

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Саровский физико-технический институт -
филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего
образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
(СарФТИ НИЯУ МИФИ)

«УТВЕРЖДАЮ»

Декан физико-технического
факультета СарФТИ НИЯУ МИФИ

_____ А.К.Чернышев

«...» _____ 2021г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

Квантовая механика

(наименование дисциплины)

Направление подготовки (специальность) 03.03.01 Прикладные математика и физика

Профиль подготовки 03.03.01 Прикладные математика и физика

Квалификация (степень) выпускника _____ бакалавр
(бакалавр, магистр, специалист)

Форма обучения _____ очная
(очная, очно-заочная (вечерняя), заочная)

Автор _____ к.ф.-м. н. А.Г. Звенигородский

Рецензент _____ д.ф.-м. н. С.Н. Абрамович

Зав. кафедрой ЯРФ _____ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Руководитель ОПП _____ д.ф.-м.н. Н.В. Завьялов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО и ОС НИЯУ МИФИ
(актуализирован Ученым советом университета, Протокол №21/11 от 27.07.2021 г)

Программа актуализирована на заседании кафедры
Ядерной и радиационной физики
от 30.08.21 протокол №1

г. Саров, 2021 г.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью данного курса квантовой механики

является ознакомление студентов с основными понятиями и принципами квантовой механики и ее математическим аппаратом.

Студенты научатся пользоваться математическим аппаратом квантовой механики, будут способны применять его к исследованию простейших квантовых систем: атома водорода, ротатора, осциллятора и др., а также для решения простейших задач. Владение квантовой механикой в таком объеме позволит студентам в будущем изучать другие разделы современной физики.

Задачи дисциплины:

В процессе изучения курса студенты **должны овладеть:**

- a. основными принципами квантовой теории;
- b. методами решения квантовомеханических задач с использованием симметрии физических систем и наличия малого параметра;

обязаны знать:

- a. Основные понятия квантовой механики;
- b. квантовую теорию гармонических колебаний;
- c. общую теорию момента, включая спиновый;
- d. спектры простейших атомов и свойства их стационарных состояний;
- e. элементы квантовой теории ядерных моделей;
- f. принцип тождественности одинаковых частиц и его следствия.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Курс квантовая механика изучается студентами на 3 курсе (5 и 6 семестры обучения по ООП) и является важным компонентом в подготовке бакалавров. Изучение курса основано на базе дисциплин «Общая физика», Математический анализ, Дифференциальные уравнения, Уравнения математической физики.

3. КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА, ФОРМИРУЕМЫЕ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ / ОЖИДАЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАЗОВАНИЯ И КОМПЕТЕНЦИИ СТУДЕНТА ПО ЗАВЕРШЕНИИ ОСВОЕНИЯ ПРОГРАММЫ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Согласно ОС НИЯУ МИФИ дисциплина «Квантовая механика» направлена на формирование следующих **обще профессиональных компетенций (ОПК)** студента:

- Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности (**ОПК-1**).

В результате изучения дисциплины студент должен:

1. Знать

3-ОПК-1 Знать фундаментальные основы, полученные в области информационных технологий, естественных и гуманитарных наук, знать методы анализа информации.

В том числе:

- a. основные понятия квантово-механического описания процессов, происходящих в микромире;
- b. квантовую теорию гармонических колебаний;
- c. общую теорию момента, включая спиновый;
- d. спектры простейших атомов и свойства их стационарных состояний;
- e. элементы квантовой теории ядерных взаимодействий;

- f. принцип тождественности одинаковых частиц и его следствия

2. Уметь

У-ОПК-1 Уметь использовать на практике углубленные фундаментальные знания, полученные в области естественных и гуманитарных наук.

В том числе:

- a. пользоваться формализмом операторов гильбертова пространства;
- b. уметь решать задачи по решению простейших представлений уравнения Шредингера;
- c. использовать источники научной и методической информации для решения поставленных задач в рамках своей компетенции;
- d. представлять результаты аналитической и следовательской работы в виде выступления, доклада, информационного обзора, аналитического отчета, статьи.

3. Владеть

В-ОПК-1 Владеть навыками обобщения, синтеза и анализа фундаментальных знаний, полученные в области информационных технологий, естественных и гуманитарных наук, владеть научным мировоззрением

В том числе:

- a. навыками самостоятельной работы, самоорганизации и организации выполнения поручений.
- b. приемами обсуждения проблем с точки зрения общеприкладного осмысления рассматриваемой информации;
- c. соответствующим математическим аппаратом, позволяющим решать задачи как прикладного, так и теоретического характера в границах компетентности.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость дисциплины составляет 6 ЗЕТ (216 часов), из них - 128 аудиторных часов за 2 семестра (64 часа лекции, 64 часа – практические занятия, в том числе в интерактивной форме – 18), СРС – 52 часов.

I СЕМЕСТР

32 часа лекции, 32 часа – практические занятия, в том числе в интерактивной форме – 8), СРС – 8 часов

| Раздел учебной дисциплины | Недели | Виды учебной деятельности, | | Текущий контроль успеваемости (неделя, форма) | Аттестац. раздела (неделя, форма) | Максимальный балл за раздел |
|--|--------|----------------------------|-------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| | | Лекции | Практич. занятия/ | | | |
| 1. Основные положения квантовой механики. | | | | | | 5 |
| 1.1. Место квантовой механики в современной физической науке. Фундаментальные идеи квантовой физики. | 1 | 2 | 2 | | | |

| | | | | | | |
|---|----|---|---|--|-----------------------------------|------------|
| 1.2. Математический аппарат квантовой механики. Операторы физических величин. Свойства операторов. | 2 | 2 | 2 | Обсуждение, ответы на контрольные вопросы | Выдача темы презентац. | |
| 1.3. Матрицы операторов. Унитарные преобразования базиса. Соотношения коммутации. | 3 | 2 | 2 | Обсуждение, ответы на контрольные вопросы | | |
| 1.4. Одномерное движение. Стационарные состояния. Плотность потока вероятности. | 4 | 2 | 2 | Презентация №1 | | 5+5 |
| 1.5. Различные представления волновой функции. | 5 | 2 | 2 | Обсуждение, ответы на вопросы | Выдача самостоят работы 1 | |
| 1.6. Зависимость средних от времени. Интегралы движения. Законы сохранения и симметрии. Сохранение чётности | 6 | 2 | 2 | Решение задач, ответы на контрольные вопросы | | |
| 2. Одномерное движение частиц в поле потенциальных сил. | | | | | | 5 |
| 2.1. Движение в однородном поле. Коэффициент прохождения. | 7 | 2 | 2 | Презентация №2 | | 5+5 |
| 2.2. Бесконечно глубокая прямоугольная потенциальная яма. Спектр, стационарные состояния, средние. | 8 | 2 | 2 | Решение задач, ответы на контрольные вопросы | | |
| 2.3. Линейный гармонический осциллятор. Уровни энергии и волновые функции. | 9 | 2 | 2 | Решение задач, ответы на вопросы | | |
| 2.4. Квазиклассическое приближение. Квазиклассические решения уравнения Шредингера. | 10 | 2 | 2 | Решение задач, ответы на контрольные вопросы | Сдача самостоят работы 1 | |
| 3. Движение частицы в поле центральных сил. | | | | | | 5 |
| 3.1. Общие особенности движения частицы при сферической симметрии. Вырождение по проекции и случайное вырождение. | 11 | 2 | 2 | Презентация №3 | Выдача самостоят. работы 2 | 5+5 |
| 3.2. Момент импульса: операторы, коммутационные соотношения, решения на собственные значения. | 12 | 2 | 2 | Первая полусеместровая контрольная | | |
| 3.3. Водородоподобный атом. Уровни энергии и волновые функции. Кратность вырождения. Сферический осциллятор. | 13 | 2 | 2 | Решение задач, ответы на контрольные вопросы | | |
| 3.4. Собственный магнитный момент. Паули уравнение. Движение заряженной частицы в магнитном поле. Уровни Ландау. | 14 | 2 | 2 | Презентация №4 | | 5+5 |
| 3.5. Свойства полного момента импульса. Сложение моментов. | 15 | 2 | 2 | Обсуждение, ответы на контрольные вопросы | Сдача самостоят. работы 2 | |
| 3.6. Подготовка к зачёту. Отработка тестовых вопросов. | 16 | 2 | 2 | Разбор домашних работ 1,2. Зачёт | | |

2 СЕМЕСТР

32 часа лекции, 32 часа – практические занятия, в том числе в интерактивной форме – 10), СРС – 44 часа.

| | |
|--|----------|
| 4. Спин. Частицы со спином 1/2. | 5 |
|--|----------|

| | | | | | | |
|---|--------|---|---|---|-----------------------------------|----------|
| 4.1. Спин элементарных частиц. Спиновые волновые функции и операторы спина. | 1(17) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на контрольные вопросы, | | |
| 4.2. Спин 1/2. Спиновые функции, операторы спина. Матрицы Паули и их свойства. Разложение по спиновым функциям. | 2(18) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на контрольные вопросы, | | |
| 4.3. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша- Гордана. | 3(19) | 2 | 2 | Презентация №5 | Выдача работы 3 | |
| 5. Приближённые методы решения стационарных задач квантовой механики | | | | | | 5 |
| 5.1. Теория стационарных возмущений для дискретного спектра. Случай невырожденного спектра. | 4(20) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на вопросы. | | |
| 5.2. Теория стационарных возмущений для невырожденного спектра. Примеры. | 5(21) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на вопросы. | | |
| 5.3. Теория стационарных возмущений для дискретного спектра. Случай вырожденного спектра. | 6(22) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на вопросы. | | |
| 5.4. Теория нестационарных возмущений. Переходы под влиянием возмущений, зависящих от времени. | 7(23) | 2 | 2 | Презентация №6 | | |
| 4.5. Переходы под действием периодических возмущений. Резонансное приближение. Переходы в непрерывный спектр. | 8(24) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на вопросы. | Сдача самостоят. работы 3 | |
| 6. Тожественные частицы и понятие симметрии в квантовой механике. | | | | | | 5 |
| 6.1. Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц. Принцип Паули. Бозоны и фермионы. | 9(25) | 2 | 2 | Решение задач, ответы на вопросы. | Выдача самостоят. работы 4 | |
| 6.2. Системы тождественных частиц. Обменное взаимодействие. Симметрия координатных и спиновых функций. | 10(26) | 2 | 2 | Презентация №7 | | |
| 6.3. Свойства атомных уровней. Состояния электронов в атоме. Уравнение Томаса-Ферми. Периодическая система Менделеева. | 11(27) | 2 | 2 | Вторая полусеместровая контрольная | | |
| 6.4. Элементарная теория основного состояния атомов с двумя электронами. | 12(28) | 2 | 2 | Презентация №8 | | |
| 7. Элементарные понятия квантовой теории рассеяния. | | | | | | 5 |
| 7.1. Задача о рассеянии. Амплитуда рассеяния и эффективное сечение рассеяния. Оптическая теорема. | 13(29) | 2 | 2 | Обсуждение, ответы на контрольные вопросы. | | |
| 7.2. Упругое рассеяние заряженных частиц и формула Резерфорда. Резонансное рассеяние. Формула Брейта-Вигнера. | 14(30) | 2 | 2 | | Сдача самостоят. работы 4 | |
| 7.3. Эффекты обмена при упругом рассеянии одинаковых частиц без спина. Обменные эффекты при рассеянии одинаковых частиц, обладающих спином. | 15(31) | 2 | 2 | | | |
| Итоговое занятие | 16(32) | 2 | 2 | | | 5 |

4.2. СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Раздел 1. Основные положения квантовой механики

1.1. Место квантовой механики в современной физической науке.

Основные экспериментальные факты, лежащие в основе квантовой механики. Гипотеза Планка. Формула Планка. Формула Эйнштейна для фотоэффекта. Эффект Комптона и фотоэффект, как подтверждение корпускулярной природы квантов излучения. Опыты Резерфорда, «старая» квантовая теория ядра Бора и правило квантования Бора-Зоммерфельда. Корпускулярно-волновой дуализм и гипотеза Луи де Бройля. Соотношения де Бройля.

1.2. Принципы построения и постулаты квантовой механики.

Принцип неопределённости. Квантовомеханический эксперимент и его особенности. Роль измерительного «прибора». Волновая функция свободно движущейся частицы. Принцип суперпозиции состояний. Статистическое толкование волновой функции. Операторы физических величин. Собственные функции и собственные значения операторов. Сложение и умножение операторов. Операторы координаты и импульса. Волновая функция в координатном и импульсном представлениях.

1.3. Одномерное движение. Стационарные состояния.

Временное уравнение Шредингера. Оператор Гамильтона. Плотность тока вероятности. Ортогональность собственных функций оператора Гамильтона. Стационарные состояния. Общие свойства одномерного движения. Осцилляционная теорема. Зависимость средних от времени. Уравнения движения в форме Гейзенберга. Скобки Пуассона. Теоремы Эренфеста. Интегралы движения и условия симметрии.

1.4. Различные представления волновой функции.

Как перейти от координатного представления к импульсному? Каков явный вид операторов $\hat{p}^{(p)}$ импульса и $\hat{r}^{(p)}$ координаты в импульсном представлении? Как преобразовать уравнение Шредингера из координатного представления в импульсное? Каким образом осуществляется дираковское описание состояния квантовой системы? Различные представления операторов. Каким образом получают эквивалентные представления? Как можно с помощью унитарных преобразований выразить изменение состояний с течением времени?

1.5. Матрицы операторов.

Матричная форма квантовой механики. Понятие матрицы оператора. Различные матричные представления операторов, изображающих механические величины. Соотношения коммутации. Унитарные преобразования матриц. Одновременная измеримость физических величин.

Раздел 2 Одномерное движение.

2.1. Одномерное движение частиц в поле потенциальных сил.

Одномерное движение частиц в поле потенциальных сил. Движение в однородном поле. Коэффициент прохождения. Влияние скачков потенциала на движение микрочастиц. Что такое туннельный эффект. Общие свойства стационарных состояний одномерного движения для дискретного спектра. Частица в прямоугольной потенциальной яме. Бесконечно глубокая потенциальная яма. Свободное движение частицы $E \geq U_0$.

2.2. Линейный гармонический осциллятор.

Решение дифференциального уравнения. Уровни энергии и волновые функции. Квантовая теория гармонических колебаний произвольной физической природы. Операторы рождения a^+ и a^- уничтожения и их свойства. Спектр энергии гармонического осциллятора. Координатное представление. Полиномы Чебышева-Эрмита. Основное состояние и его свойства. Нулевые колебания.

2.3. Общие свойства стационарных состояний одномерного движения в случае непрерывного спектра. Квазиклассическое приближение.

Постановка проблемы и простейшие случаи. Основные критерии квазиклассического приближения. Граничные условия в квазиклассическом случае. Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Прохождение через потенциальный барьер в квазиклассическом приближении.

2.4. Момент импульса: операторы, коммутационные соотношения, решения на собственные значения.

Операторы момента импульса. Собственные значения момента. Собственные функции момента. Понятие чётности состояния.

Раздел 3 Движение частицы в центральном поле.

3.1. Движение частицы в поле центральных сил.

Общие особенности движения частицы при сферической симметрии. Разделение переменных в волновом уравнении. Решение угловой части волнового уравнения. Полиномы Лежандра и сферические функции. Момент количества движения и сферические функции. Чётность. Свободное движение с определенным значением орбитального момента.

3.2. Водородоподобный атом.

Уровни энергии и волновые функции. Кратность вырождения. Сферический осциллятор. Атом водорода с учётом движения ядра. Уровни энергии и волновые функции. Кратность вырождения. Волновые функции и энергетические уровни трёхмерного изотропного осциллятора.

3.3. Спин элементарных частиц. Спиновые волновые функции и операторы спина.

Собственный механический и магнитный момент электрона. Спин. Оператор спина электрона. Спиновые функции. Собственный магнитный момент. Уравнение Паули. Расщепление спектральных линий в магнитном поле. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле.

3.4. Свойства полного момента импульса.

Понятие полного момента импульса. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша-Гордона. Примеры построения собственных функций оператора суммарного момента двух частиц. Сложение двух спинов $\frac{1}{2}$. Классификация спиновых функций в системе из двух частиц.

Раздел 4 Приближённые методы решения квантовомеханических задач.

4.1. Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени.

Невырожденный случай - дискретный спектр. Невырожденный случай - непрерывный спектр. Вырожденные собственные значения. Секулярное уравнение. Ангармонический осциллятор. Эффект Штарка первого порядка в атоме водорода. Расщепление спектральных линий в электрическом поле.

4.2. Теория возмущений. Возмущения, зависящие от времени.

Общее выражение для вероятности перехода из одного состояния в другое. Золотое правило Ферми. Спонтанное излучение. Индуцированное излучение. Правила отбора для испускания и поглощения света. Мультипольное излучение.

Раздел 5 Тождественные частицы и задача рассеяния.

5.1. Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц.

Принцип неразличимости одинаковых частиц. Обменное взаимодействие. Симметричные и антисимметричные волновые функции. Частицы Ферми и частицы Бозе. Принцип Паули. Изотропная модель ядерной Ферми-жидкости. Оболочечная модель ядра.

5.2. Рассеяние частиц.

Общая теория рассеяния. Система центра масс и лабораторная система. Амплитуда рассеяния и эффективное сечение рассеяния. Связь амплитуды и фазы рассеяния. Понятие

S-матрицы и условие унитарности. Оптическая теорема. Борновское приближение и формула Борна. Упругое рассеяние заряженных частиц и формула Резерфорда. Рассеяние медленных частиц. Резонансное рассеяние. Формула Брейта-Вигнера.

5.3. Атом.

Атомные уровни энергии. Состояния электронов в атоме. Водородоподобные уровни энергии. Самосогласованное поле. Уравнение Томаса-Ферми. Периодическая система Менделеева. Спектральные и рентгеновские термы.

4.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Практические занятия включают семинарские занятия по темам, предлагаемым преподавателем, дискуссии, решение задач, тестов.

ПЛАНЫ СЕМИНАРСКИХ ЗАНЯТИЙ

Раздел 1. Основные положения квантовой механики.

1.1. Место квантовой механики в современной физической науке.

Формула Планка. Законы фотоэффекта. Гипотеза де Бройля и эффект Комптона.

1.2. Принципы построения и постулаты квантовой механики.

Принцип неопределённости. Волновая функция свободно движущейся частицы. Собственные функции и собственные значения операторов. Сложение и умножение операторов. Операторы координаты и импульса.

1.3. Одномерное движение. Стационарные состояния.

Временное уравнение Шредингера. Общие свойства одномерного движения. Осцилляционная теорема. Зависимость средних от времени. Скобки Пуассона. Теоремы Эренфеста. Интегралы движения и условия симметрии.

1.4. Различные представления волновой функции.

Как перейти от координатного представления к импульсному? Каков явный вид операторов $\hat{p}^{(p)}$ импульса и $\hat{r}^{(p)}$ координаты в импульсном представлении? Как преобразовать уравнение Шредингера из координатного представления в импульсное?

1.5. Матрицы операторов.

Матричная форма квантовой механики. Понятие матрицы оператора. Различные матричные представления операторов, изображающих механические величины.

Раздел 2 Одномерное движение.

2.1. Одномерное движение частиц в поле потенциальных сил.

Что такое туннельный эффект. Частица в прямоугольной потенциальной яме. Бесконечно глубокая потенциальная яма.

2.2. Линейный гармонический осциллятор.

Спектр энергии гармонического осциллятора. Координатное представление. Полиномы Чебышева-Эрмита. Основное состояние и его свойства. Нулевые колебания.

2.3. Квазиклассическое приближение.

Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Прохождение через потенциальный барьер в квазиклассическом приближении.

2.4 Момент импульса: операторы, решения на собственные значения.

Операторы момента импульса, коммутационные соотношения, собственные значения момента. Собственные функции момента. Понятие чётности состояния.

Раздел 3 Движение частицы в центральном поле.

3.1. Движение частицы в поле центральных сил.

Решение угловой части волнового уравнения. Полиномы Лежандра и сферические функции. Момент количества движения и сферические функции. Чётность. Свободное движение с определенным значением орбитального момента.

3.2. Водородоподобный атом.

Уровни энергии и волновые функции. Кратность вырождения. Атом водорода с учётом движения ядра. Уровни энергии и волновые функции. Волновые функции и энергетические уровни трёхмерного изотропного осциллятора.

3.3. Спин элементарных частиц.

Собственный механический и магнитный момент электрона. Оператор спина электрона. Спиновые функции. Собственный магнитный момент. Уравнение Паули. Расщепление спектральных линий в магнитном поле.

3.4. Свойства полного момента импульса.

Понятие полного момента импульса. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша-Гордона. Построения собственных функций оператора суммарного момента двух частиц. Примеры. Сложение двух спинов $\frac{1}{2}$. Классификация спиновых функций в системе из двух частиц.

Раздел 4 Приближённые методы решения квантовомеханических задач.

4.1. Теория возмущений. Возмущения, не зависящие от времени.

Невырожденный случай - дискретный спектр. невырожденный случай - непрерывный спектр. Секулярное уравнение. Расщепление спектральных линий в электрическом поле.

4.2. Теория возмущений. Возмущения, зависящие от времени.

Общее выражение для вероятности перехода из одного состояния в другое. Золотое правило Ферми. Спонтанное излучение. Индуцированное излучение. Правила отбора для испускания и поглощения света. Мультипольное излучение.

Раздел 5 Тождественные частицы и задача рассеяния.

5.1. Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц.

Обменное взаимодействие. Симметричные и антисимметричные волновые функции. Частицы Ферми и частицы Бозе. Принцип Паули. Оболочечная модель ядра.

5.2. Рассеяние частиц.

Система центра масс и лабораторная система. Амплитуда рассеяния и эффективное сечение рассеяния. Связь амплитуды и фазы рассеяния. Оптическая теорема. Формула Резерфорда. Рассеяние медленных частиц. Резонансное рассеяние. Формула Брейта-Вигнера.

5.3. Атом.

Атомные уровни энергии. Состояния электронов в атоме. Уравнение Томаса-Ферми. Периодическая система Менделеева. Спектральные и рентгеновские термы.

5.2. Задачи и тесты по следующим разделам.

| <i>Раздел</i> | <i>Форма контроля</i> | <i>Срок выполнения (недели семестра)</i> |
|---|---------------------------------|--|
| 1 СЕМЕСТР | | |
| Основные положения квантовой механики. | Решение задач и ответы на тесты | 2-6 |

| | | |
|--|---------------------------------|-------|
| Одномерное движение частиц в поле потенциальных сил. | Решение задач и ответы на тесты | 7-10 |
| Движение частицы в центральном поле. | Решение задач и ответы на тесты | 11-16 |
| 2 СЕМЕСТР | | |
| Спин. Частицы со спином 1/2. | Решение задач и ответы на тесты | 1-3 |
| Приближённые методы решения квантовомеханических задач. | Решение задач и ответы на тесты | 4-8 |
| Квантовая теория систем, состоящих из одинаковых частиц. | Решение задач и ответы на тесты | 9-12 |
| Элементарные понятия квантовой теории рассеяния. | Решение задач и ответы на тесты | 13-16 |

Формы контроля: проверка работ сданных преподавателю в письменной форме.

6. КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Текущий и итоговый контроль знаний студентов:

- посещаемость лекций, семинарских и практических занятий
- активность на всех видах занятий
- выполнение индивидуальных заданий
- написание итогового теста
- сдача экзамена по предложенным вопросам.

6.1. ТЕКУЩИЙ ТЕСТ ПО КУРСУ.

- текущие практические задания (2 задания (СР) в семестре по четыре задачи в каждом),
- тестовые контрольные работы (в среднем – через 3 занятия по мере прохождения материала)
- полусеместровая контрольная работа,

6.1.1. Варианты практических заданий

Ниже приводятся варианты текущих заданий. Задания выдаются студентам на {5, 10} и {3,8} неделях 1 и 2 семестров, соответственно (после прохождения достаточного объема материала), принимаются в начале {10,15} и {3,8} с выставлением зачётной оценки (0, 1 или 2 балла за задачу)/

Задание 1

| | |
|---|---|
| 1 | Определить максимальную скорость фотоэлектронов, вылетающих из никелевого электрода, освещаемого ультрафиолетовым светом с длиной волны $\lambda=220$ нм. Работа выхода электронов из никеля $A=4,84$ эВ. |
| 2 | Необходимо спроектировать ускоритель электронов для исследования структуры вещества с линейными размерами 1 ферми. Какая нужна кинетическая энергия электронов? |
| 3 | Найти собственные функции и собственные значения операторов а) $\frac{d}{dx}$, б) $i \frac{d}{dx}$, в) $\hat{k}_x = \frac{\hat{p}_x}{\hbar}$ |
| 4 | Доказать, что если механическая величина изображается самосопряженным оператором, то среднее значение квадрата этой величины – положительное. |

Задание 2

| | |
|---|---|
| 1 | Используя рекуррентные соотношения для полиномов Эрмита вычислить интегралы |
|---|---|

| | |
|---|--|
| | $\int_{-\infty}^{\infty} \psi_n^*(x) x \psi_m(x) dx$, $\int_{-\infty}^{\infty} \psi_n^*(x) \hat{p}_x \psi_m(x) dx$, где $\{\psi_k\}_0^{\infty}$ - волновые функции стационарных состояний линейного гармонического осциллятора. |
| 2 | Получить приближённое выражение для энергии связи частицы с массой μ в одномерной прямоугольной яме конечной глубины V_0 , если ширина ямы a удовлетворяет соотношению $a \ll \lambda(2\mu V_0)^{-1/2}$. Оценить вероятность пребывания частицы внутри и вне ямы. |
| 3 | Построить в импульсном представлении гейзенберговские операторы $\hat{x}(t)$ и $\hat{p}(t)$ для линейного гармонического осциллятора. |
| 4 | Вычислить сумму $\sum_{n=1}^{\infty} \left \langle n e^{ikx} 0 \rangle \right ^2$, где $\langle n e^{ikx} 0 \rangle$ - матричный элемент оператора e^{ikx} , связывающий основное ($n=0$) и n -е состояния линейного гармонического осциллятора. |

Задание 3

| | |
|---|---|
| 1 | Используя явный вид собственных шаровых функций операторов квадрата импульса \hat{L}^2 и его проекции на ось z \hat{L}_z , найти собственные значения l и m : $Y_0^0(\theta, \varphi) = (4\pi)^{-1/2}$; $Y_1^0(\theta, \varphi) = (1/2)(3/\pi)^{1/2} \cos \theta$; $Y_1^{\pm 1}(\theta, \varphi) = \pm(1/2)(3/2\pi)^{1/2} \sin \theta \exp(\pm i\varphi)$. Здесь θ и φ - сферические углы. |
| 2 | Как перейти от уравнения Шредингера в случае двухчастичного взаимодействия к задаче движения одной частицы в поле центральных сил? |
| 3 | Как определить коэффициенты прохождения и отражения для произвольного потенциального барьера? |
| 4 | Что означает вырождение уровня по магнитному квантовому числу? |

6.1.2. Варианты тестовых контрольных заданий

1. Оператор \hat{A} , действующий в некотором линейном пространстве, является линейным, если для любых элементов ψ_1 и ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

A. $\hat{A}\beta\psi_1 = \beta\hat{A}\psi_1$; **B.** $\hat{A}(\alpha\psi_1 + \beta\psi_2) = \alpha\hat{A}\psi_1 + \beta\hat{A}\psi_2$;

C. $\hat{A}\beta\psi_2 = \alpha\hat{A}\psi_1$; **D.** $\hat{A}(\alpha\psi_1 + \beta\psi_2) = \beta\hat{A}\psi_1 + \alpha\hat{A}\psi_2$.

Здесь (α и β - произвольные комплексные числа).

2. Оператор \hat{A} , действующий в некотором линейном пространстве, является эрмитовым, если для любых элементов ψ_1 и ψ_2 этого пространства имеет место равенство:

A. $(\hat{A}\psi_1, \psi_2) = (\psi_2, \hat{A}\psi_1)$ **B.** $(\hat{A}\psi_1, \psi_2)^* = (\psi_1, \hat{A}\psi_2)$;

C. $(\hat{A}\psi_1, \psi_2) = (\psi_1, \hat{A}\psi_2)$; **D.** $(\hat{A}\psi_1, \psi_2)^* = (\psi_2, \hat{A}\psi_1)$ *

где (\dots, \dots) – скалярное произведение элементов пространства.

3. Какой формулой принято определять скалярное произведение элементов, входящих в линейное пространство комплексных функций одной переменной и определенных на интервале $[a, b]$?

A. $(\psi_1, \psi_2) = \int_a^b \psi_1^*(x) \psi_2(x) dx$ **B.** $(\psi_1, \psi_2) = \int_a^b \psi_2^*(x) \psi_1(x) dx$

C. $(\psi_1, \psi_2) = \int_a^b \psi_1^*(x) \psi_2^*(x) dx$; **D.** $(\psi_1, \psi_2) = \int_a^b \psi_2(x) \psi_1(x) dx$ *

6.1.3. Полусеместровая контрольная работа

1. Определить длины волн де-Бройля протона и электрона, прошедших одинаковую разность потенциалов 1 кВ.
2. Атом испустил фотон $\lambda=0,55$ мкм за время $\tau\sim 10^{-8}$ сек. Оценить величину относительной неопределённости его длины волны $\Delta\lambda/\lambda$.
3. Доказать, что если выполняется условие $[\hat{A}, \hat{B}]=1$, то справедливо следующее равенство: $[\hat{A}, \hat{B}^2]=2\hat{B}$.
4. Найти собственные значения оператора \hat{A} , соответствующие собственной функции $\Psi_A(x)$ ($-\infty < x < \infty$). $\hat{A} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{2}{x} \frac{\partial}{\partial x}$, $\Psi_A = \frac{C}{x} \sin ax$
5. Доказать, что среднее значение импульса одномерного движения может быть представлено в виде: $\bar{p}_x = \frac{\hbar}{2i} \int \left(\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial x} \right) dx = m \int j_x dx$.
6. Найти вероятности отдельных квантовых состояний и среднюю кинетическую энергию частицы в одномерной прямоугольной потенциальной яме шириной l , если частица находится в состоянии с волновой функцией: $\Psi(x) = Cx(l-x)$.
7. Показать, что операторы скорости и ускорения частицы, движущейся в поле с потенциальной энергией $V(r)$, могут быть представлены в виде:
 $\hat{v} = \hat{p}/m$ и $\hat{a} = -gradV(r)/m$, где m – масса частицы, а \hat{p} – оператор её импульса.
8. Волновая функция основного состояния атома водорода имеет вид:
 $\Psi(r) = Ae^{-r/a}$, где $a = \hbar^2 / me^2$. Здесь m – масса электрона, e – его заряд, A – нормировочная константа. Определить A и найти среднее значение потенциальной энергии взаимодействия электрона ($V = -e^2/r$) с ядром в этом состоянии.

6.2. ИТОГОВЫЙ ТЕСТ ПО КУРСУ

1. Основные понятия квантовой механики.

| | |
|----|--|
| 1 | В чём выражается экспериментальное проявление принципа неопределённости? |
| 2 | Как формулируется принцип неопределённости для канонических переменных? |
| 3 | Как связаны между собой энергия и импульс световых квантов? |
| 4 | Что такое волна де Бройля? |
| 5 | Физический смысл постоянной Планка. |
| 6 | Сформулируйте законы фотоэффекта. |
| 7 | Каким образом эксперименты по комптоновскому рассеянию γ -квантов подтверждают гипотезу корпускулярно-волнового дуализма? |
| 8 | Каковы основные постулаты старой квантовой теории и теории атома Нильса Бора? |
| 9 | В чём состоит смысл принципа суперпозиции? |
| 10 | В каких процессах принято использовать понятие виртуальные частицы и почему? |

2. Волновая функция и операторы физических величин.

| | |
|----|---|
| 11 | Что такое волновая функция? Зачем она нужна? Какова ее роль в квантовой механике? |
| 12 | В чем состоит условие нормировки волновой функции? |
| 13 | Может ли волновая функция подчиняться нелинейному уравнению? |
| 14 | Какова физическая интерпретация волновой функции? |
| 15 | От чего зависит волновая функция? |

| | |
|----|---|
| 16 | Что такое волновая функция в импульсном представлении? |
| 17 | Как получить волновую функцию в импульсном представлении, зная эту функцию в координатном представлении? |
| 18 | Какие операторы называются эрмитовыми? |
| 19 | Почему операторы наблюдаемых физических величин должны быть эрмитовыми? |
| 20 | Какая величина называется коммутатором операторов \hat{A} и \hat{B} ? |
| 21 | Что означает «вырожденные состояния» физической величины? |
| 22 | Каков физический смысл собственных значений оператора |
| 23 | Какова связь между собственным значением оператора физической величины и средним значением этой величины? |
| 24 | Вид оператора координаты в импульсном представлении? |
| 25 | Вид оператора импульса в координатном представлении? |
| 26 | Вид оператора полной энергии? |
| 27 | Как построить оператор произвольной физической величины? |
| 28 | Что является основой принципа квантования? |
| 29 | Почему собственные значения операторов физических величин вещественны? |

3. Волновое уравнение Шредингера

| | |
|----|--|
| 30 | Какая величина носит название интеграла квантовых уравнений движения? |
| 31 | Как формулируется закон сохранения плотности вероятности? |
| 32 | Что такое стационарное состояние и как оно соотносится со стационарным уравнением Шредингера? |
| 33 | В чём состоит основное содержание осцилляционной теоремы? |
| 34 | Какие состояния называются квазистационарными? |
| 35 | Что такое уравнение Шредингера? |
| 36 | Что понимается под точкой поворота в квазиклассическом приближении? |
| 37 | Какой фазовый объём приходится на каждое состояние в трёхмерном случае? |
| 38 | Что называется спектром оператора? |
| 39 | Что такое квантование физической величины? |
| 40 | Каковы стандартные условия, налагаемые на волновую функцию? Зачем нужны эти условия? |
| 41 | В чём состоит смысл закона сохранения чётности? |
| 42 | Какие состояния называются чётными, а какие нечётными? |
| 43 | Что такое туннельный эффект? |
| 44 | Написать уравнение Шредингера для линейного гармонического осциллятора. |
| 45 | Чему равна энергия нулевых колебаний линейного гармонического осциллятора? |
| 46 | Чем характерен спектр собственных значений энергии линейного гармонического осциллятора? |
| 47 | Как определить коэффициенты прохождения для произвольного потенциального барьера? |
| 48 | Как перейти от задачи двухчастичного взаимодействия (при решении уравнения Шредингера) к задаче движения одной частицы в поле центральных сил? |
| 49 | Что такое центробежная потенциальная энергия? |
| 50 | В каких взаимодействиях не выполняется закон сохранения чётности? |

4. Квантовый момент импульса.

| | |
|----|---|
| 51 | В чём сходство и коренное различие между классическим моментом импульса и его квантовым аналогом? |
| 52 | Что определяет магнитное квантовое число? |
| 53 | Какова связь между величиной орбитального момента L и чётностью P соответствующего состояния? |

| | |
|----|---|
| 54 | Что означает вырождение уровня по магнитному квантовому числу? |
| 55 | Что понимается под «случайным» вырождением? |
| 56 | Будет ли гамильтониан частицы, движущейся в центральном поле, коммутировать с оператором проекции момента на ось z? |
| 57 | Что такое спин и в каких единицах он измеряется? |
| 58 | Что такое дипольный магнитный момент? |
| 59 | В чём отличие электронного магнетона Бора от его нуклонного аналога? |
| 60 | Что такое эффект Штарка? |
| 61 | Что такое эффект Зеемана? |

5. Теория возмущений

| | |
|----|--|
| 62 | Что такое комптоновская длина волны? |
| 63 | Волновая функция гармонического осциллятора в некоторый момент времени является чётной функцией координаты. Спрашивается, можно ли при измерении энергии осциллятора в этом состоянии обнаружить значение $3\hbar\omega/2$? |
| 64 | Показать с помощью законов сохранения, что свободный электрон не может полностью поглотить фотон. |
| 65 | Каким образом отличаются классическое и квантово-механическое представления о фазовом пространстве. |
| 66 | Общее выражение для вероятности перехода из одного состояния в другое согласно теории нестационарных возмущений или «золотое правило Ферми». |
| 67 | Связь ширины уровня и времени жизни возбуждённого состояния. |
| 68 | Из чего складывается полный момент частицы? |
| 69 | Какие уровни атома водорода остаются вырожденными при внесении релятивистских поправок? |
| 70 | Что называется тонкой структурой и чему равно расстояние между уровнями тонкой структуры? |
| 71 | Что такое лэмбовское смещение уровней? |
| 72 | Что такое сверхтонкое расщепление уровней? |
| 73 | Что такое принцип тождественности частиц? |
| 74 | Какие частицы подчиняются статистике Бозе-Эйнштейна? |
| 75 | Какие частицы подчиняются статистике Ферми-Дирака? |
| 76 | Написать формулу, связывающую плотность электронов, находящихся на стационарных состояниях сложных ядер, с энергией Ферми в модели Томаса-Ферми. |
| 77 | Как формулируется принцип Паули и к каким частицам он относится? |
| 78 | Что такое вырожденный Ферми газ? |
| 79 | Что такое энергия Ферми для вырожденного Ферми газа? |
| 80 | Каков диапазон изменения радиуса сложных атомов согласно модели Томаса-Ферми? |
| 81 | Дайте определение для замкнутой оболочки атома. |
| 82 | Что такое обменное взаимодействие? |

6. Теория рассеяния

| | |
|----|---|
| 83 | Что такое упругое рассеяние субатомной частицы? |
| 84 | Что такое сечение рассеяния, и в каких единицах оно выражается? |
| 85 | В чём существенное различие в механизме рассеяния нетождественных и тождественных частиц? |
| 86 | В чём различие между формулами упругого рассеяния Резерфорда и Мотта? |
| 87 | Что называется дифференциальным эффективным сечением рассеяния? |
| 88 | Какое столкновение частиц называется упругим? |
| 89 | Какой вид должна иметь волновая функция, отвечающая постановке задачи о рассеянии |

| | |
|----|--|
| | частицы на мишени? |
| 90 | Что такое парциальное сечение рассеяния? |
| 91 | В чем состоит борновское приближение в задаче о рассеянии? |
| 92 | Что называется амплитудой рассеянной волны? |
| 93 | Что такое E1 и M1 γ -переходы в атомных ядрах? |
| 94 | Определите тип и мультипольность γ -квантов для переходов из 2^+ в 1^- ; из 1^- в 0^- . |
| 95 | Какое максимальное число протонов может находиться в состоянии $1p_{3/2}$? |
| 96 | Каким будет результат измерения орбитального момента протона в состоянии $1d_{5/2}$? |
| 97 | Как связаны ширина ядерного уровня и его среднее время жизни? |
| 98 | Чему равна масса покоя протона, нейтрона в энергетических единицах? |
| 99 | Чему равна масса покоя электрона в энергетических единицах? |

Лист регистрации изменений