

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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан физического факультета
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Релятивистская квантовая механика

по направлению подготовки
03.03.02 Физика

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. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

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. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля.

I. По дисциплине «Релятивистская квантовая механика» предусмотрены тесты по разделам: Темы 1-2 (ИПК 1.1, ИОПК 2.1). Тесты размещены в системе LMS Moodle ТГУ (Learning Management System Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) по ссылке: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=25836>

Тесты по курсу составлены на основе банка вопросов в курсе Moodle.

Пример теста к первому разделу курса.

Вопрос: Какое релятивистское волновое уравнение описывает частицы спина 1/2? Допускается один ответ.

Ключи: 1) уравнение Дирака.

Критерии оценивания: Прохождение теста при правильном ответе (100%) оценивается в 5 баллов. Максимальная оценка 100%; выбор ответа 1) оценивается в 100%; выбор остальных ответов 0%. Набранные баллы вычисляются системой.

II. По Темам 1-5 в курсе предусмотрены Задания (ИПК 1.1, ИОПК 2.1).

Пример Задания по Теме 1.

Задание по теме Релятивистские волновые уравнения

Дать ответы (в виде файла или текста) на контрольные вопросы по теме.

Контрольные вопросы:

1. Объясните два способа построения релятивистских волновых уравнений.
2. Найдите уравнение непрерывности для уравнения Клейна-Гордона.
3. Как вводится внешнее электромагнитное поле в уравнение Клейна-Гордона?
4. Покажите, что скалярное произведение двух решений уравнения Клейна-Гордона не зависит от выбора пространственно-подобной гиперповерхности.
5. Найдите решение уравнения Клейна-Гордона для свободной частицы.
6. Можно ли отбросить отрицательно-частотные решения уравнения Клейна-Гордона?
7. Какая минимальная размерность матриц Дирака возможна для выполнения условий на гамма-матрицы Дирака?
8. Получите нерелятивистский предел уравнения Клейна-Гордона.

Студенты выполняют задание в форме эссе.

Критерии оценивания: Представленный файл эссе оценивается по форме элемента Задание системы Moodle: «простое непосредственное оценивание» по шкале в форме Pass/Fail (зачтено/не зачтено).

III. Контрольная работа по курсу проводится в виде решения 2х задач из банка задач (ИПК 1.1, ИОПК 2.2). Примеры задач из контрольных работ.

Задача 1. Покажите, что решения уравнения Клейна-Гордона для свободной частицы представляются в виде волнового пакета.

Задача 2. Найдите операторы симметрии первого порядка уравнения Клейна-Гордона для свободной частицы.

Критерии оценивания: результаты контрольной работы определяются оценками «зачтено» и «не зачтено». Оценка «зачтено» выставляется, если студент предъявляет правильные письменные решения двух задач, то есть для каждой задачи способен обосновать метод решения, понимает используемые термины и формулы и получил правильный ответ. При невыполнении указанных критериев оценки «зачтено» выставляется оценка «не зачтено».

IV. Для углубленного изучения курса по основным разделам курса студентам предлагаются темы для рефератов (ОПК-2, ПК-1).

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.

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

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

Билет содержит два теоретических вопроса, проверяющие сформированность компетенций ПК-1, ОПК-2 в соответствии с индикаторами достижения ИПК 1.1, ИОПК 2.2. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы из открытого перечня вопросов экзаменационных билетов, открытого банка задач, тестов (п. 2), направленные на проверку достижения ИПК 1.1 и ИОПК 2.2.

Примерный перечень теоретических вопросов.

Вопрос 1. Найдите условия, при которых вектор Киллинга допускает оператор симметрии первого порядка в случае внешнего электромагнитного поля.

Вопрос 2. Опишите процесс рождения электрон-позитронной пары при помощи дырочной интерпретации.

Примеры задач.

Задача 1. Найдите полную систему решений уравнения Клейна-Гордона для свободной частицы.

Задача 2. Вычислите четную часть оператора скорости уравнения Дирака для свободной частицы.

Отметка «Зачтено» ставится студенту при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

Открытый 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 операторов 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 $Z = 137$.

Критерии оценивания.

В курсе «Релятивистская квантовая механика» используется балльно-рейтинговая система оценки знаний. Максимальная сумма баллов по дисциплине составляет 100 баллов и формируется следующим образом: 60 баллов по результатам текущей аттестации и 40 баллов по результатам промежуточной аттестации (зачет). Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученной по итогам текущего контроля и промежуточной аттестации (устного зачета).

Текущая аттестация включает:

- активность студента на практических занятиях (0-15 баллов); весь семестр разбит на 3 этапа по четыре недели, баллы выставляются в конце каждого этапа (0-5 баллов).
- результаты выполнения контрольных работ (0-15 баллов),
- реферат (0-20 баллов), при невыполнении срока сдачи реферата за каждую просроченную неделю снимается 5 баллов.
- Промежуточная аттестация подразумевает проведение теоретического зачета в устной форме, который предусматривает дифференцированное оценивание ответа (0-40 баллов). К зачету допускаются только студенты, успешно прошедшие текущую аттестацию и выполнившие все практические задания. Каждый билет состоит из двух теоретических вопросов.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Тест (ИОПК-2.2.).

1. К какому типу относится уравнение Клейна-Гордона-Фока?

- а) параболический тип.
- б) гиперболический тип.
- в) эллиптический.

Ключи: б).

Задачи (ИПК-1.1).

Задача 1. Определите минимальное расстояние, на котором электрон можно считать локализованным.

Ответ. Это расстояние определяется компоновской длиной волны электрона и равно $\hbar/mc$.

Задача 2. Найдите коэффициент пропускания электронов для ступеньки Клейна.

Ответ. $\beta = 2p/(\frac{E}{c} + p)$.

Теоретические вопросы (ИПК 1.1, ИОПК 2.2):

1. Чему равна амплитуда отражения электронов, когда импульс прошедшей волны становится мнимым?
2. Покажите, что импульс прошедшей волны должен быть отрицательным, когда он принимает действительные значения.
3. В чем заключается парадокс Клейна?
4. В чем состоит идея Дирака для описания вакуумного состояния при помощи понятий электрона и дырки?
5. Опишите процесс рождения электрон-позитронной пары при помощи дырочной интерпретации.
6. Опишите процесс аннигиляции электрон-позитронной пары при помощи дырочной интерпретации.
7. В чем заключаются недостатки модели вакуума введенной Дираком?
8. Дайте описание парадокса Клейна при помощи теории дырок Дирака.
9. Найдите все вектора Киллинга, допускающие однородное постоянное магнитное поле.
10. Найдите алгебру Ли операторов симметрии первого порядка уравнения Клейна-Гордона в постоянном однородном магнитном поле.
11. Найдите нормировочную константу волновой функции, описывающей уровни Ландау релятивистской бесспиновой частицы.
12. Найти тензорное поле Яно-Киллинга, допускающее однородное постоянное магнитное поле.
13. Найти векторное поле Яно, допускающее однородное постоянное магнитное поле
14. Найти все матричные операторы симметрии уравнения Дирака в постоянном однородном магнитном поле.
15. В чем заключается процедура квадрирования уравнения Дирака?

Информация о разработчиках

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