

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Л. Д. Ландау**  
**РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
(ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН)

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН,  
член-корреспондент РАН  
В. В. Лебедев  
«25» декабря 2015 г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА**  
**ДИСЦИПЛИНЫ ПО ВЫБОРУ Б1.В.ДВ.2.2**  
**«Квантовая электродинамика»**

По направлению подготовки: 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

По направленности подготовки: 01.04.02 – «Теоретическая физика»

Уровень образования: Подготовка кадров высшей квалификации

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения – очная

Принята на заседании Ученого  
совета ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
« 25 » декабря 2015 г.,  
Протокол № 33

Черноголовка 2015

Рабочая программа дисциплины по выбору «Квантовая электродинамика» (Б1.В.ДВ.2.2) для основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО) подготовки кадров высшей квалификации по направлению подготовки 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ по направленности (наименование) подготовки 01.04.02 теоретическая физика составлена в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования «Подготовка кадров высшей квалификации» по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (ФГОС ВО), утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации №867 от 30.07.2014 с изменениями и дополнениями от 30 апреля 2015 г.
2. Паспорт научной специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика» разработанный экспертами ВАК Минобрнауки РФ в рамках Номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 25.02.2009 г. № 59.
3. Программа-минимум кандидатских экзаменов по специальностям 01.04.02 — «Теоретическая физика» и 01.04.07 — «Физика конденсированного состояния» с учетом особенностей сложившейся в ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН научной школы.

Составитель программы:

к.ф.-м.н. доц., н.с.



С. Н. Вергелес

«Согласовано»:

Зам. директора ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН  
по науке, д.ф.-м.н., профессор



И. В. Колоколов

Зав. аспирантурой, к.ф.-м.н., н.с.



С. С. Вергелес

НЕ ДЛЯ КОПИРОВАНИЯ



## 1. Паспорт научной специальности 01.04.02 — «Теоретическая физика»

Шифр специальности:

01.04.02 Теоретическая физика

Формула специальности:

Теоретическая физика – область физики, занимающаяся математической формулировкой закономерностей физических явлений, наблюдаемых экспериментально. Теоретическая физика является единой наукой, внутренние связи в которой устанавливаются путем аналитических вычислений или численных расчетов и сравнением с экспериментальными данными. Ее фактическое содержание связано со всем историческим развитием физики. Целью исследований в области теоретической физики является наиболее полное описание фундаментальных физических законов.

Области исследований:

1. Теория конденсированного состояния классических и квантовых, макроскопических и микроскопических систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика и кинетическая теория равновесных и неравновесных систем.
2. Общая теория относительности и релятивистская астрофизика. Физические свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация.
3. Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая теория поля. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Разработка математических методов теории поля.
4. Общие вопросы квантовой механики: основы, теория измерений, общая теория рассеяния. Квантовая теория физических явлений в ядрах, атомах и молекулах.
5. Разработка теории мезоскопических систем. Квантовая теория информации и квантовые вычисления.
6. Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей нелинейной динамики сильно неравновесных систем. Разработка теории хаоса и турбулентности.

Отрасль наук:

физико-математические науки (за исследования, поименованные в пунктах 1-6)

## 2. Цель и задачи освоения дисциплины

**Целью** изучения настоящей дисциплины является подготовка квалифицированных научных кадров в области теоретической физики, способных вести научно-исследовательскую работу, самостоятельно ставить и решать актуальные научные и практические задачи.

**Задачи** дисциплины включают формирование у аспирантов системы знаний и основных понятий по квантовой электродинамике и развитие способности к научно-исследовательской работе и выработку потребности к самостоятельному приобретению знаний по теоретической физике.

## 3 Место дисциплины в структуре ОПОП ВО по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Дисциплина «Квантовая электродинамика» (Б1.В.ДВ.2.2) относится к дисциплинам по выбору дисциплины Б1.В.ДВ.2 вариативной части Блока 1 «Дисциплины» основной профессиональной образовательной программы аспирантуры по направлению подготовки 03.06.01 физика и астрономия по направленности (наименование) подготовки 01.04.02 теоретическая физика.

Программа курса включает изложение квантовой электродинамики при помощи аппарата функционального интегрирования, применяется размерностный метод ультрафиолетовой регуляризации. Все вычисления проводятся подробно и до конца. Курс заканчивается вычислением однопетлевых поправок в КЭД. В частности, вычисляется аномальный (однопетлевой) вклад в магнитный момент электрона. Основной текст существенно дополняется упражнениями и задачами, приведенными в конце каждой лекции.

## 4. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Общепрофессиональные компетенции:	
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
Универсальные компетенции:	
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях

Профессиональные компетенции	
ПК-А	способностью самостоятельно выделять различные физические механизмы в физическом феномене, подбирать адекватные модели для описания этих механизмов (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-В	способностью применять на практике базовые общепрофессиональные знания теории и методов теоретической физики, в том числе микроскопическое и феноменологическое описание, теорию возмущений и диаграммный методы (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Г	способностью применять различные математические методы, такие как ТФКП, решение дифференциальных уравнений, применение теории групп, диаграммная техника, при исследовании математических уравнений
ПК-Д	готовность сотрудничать с экспериментальными группами по планированию физических экспериментов и анализу полученных экспериментальных данных, способностью выделять в экспериментальной ситуации отдельные физические феномены и составлять адекватную математическую модель, описывающую эти феномены (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Е	готовность к дальнейшему самообразованию и расширению компетенции, способностью локализовать общие принципы теоретической физики для нового физического феномена (в соответствии с профилем подготовки)

**В результате освоения дисциплины обучающиеся должны**

**знать:**

- основополагающие сведения по современной квантовой теории поля, а именно:
- построение квантовой теории для бозе и ферми частиц;
- теорию перенормировок;
- теорию калибровочных полей;
- суперсимметрию и ее использование в квантовой теории поля;
- теорию солитонов и инстантонов;
- построение конформных теорий поля
- основы теории струн
- основы теории электрослабых взаимодействий и квантовой хромодинамики

**уметь:**

- использовать свои знания для решения фундаментальных и прикладных задач;

- анализировать данные эксперимента и сопоставлять теоретические предсказания и экспериментальные результаты;
- делать качественные выводы при анализе асимптотических режимов в изучаемых проблемах;
- осваивать новые предметные области и теоретические модели;
- пользоваться адекватным математическим аппаратом при решении практических задач;
- эффективно использовать IT-технологии и компьютерную технику;
- конструировать физические подходы, способные описывать физические явления.

**владеть:**

- навыками построения минимальной модели, описывающей интересные аспекты изучаемого физического явления;
- свободно основными понятиями квантовой теории поля, калибровочных теорий и теории суперструн, что позволяет решать необходимые задачи на современном уровне.

**5. Объем дисциплины, виды учебной работы и форма отчетности**

Вид учебной работы	Часов	ЗЕТ
Общая трудоемкость дисциплины	144	4
Аудиторные занятия:	56	1.55
лекции	56	1.55
Самостоятельная работа	81	2.25
Контроль	7	0.2

Форма отчетности: зачет с оценкой

**6. Содержание и структура дисциплины**

**6.1. Учебный план по дисциплине**

№	Название тем	Количество часов				Всего
		лек.	семинары	СР	К	
1.	Общие принципы квантования полей	20	-	31	3	54
2.	Квантовая электродинамика	36	-	50	4	90
	Итого часов:	56	-	81	7	144

Самостоятельная работа заключается в разборе задач и упражнений по курсу.

## **6.2. Содержание лекционного курса**

### **I. Общие принципы квантования полей.**

Тема 1. Континуальный интеграл для конечномерных систем

Одномерный случай. Хронологические средние. Доопределение операторов при вычислении гауссовых функциональных интегралов в квантовой механике. Теорема Вика. Поворот Вика. Голоморфное представление континуального интеграла. Операторы рождения и уничтожения. Операторы общего вида. Функциональный интеграл в голоморфном представлении. Определение  $S$ -матрицы.

Тема 2. Диаграммная техника Фейнмана

Разложение по константе связи. Диаграммы Фейнмана и правила Фейнмана. О физической интерпретации пропагаторов и проблема причинности в квантовой теории поля. Ультрафиолетовые расходимости и регуляризация. Размерностная регуляризация расходимостей. Индекс расходимости диаграмм. Устранение расходимостей. Инвариантные переменные Манделштама.

Тема 3. Теория перенормировок

Спектральное представление Челлена--Лемана двухточечной функции. Перенормировки. Условие унитарности. Ренормализационная группа. Подход Вильсона к теории перенормировок. Уравнение Каллана—Симанчика. Эволюция бегущей константы связи.

### **II. Квантовая электродинамика.**

Тема 4. Квантование электромагнитного поля

Континуальный интеграл для вырожденных систем. Электромагнитное поле как динамическая система. Ковариантные правила квантования и трюк Фаддеева—Попова

Тема 5. Уравнение Дирака.

Уравнение Дирака и его нерелятивистский предел. Алгебра матриц Дирака. Дискретные симметрии уравнения Дирака. Уравнение Вейля. Каноническое квантование дираковского поля

Тема 6. Квантование фермионов при помощи функционального интеграла и общая формула для  $S$ -матрицы в КЭД.

Фермионный осциллятор. Представление фермионных амплитуд при помощи функциональных интегралов. Функциональный интеграл в теории Дирака. Общая формула для  $S$ -матрицы в КЭД.

Тема 7. Правила Фейнмана для КЭД, теорема Фарри и тождества Уорда-Такахаси



Простейшие амплитуды в КЭД. Правила Фейнмана для КЭД. Теорема Фарри. Тожество Уорда-Такахаша

Тема 8. Индекс расходимости диаграмм и условия перенормировки в КЭД

Индекс расходимости диаграмм. Условия перенормировки в КЭД

Тема 9. Однопетлевая структура КЭД.

Электронный и фотонный пропагаторы. Массовый оператор. Поляризационный оператор. Радиационные поправки к закону Кулона. Вершинный оператор и аномальный магнитный момент электрона. Формфакторы электрона. Вычисление формфакторов. Аналитические свойства формфакторов. Аномальный магнитный момент электрона.

### **7. Самостоятельная работа аспирантов**

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах, на рабочих местах с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется собеседованием. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

### **8. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов**

Контрольные вопросы для проведения текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины совпадают с пунктами содержания лекционного курса.

#### **8.1. Пример экзаменационного билета**

1. Операторы рождения и уничтожения. Операторы общего вида. Функциональный интеграл в голоморфном представлении.
2. Уравнение Дирака и его нерелятивистский предел. Алгебра матриц Дирака. Дискретные симметрии уравнения Дирака.

После окончания курса аспирантам дается набор вопросов для зачета.

### **9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.**

#### **9.1. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)**

[1]. Вергелес С.Н. Лекции по квантовой электродинамике. --- М.: Физматлит, 2008.

[2]. Бьёркен Дж.Д., Дрелл С.Д. Релятивистская квантовая теория: В 2 т. / Пер. с англ. под ред. Берестецкого В.Б. --- М.: Наука, 1978.

[3]. Швингер Ю. Частицы, Источники, Поля: В 2 т. / Пер. с англ. под ред. Бродского

А.М. --- М.: Мир, 1973-1976.

[4]. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля / Пер. с англ. под ред. Белавина А.А. и Беркова А.В. --- Москва-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2001.

[5]. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. --- М.: Наука, 1976.

[6]. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: В 10 т. Т. 4: Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Квантовая электродинамика. --- 3-е изд., исправленное. --- М.: Наука, 1989.

[7]. Вайнберг С. Квантовая теория поля. В 2 т. / Пер. с англ. Под ред. Жуковского В.Ч. -- М.: Физматлит, 2003.

[8]. Славнов А.А., Фаддеев Л.Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. -- М.: Наука, 1988.

### **8.3. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)**

См. список литературы

### **8.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

On-line доступ к журналам «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Письма в ЖЭТФ», к журналам: Physical Review Journals Published by the American Physical Society, к некоторым публикациям издательств Elsevier и Springer/Nature Publishing Group (из подписки ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН).

### **8.5. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

## **9. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

аудиторный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН;  
ноутбук, мультимедиа-проектор, экран;  
рабочее место с выходом в Интернет;  
библиотечный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН