

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)

Нижегород

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	
1. Релятивистские уравнения. Уравнение Клейна-Гордона. Уравнение Дирака. Доказательство ковариантности уравнения Дирака. Плоские волны.	11	3	3	–	6	5
2. Классические поля. Лагранжева формулировка, динамические инварианты, теорема Нетер, Нетеровский ток. Скалярное действительное поле. Скалярное комплексное поле.	11	3	3	–	6	5
3. Глобальные и локальные симметрии. Электромагнитное поле. Калибровочная инвариантность	11	3	3	–	6	5
4. Спонтанное нарушение симметрии. Теорема Голдстоуна. Голдстоуновские частицы. Эффект Хиггса.	12	3	3	–	6	6
5. Каноническое квантование полей. Квантование скалярного действительного поля, квантование скалярного комплексного поля. Пропагатор для скалярного поля. Запись операторов в нормальной форме.	9	2	2	–	4	5
6. Квантовое спинорного поля. Спинорное поле. Коммутатор полей.	12	3	3	–	6	6
7. Квантование электромагнитного поля. Калибровка излучения. Спин фотона. Эффект Казимира. Фейнмановский пропагатор для поперечных фотонов.	11	3	3	–	6	5
8. Взаимодействующие поля. Матрица рассеяния. Представление взаимодействия.	12	3	3	–	6	6

Теория возмущений для S-матрицы. Порядки теории рассеяния. Расчет матричных элементов в низшем порядке теории возмущений.						
9. Рассеяние электронов и позитронов внешним полем. Высшие порядки теории возмущений. Расчет матричных элементов S матрицы. Фейнмановские диаграммы. Правила Фейнмана.	12	3	3	–	6	6
10. Эффект Комптона. Сечение рассеяния фотона электроном в низшем порядке теории возмущений. Формула Клейна-Нишины. Формула Резерфорда.	11	3	3	–	6	5
11. Перенормировка массы и заряда электрона. Собственные энергетические диаграммы. Уравнения Дайсона. Поляризация вакуума.	12	3	3	–	6	6
В т.ч. текущий контроль	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 style="text-align: center;">ПК-3</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) Знать принципы применения аппарата квантовой теории поля в приложении к практическим задачам в рамках профессиональной деятельности.</p> <p>(ПК-3) Уметь формулировать задачи в рамках профильных физических и математических дисциплин, требующие для своего решения знания методов квантовой теории поля.</p> <p>(ПК-3) Владеть 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: $\psi \rightarrow \exp(i\beta\gamma_5)\psi$, (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

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

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 спиновое состояние описывается двухкомпонентным спинором φ_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 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 1.8.

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

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. /