

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

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.О.06.02

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 1 – Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 – Знает основные законы, модели и методы исследования физических процессов и явлений

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить понятийный аппарат и методы нерелятивистской квантовой теории.

– Научиться применять понятийный аппарат и методы квантовой механики для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

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

Семестр 5, зачет. Семестр 6, экзамен.

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.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 з.е., 252 часа, из которых:

– лекции: 94 ч.;

–практические занятия: 32 ч.;

– в том числе практическая подготовка: 16 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Математические основы квантовой механики

Определение гильбертового пространства. Обозначения Дирака. Функционалы. Понятие оператора. Ядро линейного оператора. Алгебра операторов. Самосопряженные операторы. Унитарные и положительные операторы. Проекционные операторы. Собственные вектора и собственные значения операторов. Теория представлений. След оператора.

Тема 2. Физические величины и операторы

Правила сопоставления фон Неймана. Квантовые скобки Пуассона. Перестановочные соотношения Гейзенберга. Полный набор физических величин в координатном представлении. Построение физических величин имеющих классический аналог. Правило сопоставления Вейля.

Тема 3. Состояния в квантовой механике

Состояния классических и квантовых систем. Эффект вмешательства. Принцип соответствия. Квантовые ансамбли. Статистический оператор и его свойства. Чистые и смешанные состояния. Квантовая логика, доказательство теоремы о скрытых параметрах. Соотношения неопределенности Гейзенберга. Статистическое толкование волновой функции.

Тема 4. Одномерные квантовые системы

Уравнение Шредингера и Гейзенберга. Интегралы движения. Теорема Эренфеста. Волновой пакет. Одномерные квантовые системы. Соотношение неопределенности энергия-время. Одномерная задача рассеяния. Туннельный эффект. Квантовый гармонический осциллятор. Состояния гармонического осциллятора в координатном представлении.

Тема 5. Угловой момент в квантовой механике.

Классический угловой момент. Спектр операторов углового момента и их матричные элементы. Классический угловой момент в координатном представлении.

Тема 6. Задача двух тел

Частица в центральном поле. Задача двух тел в квантовой механике. Атом водорода. Квантование энергии для атома водорода. Уровни энергии атома водорода.

Тема 7. Спин

Спин электрона. Магнитный момент. Постулаты теории Паули. Описание частицы спина $\frac{1}{2}$. Сложение угловых моментов.

Тема 8. Приближенные методы

Квазиклассическое приближение. Стационарная теория возмущений. Возмущение невырожденного уровня. Возмущение вырожденного уровня. Нестационарная теория возмущений. Эффект Зеемана.

Тема 9. Теория измерений

Постулаты квантовой механики. Селективное и неселективное измерение. Измерение без взаимодействия. Квантовый эффект Зенона. Теорема Халфина. Запутанные состояния. Зацепленные состояния при селективном и неселективном измерении. Теорема о невозможности клонирования квантового состояния. Интерпретации квантовой механики.

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 5 семестре и экзамен в 6 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 ОПК 1 в соответствии с индикатором ИОПК 1.1. 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 1.1. Ответ на вопрос второй части дается в краткой форме, включающей краткую интерпретацию полученных результатов.

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 яме

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

Дополнительные вопросы.

Вопрос 1. Объяснить физический смысл условия Стефана на границе раздела твердой и жидкой фаз.

Вопрос 2. Объяснить, из каких свойств вычисляется вронскиан функций Йоста $W(\varphi(x, k), \bar{\varphi}(x, \bar{k}))$ и найти его значение.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=2425>

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. Гильбертово пространство. Норма. 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 экзамен 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. Триплетное 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 Антисимметрии. О локальности и нелокальности квантовой механики
26. Определение запутанных состояний
27. Зацепленные состояния при селективном измерении

в) План семинарских / практических занятий по дисциплине.

1. Волновые функции и вычисление средних значений.
2. Действия с операторами.
3. Уравнение Шредингера и состояние квантовой частицы в потенциальной яме.
4. Потенциальная яма конечной глубины.
5. Потенциальный барьер конечной глубины.
6. Туннельный эффект.
7. Гармонический осциллятор.
8. Угловой момент.
9. Описание спина. Сложение угловых моментов.
9. Стационарная теория возмущений, невырожденный случай.
10. Стационарная теория возмущений, вырожденный случай.
11. Эффект Зеемана.
12. Квазиклассическое приближение.
13. Частичный след матрицы плотности

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Вопросы, вынесенные на самостоятельное изучение.

1. В чем суть метода линейной комбинации орбиталей? Что понимают под орбиталью?
2. Как связано происхождение разрешенных энергетических зон в кристалле с уровнями энергии атома?
3. Правило сумм для осцилляторов
4. Метод слабой связи для расчета спектра энергий электронов в кристалле.
5. Правила отбора для дипольных переходов в атоме водорода.
6. Релятивистские поправки к энергетическим уровням электрона
7. Тонкая структура спектральных термов
8. Кулоновский и обменный интегралы

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.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Козн-Таннуджи К., Диу Б., Лалоз Ф. Квантовая механика. В 2-х томах. Пер. с фр. Т.1-2. Изд. 2, испр. и доп., 2015. – 1632 с.
2. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. Изд.8., 2015. – 672 с.
3. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике: Т.8,9: Квантовая механика. Пер. с англ. Т.8,9. Изд.8. 2014. 528 с..
4. Блохинцев Д.И. Принципиальные вопросы квантовой механики. Изд.3. 2015. 152 с..
5. Давыдов А. Квантовая механика. 3 изд. — СПб. : БХВ-Петербург, 2011 г. — 704 с.

б) дополнительная литература:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Наука, 1989.
2. Мессиа А. Квантовая механика. Т.1. М.: Наука, 1978; Т.2. М.: Наука, 1979.
3. Елютин П.В., Кривченков В.Д. Квантовая механика. М. : Физматлит, 2001. - 304 с
4. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. Т.1; Т.2. М.: Мир, 1974.
5. Галицкий В.М., Карнаков Б.М. Задачи по квантовой механике. М.: Наука, 1992.
7. Бом Д. Квантовая теория. М.: Наука, 1965.
9. Боум А. Квантовая механика. М.: Мир, 1990.
10. Дирак П. Принципы квантовой механики. М.: Наука, 1979.

в) ресурсы сети Интернет:

Как понимать квантовую механику - МФТИ

<https://mipt.ru/students/organization/mezhpr/biblio/q-ivanov/quant-1-0.pdf>

Квантовая механика. Теоретический минимум

https://vk.com/doc91393228_382032921?hash=b31f9cda16d24712d5&dl=ecdfaac50c949a692b

Квантовая физика

www.ilt.kharkov.ua/bvi/ogurtsov/lect7quant.pdf

Об интерпретации квантовой механики

https://www.ufn.ru/ufn57/ufn57_8/Russian/r578f.pdf

Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов

https://ufn.ru/ufn01/ufn01_4/Russian/r014_reply.pdf

Квантовая механика как полная физическая теория

http://www.mathnet.ru/php/archive.phtml?wshow=paper&jrnid=tmf&paperid=372&option_lang=rus

Необходимые и достаточные постулаты квантовой механики

<http://www.ams.org/mathscinet-getitem?mr=2165904>

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); 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.