**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**
**ФГБОУ ВО «ИГУ»**
**Кафедра теоретической физики**

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета
_____/Н.М. Буднев
«22» апреля 2020 г.

**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.В.ДВ.02.01 Квантовая электродинамика

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

Тип образовательной программы: Академический бакалавриат

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная физика

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета
Протокол №25 от «21» апреля 2020 г.
Председатель _____
Н.М. Буднев

Рекомендовано кафедрой:
Протокол №8
От «14» апреля 2020 г.
И.о. зав. кафедрой _____
С.В. Ловцов

**Иркутск 2020 г.**

Содержание

1. Цели и задачи дисциплины.....3
2. Место дисциплины в структуре ОПОП.....3
3. Требования к результатам освоения дисциплины.....3
4. Объем дисциплины и виды учебной работы.....4
5. Содержание дисциплины.....4
6. Перечень семинарских, практических занятий, лабораторных работ.....5
7. Примерная тематика курсовых работ.....7
8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....8
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....9
10. Образовательные технологии.....9
11. Оценочные средства (ОС).....9
Приложение: фонд оценочных средств

## 1. 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.

## 2. Место дисциплины в структуре ОПОП

«Квантовая электродинамика» является дисциплиной по выбору в вариативной части общенаучного цикла ОПОП. 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.

## 3. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:
- способность использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин (ПК-1).

В результате изучения дисциплины студент должен:

**Знать**: основные типы взаимодействий и методы вычислений в квантовой теории поля, основные проблемы квантовой теории поля.

**Уметь**: использовать математический аппарат для решения задач КЭД.

**Владеть**: навыками вычисления сечений и вероятностей распадов, методами вычислений петлевых поправок.

**4. Объем дисциплины и виды учебной работы**

| Вид учебной работы | Всего часов / зачетных единиц | Семестр |
|---|---|---|
| | | 7 |
| **Аудиторные занятия (всего)** | 84/2,3 | 84 |
| Лекции | 18/0,5 | 18 |
| Практические занятия (ПЗ) | 54/1,5 | 54 |
| КСР | 12/0,3 | 12 |
| **Самостоятельная работа (всего)** | 69/1,9 | 69 |
| Вид промежуточной аттестации (экзамен) | 27/0,75 | 27 |
| **Контактная работа (всего)** | 91/2,5 | 91 |
| Общая трудоемкость часы<br>зачетные единицы | 180/5 | 180 |

**5. Содержание дисциплины**

**5.1 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. Ренормрупповые уравнения.

**5.2 Разделы дисциплины и междисциплинарные связи с обеспечиваемыми дисциплинами**

| № | Наименование обеспечиваемых дисциплин | № разделов и тем данной дисциплины, необходимых для изучения обеспечиваемых дисциплин | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1. | Слабые взаимодействия | 1.1 | 1.4 | 2.10 | 3.14 | | | | | | |

**5.3 Разделы и темы дисциплин и виды занятий**

| № п/п | Наименование раздела | Наименование темы | Виды занятий в часах | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Лекции | Практ. занятия | СРС |
| 1 | Раздел 1 | Тема 1-4 | 4 | 12 | 20 |
| 2 | Раздел 2 | Тема 5-7 | 3 | 9 | 15 |
| 3 | Раздел 3 | Тема 8-11 | 4 | 12 | 20 |
| 4 | Раздел 4 | Тема 12-16 | 5 | 15 | 35 |
| 5 | Раздел 5 | Тема 17-18 | 2 | 9 | 20 |

**6. 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 | 3 | Задание на семинаре в виде задачи | ПК-1 |
| 2. | Раздел 1, Тема 2 | Вычисление квадрата амплитуды Комптон-эффекта. Знакомство с REDUCE | 3 | Задание на семинаре в виде задачи | ПК-1 |
| 3. | Раздел 1, Тема 3 | Вычисление сечения. Учет поляризации фотонов. | 3 | Задание на семинаре в виде задачи | ПК-1 |
| 4. | Раздел 1, Тема 4 | Сечение рождения мюонов. Угловые распределения. | 3 | 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 |

### 6.1. План самостоятельной работы студентов

| № 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, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ и Сторонние сайты | 4 |
| 2 | Правила Фейнмана | | Учет поляризации | | 4 |
| 3 | Квадрат амплитуды | | Знакомство с REDUCE, использование для вычислений. | | 4 |
| 4 | Амплитуда в КЭД | | Мнимые части графиков | | 4 |
| 5 | Кинематика | | Инвариантные переменные и физические области | | 4 |
| 6 | Процессы КЭД | | Позитроний, квантовые числа, моды распада. | | 4 |
| 7 | Процессы КЭД | | Образование пар фотоном в поле ядра. | | 3 |
| 8 | Процессы КЭД | | Метод эквивалентных фотонов, спектр фотонов. | | 3 |
| 9 | Процессы КЭД | | Аннигиляция позитрония | | 3 |
| 10 | Процессы КЭД | | Разложение по парциальным волнам. | | 3 |
| 11 | Процессы КЭД | | Электрон в поле плоской электромагнитной волны. | | 3 |
| 12 | Процессы КЭД | | Вычисление 4-мерных интегралов | | 4 |
| 13 | Высшие порядки ТВ | | Аналитические свойства поляризационного оператора. | | 4 |
| 14 | Высшие порядки ТВ | | Вычисление индекса расходимости диаграммы | | 4 |
| 15 | Высшие порядки ТВ | | Перенормировка на массовой поверхности. | | 4 |
| 16 | Высшие порядки ТВ | | Контрчлены в лагранжиане. | | 4 |
| 17 | Высшие порядки ТВ | | Свойства размерной регуляризации | | 5 |
| 18 | Высшие порядки ТВ | | Ренормгрупповые уравнения | | 5 |

### 6.2. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 6.1. 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, представленные в литературе из п. 8, а затем решит предложенные в п. 6.1 задачи, методы решения которых частично обсуждаются на семинарах. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде контрольных опросов на практических занятиях.

## 7. Примерная тематика курсовых работ

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ**.**

**8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

а) 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.

б) 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.)
2. Фейнман, Р. Ф. Квантовая электродинамика : курс лекций / Р. Ф. Фейнман. - М. : Либроком, 2009. - 218 с. - ISBN 978-5-397-00384-1 (1)
2. Ахиезер, А. И. Квантовая электродинамика / А. И. Ахиезер, В. Б. Берестецкий. - 4-е изд., перераб. - М. : Наука, 1981. - 432 с. (2)
3. Бьёркен Д.Д. Релятивистская квантовая теория / Д. Д. Бьеркен. - Т.1 (1 экз.)
4. Боголюбов, Н. Н. Квантовые поля: учеб. пособие для вузов / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков ; Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. - 3-е изд., доп. - М. : Физматлит, 2005. - 383 с. - ISBN 5-9221-0580-9 (1)
5. Волошин, М. Б. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц / М. Б. Волошин, К. А. Тер-Мартиросян. - М.: Энергоатомиздат, 1984. - 296 с. (2)

в) базы данных, поисково-справочные и информационные 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 «Руконт» - 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.

**9. 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.

**10. 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.

**11. Оценочные средства (ОС)**

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 $e^+e^- \to e^+e^-$,

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

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 поляризационного оператора.
14. Метод эквивалентных фотонов.
15. Альфа-представление для петлевых вкладов.
16. Феймановская 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.

**Разработчики:**

профессор кафедры теоретической физики А.Е. Калошин

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики
«14» апреля 2020 г. Протокол №8

И.о. зав. кафедрой С.В. Ловцов

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