

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>ПК-3 готовность применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований (этап освоения – завершающий)</p>	<p><i>31 (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				
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы				Самостоятельная работа обучающегося, часы
		из них				
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
Тема 1. Релятивистские уравнения	7	2	3		5	2
Тема 2. Классические поля: лагранжева формулировка, динамические инварианты, теорема Нетер	7	2	3		5	2
Тема 3. Глобальные и локальные симметрии	7	2	3		5	2
Тема 4. Спонтанное нарушение симметрии	7	2	3		5	2
Тема 5. Каноническое квантование полей. Скалярное поле	7	2	3		5	2
Тема 6. Квантовое спинорное поле	6	1	3		4	2
Тема 7. Квантование электромагнитного поля. Эффект Казимира	6	1	3		4	2
Тема 8. Взаимодействующие поля. Матрица рассеяния	6	1	3		4	2
Тема 9. Рассеяние электронов и позитронов внешним полем	6	1	3		4	2
Тема 10. Сечение рассеяния фотона электроном в низшем порядке теории возмущений	6	1	3		4	2
Тема 11. 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 φ_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 антикоммутационные 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

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

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: $\psi \rightarrow \exp(i\beta\gamma_5)\psi$, (β – 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

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

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. *Цвелик 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
- 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