

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Тихоокеанский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

\_\_\_\_\_ С.В. Шалобанов

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2010 г.

**ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ**

по кафедре «Физика»

**КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ**

Утверждена научно-методическим советом университета для  
подготовки по специальности 010701 «Физика»

Хабаровск 2010 г.

Программа разработана в соответствии с требованиями государственного образовательного стандарта, предъявляемыми к минимуму содержания дисциплины и в соответствии с примерной программой дисциплины, утвержденной департаментом образовательных программ и стандартов профессионального образования с учетом особенностей региона и условий организации учебного процесса Тихоокеанского государственного технического университета.

Программу составил

Зайцев С.А.

д. ф.-м. н., профессор кафедры

«Физика»

Программа рассмотрена и утверждена на заседании кафедры  
протокол № 2 от «21» октября 2010 г.

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. Римлянд В.И.

Программа рассмотрена и утверждена на заседании УМК и реко-  
мендована к изданию

протокол № 2 от «21» октября 2010 г.

Председатель УМК \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. Римлянд В.И.

Декан ФММПУ \_\_\_\_\_ «\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г. Син А.З.

### **3. Цели и задачи дисциплины**

#### ***3.1. Цель преподавания дисциплины***

Целью курса является формирование у студентов базовых знаний по квантовой механике, ознакомление их с ее математическим аппаратом и методами анализа различных квантовых систем.

#### ***3.2. Задачи изучения дисциплины***

Задачами курса являются: обучение основным законам и уравнениям квантовой механики; методам нахождения собственных чисел и собственных функций основных физических операторов; умению по заданному оператору и функции, описывающей состояние системы, определять спектр измеряемой физической величины и его распределение; методам анализа процессов, происходящих в атоме, при столкновении квантовых частиц, при квантовом движении частиц во внешнем электрическом и магнитном полях и т.д.

### **4. Требования к уровню освоения содержания дисциплины**

Специалист должен знать и уметь использовать: понятие состояний в квантовой теории, динамические переменные, элементы теории представлений, эволюцию векторов состояний со временем, уравнение Шредингера, гайзенберговскую форму основного уравнения, законы сохранения, представление взаимодействия, чистые и смешанные состояния, матрицу плотности, линейный гармонический осциллятор, теорию водородоподобного атома, общую теорию моментов, приближенные методы квантовой теории, упругое рассеяние частиц, теорию излучения, основы релятивистской квантовой теории, уравнение Дирака, тождественность частиц, вторичное квантование.

## 5. Объем дисциплины и виды учебной работы

Наименование	Объем в часах
<b>Общая трудоемкость дисциплины</b> по ГОС по УП	228
<b>Изучается в семестрах</b>	7, 8
<b>Вид итогового контроля по семестрам</b> Экзамен КР	7, 8 8
<b>Аудиторные занятия</b> всего В том числе: лекции (Л) практические занятия (ПЗ)	105 70 35
<b>Самостоятельная работа</b> Общий объем часов (С2) В том числе: на подготовку к лекциям на подготовку к практическим занятиям на КР	123 52 35 36

## **6. Содержание дисциплины**

### **1. Физические основы квантовой механики**

Экспериментальные предпосылки квантовой механики. Атомные спектры и закон композиции Ритца. Опыты Резерфорда. Модели Бора и Эйнштейна. Понятие о наблюдаемых. Соотношения неопределенностей. Матричная механика Гейзенберга.

### **2. Наблюдаемые и состояния в квантовой механике**

Пространство состояний как гильбертово пространство. Линейные операторы и наблюдаемые. Операторы координаты и импульса. Описание состояний физических систем. Чистые и смешанные состояния. Полный набор наблюдаемых. Эволюция физических величин. Представления Гейзенберга и Шредингера. Уравнение Шредингера. Интегралы движения. Стационарные состояния. Координатное и импульсное пространства.

### **3. Симметрии в квантовой механике**

Симметрии и законы сохранения. Линейные представления групп и их роль в квантовой механике. Теорема Вигнера. Импульс. Квазиимпульс. Момент количества движения. Спин. Сложение моментов. Неприводимые тензоры, их матричные элементы в базисе полного момента. Конечные группы симметрии. Кристаллографические группы. Группы перестановок.

### **4. Простейшие задачи квантовой механики**

Уровни энергии одномерных систем. Метод факторизации. Гармонический осциллятор, когерентные состояния. Уровни энергии трехмерных систем. Симметрия потенциала и вырождение уровней. Сферически симметричные и аксиально симметричные системы. Разделение переменных. Задача двух тел. Атом водорода. Приближение кристаллического поля. Периодические потенциалы и зонная структура энергетических спектров. Решетки и суперрешетки.

### **5. Квазиклассическое приближение**

Метод Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. Одномерное туннелирование в квазиклассическом приближении. Движение волновых пакетов.

### **6. Частицы со спином**

Уравнение Дирака для свободной частицы. Спин частицы Дирака. Частицы и античастицы. Частица Дирака во внешних полях. Квазирелятивистское приближение гамильтониана Дирака. Релятивистские поправки в спектре атома водорода. Лэмбовский сдвиг.

### **7. Приближенные методы в квантовой теории**

Возмущения невырожденного дискретного спектра. Возмущения вырожденного спектра. Снятие вырождения. Нестационарная теория возмущений Дирака. Золотое правило (Ферми) для вероятности перехода. Вариационные методы.

## **8. Элементарная теория спектров многоэлектронных атомов и молекул.**

Принцип Паули. Приближение центрального поля. Атом гелия. Модель атома Томаса - Ферми и самосогласованное поле атома. Классификация стационарных состояний. Обменное взаимодействие. Волновые функции конфигурации с определенным спином. Таблица Менделеева. Тонкая структура уровней. Тонкая структура уровней в приближении L-S связи. Взаимодействие атомов. Силы Ван-дер-Ваальса. Потенциалы Ленарда - Джонсона. Атом во внешних полях. Строение молекул. Типы химической связи. Симметрии и элементарная теория молекулярных спектров. Эффект Яна - Теллера.

## **9. Квантование электромагнитного поля**

Гамильтонова форма уравнений Максвелла. Квантование электромагнитного поля. Спин и спиральность фотона. Пространство состояний электромагнитного поля. Корпускулярно - волновые свойства. Соотношение неопределенностей. Взаимодействие электромагнитного поля с веществом. Эффект Мёссбауэра. Когерентные (глауберовы) и сжатые состояния. Возникновение классической составляющей поля.

## **10. Общая теория переходов**

Определение вероятностей переходов. Общий метод вычисления вероятности перехода. Закон распада, форма линии и скорости переходов при распаде изолированного состояния. Соотношение неопределенностей между временем жизни и шириной линии. Прямые и последовательные переходы. Эволюция состояний, принадлежащих вырожденному уровню энергии.

## **11. Электромагнитные переходы в атомах**

Излучение и поглощение фотонов. Правила отбора. Излучение и поглощение во внешних полях. Электронный парамагнитный резонанс. Рассеяние света на атоме. Элементарная теория лазера.

## **12. Системы с неопределенным числом частиц**

Пространство состояний с неопределенным числом частиц. Вторичное квантование. Основные операторы в представлении вторичного квантования. Уравнения движения в представлении вторичного квантования. Вариационный принцип Боголюбова.

## **13. Теория рассеяния**

Представление взаимодействия (Дирака). Вычисление вероятностей переходов. Сечение рассеяния. Рассеяние в борновском приближении. Потенциальное рассеяние. Разложение по парциальным волнам. Движение волновых пакетов. Поведение амплитуды рассеяния при низких энергиях. Аналитические свойства амплитуды рассеяния.

## Разделы дисциплины и виды занятий и работ

№	Раздел дисциплины	Л	ЛР	ПЗ	КР	РГР	ДЗ	РФ	С2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	Физические основы квантовой механики	*							
2.	Наблюдаемые и состояния в квантовой механике	*		*					
3.	Симметрии в квантовой механике	*		*					
4.	Простейшие задачи квантовой механики	*		*					
5.	Квазиклассическое приближение	*		*					
6.	Частицы со спином	*		*					
7.	Приближенные методы в квантовой теории	*		*	*				
8.	Элементарная теория спектров многоэлектронных атомов и молекул	*		*	*				
9.	Квантование электромагнитного поля	*		*	*				
10.	Общая теория переходов	*		*	*				
11.	Электромагнитные переходы в атомах	*		*	*				
12.	Системы с неопределенным числом частиц	*		*					
13.	Теория рассеяния	*		*	*				

## 8. Практические занятия

1. Принцип неопределенности. Алгебра операторов.  
Получить соотношения неопределенностей для величин, которым соответствуют эрмитовские операторы с заданным коммутатором. Получить коммутационные соотношения для функций от операторов.
2. Волновой пакет. Свободное уравнение Шредингера.  
Найти эволюцию во времени волновой функции, заданной в момент  $t=0$ , для свободного движения. На выполнение задания отводится 2 часа.
3. Теория представлений.

- Найти волновые функции и собственные энергии системы в различных представлениях (координатном и импульсном). На выполнение задания отводится 2 часа.
4. Метод факторизации.  
Найти дискретный спектр частицы в заданной одномерной потенциальной яме. На выполнение задания отводится 2 часа.
  5. Туннельный эффект.  
Вычислить коэффициент прохождения  $D(E)$  в поле с заданным потенциалом. На выполнение задания отводится 2 часа.
  6. Квазиклассическое движение.  
Найти ВКБ-спектр частицы в заданном одномерном потенциале. Оценить ВКБ-коэффициент прохождения  $D(E)$  в поле с заданным потенциалом. На выполнение задания отводится 2 часа.
  7. Атом водорода.  
Для основного и возбуждённых состояний атома водорода средние значения:  $r^n$ , где  $n \in \mathbb{Z}$ ; кинетической и потенциальной энергии; потенциала, создаваемого атомом; электрического поля, создаваемого на больших расстояниях от атома. На выполнение задания отводится 2 часа.
  8. Стационарная теория возмущений.  
Вычисление поправок первого и второго порядков к уровням энергии атома водорода и гармонического осциллятора при наличии возмущения. На выполнение задания отводится 3 часа.
  9. Спин. Движение частиц в магнитном поле.  
Определить спиновую волновую функцию частицы со спином  $\frac{1}{2}$  в нестационарном и неоднородном магнитном поле. На выполнение задания отводится 2 часа.
  10. Релятивистская теория. Уравнение Клейна-Гордона.  
Получить выражения для среднего значения энергии и импульса свободной бесспиновой частицы в произвольном состоянии, описываемом решением уравнения Клейна-Гордона. На выполнение задания отводится 2 часа.
  11. Уравнение Дирака.  
Найти решение уравнение Дирака, описывающего свободную частицу, имеющую определенные импульс и энергию. На выполнение задания отводится 2 часа.
  12. Тонкая структура атома водорода.  
Вычислить поправки к положению энергетических уровней водородоподобных ионов, связанные с учетом: 1) релятивистской зависимости кинетической энергии электрона от импульса; 2) спин-орбитального взаимодействия; 3) контактно взаимодействия. На выполнение задания отводится 2 часа.
  13. Атом гелия.  
Вычислить энергии основного и возбуждённых состояний атома гелия, рассматривая межэлектронное взаимодействие в качестве возмущения. На выполнение задания отводится 2 часа.
  14. Теория возмущений Дирака.  
Заряженный гармонический осциллятор подвергается воздействию однородного электрического поля с заданной временной зависимостью. Найти в первом порядке теории возмущений вероятности возбуждения различных его состояний. На выполнение задания отводится 2 часа.



15. Периодическое возмущение и резонанс.  
 Определить в дипольном приближении вероятность в единицу времени спонтанного излучения фотона водородоподобным ионом, сферическим осциллятором, находящимися в заданных возбуждённых состояниях. На выполнение задания отводится 2 часа.
16. Борновское приближение.  
 Вычисление в первом борновском приближении амплитуды рассеяния и полное сечение рассеяния частиц на заданных потенциалах. На выполнение задания отводится 2 часа.
17. Фазовая теория рассеяния. Аналитические свойства амплитуды рассеяния.  
 Получить выражения в борновском приближении для фазовых сдвигов  $\delta_l(k)$  и  $S$ -матрицы на заданном центральном потенциале. Исследовать особые точки  $S$ -матрицы. На выполнение задания отводится 2 часа.

Практические занятия и их взаимосвязь с содержанием лекционного курса

№ п/п	№ раздела по варианту содержания			Тема практического занятия
	1	2	3	
1	1	2		Принцип неопределенности. Алгебра операторов
2	2	4		Волновой пакет. Уравнение Шредингера.
3	1	2		Теория представлений
4	4			Метод факторизации
5	4			Туннельный эффект
6	5			Квазиклассическое движение
7	7			Стационарная теория возмущений
8	3	4		Атом водорода
9	3	6		Спин. Движение частиц в магнитном поле
10	3	6		Релятивистская теория. Уравнение Клейна-Гордона
11	6			Уравнение Дирака
12	8			Тонкая структура атома водорода
13	8			Атом гелия
14	9	10	11	Теория возмущений Дирака
15	9	10	11	Периодическое возмущение и резонанс
16	13			Борновское приближение
17	13			Фазовая теория рассеяния. Аналитические свойства амплитуды рассеяния.

## 9. Курсовые работы

На выполнение курсовой работы отводится 36 часов. Объем отчета по курсовой работе не превышает 30 страниц.

### **Тематика курсовых работ**

1. Применение приближенных и численных методов решений задач квантовой механики к одномерному и квазиклассическому движению частицы.
2. Применение приближенных и численных методов решений задач квантовой механики к движению частицы в центрально-симметричном поле.
3. Использование приближенных и численных методов для определения состояний квантовых систем в различных представлениях.
4. Применение приближенных и численных методов к расчету энергетического спектра водородоподобного атома во внешнем электрическом поле.
5. Применение приближенных и численных методов к расчету энергетического спектра водородоподобного атома во внешнем магнитном поле.
6. Применение приближенных и численных методов к расчету энергии ионизации гелиоподобного атома.
7. Применение приближенных и численных методов в оболочной модели атомного ядра для определения состава магических ядер.
8. Квантовое движение заряженных частиц в магнитном, электрическом и скрещенных полях.
9. Использование методов Томаса-Ферми и Хартри-Фока для многоэлектронных атомов.
10. Точные и приближенные решения уравнения Клейна-Гордона-Фока для бесспиновой частицы во внешнем поле.
11. Точные и приближенные решения уравнения Дирака для частицы во внешнем поле.
12. Применение приближенных и численных методов к определению вероятности перехода квантовой системы из одного состояния в другое под действием нестандартных полей различной конфигураций.
13. Применение приближенных и численных методов к определению вероятности изучения фотона квантовой системой под действием нестандартных полей различной конфигураций.
14. Определение и численный анализ сечений тормозного излучения, возникающего при столкновении электрона с тяжелой рассеивающей частицей во внешнем однородном электрическом поле.
15. Определение и численный анализ сечений упругих и неупругих столкновений электрона с атомом водорода во внешнем однородном электрическом поле.

### **12. Самостоятельная работа студентов**

Самостоятельная работа студентов выполняется по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия. Целью самостоятельной работы является систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентом, углубление и расширение знаний, приобретение навыков самостоятельной работы с литературой, развитие способностей к самосовершенствованию.

### 13. Контроль знаний студентов

#### 6.1 Входной контроль знаний студентов

Темы входного контроля знаний студентов: общая физика, дифференциальное и интегральное исчисление, линейная алгебра, аналитическая геометрия, дифференциальные уравнения.

#### 6.2 Текущий контроль знаний студентов

В качестве текущего контроля знаний студентов используется опрос студентов по изученному материалу. Опрос проводится на практических занятиях.

#### Примеры тестовых заданий

1. Тест на соответствие:

Установить соответствие: 1. Уравнения Ньютона, 2. Уравнение Гамильтона-Якоби, 3. Уравнения Даламбера (уравнения Максвелла в потенциалах), 4. Уравнение Шредингера, 5. Уравнение Паули

$$\frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} - \frac{i\hbar}{2m} \Delta \psi(\vec{r}, t) = -\frac{i}{\hbar} U(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t)$$

$$\frac{\partial S(\vec{r}, t)}{\partial t} + \frac{1}{2m} (\nabla S(\vec{r}, t))^2 + U(\vec{r}, t) = 0$$

$$\Delta \vec{A}(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}(\vec{r}, t)$$

$$\Delta \varphi(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = -4\pi \rho(\vec{r}, t)$$

$$m \frac{d^2 \vec{r}(t)}{dt^2} + \nabla U(\vec{r}, t) = 0$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \left[ \frac{1}{2m} \left( i\hbar \nabla + \frac{e}{c} \vec{A}(\vec{r}, t) \right)^2 + e\varphi(\vec{r}, t) - \frac{e}{mc} (\hat{s} \vec{B}) \right] \psi(\vec{r}, t)$$

2. Открытая форма тестового задания.

Ввести ответ с тремя знаками после десятичной точки  
Квантовый гармонический осциллятор находится в основном состоянии. Найти вероятность его пребывания в области, запрещенной для классического движения.

### 3. Закрытая форма тестового задания

Отметьте правильный ответ

Уровни энергии заряженной бесспиновой частицы в постоянном однородном магнитном поле (уровни Ландау)

- не вырождены
- двукратно вырождены
- основное состояние не вырождено, возбужденные - двукратно вырождены
- бесконечно кратно вырождены

### ***6.3 Выходной контроль знаний студентов***

Выходной контроль знаний студентов осуществляется при проведении экзамена.

#### **Вопросы выходного контроля (вопросы, выносимые на экзамен)**

1. Волновая функция, принцип суперпозиции. Прямые эксперименты, подтверждающие отсутствие траекторий у микрочастиц
2. Измерение физических величин. Операторы. Их свойства и свойства их собственных функций.
3. Алгебра операторов. Коммутаторы. Функции от операторов.
4. Нормировка собственных функций операторов непрерывного спектра. Различные представления квантовой механики. Оператор координаты.
5. Волновая функция квазиклассической системы.
6. Волновое уравнение. Гамильтониан.
7. Оператор дифференцирования физической величины по времени. Сохраняющиеся величины (интегралы движения).
8. Энергия, закон сохранения энергии, стационарные состояния. Зависимость волновых функций стационарных состояний от времени.
9. Импульс. Собственные функции оператора импульса.
10. Коммутационные соотношения между операторами координат и импульса. Соотношение неопределенностей координат и импульса.
11. Уравнение Шредингера. Общие свойства его решений. Плотность потока вероятности.
12. Соотношения между классической и квантовой механиками.
13. Одномерное уравнение Шредингера. Движение частицы в одномерной прямоугольной несимметричной потенциальной яме.

14. Лине́йный гармонический осциллятор.
15. Туннельный эффект. Надбарьерное отражение.
16. Квазиклассическое приближение. Правила квантования Бора-Зоммерфельда.
17. Момент импульса. Коммутационные соотношения между операторами компонент момента и квадратом оператора момента.
18. Оператор проекции момента на ось  $z$  в сферических координатах, его собственные числа.
19. Собственные числа оператора квадрата момента.
20. Собственные функции оператора квадрата момента.
21. Сложение моментов.
22. Четность. Закон сохранения четности. Четность частицы в состоянии с определенным значением момента.
23. Спин. Операторы спина. Волновые функции частиц, имеющих спин.
24. Принцип неразличимости одинаковых частиц. Симметрия волновых функций систем, состоящих из одинаковых частиц. Принцип Паули.
25. Обменное взаимодействие.
26. Задача двух тел в квантовой механике. Радиальное уравнение.
27. Водородоподобный атом.
28. Стационарная теория возмущения (невырожденный случай).
29. Стационарная теория возмущения (вырожденный случай).
30. Нестационарная теория возмущений
31. Соотношение неопределённостей энергии и времени.
32. Вероятность перехода в единицу времени.
33. Сечение рассеяния частиц в борновском приближении.
34. Уравнение Клейна-Гордона.
35. Движение бесспиновой частицы в кулоновом поле.
36. Уравнение Дирака.
37. Частицы в магнитном поле. Оператор собственного магнитного момента. Нейтрон в однородном и постоянном магнитном поле.
38. Разложение уравнения Дирака по степеням  $v/c$  до второго порядка включительно. Спин-орбитальное взаимодействие. Тонкая структура энергетических уровней.
39. Многоэлектронные атомы. Их состояния. Периодическая таблица Д.И. Менделеева.
40. Функция Грина свободного движения частицы. Амплитуда рассеяния. Связь дифференциального сечения рассеяния с амплитудой рассеяния.
41. Разложение амплитуды рассеяния по кратности взаимодействия. Борновское приближение. Условия применимости борновского приближения.
42. Метод вторичного квантования.

**Примерный список задач, выносимых на экзамен**

1. Найти уровни энергии в одномерной симметричной потенциальной яме

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

2. Найти вероятность отражения частицы при прохождении над одномерным потенциальным барьером  $V(x) = \begin{cases} V_0, & |x| < a \\ 0, & |x| \geq a \end{cases}$  (энергия частицы больше высоты барьера).

3. Найти  $s$ -уровни энергии в сферически-симметричной потенциальной яме

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

4. Найти  $s$ -уровни энергии в сферической оболочке  $V(r) = -V_0 \cdot \delta(r - a)$ .

5. Для водородоподобного атома в основном состоянии найти вероятность пребывания электрона в классически запрещенной области.

6. Рассчитать расщепление уровня энергии атома водорода с  $n = 2$  в слабом однородном электрическом поле.

7. Пусть гамильтониан зависит от  $\lambda$  как от параметра и  $\hat{H}(\lambda)|\psi(\lambda)\rangle = E(\lambda)|\psi(\lambda)\rangle$ . Показать, что для нормированных на единицу векторов  $|\psi(\lambda)\rangle$  имеет место соотношение  $\frac{\partial E(\lambda)}{\partial \lambda} = \langle \psi(\lambda) | \frac{\partial \hat{H}(\lambda)}{\partial \lambda} | \psi(\lambda) \rangle$ .

8. Показать, что если  $\hat{A}$  - скалярный оператор, то  $\langle j'm' | \hat{A} | jm \rangle = \delta_{jj'} \delta_{m'm} \langle j | \hat{A} | j \rangle$ .

9. Двухуровневая система с состояниями  $|1\rangle, |2\rangle$ , энергии которых есть  $\hbar\omega_1, \hbar\omega_2$ , подвергается действию не зависящего от времени возмущения  $\hat{W}$ . Вычислить вероятность обнаружить то или иное состояние в момент времени  $t$ , если в начальный момент  $t = 0$  система находилась в основном состоянии.

10. Нейтральная частица со спином  $1/2$  и магнитным моментом  $\vec{\mu} = \mu_0 \vec{s}$  находится в однородном магнитном поле, изменяющемся по закону  $\vec{H} = (H_1 \cos \omega t, H_1 \sin \omega t, H_0)$ . В момент времени  $t = 0$  проекция спина на направление поля была равна  $+1/2$ . Определить вероятность перехода частицы к моменту времени  $t$  в состояние, в котором проекция спина на направление магнитного поля равна  $-1/2$ .

11. Подействовать оператором  $\hat{L} = \exp(a \frac{\partial}{\partial x})$  на функцию  $\Psi(x) = C \frac{\sin x}{x}$ .

12. Найти оператор, эрмитово сопряженный оператору комплексного сопряжения.
13. Найти спектр и собственные функции оператора трансляции.
14. Показать, что коммутатор наблюдаемых не является наблюдаемой.
15. Найти  $\frac{d}{dt}(\hat{L}(t) \cdot \hat{M}(t))\pi$ .
16. Найти коммутаторы операторов координат момента импульса и импульса.
17. Показать, что в любом стационарном состоянии среднее значение импульса должно равняться нулю.
18. Найти вид оператора скорости  $\hat{v} = \hat{r}$  заряженной без спиновой частицы, находящейся в произвольном электромагнитном поле.
19. Определить состояние, в котором средняя энергия гармонического осциллятора равна  $\hbar\omega$ .
20. Квантовая частица находится в основном состоянии линейного гармонического осциллятора. Найти вероятность пребывания этой частицы в области, запрещенной для классического движения.
21. Проверить выполнение соотношения неопределенности для координаты и импульса частицы, совершающей линейные гармонические колебания.
22. Как изменятся разрешенные значения энергии заряженного квантового гармонического осциллятора, если поместить его в постоянное, однородное электрическое поле. Сравнить точный ответ с первой поправкой к осцилляторным уровням энергии, если поле рассматривать как возмущение.
23. Для квантовой частицы, находящейся в «бесконечно глубокой потенциальной яме» в первом возбужденном состоянии определить среднюю кинетическую энергию и средне квадратичное отклонение от этого значения.

24. Состояние частицы, находящейся в «бесконечно глубокой потенциальной яме» ширины  $a$  ( $0 < x < a$ ), в начальный момент времени имеет вид

$$\Psi(x, t = 0) = A \cdot \sin^3 \frac{\pi x}{a}.$$

Найти волновую функцию в произвольный момент времени. ( Указание:  $4 \cdot \sin^3 \alpha = 3 \cdot \sin \alpha - \sin 3\alpha$  ).

25. Определить коэффициент прозрачности потенциального барьера

$$V(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ V_0, & 0 \leq x \leq a \\ V_1, & x > a \end{cases}$$

для частиц массой  $m$ , движущихся к нему слева с энергией  $E$  ( $V_1 < E < V_0$  ).

26. Используя вариационный метод, найти энергию и волновые функции основного и первого возбужденного состояния частицы массы  $m$ , находящейся в потенциальном поле  $V(x) = C|x|$ , где  $C$  - const.
27. Линейный заряженный гармонический осциллятор подвергается воздействию однородного электрического поля, изменяющегося во времени по закону  $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \exp[-(t/\tau)^2]$ . Считая, что до включения поля (при  $t \rightarrow -\infty$ ) осциллятор находился в  $n$ -ом стационарном состоянии, найти в первом порядке теории возмущений вероятность того, что он и останется в этом же состоянии и при  $t \rightarrow \infty$ .
28. Рассчитать энергию расщепление первого возбужденного состояния атома водорода, обусловленное неточечностью протона. (Протон считать равномерно заряженным шаром, радиуса  $r_0$ ).
29. Определить состояние, в котором атом водорода с энергией  $E_2 = -\frac{R}{4}$ , где  $R$  - постоянная Ридберга, имеет максимальный дипольный момент.
30. Оценить коэффициент прозрачности потенциального барьера вида
- $$V(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ V_0 \cdot (1 - x/a), & x > 0 \end{cases}$$
- (Обсудить случай медленных частиц  $E \rightarrow 0$ ).

## 15. Учебно-методическое обеспечение дисциплины

### Основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. – М.: Физматлит, 2002.
2. Мессиа А. Квантовая механика, т. 1,2. М.: Наука, 1978.
3. Шифф Л. Квантовая механика. – М.: ИЛ, 1957.
4. Галицкий В.М. и др. Задачи по квантовой механике / В.М. Галицкий, Б.М. Карнаков, В.И. Коган. – М.: Наука, 1981.
5. Флюгге З. Задачи по квантовой механике, т. 1. – М.: Мир, 1974.
6. Флюгге З. Задачи по квантовой механике, т. 2. – М.: Мир, 1974.
7. Давыдов А.С. Квантовая механика. – М.: Физматлит, 1963.
8. Блохинцев Д. Основы квантовой механики. – СПб.: Лань, 2004.

### Дополнительная литература

9. Дирак П.А.М. Собрание научных трудов. – Т.1. Квантовая механика. – М.: Физматлит, 2004.
10. Соколов А.А., Тернов И.М., Жуковский В.И. Квантовая механика. – М.: Наука, 1978.
11. Гольдман И.И. Сборник задач по квантовой механике. – М.: Физматлит, 2004.



12. Баргатин И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н. Запутанные квантовые состояния атомных систем // УФН, т. 171, с. 625.
13. Гришанин Б.А. Квантовая электродинамика для радиофизиков. – М.: Изд. Моск. Унив., 1981.
14. Симкин Б.Я. Задачи по теории строения молекул. – Ростов-на-Дону: Феникс, 1997.
15. Фейнман Р и др. Задачи и упражнения / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир, 1978.  
Ярив А. Введение в теорию и приложения квантовой механики. – М.: Мир, 1984.