

# Квантовая механика

**Лекторы:**

Пётр Штернин

**Ассистент:**

Юрий Кривосенко

Валентин Агабабаев

**Язык:**

Русский

**Трудоемкость:**

4 з.е.

**Форма контроля:**

Экзамен

**Образовательная программа:**

Теоретическая и экспериментальная физика

5 семестр

Беспроводные технологии

5 семестр

**Пререквизиты:**

Общая физика: термодинамика и статистическая физика

Общая физика: оптика и квантовая физика

Лекции (ак.час)*	Практические занятия (ак.час)	Лабораторные занятия (ак.час)
50	30	
*1 академический час = 45 минутам		

Квантовая теория является одной из основных физических концепций, составляющих фундамент современной физической картины мира. В осеннем семестре третьего года обучения студентам предлагается базовый вводный курс нерелятивистской квантовой механики. Курс включает обсуждение основных физических идей квантовой механики, формализацию этих идей в уравнениях и методы решения данных уравнений. Построение курса можно условно разделить на три части. В первой части курса основные принципы квантовой механики вводятся в рамках волновой механики (в координатном/импульсном представлениях), что позволяет с начала семестра тренироваться в решении широкого класса задач, направленных на выработку необходимой для студента-физика техники. Абстрактный формализм квантовой механики изучается во второй части курса. Третья часть курса посвящена основным приближенным методам квантовой механики, которые позволяют изучать реальные физические системы. По окончании курса ожидается, что студент будет уверенно оперировать базовыми квантовомеханическими концепциями, языком квантовой механики, основными методами решения квантовомеханических задач.

## Содержание курса

### 5 семестр

#### Квантовая механика

#### Структура курса

Разделы лекций	Темы практик	Лекции (ак. ч.)	Практика (ак. ч.)
<b>1. Введение</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Исторические предпосылки возникновения квантовой теории. Корпускулярно-волновой дуализм.</li> </ul>		3	2
<b>2. Волновая механика. Уравнение Шредингера.</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Волновая функция. Уравнение Шредингера (нестационарное и стационарное). Правило Борна. Закон сохранения вероятности. Движение свободной частицы. Непрерывный спектр. Нормировка волновых функций непрерывного спектра. Плотность состояний. Наблюдаемые. Средние значения. Импульсное представление.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Формула Планка. Эволюция волновых пакетов. Ток вероятности.</li> </ul>	6	2
<b>3. Основные задачи квантовой механики.</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Одномерные задачи: прямоугольная потенциальная яма; прямоугольный потенциальный барьер; линейный гармонический осциллятор. Общие свойства одномерного движения. Движение в периодическом потенциале; теорема Блоха; упрощённая модель Кронига-Пенни (дираковская потенциальная гребенка).</li> <li>○ Движение в центрально-симметричном поле. Разделение переменных; орбитальный угловой момент; общие свойства радиальных функций.</li> <li>○ Атом водорода.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Одномерная яма с бесконечными стенками. Конечная яма. Сингулярные потенциалы. Коэффициенты прохождения через барьеры различной формы. Резонансы. Метод матриц переноса. Движение в однородном электрическом поле. Функция Эйри. Гармонический осциллятор. Полиномы Эрмита. Сферический осциллятор. Движение в однородном магнитном поле. Уровни Ландау. Радиальные функции атома водорода. Полиномы Лагерра. Вычисление матричных элементов.</li> </ul>	8	12
<b>4. Формализм квантовой механики.</b>			

<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Абстрактная формулировка квантовой механики. Конечномерные и бесконечномерные гильбертовы пространства. Матричная формулировка. Обозначения Дирака. Математические трудности квантовой теории. Самосопряжённые оператор. Основы теории представлений. Коммутаторы операторов. Понятие одновременной измеримости физических величин. Соотношения неопределённости.</li> <li>○ Линейный гармонический осциллятор в матричной формулировке. Лестничные операторы.</li> <li>○ Унитарная эволюция в квантовой механике. Картины Шредингера и Гейзенберга. Дифференцирование операторов по времени. Теоремы Эренфеста.</li> <li>○ Законы сохранения и квантовая теорема Нётер. Непрерывные и дискретные симметрии. Чётность.</li> <li>○ Чистые и смешанные состояния. Матрица плотности.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Скалярные произведения. Разложение единицы. Коммутаторы. Операторы рождения и уничтожения. Матричные элементы гармонического осциллятора. Когерентные состояния гармонического осциллятора. Операторные функции и экспоненты. Формула Бейкера-Кэмпбелла-Хаусдорфа. Операторы в картине Гейзенберга. Эволюция операторов</li> </ul>	12	6
<p><b>5. Приближенные методы квантовой механики</b></p>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Теория возмущений (Релея-Шредингера). Вариационный метод. Расчёт основного состояния атома гелия по теории возмущений и вариационным методом. Теория возмущений для вырожденных состояний. Линейный эффект Штарка в атоме водорода. Адиабатическое приближение в теории молекул.</li> <li>○ Теория возмущений, зависящих от времени. Представление взаимодействия. Разложение Дайсона. Внезапные и адиабатические возмущения. Фаза Берри. Периодическое возмущение. Золотое правило Ферми.</li> <li>○ Рассеяние в борновском приближении; формула Резерфорда.</li> <li>○ Квазиклассическое приближение; условие квантования Бора-Зоммерфельда; квазиклассическое туннелирование</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Ангармонический осциллятор. Двухуровневая система. Потенциальная яма в однородном поле. Силы Ван-дер-Ваальса. Второй порядок теории возмущений. Приложения вариационного метода. Осциллятор под действием зависящего от времени возмущения различной формы. Периодические возмущения. Условия квантования в квазиклассическом случае. Туннелирование из потенциальной ямы.</li> </ul>	21	10

## Рекомендуемые ресурсы

1. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — 5-е изд., стер. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, [б. г.]. — Том 3 : Квантовая механика (нерелятивистская теория) — 2001. — 808 с. — ISBN 5-9221-0057-2. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — Режим доступа: <https://e.lanbook.com/book/2380>. — Загл. с экрана.
2. Мессиа, А. Квантовая Механика. Т.1. / А. Мессиа — М.: Наука, 1978.
3. Мессиа, А. Квантовая Механика. Т.2. / А. Мессиа — М.: Наука, 1979.
4. Галицкий, В. М. Задачи по квантовой механике: в 2 ч.: уч. пособие / В. М. Галицкий, Б. М. Карнаков, В. И. Коган. — М.: Едиториал УРСС, 2001.
5. Sakurai, J.J. Modern Quantum Mechanics. Second Edition. / J. J. Sakurai, J. Napolitano, editor. — Boston: Addison-Wesley, 2011. — URL.: <https://www.cambridge.org/ru/academic/subjects/physics/quantum-physics-quantum-information-and-quantum-computation/modern-quantum-mechanics-2nd-edition>
6. Давыдов, А. С. Квантовая механика: учеб. пособие для вузов / А. С. Давыдов. — СПб.: БХВ, 2011
7. Флюгге, З. Задачи по квантовой механике. Т.1 и 2. / З. Флюгге — М.: Наука, 1974.
8. Шифф, Л. Квантовая механика / Л. Шифф — М.: ИИЛ, 1959.
9. Zelevinsky, V. Quantum Physics. Vols. 1 and 2. / V. Zelevinsky — Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
10. Shankar, R. Principles of Quantum Mechanics / R. Shankar — New York: Plenum Press, 1994.

## Политика оценивания

**Оценочные средства дисциплины: домашнее задание, индивидуальное расчетное задание, контрольная работа, экзамен.**

Допуск к промежуточной аттестации происходит с учетом вовремя сданных домашних заданий, выполненных индивидуальных расчетных заданий. На промежуточной аттестации выполняется письменное индивидуальное контрольное задание. Итоговая аттестация - устный экзамен: ответ на билет из двух вопросов, в случае спорных ситуаций выдается задача.

**Домашнее задание:** после каждого занятия, кроме последних двух, студентам необходимо выполнить и сдать домашнее задание в течение двух недель. Задачи домашнего задания как правило соответствуют задачнику Галицкого и др. Задачи решаются самостоятельно, **максимальное количество баллов - 15 (мин. - 10).**

**Индивидуальное расчётное задание:** необходимо выполнить до итоговой аттестации, **максимальное количество баллов - 15 (мин. - 10).**

**Контрольная работа №1:** письменная работа выполняется на промежуточной аттестации, **максимальное количество баллов - 15 (мин. - 10).**

**Контрольная работа №2:** контрольная работа на последней неделе обучения, **максимальное количество баллов - 15 (мин. - 10).**

**Экзамен по билетам:** беседа по содержанию билета, в случае спорных ситуаций выдается задача по характеру близкая к задачам контрольных работ, **максимальное количество баллов - 40 (мин. 20).**

**Максимальное общее количество баллов за семестр - 100, минимальное - 60.**

## Тип самостоятельных заданий

Примерный перечень возможных заданий для заполнения и как они могут быть оценены:

1. Домашнее задание: задачи домашнего задания как правило соответствуют задачнику Галицкого и др. После каждого занятия кроме последних двух студентам необходимо выполнить и сдать домашнее задание в течение двух недель. Решение задач индивидуально.

2. Индивидуальная контрольная работа. Контрольная работа на последней неделе обучения. Пример задания: вычислить вероятность перехода электрона в атоме водорода из основного состояния в состояние  $3p$  ( $m=0$ ) под действием электрического поля, направленного вдоль оси  $z$ .

Это письменная работа. Задачи оцениваются по принципу решено/не решено/решено не точно (15/0/10). Служит составной частью текущего контроля для оценки допуска к сессии.

2. Индивидуальное расчётное задание. Пример задания: определить уровни энергии двухатомной молекулы и вращательные поправки к ним пользуясь потенциалом Морза:

Где  $r$  - расстояние между ядрами. Результат применить к молекуле HCl: Это индивидуальное задание на семестр.

4. Индивидуальная контрольная работа. Работа выполняется на промежуточной аттестации. Пример задания:

1. Вычислить средние значения кинетической и потенциальной энергии электрона в состоянии  $n=3, l=2, m=0$  атома водорода

2. Для трёхмерного гармонического осциллятора.

найдите чему равен оператор скорости.

Это письменная работа. Задачи оцениваются по принципу решено/не решено/решено не точно (7.5/0/5).

Устный экзамен, примерный список экзаменационных билетов:

### Билет I.

1. Волновая функция, уравнение Шредингера, ток вероятности.

2. Эффект Штарка в атоме водорода ( $n=2$ ).

### Билет II.

1. Прямоугольный потенциальный барьер.

2. Теория возмущений, зависящих от времени.

### Билет III.

1. Движение свободной частицы. Плоские волны. Нормировка волновых функций непрерывного спектра.

2. Условие квантования Бора-Зоммерфельда.

### Билет IV.

1. Вычисление энергии основного состояния атома гелия по теории возмущений.

2. Квазиклассическое приближение. Одномерная волновая функция.

### Билет V.

1. Одномерная прямоугольная потенциальная яма.

2. Рассеяние частицы во внешнем поле в борновском приближении. Формула Резерфорда.

### Билет VI.

1. Разделение переменных в центрально-симметричном поле. Оператор орбитального углового момента. Сферические функции.

2. Дифференцирование операторов по времени. Теорема Эренфеста.

**Билет VII.**

1. Адиабатическое приближение в теории молекул.
2. Прохождение сквозь слабо прозрачный потенциальный барьер в квазиклассическом приближении.

**Билет VIII.**

1. Движение частицы в поле "дираковской гребёнки" (модель Кронига-Пенни). Схемы приведённых и расширенных зон Бриллюэна.
2. Стационарная теория возмущений для вырожденных уровней.

**Билет IX.**

1. Движение частицы в периодическом потенциале. Теорема Блоха.
2. Матрица плотности.

**Билет X.**

1. Абстрактная формулировка квантовой механики. Обозначения Дирака. Матрицы операторов.
2. Переходы под влиянием гармонического возмущения. Золотое правило Ферми.

**Билет XI.**

1. Линейный гармонический осциллятор в матричной формулировке.
2. Общий формализм стационарной теории возмущений

**Билет XII.**

1. Эрмитовское сопряжение операторов. Самосопряженные операторы. Представления.
2. Линейный гармонический осциллятор. Полиномы Эрмита.

**Билет XIII.**

1. Свободное движение в центрально-симметричном поле. Исследование радиального уравнения.
2. Законы сохранения в квантовой механике и их связь с симметрией. Чётность.

**Билет XIV.**

1. Общие свойства одномерного движения. Осцилляторная теорема.
2. Атом водорода. Полиномы Лагерра и вырожденная гипергеометрическая функция

**Билет XV.**

1. Стационарное уравнение Шредингера. Теорема об энергетическом спектре.
2. Связь между квазиклассическими волновыми функциями в классически разрешённой и запрещённой областях.

**Билет XVI.**

1. Унитарная эволюция в квантовой механике. Представления Шредингера и Гейзенберга.
2. Вариационный метод. Вычисление энергии основного состояния атома гелия вариационным методом.

**Билет XVII.**

1. Наблюдаемые в волновой механике. Средние значения физических величин. Импульсное представление.
2. Стационарная теория возмущений для невырожденных уровней.

**Билет XVIII.**

1. Коммутаторы операторов, одновременная измеримость физических величин. Соотношения неопределённостей.
2. Внезапные и адиабатические возмущения. Фаза Берри.

**Беседа по содержанию билета. В случае спорных ситуаций выдаётся задача по характеру близкая к задачам контрольных работ.**