

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института нано-, био-,  
информационных, когнитивных  
и социогуманитарных наук и  
технологий**

**Т.Е. Григорьев**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

<b>по дисциплине:</b>	Квантовая теория
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и физического материаловедения
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 45 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 15 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составили:

А.Л. Барабанов, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент

С.В. Романов, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и физического материаловедения 20.03.2021

## Аннотация

Целью освоения дисциплины является формирование у студентов представления о квантово-механических закономерностях, лежащих в основе современной физики и ее фундаментальных приложений, овладение математическим аппаратом квантовой механики при изучении теоретического материала курса и решении задач.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- знакомство с необычными свойствами квантовых систем, обучение способам описания нерелятивистских квантовых систем, знакомство с основными методами описания релятивистских частиц.

#### Задачи дисциплины

- знакомство с базовыми экспериментальными фактами в области квантовой физики, усвоение уравнений Шредингера, Паули и Дирака, описывающих квантовые явления, овладение математическими методами, позволяющими решать квантовые уравнения, решение задач, охватывающих основные приложения квантовой физики.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- численные порядки величин, характеризующие квантовые явления;
- экспериментальные основы квантовой физики;
- основные принципы квантовой механики;
- методы описания квантовых систем;
- связь собственных векторов и собственных значений операторов с наблюдаемыми и измеряемыми физическими величинами;
- основные точно решаемые модели квантовых систем;
- основные приближенные методы решения задач квантовой механики: квазиклассическое приближение, стационарную и нестационарную теорию возмущений, вариационный метод;
- методы и способы описания систем тождественных частиц в квантовой теории;
- методы описания рассеяния частиц;
- описание взаимодействия электромагнитного излучения с квантовыми системами зарядов;
- основы релятивистской квантовой теории.

уметь:

- находить безразмерные параметры, определяющие изучаемое явление;
- производить численные оценки по порядку величины;
- находить энергетические спектры и волновые функции в одномерных случаях;
- находить квантовомеханические средние с помощью известных волновых функций;
- применять квазиклассическое приближение для оценки уровней энергии и вероятностей прохождения сквозь потенциальные барьеры;
- применять стационарную теорию возмущений для нахождения поправок к уровням энергии и волновым функциям;
- применять нестационарную теорию возмущений для нахождения вероятностей переходов между состояниями;
- решать задачи о нахождении состояний и энергетического спектра систем многих, в том числе тождественных, частиц;
- вычислять дифференциальные сечения рассеяния частиц различными потенциалами;
- определять возможность оптических переходов между состояниями систем зарядов и оценивать времена жизни возбужденных состояний.

владеть:

- культурой постановки задач квантовой механики;
- основными методами решения задач квантовой механики, в частности, о нахождении собственных функций и собственных значений операторов физических величин;
- навыками теоретического анализа, моделирования и оценок свойств реальных физических систем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектром.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Волновая механика простых систем и теория рассеяния.	10	5		15
2	Математические основы квантовой теории.	5	3		15
3	Основы релятивистской квантовой теории.	5	3		15
4	Приближенные методы квантовой механики.	10	4		15
Итого часов		30	15		60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 6 (Весенний)

###### 1. Волновая механика простых систем и теория рассеяния.

Гипотеза квантов (фотонов), уравнение Эйнштейна для фотоэффекта. Импульс фотона и эффект Комптона. Волны де Бройля. Длина волны де Бройля для электрона. Плотность вероятности и амплитуда вероятности обнаружить частицу в заданной точке. Условие нормировки. Суперпозиция волн де Бройля (волновой пакет). Амплитуда вероятности и плотность вероятности обнаружить частицу с заданным импульсом. Волновая функция. Нормировка волновых функций на единицу и на дельта-функцию. Волна де Бройля и оператор импульса. Уравнение Шредингера. Стационарные состояния. Уравнение непрерывности для плотности вероятности и плотность тока вероятности для частицы. Одномерное финитное и инфинитное движение частицы. Принцип суперпозиции. Гамильтониан линейного гармонического осциллятора. Операторы рождения и уничтожения. Энергетический спектр линейного осциллятора. Построение собственных функций линейного осциллятора в координатном представлении. Полиномы Эрмита. Разделение переменных в квантовой задаче двух тел. Сведение задачи двух тел к движению частицы с приведённой массой в центральном поле. Оператор орбитального момента частицы в координатном представлении. Сферические гармоники. Гамильтониан частицы в сферических координатах. Разделение переменных в центральном поле. Уравнение для радиальной функции. Гамильтониан водородоподобного атома. Атомная система единиц. Энергетический спектр и радиальные волновые функции стационарных состояний водородоподобного атома. Главное, радиальное, орбитальное и магнитное квантовые числа. Постановка задачи рассеяния. Упругое рассеяние. Амплитуда рассеяния. Сечение рассеяния. Функция Грина задачи рассеяния. Интегральное уравнение для задачи рассеяния. Приближение Борна. Метод парциальных волн. Фазы рассеяния. Резонансное рассеяние. Неупругое рассеяние. Оптическая теорема. Особенности рассеяния тождественных частиц.

## 2. Математические основы квантовой теории.

Состояния и наблюдаемые. Эрмитовы и линейные операторы. Разложение волновых функций по собственным функциям оператора физической величины. Амплитуды вероятности. Условия ортогональности для собственных функций операторов физических величин. Вычисление средних значений. Теория представлений. Векторы состояний и сопряжённые векторы состояний. Условие полноты собственных векторов оператора физической величины. Одновременно измеримые физические величины. Коммутаторы. Полный набор физических величин, описывающих квантовую систему. Соотношения неопределённости и когерентные состояния. Импульсное представление. Матричные представления: операторы-матрицы и векторы-столбцы. Унитарные преобразования векторов состояний и операторов. Матричная механика. Зависимость физических величин от времени. Оператор изменения физической величины во времени. Интегралы движения. Операторы изменения во времени координаты и импульса частицы в потенциальном поле. Коммутаторы и скобки Пуассона. Оператор эволюции. Представления Шредингера и Гейзенберга. Уравнение Гейзенберга для операторов физических величин. Пространственные сдвиги и оператор импульса. Повороты в пространстве и оператор углового момента. Орбитальный угловой момент частицы. Коммутационные соотношения для операторов углового момента. Система собственных векторов операторов углового момента. Спин частицы. Матрицы Паули.

## 3. Основы релятивистской квантовой теории.

Уравнение Клейна-Гордона. Уравнение Дирака. Градиентная инвариантность. Свободная релятивистская частица. Состояния с положительными и отрицательными энергиями. Частицы и античастицы. Уравнение Паули. Уравнение Шредингера во внешнем электромагнитном поле. Поправки второго порядка по  $v/c$ : поправка к кинетической энергии, поправка Дарвина, спин-орбитальное взаимодействие. Частица в магнитном поле. Уровни Ландау. Квантование свободного электромагнитного поля. Операторы рождения и уничтожения фотонов. Гамильтониан поля. Гамильтониан взаимодействия атома и поля. Электрическое дипольное излучение. Вероятность излучения и поглощения. Правила отбора для электрического дипольного излучения. Магнитное дипольное и электрическое квадрупольное излучения. Рассеяние фотонов.

## 4. Приближенные методы квантовой механики.

Условие применимости квазиклассического приближения. Вид волновой функции частицы в квазиклассическом приближении. Решения уравнения Шредингера в окрестности точки поворота. Условия квантования Бора-Зоммерфельда. Вероятность проникновения частицы через барьер в квазиклассическом приближении. Первое и второе приближения теории стационарных возмущений. Критерий применимости теории. Стационарное возмущение вырожденных уровней дискретного спектра. Волновые функции нулевого приближения. Секулярное уравнение. Эффект Штарка в атоме водорода. Нестационарное возмущение дискретного спектра. Переходы под влиянием возмущения, действующего в течение конечного времени. Адиабатические и внезапные возмущения. Переходы под действием периодического возмущения в дискретном и непрерывном спектрах. Правило Ферми. Распад квазистационарных состояний. Спин-орбитальное взаимодействие. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша-Гордана. Полный угловой момент. Симметрии волновой функции тождественных частиц. Бозоны и фермионы. Детерминант Слэтера. Принцип Паули. Атом гелия. Координатные и спиновые функции двух электронов. Вариационный принцип, вычисление энергии основного состояния. Метод Хартри-Фока. Приближение центрального поля. Интегралы движения в сложных атомах. Термы. Правила Хунда. LS-связь. Тонкая структура уровней. Правило интервалов Ланде. Эффекты Зеемана и Пашена-Бака. Парамагнетизм и диамагнетизм атомов.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная маркерной доской с комплектом маркеров, мультимедиа проектором и экраном.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 3 : Квантовая механика. Нерелятивистская теория : учеб. пособие для вузов: рек. М-вом образования РФ / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского .— 6-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2008 .— 800 с.
  2. Задачи по теоретической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Белоусов, С. Н. Бурмистров, А. И. Тернов .— Долгопрудный : Интеллект, 2013 .— 584 с.
  3. Задачи по квантовой механике [Текст]. Т. 1 : [учеб. пособие для вузов] / З. Флюгге ; пер. с англ. Б. А. Лысова ; под ред. и с предисл. А. А. Соколова .— 3-е изд. — М. : ЛКИ, 2010 .— 344 с.
  4. Задачи по квантовой механике [Текст]. Т. 2 : [учеб. пособие для вузов] / З. Флюгге ; пер. с англ. Б. А. Лысова ; под ред. и с предисл. А. А. Соколова .— 3-е изд. — М. : ЛКИ, 2010 .— 320 с.
- Фонд литературы кафедры

5. В. А. Фок. Начала квантовой механики. - М.: Издательство URSS, 2014.

### **Дополнительная литература**

1. Задачи по квантовой механике [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. М. Галицкий, Б. М. Карнаков, В. И. Коган .— М. : Наука, 1992 .— 880 с.
2. Квантовая механика [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. С. Давыдов .— 2-е изд., испр. и перераб. — М. : Наука, 1973 .— 704 с.

Фонд литературы кафедры

3 Мессиа А. Квантовая механика. - М.: Наука; Т. 1, 1978; Т. 2, 1979.

4 Шифф Л. Квантовая механика. - М.: ИЛ, 1959.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://lib.mipt.ru>— электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.Sci-lib.com> — Большая научная библиотека.
3. <http://physics.nglib.ru/catalog.jsp?rubric=14> — литература по физике в электронной Библиотеке Технической Литературы «Нефть и Газ».

4. <http://arXiv.org> – CornellUniversityLibrary– Библиотека Корнельского Университета, электронный ресурс arXiv.

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

Программные средства MATLAB, Mathcad, Scilab, WolframMathematica.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Для успешного освоения курса, помимо посещения лекций и семинаров, от студентов требуется самостоятельная работа в объеме не менее, чем те часы, которые указаны для каждого раздела программы. Самостоятельные занятия включают в себя повторение материала лекций, семинарских занятий и подготовку к промежуточным тестированиям, которые проводятся для текущего контроля за усвоением материала. Студенты, успешно прошедшие все формы промежуточного контроля, допускаются к сдаче экзамена по дисциплине.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Суперкомпьютерное моделирование ядерных процессов и технологий Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра физики и физического материаловедения
<b>курс:</b>	3
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 6 (весенний) - Экзамен

#### Разработчики:

А.Л. Барабанов, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент  
С.В. Романов, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.2 Способен строить математические модели, производить количественные расчеты и оценки
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
	ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений
	ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Квантовая теория» обучающийся должен:

### знать:

- численные порядки величин, характеризующие квантовые явления;
- экспериментальные основы квантовой физики;
- основные принципы квантовой механики;
- методы описания квантовых систем;
- связь собственных векторов и собственных значений операторов с наблюдаемыми и измеряемыми физическими величинами;
- основные точно решаемые модели квантовых систем;
- основные приближенные методы решения задач квантовой механики: квазиклассическое приближение, стационарную и нестационарную теорию возмущений, вариационный метод;
- методы и способы описания систем тождественных частиц в квантовой теории;
- методы описания рассеяния частиц;
- описание взаимодействия электромагнитного излучения с квантовыми системами зарядов;
- основы релятивистской квантовой теории.

### уметь:

- находить безразмерные параметры, определяющие изучаемое явление;
- производить численные оценки по порядку величины;
- находить энергетические спектры и волновые функции в одномерных случаях;
- находить квантовомеханические средние с помощью известных волновых функций;
- применять квазиклассическое приближение для оценки уровней энергии и вероятностей прохождения сквозь потенциальные барьеры;
- применять стационарную теорию возмущений для нахождения поправок к уровням энергии и волновым функциям;
- применять нестационарную теорию возмущений для нахождения вероятностей переходов между состояниями;
- решать задачи о нахождении состояний и энергетического спектра систем многих, в том числе тождественных, частиц;
- вычислять дифференциальные сечения рассеяния частиц различными потенциалами;
- определять возможность оптических переходов между состояниями систем зарядов и оценивать времена жизни возбужденных состояний.

### владеть:



- культурой постановки задач квантовой механики;
- основными методами решения задач квантовой механики, в частности, о нахождении собственных функций и собственных значений операторов физических величин;
- навыками теоретического анализа, моделирования и оценок свойств реальных физических систем, обладающих как дискретным, так и непрерывным спектром.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

В целях текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущих занятий по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков

Промежуточная аттестация по дисциплине «квантовая теория» осуществляется в форме экзамена в бм семестре. Экзамен проводится в устной форме.

#### Пример теста:

1. Выразите постоянную тонкой структуры  $\alpha$  через фундаментальные постоянные  $e$ ,  $\hbar$ ,  $c$  и укажите её приближенное численное значение.
2. Состояние частицы описывается волновой функцией  $\Psi(\vec{r}, t)$ . Напишите формулу, определяющую вероятность  $P$  того, что в момент  $t$  частица будет обнаружена в известном объёме  $V$ .
3. Состояние частицы описывается волновой функцией  $\Psi(\vec{r}, t)$ . Напишите условие нормировки этой волновой функции на единицу.
4. Частица, свободно движущаяся с импульсом  $\vec{p}$  и энергией  $E$ , описывается волной де Бройля. Напишите волновой вектор  $\vec{k}$  и частоту  $\omega$  этой волны.
5. Частица свободно движется с импульсом  $\vec{p}$  и энергией  $E$ . Напишите явное выражение для волновой функции этой частицы  $\Psi_{\vec{p}}(\vec{r}, t)$ .
6. Напишите явное выражение для оператора импульса частицы  $\hat{\vec{p}}$ .
7. Частица массой  $m$  движется в потенциальном поле  $U(\vec{r})$ . Напишите явное выражение для гамильтониана  $\hat{H}$  этой частицы.
8. Частица массой  $m$  движется в потенциальном поле  $U(\vec{r})$ . Напишите уравнение Шредингера, определяющее волновую функцию  $\Psi(\vec{r}, t)$  этой частицы.
9. Состояние частицы массой  $m$  описывается волновой функцией  $\Psi(\vec{r}, t)$ . Напишите явные выражения для плотности вероятности  $\rho$  обнаружить частицу в точке  $\vec{r}$  в момент  $t$  и для плотности потока вероятности  $\vec{j}$ .
10. Напишите закон сохранения вероятности обнаружения частицы в некоторой области пространства в дифференциальной форме.

#### Перечень контрольных вопросов к экзамену:

1. Какую роль в квантовой теории играют операторы? Какие операторы называют линейными, эрмитово сопряженными, эрмитовыми? Что называют одновременно измеримыми величинами? Что называют соотношениями неопределенностей?
2. Как в квантовой теории определяется состояние частицы? Какое уравнение определяет эволюцию состояния частицы? Какие состояния называют стационарными? Что называют условиями нормировки и полноты?
3. Что в квантовой теории называют оператором изменения физической величины во времени? Какие физические величины называют интегралами движения?
4. Волновая функция и вектор состояния - это одно и то же? Что называют координатным и импульсным представлениями? Как выглядят операторы координаты и импульса частицы в этих представлениях? Как выглядят собственные функции указанных операторов в этих представлениях?
5. Что называют матричными представлениями? Как преобразуются векторы состояний и операторы физических величин из одного матричного представления в другое? Какие операторы называют унитарными?
6. Что называют представлениями Шредингера и Гейзенберга? Рассмотрите в качестве примера свободное движение частицы.
7. Как описывается линейный гармонический осциллятор в классической и квантовой

теориях? Каким уравнением определяются волновые функции стационарных состояний в координатном представлении? Как выглядят волновые функции для первых 3-4 стационарных состояний? Как выглядит волновая функция, описывающая эволюцию линейного осциллятора в самом общем случае?

8. Каким уравнением определяются векторы стационарных состояний и уровни энергии линейного гармонического осциллятора? В чем состоит суть метода установления спектра линейного оператора, основанного на введении операторов  $\hat{a}$  и  $\hat{a}^+$ ?

9. Что называют модами свободного электромагнитного поля в ограниченном объеме  $V$ ? Какова энергия моды? Что называют квантованием свободного электромагнитного поля?

10. Что называют операторами потенциалов и напряженностей свободного электромагнитного поля? Как выглядит гамильтониан? Каков его спектр? Какими уравнениями определяются состояния свободного квантованного электромагнитного поля?

11. Что называют оператором углового момента частицы? Почему угловой момент сохраняется в центральном поле? Как выглядят операторы  $\hat{L}^2$  и  $\hat{L}_z$  в координатном представлении (в декартовых и сферических координатах)? Что называют сферическими гармониками? Почему орбитальный момент частицы всегда кратен постоянной Планка  $\hbar$ ?

12. Как выглядит стационарное уравнение Шредингера, описывающее частицу в центральном поле, в декартовых и сферических координатах? В какой форме ищется волновая функция частицы в центральном поле? Рассмотрите примеры - водородоподобный атом и объемный гармонический осциллятор.

13. Как описывается водородоподобный атом в классической и квантовой теориях? Что в квантовой теории называют полным набором физических величин и что в данном случае выступает в качестве такого набора? Какому уравнению удовлетворяют радиальные волновые функции стационарных состояний и как они выглядят для первых 3-х состояний? Что называют атомной системой единиц?

14. Какие приемы используются для определения спектров сложных квантовых систем? Что называют вырожденными и невырожденными уровнями, дискретным и непрерывным спектрами? Какой формулой определяется дискретный спектр водородоподобного атома? Какими квантовые числа характеризуют уровни этого атома? Что называют кулоновским (случайным) вырождением?

15. Как в квантовой теории из условия изотропии пространства выводится закон сохранения углового момента? Какой явный вид приобретает оператор углового момента в применении к движущейся частице? Как выглядит этот оператор в декартовых координатах? Каким коммутационным соотношениям удовлетворяют операторы проекций углового момента?

16. Что называют спиновым угловым моментом (спином) частиц? В чем состоит суть метода, устанавливающего, что спин частицы может быть только целым или полуцелым числом? Какой формулой определяется результат действия операторов  $\hat{j}_x$ ,  $\hat{j}_y$  на спиновое состояние частицы? Что такое спиноры для частиц со спином  $1/2$ ? Что называют матрицами Паули?

17. Что называется квазиклассическим приближением? Как выглядит волновая функция частицы в этом приближении в классически разрешенной и классически запрещенной областях? Что называется правилом Бора-Зоммерфельда? Что называют фазовым объемом, приходящимся на одно квантовое состояние?

18. В каких случаях для решения уравнений в задаче о прохождении частицы через потенциальный барьер может быть использовано квазиклассическое приближение? Как выглядит формула для вероятности прохождения частицы через потенциальный барьер в квазиклассическом приближении?

19. Что называют стационарной теорией возмущений? Каковы поправки 1-го и 2-го порядков к энергии невырожденного уровня дискретного спектра и поправка 1-го порядка к вектору состояния, соответствующего тому же уровню? В чем состоит условие применимости стационарной теории возмущений?

20. Что происходит или может произойти с вырожденным уровнем дискретного спектра под

влиянием стационарного возмущения? Чем определяются поправки 1-го порядка к векторам состояний и энергиям этих же состояний?

21. Как эволюционирует вектор состояния квантовой системы под действием возмущения, зависящего от времени? Рассмотрите случай, когда возмущение начинает действовать на систему, находящуюся в одном из невырожденных состояний дискретного спектра.

22. Что называют "внезапным возмущением"? Чем определяется вероятность перехода системы из одного состояния дискретного спектра в другое под действием внезапного возмущения?

23. Чем определяется вероятность перехода системы из одного состояния дискретного спектра в другое под действием слабого возмущения, действующего в течение конечного времени? Что называют "адиабатическим возмущением"?

24. Чем определяется вероятность перехода из состояния дискретного спектра в непрерывный спектр под действием периодического возмущения? В чем состоит условие применимости?

25. Что называют уравнением Клейна--Гордона для свободной частицы? Какое уравнение непрерывности соответствует этому уравнению?

26. Что называют уравнением Дирака для свободной частицы? Какое уравнение непрерывности соответствует этому уравнению?

27. Чем определяется волновая функция свободной релятивистской частицы со спином  $1/2$  в квантовой механике? Какой вид принимает волновая функция свободной частицы в нерелятивистском пределе?

28. Какую форму приобретают уравнение Клейна-Гордона и уравнение Дирака для частиц, взаимодействующих с электромагнитным полем? Обладает ли уравнение Дирака свойством инвариантности при калибровочном преобразовании потенциалов электромагнитного поля?

29. Как выглядит "нерелятивистский предел" уравнения Дирака? Что называют уравнением Паули? Приведите примеры частиц, которые описываются этим уравнением. Обладает ли уравнение Паули свойством инвариантности при калибровочном преобразовании входящих в него потенциалов электромагнитного поля?

30. Как описывается движение бесспиновой заряженной частицы в постоянном и однородном магнитном поле в классической и квантовой теориях? В какой форме ищется волновая функция? Что называют уровнями Ландау?

31. Как выглядит "нерелятивистский предел" уравнения Дирака в случае взаимодействия частицы со стационарным электрическим полем? Каковы поправки второго порядка по  $v/c$  к нерелятивистскому гамильтониану? Что называют спин-орбитальным взаимодействием? Как это взаимодействие влияет на вырожденные уровни атома водорода?

32. В чем состоит задача сложения угловых моментов в квантовой теории? Что называют коэффициентами Клебша-Гордана?

33. Как в квантовой теории описываются системы, состоящие из многих частиц? Какими свойствами обладает волновая функция в случае, когда некоторые из частиц являются тождественными? Что называют фермионами и бозонами? Что называют детерминантом Слетера?

34. Как в квантовой теории описываются системы, состоящие из двух тождественных частиц? При каких условиях возможно разделение пространственных координат и спиновых переменных?

35. Как описывается гелиеподобный атом? В чем состоит суть метода приближенного определения энергий основного и возбужденных состояний? Что называют обменным взаимодействием?

36. Что называют вариационным методом поиска волновых функций и энергий основных состояний квантовых систем? Рассмотрите в качестве примера атом гелия.

37. Как выглядит стационарное уравнение Шредингера для сложного атома без учета релятивистских поправок? В чем состоит суть методов Хартри и Хартри-Фока, используемых для описания сложных атомов? Как выглядит гамильтониан сложного атома в приближении

центрального поля? Что называют термами сложного атома? Что называется тонкой структурой термов и что является причиной появления этой структуры? Что называют правилом интервалов Ланде?

38. Как выглядит гамильтониан сложного атома, помещенного в постоянное и однородное магнитное поле, с учетом спин-орбитального взаимодействия? Чем определяются расщепления уровней в слабом (эффект Зеемана) и сильном (эффект Пашена-Бака) полях? Что называют фактором Ланде?

39. Как в рамках квантовой механики может быть найдена диамагнитная восприимчивость атома гелия?

40. Как выглядит гамильтониан атома в приближении центрального поля, если он (атом) находится в ограниченном (но очень большом) объеме  $V$  и взаимодействует со свободным электромагнитным полем? Как выглядит гамильтониан системы "атом + свободное электромагнитное поле", если поле рассматривается как квантовая система? Что происходит при взаимодействии атома и поля?

41. Что называют спонтанным излучением атома? Что называют дипольным приближением в теории излучения? Чем определяется полная вероятность излучения в единицу времени для заданного перехода? Что называют правилами отбора по четности?

42. Как в нерелятивистской квантовой механике задача о движении двух взаимодействующих частиц преобразуется в задачу об одной частице, движущейся в центральном поле? Рассмотрите в качестве примера атом водорода.

43. Чем определяется решение квантовомеханической задачи о рассеянии частицы на неподвижном центре? Что называют амплитудой рассеяния? Как дифференциальное сечение связано с амплитудой рассеяния?

44. Задача рассеяния двух сталкивающихся частиц - это задача двух тел, которая в нерелятивистской квантовой механике преобразуется в задачу рассеяния одной частицы на неподвижном рассеивающем центре. Чем определяется дифференциальное сечение рассеяния частицы на неподвижном центре? Что меняется в постановке задачи, если две исходные сталкивающиеся частицы являются тождественными?

45. Что называют функцией Грина задачи рассеяния? Что называют интегральным уравнением рассеяния? Как интегральное уравнение определяет связь между амплитудой рассеяния и рассеивающим потенциалом?

46. Что называют борновским приближением в задаче рассеяния? В чем состоит условие применимости данного приближения? Если скорость движения частиц важна для применимости борновского приближения, то объясните, почему и насколько важна?

47. Что называют методом парциальных волн в квантовой задаче рассеяния? Что называют парциальной волной? Что называют сферическими функциями Бесселя, Неймана и Ганкеля? Каковы асимптотики этих функций? Что называют формулой Релея?

48. Что называют фазой рассеяния парциальной волны? При каких условиях данная парциальная волна искажается или, наоборот, не искажается потенциалом рассеивающего центра? Чем определяется амплитуда рассеяния в методе парциальных волн? Чем определяются дифференциальное и полное сечения упругого рассеяния в этом же методе? Что называют резонансным рассеянием?

49. Чем определяется полное сечение неупругого рассеяния в методе парциальных волн?

50. Чем определяется полное сечение взаимодействия частиц с рассеивающим центром? Что называют оптической теоремой?

## Примеры экзаменационных билетов:

### Билет 1

1. Какую роль в квантовой теории играют операторы? Какие операторы называют линейными, эрмитово сопряженными, эрмитовыми? Что называют одновременно измеримыми величинами? Что называют соотношениями неопределенностей?
2. В чем состоит задача сложения угловых моментов в квантовой теории? Что называют коэффициентами Клебша-Гордана?

### Билет 2

1. Как в квантовой теории определяется состояние частицы? Какое уравнение определяет эволюцию состояния частицы? Какие состояния называют стационарными? Что называют условиями нормировки и полноты?
2. Как в квантовой теории описываются системы, состоящие из многих частиц? Какими свойствами обладает волновая функция в случае, когда некоторые из частиц являются тождественными? Что называют фермионами и бозонами? Что называют детерминантом Слетера?

### Билет 3

1. Что в квантовой теории называют оператором изменения физической величины во времени? Какие физические величины называют интегралами движения?
2. Как в квантовой теории описываются системы, состоящие из двух тождественных частиц? При каких условиях возможно разделение пространственных координат и спиновых переменных?

## 4. Критерии оценивания

Оценка	Баллы	Критерии
отлично	10	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	9	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.
	8	Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми

		недочетами.
хорошо	7	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.
	6	Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.
	5	Выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.
удовлетворительно	4	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.
	3	Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.
неудовлетворительно	2	Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.
	1	Выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

**5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и опыта деятельности.**

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется не менее 40 минут на подготовку. Опрос по билету и ответы на дополнительные вопросы не превышает двух астрономических часов. По завершении отведенного на опрос времени, экзаменатор выставляет обучающемуся оценку в соответствии с вышеприведенными критериями.