

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Квантовая теория калибровочных полей
<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 15 час.

семинары: 45 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: В.В. Нестеренко

Программа обсуждена на заседании кафедры фундаментальных и прикладных проблем физики микромира  
25.05.2020

## Аннотация

Курс содержит основы квантовой теории калибровочных полей, являющейся основным математическим аппаратом описания всех фундаментальных взаимодействий в микромире. Курс является углубленным и предназначен для студентов, специализирующихся в области теоретической физики.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- получение студентами прочных знаний в области современной физики элементарных частиц, освоение ими квантовой теории калибровочных полей, являющейся основным математическим аппаратом описания всех фундаментальных взаимодействий в микромире, а также приобретение базовых навыков самостоятельной научно-исследовательской работы.

#### Задачи дисциплины

- ☐ формирование базовых знаний в области теоретической физики элементарных частиц;
- ☐ обучение студентов современным методам теоретического описания различных процессов фундаментальных взаимодействий и навыкам решения сопутствующих задач;
- ☐ формирование у студентов профессиональных навыков, необходимых им при проведении исследований в области теоретической физики в рамках выпускных работ на степень магистра.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	ОПК-3.1 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.1 Знает физическое описание явлений и процессов в области ядерной физики и технологий
	ПК-1.2 Умеет создавать теоретические и математические модели в области ядерной физики и технологий
ПК-3 Способен объективно оценить предлагаемое решение или проект по отношению к современному мировому уровню, подготовить экспертное заключение	ПК-3.1 Знает современный уровень развития науки и технологии, профессиональные проблемы в своей предметной области

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- ☐ фундаментальные взаимодействия в микромире;
- ☐ принцип локальной калибровочной инвариантности;
- ☐ правила построения калибровочно-инвариантных лагранжианов;
- ☐ теоретико-групповое и геометрическое описание классических калибровочных полей;
- ☐ особенности классической динамики калибровочных полей (вторая теорема Нетер);
- ☐ обобщенную гамильтонову динамику систем со связями;
- ☐ методы квантования систем со связями;
- ☐ правила квантования калибровочных теорий методом функционального интегрирования;
- ☐ геометрическую интерпретацию детерминанта Фаддеева-Попова;
- ☐ тождества Славнова-Тейлора и их роль в доказательстве перенормируемости калибровочных теорий;
- ☐ эффект Хиггса и доказательство перенормируемости спонтанно нарушенной неабелевой калибровочной теории.

уметь:

- ☐ эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики элементарных частиц.

владеть:

- ☐ техникой построения лагранжиана калибровочной теории по заданной калибровочной группе;
- ☐ правилами выбора калибровочных условий;
- ☐ методом функционального интегрирования в квантовой теории поля (в лагранжевом и гамильтоновом формализмах, по бозонным и грассмановым переменным);
- ☐ техникой построения эффективного квантового лагранжиана для заданной калибровочной группы и выбранной калибровки;
- ☐ методом введения духовых переменных в квантовую теорию неабелевых калибровочных полей;
- ☐ методом построения правил Фейнмана для калибровочной теории, заданной калибровочной группой, калибровочным условием и набором полей «материи»;
- ☐ техникой перехода от одной калибровки к другой при квантовании калибровочных теорий;
- ☐ методами описания топологически нетривиальных полевых конфигураций типа монополей 'т Хоффа-Полякова.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Введение. Фундаментальные взаимодействия в микромире, их группы симметрии и квантово-полевой формализм.	1	3		2
2	Глобальные и локальные симметрии. Принцип локальной калибровочной инвариантности и его следствия.	1	3		2
3	Элементы теории групп Ли (геометрические аспекты). Лагранжиан неабелевой калибровочной теории.	1	3		2
4	Особенности классической динамики калибровочных полей. Вторая теорема Нетер и ее следствия.	1	3		2

5	Обобщенная гамильтонова динамика систем со связями. Скобки Дирака.	1	3		2
6	Операторное квантование систем со связями первого и второго рода.	1	3		2
7	Квантование систем со связями методом функционального интегрирования.	1	3		2
8	Гамильтоново описание неабелевых калибровочных теорий. Связи в фазовом пространстве.	1	3		2
9	Выбор калибровки. Неоднозначности Грибова.	1	3		2
10	Квантование неабелевой калибровочной теории методом функционального интегрирования. Переход от кулоновской калибровки к лоренцевской в функциональном интеграле.	1	3		2
11	Детерминант Фаддеева-Попова и поля духов. Геометрическая интерпретация детерминанта Фаддеева-Попова.	1	3		2
12	Правила Фейнмана в неабелевой теории поля в разных калибровках и для разных наборов полей материи.	1	3		2
13	Унитарность квантовой теории неабелевого калибровочного поля в разных калибровках. Функциональный интеграл в квантовой механике и в квантовой теории поля. Лагранжев и гамильтонов формализмы. Интегрирование по бозонным и грасмановым переменным.	1	3		2
14	Тождества Славнова-Тейлора и их роль в доказательстве перенормируемости квантовой теории неабелевых калибровочных полей.	1	3		2
15	Монополи в неабелевых теориях.	1	3		2
Итого часов		15	45		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

1. Введение. Фундаментальные взаимодействия в микромире, их группы симметрии и квантово-полевой формализм.

Базовые элементы Стандартной модели: поколения, фундаментальные фермионы (лептоны и кварки) и калибровочные бозоны – переносчики фундаментальных взаимодействий (электрослабого и сильного), бозон Хиггса. Калибровочные симметрии, лежащие в основе Стандартной модели. Квантовая теория поля и элементарные частицы. Идеи струнного подхода к объединению всех взаимодействий, включая гравитацию.

2. Глобальные и локальные симметрии. Принцип локальной калибровочной инвариантности и его следствия.

Роль симметрий в теоретической физике и, в частности, в теории фундаментальных взаимодействий. Глобальные и локальные симметрии и их следствия (законы сохранения и фиксирование лагранжиана взаимодействия). Локальная калибровочная инвариантность – основа всех теорий фундаментальных взаимодействий.

3. Элементы теории групп Ли (геометрические аспекты). Лагранжиан неабелевой калибровочной теории.

Группы Ли как гладкие многообразия. Определение группы Ли по структуре касательного пространства к единичному элементу группы (по ее алгебре Ли). Алгебра Ли – действительное линейное пространство с метрикой Киллинга. Основные факты, касающиеся компактных (в частности, унитарных) групп. Построение на групповой основе лагранжиана неабелевой калибровочной теории.

4. Особенности классической динамики калибровочных полей. Вторая теорема Нетер и ее следствия.

Следствия локальной калибровочной симметрии для уравнений Эйлера в калибровочных теориях и законах сохранения; связи в конфигурационном и фазовом пространствах и особенности формулировки задачи Коши. Вторая теорема Нетер.

5. Обобщенная гамильтонова динамика систем со связями. Скобки Дирака.

Гамильтоново описание систем с сингулярными лагранжианами. Обобщенные уравнения Гамильтона, связи первого и второго рода. Скобки Дирака как обобщение скобок Пуассона на системы со связями. Связи и локальные симметрии.

6. Операторное квантование систем со связями первого и второго рода.

Каноническое квантование систем со связями первого и второго рода переходом к редуцированному фазовому пространству (разрешение связей). Учет связей первого рода в квантовой теории по Дираку.

Функциональный интеграл в квантовой механике и в квантовой теории поля. Лагранжев и гамильтонов формализмы. Интегрирование по бозонным и грассмановым переменным.

Фейнмановское интегрирование по всем путям в квантовой механике в конфигурационном и фазовом пространствах. Представление производящего функционала для функций Грина в КТП в виде интеграла по всем полям в лагранжевых и гамильтоновых переменных. Интегрирование по коммутирующим и антикоммутирующим переменным. Статус функционального интеграла в КТП.

7. Квантование систем со связями методом функционального интегрирования.

Квантование независимых динамических переменных (редуцированное фазовое пространство) методом функционального интегрирования. Распространение функционального интегрирования на все исходное фазовое пространство. Детерминант Фаддеева-Попова.

8. Гамильтоново описание неабелевых калибровочных теорий. Связи в фазовом пространстве.

Канонический гамильтониан и генерирование связей в фазовом пространстве. Закон Гаусса. Инволютивность связей в калибровочных теориях.

9. Выбор калибровки. Неоднозначности Грибова.

Требования, накладываемые на калибровочные условия. Кулоновская калибровка. Граничные условия на калибровочные преобразования, накладываемые на пространственной бесконечности, и однозначность решения соответствующих дифференциальных уравнений.

10. Квантование неабелевой калибровочной теории методом функционального интегрирования. Переход от кулоновской калибровки к лоренцевской в функциональном интеграле.

Функциональный интеграл для производящего функционала в кулоновской (унитарной) калибровке. Переход к ковариантной калибровке. Прием Фаддеева-Попова (представление единицы в виде интеграла по калибровочной группе).

11. Детерминант Фаддеева-Попова и поля духов. Геометрическая интерпретация детерминанта Фаддеева-Попова.

Геометрическая интерпретация детерминанта Фаддеева-Попова. Скобки Лагранжа. “Эвристическое” построение функционального интеграла в лагранжевом формализме.

12. Правила Фейнмана в неабелевой теории поля в разных калибровках и для разных наборов полей материи.

Вывод правил Фейнмана для неабелевой калибровочной теории (кулоновская калибровка, калибровка Лоренца, аксиальная калибровка). Учет полей материи для разных мультиплетов.

13. Унитарность квантовой теории неабелевого калибровочного поля в разных калибровках. Функциональный интеграл в квантовой механике и в квантовой теории поля. Лагранжев и гамильтонов формализмы. Интегрирование по бозонным и фермионовым переменным.

Роль духовых полей в проблеме унитарности (конкретные примеры расчетов в низших порядках теории возмущений). Унитарные калибровки. Доказательство унитарности в общем случае (без использования теории возмущений).

Фейнмановское интегрирование по всем путям в квантовой механике в конфигурационном и фазовом пространствах. Представление производящего функционала для функций Грина в КТП в виде интеграла по всем полям в лагранжевых и гамильтоновых переменных. Интегрирование по коммутирующим и антикоммутирующим переменным. Статус функционального интеграла в КТП.

14. Тождества Славнова-Тейлора и их роль в доказательстве перенормируемости квантовой теории неабелевых калибровочных полей.

Перенормируемость квантовой теории калибровочного поля и калибровочная инвариантность на квантовом уровне. Доказательство тождеств Славнова-Тейлора (использование функционального интегрирования). Квантовые аномалии в калибровочных теориях.

15. Монополи в неабелевых теориях.

Монополи Дирака и Швингера в абелевой калибровочной теории. Монополи ‘т Хоофта-Полякова в неабелевых моделях и их физические приложения.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: компьютер и мультимедийное оборудование (проектор).

## **6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Классические калибровочные поля : Бозонные теории [Текст] / В. А. Рубаков - М.ЛИБРОКОМ,2016

2. Введение в квантовую теорию калибровочных полей [Текст]/А. А. Славнов, Л. Д. Фаддеев, -М., Наука, 1988
3. Калибровочные поля [Текст]/Н. П. Коноплева, В. Н. Попов, -М., Атомиздат, 1980
2. Славнов А.А., Фаддеев Л.Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. 2-е изд. - М.: Наука, 1988.
4. Квантовая теория калибровочных полей. Сб. статей. Перевод с англ. под ред. Н.П. Коноплевой. - М.: Мир, 1977.
5. Нестеренко В.В., Червяков А.М. Сингулярные лагранжианы. Классическая динамика и квантование. Лекции для молодых ученых. ОИЯИ Р2-86-323, Дубна, 1986.

#### Дополнительная литература

1. Введение в теорию квантовых полей [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков .— 4-е изд., испр. — М. : Наука, 1984 .— 600 с.
2. Лекции по квантовой механике [Текст] = Lectures on quantum mechanics : [учеб. пособие для вузов] / П. А. М. Дирак ; пер. с англ. А. Г. Миронова .— М. : Мир, 1968 .— 84 с.
3. Квантовая механика и интегралы по траекториям [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Р. Фейнман, А. Хибс ; пер. с англ. Э. М. Барлита, Ю. Л. Обухова ; под ред. В. С. Барашенкова .— М. : Мир, 1968 .— 382 с.
4. Континуальный интеграл в квантовой механике [Текст] = Path integrals in quantum mechanics/Ж. Зинн-Жюстен , -М., Физматлит, 2006

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Информационные ресурсы: Доступные через интернет журналы по физике элементарных частиц (Теоретическая и математическая физика, Письма в ЖЭТФ, УФН, Physical Review D, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Reviews of Modern Physics).

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Необходимое программное обеспечение Adobe Acrobat Reader.

Обеспечение самостоятельной работы: доступ к библиотеке и базам данных по журналам Теоретическая и математическая физика, Письма в ЖЭТФ, УФН, Physical Review D, European Physical Journal C, Journal of High Energy Physics, Lecture Notes in Physics, Nuclear Physics B, Physics Letters B, Physics Reports, Reviews of Modern Physics.

### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий дисциплину, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике. В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения дисциплины, уметь применять полученные знания для решения различных задач.

Успешное освоение курса требует:

- посещения всех занятий, предусмотренных учебным планом по дисциплине;
- ведения конспекта занятий;
- напряжённой самостоятельной работы студента.

Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала, подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения;
- решение задач, предлагаемых студентам на занятиях;
- подготовку к выполнению заданий промежуточной аттестации.

Показателем владения материалом служит умение без конспекта отвечать на вопросы по темам дисциплины.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к преподавателю.



**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Ядерная физика и технологии
<b>профиль подготовки:</b>	Ядерная физика, УТС и компьютерные методы в физике Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра фундаментальных и прикладных проблем физики микромира
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	В.В. Нестеренко

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен формулировать цели и задачи исследования, выбирать критерии оценки, выявлять приоритеты решения задач	ОПК-1.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Владеет систематическими знаниями по направлению деятельности; углубленными знаниями по выбранной направленности подготовки, базовыми навыками проведения научно-исследовательских работ по предложенной теме
ОПК-2 Способен применять современные методы исследования, оценивать и представлять результаты выполненной работы	ОПК-2.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен оформлять результаты научно-исследовательской деятельности в виде статей, докладов, научных отчетов и презентаций с использованием систем компьютерной верстки и пакетов офисных программ	ОПК-3.1 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ПК-1 Способен к созданию теоретических и математических моделей в области ядерной физики и технологий	ПК-1.1 Знает физическое описание явлений и процессов в области ядерной физики и технологий
	ПК-1.2 Умеет создавать теоретические и математические модели в области ядерной физики и технологий
ПК-3 Способен объективно оценить предлагаемое решение или проект по отношению к современному мировому уровню, подготовить экспертное заключение	ПК-3.1 Знает современный уровень развития науки и технологии, профессиональные проблемы в своей предметной области

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая теория калибровочных полей» обучающийся должен:

### знать:

- ☐ фундаментальные взаимодействия в микромире;
- ☐ принцип локальной калибровочной инвариантности;
- ☐ правила построения калибровочно-инвариантных лагранжианов;
- ☐ теоретико-групповое и геометрическое описание классических калибровочных полей;
- ☐ особенности классической динамики калибровочных полей (вторая теорема Нетер);
- ☐ обобщенную гамильтонову динамику систем со связями;
- ☐ методы квантования систем со связями;
- ☐ правила квантования калибровочных теорий методом функционального интегрирования;
- ☐ геометрическую интерпретацию детерминанта Фаддеева-Попова;
- ☐ тождества Славнова-Тейлора и их роль в доказательстве перенормируемости калибровочных теорий;
- ☐ эффект Хиггса и доказательство перенормируемости спонтанно нарушенной неабелевой калибровочной теории.

### уметь:

- ☐ эффективно применять вышеуказанные знания на практике для решения фундаментальных и прикладных научных задач в области современной теоретической физики элементарных частиц.

### владеть:

- ☐ техникой построения лагранжиана калибровочной теории по заданной калибровочной группе;
- ☐ правилами выбора калибровочных условий;
- ☐ методом функционального интегрирования в квантовой теории поля (в лагранжевом и гамильтоновом формализмах, по бозонным и фермионовым переменным);
- ☐ техникой построения эффективного квантового лагранжиана для заданной калибровочной группы и выбранной калибровки;
- ☐ методом введения духовых переменных в квантовую теорию неабелевых калибровочных полей;
- ☐ методом построения правил Фейнмана для калибровочной теории, заданной калибровочной группой, калибровочным условием и набором полей «материи»;
- ☐ техникой перехода от одной калибровки к другой при квантовании калибровочных теорий;
- ☐ методами описания топологически нетривиальных полевых конфигураций типа монополей 'т Хоффа-Полякова.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Примеры тем курсовых работ:

1. Фундаментальные взаимодействия в микромире.
2. Вторая теорема Нетер. Тожества Нетер. Связи в конфигурационном пространстве.
3. Статус функционального интеграла в квантовой теории поля.
4. Перенормируемость спонтанно нарушенной калибровочной теории.
5. Монополи 'т Хоффа-Полякова в неабелевых калибровочных моделях.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов для сдачи дифференцированного зачета в 9-ом семестре:

1. Фундаментальные взаимодействия в микромире.
2. Набор фундаментальных полей в Стандартной модели.
3. Принцип локальной калибровочной инвариантности.
4. Группы Ли, их алгебры и структурные константы.
5. Восстановление группы по структурным константам.
6. Метрика Киллинга в алгебре Ли. Компактные группы Ли.
7. Инвариантное интегрирование по группе. Мера Хаара.
8. Вторая теорема Нетер. Тожества Нетер. Связи в конфигурационном пространстве.
9. Локальные симметрии и вырожденность лагранжиана.
10. Постановка задачи Коши для калибровочных полей.
11. Обобщенная гамильтонова динамика для вырожденных лагранжианов. Связи первого и второго рода. Скобки Дирака.
12. Правила канонического квантования для систем со связями. Метод редуцированного фазового пространства.
13. Учет связей первого рода на квантовом уровне по Дираку.
14. Квантовая механика на языке функциональных интегралов. Лагранжева и гамильтонова формулировки.
15. Производящий функционал для функций Грина в стандартной КТП и его представление функциональным интегралом «по всем полям».
16. Интегрирование по бозонным и фермионовым переменным.
17. Интегралы гауссовского типа по коммутирующим и антикоммутирующим переменным.
18. Статус функционального интеграла в квантовой теории поля.
19. Квантование систем со связями методом функционального интегрирования.
20. Детерминант Фаддеева-Попова, его геометрическая интерпретация.
21. Гамильтонов формализм для калибровочных полей. Связи в фазовом пространстве.
22. Выбор калибровки, неоднозначности Грибова.
23. Квантование неабелевой теории методом функционального интегрирования в фазовом пространстве.

24. Детерминант Фаддеева-Попова, поля духов.
25. Функциональный интеграл для калибровочной теории в лагранжевом формализме. Прием Фаддеева-Попова (выделение объема калибровочной группы).
26. Правила Фейнмана для неабелевой калибровочной теории в ковариантной калибровке.
27. Особенность аксиальной калибровки.
28. Доказательство унитарности в квантовой теории неабелева калибровочного поля. Роль духов в этом доказательстве.
29. Тождества Славнова-Тейлора как следствие калибровочной инвариантности на квантовом уровне; их роль в доказательстве перенормируемости квантовой не-абелевой теории.
30. Калибровочные аномалии.
31. Генерирование массы калибровочных полей с помощью эффекта Хиггса.
32. Физические предпосылки для использования эффекта Хиггса в электрослабой теории.
33. Перенормируемость спонтанно нарушенной калибровочной теории.
34. Монополи 'т Хоофта-Полякова в неабелевых калибровочных моделях.

#### Критерии оценивания

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении оценивания знаний обучающемуся предоставляется время на подготовку на усмотрение экзаменатора. Опрос обучающегося по билету не должен превышать одного астрономического часа. Оценивание знаний производится в соответствии с вышеуказанными критериями в соответствии с содержанием дисциплины.