

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»

**Высшая школа общей и прикладной физики**  
(факультет)

---

УТВЕРЖДАЮ:

Декан ВШОПФ \_\_\_\_\_ Е.Д. Господчиков

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**Квантовая теория поля**

---

Уровень высшего образования  
бакалавриат

---

Направление подготовки / специальность  
03.03.02 Физика

---

Направленность образовательной программы  
профиль: Фундаментальная физика

---

Квалификация (степень)  
бакалавр

---

Форма обучения  
очная

---

Нижегород

2019

**1. Место и цели дисциплины в структуре ОПОП**

Дисциплина «Квантовая теория поля» относится к Блоку «Факультативы» ОПОП. Дисциплина является факультативной в седьмом семестре четвертого года обучения в бакалавриате.

**Целями освоения дисциплины являются:**

- формирование у студентов современного представления об основных методах квантовой теории поля, позволяющей совместить принципы квантовой механики и теории относительности;
- освоение обучающимися достижений квантово-полевого описания систем многих частиц;
- формирование у обучающихся практических навыков в решении задач релятивистской квантовой механики и использовании диаграмм Фейнмана для расчета процессов рассеяния в квантовой электродинамике;
- формирование у студентов общепрофессиональных и профессиональных компетенций в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 «Физика».

## 2. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников)

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций
<p style="text-align: center;"><b>ПК-3</b></p> <p>готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований</p> <p style="text-align: center;">(этап освоения – завершающий)</p>	<p><i>З1 (ПК-3) Знать</i> основные релятивистские уравнения; теорему Нетер; метод канонического квантования; электронный и фотонный пропагаторы; матрицу рассеяния; коммутационные соотношения для операторов спинорного и электромагнитного полей; правила Фейнмана.</p> <p><i>У1 (ПК-3) Уметь</i> находить решение уравнения Дирака в простейших случаях; использовать теорему Нетер для определения динамических инвариантов полей; вычислять вакуумные средние от произведений операторов полей; выражать амплитуды рассеяния для основных электродинамических процессов через диаграммы Фейнмана.</p> <p><i>В3 (ПК-3) Владеть</i> теоретико-полевыми методами и использовать их (при необходимости) в исследованиях, связанных с физикой высоких энергий и физикой конденсированного состояния.</p>

## 3. Структура и содержание дисциплины

Объем дисциплины составляет 2 зачетные единицы, всего 72 часа, из которых 49 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (16 часов занятия лекционного типа, 32 часа занятия семинарского типа (семинары, научно-практические занятия), 1 час мероприятия промежуточной аттестации), 23 часа составляет самостоятельная работа обучающегося.

## Содержание дисциплины (модуля)

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины,  форма промежуточной аттестации по дисциплине	Всего (часы)	В том числе				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				
		из них				
Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего			
<u>Тема 1.</u> Релятивистские уравнения	7	2	3		5	2
<u>Тема 2.</u> Классические поля: лагранжева формулировка, динамические инварианты, теорема Нетер	7	2	3		5	2
<u>Тема 3.</u> Глобальные и локальные симметрии	7	2	3		5	2
<u>Тема 4.</u> Спонтанное нарушение симметрии	7	2	3		5	2
<u>Тема 5.</u> Каноническое квантование полей. Скалярное поле	7	2	3		5	2
<u>Тема 6.</u> Квантовое спинорное поле	6	1	3		4	2
<u>Тема 7.</u> Квантование электромагнитного поля. Эффект Казимира	6	1	3		4	2
<u>Тема 8.</u> Взаимодействующие поля. Матрица рассеяния	6	1	3		4	2
<u>Тема 9.</u> Рассеяние электронов и позитронов внешним полем	6	1	3		4	2
<u>Тема 10.</u> Сечение рассеяния фотона электроном в низшем порядке теории возмущений	6	1	3		4	2
<u>Тема 11.</u> Перенормировка массы и заряда электрона	6	1	2		3	3
в т.ч. текущий контроль			4			
Промежуточная аттестация – Зачет					1	

Текущий контроль успеваемости осуществляется в виде решений и последующей проверки домашних контрольных работ, а также в рамках занятий практического и семинарского типа, групповых и индивидуальных консультаций. Итоговый контроль осуществляется на зачете.

### 4. Образовательные технологии

При изучении дисциплины используются современные образовательные технологии. Предусматривается широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (разбор конкретных ситуаций, тренинги по реше-

нию практических задач) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) по дисциплине проходит в форме лекций и практических занятий, а также в виде коллективных и индивидуальных консультаций. На занятиях лекционного типа используются мультимедийные средства поддержки образовательного процесса, часть занятий проводятся в виде лекций с проблемным изложением материала. На занятиях практического типа разбираются решения задач различной степени сложности, проводятся обсуждения рассматриваемых проблем в свете последних научных достижений в данной области. Студенты работают как индивидуально, так и коллективно.

Самостоятельная работа включает в себя выполнение домашних контрольных работ и теоретическую подготовку к занятиям по материалам лекций и рекомендованной литературе, приведенной в конце данной программы. Кроме того, студенты имеют возможность принимать участие в семинарах с представителями российских и зарубежных научных организаций, проводимых в Федеральном исследовательском центре Институт прикладной физики Российской академии наук.

Формой итогового контроля знаний студентов по дисциплине является зачет, в ходе которого оценивается уровень теоретических знаний и навыки решения практических задач.

## **5. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся**

Самостоятельная работа студента способствует более углубленным и активному усвоению содержания курса и является необходимым атрибутом подготовки высококвалифицированного специалиста в области фундаментальной физики. Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной и дополнительной литературы, а также выполнение домашних заданий, включающих в себя группы задач, отвечающих изучаемым разделам дисциплины. Для выполнения домашних заданий студенты изучают примеры решения задач, с использованием иных источников из разделов основной и дополнительной литературы, указанных в разделе 7 данной программы.

Индивидуальные зачётные задания выдаются студентам за 3 недели до окончания семестра (банк этих заданий обновляется ежегодно). В течение этого времени студенты самостоятельно решают зачётные задачи, при необходимости, консультируясь с преподавателем.

**Типовые задачи**, предлагаемые студентам в качестве домашних контрольных работ:

### Задача 1.

В системе покоя электрона, имеющего волновую функцию

$$U(\mathbf{p} = 0) = \begin{pmatrix} \varphi_0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

его спиновое состояние описывается двухкомпонентным спинором  $\varphi_0$ . Найти биспинор  $U(\mathbf{p})$  в системе координат, в которой импульс электрона равен  $\mathbf{p}$ .

### Задача 2

Для частиц со спином  $S = 1$  плотность лагранжиана имеет вид:

$$L = -\frac{1}{2} \frac{\partial \varphi^\nu}{\partial x^\mu} \frac{\partial \varphi_\nu}{\partial x_\mu} + \frac{m^2 \varphi^\nu \varphi_\nu}{2} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \varphi^\nu}{\partial x^\nu} \right)^2.$$

Получить уравнения движения.

### Задача 3

Используя разложение спинорного поля в импульсном пространстве и антикоммутирующие соотношения для операторов  $b, b^+, d, d^+$ , получить выражение

$$\{ \hat{\psi}_\alpha(\vec{x}, t), \hat{\psi}_\beta^+(\vec{y}, t) \} = \delta_{\alpha\beta} \delta(\vec{x} - \vec{y})$$

### Задача 4

Показать, что фейнмановский пропагатор спинорного поля

$$S_F(x, y)_{\beta\alpha} = -i \langle 0 | \hat{T} \hat{\psi}_\beta(x) \hat{\psi}_\alpha(y) | 0 \rangle$$

удовлетворяет уравнению  $(i\hat{V}_x - m)S_F(x, y) = \delta^4(x - y)$ .

## 6. Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине,

включающий:

6.1. Перечень компетенций выпускников образовательной программы с указанием результатов обучения (знаний, умений, владений), характеризующих этапы их формирования, описание показателей и критериев оценивания компетенций на различных этапах их формирования.

ПК-3: готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований

Индикаторы компетенции	Критерии оценивания (дескрипторы)	
	«незачет»	«зачет»
<u>Знания</u> Знать основные релятивистские уравнения; теорему Нетер; метод канонического квантования; электронный и фотонный пропагаторы; матрицу рассеяния; коммутационные соотношения для операторов спинорного и электромагнитного полей; правила Фейнмана	Наличие грубых ошибок в основном материале	Знание основного материала с незначительными погрешностями
<u>Умения</u> Уметь находить решение уравнения Дирака в простейших случаях; использовать теорему Нетер для определения динамических инвариантов полей; вычислять вакуумные средние от произведений операторов полей; выражать амплитуды рассеяния для основных электродинамических	Неумение использовать полученные знания для решения задач, требующих владения методами релятивистской квантовой теории	Умение применять полученные знания для решения конкретных задач и при проведении научных исследований в избранной области

процессов через диаграммы Фейнмана		
<u>Навыки</u> Владеть теоретико-полевыми методами и использовать их (при необходимости) в исследованиях, связанных с физикой высоких энергий и физикой конденсированного состояния.	Отсутствие ряда важнейших навыков, предусмотренных данной компетенцией	Наличие основных навыков, продемонстрированное в стандартных ситуациях при проведении теоретических и/или экспериментальных физических исследований
Шкала оценок по проценту правильно выполненных контрольных заданий	0 – 50 %	50 – 100%

## 6.2. Описание шкал оценивания

Итоговый контроль качества усвоения студентами содержания дисциплины проводится в форме зачета, на котором определяется:

- уровень усвоения студентами основного учебного материала по дисциплине;
- уровень понимания студентами изученного материала;
- способности студентов использовать полученные знания для решения конкретных задач.

Зачет проводится в устной форме. Студенты получают индивидуальное задание, включающее в себя теоретический вопрос по одному из разделов курса и одну задачу, требующую поэтапного решения и развернутого ответа. Кроме того, в процессе собеседования студенты должны ответить на один-два дополнительных вопроса экзаменатора.

Оценка	Уровень подготовки
Зачет	В целом удовлетворительная подготовка, возможно с заметными, но не грубыми ошибками или недочетами. Студент дает полный ответ на все теоретические вопросы собеседования, возможно с небольшими неточностями, допускаются негрубые ошибки при ответах на дополнительные вопросы. Полученные ответы отличаются логической последовательностью, достаточной четкостью в выражении мыслей, возможно с не всегда полной обоснованностью выводов, и в целом демонстрируют знание общефизических и профессиональных дисциплин, умение применять на практике приобретенные навыки. 50-100 %-ное выполнение заданий
Незачет	Подготовка недостаточная и требует дополнительного изучения материала. Студент дает ошибочные ответы как на теоретические вопросы, так и на наводящие и дополнительные вопросы преподавателя, что говорит о недостатке знаний по общефизическим и профессиональным дисциплинам, отсутствии умения применять на практике приобретенные навыки. 0-50 %-ное выполнение заданий

## 6.3. Критерии и процедуры оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю), характеризующих этапы формирования компетенций.

Для оценивания результатов обучения в виде знаний используются следующие процедуры и технологии:

- индивидуальное собеседование,
- устные и/или письменные ответы на вопросы.

**Для оценивания результатов обучения в виде умений и владений используются следующие процедуры и технологии:**

- практические контрольные задания (далее – ПКЗ), включающие одну или несколько задач.

По сложности ПКЗ разделяются на простые (стандартные) и комплексные задания. Простые ПКЗ предполагают решение в одно или два действия, применяются для оценки умений. Комплексные задания (задания повышенной сложности) требуют поэтапного решения и развернутого ответа с применением нестандартных подходов к решению. Комплексные практические задания применяются для оценки владений. Критериями оценки результатов обучения являются индикаторы, приведённые в разделе 6.1. В зависимости от успешности выполнения данных критериев выставляется оценка «зачет» или «незачет».

6.4. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения, характеризующих этапы формирования компетенций и (или) для итогового контроля сформированности компетенции.

**Теоретические вопросы для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

- 1) Уравнение Дирака. Переход к нерелятивистскому приближению.
- 2) Лоренц-инвариантность уравнения Дирака.
- 3) Классические свободные поля. Лагранжиан. Теорема Нетер. Вектор энергии-импульса.
- 4) Непрерывные симметрии. Глобальная  $U(1)$  симметрия. Локальные симметрии и калибровочные поля.
- 5) Спонтанное нарушение симметрии. Голдстоуновские частицы. Эффект Хиггса.
- 6) Спинорное поле. Импульсное представление.
- 7) Электромагнитное поле. Калибровочная инвариантность и условие Лоренца.
- 8) Канонический формализм. Квантование скалярного поля. Фейнмановский пропагатор скалярного поля.
- 9) Квантование электромагнитного поля (калибровка излучения).
- 10) Квантование поля Дирака. Фейнмановский пропагатор.
- 11) Матрица рассеяния. Представления Шредингера, Гейзенберга. Представление взаимодействия.
- 12) Теория возмущений для  $S$ -матрицы.
- 13) Электромагнитное взаимодействие. Матричные элементы  $S$ -матрицы. Правила Фейнмана.
- 14) Нерелятивистская теория рассеяния. Борновское приближение.
- 15) Рассеяние электрона в кулоновском поле в низшем порядке теории возмущений.
- 16) Рассеяние электрона на электроне. Усреднение по спиновым поляризациям.
- 17) Комптоновское рассеяние.
- 18) Структура диаграмм матрицы рассеяния. Собственно-энергетические и вершинные диаграммы.

- 19) Эффективные линии. Уравнения Дайсона для функций Грина. Графическое уравнение для вершинной функции.
- 20) Перенормировка массы электрона.
- 21) Перенормировка заряда в КЭД. Перенормируемость квантовой электродинамики.

**Типовые задачи для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины:**

Для оценки сформированности компетенции ПК-3: готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований:

Задача 1.1

Для безмассового свободного спинорного поля написать плотность лагранжиана  $L$ , вывести уравнения движения, показать, что  $L$  инвариантен относительно киральных преобразований:  $\psi \rightarrow \exp(i\beta\gamma_5)\psi$ , ( $\beta$  – постоянная,  $\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$ ) и найти соответствующий сохраняющийся ток.

Задача 1.2

Для дираковского поля оператор заряда

$$\hat{Q} = \int d\vec{x} \hat{j}_0(\vec{x}, t), \text{ где } \hat{j}_\mu(\vec{x}, t) =: \hat{\bar{\psi}}(\vec{x}, t)\gamma_\mu\hat{\psi}(\vec{x}, t) :.$$

Показать, что  $\hat{\psi}_\alpha(\vec{x}, t)|0\rangle$  есть состояние с зарядом (-1).

Задача 1.3

Используя линейную подстановку, диагонализировать лагранжиан 2-х скалярных полей  $\varphi_1(x)$  и  $\varphi_2(x)$

$$L = L_0(\varphi_1, m_1) + L_0(\varphi_2, m_2) + g\varphi_1\varphi_2,$$

где  $g$  - константа связи, а  $L_0(\varphi, m) = \frac{1}{2}((\partial_\mu\varphi)(\partial^\mu\varphi) - m^2\varphi^2)$ ,  $m_1 > m_2$ .

Проведя каноническое квантование новых свободных полей, вычислить коммутатор

$$[\hat{\varphi}_1(x), \hat{\varphi}_2(x)].$$

Задача 1.4

В низшем порядке теории возмущений найти матричный элемент  $S_{fi}$  для упругого рассеяния скалярной частицы кулоновским потенциалом. Результат сравнить с соответствующим выражением для рассеяния электрона.

**6.5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания.**

Положение «О проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся в ННГУ», утверждённое приказом ректора ННГУ от 13.02.2014 г. №55-ОД,

Положение о фонде оценочных средств, утвержденное приказом ректора ННГУ от 10.06.2015 №247-ОД.

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины «Квантовая теория поля»

а) основная литература:

- 1) *Вайнберг С.* Квантовая теория полей, т.1. М., ФМЛ, 2015, 648 с. — Режим доступа: ЭБС «Лань» <https://e.lanbook.com/book/91164>

б) дополнительная литература:

1. *Цвеллик А.М.* Квантовая теория поля в физике конденсированного состояния. М., Физматлит, 2004, 320с. — Режим доступа: ЭБС «Лань» <https://e.lanbook.com/book/2714>

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы

- 1) Учебно-образовательная физико-математическая библиотека EqWorld <http://eqworld.ipmnet.ru/ru/library/physics/quantum.htm>
- 2) УрО РАН Лаборатория теоретической физики М.В.Садовский Лекции по квантовой теории поля, 2002 -379 с. [http://sadovski.iep.uran.ru/RUSSIAN/LTF/Q\\_fields.pdf](http://sadovski.iep.uran.ru/RUSSIAN/LTF/Q_fields.pdf)
- 3) Department of physic, University of California, Santa Barbara, Mark Srednicki Quantum Field Theory, 2006 -616 с. <http://web.physics.ucsb.edu/~mark/ms-qft-DRAFT.pdf>
- 4) Материалы кафедры общей ядерной физики физического факультета МГУ <http://nuclphys.sinp.msu.ru/books/ft/index.html>

## 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Для проведения лекций и практических занятий требуется типовое оборудование лекционной аудитории.

Для подготовки самостоятельных контрольных работ и для их графического представления (если это необходимо), а также для расширения коммуникационных возможностей студенты имеют возможность работать в компьютерных классах с соответствующим лицензионным программным обеспечением и выходом в Интернет.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО с учетом рекомендаций и ОПОП ВПО по направлению 03.03.02 «Физика», профиль «Фундаментальная физика».

Авторы \_\_\_\_\_ Г.М. Максимов

Рецензент \_\_\_\_\_ В.А. Бурдов

Программа одобрена на заседании методической комиссии факультета «Высшая школа общей и прикладной физики»

от \_\_\_\_\_ года, протокол № \_\_\_\_\_.

Председатель методической комиссии \_\_\_\_\_ А.М. Фейгин