

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

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан
С. Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

Квантовая механика

по направлению подготовки

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
Фундаментальная и прикладная физика

Форма обучения
Очная

Квалификация
Магистр

Год приема
2025

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
О.Н. Чайковская

Председатель УМК
О.М. Сюсина

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ПК-1 Способен самостоятельно ставить конкретные задачи научных исследований в области физики и решать их с помощью современной аппаратуры и информационных технологий с использованием новейшего российского и зарубежного опыта.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИПК-1.1 Знает основные стратегии исследований в выбранной области физики, критерии эффективности, ограничения применимости

ИПК-1.2 Умеет выделять и систематизировать основные цели исследований в выбранной области физики, извлекать информацию из различных источников, включая периодическую печать и электронные коммуникации, представлять её в понятном виде и эффективно использовать

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

I. По дисциплине «Квантовая механика» предусмотрены тесты по разделам: Математические основы квантовой механики, Темы 1-2 (ИПК 1.1, ИПК 1.2). 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=2884>

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

Пример теста к вводу разделу курса.

Вопрос: Пусть оператор L имеет сопряженный оператор M . Если операторы L и M совпадают, то как называется оператор L ? Допускается один ответ.

Ключи: 1) называется самосопряженным

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

II. По Темам 1-5 в курсе предусмотрены Задания (ИПК 1.1, ИПК 1.2).

Пример Задания по Теме 1.

Задание по теме Квантовая механика

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

Контрольные вопросы:

1. Объясните различие между определением эрмитового (симметрического) оператора от самосопряженного. Почему физическим величинам в квантовой теории сопоставляются самосопряженные операторы?
2. Найдите среднее значение координаты одномерной частицы для волнового пакета.
3. Что такое смешанный квантовый ансамбль?
4. Как для данной физической величины определить вероятность того, что в результате измерения квантовой системы находящейся в чистом состоянии мы получим значение физической величины равное L .
5. В чем основное различие между классической и квантовой логикой?
6. Как изменяется форма волнового пакета с течением времени?
7. Покажите, что квадрат оператора углового момента коммутирует со всеми операторами углового момента.
8. Найдите решение уравнения Шредингера для квантового гармонического осциллятора.

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, ИПК 1.2). Примеры задач из контрольных работ.

Задача 1. Пусть частица находится в бесконечно глубокой потенциальной яме. Найдите среднее значение импульса частицы.

Ключ: Среднее значение импульса равно нулю.

Задача 2. Найти волновую функцию описывающую стационарные состояния частицы в одномерной симметричной потенциальной яме конечной глубины. Покажите, что в этом случае четность является интегралом движения.

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 (ИПК 1.1, ИПК 1.2).

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

Тема 1. Применение теории групп в 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.

Тема 2. Теория рассеяния в квантовой теории.

Литература:

- 1) Коэн-Таннуджи К., Диу Б., Лалоз Ф. Квантовая механика. Том 2. - Екатеринбург: УрГУ, 2000. - 799 с.
- 2) А.С. Давыдов. Квантовая механика. М.: Наука, 1973. - 704 с.
- 3) Мессиа А. Квантовая механика. Т.2. М.: Наука, 1979. - 584 с. 4) Гончаренко А. М.

Тема 3. Когерентные состояния в квантовой теории.

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 1 семестре и 2 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 ИПК 1.2. 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 ИПК 1.1. Ответ на вопрос второй части дается в краткой форме, включающей краткую интерпретацию полученных результатов.

Билет содержит два теоретических вопроса, проверяющие компетенции ИПК 1.1, ИПК 1.2. 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 ИПК 1.2.

Примерный перечень теоретических вопросов.

Вопрос 1. Свойства оператора углового момента. Собственные векторы и собственные значения.

Вопрос 2. Задача. Найти уровни энергии в одномерной симметричной потенциальной

$$\text{яме } V(x) = \begin{cases} -V_0, & |x| < a \\ 0, & |x| \geq a \end{cases}.$$

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. Гильбертово пространство. Нормы. Скалярное произведение. Базис в гильбертовом пространстве.
2. Функционалы. Обобщенные дельта-функции. Интегральное представление дельта-функции.
3. Условие замкнутости векторов гильбертового пространства.
4. Понятие оператора. Ядро линейного оператора.
5. Алгебра операторов. Функция от оператора.
6. Самосопряженные операторы. Свойства операции эрмитового сопряжения.
7. Унитарные и положительные операторы. Теорема Стоуна. Основные свойства унитарных преобразований операторов.
8. Проекционные операторы и их свойства.
9. Собственные значения и собственные вектора операторов. Спектр. Полный набор операторов. Непрерывный спектр.
10. Представления векторов. Связь между двумя разными представлениями.
11. Представления операторов. Матричные элементы оператора. Связь между разными представлениями одного оператора.
12. След оператора и его свойства.
13. Постулат соответствия ф.в. и операторов. Принцип соответствия. Правила сопоставления Фон-Неймана.
14. Квантовые скобки Пуассона. Перестановочные соотношения Гейзенберга.
15. Координатное представление. Полный набор физ. величин. Оператор координаты и импульса в координатном представлении.
16. Практический рецепт построения операторов ф.в., имеющих физический аналог. Правила сопоставления Вейля.

Перечень выносимых на зачет вопросов по темам 3, 4.

1. Состояния в классической механике. Концепция непрерывности и невмешательства. Чистые и смешанные состояния.
2. Состояния в квантовой механике. Эффект вмешательства и принцип соответствия.
3. Измерение в квантовой механике. Приготовление состояний. Квантовый ансамбль.
4. Функция распределения как характеристика результата взаимодействия квантовой системы с прибором. Физический и математический критерий сравнения состояний.
5. Статистический оператор и его свойства.
6. Чистые и смешанные состояния в квантовой механике. Теорема фон-Неймана о чистых состояниях.
7. Физический смысл нормированных на единицу векторов гильбертового пространства. Принцип суперпозиции состояний.
8. Дисперсия физических величин. Доказательство того, что в квантовой теории нет таких состояний, в которых все ф.в. имеют нулевую дисперсию. Физический смысл собственных векторов операторов ф.в.
9. Одновременная измеримость ф.в. Определение полного набора ф.в. и числа степеней квантовой системы. Принцип дополнительности.
10. Статистический характер квантовой теории. Теорема Неймана о скрытых параметрах.
11. Соотношения неопределенности Гейзенберга.
12. Постулат динамической эволюции квантовой системы. Гамильтониан. Уравнение Шредингера.
13. Уравнение эволюции фон Неймана для смешанных состояний.
14. Изменение средних значений ф.в. со временем. Принцип соответствия и гамильтониан.
15. Картины представления Шредингера и Гейзенберга. Уравнение Гейзенберга.
16. Теорема Эренфеста. Уравнение Эренфеста.
17. Интегралы движения. Закон сохранения в квантовой механике.
18. Интегралы движения и уравнение Шредингера.
19. Стационарные состояния. Стационарные состояния свободной нерелятивистской частицы.
20. Вероятности результатов измерения ф.в. Физический смысл волновой функции. Статистическое толкование волновой функции.
21. Структура спектра одномерных квантовых систем.
22. Прямоугольная потенциальная яма.
23. Гармонический осциллятор. Лестничные операторы. Спектр гармонического осциллятора.
24. Состояния гармонического осциллятора в координатном представлении. Сравнение с осциллятором в классической механике.
25. Решение нестационарного уравнения Шредингера для свободной одномерной частицы. Волновой пакет.
26. Форма волнового пакета в заданный момент времени.
27. Эволюция волнового пакета во времени.
28. Одномерная задача рассеяния. Коэффициент прохождения и отражения. Общие свойства одномерного рассеяния.
29. Потенциальный барьер типа ступеньки.
30. Туннельный эффект и соотношение неопределенности.
31. Туннельный эффект на примере потенциального барьера конечной ширины.

Перечень выносимых на экзамен вопросов по темам 5, 6.

1. Классический угловой момент. Определение углового момента в квантовой механике.

2. Оператор квадрата углового момента, повышающие и понижающие операторы и их коммутационные соотношения.
3. Собственные значения оператора квадрата углового момента и оператора проекции на ось Oz.
4. Матрицы операторов углового момента. Стандартный базис.
5. Система уравнений на собственные значения оператора квадрата углового момента и оператора проекции на ось Oz в координатном представлении.
6. Собственные значения, отвечающие орбитальному угловому моменту.
7. Интегралы движения частицы в центральном поле
8. Радиальное уравнение частицы в центральном поле. Эффективный потенциал.
9. Асимптотика решений радиального уравнения в начале координат.
10. Существенное и случайное вырождение уровней энергии
11. Задача двух тел в квантовой механике и ее симметрии.
12. Наблюдаемые, связанные с центром масс и относительной частицей.
13. Собственные значения и собственные состояния квантового гамильтониана.
14. Модель Бора для атома водорода. Кулоновские и атомные единицы.
15. Радиальное уравнение для атома водорода.
16. Квантование энергии атома водорода. Уровни энергии. Спектроскопические обозначения
17. Волновые функции атома водорода в координатном представлении.
18. Радиусы орбит Бора с точки зрения квантовой теории

Перечень выносимых на зачет вопросов по темам 7, 8, 9.

1. Магнитный момент. Квантование магнитного момента.
2. Постулаты теории Паули.
3. Спин $\frac{1}{2}$. Матрицы Паули.
4. Нерелятивистское описание частицы спина $\frac{1}{2}$.
5. Полный угловой момент системы из двух частиц
6. Полный угловой момент спиновой частицы.
7. Задача о сложении двух спиновых угловых моментов. Триpletное и синглетное состояние.
8. Сложение двух угловых моментов в общем случае.
9. Коэффициенты Клебша-Гордона.
10. Квазиклассическое приближение.
11. Квазиклассическое приближение в одномерном случае
12. Постановка задачи стационарной теории возмущений.
13. Приближенное решение стационарного уравнения Шредингера.
14. Возмущение невырожденного уровня в первом и втором порядке по теории возмущений.
15. Возмущение вырожденного уровня в первом порядке по теории возмущений.
16. Постановка задачи нестационарной теории возмущений.
17. Приближенное решение уравнения Шредингера в первом порядке. Вероятность перехода из одного стационарного состояния в другое стационарное состояние.
18. Измерение в квантовой механике. Волновая функция после измерения.
19. Селективное и неселективное измерение
20. Матрица плотности после неселективного измерения
21. Приготовление состояний
22. Измерение без взаимодействия
23. Квантовый эффект Зенона. Формулировка теоремы Халфина
24. Доказательство теоремы Халфина
25. Эффект Антizenона. О локальности и нелокальности квантовой механики
26. Определение запутанных состояний

27. Зацепленные состояния при селективном измерении

Критерии оценивания.

В курсе «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.).

Укажите, какие пространства называются линейными:

- а) множество матриц-столбцов с неотрицательными элементами.
- б) совокупность n комплексных чисел.
- в) совокупность комплексных квадратных матриц

Ключи: б) в)

Задачи (ИПК-3.3).

Задача 1. Найдите среднее значение координаты частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме.

Ответ. Среднее значение координаты частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме равно нулю.

Задача 2. Чему равно среднее значение квадрата координаты частицы находящейся в фоковском состоянии n ?

Ответ. Фоковское состояние n отвечает состоянию квантового гармонического осциллятора. Среднее от квадрата координаты равно $n+1/2$.

Теоретические вопросы (ИПК 3.3):

1. Дайте определение унитарного пространства, нормированного пространства, гильбертова пространства.
2. Покажите, что условие замкнутости для векторов базиса в гильбертовом пространстве сводится к формуле типа разбиения единицы.
3. Покажите, что эрмитов оператор не всегда является самосопряженным оператором.
4. Вычислите нормированную волновую функцию квантовой частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме.

5. Докажите правило Лейбница для коммутатора двух операторов.
6. Объясните, что такое чистое состояние в квантовой теории и каким статистическим оператором оно определяется.
7. Как определяется обратный оператор и каковы его свойства?
8. Объясните, как определяется квантовая скобка Пуассона.
9. Вычислите среднее значение импульса частицы в бесконечно глубокой потенциальной яме.
10. Как задается координатное представление? Чем оно отличается от импульсного представления?
11. Как связаны между собой волновые функции одного и того же кет-вектора в разных представлениях?
12. Вычислите, как действует экспонента от оператора дифференцирования на гладкую функцию.
13. Объясните, как получаются перестановочные соотношения Гейзенберга из канонической скобки Пуассона для обобщенных координат и импульсов.
14. Объясните методику расчета средних значений физических величин при измерении.
15. Постройте решение уравнения Шредингера для свободной частицы в виде волнового пакета. Почему волновой пакет расплывается с течением времени?
16. Найдите спектр квантового гармонического осциллятора. Как вводятся операторы рождения и уничтожения квантов?
17. Что такое приготовление состояний? Для чего нужно вводить понятие квантового ансамбля?
18. Докажите теорему Рисса о линейном функционале.
19. Дайте определение интеграла движения в квантовой механике. Как задать интеграл движения в картине Гейзенберга?
20. Сформулируйте постановку одномерной задачи рассеяния.

Информация о разработчиках

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