

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет  
им. Н.И. Лобачевского»

УТВЕРЖДЕНО  
решением  
Ученого совета ННГУ  
протокол от  
«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ г. № \_\_\_\_\_

**Рабочая программа дисциплины**

Квантовая теория поля

(наименование дисциплины (модуля))

Уровень высшего образования

магистратура

(бакалавриат / магистратура / специалитет)

Направление подготовки / специальность

03.04.02 Физика

(указывается код и наименование направления подготовки / специальности)

Направленность образовательной программы

магистерская программа "Квантовые и нейроморфные технологии"

(указывается профиль / магистерская программа / специализация)

Квалификация (степень)

магистр

(бакалавр / магистр / специалист)

Форма обучения

Очная

(очная / очно-заочная / заочная)

Год начала обучения

2023

(для обучающихся какого года начала обучения разработана Рабочая программа)

Нижний Новгород

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

Дисциплина «Квантовая теория поля» относится к вариативной части Б1.В блока Б1 «Дисциплины (модули)», является элективной дисциплиной, преподается на втором году обучения, в третьем семестре.

Целями освоения дисциплины «Квантовая теория поля» 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.

## **2. Структура и содержание дисциплины**

Объем дисциплины «Квантовая теория поля» составляет 4 зачетные единицы, всего 144 часа, из которых 50 часов составляет контактная работа обучающегося с преподавателем (2 часа – мероприятия промежуточной аттестации; 16 часов занятия лекционного типа, 32 часа занятия семинарского типа (практические занятия), в том числе 2 часа – мероприятия текущего контроля успеваемости), 94 часа составляет самостоятельная работа обучающегося (49 часов самостоятельная работа в течение семестра, 45 часов самостоятельная работа при подготовке к промежуточной аттестации).

Содержание дисциплины «Квантовая теория поля»

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В том числе				
		контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) в течение семестра, часы, из них				Самостоятельная работа в течение семестра, часы
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Занятия лабораторного типа	Всего	
<b>1. Релятивистские уравнения.</b> Уравнение Клейна-Гордона. Уравнение Дирака. Доказательство ковариантности уравнения Дирака. Плоские волны.	11	3	3	—	6	5
<b>2. Классические поля.</b> Лагранжева формулировка, динамические инварианты, теорема Нетер, Нетеровский ток. Скалярное действительное поле. Скалярное комплексное поле.	11	3	3	—	6	5
<b>3. Глобальные и локальные симметрии.</b> Электромагнитное поле. Калибровочная инвариантность	11	3	3	—	6	5
<b>4. Спонтанное нарушение симметрии.</b> Теорема Голдстоуна. Голдстоуновские частицы. Эффект Хиггса.	12	3	3	—	6	6
<b>5. Каноническое квантование полей.</b> Квантование скалярного действительного поля, квантование скалярного комплексного поля. Пропагатор для скалярного поля. Запись операторов в нормальной форме.	9	2	2	—	4	5
<b>6. Квантовое спинорного поля.</b> Спинорное поле. Коммутатор полей.	12	3	3	—	6	6
<b>7. Квантование электромагнитного поля.</b> Калибровка излучения. Спин фотона. Эффект Казимира. Фейнмановский пропагатор для поперечных фотонов.	11	3	3	—	6	5
<b>8. Взаимодействующие поля. Матрица рассеяния.</b> Представление взаимодействия.	12	3	3	—	6	6

Теория возмущений для S-матрицы. Порядки теории рассеяния. Расчет матричных элементов в низшем порядке теории возмущений.						
<b>9.Рассеяние электронов и позитронов внешним полем.</b> Высшие порядки теории возмущений. Расчет матричных элементов S матрицы. Фейнмановские диаграммы. Правила Фейнмана.	12	3	3	—	6	6
<b>10. Эффект Комптона.</b> Сечение рассеяния фотона электроном в низшем порядке теории возмущений. Формула Клейна-Нишины. Формула Резерфорда.	11	3	3	—	6	5
<b>11. Перенормировка массы и заряда электрона.</b> Собственные энергетические диаграммы. Уравнения Дайсона. Поляризация вакуума.	12	3	3	—	6	6
<b>В т.ч. текущий контроль</b>	2	2				—
Промежуточная аттестация – экзамен						

### 3. Образовательные технологии

- 1) Чтение лекций;
- 2) сопровождение лекций написанием и выводом формул, построением графиков, изображением рисунков на доске;
- 3) методика «вопросы и ответы»;
- 4) выполнение практического задания у доски;
- 5) индивидуальная работа над практическим заданием;
- 6) работа в парах над практическим заданием;
- 7) работа в малых группах над практическим заданием;
- 8) методика «мозговой штурм».

### 4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы обучающихся

Самостоятельная работа обучающихся предполагает изучение конспектов лекций, выделенных разделов основной литературы, а также дополнительной литературы, выполнение практических заданий, отвечающих изучаемым разделам дисциплины, подготовку к промежуточной аттестации.

Перечень основной и дополнительной литературы для самостоятельного изучения приведен в п. 7 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Контрольные вопросы для промежуточной аттестации, примеры практических заданий приведены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

Формируемые компетенции	Планируемые результаты обучения по дисциплине
<p><b>ПК-3</b></p> <p>Способен свободно владеть разделами физики и применять результаты научных исследований в профильных областях для решения научно-практических и научно-технологических задач</p>	<p>(ПК-3) <b>Знать</b> принципы применения аппарата квантовой теории поля в приложении к практическим задачам в рамках профессиональной деятельности.</p> <p>(ПК-3) <b>Уметь</b> формулировать задачи в рамках профильных физических и математических дисциплин, требующие для своего решения знания методов квантовой теории поля.</p> <p>(ПК-3) <b>Владеть</b> навыками постановки и решения основных типов задач, требующих привлечения теоретико-полевых методов.</p>

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

### 6.1. Описание шкал оценивания результатов обучения по дисциплине

Промежуточной аттестацией для дисциплины «Квантовая теория поля» является **экзамен**.

По итогам экзамена выставляется оценка по семибалльной шкале: оценки «Плохо» и «Неудовлетворительно» означают отсутствие аттестации, оценки «Удовлетворительно», «Хорошо», «Очень хорошо», «Отлично» и «Превосходно» выставляются при успешном прохождении аттестации.

### 6.2. Процедуры и критерии оценивания результатов обучения по дисциплине

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

- индивидуальное собеседование (промежуточная аттестация).

Контрольные вопросы для индивидуального собеседования представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

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

- выполнение практических заданий (текущий контроль, промежуточная аттестация).

Примеры практических заданий для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации представлены в п. 6.3 настоящей Рабочей программы дисциплины.

Критериями оценивания являются полнота знаний, наличие умений и владений (навыков), перечисленных в п. 5 настоящей Рабочей программы дисциплины.

**«Плохо»** – обучающийся не продемонстрировал никаких знаний об основных теоретических разделах курса, не показал никаких умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Неудовлетворительно»** – обучающийся не продемонстрировал представления об основных теоретических разделах курса, не показал минимально допустимый уровень умений и навыков выполнения практических заданий;

**«Удовлетворительно»** – обучающийся продемонстрировал изложение формулировок основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий базового уровня сложности;

**«Хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение основных теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Очень хорошо»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение практически всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения стандартных практических заданий;

**«Отлично»** – обучающийся продемонстрировал связное изложение всех теоретических положений курса и успешно показал умения и навыки выполнения практических заданий повышенного уровня сложности;

**«Превосходно»** – обучающийся продемонстрировал уровень знаний в объеме, превышающем стандартную программу подготовки, и продемонстрировал творческий подход к выполнению практических заданий повышенного уровня сложности.

### 6.3. Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки результатов обучения

6.3.1. При проведении промежуточной аттестации обучающимся предлагаются следующие контрольные вопросы, охватывающие программу дисциплины «Квантовая теория поля»:

- 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) Комptonовское 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.

6.3.2. Примеры практических заданий для практических занятий, самостоятельной работы обучающихся, проведения текущего контроля и промежуточной аттестации:

#### 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.

### Задача 1.5.

В системе покоя электрона, имеющего волновую функцию

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

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

### Задача 1.6.

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 1.7.

Используя разложение спинорного поля в импульсном пространстве и антикоммутиационные 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 1.8.

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

## 6.4. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания

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

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

## 7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

### а) основная литература:

1. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В., Введение в теорию квантовых полей. М.: Наука, 1984. – 597 с. Фонд ФБ ННГУ: 4 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=70905>.

М.: Наука, 1976. – 480 с. Фонд ФБ ННГУ: 3 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=67737>.

2. Бьеркен Дж.Д., Дрелл С.Д., Релятивистская квантовая теория : [в 2 т.] – М.: Наука, 1978.

т. 1, 295 с. Фонд ФБ ННГУ: 4 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=67744>;

т. 2, 407 с. Фонд ФБ ННГУ: 4 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=67743>.

### б) дополнительная литература:

1. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б., Квантовая электродинамика. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1981. – 431 с. Фонд ФБ ННГУ, 3 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=19214>.

2. Ициксон К., Зюбер Ж.-Б., Квантовая теория поля. – М.: Мир, 1984.

т. 1, 448 с. Фонд ФБ ННГУ: 3 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=67765>;

т. 2, 400 с. Фонд ФБ ННГУ: 3 экз.

<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=67766>.

3. Пескин М.Е, Шредер Д.В., Введение в квантовую теорию поля. – М.: Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 784 с. Фонд ФБ ННГУ: 3 экз.  
<http://www.lib.unn.ru/php/details.php?DocId=57195>.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

Интернет-ресурсы Фундаментальной библиотеки ННГУ  
<http://www.lib.unn.ru/>.

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

Материально-техническое обеспечение дисциплины обусловлено наличием учебных аудиторий для проведения занятий, оборудованных специализированной мебелью, меловыми или магнитно-маркерными досками для представления учебной информации большой аудитории. Ресурс мела и маркеров для доски в учебных аудиториях регулярно возобновляется.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся (на базе Фундаментальной библиотеки ННГУ) оснащены компьютерной техникой с подключением к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду ННГУ.

Программа составлена в соответствии с требованиями федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика.

Автор(ы):

доцент кафедры теоретической физики  
физического факультета,

к. ф.-м. н., доцент \_\_\_\_\_ / Максимова Г.М. /

Рецензент(ы):

Зав. кафедрой теоретической физики  
физического факультета,

д. ф.-м. н., доцент \_\_\_\_\_ / Бурдов В.А. /

Программа одобрена на заседании Учебно-методической комиссии  
физического факультета ННГУ от «\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202\_ года, протокол  
№ б/н.

Председатель

Учебно-методической комиссии

физического факультета ННГУ \_\_\_\_\_ / Перов А.А. /