



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

УТВЕРЖДАЮ
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев
«20» апреля 2024 г.



Рабочая программа дисциплины

Наименование дисциплины: Б1.В.04 Релятивистская квантовая теория

Направление подготовки: 03.03.02 Физика

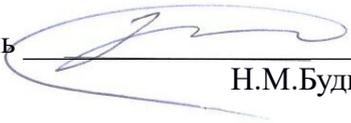
Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная физика

Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета
Протокол №42 от «15» апреля 2024 г.

Председатель


Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:
Протокол №7
От «15» марта 2024 г.

И.о. зав. кафедрой


С.В. Ловцов

Иркутск 2024 г.

Содержание

I. Цели и задачи дисциплины.....	3
II. Место дисциплины в структуре ОПОП:.....	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.....	4
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.....	4
4.3. Содержание учебного материала.....	5
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).....	6
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	7
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов).....	7
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.....	7
а) список литературы.....	7
б) периодические издания.....	8
в) список авторских методических разработок.....	8
г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.....	8
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля).....	8
VII. Образовательные технологии.....	8
VIII. Оценочные средства (ОС):.....	8

Приложение: фонд оценочных средств

I. Цели и задачи дисциплины

В ходе изучения дисциплины «Релятивистская квантовая теория» студенты изучают и осваивают основные понятия и методы квантовой теории, способы теоретического описания, количественного и качественного анализа квантовых процессов в системах, состоящих из одной или многих частиц, а также в системах с неопределенным или меняющимся числом частиц.

Дисциплина «Релятивистская квантовая теория» представляет собой теоретическую основу для последующих разделов курса теоретической физики. Математической и методической базой курса являются все разделы курса математики и теоретической физики, изученные студентами ранее.

В результате изучения курса студент приобретает как фундаментальные знания о подходах к описанию релятивистских квантовых систем, так и навыки решения конкретных релятивистских квантово-механических задач.

Цели курса

Релятивистская квантовая теория является важной частью универсальной базы для изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин, вооружает выпускников необходимыми знаниями для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, знакомит студентов с научными методами познания, позволяет научить их отличать гипотезу от теории, теорию от эксперимента. Эта дисциплина способствует проведению демаркации между научным и антинаучным подходом в изучении окружающего мира, позволяет научить строить физические модели происходящего и устанавливать связь между явлениями, прививать понимание причинно-следственной связи между явлениями. Обладая логической стройностью и опираясь на экспериментальные факты, дисциплина «Релятивистская квантовая теория» является идеальной для решения этой задачи, формируя у студентов подлинно научное мировоззрение.

Целью освоения курса релятивистской квантовой теории является ознакомление студентов с основными законами современной физики и возможностями их применения при решении задач, возникающих в их последующей профессиональной деятельности.

Задачи курса

- изучение законов релятивистской квантовой теории в их взаимосвязи;
- формирование навыков по применению положений релятивистской квантовой теории к грамотному научному анализу ситуаций, с которыми исследователю приходится сталкиваться при создании новой техники и новых технологий;
- формирование у студентов знаний основ релятивистской квантовой теории описания окружающего мира;
- ознакомление студентов с историей и логикой развития релятивистской квантовой теории и основных её открытий.

II. Место дисциплины в структуре ОПОП:

«Релятивистская квантовая теория» относится к дисциплинам, формируемым участниками образовательного процесса. Изучение курса предполагает наличие полученных на предыдущем уровне образования основных знаний, умений по дисциплинам «Дифференциальные уравнения», «Теоретическая механика», «Электродинамика». Дисциплина «Релятивистская квантовая теория» представляет собой теоретическую основу для последующих разделов курса теоретической физики, «Введение в квантовую теорию поля», «Квантовая теория излучения», «Квантовая электродинамика».

III. Требования к результатам освоения дисциплины

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

Компетенция	ПК-1: Способен использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин
Индикаторы компетен-	ИДК _{ПК 1.1} Применяет физико-математический аппарат в сфере своей

ции	профессиональной деятельности
Результаты обучения	<p>Знает: основные уравнения релятивистской квантовой теории; отличие релятивистской квантовой теории от нерелятивистской и от классической; основные методы решения задач, применяющиеся в релятивистской квантовой теории; особенности квантово-полевых представлений физических полей.</p> <p>Умеет: решать основные уравнения релятивистской квантовой теории; основные принципы релятивистской квантовой теории и применять их к решению конкретных квантово-полевых задач; формулировать основные принципы релятивистской квантовой теории и применять их к решению конкретных квантово-полевых задач.</p> <p>Владеет: математическим аппаратом, применяющемся в квантово-полевом подходе; навыками решения задач релятивистской квантовой теории; навыками решения задач релятивистской квантовой теории.</p>

IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часа, в том числе 47 часов контактной работы.

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

На практическую подготовку отводится 16 часов.

Форма промежуточной аттестации: зачет с оценкой.

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

№ п/п	Раздел дисциплины/темы	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)			Самостоятельная работа	Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися				
					Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия	Консультации		
1	1-9	5	72	16	16	16	1	25	Практическое задание; вопросы к зачету
Итого:			72	16	16	16	1	25	

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.)		
5	Тема 1-9	Задание в виде задачи	После пройденных тем	25	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по теме

						практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.
--	--	--	--	--	--	---

4.3. Содержание учебного материала

Содержание разделов и тем дисциплины

Раздел 1

Тема 1. Преобразование Лоренца. Пространство Минковского и его движения. Однородная группа Лоренца. Ковариантные и контравариантные вектора. Тензорная размерность производных. Бесконечно малые (инфинитезимальные) преобразования однородной группы Лоренца. 4-х мерные трансляции.

Тема 2. Классификация полей. Скалярное поле. Векторное поле. Генераторы преобразований — как квантово-механические операторы динамических величин. 4-х мерные трансляции и их генераторы. Алгебра генераторов группы Пуанкаре. Уравнение Клейна–Гордона и природа его инвариантности.

Раздел 2

Тема 3. Уравнение Дирака. Понижение порядка уравнения Клейна–Гордона с помощью матриц α_i и β . Уравнение Дирака для фермиона в произвольном электромагнитном поле. Нерелятивистский предел уравнения Дирака (уравнение Паули). Электромагнитный ток и его сохранение. Разложение Гордона для тока. Ковариантная форма уравнения Дирака. Основные свойства γ^μ -матриц.

Тема 4. Трансформационные свойства спиновых полей. Ковариантность уравнения Дирака при преобразованиях Лоренца. Тензорные размерности билинейных комбинаций спинорных полей (скаляр, вектор, тензор).

Тема 5. Свободные решения уравнения Дирака. Решения в системе покоя. Стационарные решения с положительной и отрицательной энергией. Спиноры в импульсном пространстве и их свойства. Разложение единичного оператора в спинорном пространстве по базису $u|k,s\rangle$ и $v|k,s\rangle$ (условие полноты). Проекционные операторы. Нормированные состояния с определённой энергией, импульсом и поляризацией во всём пространстве и в конечном объёме V .

Тема 6. Уравнение Дирака и атомная физика. Релятивистский спектр атома водорода. Преобразование Фолди–Ваутхойзена и эффективный гамильтониан взаимодействия фермиона с внешним электромагнитным полем.

Раздел 3

Тема 7. Метод функции распространения. Нерелятивистский пропагатор и его аналитические свойства в комплексной плоскости энергии (свободный случай). Его представление в виде билинейной комбинации базисных функций. Ряд теории возмущения для нерелятивистской амплитуды рассеяния.

Тема 8. Релятивистский электрон во внешнем поле. Интегральное уравнение для функции Грина и её аналитические свойства в комплексной плоскости энергии. Разложение функции Грина по ортонормированному спинорному базису. Матрица рассеяния в виде ряда теории возмущения. Рассеяние на кулоновском центре. Сечение Мотта и Мессии. Амплитуда рассеяния электрона на мюоне.

Тема 9. Квантование свободного электромагнитного поля. Представление электромагнитного поля в коллективных переменных, описывающих независимые гармонические коле-

бания с двумя поляризациями. Калибровочная инвариантность и её связь с равенством нулю массы фотона. Энергия, спин и импульс фотона. Равновесное излучение и его характеристики.

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
1	2	3	4	5	6
1.	Раздел 1, Тема 1	Преобразования Лоренца, однородная группа Лоренца	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
2.	Раздел 1, Тема 2	Классификация полей, алгебра генераторов группы Пуанкаре	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
3.	Раздел 2, Тема 3	Уравнение Дирака, свойства γ^μ -матриц	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
4.	Раздел 2, Тема 4	Ковариантность уравнения Дирака	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
5.	Раздел 2, Тема 5	Свободные решения уравнения Дирака	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
6.	Раздел 3, Тема 6	Спектр атома водорода, преобразование Фолди–Ваутхойзена	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
7.	Раздел 3, Тема 7	Аналитические свойства нерелятивистского пропагатора	2	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
8.	Раздел 3, Тема 8	Фермион во внешнем поле	1	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1
9.	Раздел 3, Тема 9	Квантование свободного электромагнитного поля	1	Задание на семинаре в виде задачи	ПК-1

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.	Фундаментальные постоянные и планковские величины	Внеаудиторная, решение задач	Ввести естественную систему единиц и пересчитать фундаментальные физические постоянные в этой системе единиц. Ввести планковские величины.	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий;	6
2.	Инфинитезимальные преобразования в про-	Внеаудиторная, решение задач	Рассмотреть преобразования скалярной функции, индуцируемые бесконечно малыми вращениями про-	Образовательные ре-	6

	странстве		странства. Построить алгебру генераторов преобразования. Найти связь с матрицами Паули.	сурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ и сторонние сайты	
3.	Электромагнитное взаимодействие	Внеаудиторная, решение задач	Ввести электромагнитное поле в квантово-механической системе как «компенсирующее» поле при выполнении локального преобразования: $\Psi(x) \rightarrow \Psi'(x) = e^{ia(x)} \Psi(x)$.		6
4.	Алгебра γ^μ - матриц	Внеаудиторная, решение задач	Вычислить шпур от произведения чётного и нечётного числа γ^μ -матриц, получить разложение произвольной матрицы по γ^μ -матрицами, получить разложение произведения трёх и четырёх γ^μ -матриц.		7

4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Студентам для самостоятельного углубленного изучения дисциплины (параллельно с лекциями) предлагаются задачи по изучаемым разделам. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительные параграфы по пройденной теме, представленные в литературе, а затем решит предложенные квантово-механические задачи. Оценка самостоятельной работы студентов проводится в виде контрольных опросов на практических занятиях.

4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов)

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ.

V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) список литературы

основная литература

1. . Введение в квантовую физику / А. Н. Паршаков. - Москва : Лань, 2010. - 351 с. - Режим доступа: ЭБС "Издательство "Лань". - Неогранич. доступ.

б) дополнительная литература

1. Квантовая механика [Текст] : курс лекций / В. В. Киселев. - М. : Изд-во МЦНМО, 2009. - 560 с. - ISBN 978-5-94057-497-2 (4)

б) периодические издания

- нет

в) список авторских методических разработок

- нет

г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

<http://library.isu.ru/> — Научная библиотека ИГУ;

Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ:

- <https://isu.bibliotech.ru/> — ЭЧЗ «БиблиоТех»;
- <http://e.lanbook.com> — ЭБС «Издательство «Лань»;

- <http://rucont.ru> — ЭБС «Руко́нт» — межотраслевая научная библиотека, содержащая оцифрованные книги, периодические издания и отдельные статьи по всем отраслям знаний, а также аудио-, видео-, мультимедиа софт и многое другое;
- <http://ibooks.ru/> — ЭБС «Айбу́к» — интернет ресурсы в свободном доступе.

VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

Учебная аудитория для проведения лекционных и практических 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. На факультете имеется компьютеризированная аудитория, предназначенная для самостоятельной работы, с неограниченным доступом в Интернет.

VII. Образовательные технологии

При изучении данной дисциплины используются следующие образовательные технологии:

1. Лекции, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении практических задач
2. Практические занятия, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения практических и проблемных задач;
3. Консультации – еженедельно для всех желающих студентов.
4. Текущий контроль за деятельностью студентов осуществляется в основном на практических занятиях при дискуссии о результатах выполненных практических работ.

VIII. Оценочные средства (ОС):

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

Оценочные средства для входного контроля: не требуются.

Оценочные средства текущего контроля:

Контрольные задачи для проведения текущего контроля:

1. Частица массы m движется вдоль оси Oy связанной с неподвижным наблюдателем. Перейти в собственную систему отсчёта частицы.
2. Как связаны время наблюдателя и собственное время частицы? Можно ли говорить о собственном времени частицы, если её масса покоя равна нулю?
3. Ввести ковариантную производную и определить её тензорную размерность.
4. Вычислить шпур матриц γ^1, γ^5 .
5. Вычислить шпур матриц $\gamma^1 \gamma^5, \gamma^5 \gamma^1 \gamma^2$.
6. Пусть σ_i — матрицы Паули, a, b — два произвольных вектора. Упростить выражение $(\sigma a)(\sigma b)$.
7. Получить формулу аналогичную предыдущей для γ^μ -матриц.
8. Пусть Ψ — решение уравнения Дирака. Показать, что выражение $\bar{\Psi} \Psi$ — инвариант относительно преобразований Лоренца.
9. Пусть Ψ — решение уравнения Дирака. Показать, что выражение $\bar{\Psi} \gamma^\mu \Psi$ — вектор относительно преобразований Лоренца.
10. Получите преобразование Лоренца для системы отсчёта, движущейся вдоль единичного направления n со скоростью v .
11. Пусть $w^r(p), (r=1,2,3,4)$ — спинорная часть решения уравнения Дирака для свободной частицы, $\varepsilon_r = +1, -1$, если $r=1,2$ или $r=3,4$ соответственно. Упростить выражение $\sum_{r=1}^4 \varepsilon_r \hat{w}_\alpha^r(p) w_\beta^r(p)$.
12. Упростить выражение $e^{iS} H e^{-iS}$.

Оценочные средства для промежуточной аттестации

Форма проведения промежуточной аттестации — зачет с оценкой.

Материалы для проведения текущего и промежуточного контроля знаний студентов:

№ п/п	Вид контроля	Контролируемые темы (разделы)	Компетенции, компоненты которых контролируются
1.	Собеседование по теме;	Все разделы	ПК-1
2.	Зачет	Все разделы	ПК-1

Пример вопросов для собеседования

1. Сформулировать постулаты специальной теории относительности.
2. Дать определение движения пространства Минковского.
3. Дать определение 4-вектора, его ковариантных и контравариантных координат.
4. Дать определение однородной группы Лоренца.
5. Дать определение группы Пуанкаре.
6. Дать определение скалярного поля.
7. Дать определение векторного поля.
8. Привести явный вид матриц Паули.
9. Привести явный вид матриц α_i и β .

Примерный перечень вопросов и заданий к зачету

1. Преобразование Лоренца. Тензорная размерность производной.
2. Ковариантные и контравариантные координаты 4-вектора. Инфинитезимальные преобразования однородной группы Лоренца.
3. Генераторы преобразований группы Пуанкаре. Скалярное поле.
4. Генераторы преобразований группы Пуанкаре. Векторное поле.
5. Алгебра генераторов группы Пуанкаре. Уравнение Клейна–Гордона.
6. Уравнение Дирака. Матрицы α_i и β .
7. Уравнение Дирака. Алгебра γ^μ -матриц.
8. Уравнение Паули.
9. Ток и разложение Гордона.
10. Ковариантность уравнения Дирака. Тензорная размерность билинейных комбинаций спинорных полей.
11. Решение уравнения Дирака для свободной частицы.
12. Проекционные операторы и условие полноты в импульсном пространстве.
13. Преобразование Фолди–Ваутхойзена.
14. Нерелятивистский пропагатор. Его аналитические свойства.
15. Ряд теории возмущения для нерелятивистской амплитуды рассеяния.
16. Функция Грина для свободной частицы и её аналитические свойства.
17. Матрица рассеяния в виде ряда теории возмущения.
18. Квантование свободного электромагнитного поля.

Разработчики:



доцент кафедры теоретической физики

В.П. Ломов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 03.03.02 Физика.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики

«15» марта 2024 г.

Протокол №7 И.о. зав. кафедрой



С.В. Ловцов

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