресурсов и реализовать самостоятельную работу студентов. На факультете имеется компьютеризированная аудитория, предназначенная для самостоятельной работы, с неограниченным доступом в Интернет.

**VII. Образовательные технологии**

При изучении данной дисциплины используются следующие образовательные технологии:

1. Лекции, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении практических задач
2. Практические занятия, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения практических и проблемных задач;
3. Консультации – еженедельно для всех желающих студентов; Компьютерные симуляции для демонстрации различных механических процессов.
4. Текущий контроль за деятельностью студентов осуществляется в основном на практических занятиях при дискуссии о результатах выполненных практических работ.

**VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации**

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

Оценочные средства текущего контроля — контрольные работы.

Форма проведения промежуточной аттестации — экзамен.

**Варианты задач для контрольной работы**

1. Нарисовать все диаграммы низшего порядка

а) для процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^-$ ,

б) для процесса  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ .

Написать матричный элемент для одной из них.

2. Написать матричный элемент диаграммы, содержащей петлевую поправку к фотонному пропагатору.

### Примерный перечень вопросов к экзамену

1. Правила Фейнмана вычисления матричных элементов в импульсном представлении.
2. Калибровочная инвариантность матричных элементов.
3. Вычисление сечения.
4. Атомный формфактор, формфакторы нуклона.
5. Тормозное излучение при рассеянии на ядре.
6. Переход к альфа-представлению в петлевых интегралах.
7. Регуляризации петлевых вкладов.
8. Виковский поворот, переход к евклидову пространству.
9. Аналитические свойства, правила Ландау-Куткоски.
10. Размерная регуляризация.
11. С-четность и теорема Фарри.
12. Тождество Уорда в КЭД.
13. Вычисление поляризаационного оператора.
14. Метод эквивалентных фотонов.
15. Альфа-представление для петлевых вкладов.
16. Фейнмановская параметризация.
17. Размерная регуляризация.
18. Индекс расходимости диаграммы.
19. Перенормировка и контрчлены в лагранжиане.
20. Перенормировка вычитанием на массовой поверхности.
21. Мультипликативная перенормировка.
22. Логарифмическая асимптотика диаграмм в КЭД.
23. Уравнения Дайсона-Швингера.
24. Полные пропагаторы и вершины.
25. Уравнение Гелл-Мана – Лоу.
26. Нуль заряда в КЭД.

*Пример тестовых заданий для проверки сформированности компетенций, указанных выше*  
**п.3:**

1. Уравнение Шредингера, описывающее эволюцию квантовой волновой функции состояния системы...

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H}(p, q) \Psi,$$

- а) Постулируется, в нерелятивистском пределе воспроизводит классические результаты
- б) Напрямую следует из уравнений классической теории, полностью повторяет классические результаты
- в) Напрямую следует из уравнений классической теории, его результаты противоречат результатам классических уравнений

2. При распаде отрицательно заряженного мюона образуются мюонное нейтрино, ...

- а) ... электрон и электронное антинейтрино

- б) ... протон и фотон
- в) ... нейтрон и фотон

3. Позитрон можно охарактеризовать как

- а) фермион со спином  $\frac{1}{2}$ , электрическим зарядом  $+e$
- б) бозон со спином 1, электрическим зарядом  $-e$
- в) фермион со спином  $\frac{1}{2}$ , электрическим зарядом  $-e$

**Разработчики:**



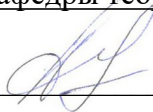
доцент кафедры теоретической физики А.А. Шишмарев

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики «12» марта 2026 г.

Протокол №7

Зав. кафедрой



С.В. Ловцов

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**