

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

Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета

 С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.



Рабочая программа дисциплины

Релятивистская квантовая механика

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная физика»

Форма обучения
Очная

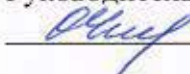
Квалификация
Бакалавр

Год приема
2021

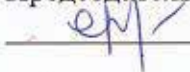
Код дисциплины в учебном плане: Б1.В.ДВ.01.01.13

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

Томск – 2021

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК 2 – Способен 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;

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 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

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

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

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

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 Киплинга и спиновые операторы симметрии, которые порождаются тензорным полем Яно-Киплинга 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

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 проводится с применением балльно-рейтинговой системы, включающей контроль посещаемости, результаты выполнения контрольных работ, заданий и тестов по материалам курса, и фиксируется в форме баллов (нарастающим итогом): посещаемость – максимальный балл 10, выполнение контрольных заданий – 40, тестов – 10. Контрольная точка проводится не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в 7 семестре проводится в письменной форме по экзаменационным билетам.

Результаты зачета определяются оценкой «зачтено» исходя из результатов ответов на зачете (40%) и текущей аттестации в течение семестра (60%) в соответствии с балльной шкалой оценивания: количество набранных баллов более 59 — «зачтено», менее 59 баллов — «не зачтено».

Экзаменационный билет состоит из двух частей.

Первая часть представляет собой тест из 2-х основных вопросов, проверяющих сформированность компетенции ИПК 1.1 в соответствии с индикатором ИОПК 2.2. Ответы даются в развернутой форме, включая практические задачи.

Вторая часть содержит 2 дополнительных вопроса из списка контрольных вопросов по курсу (приведен в разделе 11), проверяющих соответствие индикатору достижения компетенции ИОПК 2.2. Ответ на вопрос второй части дается в краткой форме, включающей краткую интерпретацию полученных результатов.

Примерный перечень теоретических вопросов

Вопрос 1. Парадокс Кляйна на примере потенциального барьера типа ступеньки в одночастичном приближении.

Вопрос 2. Оператор продольной поляризации и знаковый оператор.

Дополнительные вопросы.

Вопрос 1. Объяснить проблему наличия решений с отрицательной энергией и проблему "попятного движения" в рамках решений уравнений Дирака для свободной частицы.

Вопрос 2. Объяснить проблему описания электрона в ядре с атомным номером больше критического значения $Z = 137$.

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.

Перечень вопросов, выносимых на зачет.

Перечень выносимых на зачет вопросов по темам 1,2.

1. Синтез идей квантовой теории и специальной теории относительности.
2. Построение релятивистских волновых уравнений: уравнение Кляйна-Гордона-Фока и уравнение Дирака.
3. Обобщение уравнения Клейна-Гордона-Фока на случай частицы во внешнем электромагнитном поле.
4. Вывод уравнения непрерывности и проблема неположительной определенности плотности вероятности.
5. Скалярное произведение решений уравнения КГФ. Решение уравнения КГФ для свободной частицы.

6. Нерелятивистский предел уравнения КГФ.
7. Ковариантная форма уравнения Дирака во внешнем электромагнитном поле.
8. Уравнение непрерывности и скалярное произведение для решений уравнения Дирака.
9. Стационарные состояния свободной спиновой релятивистской частицы, обладающие определенным импульсом.
10. Оператор продольной поляризации и знаковый оператор.
11. Проблема определения оператора скорости свободной частицы.
12. Рассмотреть сложный характер движения электрона, которое называется "дрожанием Шредингера".
13. Одночастичная теория движения электрона. Четные и нечетные операторы и их основные свойства.
14. Четные и нечетные части оператора свободной релятивистской частицы.
15. Решение проблемы наличия решений с отрицательной энергией и проблема "попятного движения".

Перечень выносимых на зачет вопросов по темам 3, 4, 5.

16. Парадокс Кляйна на примере потенциального барьера типа ступеньки в одночастичном приближении.
17. Дырочная интерпретация Дирака процессов рождения и аннигиляции электрон-позитронных пар.
18. Разрешение парадокса Кляйна с точки зрения рождения электрон-позитронных пар на барьере.
19. Вычисление операторов симметрии первого порядка для уравнения КГФ в однородном постоянном магнитном поле.
20. Получение решения с определенным значением углового момента вдоль направления магнитного поля.
21. Операторы симметрии уравнения Дирака во внешнем однородном постоянном магнитном поле. Скалярные операторы симметрии, порожденные векторными полями Киплинга и спиновые операторы симметрии, которые порождаются тензорным полем Яно-Киплинга и векторным полем Яно.
22. Разделение переменных в уравнении Дирака в однородном постоянном магнитном поле.
23. Процедура квадрирования уравнения Дирака.
24. Построение решений уравнения Дирака с определенным значением углового момента вдоль направления поля в однородном постоянном магнитном поле.
25. Уравнение Дирака в скалярном центрально-симметричном потенциале.
26. Интегралы движения частицы в центрально-симметричном потенциале и радиальное уравнение Дирака.
27. Шаровые спиноры и их свойства, при помощи которых проводится редукция уравнения Дирака к системе радиальных уравнений в центральном поле.
28. Свойства радиальных уравнений для электрона во внешнем кулоновском поле точечного ядра.
29. Асимптотики решений радиального уравнения Дирака в окрестности начала координат ($r=0$) и на бесконечности во внешнем кулоновском поле.
30. Спектр электрона в кулоновском поле точечного ядра.
31. Проблема описания электрона в ядре с атомным номером больше критического значения $Z = 137$.

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.

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение

1. Когерентные состояния в однородном магнитном поле
2. Квазиэнергетические состояния спинорных частиц в поле плоской волны
3. Зарядовое сопряжение для уравнений Дирака и Кляйна-Гордона.
4. Доказательство релятивистской инвариантности уравнения Дирака.
5. Дираковские спиноры и неприводимые представления группы Лоренца.
6. Операторы физических величин в представлении Фолди-Ваутхайзена
7. Квазирелятивистское приближение в теории Дирака
8. Тонкая структура уровней энергии водородоподобного атома

Темы для рефератов и учебно-методическая литература для самостоятельной работы по разделам дисциплины «Релятивистская квантовая механика»:

Тема 1. Применение теории групп в релятивистской квантовой механике .

Литература:

- 1) Мессиа А. Квантовая механика. Т.2. М.: Наука, 1979. - 584 с.
- 2) Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Том 3. Квантовая механика. - М.: Физматлит, 2004. - 800 с.
- 3) В. Хейне. Теория групп в квантовой механике. М.:Изд-во Иностранной литературы, 1963.- 524 с.
- 4) Гельфанд, И. М., Минлос, Р. А., Шапиро, З. Я. Представления группы вращений и группы Лоренца, их применения. - Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 368 с.

Тема 2. Когерентные состояния в релятивистской квантовой механике.

Литература:

- 1) Переломов А.М..Обобщенные когерентные состояния и их применения. М.: Наука, 1987. – 272 с.
- 2) Малкин И.А., Манько В.И. Динамические симметрии и когерентные состояния квантовых систем. – М.: Наука, 1979. – 320 с.
- 3) В. В. Додонов В. И. Манько Инварианты и эволюция нестационарных квантовых систем, Труды ФИАН. — Москва : Наука, 1987. — Т. 183 : стр. 286 с.

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. И.Л. 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 OneNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX;

– 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 практических занятий, 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 для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате, оснащенные системой («Актру»).

15. Информация о разработчиках

Бреев Александр Игоревич, кандидат физико-математических наук, кафедра теоретической физики физического факультета ТГУ, доцент.