

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Рабочая программа дисциплины

Релятивистская квантовая механика

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная и прикладная физика»

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
С.Н. Филимонов

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 – способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования;

ИПК-1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

2. Задачи освоения дисциплины

- Освоить физические и математические модели и методы релятивистской квантовой теории.
- Научиться применять физические и математические модели и методы релятивистской квантовой механики для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к Блоку 1 «Дисциплина (модули)».

Дисциплина относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, предлагается обучающимся на выбор.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 7, зачет.

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: дифференциальное и интегральное исчисление, линейная алгебра, теория обыкновенных дифференциальных уравнений, математическая физика, квантовая механика.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 з.е., 72 часа, из которых:

- лекции: 16 ч.;
- практические занятия: 16 ч.;
- в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Релятивистские волновые уравнения

Краткое содержание темы.

Синтез идей квантовой теории и специальной теории относительности. Построение релятивистских волновых уравнений: уравнение Кляйна-Гордона-Фока (КГФ) и уравнение Дирака. Обобщение уравнения Клейна-Гордона-Фока на случай частицы во внешнем электромагнитном поле. Вывод уравнения непрерывности и проблема неположительной определенности плотности вероятности. Скалярное произведение решений уравнения КГФ. Решение уравнения КГФ для свободной частицы. Нерелятивистский предел уравнения КГФ. Ковариантная форма уравнения Дирака во внешнем электромагнитном поле. Выводится уравнение непрерывности и вводится скалярное произведение для решений уравнения Дирака.

Тема 2. Решение уравнения Дирака для свободной частицы

Краткое содержание темы.

Рассматриваются стационарные состояния свободной релятивистской частицы, обладающие определенным импульсом. Вводится оператор продольной поляризации и знаковый оператор. Рассматривается сохранение полного углового момента частицы. Рассматривается проблема определения оператора скорости свободной частицы. Рассматривается сложный характер движения электрона, которое называется "дрожанием Шредингера", который связан с интерференцией состояний с различными знаками энергии. Качественно обсуждается одночастичная теория движения электрона. Вводится понятие четных и нечетных операторов и обсуждаются их основные свойства. Подробно выводятся четные и нечетные части оператора свободной релятивистской частицы. Показано, что координата может быть разложена на часть допускающую классическое описание, и часть отвечающую дрожанию Шредингера. Обсуждается проблема наличия решений с отрицательной энергией и проблема "попятного движения".

Тема 3. Парадокс Кляйна

Краткое содержание темы.

Изучается парадокс Кляйна на примере потенциального барьера типа ступеньки в одночастичном приближении. Рассматривается дырочная интерпретация Дирака процессов рождения и аннигиляции электрон-позитронных пар. Разрешение парадокса Кляйна с точки зрения рождения электрон-позитронных пар на барьере.

Тема 4. Частица во внешнем магнитном поле

Краткое содержание темы.

Вычисление операторов симметрии первого порядка для уравнения КГФ в однородном постоянном магнитном поле. Получение решения с определенным значением углового момента вдоль направления магнитного поля. Выводятся операторы симметрии уравнения Дирака во внешнем однородном постоянном магнитном поле. Рассматриваются скалярные операторы симметрии, порожденные векторными полями Кипплинга и спинные операторы симметрии, которые порождаются тензорным полем Яно-Кипплинга и векторным полем Яно. Проводится процедура разделения переменных в уравнении Дирака. Рассматривается процедура квадрирования уравнения Дирака. Построение решения уравнения Дирака с определенным значением углового момента вдоль направления поля.

Тема 5. Уравнение Дирака в центральном поле. Электрон во внешнем кулоновском поле

Краткое содержание темы.

Рассматривается уравнение Дирака в скалярном центрально-симметричном потенциале. Исследуются интегралы движения частицы в таком поле и выводятся радиальное уравнение Дирака. Изучаются шаровые спиноры и выводятся их свойства, при помощи которых проводится редукция уравнения Дирака к системе радиальных уравнений в центральном поле. Рассматриваются свойства радиальных уравнений для электрона во внешнем кулоновском поле точечного ядра. Получены асимптотики решений в окрестности начала координат ($r=0$) и на бесконечности. Подробно выводятся решения радиальных уравнений в классе квадратично-интегрируемых функций и получен спектр электрона в

кулоновском поле точечного ядра. Обсуждается проблема описания электрона в ядре с атомным номером больше критического значения $Z = 137$.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине осуществляется путем контроля посещаемости, проведения контрольных работ, тестов по лекционному материалу и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр. Оценочные материалы текущего контроля размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в седьмом семестре проводится в письменной форме по билетам. Продолжительность зачета 1 час.

Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации размещены на сайте ТГУ в разделе «Информация об образовательной программе» – <https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» – <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=25836>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине (<https://www.tsu.ru/sveden/education/eduop/>).

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Решение уравнений Дирака и Кляйна-Гордона для свободной частицы
2. Четная и нечетная часть оператора координаты для свободной дираковской частицы.
3. Анализ парадокса Клейна на примере потенциального барьера типа ступеньки.
4. Построение решений уравнения Клейна-Гордона в однородном постоянном магнитном поле.
5. Построение решений уравнения Дирака в однородном постоянном магнитном поле
6. Уравнение Дирака в кулоновском поле.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. П.А.М. Дирак. Принципы квантовой механики. ГИФМЛ. М. 1960.
2. А.А. Соколов, И.М. Тернов, В.Ч. Жуковский. Квантовая механика. Наука. М. 1979.
3. А.С. Давыдов. Квантовая механика. Наука. М. 1973.
4. Г. Бете, Э. Солпитер. Квантовая механика атомов с одним и двумя электронами. ГИФМЛ. М. 1960.
5. С. Швебер. Введение в релятивистскую квантовую теорию поля. ИЛ. М. 1963.
6. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Введение в теорию квантованных полей. Наука. М. 1984.
7. В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Релятивистская квантовая теория. Часть I. Наука. М. 1968.

в) ресурсы сети Интернет:

ICTP Relativistic quantum mechanics Lectures

<https://www.youtube.com/watch?v=6Wfe82jBxm4>

Quantum Mechanics Lecture 8: Relativistic Quantum Mechanics

<https://phys.spbu.ru/content/File/Library/studentlectures/schlippe/qm07-08.pdf>

Relativistic quantum mechanics – Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_quantum_mechanics

13. Перечень информационных технологий

- а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:
- Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook);
 - публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

- Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ –
<http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>
- Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ –
<http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>
- ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>
- ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>
- Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>
- ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>
- ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения занятий семинарского типа, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории, оборудованные соответствующей техникой (в том числе «Актру»), для реализации учебного процесса в смешанном формате.

15. Информация о разработчиках

Бреев Александр Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики ФФ НИ ТГУ.