

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
«Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля»

Направление подготовки
03.04.02 Физика

Направленность (профиль)
«Теоретическая физика»

Форма обучения
очная
прием 2021

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

Дисциплина «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» обеспечивает приобретение студентами знаний и умений для решения задач теоретической физики с использованием методов ренормализационной группы.

2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Дисциплина «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» является дисциплиной Блока 1, части, формируемой участниками образовательных отношений, блок Дисциплины по выбору Б1.В.ДВ.3.

Для освоения данной дисциплиной студенты должны владеть математическим аппаратом квантовой теории поля, уметь решать основные типы дифференциальных уравнений, знать специальные функции математической физики и их свойства.

Дисциплина «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» является важным курсом магистерской программы «Теоретическая физика», являясь логическим продолжением дисциплины «Радиационные поправки и теория перенормировок» и раскрывая один из важнейших аспектов квантовой теории поля, связанный с исследованием асимптотического поведения параметров физической теории в пределе сверхмалых расстояний.

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
Профессиональные компетенции		
ПК-1 Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность по решению комплексных фундаментальных задач физики	ИД-ПК-1_1 Знает теоретические – методы проведения и анализа научных исследований	Знать: теоретический метод ренормализационной группы для анализа асимптотического поведения эффективных констант связи в квантовой теории поля. Уметь: – формулировать уравнение Гелл-Манна–Лоу для бегущего заряда; – формулировать уравнение для бегущей массы.
	ИД-ПК-1_2 Знает современные теории и модели физики	Знать: – основные уравнения ренормализационной группы; – основные типы асимптотического поведения эффективных констант связи в квантовой теории поля. Владеть навыками: анализа асимптотического поведения эффективной константы связи в зависимости от поведения функции Гелл-Манна–Лоу.

4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 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)
			Контактная работа						
			лекции	практические работы	семинары	аудиторная самостоятельная работа			
1	Общий формализм метода ренормгруппы.	3	9	17		2		23	Задания для самостоятельной работы
2	Применения метода ренормализационной группы.	3	8	17		2		22	Задания для самостоятельной работы,
							0,3	7,7	Зачет
	Всего за 3 семестр		17	34		4	0,3	52,7	
	Всего		17	34		4	0,3	52,7	

Содержание разделов дисциплины:

1. Общий формализм метода ренормгруппы.

1.1. Физическое обоснование перенормировки. Достижения и трудности квантовой электродинамики. Понятия перенормировки, регуляризации, точных пропагаторов и вершинных функций. Способы регуляризации.

1.2. Мультипликативная перенормировка в квантовой электродинамике. Уравнение Дайсона. Перенормировка пропагаторов и вершинных функций. Перенормировка амплитуд. Тождество Уорда.

1.3. Универсальный формализм мультипликативной перенормировки функций Грина. Ренормализационная группа. Обезразмеренные функции Грина, их мультипликативная перенормировка, точка нормировки. Эффективный, или инвариантный заряд. Групповой характер преобразований перенормировки. Бегущая константа связи.

1.4 Уравнения ренормгруппы и их общие решения. Ренормгрупповое преобразование обобщенной функции Грина. Функциональные уравнения ренормгруппы. Дифференциальное уравнение ренормгруппы Овсянникова–Каллана–Симанчика. Уравнение Гелл-Манна–Лоу для бегущего заряда и уравнение для бегущей массы.

1.5 Ультрафиолетовая и инфракрасная асимптотики функций Грина. Случай безмассовой теории. Функция Гелл-Манна–Лоу. Функция аномальной размерности. Интегральное уравнение Гелл-Манна–Лоу. Типы асимптотического поведения эффективной константы связи в зависимости от поведения функции Гелл-Манна–Лоу.

2. Применения метода ренормализационной группы.

2.1. Испытательный полигон квантовой теории поля – модель $g\phi^4$. Вершинная функция для амплитуды перехода $2 \rightarrow 2$. Комбинаторика модели $g\phi^4$. Диаграммы типа «рыба». Эффективный заряд. Неустойчивость поведения эффективного заряда относительно поправок высших порядков.

2.2. Проблема «нуль-заряда» в квантовой электродинамике. Обезразмеренная функция Грина фотона. Формула Ландау–Абрикосова–Халатникова для эффективной константы связи квантовой электродинамики. «Призрачный полюс Ландау». Проблема «нуль-заряда» и перспектива ее решения.

2.3. Асимптотическая свобода в квантовой хромодинамике. Проблемы построения квантовополевой теории сильных взаимодействий. Теорема Гросса–Вильчека–Политцера для теорий с неабелевыми полями Янга–Миллса. Обезразмеренная функция Грина глюона в квантовой хромодинамике. Бегущая константа связи сильного взаимодействия. Размерная трансмутация.

2.4. Великое объединение взаимодействий. Полупростая группа сильного и электрослабого взаимодействий $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Слияние трех бегущих констант связи и масштаб великого объединения. Вычисление угла Вайнберга. Проблема треугольника.

2.5. Бегущая масса кварка.

2.6. Модель Пати-Салама с кварк-лептонной симметрией.

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 – 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. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой 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
2. Научная библиотека на сайте www.poiskknig.ru
3. Научная энциклопедия на сайте <http://elementy.ru/physics>
4. 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. Кузнецов А.В., Румянцев Д.А. Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля: учеб. пособие. Ярославль, ЯрГУ, 2006. 76 с.
<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20060786.pdf>
2. Добрынина А.А., Нарынская Е.Н. Радиационные поправки и теория перенормировок: учеб. пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2015. 100 с.
<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20150703.pdf>

б) дополнительная литература

1. 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
2. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1984. 600 с.
http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=299849&cat_cd=YARSU

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;
- учебные аудитории для проведения 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.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Профессор кафедры
теоретической физики, д.ф.-м.н.

А.В. Кузнецов

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины
«Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля»**

**Фонд оценочных средств
для проведения текущего контроля успеваемости
и промежуточной аттестации студентов
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания и иные материалы,
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

Задания для самостоятельной работы

*(данные задания выполняются студентом самостоятельно
и преподавателем в обязательном порядке не проверяются)*

Задания по теме № 1 «Общий формализм метода ренормгруппы»:

1. Раздел 1.2: методом регуляризации обрезанием вычислить в рамках КЭД и в однопетлевом приближении массовый оператор электрона.
2. Раздел 1.3: доказать свойство ассоциативности в рамках ренормгруппы.
3. Раздел 1.4: вывести уравнения (1.64) и (1.65) в параграфе № 1.4 учебного пособия «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» (А.В. Кузнецов, Д.А. Румянцев. ЯрГУ, 2006).
4. Раздел 1.5: получить формулы (1.76) и (1.78) в параграфе № 1.5 учебного пособия «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» (А.В. Кузнецов, Д.А. Румянцев. ЯрГУ, 2006).

Задания по теме № 2 «Применения метода ренормализационной группы»:

1. Раздел 2.1: Вычислить бета-функции в модели с двумя скалярными полями.
2. Раздел 2.2: Выделить дважды логарифмические вклады в вершинном операторе в рамках КЭД.
3. Раздел 2.3: В модели Гросса-Навье найти бета-функцию и определить, является ли данная модель асимптотически свободной.
4. Раздел 2.5: Выделить дважды логарифмические вклады в вершинном операторе в расширении стандартной модели с правыми нейтрино.

2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации

Список вопросов к зачету

1. Физическое обоснование перенормировки. Достижения и трудности квантовой электродинамики. Понятия перенормировки, регуляризации, точных пропагаторов и вершинных функций. Способы регуляризации.
2. Мультипликативная перенормировка в квантовой электродинамике. Уравнение Дайсона. Перенормировка пропагаторов и вершинных функций. Перенормировка амплитуд. Тождество Уорда.
3. Универсальный формализм мультипликативной перенормировки функций Грина. Ренормализационная группа. Обезразмеренные функции Грина, их мультипликативная перенормировка, точка нормировки. Эффективный, или инвариантный заряд. Групповой характер преобразований перенормировки. Бегущая константа связи.

4. Уравнения ренормгруппы и их общие решения. Ренормгрупповое преобразование обобщенной функции Грина. Функциональные уравнения ренормгруппы. Дифференциальное уравнение ренормгруппы Овсянникова-Каллана-Симанчика. Уравнение Гелл-Манна-Лоу для бегущего заряда и уравнение для бегущей массы.
5. Ультрафиолетовая и инфракрасная асимптотики функций Грина. Случай безмассовой теории. Функция Гелл-Манна-Лоу. Функция аномальной размерности. Интегральное уравнение Гелл-Манна-Лоу. Типы асимптотического поведения эффективной константы связи в зависимости от поведения функции Гелл-Манна-Лоу.
6. Испытательный полигон квантовой теории поля - модель $g\varphi^4$. Вершинная функция для амплитуды перехода $2 \rightarrow 2$. Комбинаторика модели $g\varphi^4$. Диаграммы типа "рыба". Эффективный заряд. Неустойчивость поведения эффективного заряда относительно поправок высших порядков.
7. Проблема "нуль-заряда" в квантовой электродинамике. Обезразмеренная функция Грина фотона. Формула Ландау-Абрикосова-Халатникова для эффективной константы связи квантовой электродинамики. "Призрачный полюс Ландау". Проблема "нуль-заряда" и перспектива ее решения.
8. Асимптотическая свобода в квантовой хромодинамике. Проблемы построения квантовополевой теории сильных взаимодействий. Теорема Гросса-Вильчека-Политцера для теорий с неабелевыми полями Янга-Миллса. Обезразмеренная функция Грина глюона в квантовой хромодинамике. Бегущая константа связи сильного взаимодействия. Размерная трансмутация.
9. Бегущая масса кварка.
10. Великое объединение взаимодействий. Полупростая группа сильного и электрослабого взаимодействий $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Слияние трех бегущих констант связи и масштаб великого объединения. Вычисление угла Вайнберга. Проблема треугольника.
11. Модель Пати-Салама с кварк-лептонной симметрией.

Описание процедуры выставления оценки

Оценка «зачтено» выставляется студенту, проявившему на мероприятии промежуточной аттестации следующие умения и навыки:

- Студент правильно формулирует постановку задачи, определяет метод ее решения, проводит простейший анализ полученного результата, в том числе, определяет границы его применимости;
- Студент владеет навыками проведения сложных вычислений под руководством преподавателя, может объяснить проведенные вычисления, может самостоятельно выполнить простейшие вычисления, используя аппарат математической и теоретической физики;
- Студент может делать ошибки, но должен их исправлять самостоятельно после дополнительных (наводящих) вопросов преподавателя.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, проявившему на мероприятии промежуточной аттестации умения и навыки следующего уровня:

- Студент не может выполнить постановку задачи, не может определить метод ее решения и провести даже простейший анализ полученного результата.
- Студент не может провести самостоятельно даже базовые вычисления с

использованием аппарата математической и теоретической физики, не может пояснить вычисления, проведенные на практических занятиях под руководством преподавателя.

Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля»

Методические указания для студентов по освоению дисциплины

Базовой формой изложения учебного материала по дисциплине «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» являются лекции, причем в достаточно большом объеме. Это связано с тем, что в основе метода ренормализационной группы в квантовой теории поля лежит особый математический аппарат, с помощью которого можно решить довольно сложные и громоздкие задачи. По большинству тем предусмотрены практические занятия, на которых происходит закрепление лекционного материала путем применения его к конкретным физическим задачам и отработка навыков работы с математическим аппаратом ренормгруппы.

Для успешного освоения дисциплины очень важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные консультации. Основная цель решения задач – помочь усвоить фундаментальные понятия и основы ренормгруппы. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы.

Большое внимание должно быть уделено выполнению домашней работы. В качестве заданий для самостоятельной работы дома студентам предлагаются задачи, аналогичные разобранным на лекциях и практических занятиях или немного более сложные, которые являются результатом объединения нескольких базовых задач.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы с аппаратом метода ренормализационной группы в квантовой теории поля и проведения вычислений, в течение обучения проводятся мероприятия текущей аттестации в виде двух контрольных работ и самостоятельных работ (в аудитории) в течение семестра изучения дисциплины. Также проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

В конце семестра изучения дисциплины студенты сдают зачет. Зачет по итогам первого семестра выставляется по итогам контрольных работ и краткого собеседования по их результатам.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Метод ренормализационной группы в квантовой теории поля» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать зачет по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.