

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:  
Декан физического факультета

 С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.



Рабочая программа дисциплины

**Принципы квантовой теории поля**

по направлению подготовки

**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная физика»**

Форма обучения  
**Очная**


Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2021**

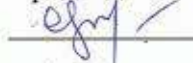
Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.01.15

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

## **1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК 2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1 – Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-2.2 – Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные;

ИПК-1.1 – Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования .

## **2. Задачи освоения дисциплины**

- Освоить понятийный аппарат и методы квантовой теории поля.
- Научиться применять понятийный аппарат и методы квантовой теории поля для решения практических задач профессиональной деятельности.

## **3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы**

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, входит в модуль по выбору «Теоретическая и математическая физика».

## **4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине**

Семестр 8, экзамен.

## **5. Входные требования для освоения дисциплины**

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для изучения и понимания материала данной дисциплины обучающийся должен владеть методами математической физики, классической теории поля, релятивистской механики.

## **6. Язык реализации**

Русский

## **7. Объем дисциплины (модуля)**

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 з.е., 108 часов, из которых:

- лекции: 24 ч.;
- практические занятия: 24 ч.;
- в том числе практическая подготовка: 24 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

## **8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам**

Тема 1. Введение в предмет. Метод канонического квантования. Естественная система единиц.

Достижения и проблемы релятивистской квантовой теории поля. Каноническое квантование бозевских релятивистских моделей.

Тема 2. Состояния in и out. Уравнение Липпмана – Швингера. S- матрица.

Постановка задачи рассеяния. Вывод уравнений Липпмана-Швингера. Определение S-матрицы.

Тема 3. Унитарность, пуанкаре-инвариантность и внутренние симметрии S-матрицы.

Формальное доказательство унитарности S-матрицы. Закон преобразования элементов S-матрицы под действием преобразований Пуанкаре. Закон преобразования элементов S-матрицы под действием внутренних симметрий.

Тема 4. Сечения и вероятности. Оптическая теорема. H-теорема Больцмана. Операторы рождения и уничтожения.

Связь S-матрицы с сечением рассеяния. Доказательство оптической теоремы.

Доказательство H-теоремы Больцмана для разреженного газа частиц. Тождественность частиц. Определение операторов рождения-уничтожения.

Тема 5. Связные амплитуды и принцип кластерного разложения. Теория возмущений для S-матрицы. Принцип микропричинности.

Определение связной части S-матрицы. Формулировка принципа кластерного разложения. Доказательство критерия выполнения принципа кластерного разложения. Построение ряда теории возмущений для S-матрицы.

Тема 6. Реализация релятивистской симметрии на квантованных полях. Античастицы как следствие микропричинности.

Квантовые поля как базис для построения релятивистской квантовой теории поля. Положительно и отрицательно-частотные части квантового поля. Античастицы.

Тема 7. Квантованное скалярное поле.

Построение квантовой теории скалярного поля.

Тема 8. Квантованное комплексное скалярное поле.

Построение квантовой теории комплексного скалярного поля. Заряд.

Тема 9. Квантованное спинорное поле.

Построение квантовой теории спинорного поля.

Тема 10. Квантованные поля произвольного спина. Теорема о связи спина и статистики.

Построение квантовой теории поля произвольно спина. Доказательство теоремы о связи спина и статистики.

Тема 11. Каноническое квантование электромагнитного поля по Гупта – Блейеру.

Построение квантовой теории безмассового поля спина 1. Калибровочная инвариантность.

Тема 12. Правила Фейнмана. Диаграммы Фейнмана в координатном представлении. Вывод правил Фейнмана в координатном представлении. Комбинаторные и знаковые множители.

Тема 13. Фейнмановские пропагаторы. Правила Фейнмана в импульсном представлении.

Вывод явного выражения для фейнмановского пропагатора поля произвольного спина. Вывод правил Фейнмана в импульсном представлении.

Тема 14. Классификация фейнмановских диаграмм.

Топологические свойства диаграмм Фейнмана.

Тема 15. Примеры расчетов S-матрицы в древесном приближении.

Древесная амплитуда перехода для процесса два в два.

Тема 16. Правила Фейнмана при наличии источников. Корреляционные функции. Правила Фейнмана для вычисления функций Грина. Корреляционные функции. Вычисление элементов S-матрицы с помощью корреляционных функций. Производящий функционал функций Грина. Производящий функционал связных функций Грина. Производящий функционал вершинных функций Грина (эффективное действие).

## 9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения контрольных работ, заданий и тестов по материалам курса, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение контрольных заданий – 40, тестов – 10. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

## 10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

**Экзамен в 8 семестре** проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Результаты экзамена определяются оценкой, исходя из результатов ответов на экзамене (60%) и текущей аттестации в течение семестра (40%) в соответствии с балльной шкалой оценивания: количество набранных баллов более 80 — «отлично», от 65 до 79 — «хорошо», от 50 до 64 — «удовлетворительно, менее 50 баллов — «неудовлетворительно».

Экзаменационный билет состоит из двух частей.

Первая часть содержит основной вопрос, проверяющий сформированность компетенции ИПК 1.1 в соответствии с индикатором ИОПК 2.2. Ответы даются в развернутой форме, включая практические задачи.

Вторая часть содержит дополнительный вопрос из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющий соответствие индикатору достижения компетенции ИОПК 2.2. Ответ на вопрос второй части дается в краткой форме, включающей краткую интерпретацию полученных результатов.

Примерный перечень теоретических вопросов

Вопрос 1. Связная часть  $S$ -матрицы и принцип кластерного разложения.

Вопрос 2. Квантованное комплексное скалярное поле.

Дополнительные вопросы.

Вопрос 1. Привести выражения для оператора 4-импульса и заряда комплексного скалярного поля.

Вопрос 2. Дать определение операторов рождения-уничтожения.

## 11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронные учебные курсы по дисциплине в электронном университете «Moodle»: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21962>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Перечень вопросов, выносимых на экзамен в 8 семестре.

1. Метод канонического квантования в теории поля
2. Рассеяние в квантовой теории. Состояния ин и аут.
3.  $S$ -матрица и  $S$ -оператор. Определение и основные свойства.
4. Пуанкаре-инвариантность  $S$ -матрицы. Реализация пуанкаре-инвариантности  $S$ -матрицы в теории поля.
5. Внутренние симметрии  $S$ -матрицы. Реализация в теории поля.
6. Сечения рассеяния и вероятности переходов.
7. Операторы рождения и уничтожения.
8. Связные амплитуды и принцип кластерного разложения. Реализация в квантовой теории поля.
9. Производящий функционал  $S$ -матрицы. Формула Майера.
10. Ряд теории возмущений для  $S$ -матрицы. Явная пуанкаре-инвариантность ряда.
11. Поля рождения, уничтожения и коэффициентные функции.
12. Квантованные поля. Античастицы как следствие причинности.
13. Квантованное скалярное поле.

14. Каноническое квантование модели вещественного скалярного поля.
15. Каноническое квантование модели комплексного скалярного поля.
16. Квантованное спинорное поле.
17. Каноническое квантование модели спинорного поля.
18. Теорема о связи спина и статистики. Равенство масс частиц и античастиц.
19. Каноническое квантование электромагнитного поля по Гупта-Блейеру.
20. Вывод и формулировка правил Фейнмана в координатном представлении.
21. Фейнмановские пропагаторы.
22. Вывод и формулировка правил Фейнмана в импульсном представлении.
23. Связные диаграммы Фейнмана как вклады в связную часть S-матрицы.
24. Разложение по числу петель и его связь с разложением по константам связи в теории поля.
25. Древесное приближение для двухчастичного рассеяния фермионов в модели Юкавы. Потенциал Юкавы.
26. Правила Фейнмана при наличии источников. Связь с корреляционными функциями.
27. n-точечные функции Грина. Редукционные формулы. Производящий функционал функций Грина.
28. Связные функции Грина. Производящий функционал связных функций Грина. Формула Майера.
29. Производящий функционал вершинных функций Грина. Эффективное действие.

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Каноническое квантование заряженного скалярного поля.
2. Построение борновского ряда для решений уравнения Липпмана-Швингера.
3. Закон сохранения энергии импульса как следствие трансляционной инвариантности.
4. Закон сохранения заряда в моделях КТП.
5. Доказательство основных свойств операторов рождения-уничтожения.
6. Вывод связи инвариантной амплитуды рассеяния с дифференциальным сечением в лабораторной системе отсчета.
7. Доказательство формулы Майера.
8. Нестационарная теория возмущений для S-матрицы. T-экспонента.
9. Доказательство выполнения принципа микропричинности для квантовых полей.
10. Энергия-импульс, угловой момент и оператор заряда для заряженного комплексного поля.
11. Энергия-импульс, угловой момент и оператор заряда для дираковского поля.
12. Энергия-импульс, угловой момент для истинно нейтральных полей.
13. Доказательство теоремы о связи спина со статистикой.
14. Описание физических состояний электромагнитного поля в методе квантования по Гупта-Блейеру.
15. Вывод выражения для пропагатора фермионных полей. Доказательство формул для комбинаторного множителя и знака диаграммы Фейнмана.
16. Переход от координатного к импульсному представлению в диаграммах Фейнмана. Топологические свойства диаграмм Фейнмана.
17. Амплитуда рассеяния двух фермионов в два фермиона, взаимодействующих юкавским образом.
18. Вывод правил Фейнмана для функций Грина.
19. Доказательство формулы Майера для производящего функционала связных функций Грина.
20. Преобразование Лежандра и одночастично-неприводимые диаграммы.

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Самостоятельная работа студента включает:

- углубленное теоретическое изучение разделов курса при подготовке к лекционным и

- практическим занятиям;
- подготовку к обсуждению материала, в том числе самостоятельный поиск необходимых источников информации, включая научно-образовательные ресурсы сети Интернет;
- подготовку к экзаменам.

Вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение.

1. Спонтанное нарушение глобальной симметрии. Теорема Годстоуна.
2. Спонтанное нарушение калибровочной симметрии. Механизм Хиггса.
3. Квантование спинорной электродинамики в кулоновской калибровке.
4. СРТ-теорема.

Темы для рефератов и учебно-методическая литература для самостоятельной работы по разделам дисциплины «Принципы квантовой теории поля»:

Тема 1. Аксиоматическая квантовая теория поля

Литература:

- 1) Боголюбов Н. Н., Логунов А. А., Годоров И. Т. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля. — М.: Наука, 1969. — 424 с.
- 2) Стритер Р., Вайтман А. РСТ, спин и статистика и всё такое. — М.: Наука, 1966. — 251 с.
- 3) Йост Р. Общая теория квантованных полей. — М.: Мир, 1967. — 236 с.

Тема 2. Конструктивная квантовая теория поля.

Литература:

- 1) Jaffe A. Constructive Quantum Field Theory Mathematical Physics 2000: 111–127
- 2) Baez J. Introduction to algebraic and constructive quantum field theory. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1992.

Тема 3. Алгебраическая квантовая теория поля.

Литература:

- 1) Haag R., Kastler D. An algebraic approach to quantum field theory, Journal of Mathematical Physics, 5: 848–861 (1964)
- 2) Haag R. Local quantum physics, Texts and Monographs in Physics (2nd ed.), Berlin, New York: Springer-Verlag, 1996.

## 12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. С. Вайнберг. Квантовая теория полей (в 3-х томах). Т.1-2//пер с англ. под ред. Б.Л. Воронова, 2001 г; электронная версия; пер с англ. под ред. В.Ч. Жуковского, М., Физматлит. 2003 г. 648 с.
2. М. Пескин, Д. Шредер. Введение в квантовую теорию поля//Москва-Ижевск. РХД (Регулярная и хаотическая динамика). 2001. 784 с.
3. К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер. Квантовая теория поля (в 2-х томах)//М. Мир. 1984. 448+400 с.
4. Л. Райдер. Квантовая теория поля//М. Мир. 1987. 512 с.; Волгоград. Платон. 1998. 512 с.
5. Дж. Д. Бьеркен, С.Д. Дрелл. Релятивистская квантовая теория. Том 2. Релятивистские квантовые поля//М. Наука. 1978. 408 с.
6. П. Рамон. Теория поля//М. Мир. 1984. 332 с.; М. Бибфизмат. 1995. 332 с.

б) дополнительная литература:

1. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Введение в теорию квантованных полей//М. Наука. 1973. 416 с.
2. Н.Н. Боголюбов, А.А. Логунов, И.Т. Годоров. Основы аксиоматического подхода в квантовой теории поля//М. Наука. 1969. 424 с.
3. Б.С. Девитт. Динамическая теория групп и полей//М. Наука. 1987. 288 с.
4. W. Siegel. Fields.//<http://xxx.lanl.gov/e-print/hep-th/9912205>. 738 p.
5. А.Н. Кушниренко. Введение в квантовую теорию поля//М. Высшая школа. 1983. 319 с.

6. С. Швебер. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля//М. Ин.лит. 1963. 842 с.
7. П.А.М. Дирак. Лекции по квантовой теории поля//М. Мир. 1971. 243 с.; М. Меркурий-ПРЕСС. 2000. 242 с.
8. В. Паули. Общие принципы волновой механики//Москва-Ленинград. ОГИЗ. 1947. 332 с.
9. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика//М. Наука. 1989. 723 с.
10. А.И. Ахиезер, В.Б. Берестецкий. Квантовая электродинамика//М. Наука. 1981. 432 с.
11. В.Н. Грибов. Квантовая электродинамика//Москва-Ижевск. РХД. 2001. 288 с.
12. Р. Фейнман. Квантовая электродинамика//М. Мир. 1964. 219 с.; Новокузнецк. НФМИ. 2000. 218 с.
13. Р. Фейнман. Теория фундаментальных процессов//М. Наука. 1978. 199 с.
14. Г.А. Сарданашвили. Современные методы теории поля (в 4-х томах)//М. УРСС. 1996-1999. 4+167+214+ с.
15. Дж. Коллинз. Перенормировка//М. Мир. 1988. 446 с.
16. John Collins. The problem of scales: renormalization and all that//  
<http://xxx.lanl.gov/e-print/hep-ph/9510276>. 52 p.
17. О.И. Завьялов. Перенормированные диаграммы Фейнмана//М. Наука. 1979. 317 с.

в) ресурсы сети Интернет:

<http://arxiv.org> База электронных препринтов: разделы hep-th, hep-ph, qr-qc.

<http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/qft.html>. Кэмбриджские лекции по квантовой теории поля.

<https://www.physics.harvard.edu/events/videos/Phys253>. Гарвардские лекции С. Колмена по квантовой теории поля.

### 13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –

<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –

<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

### 14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате, оснащенные системой («Актру»).

## **15. Информация о разработчиках**

Казинский Петр Олегович, доктор физико-математических наук, доцент, кафедра квантовой теории поля физического факультета ТГУ, профессор.