



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
ФГБОУ ВО «ИГУ»  
**Кафедра теоретической физики**

УТВЕРЖДАЮ  
Декан физического факультета

/Н.М. Буднев

«20» апреля 2024 г.



**Рабочая программа дисциплины**

Наименование дисциплины: Б1.О.18 Квантовая механика

Направление подготовки: 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Направленность (профиль) подготовки: Электроника и нанoeлектроника

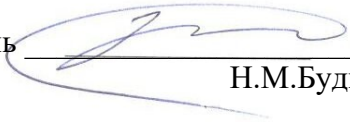
Квалификация (степень) выпускника: Бакалавр

Форма обучения: Очная

Согласовано с УМК физического факультета

Протокол №42 от «15» апреля 2024 г.

Председатель


  
Н.М.Буднев

Рекомендовано кафедрой:

Протокол №7

От «15» марта 2024 г.

И.о. зав. кафедрой

  
С.В. Ловцов

**Иркутск 2024 г.**

## Содержание

I. Цели и задачи дисциплины.....	3
II. Место дисциплины в структуре ОПОП:.....	4
III. Требования к результатам освоения дисциплины.....	4
IV. Содержание и структура дисциплины (модуля).....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов.....	4
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине.....	5
4.3. Содержание учебного материала.....	5
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ.....	7
4.3.2. План самостоятельной работы студентов.....	9
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.....	11
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии).....	11
V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:.....	11
а) перечень литературы.....	11
б) периодические издания.....	12
в) список авторских методических разработок.....	12
г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы.....	12
VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	12
VII. Образовательные технологии.....	13
VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации.....	13
Приложение: фонд оценочных средств	

## **I. Цели и задачи дисциплины**

В ходе изучения дисциплины «Квантовая механика» студенты изучают и осваивают основные понятия и методы квантовой теории, способы теоретического описания, количественного и качественного анализа квантовых процессов в системах, состоящих из одной или многих частиц, а также в системах с неопределенным или меняющимся числом частиц.

Дисциплина «Квантовая механика» представляет собой теоретическую основу для последующих разделов курса теоретической физики. Математической и методической базой курса являются все разделы курса математики и теоретической физики, изученные студентами к началу 5 семестра.

В результате изучения курса студент приобретает как фундаментальные знания о подходах к описанию квантовых систем, так и навыки решения конкретных квантово-механических задач.

### **Цели курса**

Квантовая механика является важной частью универсальной базы для изучения общепрофессиональных и специальных дисциплин, вооружает выпускников необходимыми знаниями для решения научно-технических задач в теоретических и прикладных аспектах, знакомит студентов с научными методами познания, позволяет научить их отличать гипотезу от теории, теорию от эксперимента. Эта дисциплина способствует проведению демаркации между научным и антинаучным подходом в изучении окружающего мира, позволяет научить строить физические модели происходящего и устанавливать связь между явлениями, прививать понимание причинно-следственной связи между явлениями. Обладая логической стройностью и опираясь на экспериментальные факты, дисциплина «Квантовая механика» является идеальной для решения этой задачи, формируя у студентов подлинно научное мировоззрение.

Целью освоения курса квантовой механики является ознакомление студентов с основными законами современной физики и возможностями их применения при решении задач, возникающих в их последующей профессиональной деятельности.

### **Задачи курса**

- изучение законов квантовой теории в их взаимосвязи;
- формирование навыков по применению положений квантовой теории к грамотному научному анализу ситуаций, с которыми исследователю приходится сталкиваться при создании новой техники и новых технологий;
- формирование у студентов знаний основ квантовой теории описания окружающего мира;
- ознакомление студентов с историей и логикой развития квантовой механики и основных её открытий.

## II. Место дисциплины в структуре ОПОП:

Дисциплина «Квантовая механика» является обязательной для изучения по данному профилю. Изучение курса предполагает наличие полученных на предыдущем уровне образования основных знаний, умений по дисциплинам «Дифференциальные уравнения», «Теоретическая механика», «Электродинамика». Дисциплина «Квантовая теория» представляет собой теоретическую основу для последующих разделов курса теоретической физики «Физика конденсированного состояния», «Термодинамика и статистическая физика», «Введение в квантовую теорию поля», «Квантовая теория излучения».

## III. Требования к результатам освоения дисциплины

**Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесенных с индикаторами достижения компетенций**

Компетенция	ОПК-1: Способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности
ОПК 1.1	Применяет базовые знания в области физики для решения научно-исследовательских задач
ОПК 1.2	Применяет базовые знания в области физики для решения прикладных задач профессиональной деятельности
ОПК 1.3	Представляет слушателям в доступной для восприятия форме знания в области физики, в том числе при выполнении задач в сфере педагогической деятельности

## IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 6 зачетных единиц, 216 часов, в том числе 128 ч. контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов через ЭИОС факультета. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 68 аудиторных часов.

Форма промежуточной аттестации: экзамен.

### 4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов

№ п/п	Раздел дисциплины/темы	Семестр	Вес	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися		Самостоятельная работа	
					Лекции	Семинарские /практические /лабораторные занятия		

1	1-22	5	216	68	50	68		62	Практическое задание; экзаменационные задачи
Итого:			216	68	50	68		62	

#### 4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
5	Тема 1-22	Задание в виде задачи	После пройденных тем	62	Демонстрация готовых решений	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ.

#### 4.3. Содержание учебного материала

##### Содержание разделов и тем дисциплины (модуля)

##### Раздел 1

**Тема 1.** Энергия и импульс световых квантов. Гипотеза Планка. Эффект Комптона. Плоская волна Де-Бройля, её физический смысл. Комптоновская длина волны и длина волны Де-Бройля. Дифракция микрочастиц.

**Тема 2.** Борновская интерпретация волновой функции. Принцип суперпозиции состояний. Разложение произвольного состояния по плоским волнам Де-Бройля. Физический смысл коэффициентов разложения. Формализм Дирака.

**Тема 3.** Фазовое пространство квантовой системы. Соотношение неопределенности координата-импульс. Оценка энергии основного состояния гармонического осциллятора и атома водорода.

**Тема 4.** Операторный формализм квантовой механики. Самосопряженные операторы в гильбертовом пространстве. Операторы координаты и импульса и их собственные функции. Среднее значение любой динамической величины в произвольном состоянии. Основные свойства собственных функций. Вычисление вероятностей результатов измерения динамической величины в произвольном состоянии. Условие одновременной измеримости динамических величин.

**Тема 5.** Гамильтониан свободной частицы. Бесконечное вырождение состояний. Обобщение на случай внешнего поля. Уравнение Шредингера. Гамильтониан как генератор эволюции системы во времени. Уравнение непрерывности. Плотность тока. Нормировка плоских волн. Стационарные состояния. Стационарное уравнение Шредингера. Феноменологическое описание квазистационарных состояний. Естественная ширина спектральных линий и время жизни.

**Тема 6.** Эволюция операторов во времени. Интегралы движения.

### Раздел 2

**Тема 7.** Квантование гармонического осциллятора. Повышающие и понижающие операторы. Энергетический спектр. Волновая функция основного состояния. Матричные элементы оператора координаты.

**Тема 8.** Квантование момента количества движения методом повышающих и понижающих операторов. Алгебра моментов количества движения. Реализация алгебры в дифференциальной и матричной форме. Собственный момент количества движения (спин) Спектры квадрата момента и 3-ей проекции. Собственные функции орбитального момента количества движения.

**Тема 9.** Частица в сферически-симметричном поле. Разделение переменных. Радиальное уравнение Шредингера. Классификация состояний в сферически-симметричном поле. Атом водорода, его спектр и волновая функция основного состояния. Вырождение энергетических уровней и его природа. Токи в атомах, магнитный момент атома.

**Тема 10.** Гамильтониан заряженной частицы в произвольном электромагнитном поле. Атом водорода в постоянном магнитном поле. Волновая функция и энергетический спектр. Частичное снятие вырождения.

**Тема 11.** Квантовое описание двухатомной молекулы. Теплоемкость при различных температурах.

**Тема 12.** Движение частицы в периодическом поле. Трансляционная инвариантность. Собственные функции и собственные значения оператора трансляции. Зонная структура спектра. Разложение спектра на "дне" и "краях" зоны Бриллюэна. Метод "эффективной массы".

### Раздел 3

**Тема 13.** Спин электрона. Экспериментальное доказательство существования спина электрона. Оператор спина. Спиновые функции. Уравнение Паули. Движение спина в постоянном и переменном магнитных полях.

**Тема 14.** Стационарная теория возмущения. Особенности и различия в вырожденном и невырожденном случаях. Подробный анализ двукратного вырождения. Частичное снятие вырождения.

**Тема 15.** Нестационарная теория возмущения. Резонансное возбуждение системы.

**Тема 16.** Простейшие применения теории возмущения. Ангармонический осциллятор. Расщепление спектральных линий в электрическом и слабом магнитном полях.

**Тема 17.** Поведение волновых функций на больших и малых расстояниях. Причина квантования энергии.

#### Раздел 4

**Тема 18.** Постановка задачи в теории столкновений микрочастиц. Связь между амплитудой рассеяния и асимптотическим поведением волновой функции. Сечение рассеяния. Борновское приближение для амплитуды рассеяния.

**Тема 19.** Расчет амплитуды и сечения при рассеянии на кулоновском и юкавском потенциалах.

**Тема 20.** Точная теория рассеяния. Разложение амплитуды на парциальные волны. Фаза рассеяния. Условие упругой унитарности. Оптическая теорема. Модель абсолютно черного диска.

**Тема 21.** Прохождение частиц через потенциальный барьер Туннельный эффект. Холодная эмиссия металлов. Исчезновение спектральных линий в сильном электрическом поле. Трёхмерный потенциальный барьер Квазистационарные состояния. Теория радиоактивного распада.

**Тема 22.** Кинематика излучения и поглощения фотона нестабильным свободным ядром. Энергия отдачи ядра и вклад ее в энергию фотона. Ядро в поле осциллятора. Эффект Мессбауэра. Фактор Дебая - Валлера.

#### **4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ**

№	№ раздела и темы дисциплины	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Раздел 1, Тема 1	Гипотеза Де-Бройля, гипотеза Планка	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
2.	Раздел 1, Тема 2	Эффект Комптона	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
3.	Раздел 1, Тема 3	Лазерная конверсия как механизм ускорения фотонов	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
4.	Раздел 1, Тема 4	Минимальные значения фазового объема частицы. Соотношение неопределенностей "координата-импульс", "энергия-время жизни"	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1

5.		Оценка энергии основного состояния из соотношения неопределенностей для линейного гармонического осциллятора и атома водорода	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
6.	Раздел 1, Тема 5	Операторы динамических величин в гильбертовом пространстве. Собственные функции и собственные значения. Их физический смысл.	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
7.		Канонический коммутатор "координата-импульс"	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
8.	Раздел 1, Тема 6	Уравнение Шредингера для волновой функции. Борновская интерпретация волновой функции. Стационарное уравнение Шредингера. Факторизация зависимости от времени и координат. Энергетический спектр и волновые функции частицы в «потенциальной яме» с бесконечно высокими «стенками»	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
9.	Раздел 2, Тема 7	Энергетический спектр и волновые функции частицы в конечной «потенциальной яме»	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
10.		Энергетический спектр и волновые функции частицы в поле потенциала вида $V(x)=-g\delta(x)$	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
11.	Раздел 2, Тема 8	Энергетический спектр и волновые функции частицы в поле потенциала вида $V(x)=-g(\delta(x+a)+\delta(x-a))$	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
12.	Раздел 2, Тема 9	Орбитальный момент	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
13.	Раздел 2, Тема 10	Амплитуда рассеяния электрона на протоне в борновском приближении	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
14.		Амплитуда рассеяния электрона на сложном электронейтральном атоме	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
15.	Раздел 2, Тема 11	Прохождение частицы через потенциальный барьер $V(x)=-g\delta(x)$	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
16.	Раздел 2, Тема 12	Прохождение частицы через потенциальный барьер в виде «бесконечной ступени»	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
17.		Прохождение частицы через прямоугольный потенциальный барьер	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
18.	Раздел 3, Тема 13	Энергетический спектр частицы, находящейся в поле гармонического осциллятора и в постоянном электрическом поле	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
19.	Раздел 3, Те-	Волновые функции частицы, на-	2	Задание на се-	ОПК-1



	ма 14	ходящейся в поле линейного гармонического осциллятора, соответствующие возбуждениям $n=1,2$		минаре в виде задачи	
20.	Раздел 3, Тема 15	Волновые функции и энергетический спектр частицы, находящейся в поле двумерного гармонического осциллятора	2	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
21.	Раздел 3, Тема 16	Волновые функции и энергетический спектр частицы, находящейся в поле трехмерного гармонического осциллятора (ядра в кристалле)	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
22.	Раздел 3, Тема 17	Энергетический спектр атома водорода в постоянном магнитном поле	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
23.	Раздел 3, Тема 18	Спин. Матрицы Паули	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
24.	Раздел 4, Тема 19	Изменение состояния системы под действием внешнего возмущения	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
25.	Раздел 4, Тема 20	Холодная эмиссия электронов из металла	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
26.	Раздел 4, Тема 21	Энергия излучения и поглощения фотона нестабильным свободным ядром	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1
27.	Раздел 4, Тема 22	Эффект Мессбауэра. Фактор Дебая-Валлера	4	Задание на семинаре в виде задачи	ОПК-1

#### 4.3.2. План самостоятельной работы студентов

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1	Квантование Борна - Инфельда в ящике.	Внеаудиторная, решение задач	Квантование Борна - Инфельда в ящике. Вычисление статистической суммы одной свободной частицы.	Источники из основной и дополнительной литературы по теме практических занятий; Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой	4
2	Квантование момента количества движения	Внеаудиторная, решение задач	Квантование момента количества движения методом повышающих и понижающих операторов. Алгебра моментов количества движения. Реализация алгебры в дифференциальной и матричной форме. Собственный момент количества движения (спин) Спектры квадрата момента и 3-ей проекции. Собственные функции орбитального момента количества движения.		4

3	Квантовое описание двухатомной молекулы.	Внеаудиторная, решение задач	Квантовое описание двухатомной молекулы. Теплоемкость при различных температурах.	ИГУ и Стронские сайты	4
4-5	Спин электрона.	Внеаудиторная, решение задач	Спин электрона. Экспериментальное доказательство существования спина электрона. Оператор спина. Спиновые функции. Уравнение Паули. Движение спина в постоянном и переменном магнитных полях.		4
6	Сечение рассеяния	Внеаудиторная, решение задач	Расчет амплитуды и сечения при рассеянии на кулоновском и юкавском потенциалах.		4
7-8	Кинематика излучения и поглощения фотона	Внеаудиторная, решение задач	Кинематика излучения и поглощения фотона нестабильным свободным ядром. Энергия отдачи ядра и вклад ее в энергию фотона. Доплеровское уширение линий. Определение температуры звезд.		4
9	Теория рассеяния	Внеаудиторная, решение задач	Рассеяние в поле $U(x) = -G\delta(x)$ . Обратить внимание на поведение амплитуд отраженной и прошедшей волн при продолжении решения в область $E < 0$ .		4
10	Квантовомеханические операторы	Внеаудиторная, решение задач	Операторы, сопряженные к операторам $\hat{A} = \frac{d}{dx}, \hat{B} = i\frac{d}{dx}, \hat{C} = m\omega x + \hbar\frac{d}{dx}$		4
11	Собственные значения квантовомеханических операторов	Внеаудиторная, решение задач	Для оператора $\hat{C} = m\omega x + \hbar\frac{d}{dx}$ найти собственные функции и собственные значения. Проверить, что собственные значения этого оператора могут быть комплексными, а собственные функции, отвечающие различным собственным значениям, обязательно ортогональны.		5
12	Энергия квантовомеханических систем	Внеаудиторная, решение задач	Определить уровни энергии и волновые функции для заряженной для заряженной частицы в постоянном и однородном магнитном поле. Выбрать векторный потенциал в виде $A = (0, xB, 0)$ .		5

13-14	Частица в электромагнитном поле	Внеаудиторная, решение задач	Считая известным гамильтониан частицы в электромагнитном поле, найти а) выражение для оператора скорости $\hat{v}$ ; б) коммутационные соотношения для компонент скорости; в) аналог уравнения Ньютона.	5
15-16	Борновское приближение	Внеаудиторная, решение задач	Вычислить амплитуду рассеяния на прямоугольной потенциальной яме в борновском приближении.	5
17	Рассеяние на потенциале Юкава	Внеаудиторная, решение задач	Вычислить амплитуду рассеяния в борновском приближении на потенциале Юкава $U(r) = (\alpha / r)e^{-r/a}$ .	10

#### 4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

В разделе 4.3.2 студентам для самостоятельного углубленного изучения дисциплины (параллельно с лекциями) предлагаются задачи по изучаемым разделам. Предполагается, что студент самостоятельно изучит дополнительные параграфы по пройденной теме, представленные в литературе из п. 5, а затем решит предложенные задачи. Оценка самостоятельной работы студентов проводится на практических занятиях.

#### 4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Учебным планом не предусмотрено написание курсовых работ.

#### V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины:

##### а) перечень литературы

основная литература

1. Валл А. Н. Квантовая механика в задачах : учеб.-метод. пособие / А. Н. Валл, О. Н. Солдатенко. – Иркутск : Изд-во ИГУ, 2010. – 87 с. нф А623906; физмат 30856 (100 экз.)
2. Паршаков А. Н. Введение в квантовую физику : учеб. пособие [Электронный ресурс] / А. Н. Паршаков. – Электрон. версия кн. – СПб. : Изд-во Лань, [2010]. – 352 с. – (ЭБС «Лань»). – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/view/book/297/>

дополнительная литература

1. Ландау Л. Д. Квантовая механика : Теоретическая физика, том III / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 5-е изд. – М. : Наука, 1989. – 767 с. (56 экз.)
2. Липкин Г. Квантовая механика. Новый подход к некоторым проблемам / Г. Липкин. – М. : Мир, 1977. – 592 с. (нф А 37855, 767271, фм 767272, 3 экз.)

## **б) периодические издания**

- нет.

## **в) список авторских методических разработок**

- 1 (основная литература)

## **г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

<http://library.isu.ru/> - Научная библиотека ИГУ;

Образовательные ресурсы, доступные по логину и паролю, предоставляемым Научной библиотекой ИГУ:

- <https://isu.bibliotech.ru/> - ЭЧЗ «БиблиоТех»;
- <http://e.lanbook.com> - ЭБС «Издательство «Лань»;
- <http://rucont.ru> - ЭБС «Рукопт» - межотраслевая научная библиотека, содержащая оцифрованные книги, периодические издания и отдельные статьи по всем отраслям знаний, а также аудио-, видео-, мультимедиа софт и многое другое;
- <http://ibooks.ru/> - ЭБС «Айбукс»- интернет ресурсы в свободном доступе.

## **VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины**

Учебная аудитория для проведения занятий. Для проведения занятий лекционного типа в качестве демонстрационного оборудования используется меловая доска. Наглядность обеспечивается путем изображения схем, диаграмм и формул с помощью мела. Использование глобальной компьютерной сети позволяет обеспечить доступность Интернет-ресурсов и реализовать самостоятельную работу студентов. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук. На факультете имеется компьютеризированная аудитория, предназначенная для самостоятельной работы, с неограниченным доступом в Интернет.

Материалы: учебно-методические пособия, задания для аудиторной и самостоятельной работы студентов.

## **VII. Образовательные технологии**

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

- лекции, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении практических задач;
- практические занятия, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения практических и проблемных задач;
- консультации –еженедельно для всех желающих студентов;
- самостоятельная внеаудиторная работа направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине;
- текущий контроль за деятельностью студентов осуществляется на лекционных и практических занятиях в ходе самостоятельного решения задач, в том числе у доски.

## **VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации**

Фонд оценочных средств представлен в приложении.

8.1. Оценочные средства для входного контроля: не требуются.

8.2. Оценочные средства текущего контроля - контрольные работы и собеседование.

## Демонстрационный вариант контрольной работы

Задача 1. Вычислить  $\Psi(x, t)$  для волнового пакета  $\varphi(x, t) = Ae^{-x^2/2a^2}$ .

Задача 2. Используя результат предыдущей задачи, найти изменение ширины пакета со временем.

### **Примеры вопросов для собеседования**

- Описать операторный формализм квантовой механики.
- Дать определение самосопряженных операторов в гильбертовом пространстве.
- Указать основные свойства собственных функций.
- Вычисление вероятностей результатов измерения динамической величины в произвольном состоянии.
- Условие одновременной измеримости динамических величин.
- Ввести операторы координаты и импульса и их собственные функции. Указать отличия координатного и импульсного представления.

8.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации

Форма проведения промежуточной аттестации — экзамен.

### **Примерный перечень вопросов и заданий к экзамену**

1. Энергия и импульс световых квантов. Гипотеза Планка. Эффект Комтона. Плоская волна Де-Бройля, её физический смысл. Комтоновская длина волны и длина волны Де-Бройля. Дифракция микрочастиц.
2. Борновская интерпретация волновой функции. Принцип суперпозиции состояний. Разложение произвольного состояния по плоским волнам Де-Бройля. Физический смысл коэффициентов разложения. Формализм Дирака.
3. Фазовое пространство квантовой системы. Соотношение неопределенности координата-импульс. Оценка энергии основного состояния гармонического осциллятора и атома водорода.
4. Операторный формализм квантовой механики. Самосопряженные операторы в гильбертовом пространстве. Операторы координаты и импульса и их собственные функции. Среднее значение любой динамической величины в произвольном состоянии. Основные свойства собственных функций. Вычисление вероятностей результатов измерения динамической величины в произвольном состоянии. Условие одновременной измеримости динамических величин.
5. Гамильтониан свободной частицы. Бесконечное вырождение состояний. Обобщение на случай внешнего поля. Уравнение Шредингера. Гамильтониан как генератор эволюции системы во времени. Уравнение непрерывности. Плотность тока. Нормировка плоских волн. Стационарные состояния. Стационарное уравнение Шредингера. Феноменологическое описание квазистационарных состояний. Естественная ширина спектральных линий и время жизни.
6. Эволюция операторов во времени. Интегралы движения.
7. Квантование гармонического осциллятора. Повышающие и понижающие операторы. Энергетический спектр. Волновая функция основного состояния. Матричные элементы оператора координаты.
8. Квантование момента количества движения методом повышающих и понижающих операторов. Алгебра моментов количества движения. Реализация алгебры в дифференциальной и

- матричной форме. Собственный момент количества движения (спин) Спектры квадрата момента и 3-ей проекции. Собственные функции орбитального момента количества движения.
9. Частица в сферически-симметричном поле. Разделение переменных. Радиальное уравнение Шредингера. Классификация состояний в сферически-симметричном поле. Атом водорода, его спектр и волновая функция основного состояния. Вырождение энергетических уровней и его природа.
  10. Гамильтониан заряженной частицы в произвольном электромагнитном поле. Атом водорода в постоянном магнитном поле. Волновая функция и энергетический спектр. Частичное снятие вырождения.
  11. Квантовое описание двухатомной молекулы. Теплоемкость при различных температурах.
  12. Движение частицы в периодическом поле. Трансляционная инвариантность. Собственные функции и собственные значения оператора трансляции. Зонная структура спектра. Разложение спектра на "дне" и «краях» зоны Бриллюэна. Метод «эффективной массы»
  13. Спин электрона. Экспериментальное доказательство существования спина электрона. Оператор спина. Спиновые функции. Уравнение Паули. Движение спина в постоянном и переменном магнитных полях.
  14. Стационарная теория возмущения. Невырожденный случай.
  15. Стационарная теория возмущения. Вырожденный случай.
  16. Нестационарная теория возмущения. Резонансный характер квантовых переходов.
  17. Поведение волновых функций на больших и малых расстояниях. Причина квантования энергии.
  18. Постановка задачи в теории столкновений микро-частиц. Связь между амплитудой рассеяния и асимптотическим поведением волновой функции. Сечение рассеяния. Борновское приближение для амплитуды рассеяния.
  19. Расчет амплитуды и сечения при рассеянии на кулоновском и юкавском потенциалах.
  20. Амплитуда рассеяния заряженной частицы на сложном атоме. Формфактор атома.
  21. Точная теория рассеяния. Разложение амплитуды на парциальные волны. Фаза рассеяния. Условие упругой унитарности. Оптическая теорема. Модель абсолютно черного диска.
  22. Прохождение частиц через потенциальный барьер Туннельный эффект. Холодная эмиссия металлов. Исчезновение спектральных линий в сильном электрическом поле. Трёхмерный потенциальный барьер. Квазистационарные состояния. Теория радиоактивного распада.
  23. Кинематика излучения и поглощения фотона нестабильным свободным ядром. Энергия отдачи ядра и вклад ее в энергию фотона. Доплеровское уширение линий. Определение температуры звезд.
  24. Нестабильное ядро в поле осциллятора. Эффект Мессбауэра. Фактор Дебая -Валлера.
  25. Конверсия лазерного излучения при рассеянии на быстрых электронах.
  26. Квантование Борна - Инфельда в ящике. Вычисление статистической суммы одной свободной частицы.

### **Задания:**

1. Найти изменение длины волны фотона при упругом рассеянии на покоящемся электроне (эффект Комптона). Дать интерпретацию экспериментальных данных, полученных Комптоном в процессе рассеяния фотонов на парафине.
2. Найти изменение энергии фотона при упругом рассеянии на релятивистском электроне

на угол  $\theta = \pi$  в рамках гипотезы Планка–Эйнштейна.

3. Найти  $E_{q'}$  при  $E_q = 1, 2 \text{ eV}$  (инфракрасный лазер на неодимовом стекле),  $E_p = 46 \text{ GeV}$  (ускоритель SLAC, опыты по нелинейному эффекту Комптона, 1996 г.) и  $E_q = 1, 2 \text{ eV}$ ,  $E_p = 5 \text{ GeV}$  (ускоритель ВЭПП-4М, опыты по расщеплению фотона в поле ядра, 1997 г.).

4. Почему свободный электрон не может поглотить или излучить фотон. Найти энергетический спектр излучения абсолютно черного тела, используя соотношения Планка:  $E = pc$  и  $p = \hbar k$ , где  $k = 2\pi/\lambda$  – волновой вектор,  $\lambda$  – длина волны фотона.

5. Полагая, что для дифракции на кристаллической решетке полезно иметь частицы с  $\lambda \approx 10^{-8} \text{ см}$ , найти энергию фотона, электрона и нейтрона с данной длиной волны.

6. Ультрахолодными называются нейтроны, скорость которых  $v \leq 1 \text{ м/с}$ . Найти их длину волны Де-Бройля.

7. Вычислить матричный элемент  $\langle \hbar x | \hat{p} | \hbar r_i \rangle$ , где  $|\hbar r_i\rangle$ ,  $|\hbar x_i\rangle$  – состояния с определенным импульсом и определенной координатой соответственно.

8. Оценить из соотношения неопределенности энергию основного состояния частицы в поле одномерного гармонического осциллятора.

9. Оценить из соотношения неопределенности энергию основного состояния электрона в атоме водорода.

10. Найти радиус сильного взаимодействия, которое обусловлено обменом виртуальным  $\pi$ -мезоном.

11. Показать, что произвольный линейный оператор  $L$  можно представить в виде  $L = A + iB$ , где  $A$  и  $B$  – эрмитовы операторы.

12. Доказать, что для любых операторов  $A$ ,  $B$  и  $C$  справедливо тождество  $[A, BC] = [A, B]C + B[A, C]$ .

13. Является ли оператор комплексного сопряжения а) линейным, б) эрмитовым?

14. Для оператора  $C$ , определенного в предыдущей задаче, найти собственные функции и собственные значения. Проверить, что собственные значения этого оператора могут быть комплексными, а собственные функции, отвечающие различным собственным значениям, не обязательно ортогональны.

15. Показать, что собственные функции эрмитового оператора ортогональны между собой, если они соответствуют различным собственным значениям.

16. Показать, что собственные значения эрмитового оператора всегда действительны.

17. Показать, что волна Де-Бройля не принадлежит гильбертову пространству.

18. Найти общее решение уравнения Шредингера для свободной частицы и показать, что оно бесконечно вырождено.

19. Показать, что плотность тока  $j$  для электрона в основном состоянии атома водорода равна нулю. Следствием этого факта является стабильность атома водорода в основном состоянии. Объяснить почему.

20. Найти энергетический спектр и нормированные волновые функции связанных состояний частицы в поле  $V(x) = -g \cdot \delta(x)$ , где  $g$  – положительная постоянная.

21. Найти средние значения кинетической и потенциальной энергий. Вычислить произведение неопределенностей координаты и импульса. Каков вид волновой функции в импульсном представлении?

22. Найти энергетический спектр и волновые функции частицы с зарядом  $e$  и массой  $m$ , находящейся в поле гармонического осциллятора и в постоянном электрическом поле напряженностью  $E$ . Считать волновые функции и спектр линейного гармонического осциллятора заданными. Движение одномерное.

*Пример тестовых заданий для проверки сформированности компетенций, указанных выше п.3:*

1. Условия неопределенности для  $p$  и  $x$

1.  $\Delta P \Delta X \geq \frac{h}{2}$

2.  $\Delta P \Delta X > h$

3.  $\Delta P \Delta X \geq \frac{h}{3}$

2. Спектр осциллятора

1.  $E = h\omega \left( n + \frac{1}{2} \right)$

2.  $E = h\omega(n)$

3.  $E = \frac{h\omega}{2}$

3. Связь коэффициента прохождения  $R$  и отражения  $D$  (одномерный случай)

1.  $R + D = 1$

2.  $R^2 + D^2 = 1$

3.  $R + D = 5$

**Разработчики:**



доцент кафедры теоретической физики С.В. Ловцов

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника.

Программа рассмотрена на заседании кафедры теоретической физики

«15» марта 2024 г.

Протокол №7 И.о. зав. кафедрой



С.В. Ловцов

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**