

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **КВАНТОВАЯ ФИЗИКА НАНОСТРУКТУР**

**Методические указания по выполнению практических работ**

Направление подготовки 28.03.02 Наноинженерия  
Направленность (профиль)  
«Нанотехнологии и наноматериалы»

**Ставрополь  
2026**

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                   | 2  |
| Тема 1. Экспериментальные и теоретические основы квантовой теории.         | 2  |
| Тема 2. Представление состояний и эволюция квантовых систем.               | 3  |
| Тема 3. Симметрии, инварианты и законы сохранения.                         | 4  |
| Тема 4. Базовые (простейшие) задачи квантовой теории.                      | 5  |
| Тема 5. Квантовая механика частиц, обладающих спином.                      |    |
| изучение темы                                                              | 6  |
| Тема 6. Приближенные методы в квантовой теории.                            | 7  |
| Тема 7. Общая теория переходов, спектры многоэлектронных атомов и молекул. | 8  |
| Тема 8. Основы теории рассеяния.                                           | 9  |
| Тема 9. Методы вторичного квантования.                                     | 10 |
| Тема 10. Основы квантовой теории твердого тела.                            | 11 |
| Тема 11. Некоторые методы современной квантовой теории.                    | 12 |

## Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студента).

Самостоятельная работа студента является важным видом учебной и научной деятельности студента. Федеральным государственным образовательным стандартом предусматривается значительный объем времени из общей трудоемкости дисциплины на самостоятельную работу. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому самостоятельная работа должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования – подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студента предполагает, прежде всего, его научно-исследовательскую и практическую деятельность, поскольку именно эти виды учебной работы в первую очередь готовят к самостоятельному выполнению профессиональных задач. Конечной целью самостоятельной работы является организация самостоятельной познавательной деятельности, формирование умения самостоятельно анализировать информацию, выделять главное и второстепенное.

Основными формами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теория и методология социально-экономических исследований в туристской индустрии» являются:

- подготовка к собеседованию;
- подготовка к практическому занятию.

**Собеседование** – обсуждение проблемы, темы по заранее заданной структуре (вопросам) с предварительным углубленной самостоятельной проработкой материала. Семинары помогают овладеть понятийно-терминологическим аппаратом, свободно оперировать им, понимать практическое приложение теории, прививают навыки самостоятельного мышления, устного выступления.

**Проблемные задачи** – частично регламентированное задание, имеющее нестандартное решение и позволяющее диагностировать умения, интегрировать знания различных областей, аргументировать собственную точку зрения.

### **Знать:**

- основные постулаты квантовой теории;
- способы описания состояний микросистем;
- способы описания физических величин;
- свойства собственных функций операторов физических величин;
- явный вид операторов основных физических величин;
- физическую интерпретации соотношений неопределенностей и волновых функций;
- основные положения квантовой физики.

### **Уметь:**

- применять соотношения неопределенностей для получения оценок при решении задач;
- записывать оператор Гамильтона для любой микросистемы;

- записывать уравнение Шредингера для атомов и молекул;
- применять в простых случаях приближенные методы решения уравнений Шредингера;
- решать одномерные задачи на отыскание собственных функций и собственных значений;
- применять приближенные методы построения уравнений движения сложных атомных и молекулярных систем;
- применять методы нахождения координатных и спиновых волновых функций;
- применять методы построения матричных элементов оператора момента количества движения и его проекций;
- применять неэмпирические и полуэмпирические методы изучения электронного строения атомов и молекул;
- применять методы адиабатического и самосогласованного приближения

**Владеть:**

- основами квантовой теории твердого тела;
- методами современной квантовой теории

## **Тема 1. Экспериментальные и теоретические основы квантовой теории**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

Задачи:

1. Работа выхода электрона из серебра равняется  $A = 4.28$  эВ. Определить, до какого потенциала зарядится серебряный шарик, удаленный от других тел, если его облучать монохроматическим светом с длиной волны  $\lambda$  см.

2. Может ли энергия  $\gamma$ -кванта в результате рассеяния на свободном электроне увеличиться и при каких условиях?

3. Абсолютно черное тело, имеющее форму шара с радиусом  $r = 15$  см, поддерживается при постоянной температуре  $T$ . Мощность излучения данного тела составляет  $P = 1.5$  кДж/с. Определить его температуру.

4. Длина волны резонансной линии в спектре атомарного водорода равна  $1200 \text{ \AA}$ , а длина волны границы серии Бальмера составляет  $3646 \text{ \AA}$ . Найти ионизационный потенциал  $U_i$  атома водорода.

### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

## **Тема 2. Представление состояний и эволюция квантовых систем**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы

работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

Задачи:

1. Свободная частица находится в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками, расположенными при  $x = 0$  и  $x = a$  (одномерная задача). Определить уровни энергии частицы, пользуясь постулатом Бора–Зоммерфельда.

2. Пользуясь постулатом Бора–Зоммерфельда, проквантовать движение одномерного гармонического осциллятора.

3. Под действием центральной силы частица массы  $m$  свободно вращается на расстоянии  $r$  от центра (плоский жесткий ротатор). Найти уровни энергии при помощи постулата Бора–Зоммерфельда.

4. Найти уровни энергии электрона, движущегося по эллиптической орбите вблизи ядра с зарядом  $Ze$ , пользуясь постулатом Бора–Зоммерфельда.

5. Частица массы  $m$  вертикально падает на горизонтальную пластину и упруго от нее отражается. Проквантовать движение частицы, используя постулат Бора–Зоммерфельда, определить допустимые высоты  $H_n$  и вычислить уровни энергии.

### Методические рекомендации.

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### Тема 3. Симметрии, инварианты и законы сохранения.

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

Задачи:

1. Написать уравнение Шредингера для частицы, движущейся под влиянием квазиупругой силы  $F = -kx$ .

2. Записать уравнение Шредингера и условия, налагаемые на волновую функцию в одномерной потенциальной яме  $(0, 1)$ :  $U(x) = 0$ ,  $0 < x < 1$ .

3. Написать уравнение Шредингера для электрона, движущегося в кулоновском поле неподвижного ядра с зарядом  $Ze$ .

#### 4. Может ли функция быть волновой функцией во всем пространстве?

##### **Методические рекомендации**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

#### **Тема 4. Базовые (простейшие) задачи квантовой теории**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

Задачи:

1. Найти волновую функцию и разрешенные значения энергии частицы, находящейся в потенциальном ящике, определяемом следующим образом:

2. Рассмотрим прямоугольную потенциальную яму с бесконечно высокими стенками. Волновая функция частицы, находящейся в этой потенциальной яме, записывается в виде (внутри потенциальной ямы), (вне потенциальной ямы). Вычислить коэффициент  $C$ . Какие значения можно получить при измерении полной энергии частицы и какова вероятность появления каждого из этих значений?

3 Частица движется в одномерном потенциальном поле

Предположим, что она обладает энергией  $E > V_0$  и движется слева направо. Определите волновую функцию частицы. Нормировать ее не нужно. Выполните тоже самое для случая  $E < V_0$  и сделайте вывод из полученного результата.

4. Состояние частицы массой  $m$  характеризуется (ненормированной) волновой функцией, где  $r$  – расстояние от начала координат. Чему равна энергия частицы? Является ли эта частица свободной? Если нет, то опишите, по возможности, потенциальное поле, в котором она движется.

##### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой

литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 5. Квантовая механика частиц, обладающих спином**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

Задачи:

1. Найти собственные функции и собственные значения оператора  $d/d\varphi$ .
2. Показать, что функция  $\psi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)$  является собственной функцией оператора  $\hat{F} = \frac{d^2}{dx^2} - x^2$  и найти соответствующее собственное значение.
3. Найти собственные функции и собственные значения оператора  $\frac{d^2}{dx^2} + \frac{2}{x} \frac{d}{dx}$ .
4. Найти собственные функции и собственные значения оператора  $x + \frac{d}{dx}$ .

### **Методические рекомендации**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 6. Приближенные методы в квантовой теории**



**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

Задачи:

1. Вычислить среднее и наиболее вероятное значение расстояния электрона от ядра в атоме водорода в основном состоянии.
2. Вычислить среднее значение квадрата расстояния электрона от ядра в атоме водорода в основном состоянии.
3. Найти среднее и наиболее вероятное расстояния между ядром и электроном в атоме водорода в состоянии  $2p_x$ .
4. Найти среднее значение потенциальной энергии электрона в атоме водорода в состоянии  $2p_x$ . Сравнить это значение с величиной полной энергии электрона.

#### **Методические рекомендации**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 7. Общая теория переходов, спектры многоэлектронных атомов и молекул.**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

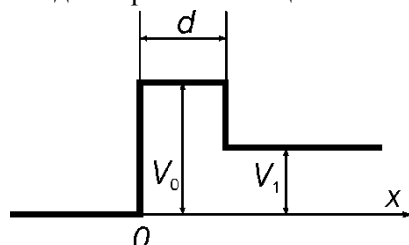
Задачи:

1. Рассмотреть полу-бесконечный кристалл с периодическим потенциалом в области  $x > 0$ , определяемым так же, как в задаче 5; в области  $x < 0$  потенциальная энергия  $V = W_0$ . Ограничиться значениями  $E < W_0$  (поверхностные уровни Тамма).

2 Частица, двигаясь в положительном направлении оси  $Ox$ , встречает потенциальный порог (потенциальная энергия задается следующим образом:  $V = 0$  при  $x < 0$  и  $V = V_0$  при  $x > 0$ ). Определить волновую функцию при  $E > V_0$  и  $E < V_0$ , вычислить плотности тока падающей, отраженной и прошедшей волн и найти коэффициенты прохождения и отражения частиц в обоих случаях.

3 Вычислить коэффициенты отражения и прохождения частиц сквозь прямоугольный потенциальный барьер ширины  $a$  ( $V = V_0$  при  $x=0$ ,  $V = 0$  при  $x=x_1$ ), вычислив их как отношения соответствующих плотностей токов.

4 Одномерный потенциальный барьер имеет следующую форму:



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

#### Методические рекомендации

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

#### Тема 8. Основы теории рассеяния

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение

1. Частица массы  $m$  движется во внешнем силовом поле с потенциальной энергией  $V(\mathbf{r})$ . Получить явный вид операторов скорости и ускорения частицы.

2. Составить операторы  $\frac{d\hat{\mathbf{r}}}{dt}$  и  $\frac{d\hat{\mathbf{p}}}{dt}$ .

3. Доказать квантовую теорему о вириале: если потенциальная энергия имеет вид  $V(r) = V_0 r^N$ , то в произвольном стационарном состоянии для средних значений кинетической и потенциальной энергии выполняется соотношение:  $2\langle T \rangle = N\langle V \rangle$ .

8. Найти уравнения движения, если гамильтониан задается выражением  $\hat{H} = \frac{(\hat{\mathbf{p}} - e\hat{\mathbf{A}})^2}{2M} + e\varphi(\mathbf{r}, t)$ , где  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$ .

#### Методические рекомендации

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

Задачи:

#### Тема 9. Методы вторичного квантования

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

**Задачи:**

1. Невозмущенная система имеет два близких уровня энергии, расстояние между которыми сравнимо с матричными элементами возмущающей энергии между этими состояниями. Найти поправку к энергии в первом приближении.
2. Какова кратность вырождения уровней энергии атома водорода? Сформулируйте правило отбора для главного квантового числа. В чем состоит физический смысл распределения плотности в электронном облаке?

3 На какую величину сдвинется энергетический уровень  $1S$  атома водорода, если представить заряд протона не точечным, а равномерно распределенным по сферической оболочке радиусом  $10^{-13}$  см? Воспользуйтесь первым приближением теории возмущений.

4 Вычислить скорость, которую приобретает атом водорода в результате излучения кванта света при переходе электрона со второго уровня на первый. На сколько благодаря этому уменьшится частота излучаемого кванта?

#### Методические рекомендации

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

#### Тема 10. Основы квантовой теории твердого тела

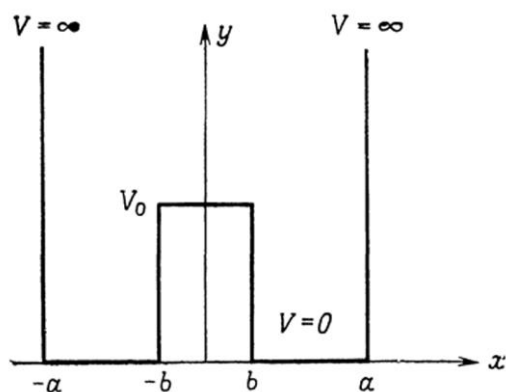
**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение

##### Задачи:

1. Рассмотрите движение частицы в потенциальном поле, показанном на следующем рисунке:



Постройте приближенную картину решений стационарного уравнения Шредингера, соответствующих двум самым низким собственным значениям энергии частицы в данном потенциальном поле. Обозначьте полученные решения через  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , а соответствующие им энергии через  $E_1$  и  $E_2$ . Частное

решение полного уравнения Шредингера для приведенного выше потенциального поля можно представить в виде суперпозиции функций  $\psi_1 \exp\left(-i \frac{E_1}{\hbar} t\right)$  и  $\psi_2 \exp\left(-i \frac{E_2}{\hbar} t\right)$ . Получите волновой

пакет  $\psi$ , который в момент времени  $t = 0$  сосредоточен (почти) полностью в левой потенциальной яме. Опишите подробно дальнейшее движение пакета во времени.

2. Чем отличается решение задачи квантового гармонического осциллятора от решения для классического осциллятора? Записать оператор Гамильтона для квантового гармонического осциллятора. Дать анализ выражения для энергии квантового гармонического осциллятора. Дать объяснение существования энергии нулевых колебаний.

3 Определить приближенно с помощью вариационного метода энергию основного состояния частицы в потенциальном поле  $U(x) = U_0 x^4$  (где  $U_0 = \text{const}$ ). В качестве пробной функции использовать

функцию  $\psi = Ae^{-\frac{x^2}{2\beta^2}}$ .

4 Рассмотреть прямым вариационным методом задачу дейтрона. Взаимодействие между протоном и нейтроном задается, как  $V(r) = -Ae^{-r/a}$ . В качестве приближенной функции взять  $\psi = Be^{-\alpha r/2a}$ .

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 11. Некоторые методы современной квантовой механики**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Задачи:**

1. Определите, какой из полуэмпирических методов наиболее точно оценивает для указанных молекул потенциал ионизации (I), энергию сродства к электрону (A), равновесное межатомное расстояние ( $r_e$ ) и энергию диссоциации ( $D_0$ ). Результаты оформите в виде таблиц:

а)  $H_2$ ; б)  $Li_2$ ; в)  $C_2$ ; г)  $N_2$ ; д)  $O_2$ ; е)  $F_2$ ; ж)  $P_2$ ; з)  $S_2$ ; и)  $Cl_2$

2. Определите, в каком полиене  $C_3H_3$ ,  $C_4H_4$ ,  $C_5H_5$ ,  $C_6H_6$ ,  $C_7H_7$ ,  $C_8H_8$  связь С-С наиболее прочная. Энергию связи С-Н принять равной 100 ккал/моль. Для расчета энергии молекулы используйте полуэмпирический метод AM1. Рассмотрите а) нейтральные молекулы; б) однозарядные катионы; в) однозарядные анионы; г) двухзарядные катионы; д) двухзарядные анионы.
3. Рассчитайте ширину энергетической щели ( $E_{gap}$ ) в полициклических конденсированных ароматических молекулах, которые имеют следующий состав:  $C_6H_6$ ,  $C_{18}H_{12}$ ,  $C_{24}H_{12}$ ,  $C_{42}H_{18}$ ,  $C_{54}H_{18}$ ,  $C_{84}H_{24}$ ,  $C_{96}H_{24}$ . Расчет энергии выполняйте без оптимизации геометрии, используя полуэмпирический метод CNDO (почему?).
4. Постройте потенциальные кривые для триплетного и синглетного состояний двухатомных молекул B<sub>2</sub>, C<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, F<sub>2</sub>. Рекомендуемые значения параметров: диапазон расстояний от 0.9 до 1.9 Å, шаг изменения расстояний - 0.1 Å.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.
2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **КВАНТОВАЯ ФИЗИКА НАНОСТРУКТУР**

**Методические указания для обучающихся по организации и проведению  
самостоятельной работы**

Направление подготовки 28.03.02 Наноинженерия  
Направленность (профиль)  
«Нанотехнологии и наноматериалы»

**Ставрополь  
2026**

## **СОДЕРЖАНИЕ**

|                                                                                                   |   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---|
| Введение                                                                                          | 3 |
| План-график выполнения самостоятельной работы                                                     | 6 |
| Методические рекомендации по изучению теоретического материала, подготовке к практическим работам | 7 |



## Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студента).

Самостоятельная работа студента является важным видом учебной и научной деятельности студента. Федеральным государственным образовательным стандартом предусматривается значительный объем времени из общей трудоемкости дисциплины на самостоятельную работу. В связи с этим, обучение включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому самостоятельная работа должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования – подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности.

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

Самостоятельная работа студента предполагает, прежде всего, его научно-исследовательскую и практическую деятельность, поскольку именно эти виды учебной работы в первую очередь готовят к самостоятельному выполнению профессиональных задач. Конечной целью самостоятельной работы является организация самостоятельной познавательной деятельности, формирование умения самостоятельно анализировать информацию, выделять главное и второстепенное.

Основными формами самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теория и методология социально-экономических исследований в туристской индустрии» являются:

- подготовка к собеседованию;
- подготовка к практическому занятию.

**Собеседование** – обсуждение проблемы, темы по заранее заданной структуре (вопросам) с предварительным углубленной самостоятельной проработкой материала. Семинары помогают овладеть понятийно-терминологическим аппаратом, свободно оперировать им, понимать практическое приложение теории, прививают навыки самостоятельного мышления, устного выступления.

**Проблемные задачи** – частично регламентированное задание, имеющее нестандартное решение и позволяющее диагностировать умения, интегрировать знания различных областей, аргументировать собственную точку зрения.

В результате изучения дисциплины у обучающихся формируются следующие компетенции (в соответствии с образовательным стандартом):

ОПК-3 способностью использовать базовые теоретические знания фундаментальных разделов общей и теоретической физики для решения профессиональных задач

ПК-1 способностью использовать специализированные знания в области физики для освоения профильных физических дисциплин

ПК-3 готовностью применять на практике профессиональные знания теории и методов физических исследований

В результате освоения дисциплины студент должен:

**Знать:**

- основные постулаты квантовой теории;
- способы описания состояний микросистем;

- способы описания физических величин;
- свойства собственных функций операторов физических величин;
- явный вид операторов основных физических величин;
- физическую интерпретацию соотношений неопределенностей и волновых функций;
- основные положения квантовой физики.

**Уметь:**

- применять соотношения неопределенностей для получения оценок при решении задач;
- записывать оператор Гамильтона для любой микросистемы;
- записывать уравнение Шредингера для атомов и молекул;
- применять в простых случаях приближенные методы решения уравнений Шредингера;
- решать одномерные задачи на отыскание собственных функций и собственных значений;
- применять приближенные методы построения уравнений движения сложных атомных и молекулярных систем;
- применять методы нахождения координатных и спиновых волновых функций;
- применять методы построения матричных элементов оператора момента количества движения и его проекций;
- применять неэмпирические и полуэмпирические методы изучения электронного строения атомов и молекул;
- применять методы адиабатического и самосогласованного приближения

**Владеть:**

- основами квантовой теории твердого тела;
- методами современной квантовой теории.

### ПЛАН-ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

| Вид деятельности студентов                                                                                                         | Итоговый продукт самостоятельной работы | Средства и технологии оценки | Время сдачи               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------|---------------------------|
| <b>6 семестр</b>                                                                                                                   |                                         |                              |                           |
| Тема 1. Экспериментальные и теоретические основы квантовой теории.<br>Тема 2. Представление состояний и эволюция квантовых систем. | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 4  |
| Тема 3. Симметрии, инварианты и законы сохранения.<br>Тема 4. Базовые (простейшие) задачи квантовой теории.                        | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 10 |
| Тема 5. Квантовая механика частиц, обладающих спином. изучение темы                                                                | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 16 |
| Подготовка к зачету                                                                                                                | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 18 |
| <b>7 семестр</b>                                                                                                                   |                                         |                              |                           |
| Тема 6. Приближенные методы в квантовой теории<br>Тема 7. Общая теория переходов, спектры многоэлектронных атомов и молекул..      | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 6  |
| Тема 8. Основы теории рассеяния<br>Тема 9. Методы вторичного квантования..                                                         | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 12 |
| Тема 10. Основы квантовой теории твердого тела.<br>Тема 11. Некоторые методы современной квантовой теории.                         | Собеседование                           | Вопросы для собеседования    | Практическое занятие № 18 |
| Подготовка к экзамену                                                                                                              | экзамен                                 | Вопросы к экзамену           |                           |

## МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА, ПОДГОТОВКЕ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ

На первом этапе необходимо ознакомиться с рабочей программой дисциплины, в которой рассмотрено содержание тем дисциплины лекционного курса, взаимосвязь тем лекций с лабораторными занятиями, темы и виды самостоятельной работы. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности.

При подготовке к практическим занятиям необходимо:

- повторить материал соответствующих лекций;
- внимательно изучить описание лабораторного занятия, изложенное в практикуме;
- ответить на вопросы по содержанию лабораторного занятия, задаваемые преподавателем на предварительном опросе перед выполнением заданий.

Все лабораторные занятия предполагают выполнение заданий, решение задач.

В результате выполнения заданий достигаются следующие результаты обучения:

- развитие мышления и творческих способностей студента,
- приобретение и закрепление навыков самостоятельной работы,
- приобретение и закрепление навыков оформления и составления письменных заданий.

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации:

| №<br>п/п | Темы для самостоятельного изучения                                     | Рекомендуемые источники информации<br>(№ источника) |                |              |                  |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|--------------|------------------|
|          |                                                                        | Основная                                            | Дополнительная | Методическая | Интернет-ресурсы |
| 1        | Тема 1. Экспериментальные и теоретические основы квантовой теории.     | 1-4                                                 | 1-5            | 1-3          | 1-3              |
| 2        | Тема 2. Представление состояний и эволюция квантовых систем.           | 1-4                                                 | 1-5            | 1-3          | 1-3              |
| 3        | Тема 3. Симметрии, инварианты и законы сохранения.                     | 1-4                                                 | 1-5            | 1-3          | 1-3              |
| 4        | Тема 4. Базовые (простейшие) задачи квантовой теории.                  | 1-4                                                 | 1-5            | 1-3          | 1-3              |
| 5        | Тема 5. Квантовая механика частиц, обладающих спином.<br>изучение темы | 1-4                                                 | 1-5            | 1-3          | 1-3              |
| 6        | Тема 6. Приближенные методы в квантовой теории.                        | 1-4                                                 | 1-5            | 1-3          | 1-3              |

|    |                                                                            |     |     |     |     |
|----|----------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 7  | Тема 7. Общая теория переходов, спектры многоэлектронных атомов и молекул. | 1-4 | 1-5 | 1-3 | 1-3 |
| 8  | Тема 8. Основы теории рассеяния.                                           | 1-4 | 1-5 | 1-3 | 1-3 |
| 9  | Тема 9. Методы вторичного квантования.                                     | 1-4 | 1-5 | 1-3 | 1-3 |
| 10 | Тема 10. Основы квантовой теории твердого тела.                            | 1-4 | 1-5 | 1-3 | 1-3 |
| 11 | Тема 11. Некоторые методы современной квантовой теории.                    | 1-4 | 1-5 | 1-3 | 1-3 |

### Тематика практических занятий

#### 6 семестр

#### Тема 1. Экспериментальные и теоретические основы квантовой теории

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение

1. Эксперименты, послужившие предпосылкой возникновения квантовой теории.
2. Опыты Резерфорда, планетарная модель атома, теоретические идеи Бора и Эйнштейна.
3. Квантовые системы: состояния и наблюдаемые соотношения неопределенностей.
4. Волновая механика Шрёдингера и матричная механика Гейзенберга

#### Методические рекомендации.

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать

фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

## **6 семестр**

### **Тема 2. Представление состояний и эволюция квантовых систем**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Гильбертово пространство состояний.
2. Физические величины, наблюдаемые, линейные эрмитовы операторы.
3. Принцип соответствия, операторы основных физических величин.
4. Состояния квантовых систем (чистые и смешанные), полный набор наблюдаемых.
5. Изменение состояний со временем: представления Шрёдингера, Гейзенберга, Дирака
6. Уравнение Шрёдингера, стационарные и нестационарные состояния, понятие об интегралах движения.
7. Описание состояний в различных пространствах (координатном, импульсном). "
8. Парадоксы" квантовой теории: Эйнштейна-Подольского-Розена, Белла.
9. Скрытые переменные.
10. Многомировая интерпретация квантовой теории.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 3. Симметрии, инварианты и законы сохранения.**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме

занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Квантово-механическое понятие симметрии
2. Базовые и адиабатические инварианты, законы сохранения и свойства пространства- времени.
3. Основы теории групп, линейные представления групп.
4. Теорема Витнера..
5. Импульс, квазиимпульс, момент количества движения, спин.
6. Сложение моментов.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

#### **Тема 4.Базовые (простейшие) задачи квантовой теории**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Одномерные системы: потенциальная яма, потенциальный барьер, гармонический осциллятор.
2. Задача двух тел, разделение переменных.
3. Водородоподобный атом: уровни энергии и волновые функции

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его

проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 5. Квантовая механика частиц, обладающих спином**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Спин дираковских частиц, частицы и античастицы.
2. Уравнение Дирака для свободной частицы и частицы со спином во внешних полях.
3. Квазирелятивистское приближение и релятивистские поправки.
4. Релятивистское уравнение Клейна-Гордона для частицы с нулевым спином.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 6. Приближенные методы в квантовой теории**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое



использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Фундаментальная природа и общая классификация приближенных методов квантовой теории.
2. Методы качественных оценок.
3. Квазиклассическое приближение, туннельный эффект, движение волновых
4. Вариационные методы квантового моделирования пакетов.
5. Стационарная теория возмущений.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 7. Общая теория переходов, спектры многоэлектронных атомов и молекул.**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Вероятности переходов в квантовых системах.
2. Закон распада состояния системы; форма линии, скорости переходов, время жизни и ширина линии.
3. Излучение и поглощение фотонов.
4. Правила отбора.
5. Принцип Паули.
6. Приближенная теория атома гелия.
7. Обменное взаимодействие.
8. Модели атома: по Хартри-Фоку, Томасу-Ферми, Энглерту-Швингеру.
9. Таблица Менделеева.
10. Тонкая структура атомных уровней, приближение L-S связи.

11. Взаимодействие атомов.
12. Силы Ван-дер-Ваальса.
13. Потенциалы Ленарда-Джонса.
14. Строение молекул.
15. Типы химической связи.
16. Основы теории молекулярных спектров.
17. Эффект Яна-Теллера.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 8. Основы теории рассеяния**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Общие положения, постановка и типы задач в квантовой теории рассеяния, виды рассеяния.
2. Основные характеристики процесса рассеяния: амплитуда, фаза, сечение..
3. Борновское приближение в теории рассеяния.
4. Потенциальное рассеяние.
5. Разложение по парциальным волнам.
6. Низкоэнергетическое рассеяние, длина рассеяния и эффективный радиус действия потенциала.
7. Эффект Рамзауэра.
8. Рассеяние при высоких энергиях.
9. Многоканальное рассеяние.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и

дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 9. Методы вторичного квантования**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

#### **Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Системы с неопределенным числом частиц.
2. Вторичное квантование: операторы рождения, уничтожения, чисел заполнения.
3. Квантование электромагнитного поля
4. Спин и спиральность фотона.
5. Основные идеи квантовой электродинамики.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

### **Тема 10. Основы квантовой теории твердого тела**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

**Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Модели твердого тела.
2. Понятие о квазичастицах: фононы, экситоны.
3. Электрон - фононный гамильтониан.
4. Основное состояние системы притягивающихся фермионов.
5. Сверхпроводимость, модель БКШ.
6. Основное состояние системы притягивающихся бозонов.
7. Сверхтекучесть.
8. Магнитные свойства вещества.
9. Диа-, пара- и ферромагнетизм.
10. Магноны.
11. Взаимодействие частиц с кристаллической решеткой.
12. Полярон.
13. Солитоны в многочастичных системах.

**Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

**Тема 11. Некоторые методы современной квантовой механики**

**Цель занятия.** Глубокое усвоение, конкретизация и закрепление знаний в области квантовой теории, формирование умений и навыков применения их на практике, развитие логического мышления и приобретение навыков самостоятельной работы.

**Организационная форма занятия** – комбинированная, сочетающая лабораторное занятие с элементами семинара. Первоначально, рассматриваются основные теоретические вопросы по теме занятия, после чего организовывается решение типовых задач. При этом предполагается широкое использование интерактивных методов – эвристических бесед, использование задач-вопросов при обсуждении теоретических положений. При решении задач используются как коллективные методы работы с элементами «мозгового штурма», так и самостоятельная работа под контролем преподавателя с последующим комментарием решения.

**Вопросы теоретического материала, выносимые на обсуждение**

1. Теоремы Нётер и вариационный принцип Швингера.

2. Квантовые теории фазовых переходов.
3. Спонтанное нарушение симметрии.
4. Нестационарная теория возмущений.
5. Диаграммы Фейнмана.
6. Топология систем со связями.
7. Описание дефектов в твердых телах.
8. Проблемы связи квантовой и классической механики.
9. Интегралы по траекториям в фазовом пространстве.
10. Квазиклассическая область явлений и квазиклассическое приближение.
11. Квантовые корреляции и информация.

#### **Методические рекомендации.**

При подготовке к занятию необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Перед занятием необходимо ознакомиться с рекомендуемой литературой (основной и дополнительной), найти необходимую информацию в сети Интернет, выявить новые аспекты изучаемой проблемы и уже поставленные и изученные способы ее решения. Помимо рекомендуемой литературы студент сам может дополнительно подобрать и изучить литературу по интересующей его проблеме.

2. Во время работы с выбранными источниками желательно делать записи, которыми можно будет воспользоваться во время дискуссии. Записи (в различной форме, например, конспект, план, аннотация, резюме, тезисы, цитаты) не только способствуют пониманию и усвоению изучаемого материала, но и помогают вырабатывать навыки ясного изложения в письменной форме тех или иных теоретических вопросов. Делая записи, не следует забывать об их оформлении. Необходимо указывать фамилию автора изучаемого материала, полное название работы, место и год ее издания. Целесообразно указывать страницы.

#### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЭКЗАМЕНУ**

Для подготовки к ответам на экзаменационные вопросы обучающиеся должны использовать не только курс лекций и основную литературу, но и дополнительную литературу для выработки умения давать развернутые ответы на поставленные вопросы.

Ответы на теоретические вопросы должны быть даны в соответствии с формулировкой вопроса и содержать не только изученный теоретический материал, но и собственное понимание проблемы.

В ответах желательно привести примеры из практики.

Подготовку к экзамену по дисциплине необходимо начать с проработки основных вопросов, список которых приведен в рабочей программе дисциплины.

Для этого необходимо прочесть и уяснить содержание теоретического материала по учебникам и учебным пособиям по дисциплине. Список основной и дополнительной литературы приведен в рабочей программе дисциплины и может быть дополнен и расширен самими студентами.

Особое внимание при подготовке к экзамену необходимо уделить терминологии, т.к. успешное овладение любой дисциплиной предполагает усвоение основных понятий, их признаков и особенности.

Таким образом, подготовка к экзамену включает в себя:

- проработку основных вопросов курса;
- чтение основной и дополнительной литературы по темам курса;
- подбор примеров из практики, иллюстрирующих теоретический материал курса;
- выполнение промежуточных и итоговых тестов по дисциплине;
- систематизацию и конкретизацию основных понятий дисциплины;
- составление примерного плана ответа на экзаменационные вопросы.

**Вопросы к экзамену**  
**Вопросы к экзамену (7 семестр)**

**Базовый уровень**

1. Экспериментальные предпосылки квантовой механики. Опыты Резерфорда. Модель атома Бора и Эйнштейна.
2. Квантовые системы: состояния и наблюдаемые соотношения неопределенностей.
3. Гильбертово пространство состояний. Физические величины, наблюдаемые, линейные эрмитовы операторы.
4. Принцип соответствия, операторы основных физических величин. Состояния квантовых систем (чистые и смешанные), полный набор наблюдаемых.
5. Изменение состояний со временем: представления Шрёдингера, Гейзенберга, Дирака.
6. Уравнение Шрёдингера, стационарные и нестационарные состояния, понятие об интегралах движения.
7. Описание состояний в различных пространствах (координатном, импульсном).
8. "Парадоксы" квантовой механики: Эйнштейна–Подольского–Розена, Белла.
9. Скрытые переменные. Многомировая интерпретация квантовой механики.
10. Квантово-механическое понятие симметрии.
11. Базовые и адиабатические инварианты, законы сохранения и свойства пространства–времени.
12. Основы теории групп, линейные представления групп. Теорема Витнера.
13. Импульс, квазиимпульс, момент количества движения, спин. Сложение моментов.
14. Одномерные системы: потенциальная яма, потенциальный барьер.
15. Трехмерный гармонический осциллятор.
16. Задача двух тел, разделение переменных.
17. Водородоподобный атом: уровни энергии и волновые функции.
18. Спин дираковских частиц, частицы и античастицы.
19. Уравнение Дирака для свободной частицы.
20. Уравнение Дирака для частицы со спином во внешних полях.
21. Квазирелятивистское приближение и релятивистские поправки.
22. Релятивистское уравнение Клейна–Гордона для частицы с нулевым спином.
23. Фундаментальная природа и общая классификация приближенных методов квантовой теории. Методы качественных оценок.
24. Квазиклассическое приближение, туннельный эффект, движение волновых пакетов.
25. Стационарная теория возмущений.
26. Вариационные методы квантового моделирования.
27. Вероятности переходов в квантовых системах. Закон распада состояния системы.
28. Излучение и поглощение фотонов.
29. Правила отбора. Принцип Паули.
30. Приближенная теория атома гелия. Обменное взаимодействие.

**Повышенный уровень**

1. Модель атома по Хартри–Фоку
2. Таблица Менделеева.
3. Тонкая структура атомных уровней, приближение L–S связи.
4. Взаимодействие атомов. Силы Ван-дер-Ваальса.
5. Строение молекул. Типы химической связи.
6. Основы теории молекулярных спектров. Эффект Яна–Теллера.
7. Общие положения, постановка и типы задач в квантовой теории рассеяния, виды рассеяния. Основные характеристики процесса рассеяния.
8. Борновское приближение в теории рассеяния.

9. Потенциальное рассеяние.
10. Низкоэнергетическое рассеяние, длина рассеяния и эффективный радиус действия потенциала. Эффект Рамзауэра.
11. Рассеяние при высоких энергиях. Многоканальное рассеяние.
12. Системы с неопределенным числом частиц. Вторичное квантование: операторы рождения, уничтожения, чисел заполнения.
13. Квантование электромагнитного поля. Спин и спиральность фотона. Основные идеи квантовой электродинамики.
14. Модели твердого тела. Понятие о квазичастицах: фононы, экситоны.
15. Электрон–фононный гамильтониан. Основное состояние системы притягивающихся фермионов.
16. Сверхпроводимость, модель БКШ.
17. Основное состояние системы притягивающихся бозонов. Сверхтекучесть.
18. Магнитные свойства вещества. Диа-, пара- и ферромагнетизм. Магноны.
19. Взаимодействие частиц с кристаллической решеткой. Полярон.
20. Теоремы Нётер и вариационный принцип Швингера.
21. Квантовые теории фазовых переходов. Спонтанное нарушение симметрии.
22. Нестационарная теория возмущений.
23. Диаграммы Фейнмана.
24. Интегралы по траекториям в фазовом пространстве.
25. Квантовые корреляции и информация.