

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Физический факультет  
Кафедра физики элементарных частиц

академик РАН



УТВЕРЖДАЮ

Декан ФФ

А. Е. Бондарь

« 04 » 10 2020 г.

Рабочая программа дисциплины  
**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА**

Направление подготовки: 03.04.02 Физика, Курс 1, семестр 1  
направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика

Форма обучения

Очная

| Семестр   | Общий объем | Виды учебных занятий (в часах)                 |                      |                      |  | Промежуточная аттестация (в часах)                    |  |       |                          |         |
|---|-------------|--|----------------------|----------------------|--|---|--|-------|--------------------------|---------|
|   |             | Контактная работа обучающихся с преподавателем |                      |                      | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа обучающихся с преподавателем |       |                          |         |
|   |             | Лекции   | Практические занятия | Лабораторные занятия |  |   | Консультации                                   | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1   | 2           | 3  | 4                    | 5                    | 6  | 7   | 8  | 9     | 10                       | 11      |
| 1   | 144         | 32   | 32                   |                      | 58   | 18  | 2  |       |                          | 2       |
| Всего 144 часа / 4 зачетные единицы<br>из них:<br>- контактная работа 68 часов<br>- в интерактивных формах 32 часа<br>Компетенции : ПК-1,ПК-2 |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |

Разработчик, д. физ.-мат. наук

А.Г. Грозин

Заведующий кафедрой ФЭЧ ФФ НГУ  
д.ф.-м.н.

И. Б.Логашенко

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск 2020

## Содержание

|   |    |
|---|----|
| 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....   | 4  |
| 2. Место дисциплины в структуре магистерской программы .....  | 4  |
| 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. .... | 5  |
| 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий. ....   | 5  |
| Программа лекций .....  | 6  |
| Программа практических занятий.....   | 8  |
| 5. Перечень учебной литературы. ....  | 9  |
| 6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов. ....   | 9  |
| 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....  | 10 |
| 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.....  | 10 |
| 9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....  | 10 |
| 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....  | 11 |

## Аннотация

### к рабочей программе дисциплины «Квантовая электродинамика»

Направление: 03.04.02 Физика

#### Направленность (профиль): Общая и фундаментальная физика

Программа дисциплины «Квантовая электродинамика» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню магистратуры по направлению подготовки 03.04.02 Физика, «Общая и фундаментальная физика», а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой физики элементарных частиц в качестве дисциплины по выбору. Дисциплина изучается студентами первого курса магистратуры физического факультета.

Цель курса – обучение магистрантов- физиков основам теории электромагнитных взаимодействий элементарных частиц и методам расчета вероятностей и сечений процессов, вызванными этими взаимодействиями.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующих профессиональных компетенций:

**ПК-1 способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта**

**ПК-2 способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности.**

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

#### **Знать:**

-теоретические методы, применяемые в абелевой калибровочной теории поля (квантовой электродинамики), основные концепции, лежащие в основе построения теории физики элементарных частиц, современную литературу по тематике курса «Квантовая электродинамика»  
-базовые разделы квантовой теории поля: основные понятия, модели, законы и теории; теоретические и методологические основы построения Стандартной модели.

#### **Уметь:**

-уметь самостоятельно решать простейшие задачи и проводить оценки для процессов ширин и сечений в квантовой электродинамике.  
-уметь применять знания квантовой электродинамики для анализа и обработки результатов физических экспериментов

#### **Владеть:**

-владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики элементарных частиц.  
-владеть основными методами научных исследований, навыками использования теоретических основ базовых разделов общей и теоретической физики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области квантовой теории поля.

Курс рассчитан на один семестр (1-й). Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и ее контроль преподавателями с помощью заданий, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения

Промежуточная аттестация: экзамен

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачетных единицы.

## **1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.**

Основной целью дисциплины «Квантовая электродинамика» является обучение магистрантов-физиков основам квантовой теории поля на примере абелевой калибровочной теории электромагнитных взаимодействий электронов и фотонов – квантовой электродинамики. В курсе излагается материал, знание которого необходимо как для теоретиков, так и для экспериментаторов. Он включает основы квантовой электродинамики (КЭД) и современные методы расчета электродинамических процессов. Курс состоит из пяти разделов: I. Основы квантовой электродинамики (построение лагранжиана квантовой электродинамики, инвариантная теория возмущений, диаграммная техника Фейнмана, сечения основных процессов в КЭД), II. Элементарные процессы квантовой электродинамики, III. Приближенные методы (мягкофотонное приближение, метод эквивалентных фотонов и квазиреальных электронов), IV. Радиационные поправки (теория перенормировок, радиационные поправки), V. Метод функционального интегрирования. В курсе также излагаются основы квантовой теории поля и современные методы теоретического анализа, позволяющие делать простые оценки для всего многообразия процессов и явлений квантовой электродинамики, а также позволяющие изучать другие разделы квантовой теории поля.

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональных компетенций (ПК):

ПК-1 -способность самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта:

ПК-2 - способность свободно владеть разделами физики, необходимыми для решения научно-инновационных задач, и применять результаты научных исследований в инновационной деятельности;

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

### **Знать:**

-теоретические методы, применяемые в абелевой калибровочной теории поля (квантовой электродинамики), основные концепции, лежащие в основе построения теории физики элементарных частиц, современную литературу по тематике курса «Квантовая электродинамика» (ПК 1.1).

-базовые разделы квантовой теории поля: основные понятия, модели, законы и теории; теоретические и методологические основы построения Стандартной модели (ПК 2.1).

### **Уметь:**

-уметь самостоятельно решать простейшие задачи и проводить оценки для процессов ширин и сечений в квантовой электродинамике (ПК 1.2).

-уметь применять знания квантовой электродинамики для анализа и обработки результатов физических экспериментов (ПК 2.2).

### **Владеть:**

-владеть навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики элементарных частиц (ПК 1.3).

-владеть основными методами научных исследований, навыками использования теоретических основ базовых разделов общей и теоретической физики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области квантовой теории поля (ПК 2.3).

## **2. Место дисциплины в структуре образовательной программы**

Дисциплина «Квантовая электродинамика» реализуется в осеннем семестре 1 курса для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 03.04.02 Физика. Курс является одной из

профессиональных дисциплин по выбору, реализуемых кафедрой физики элементарных частиц. Для ее восприятия требуется успешное прохождение курса «Физика элементарных частиц». Дисциплина должна предшествовать выполнению квалификационной работы, т.к. дает магистранту необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследований в области физики элементарных частиц в рамках подготовки ее подготовки.

### 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

| Семестр                             | Общий объем | Виды учебных занятий (в часах)                 |                      |                      |  | Промежуточная аттестация (в часах)                    |  |       |                          |         |
|-------------------------------------|-------------|--|----------------------|----------------------|--|---|--|-------|--------------------------|---------|
|                                     |             | Контактная работа обучающихся с преподавателем |                      |                      | Самостоятельная работа, не включая период сессии | Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации | Контактная работа обучающихся с преподавателем |       |                          |         |
|                                     |             | Лекции   | Практические занятия | Лабораторные занятия |  |   | Консультации                                   | Зачет | Дифференцированный зачет | Экзамен |
| 1                                   | 2           | 3  | 4                    | 5                    | 6  | 7   | 8  | 9     | 10                       | 11      |
| 1                                   | 144         | 32   | 32                   |                      | 58   | 18  | 2  |       |                          | 2       |
| Всего 144 часа / 4 зачетные единицы |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |
| из них:                             |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |
| - контактная работа 68 часов        |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |
| - в интерактивных формах 32 часа    |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |
| Компетенции: ПК-1, ПК-2             |             |  |                      |                      |  |   |  |       |                          |         |

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью.

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и ее контроль преподавателем с помощью заданий, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 часов;
- практические занятия – 32 часа;
- самостоятельная работа в течение семестра, не включая период сессии – 58 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа;

Объем контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 68 часов. Работа с обучающимися в интерактивных формах составляет 32 часа.

### 4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.

Дисциплина «Квантовая электродинамика» представляет собой полугодовой курс,

читаемый на 1-ом курсе магистратуры физического факультета НГУ в 1 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы, академических 144 часа.

| № п/п | Раздел дисциплины                                  | Неделя семестра | Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах) |                       |                                     |   | Промежуточная аттестация (в период сессии) (в часах) |
|-------|--|-----------------|---|-----------------------|-------------------------------------|---|--|
|       |  |                 | Всего   | Аудиторные часы       |                                     | Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии) |  |
|       |  |                 |   | Лекции (кол-во часов) | Практические занятия (кол-во часов) |   |  |
| 1     | 2  | 3               | 4   | 5                     | 6                                   | 7   | 8  |
| 1     | Основы квантовой электродинамики                   | 1-3             | 14  | 5                     | 5                                   | 4   |  |
| 2     | Элементарные процессы квантовой электродинамики    | 4-7             | 28  | 8                     | 8                                   | 12  |  |
| 3     | Приближенные методы                                | 8-10            | 24  | 5                     | 5                                   | 14  |  |
| 4     | Радиационные поправки                              | 11-14           | 28  | 7                     | 7                                   | 14  |  |
| 5     | Метод функционального интегрирования               | 15-16           | 28  | 7                     | 7                                   | 14  |  |
| 6     | Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену | 17              | 18  |                       |                                     |   | 18   |
| 7     | Групповая консультация                             |                 | 2   |                       |                                     |   | 2  |
| 8     | Экзамен  |                 | 2   |                       |                                     |   | 2  |
|       | <b>Всего</b>                                       |                 | <b>144</b>  | <b>32</b>             | <b>32</b>                           | <b>58</b>   | <b>22</b>  |

### Программа и основное содержание лекций

#### I. Основы квантовой электродинамики (5 часов)

1. Система единиц. Уравнения Максвелла и Дирака. Принцип калибровочной инвариантности. Лагранжиан квантовой электродинамики (КЭД). Симметрии КЭД. Представление взаимодействия для полевых операторов. Обзор методов квантования КЭД.
2. S-матрица. Релятивистская инвариантность и унитарность. Теорема Вика. Инвариантная теория возмущений. Правила диаграммной техники в КЭД. Вероятности и сечения.
3. Реакции с поляризованными частицами. Поляризационные матрицы плотности электрона и позитрона. Зарядовое сопряжение. Поляризационная матрица плотности фотона. Параметры Стокса и их физический смысл. Спиральность. Инвариантные амплитуды. Кросс-инвариантность.

#### II. Элементарные процессы квантовой электродинамики (8 часов)

4. Процессы во внешнем поле. Упругое рассеяние электрона на ядре, формула Мотта. Форм-фактор ядра. Скалярная КЭД, рассеяние электрона на  $\pi$ -мезоне, форм-фактор  $\pi$ -мезона, реакция  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Параметризация форм-факторов, формула Брейта-Вигнера. Соотношение унитарности и оптическая теорема.

5. Рассеяние электрона на протоне, форм-факторы электрона и протона, формула Розенблюта. Превращение электрон-позитронной пары в пару мюонов, угловое распределение и полное сечение. Кулоновский фактор (Зоммерфельда-Гамова-Сахарова).
6. Рассеяние электрона на мюоне. Нерелятивистский предел, уравнение Брейта. Потенциальное взаимодействие электронов и позитронов с электроном. Аннигиляционная часть потенциала Брейта, гамильтониан Брейта. Позитроний. Уровни энергии и моды распада орто- и пара- позитрония.
7. Рассеяние фотона  $\pi$ -мезоном и электроном, формула Клейна-Нишины-Тамма. Двухфотонная аннигиляция электрон-позитронной пары и рождение пары двумя фотонами. Угловые распределения и полные сечения.
8. Рассеяние электронов и позитронов на электроне, формулы Мёллера и Баба, ультрарелятивистский предел дифференциальных сечений. Оценки для сечений процессов при больших энергиях, пример: сечение рассеяния света на свете при больших и малых энергиях.

### III. Приближенные методы (5 часов)

9. Мягкофотонное приближение, вывод основной формулы. Излучение произвольного числа мягких фотонов в главном логарифмическом приближении. Метод классических токов, явный вид квазиклассической  $S$ -матрицы.
10. «Инфракрасная катастрофа», ее физический смысл. Сокращение реальных и виртуальных инфракрасных расходимостей в методе классических токов. Экспериментально наблюдаемые сечения, смысл «борновского» сечения. Радиационные поправки за счет мягких фотонов, примеры: тормозное излучение во внешнем поле, поправки к резонансным сечениям.
11. Коллинеарные приближения. "Голые" и "физические" частицы. Метод эквивалентных фотонов (Ферми-Вейцеккера-Вильямса), число фотонов в электроне, матрица плотности эквивалентного фотона.
12. Метод квазиреальных электронов, число электронов в фотоне и электроне. Примеры применения приближения: тормозное излучение во внешнем поле, рождение пары фотоном во внешнем поле (процесс Бете-Гайтлера), тормозное излучение при электрон-электронном (позитронном) рассеянии. Двойное приближение эквивалентных фотонов.

### IV. Радиационные поправки: (7 часов)

13. Подсчет ультрафиолетовых расходимостей в радиационных поправках. Алгебра знаменателей (параметризации Фейнмана и Швингера, представление Меллина-Барнса). Методы регуляризации расходимостей: размерная регуляризация  $D=4+2\epsilon$ , регуляризация Паули-Вилларса и др.
14. Точная функция Грина фотона, поляризационный оператор. Дисперсионные соотношения. Правило Кутковского для вычисления скачка амплитуды, нахождение поляризационного оператора с помощью унитарности и аналитичности.
15. Точная функция Грина электрона, массовый оператор. Перенормировка волновых функций и массы. Вершинная функция Грина, форм-факторы электрона, перенормировка вершинной функции.
16. Перенормировка заряда и проблема нуля заряда в КЭД. Построение теории возмущений по перенормированному заряду с помощью контрчленов. Общее тождество Уорда в КЭД. Разностное тождество Уорда, соотношение между константами перенормировки в КЭД ( $Z_1=Z_2$ ).

### V. Метод функционального интегрирования (7 часов)

17. Метод функционального интегрирования в квантовой механике: представление для функций Грина. Представление через функциональный интеграл для коррелятора в квантовой теории поля (бозонные поля). Двухточечные корреляторы, гауссовы

- функциональные интегралы. Производящие функционалы для функции Грина. Функциональные производные.
18. Грассманова алгебра, грассмановы поля. Дифференцирование и интегрирование грассмановых полей. Гауссовы функциональные интегралы для грассмановых полей. Квантование КЭД в методе функционального интегрирования: фиксация калибровки, функциональные детерминанты.
  19. Симметрия Бекки-Руэ-Стора-Тютина (БРСТ) для лагранжиана КЭД в лоренцевской калибровке и ее следствия. Симметрии в функциональном формализме и уравнения Дайсона-Швингера.

### **Программа практических занятий**

#### **I. Основы квантовой электродинамики (5 часов)**

1. Алгебра гамма-матриц в D-мерном пространстве, тождество Гордона. Тождества Фирца.
2. Знакомство с системами компьютерной алгебры и их применение для вычислений в квантовой теории поля.
3. Функции Грина, зависимость от калибровки. Теорема Фарри.

#### **II. Элементарные процессы квантовой электродинамики (8 часов)**

4. Рассеяние электрона на ядре, мюоне. Поляризационные эффекты.
5. Превращение электрон-позитронной пары в пару мюонов. Угловое распределение и полное сечение. Рассеяние электрона на протоне, формула Розенблюта.
6. Электрон-электронное и электрон-позитронное рассеяние. Комптоновское рассеяние.
7. Брейтовский гамильтониан для электронов и позитронов. "Аннигиляционная" часть потенциала.
8. Тонкая структура уровней позитрония. Двух- и трех-фотонная аннигиляция электрон-позитронной пары. Времена жизни орто- и пара-позитрония. Теорема Ландау.

#### **III. Приближенные методы: (5 часов)**

9. Излучение мягких фотонов. Спектр излучения фотона в процессе тормозного излучения на ядре, в процессах  $e^+e^- \rightarrow \mu^+ \mu^- \gamma$ ,  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$ .
10. Сокращение реальных и виртуальных инфракрасных расходимостей в методе классических токов. Спектр мягких фотонов для двойного тормозного излучения  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma \gamma$ .
11. Приближение эквивалентных фотонов. Спектр и угловое распределение тормозного излучения электрона на ядре и на электроне. Полные сечения тормозного излучения. Спектр и угловое распределение тормозного излучения при электрон-электронном (позитронном) рассеянии. Фоторождение пары на ядре (процесс Бете-Гайтлера).
12. Двойное приближение эквивалентных фотонов, примеры двухфотонного механизма электророждения: рождение пары мюонов, рождение адронных резонансов, полные адронные сечения в двухфотонном механизме.

#### **IV. Радиационные поправки (7 часов):**

13. Алгебра знаменателей (параметризации Фейнмана и Швингера, представление Меллина-Барнса). Вычисление поляризационного оператора в размерной регуляризации  $D=4+2\epsilon$ .
14. Общий вид вершинной функции. Первый дираковский форм-фактор в однопетлевом приближении. Дважды логарифмическое приближение. Связь между аномальным магнитным моментом и вторым дираковским форм-фактором.
15. Вычисление массового оператора. Прямое доказательство разностного тождества Уорда в однопетлевом приближении. Тождество  $Z_1=Z_2$ .

#### **V. Метод функционального интегрирования (7 часов)**



16. Вычисление амплитуды перехода в квантовой механике для одномерного осциллятора с помощью функционального интегрирования.
17. Пропагатор фотона в планарной калибровке. Дифференцирование и интегрирование грассмановых полей. Гауссовы функциональные интегралы для грассмановых полей. Замена переменных в функциональном интеграле по грассмановым полям. Вывод тождества Уорда в методе функционального интегрирования.
18. Регуляризация методом "размывания" дельта-функции. Вычисление аксиальной (треугольной) аномалии Адлера -- Белла -- Джакива в методе функционального интегрирования.
19. Тензор энергии-импульса КЭД, аномалия следа тензора энергии-импульса, перенормировка заряда и массы электрона.

#### **Самостоятельная работа студентов (76 часов)**

| Перечень занятий на СРС                                      | Объем, час |
|--|------------|
| Подготовка к практическим занятиям                           | 48         |
| Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях | 10         |
| Подготовка к экзамену  | 18         |

### **5. Перечень учебной литературы.**

#### **5.1. Основная литература**

1. В.Н. Грибов, Квантовая электродинамика: учебное пособие, Новосиб. гос. ун-т Новосибирск: РИЦ НГУ, 2000.
2. В.Г. Зелевинский, Квантовая физика [учебное пособие для студентов физических и физико-технических вузов в 3т., пер. с англ.], Новосибирск, РИЦ НГУ 2014-2015.
3. М. Пескин, Д. Шредер, Введение в квантовую теорию поля. Москва-Ижевск, 2001г.
4. В.Б. Берестецкий, Е.М.Лифшиц, Л.П. Питаевский, Релятивистская квантовая теория. ч.2. Наука, 1971.
5. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, Теоретическая физика. Том 4. Квантовая электродинамика, Наука, 1989.

#### **5.2. Дополнительная литература**

6. А.И. Ахиезер, В.Б. Берестецкий, Квантовая электродинамика, Наука, 1981.
7. К. Ициксон, Квантовая теория поля: в 2 т. : [пер. с англ.] / К. Ициксон ; пер. под ред. Р. М. Мир-Касимова Москва : Мир, 1984. Пер. изд.: Quantum field theory / Claude Itzykson, Jean-Bernard Zuber. - New York etc.: McGraw-Hill, 1980.
8. В.Н. Байер. Физика элементарных частиц. ч.1. Н. 1972 г., В.Н. Байер, Физика элементарных частиц, ч.1. Н, 1972 г., ч.2. Н. 1978.

### **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

1. M. Srednicki, Quantum Field Theory, Cambridge university press, 2007.
2. Yu. Makeenko, Methods of Contemporary Gauge Theory, Cambridge university press, 2002.
3. В.Н. Байер, В.М. Катков, В.С. Фадин, Излучение релятивистских электронов, Москва, Атомиздат, 1973.
4. Р. Фейнман, Квантовая электродинамика, Новокузнецкий ФМИ, 1998.

5. В.С. Фадин, Квантовая электродинамика (курс лекций), электронное пособие по программе НИУ НГУ, 2013.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
  - образовательные интернет-порталы;
  - информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.
- Веб-страница кафедры теоретической физики <http://www.inp.nsk.su/students/theor/index.ru.html>
  - Веб-страница TreeofKnowledge (автор: доцент, д.ф.-м.н. Ли Р.Н.)  
<http://www.inp.nsk.su/students/theor/TreeofKnowledge/index.TreeOfKnowledge.html>
  - Видеолекции по КЭД профессора, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Фадина В.С.  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x37vo3uSPB2t7gPTLedMr3fa>
  - Видеосеминары по КЭД доцента, к.ф.-м.н. Резниченко А.В.  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLPFUq1zn8x36tEait-pYyboIZRFgOY0Gm>

### **7.1 Современные профессиональные базы данных**

Не используются

### **7.2 Информационные справочные системы**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

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

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным

программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## 10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

### 10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине

#### *Текущий контроль*

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем проверки решения задач студентами из заданий для самостоятельного решения.

#### *Промежуточная аттестация*

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленные компетенции ПК-1 и ПК-2 сформированы не ниже порогового уровня.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенций ПК-1 и ПК-2.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовая электродинамика»

| Критерии оценивания результатов обучения | Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций) | Уровень освоения компетенции   |  |  |   |
|--|---|--|--|--|---|
|  |   | Не сформирован (0 баллов)  | Пороговый уровень (3 балла)  | Базовый уровень (4 балла)  | Продвинутый уровень (5 баллов)  |
| 1  | 2   | 3  | 4  | 5  | 6   |
| Полнота знаний                           | ПК 1.1<br>ПК 2.1  | Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки. | Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок. | Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на | Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы. |

|                                   |                  |  |   |  |   |
|-----------------------------------|------------------|--|---|--|---|
|                                   |                  |  |   | дополнительные вопросы.  |   |
| Наличие умений                    | ПК 1.2<br>ПК 2.2 | Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.                                | Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки. | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами. | Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.                                   |
| Наличие навыков (владение опытом) | ПК 1.3<br>ПК 2.3 | Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок. | Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.      | Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.                       | Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач. |

### Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Задания для самостоятельного решения

1. В ультрарелятивистском пределе вычислить дифференциальные сечения  $e^- \mu^-$  рассеяния для определенных спиральностей начальных частиц, используя проекторы на состояния с определенными спиральностями ( $\frac{1 \mp \gamma_5}{2}$ ) и соотношения Фирца.
2. Найти, какой вид имел бы гамильтониан электрон-электронной (позитронной) системы с точностью до членов  $v^2/c^2$  если бы фотон был: а) скалярной б) псевдоскалярной частицей.
3. Вычислить дифференциальное и полное сечение процесса  $\gamma\gamma \rightarrow e^+ e^-$  при одинаковых спиральностях фотонов.
4. Найти полное сечение процесса электрон-позитронной аннигиляции в мюонную пару в случае поляризованных начальных частиц.
5. В ультрарелятивистском пределе найти поляризацию мюона  $\mu^-$ , рождающегося в процессе  $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$  с поляризованными начальными частицами (по поляризации  $\mu^+$  проводится суммирование).

6. В логарифмическом приближении найти в физическом электроне со спиральностью  $\lambda_e$  число "голых" фотонов со спиральностью  $\lambda_\gamma$ , долей продольного импульса  $x$  и поперечными импульсами меньшими  $\mu \ll m_e$ .
7. В приближении эквивалентных фотонов найти дифференциальное по углу вылета и энергии гамма-кванта сечение процесса тормозного излучения при высокоэнергетическом электрон-электронном (позитронном) столкновении. Рассмотреть случаи малых ( $\theta \ll 1/\gamma$ ) и больших ( $1/\gamma \ll \theta \ll 1$ ) углов вылета фотона в С.Ц.И. начальных частиц. Вычислить спектр гамма-квантов.

## Билеты на экзамен

### Билет 1

1. Процесс  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Угловое распределение. Форм-фактор  $\pi$ -мезона и его феноменологические параметризации.
2. Доказать теорему Фарри (о занулении в полной амплитуде вкладов фермионной петли с нечетным числом фотонов).
3. Вывод формулы для числа фотонов в электроне  $dn^\gamma_e(x, q^\perp)$  в методе эквивалентных фотонов. Какова поляризация эквивалентных фотонов?
4. Тождество Уорда (формулировка). Дифференциальное тождество Уорда (вывод). Доказательство соотношения  $Z_1 = Z_2$ .
5. Квантование фотонных полей КЭД в формализме функционального интегрирования: фиксация калибровки, анзац Фаддеева-Попова, формула для коррелятора калибровочно-инвариантного оператора.

### Билет 2

1. Процесс  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ . Угловое распределение. Полное сечение.
2. Доказать теорему Ландау (о невозможности состояния двух фотонов с полным моментом единица).
3. В рамках мягкофотонного приближения найти спектр  $(\frac{d\sigma}{d\omega})$  мягких фотонов в процессе  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$ . Упростить получившееся выражение в пределе  $s \gg \mu^2$ .
4. Перенормированная константа связи. Перенормированная теория возмущений. Контрчлены и правила Фейнмана для них. Условия перенормировки в КЭД.
5. Алгебра Грассмана. Дифференцирование и интегрирование грассмановых полей. Вычисление гауссовского интеграла  $\int D\bar{\Psi}D\Psi \exp[\bar{\Psi}A\Psi]$ . Квантование фермионных полей в формализме функциональных интегралов.

### Билет 3

1. Вывести аннигиляционную часть потенциала Брейта:  $U_{ann}(\vec{r}) = \frac{\pi\alpha}{2m^2} (3 + \vec{\sigma}_+ \vec{\sigma}_-) \delta(\vec{r})$ .
2. Доказать, что мягкие фотоны излучаются независимым образом: вывести фактор излучения  $N$  мягких фотонов.
3. Вывести формулу (представление Меллина-Барнса) алгебры знаменателей:

$$\frac{1}{(a+b)^n} = \frac{1}{\Gamma(n)} \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty+\sigma}^{+i\infty+\sigma} dz \Gamma(-z) \Gamma(n+z) a^z b^{-n-z}, \text{ где } n \text{ есть целое положительное число.}$$

Вывести формулу параметризации Фейнмана для произведения знаменателей  $\frac{1}{D_1^{\alpha_1} \dots D_n^{\alpha_n}}$  из

$\alpha$ -параметризации:  $\frac{1}{D^\nu} = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^\infty d\alpha \alpha^{\nu-1} e^{-\alpha D}$ ,  $\text{Re } D > 0$ ,  $\text{Re } \nu > 0$ .

4. Точная функция Грина фотона. Поляризационный оператор. Константа перенормировки  $Z_3$ . Перенормированный поляризационный оператор. Эффективная константа связи в КЭД при больших передачах  $-q^2 \gg m^2$ .
5. Соотношение Дайсона-Швингера. Вывод разностного тождества Уорда в КЭД.

#### Билет 4

1. Сечение комптоновского рассеяния. Вывод сечения для скалярных заряженных частиц. Как изменится ответ в КЭД? Формула Клейна-Нишины-Тамма.
2. Рассеяние электрона на ядре в борновском приближении (вывод формулы для дифференциального сечения  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ). Физический смысл форм-фактора ядра.
3. Вывод формулы для числа электронов в фотоне  $dn_e^\gamma(x, q_\perp)$  исходя из вычисленного квадрата амплитуды (в неполяризованном случае) для числа фотонов в электроне  $dn_\gamma^e(x, q_\perp)$ :  

$$|M|^2 = 2e^2 \frac{q_\perp^2(1+(1-x)^2) + m^2 x^4}{x^2(1-x)}$$
4. Вычислить в размерностной регуляризации ( $D=4+2\epsilon$ ) расходящуюся часть вклада скалярных заряженных частиц в однопетлевой поляризационный оператор. Сравнить с аналогичным выражением для вклада  $e^+e^-$ .
5. БРСТ-симметрия в лагранжиане КЭД в лоренцевской калибровке. Доказательство неперенормируемости продольной части точной функции Грина фотона.

#### Билет 5

1. Принцип калибровочной инвариантности в КЭД. Принципы построения лагранжиана КЭД (явная форма лагранжиана, симметрии лагранжиана).
2. Рассеяние электрона на ядре в борновском приближении. Вывод формулы Мотта (формула для дифференциального сечения  $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ ). Физический смысл форм-фактора ядра.
3. Метод классических токов в мягкофотонном приближении. Вывод квазиклассического выражения для S-матрицы.
4. Вычислить в размерностной регуляризации ( $D=4+2\epsilon$ ) расходящуюся часть константы перенормировки  $Z_2$ . (Указание: регуляризируйте инфракрасную расходимость малой массой фотона  $\mu_\gamma$ )
5. Вывод выражения для квантовомеханической амплитуды перехода  $\langle x_b, t_b | x_a, t_a \rangle$  в формализме функционального интегрирования.

#### Билет 6

1. Поляризация электронов. Связь электронной и позитронной волновых функций. Вектор  $a^\mu$  Паули-Любанского. Релятивистская матрица плотности. Нахождение физической поляризации электрона в конечном состоянии.
2. Рассеяние электронов и позитронов на электроне, формулы Мёллера и Баба. Оценки для сечений процессов при больших энергиях.
3. Вывод основной формулы (фактор дифференциальной вероятности излучения одного фотона  $dw^{(1)}$ ) для мягкофотонного приближения. Функция  $F(\xi)$  и ее асимптотики.

4. Вычислить мнимую часть однопетлевого поляризационного оператора в КЭД с помощью правил (Кутковского) нахождения скачка амплитуды на разрезе.
5. Квантование бозе-полей в формализме функционального интегрирования. Вывод формулы для коррелятора полей. Производящий функционал и функциональная производная.

### Билет 7

1. Формула соответствия (между амплитудой и потенциалом) для потенциального рассеяние частиц (формулировка). Гамильтониан Брейта. Позитроний. Ширины распада орто- и пара-позитрония (вывод из известных формул для сечений).
2. Инфракрасная катастрофа в мягкофотонном приближении. Интерпретация борновского сечения. Оценка для радиационных поправок в мягкофотонном приближении.
3. Вывести поляризационную матрицу плотности для эквивалентных фотонов. Поляризация эквивалентных фотонов.
4. Кажущаяся степень расходимости диаграммы в КЭД,  $k=4L-P_e-2P_\gamma$  ( $L$  – число петель,  $P_e$  – число электронных пропагаторов,  $P_\gamma$  – число фотонных пропагаторов). Выразить  $k$  через число внешних фотонных ( $N_\gamma$ ) и электронных ( $N_e$ ) линий в размерности  $D=4$ . Основные расходящиеся амплитуды в КЭД.
5. Теорема Вика в методе функционального интегрирования для свободных бозе-полей, нахождение свободных пропагаторов на примере теории вещественного скалярного поля.

### Билет 8

1. Поляризация фотонов. Параметры Стокса и их смысл. Матрица плотности фотона.
2. Кулоновский фактор (Зоммерфельда-Гамова-Сахарова).
3. Вывод формулы для числа фотонов в электроне  $dn^\gamma_e(x, q_\perp)$  в методе эквивалентных фотонов.
4. Показать, что эволюционный оператор  $U(0, -\infty)$  переводит состояния “голых” частиц, являющиеся собственными состояниями гамильтониана  $H_0$ , в состояния “физических” частиц, являющиеся собственными состояниями гамильтониана  $H=H_0+V$  с той же энергией.
5. Теорема Вика в методе функционального интегрирования для свободных ферми-полей. Пропагатор электрона в КЭД.

### Билет 9

1. Правила Фейнмана в квантовой электродинамике.
2. Сечение процесса аннигиляции электрон-позитронной пары в два гамма-кванта. Ультрарелятивистский и нерелятивистский пределы.
3. Сокращение реальных и виртуальных инфракрасных расходимостей в методе классических токов.
4. Вершинная функция Грина в КЭД. Константа перенормировки  $Z_1$ . Электромагнитные форм-факторы электрона  $F_1(q)$  и  $F_2(q)$ . Связь магнитного момента электрона и форм-фактора  $F_2(q)$  (вывод).
5. Вывод правил Фейнмана в КЭД в формализме функционального интегрирования (вершина  $e-e-\gamma$ , свободные пропагаторы фотона и электрона).

### Билет 10

1. Лагранжиан квантовой электродинамики. Симметрии КЭД. Представление взаимодействия для полевых операторов, выражение для функции Грина произвольных гейзенберговских операторов через операторов в представлении взаимодействия.
2. Рассеяние электрона на протоне, форм-факторы электрона и протона, формула Розенблюта.
3. Фоторождение пары на ядре (процесс Бете-Гайтлера) в случае, когда частота фотона много больше массы электрона (вывод выражения для сечения с помощью метода эквивалентных фотонов).

4. Разностное тождество Уорда (формулировки). Демонстрация разностного тождества Уорда на однопетлевом уровне.
5. Вычисление квантовомеханической амплитуды перехода  $\langle x_b, t_b | x_a, t_a \rangle$  для свободной нерелятивистской частицы в формализме функционального интегрирования.

### Билет 11

1. Общее соотношение унитарности для S-матрицы. Унитарность S-матрицы в КЭД для лоренцевской калибровки.
2. Процесс рассеяния электрона на  $\pi$ -мезоне (получить выражение для дифференциального сечения). Форм-факторы  $\pi$ -мезона и их физический смысл.
3. Получить спектр излучения мягкого фотона в процессе тормозного излучения на ядре.
4. Дисперсионные соотношения. Восстановление выражения для (однопетлевого) перенормированного поряризационного оператора по известной мнимой части

$$\text{Im} P(q^2 + i0) = -\frac{\alpha}{3} \sqrt{1 - \frac{4m^2}{q^2}} \left( 1 + \frac{2m^2}{q^2} \right).$$

5. Вычислить зависимость от координат  $x_a$  и  $x_b$  амплитуды перехода  $\langle x_b, t_b | x_a, t_a \rangle$  для одномерного квантового осциллятора в формализме функционального интегрирования.

### Билет 12

1. Канонический тензор энергии-импульса в КЭД. Тензор Белинфанте. Симметричный тензор энергии-импульса в КЭД.
2. Пользуясь гамильтонианом Брейта, найти разницу энергий основного состояния орто- и пара-позитрония:  $E(^3S_1) - E(^1S_0)$ .
3. Двойное приближение эквивалентных фотонов (получение интерполяционной формулы). Демонстрация метода на примере процесса  $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \mu^+ \mu^-$ .
4. Методы регуляризации расходимостей в теории поля: размерная регуляризация, регуляризация Паули-Вилларса и др. (обзор). Вычислить в размерности  $D=4+2\epsilon$  эталонные интегралы:  $\int \frac{d^D p}{(2\pi)^D} \frac{1}{(p^2 - \Delta + i0)^\alpha}$ ,  $\int \frac{d^D p}{(2\pi)^D} \frac{p^2}{(p^2 - \Delta + i0)^\alpha}$ ,  $\int \frac{d^D p}{(2\pi)^D} \frac{p^\mu p^\nu}{(p^2 - \Delta + i0)^\alpha}$ .
5. Квантование фотонных полей КЭД в формализме функционального интегрирования: фиксация калибровки, анзац Фаддеева-Попова, формула для коррелятора калибровочно-инвариантного оператора.

### Билет 13

1. Вывести аннигиляционную часть потенциала Брейта:  $U_{ann}(\vec{r}) = \frac{\pi\alpha}{2m^2} (3 + \overrightarrow{\sigma}_+ \overrightarrow{\sigma}_-) \delta(\vec{r})$ .
2. Доказать, что мягкие фотоны излучаются независимым образом: вывести фактор излучения N мягких фотонов.
3. Получить спектр излучения мягкого фотона в процессе тормозного излучения на ядре.
4. Вывести формулу параметризации Фейнмана для произведения знаменателей  $\frac{1}{D_1^{\alpha_1} \dots D_n^{\alpha_n}}$  из  $\alpha$ -параметризации:  $\frac{1}{D^\nu} = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_0^\infty d\alpha \alpha^{\nu-1} e^{-\alpha D}$ ,  $\text{Re } D > 0$ ,  $\text{Re } \nu > 0$ .
5. Соотношение Дайсона-Швингера. Вывод разностного тождества Уорда в КЭД.



Форма экзаменационного билета представлена на рисунке

|   |
|---|
| <p><i>МИНОБРНАУКИ РОССИИ</i></p> <p><i>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение<br/>высшего образования</i></p> <p><i>«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»<br/>(Новосибирский государственный университет, НГУ)</i></p> <p><i>Физический факультет</i></p> |
| <p>ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № _____</p> <p>1. ....<br/>2. ....</p> <p>Составитель _____ /Ф.И.О. преподавателя/<br/>(подпись)</p> <p>« ____ » _____ 20 г.</p>   |

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Лист актуализации фонда оценочных средств  
по дисциплине «Квантовая электродинамика»  
по направлению подготовки 03.04.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»

| № | Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа) | Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ | Подпись ответственного |
|---|--|--|------------------------|
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |
|   |  |  |                        |