

Белорусский государственный университет

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе

А.Л. Толстик

(подпись)

08.08.2017

(дата утверждения)

Регистрационный № УД- 4356 /уч.

## **КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ПОЛЕЙ**

**Учебная программа учреждения высшего образования**

**по учебной дисциплине для специальности**

**1-31 04 01 Физика (по направлениям),**

**направлению специальности**

**1-31 04 01-01 Физика (научно-исследовательская деятельность)**

Минск 2017 г.

Учебная программа составлена на основе Образовательного стандарта ОСВО 1-31 04 01-2013, утвержденного и введенного в действие постановлением Министерства образования Республики Беларусь от 30.08. 2013 № 88; учебных планов №G31-163/уч., №G31и-174/уч., утвержденных 30.05.2013.

**СОСТАВИТЕЛИ:**

**В.И. Кувшинов**- профессор кафедры теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, профессор;

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ**

Кафедрой теоретической физики и астрофизики Белорусского государственного университета (протокол № 8 от 02.05.2017 г.);

Советом физического факультета Белорусского государственного университета (протокол № 8 от 08.06.2017 г.);

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Цель учебной дисциплины “Квантовая теория калибровочных полей” - изучение физических основ квантовой теории одного из самых глубоких понятий современной физики элементарных частиц, физики высоких энергий и ядерной физики- калибровочных полей (полей Янга – Миллса, переносчиков взаимодействий), составляющих на основе принципа калибровочной инвариантности, единую симметричную основу всех известных типов фундаментальных взаимодействий: электромагнитного, слабого, сильного и гравитационного, а также теории струн и мембран, их групповой структуры, геометрической интерпретации калибровочных полей, квантования на основе метода континуального интегрирования (интегралов по траекториям), асимптотической свободы, конфайнмента (запирания цветных кварков и глюонов), спонтанного нарушения симметрии и генерации массы изначально безмассовых элементарных частиц, механизма Хиггса, диаграммной техники, перенормировки калибровочных теорий, ренормгруппового анализа, квантовых аномалий, стандартной модели физики элементарных частиц, квантовой хромодинамики, теории струн и мембран. Универсальность подхода и его широкое использование (в теории слабых, сильных, гравитационных взаимодействий, теории струны и мембраны) делает эту информацию исключительно важной и необходимой для физика-теоретика.

Задачей учебной дисциплины “Квантовая теория калибровочных полей” является формирование у студентов понимания того, как фундаментальные закономерности квантовой теории калибровочных полей находят широкое применение в современных исследованиях, включая исследования на Большом адронном коллайдере и других ускорительных установках, вычислениях, экспериментальных и информационных технологиях. При построении курса особое внимание обращается на разъяснение принципиальных основ квантовых калибровочных полей, на неразрывную связь фундаментальных квантовых понятий с процессом измерения и описания, на глубокую связь квантовых и классических представлений современной физики калибровочных полей переносчиков взаимодействия и элементарных частиц источников полей.

Математической и методической базой курса являются все разделы курса математики и теоретической физики, изученные студентами ранее, и, прежде всего, курс «Квантовая механика» и специальных курсов по примыкающей тематике.

В результате изучения учебной дисциплины студент должен: знать: принцип калибровочной инвариантности полевых лагранжианов взаимодействия, калибровочные поля на основе неабелевых групп Ли, калибровочно - инвариантный лагранжиан и действие, квантование калибровочного поля на основе континуальных интегралов, правила Фейнмана в

ковариантных калибровках, духи Фаддеева-Попова, ультрафиолетовые расходимости, перенормируемость калибровочных теорий, ренормгруппа, асимптотическая свобода, квантовые аномалии, особенности вычислений в КЭД, стандартной модели, КХД, пертурбативная КХД, топологические аспекты КХД, инстантоны, непертурбативная КХД, основы теории конформного инварианта, решеточная КХД, основы калибровочной теории струны и мембраны:

уметь: строить калибровочно-инвариантные (ковариантные) лагранжианы для неабелевых групп Ли симметрии, проводить вычисления континуальных интегралов в рамках диаграммной техники и непертурбативных вычислений, проводить перенормировку массы, заряда, волновой функции, вычислять амплитуды основных процессов взаимодействия калибровочных полей и полей источников;

владеть: системными понятиями квантовой теории калибровочных полей, сравнительным анализом различных аспектов и подходов к квантовой теории поля, пониманием роли и места квантовой теории поля среди других разделов современной теоретической физики.

Связь с другими дисциплинами (лучше всего с читаемыми нашей кафедрой): Квантовая оптика, квантовая электродинамика, Функциональное интегрирование в квантовой теории, Математические методы теоретической физики

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

- Уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач.
- Владеть системным и сравнительным анализом.
- Владеть исследовательскими навыками.
- Уметь работать самостоятельно.
- Быть способным порождать новые идеи (обладать креативностью).
- Владеть междисциплинарным подходом при решении проблем.
- Иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером.
- Обладать навыками устной и письменной коммуникации.
- Уметь учиться, повышать свою квалификацию в течение всей жизни.
- Быть способным к социальному взаимодействию.
- Обладать способностью к межличностным коммуникациям.
- Быть способным к критике и самокритике.
- Уметь работать в команде.
- Применять знания теоретических и экспериментальных основ физики, современных технологий и материалов, методы исследования физических объектов, методы измерения физических величин, методы автоматизации эксперимента.
- Использовать новейшие открытия в естествознании, методы научного анализа, информационные образовательные технологии, физические осно-

вы современных технологических процессов, научное оборудование и аппаратуру.

– Проводить планирование и реализацию физического эксперимента, оценивать функциональные возможности сложного физического оборудования.

– Пользоваться глобальными информационными ресурсами, компьютерными методами сбора, хранения и обработки информации, системами автоматизированного программирования, научно-технической и патентной литературой.

– Осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям.

– Применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-исследовательской, научно-производственной и научно-педагогической работы.

Применять знания физических основ современных технологий, средств автоматизации, методов планирования и организации производства, правового обеспечения хозяйственной деятельности и налоговой системы, современного предпринимательства, государственного регулирования экономики и экономической политики.

Общее количество часов, отводимое на изучение учебной дисциплины – 64; из них количество аудиторных часов — 38.

Форма получения высшего образования — очная, дневная,

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и управляемой самостоятельной работы. На проведение лекционных занятий отводится 32 часа, на управляемую самостоятельную работу — 6 часов.

Занятия проводятся на 5-м курсе в 9-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине — зачет.

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. **Общие принципы квантования волновых полей.** Современная иерархия калибровочных полевых моделей. Операторная природа функций поля. Каноническое квантование. Теорема Паули о связи спина и статистики (примеры). Континуальный интеграл по фазовому пространству в квантовой механике, квантовой теории поля, функции Грина (примеры). Эквивалентность двух способов квантования. S-матрица, теория возмущений, диаграммы Феймана в методе функционального интегрирования. Ферми поля (примеры).
2. **Квантование калибровочных полей.** Лагранжева и гамильтонова формулировка теории калибровочных полей; трудности квантования. Различные типы калибровок. Метод квантования Фаддеева-

Попова (КЭД, КХД, Янг-Миллс). Правила Фейнмана в ковариантных калибровках. Души Фаддеева-Попова. Тождества Уорда. BRST-инвариантность. Взаимодействие с полями материи.

3. **Перенормировка калибровочных теорий.** Ультрафиолетовые расходимости. Подсчет степеней расходимости. Классификация расходящихся диаграмм (примеры). Методы регуляризации. Перенормировка массы заряда, волновой функции. Введение контрчленов. Доказательство перенормируемости калибровочных теорий. Ренормгруппа. Бегущая константа связи. Уравнение Каллана-Симанчика (КЭД, КХД, (4-теория)). Асимптотическая свобода калибровочных теорий (примеры).
4. **Квантовые аномалии.** Симметрии и сохраняющиеся токи в классике. Регуляризации и возникновение аномалий (примеры). Классификация аномалий. Вычисление аномалий (примеры). Сокращение аномалий как конструктивный принцип. Некоторые математические аспекты теории аномалий.
5. **Квантовая хромодинамика. Сильные взаимодействия.** Калибровочная инвариантность, перенормируемость, симметрии КХД Ренормгрупповой анализ. Асимптотическая свобода. Скейлинг. Топологические аспекты КХД. Топологический заряд. Пертурбативная КХД. Партоновая модель. Непертурбативная КХД. КХД на решетке. Конфайнмент. Критерии конфаймента.
6. **Основы калибровочной полевой теории струны.** Действие струны Намбу-Гото. Первичное квантование. Связи. Алгебра Вирасоро. Вторичное квантование. Поля частиц как возбуждения струнного функционала. Калибровочная инвариантность и действие Виттена полевой теории струн.

## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

| Номер раздела, темы | Название раздела, темы                                     | Количество аудиторных часов |                         |                        |                         |      | Количество часов<br>УСР | Литература              | Формы контроля<br>знаний |
|---------------------|--|-----------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
|                     |  | Лекции                      | Практические<br>занятия | Семинарские<br>занятия | Лабораторные<br>занятия | Иное |                         |                         |                          |
| 1                   | 2  | 3                           | 4                       | 5                      | 6                       | 7    | 8                       | 9                       |                          |
| 1                   | Общие принципы квантования волновых полей                  | 2                           |                         |                        |                         |      | [1] [2] [3]             |                         |                          |
| 2                   | Квантование калибровочных полей                            | 6                           |                         |                        |                         |      | [1] [5]                 |                         |                          |
| 3                   | Перенормировка калибровочных теорий                        | 6                           |                         |                        |                         |      | [1] [2][3] [7]<br>[7]   |                         |                          |
|                     | Текущий контроль успеваемости студентов по разделам №№ 1-3 |                             |                         |                        |                         |      | 2                       | Контроль-<br>ная работа |                          |
| 4                   | Квантовые аномалии   | 6                           |                         |                        |                         |      | [4] [6]                 |                         |                          |
| 5                   | Квантовая хромодинамика. Сильные взаимодействия            | 8                           |                         |                        |                         |      | [4] [7]                 |                         |                          |
| 6                   | Основы калибровочной полевой теории струны                 | 4                           |                         |                        |                         |      | [4] [6]                 |                         |                          |
|                     | Текущий контроль успеваемости студентов по разделам №№ 1-6 |                             |                         |                        |                         |      | 4                       | Коллоквиум              |                          |
|                     | Итого  | 32                          |                         |                        |                         |      | 6                       |                         |                          |

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Перечень основной литературы

1. А.А. Сланов, Л.Д. Фаддеев. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. М., Наука. 1988.
2. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Введение в теорию квантованных полей. М., Наука. 1973.
3. Дж. Коллинз. Перенормировка. М., Мир. 1988.
4. Т.П. Ченг, Л.Д. Ли. Калибровочные теории в физике элементарных частиц. М., Мир. 1987.
5. К. Хуанг. Кварки, лептоны и калибровочные поля. М., Мир. 1985.
6. А. Ю. Морозов. Аномалии в калибровочных теориях. Успехи физических наук, т. 150, вып. 3, стр. 337-416. 1986.
7. Л. Райдер. Квантовая теория поля. М., Мир. 1987.

### Мероприятия для контроля управляемой самостоятельной работой

Для контроля УСР используются коллоквиумы, контрольные работы, которые проводятся в письменной форме.

Каждая из письменных работ включает в себя 2–3 задания.

### Рекомендуемые темы контрольных работ

1. Континуальный интеграл по фазовому пространству в квантовой механике
2. Эквивалентность двух способов квантования.
3. Подсчет степеней расходимости
4. Вычисление аномалий
5. Перенормировка массы, заряда, волновой функции.

Тема контрольной работы №1: Квантование и расходимости

Примерный перечень заданий:

1. Квантование через континуальный интеграл.
2. Расходимости в квантовой теории калибровочных полей.
3. Подсчет степени расходимости диаграммы.

Тема контрольной работы №2: Перенормируемость и аномалии

Примерный перечень заданий:

1. Доказательство перенормируемости квантовой теории калибровочных полей.
2. Перенормировка массы заряда, волновой функции
3. Примеры квантовых аномалий., вычисление аномалий.

### Рекомендуемые темы коллоквиумов



1. Лагранжева и гамильтонова формулировка теории калибровочных полей  
Правила Фейнмана в ковариантных калибровках.
2. Калибровочная инвариантность, перенормируемость, симметрии КХД  
Пертурбативная КХД.

Тема коллоквиума №1: Лагранжиан и гамильтониан. Правила Фейнмана.

Примерный перечень заданий:

1. Построение калибровочно инвариантных лагранжианов.
2. Гамильтонова формулировка.
3. Теория возмущений.
4. Правила Фейнмана построения амплитуд по диаграммам

Тема коллоквиума №2: Пертурбативная КХД, перенормируемость.

Примерный перечень заданий:

1. Калибровочная инвариантность.
2. Симметрии КХД.
3. Особенности перенормируемости.
4. КХД при больших переданных импульсах.

#### **Рекомендуемые темы лабораторных работ:**

1. Исследование и доказательство второй теоремы Паули о связи спина и статистики.
2. Теория возмущений. Диаграммы Фейнмана.
3. Духи Фаддеева-Попова. Тождества Уорда.
4. Бегущая константа связи. Ренормгрупповой анализ.
5. Асимптотическая свобода. Асимптотическая свобода. Непертурбативная область КХД.
6. Калибровочно инвариантная теория струны. Действие Виттена.

#### **Методические рекомендации по организации и выполнению самостоятельной работы студентов**

Основой методики организации самостоятельной работы студентов по курсу является предоставление студентам необходимой для работы информации, а также обеспечение регулярных консультаций преподавателя и периодичной отчетности по различным видам учебной и самостоятельной деятельности.

В открытом доступе для студентов размещается следующая информация:

- программа курса с указанием основной и дополнительной литературы;
- учебно-методические материалы;
- график консультаций преподавателя;
- вопросы для проведения зачета;

- сроки проведения контрольных мероприятий по различным видам учебной деятельности:
  - коллоквиумов по изучаемому материалу;
  - контрольных работ
- для дополнительного развития творческих способностей одаренных студентов организуются:
  - студенческие научно-практические конференции, конкурсы;
  - студенческие олимпиады.

### **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Для текущего контроля качества усвоения знаний по дисциплине рекомендуется использовать коллоквиумы и контрольные работы. Контрольные мероприятия проводятся в соответствии с учебно-методической картой дисциплины. В случае неявки на контрольное мероприятие по уважительной причине студент вправе по согласованию с преподавателем выполнить его в дополнительное время. Для студентов, получивших неудовлетворительные оценки за контрольные мероприятия, либо не явившихся по неуважительной причине, по согласованию с преподавателем и с разрешения заведующего кафедрой мероприятие может быть проведено повторно.

Коллоквиумы и контрольные работы проводятся в письменной форме, каждая из работ включает в себя 2–3 задачи. На выполнение как контрольных работ, так и коллоквиумов отводится 90 мин. По согласованию с преподавателем разрешается использовать справочные, научные и учебные печатные издания. Каждая задача в соответствии с ее сложностью оценивается от 3 до 5 баллов (максимальная сумма баллов за все задачи в контрольной (коллоквиуме) равна 10). Количество баллов за каждую решенную задачу выставляется в зависимости от правильности, полноты и оригинальности ее решения. Нерешенная или решенная полностью неправильно задача оценивается в 0 баллов. Оценка за контрольную (коллоквиум) рассчитывается как сумма баллов, полученных за каждую задачу.

Оценка текущей успеваемости рассчитывается как среднее оценок за каждый из письменных видов работ. При оценке текущей успеваемости 4 балла и более студенты допускаются к экзамену. При оценке ниже 4 баллов решением кафедры студенты не допускаются к экзамену, и им назначается срок выполнения контрольных работ и/или коллоквиумов.

Итоговая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме экзамена. Экзаменационная оценка и оценка текущей успеваемости служат для определения рейтинговой оценки по дисциплине, которая рассчитывается как средневзвешенная оценка текущей успеваемости и экзаменационной оценки. Весовой коэффициент для оценки текущей успеваемости — 0,3; для экзаменационной оценки — 0,7.

**ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

| Название дисциплины, с которой требуется согласование | Название кафедры                           | Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине | Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)             |
|---|--|--|---|
| Прикладные проблемы квантовой теории                  | Кафедра теоретической физики и астрофизики |  | Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте<br>протокол № ____ от _____.____.20__ |
| Квантовая электродинамика                             | Кафедра теоретической физики и астрофизики |  | Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте<br>протокол № ____ от _____.____.20__ |
|   |  |  |   |
|   |  |  |   |
|   |  |  |   |