

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Кафедра теоретической физики

**УТВЕРЖДАЮ**

Декан физического факультета  
  
(подпись) И.С. Огнев

23 мая 2023 года

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Теория электрослабых взаимодействий»**

Направление подготовки  
03.04.02 Физика

Направленность (профиль)  
«Теоретическая физика»

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от «17» апреля 2023 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5 от « 25» апреля 2023 года

Ярославль

### 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Теория электрослабых взаимодействий» является изучение теории взаимодействия полей на основе локальной калибровочной симметрии.

### 2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Дисциплина «Теория электрослабых взаимодействий» относится к части Блока Б1, формируемой участниками образовательных отношений.

Дисциплина «Теория электрослабых взаимодействий» — один из базовых курсов магистратуры направления Физика. Изложение данного курса необходимо для дальнейшего изучения дисциплин «Квантовая электродинамика», «Квантовая хромодинамика».

Для освоения данной дисциплины студенты должны знать дисциплины «Введение в релятивистскую теорию поля» и «Введение в квантовую теорию поля».

### 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП магистратуры

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>ПК-1</b> Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность по решению комплексных фундаментальных задач физики	<b>ИД-ПК-1_1</b> Знает теоретические методы проведения и анализа научных исследований	<b>Знать:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>о принципе локальной калибровочной инвариантности и удлиненной ковариантной производной;</li><li>о методе построения взаимодействия фермионов с векторными полями на основе локальной калибровочной произвольной группы Ли;</li></ul> <b>Уметь:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>строить лагранжианы на основе принципа локальной калибровочной инвариантности;</li><li>строить лагранжианы взаимодействия векторных полей;</li><li>вычислять массы векторных и фермионных полей на основе спонтанного нарушения симметрии.</li></ul>
	<b>ИД-ПК-1_2</b> Знает современные теории и модели физики	<b>Знать:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>о механизме спонтанного нарушения симметрии;</li><li>основные лагранжианы взаимодействия квантовых полей;</li><li>калибровочные теории взаимодействия кварков и глюонов;</li><li>модель Вайнберга-Салама-Глешоу</li></ul>

		<p>единого электрослабого взаимодействия.</p> <p><b>Владеть навыками:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• построения калибровочно инвариантных билинейных и трилинейных структур по полям;</li> <li>• вычисления S-матричных элементов электрослабых процессов в рамках теории Вайнберга-Салама-Глешоу.</li> </ul>
--	--	---

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	С е м е с т р	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			<b>Контактная работа</b>						
			лекции	практические занятия	лабораторные работы	консультации	аудиторная самостоятельная работа		
1	Введение.	2	1					2	Индивидуальные консультации
2	Представление калибровочных групп симметрии.	2	5	5		0.5		12	Индивидуальные консультации
3	Самодействие векторных полей.	2	6	6		0,5		12	Индивидуальные консультации
4	Спонтанное нарушение произвольной симметрии.	2	6	6		1		16	Индивидуальные консультации
5	Модель Вайнберга-	2	6	6		1		16	Индивидуальные

	Салама.								консультации
6	Электрослабые взаимодействия.	2	8	9		1		18	Индивидуальные консультации
7	Спонтанное нарушение калибровочной симметрии и голдстоуновские бозоны.	2	8	8		1		20	Индивидуальные консультации
						2	0,5	33,5	Экзамен
	<b>Всего</b>		<b>40</b>	<b>40</b>		<b>6</b>	<b>0,5</b>	<b>129,5</b>	

### Содержание разделов дисциплины:

1. **Введение**
  - 1.1. Классическая электродинамика как пример калибровочной теории.
  - 1.2. Удлиненная производная. Принцип локальной калибровочной инвариантности.
2. **Представление калибровочных групп симметрии.**
  - 2.1. Набор фермионных безмассовых полей. Инвариантность относительно глобальной группы симметрии.
  - 2.2. Алгебра генераторов группы Ли. Структурные константы.
  - 2.3. Удлиненная производная. Лагранжиан взаимодействия фермионов с векторными полями.
3. **Самодействие векторных полей.**
  - 3.1. Статус векторных полей. Лагранжиан свободных векторных полей.
  - 3.2. Локальный калибровочно инвариантный лагранжиан векторных полей.
  - 3.3. Лагранжиан взаимодействия векторных полей.
4. **Спонтанное нарушение произвольной симметрии.**
  - 4.1. Спонтанное нарушение симметрии на примере дискретной группы. Спонтанное нарушение симметрии непрерывной группы. Теорема Голдстоуна.
  - 4.2. Генерация массы векторного поля на примере спонтанного нарушения симметрии группы  $U(1)$ .
5. **Модель Вайнберга-Салама-Глешоу.**
  - 5.1. Модель Вайнберга-Салама-Глешоу. Описание электромагнитных и слабых взаимодействий. Представление фермионов в модели Вайнберга-Салама-Глешоу.
  - 5.2. Локальная калибровочная симметрия. Лагранжиан взаимодействия фермионов с векторными полями.
6. **Электрослабые взаимодействия.**
  - 6.1. Фотон, бозон. Угол Вайнберга.
  - 6.2. Электродинамика, взаимодействие с Z-бозоном, взаимодействие заряженных токов. Лагранжиан самодействия векторных полей.
7. **Спонтанное нарушение калибровочной симметрии и голдстоуновские бозоны.**
  - 7.1. Механизм спонтанного нарушения симметрии.  $\chi$ -скаляр. Генерация масс векторных полей.
  - 7.2. Юкавское взаимодействие.
  - 7.3. Генерация масс фермионов.

**5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – это первая лекция по дисциплине. Она дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. На этой лекции рассказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой для ее освоения учебно-методической литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

## **6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

## **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

1. Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)
2. Научная энциклопедия на сайте <http://elementy.ru/physics>
3. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU на сайте <http://elibrary.ru/>

## **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

### **а) основная литература**

1. Боголюбов, Н. Н. Квантовые поля: учебное пособие для вузов / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 384 с.  
<https://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785922105804.html>
2. Высоцкий, М. И. Лекции по теории электрослабых взаимодействий / М. И.

**б) дополнительная литература**

1. Рубаков В.А. Классические калибровочные поля. М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 336 с.  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=273874&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=273874&cat_cd=YARSU)
2. Пескин М., Шредер Д. Введение в квантовую теорию поля. — Ижевск: РХД, 2001. — 784 с.  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=300794&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=300794&cat_cd=YARSU)
3. Биленький С.М. Введение в диаграммную технику Фейнмана. М.: Атомиздат, 1971. 215 с.  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=740950&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=740950&cat_cd=YARSU)
4. Вергелес С. Н. Теоретическая физика. Квантовая электродинамика: учебник для вузов. М: Издательство Юрайт, 2021. 262 с. <https://urait.ru/bcode/470996>
5. Михеев Н.В., Нарынская Е.Н. Введение в калибровочную теорию классических полей (метод. указания). Ярославль: ЯрГУ, 2009. 32 с.  
<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20090730.pdf>

**9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине**

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа и практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций,
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Специальные помещения укомплектованы средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий, хранящиеся на электронных носителях и обеспечивающие тематические иллюстрации, соответствующие рабочим программам дисциплин.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду организации.

Число посадочных мест в лекционной аудитории больше либо равно списочному составу потока, а в аудитории для практических занятий (семинаров) – списочному составу группы обучающихся.

Автор:

Заведующий кафедры  
теоретической физики, к.ф.-м.н.

А.Я.Пархоменко

---

должность, ученая степень

---

подпись

---

И.О. Фамилия

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Теория электрослабых взаимодействий»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущей и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания или иные материалы,  
необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности,  
характеризующих этапы формирования компетенций**

**1.1 Контрольные задания и иные материалы,  
используемые в процессе текущей аттестации**

**Задания по темам №2-7:**

Задания из методических указаний Михеев Н.В., Нарынская Е.Н. Введение в калибровочную теорию классических полей. Ярославль: ЯрГУ, 2009. 32 с.

**1.2 Список вопросов и (или) заданий для проведения итоговой аттестации**

**Список вопросов к экзамену:**

1. Удлиненная производная. Принцип локальной калибровочной инвариантности.
2. Набор фермионных безмассовых полей. Инвариантность относительно глобальной группы симметрии.
3. Алгебра генераторов группы Ли. Структурные константы.
4. Удлиненная производная. Лагранжиан взаимодействия фермионов с векторными полями.
5. Статус векторных полей. Лагранжиан свободных векторных полей.
6. Локальный калибровочно инвариантный лагранжиан векторных полей.
7. Лагранжиан взаимодействия векторных полей.
8. Спонтанное нарушение симметрии на примере дискретной группы.
9. Спонтанное нарушение симметрии непрерывной группы. Теорема Голдстоуна.
10. Генерация массы векторного поля на примере спонтанного нарушения симметрии группы  $U(1)$ .
11. Модель Вайнберга-Салама-Глешоу. Описание электромагнитных и слабых взаимодействий.
12. Представление фермионов в модели Вайнберга-Салама-Глешоу.
13. Локальная калибровочная симметрия. Лагранжиан взаимодействия фермионов с векторными полями.
14. Фотон, бозон. Угол Вайнберга.
15. Электродинамика, взаимодействие с  $Z$ -бозонами, взаимодействие заряженных токов.
16. Лагранжиан самовзадействия векторных полей.
17.  $\chi$  -скаляр. Спонтанное нарушение симметрии.
18. Генерация масс векторных полей.
19. Юкавское взаимодействие. Генерация масс фермионов.

**1.3 Правила выставления оценки на экзамене.**

В экзаменационный билет включается два теоретических вопроса. На подготовку к ответу дается не менее 1 часа.

По итогам экзамена выставляется одна из оценок: «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».

**Оценка «Отлично»** выставляется студенту, который демонстрирует глубокое и полное владение материалом; осуществляет межпредметные связи; умеет связывать теорию с практикой. Студент дает развернутые, полные и четкие ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, соблюдает логическую последовательность при изложении материала. Грамотно использует введенную терминологию.

**Оценка «Хорошо»** выставляется студенту, ответ которого на экзамене в целом соответствуют указанным выше критериям, но отличается меньшей обстоятельностью, глубиной, обоснованностью и полнотой. В ответе имеют место отдельные неточности (несущественные ошибки), которые исправляются самим студентом после дополнительных и (или) уточняющих вопросов экзаменатора.

**Оценка «Удовлетворительно»** выставляется студенту, который дает недостаточно полные и последовательные ответы на вопросы экзаменационного билета и дополнительные вопросы, но при этом демонстрирует умение выделить существенные и несущественные признаки и установить причинно-следственные связи. Ответы излагаются с использованием введенных терминов, но при этом допускаются ошибки в определении и раскрытии некоторых основных понятий, формулировке положений, которые студент затрудняется исправить самостоятельно. При аргументации ответа студент не обосновывает свои суждения. На часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

**Оценка «Неудовлетворительно»** выставляется студенту, который демонстрирует разрозненные, бессистемные знания; беспорядочно и неуверенно излагает материал; не умеет выделять главное и второстепенное, не умеет соединять теоретические положения с практикой, не устанавливает межпредметные связи; допускает грубые ошибки при определении сущности раскрываемых понятий, явлений, вследствие непонимания их существенных и несущественных признаков и связей; дает неполные ответы, логика и последовательность изложения которых имеют существенные и принципиальные нарушения, в ответах отсутствуют выводы. Дополнительные и уточняющие вопросы экзаменатора не приводят к коррекции ответов студента. На основную часть дополнительных вопросов студент затрудняется дать ответ или дает неверные ответы.

Оценка «Неудовлетворительно» выставляется также студенту, который взял экзаменационный билет, но отвечать отказался.



## **Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Теория электрослабых взаимодействий»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Дисциплина «Теория электрослабых взаимодействий» вырабатывает у студентов навыки постановки и аналитического решения сложных физических задач по курсу классической электродинамики, обеспечивает умение самостоятельно решать задачи и пользоваться справочной литературой по теоретической физике.

Широко практикуется индивидуальная методика решения задач, при которой студенты в большой степени самостоятельно решают задачи при индивидуальной помощи и комментариях преподавателя по ходу решения задачи каждым конкретным студентом с последующим обобщением результата и возможных методов его получения. Таким образом, на практических занятиях студенты приобретают навыки самостоятельных вычислений, анализа поставленной задачи и полученного результата.

Распределение времени для изучения данного курса лучше всего планировать, предусматривая регулярное повторение пройденного материала. Материал необходимо регулярно дополнять информацией, полученной из учебной литературы.

Для подготовки к практическим занятиям рекомендуется использовать литературу из прилагаемого списка основной и дополнительной литературы.

Важной частью самостоятельной работы студентов является подготовка к зачету. Список вопросов к зачету прилагается.