



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ФГБОУ ВО «ИГУ»
Кафедра общей и космической физики

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета
/ Н.М. Буднев
17 апреля 2024 г.

Рабочая программа дисциплины

Наименование дисциплины (модуля): Б1.В.05 Введение в квантовую теорию поля

Направление подготовки: 03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки: Астрофизика высоких энергий

Квалификация выпускника: магистр

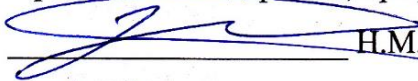
Форма обучения: очная

Согласовано с УМК:

физического факультета

Протокол № 42 от «15» апреля 2024 г.

Председатель: д.ф.-м.н., профессор


Н.М. Буднев

Рекомендовано кафедрой:

общей и космической физики

Протокол № 8

от «22» марта 2024 г.

Зав.кафедрой д.ф.-м.н., профессор


Паперный В.Л.

Иркутск 2024 г.

Содержание

I. Цели и задачи дисциплины (модуля)	3
II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО	3
III. Требования к результатам освоения дисциплины	3
IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	5
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	5
4.3. Содержание учебного материала	6
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	6
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)	7
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	8
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии).....	8
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля).....	9
а) <i>перечень литературы</i>	9
б) <i>периодические издания</i>	9
в) <i>список авторских методических разработок</i>	9
г) <i>базы данных, информационно-справочные и поисковые системы</i>	9
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)	10
6.1. Учебно-лабораторное оборудование:	10
6.2. Программное обеспечение:	10
6.3. Технические и электронные средства:	10
VII. Образовательные технологии.....	10
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации.....	10

I. Цели и задачи дисциплины (модуля)

«Введение в квантовую теорию поля» является специальной дисциплиной теоретического характера и предполагает знание основ механики, электродинамики, квантовой механики, а также основ математического анализа, линейной алгебры и дифференциальных уравнений.

Цели курса

Целью курса «Введение в квантовую теорию поля» является ознакомление с основными идеями и методами квантовой теории поля, используемыми в физике элементарных частиц, астрофизике, физике космических лучей и составляющими основу теоретического описания широкого круга физических явлений.

Задачи курса

Данный курс призван решать следующие задачи:

- знакомство с основополагающими принципами, понятиями и гипотезами, лежащими в основе описания квантовополевых систем;
- изучение методов квантовой теории поля;
- знакомство с основными физическими явлениями, описываемыми квантовой теорией поля;

Программа ориентирована на развитие у студентов интереса к самостоятельному изучению фундаментальных основ науки.

II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

«Введение в квантовую теорию поля» входит в часть, формируемую участниками образовательных соотношений, блока Б1 ОПОП по направлению 03.04.02 Физика. При изучении курса «Введение в квантовую теорию поля» используются знания, приобретенные при изучении основных физических и математических курсов в бакалавриате, а также могут пригодиться материалы спецкурсов по релятивистской квантовой теории и теории излучения (если они изучались в бакалавриате). Курс «Введение в квантовую теорию поля» является базовым для изучения такого курса как «Квантовая электродинамика», а также курсов по физике частиц и астрофизике.

Дисциплина изучается в третьем семестре на втором курсе магистратуры по направлению подготовки 03.04.02 «Физика».

III. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс освоения дисциплины направлен на формирование компетенций в соответствии с ФГОС ВО и ОПОП по данному направлению подготовки (03.04.02 Физика):

- Способен выполнять математическую и компьютерную обработку, интерпретацию и анализ результатов астрофизических исследований (ПК-3).

Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Компетенция	Индикаторы компетенций	Результаты обучения
ПК-3	ИДК ПК.3.1 Способен выбирать применимые методы для описания астрофизических явлений и объектов	Знать: основные типы взаимодействий и методы вычислений в квантовой теории поля Уметь: делать вычисления во вторично квантованной теории. Владеть: навыками вычисления сечений и вероятностей распадов, правилами Фейнмана при вычислении матричных элементов в КЭД

IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 3 зачетных единицы, 108 часов, в том числе 59 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 18 аудиторных часов (во время практических занятий).

Форма промежуточной аттестации: зачёт.

4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов

№ п/п	Раздел дисциплины/тема	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися			Самостоятельная работа	
					Лекции	Семинарские/практические/лабораторные занятия	Консультации		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<i>Раздел 1. СВОБОДНЫЕ КЛАССИЧЕСКИЕ ПОЛЯ.</i>	3	22,3	4	6	4	0,25	12	Опрос, решение задач на практическом занятии
2	<i>Раздел 2. КВАНТОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ПОЛЕЙ.</i>	3	24,3	6	8	4	0,25	12	
3	<i>Раздел 3. ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПОЛЯ.</i>	3	27,3	4	10	4	0,25	13	
4	<i>Раздел 4. МАТРИЦА РАССЕЯНИЯ, ДИАГРАММЫ ФЕЙНМАНА</i>	3	26,3	4	10	4	0,25	12	
Зачёт, КОНтроль КСР			8						Решение задач
Итого часов			108	18	34	16	1	49	

4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
3	Все разделы	Решение задач	В течение семестра	40	Готовое решение задачи в письменном виде	[1-2]
3	Подготовка к дискуссии на практических занятиях	Работа с учебной литературой	В течение семестра	9	Дискуссия	[1-2]
Общий объем самостоятельной работы по дисциплине (час)				49		

4.3. Содержание учебного материала

Раздел 1. СВОБОДНЫЕ КЛАССИЧЕСКИЕ ПОЛЯ

1. Лагранжиан. Теорема Нетер.
2. Скалярное поле. Энергия-импульс скалярного поля.
3. Массивное векторное поле. Локальный репер.
4. Электромагнитное поле.
5. Поле Дирака.

Раздел 2. КВАНТОВАНИЕ СВОБОДНЫХ ПОЛЕЙ

6. Представление чисел заполнения. Каноническое квантование. Представление Шредингера и Гайзенберга.
7. Релятивистская схема квантования полей.
8. Перестановочные соотношения. Квантование по Ферми-Дираку и Бозе-Эйнштейну.
9. Квантование полей с целым спином. Квантование электромагнитного поля.
10. Квантование поля Дирака.

Раздел 3. ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПОЛЯ

11. Лагранжианы взаимодействия. Электромагнитное поле как калибровочное.
12. Неабелевы калибровочные поля. Лагранжиан КХД.
13. Лагранжиан слабых взаимодействий, промежуточный бозон, спонтанное нарушение симметрии.
14. Диагонализация модельных гамильтонианов.

Раздел 4. МАТРИЦА РАССЕЯНИЯ, ДИАГРАММЫ ФЕЙНМАНА

15. Представление взаимодействия. Матрица рассеяния.
16. Теоремы Вика.
17. Функции Грина свободных полей. Причинная функция Грина.
18. Диаграммы Фейнмана. Правила Фейнмана КЭД в импульсном представлении.

4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)		Оценочные средства	Формируемые компетенции
			Всего Часов	Из них практическая подготовка		
1	2	3	4		5	6
1.	Раздел 1, Тема 1	Теорема Нетер и сохраняющиеся величины.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-3
2.	Раздел 1, Тема 2	Вычисление энергии-импульса скалярного поля	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
3.	Раздел 1, Тема 3	Векторное поле, дополнительные условия.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
4.	Раздел 1, Тема 4	Классическое электромагнитное поле и его динамические величины.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
5.	Раздел 1, Тема 5	Энергия-импульс поля Дирака	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
6.	Раздел 2, Тема 6	Представление Шредингера, Гайзенберга	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
7.	Раздел 2, Тема 7	Различные схемы квантования	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
8.	Раздел 2, Тема 8	Типы перестановочных соотношений	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	
9.	Раздел 2, Тема 9	Квантование массивного векторного поля,	1	1	Задание на семинаре в виде задачи	

		электромагнитного поля.			
10.	Раздел 2, Тема 10	Квантованное поле Дирака, связь спина и статистики	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
11.	Раздел 3, Тема 11	Абелева калибровочная симметрия и электромагнитное поле.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
12.	Раздел 3, Тема 12	Неабелева калибровочная симметрия.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
13.	Раздел 3, Тема 13	Неабелева калибровочная симметрия и возникновение массы.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
14.	Раздел 3, Тема 14	Простые системы со смешиванием и взаимодействием.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
15.	Раздел 4, Тема 15	Матрица рассеяния и лагранжиан взаимодействия.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
16.	Раздел 4, Тема 16	Теоремы Вика и вычисление матричных элементов.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
17.	Раздел 4, Тема 17	Различные функции Грина и граничные условия.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи
18.	Раздел 4, Тема 18	Диаграммы Фейнмана и вычисление матричных элементов.	1	1	Задание на семинаре в виде задачи

4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Теорема Нетер	Внеаудиторная, решение задач	Момент импульса	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемые Научной библиотекой ИГУ и Сторонние сайты	4
2	Энергия-импульс скалярного поля	Внеаудиторная, решение задач	Вектор тока и заряд. Решение уравнения Клейна-Гордона.		4
3	Векторное поле	Внеаудиторная, решение задач	Диагонализация энергии-импульса.		4
4	Электромагнитное поле	Внеаудиторная, решение задач	Обобщенный лагранжиан, калибровки.		4
5	Поле Дирака	Внеаудиторная, решение задач	Решение уравнения Дирака, спиновые степени свободы.		2
6	Каноническое квантование	Внеаудиторная, решение задач	Гамильтонов подход и вторичное квантование		2
7	Релятивистская схема квантования	Внеаудиторная, решение задач	Представление Фока и законы сохранения.		2
8	Перестановочные соотношения	Внеаудиторная, решение задач	Зарядовая симметрия и типы перестановочных соотношений.		2

9	Электромагнитное поле	Внеаудиторная, решение задач	Вычисление динамических величин квантованного поля.	2
10	Квантование поля Дирака	Внеаудиторная, решение задач	Динамические величины дираковского поля.	2
11	Калибровочная симметрия	Внеаудиторная, решение задач	Обобщенный лагранжиан, квантование и условия калибровки.	1
12	Неабелева калибровочная симметрия	Внеаудиторная, решение задач	Лагранжиан КХД, основные свойства.	1
13	Слабые взаимодействия и массивный переносчик.	Внеаудиторная, решение задач	Спонтанное нарушение симметрии и возникновение массы.	2
14	Вторично квантованные теории	Внеаудиторная, решение задач	Гамильтонов подход, модель статического источника.	2
15	Матрица рассеяния	Внеаудиторная, решение задач	Хронологическое произведение, хронологическая экспонента.	2
16	Теоремы Вика	Внеаудиторная, решение задач	Приведение к нормальной форме	1
17	Функции Грина	Внеаудиторная, решение задач	Причинная функция Грина, свойства. Особенности на световом фокусе.	1
18	Диаграммы Фейнмана	Внеаудиторная, решение задач	Диаграммы Фейнмана в различных теориях.	1

4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 4.3.2 студентам для самостоятельного углубленного изучения дисциплины предлагаются задачи по изучаемым разделам и график их изучения. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительные параграфы по пройденной теме, представленные в литературе из п. 5, а затем решит предложенные в п. 4.3.2 задачи, методы решения которых частично обсуждаются на семинарах. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде контрольных опросов на практических занятиях.

4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ (проектов)

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

а) перечень литературы

основная литература

1. Боголюбов, Н. Н. Собрание научных трудов в 12 т.: Квантовая теория: [в 4 т.] / Н. Н. Боголюбов; Рос. акад. наук. - М. : Наука, 2005. - Т. 10 : Введение в теорию квантовых полей / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков ; ред.-сост. А. Д. Суханов. - 2008. - 736 с. - ISBN 978-5-02-035721-1 (3)
2. Киселев, В. В. Квантовая механика [Текст] : курс лекций / В. В. Киселев. - М. : Изд-во МЦНМО, 2009. - 560 с.- ISBN 978-5-94057-497-2 (4 экз.)

дополнительная литература

1. Боголюбов, Н. Н. Квантовые поля: учеб. пособие для вузов / Н. Н. Боголюбов, Д. В. Ширков ; Московский гос. ун-т им. М.В. Ломоносова. - 3-е изд., доп. - М.: Физматлит, 2005. - 383 с. - ISBN 5-9221-0580-9 (1)
2. Бьёркен Д.Д. Релятивистская квантовая теория / Д. Д. Бьёркен. - Т.1 (1 экз.)
3. Петрина, Д. Я. Квантовая теория поля / Д. Я. Петрина. - 2-е изд. - М.: Либроком, 2014. - 247 с. - ISBN 978-5-397-04311-3 (1)

б) периодические издания

- нет необходимости.

в) список авторских методических разработок

1. В системе образовательного портала ИГУ (<http://educa.isu.ru/>) размещены методические материалы и задания по данному курсу.

г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

- 1) www.ni.com/russia
- 2) <http://www.labview.ru/>
- 3) <http://library.isu.ru/ru>
- 4) ЭЧЗ «Библиотех» <https://isu.bibliotech.ru/>
- 5) ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com/>
- 6) ЭБС «Рукопт» <http://rucont.ru>
- 7) ЭБС «Айбукс» <http://ibooks.ru>

VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

6.1. Учебно-лабораторное оборудование:

Учебная аудитория для проведения занятий. Использование глобальной компьютерной сети позволяет обеспечить доступность Интернет-ресурсов и реализовать самостоятельную работу студентов. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук.

6.2. Программное обеспечение:

Стандартные сервисы глобальной сети Интернет, стандартные средства просмотра презентаций и научных публикаций в электронном виде.

6.3. Технические и электронные средства:

Во время лекционных занятий студентам демонстрируются на экране материалы курса в виде презентаций.

VII. Образовательные технологии

При изучении данной дисциплины используются следующие образовательные технологии:

1. Практические занятия, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения практических и проблемных задач;
2. Консультации – еженедельно для всех желающих студентов; Компьютерные симуляции для демонстрации различных механических процессов.
3. Текущий контроль за деятельностью студентов осуществляется в основном на практических занятиях при дискуссии о результатах выполненных практических работ.

VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации

Фонд оценочных средств (ФОС) представлен в приложении.

Оценочные средства текущего контроля — задачи на практических занятиях.

Форма проведения промежуточной аттестации — дифференцированный зачет.

8.1.1. Оценочные средства для входного контроля

Входной контроль не предусмотрен.

8.1.2. Оценочные средства текущего контроля

Текущий контроль успеваемости магистрантов осуществляется во время практических занятий при решении задач и дискуссиях.

Примеры задач:

1. Вычислить энергию скалярного поля.
2. Вычислить матричный элемент рассеяния $2 \rightarrow 2$ с использованием теоремы Вика.

Примерный список контрольных вопросов текущего контроля:

1. Примеры преобразований, сохраняющих действие.
2. Каноническое квантование, как оно связано с классической механикой?
3. Релятивистская схема квантования – суть подхода.
4. Квантование скалярного поля.

5. Квантование массивного векторного поля.
6. Квантование электромагнитного поля, индефинитная метрика.
7. Квантование поля Дирака.
8. Лагранжианы взаимодействия.
9. Калибровочная инвариантность, лагранжиан квантовой электродинамики.
10. Неабелева калибровочная инвариантность, лагранжиан КХД.
11. Матрица рассеяния.
12. Теоремы Вика.
13. Правила Фейнмана вычисления матричных элементов в импульсном представлении.
14. Калибровочная инвариантность матричных элементов.
15. Какова размерность лагранжиана?

8.1.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Оценка степени сформированности компетенций будущего магистра основывается конкретностью и полнотой решения задач по каждой теме курса.

Примерный перечень вопросов и заданий к зачету

1. Теорема Нетер. Энергия-импульс.
2. Теорема Нетер. Момент количества движения и спин.
3. Теорема Нетер. Вектор тока и заряд.
4. Свободное скалярное поле, решение уравнения Клейна-Гордона.
5. Свободное скалярное поле, энергия поля.
6. Массивное векторное поле, лагранжиан и уравнения движения.
7. Массивное векторное поле, переход к локальному реперу.
8. Электромагнитное поле, лагранжиан и уравнения движения.
9. Электромагнитное поле, калибровочная инвариантность, условие Лоренца.
10. Электромагнитное поле, переход к локальному реперу.
11. Поле Дирака, лагранжиан, уравнения движения.
12. Решение уравнения Дирака, разложение по спиновым состояниям.
13. Квантование, корпускулярная трактовка чисел заполнения.
14. Представление Шредингера и Гайзенберга, каноническое квантование.
15. Релятивистская схема квантования полей.
16. Перестановочные соотношения, физический смысл частотных компонент.
17. Квантование по Ферми-Дираку и Бозе-Эйнштейну.
18. Квантование электромагнитного поля.
19. Квантование поля Дирака.
20. Лагранжианы взаимодействия, типы взаимодействий.
21. Локальная калибровочная инвариантность, лагранжиан КЭД.
22. Локальная калибровочная инвариантность, лагранжиан КХД.
23. Представление взаимодействия, S-матрица.
24. Теоремы Вика.
25. Функции Грина скалярного поля.
26. Функции Грина векторного и спинорного полей.
27. Правила Фейнмана КЭД.

Пример тестовых заданий для проверки сформированности компетенций, указанных выше п.III:

1. Основным объектом в квантовой теории поля является:

- 1) функция Лагранжа;
- 2) функция Гамильтона;
- 3) гамильтониан;
- 4) лагранжиан;
- 5) плотность функции Лагранжа;
- 6) плотность функции Гамильтона.

2. Основным объектом при каноническом квантовании является:

- 1) функция Лагранжа;
- 2) функция Гамильтона;
- 3) гамильтониан;
- 4) лагранжиан;
- 5) плотность функции Лагранжа;
- 6) плотность функции Гамильтона.

3. Основным объектом при ковариантном квантовании является:

- 1) функция Лагранжа;
- 2) функция Гамильтона;
- 3) гамильтониан;
- 4) лагранжиан;
- 5) плотность функции Лагранжа;
- 6) плотность функции Гамильтона.

4. Размерность плотности функции Лагранжа в СГС:

- 1) $[W]$;
- 2) $[W] \cdot T$;
- 3) ML^2/T^2 ;
- 4) ML^2/T ;
- 5) M/LT^2 ;
- 6) M^4 .

5. Размерность плотности функции Лагранжа в естественной системе единиц:

- 1) $[W]$;
- 2) $[W] \cdot T$;
- 3) ML^2/T^2 ;
- 4) ML^2/T ;
- 5) M/LT^2 ;
- 6) M^4 .

6. Вследствие какой симметрии из теоремы Нётер следует закон сохранения вектора энергии-импульса:

- 1) вращательной симметрии;
- 2) трансляционной симметрии;
- 3) симметрии относительно сдвигов в пространстве-времени Минковского;
- 4) симметрии относительно 4-вращений в пространстве-времени Минковского;
- 5) симметрии относительно глобального фазового преобразования вещественной полевой функции;
- 6) симметрии относительно глобального фазового преобразования комплексной полевой функции.

7. Вследствие какой симметрии из теоремы Нётер следует закон сохранения тензора момента импульса:

- 1) вращательной симметрии;
- 2) трансляционной симметрии;

- 3) симметрии относительно сдвигов в пространстве-времени Минковского;
- 4) симметрии относительно 4-вращений в пространстве-времени Минковского;
- 5) симметрии относительно глобального фазового преобразования вещественной полевой функции;
- 6) симметрии относительно глобального фазового преобразования комплексной полевой функции.

8. Вследствие какой симметрии из теоремы Нётер следует закон сохранения заряда:

- 1) вращательной симметрии;
- 2) трансляционной симметрии;
- 3) симметрии относительно сдвигов в пространстве-времени Минковского;
- 4) симметрии относительно 4-вращений в пространстве-времени Минковского;
- 5) симметрии относительно глобального фазового преобразования вещественной полевой функции;
- 6) симметрии относительно глобального фазового преобразования комплексной полевой функции.

Разработчики:

профессор кафедры теоретической физики ИГУ А.Е. Калошин

Программа рассмотрена на заседании кафедры общей и космической физики ИГУ
« 22 » марта 2024 г.

Протокол № 8, зав. кафедрой  В.Л. Паперный

Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.