

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»  
(Новосибирский государственный университет, НГУ)

**Физический факультет  
Кафедра теоретической физики**



**Рабочая программа дисциплины  
КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ 1**

направление подготовки: **03.03.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения: **Очная**

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	144	48	48	16	8	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 118 часов										
Компетенции: ОПК-1										

Ответственный за образовательную программу,  
д.ф.-м.н., проф.

С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

## Содержание

<b>Аннотация</b> .....	3
1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы .....	6
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	6
4. Структура и содержание дисциплины .....	8
5. Перечень учебной литературы. ....	11
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся. ....	12
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	12
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	13
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	13
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине. ....	13

## Аннотация

### к рабочей программе дисциплины курса «Квантовая теория 1»

Направление: **03.03.02 Физика**

Направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Программа курса «**Квантовая теория 1**» составлена в соответствии с требованиями СУОС к уровню бакалавриата по направлению подготовки **03.03.02 Физика, направленность «Общая и фундаментальная физика»**, а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ. Дисциплина реализуется на физическом факультете Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (НГУ) кафедрой теоретической физики. Курс реализуется кафедрой теоретической физики, входит в набор вариативных дисциплин и является дисциплиной по выбору.

Целью курса является обучение студентов-физиков основам квантовой теории, применяемым преимущественно в квантовой механике и в квантовой физике в целом. Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей общепрофессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1.</b> Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественно-научных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p><b>Знать:</b> основные положения и понятия квантовой механики, свойства коммутирующих операторов, решения уравнения Шрёдингера квантового гармонического осциллятора, атома водорода и других простейших квантовых систем; сферические функции, спиновый формализм для спина 1/2. Иметь понятие о гайзенберговском представлении, когерентных состояниях.</p> <p><b>Уметь:</b> составлять и решать уравнение Шрёдингера для простых квантовых систем; решать нестационарное уравнение Шрёдингера, пользуясь разложением по стационарным состояниям; решать простейшие одномерные задачи рассеяния; применять формализм сложения моментов.</p> <p><b>Владеть:</b> операторным формализмом, техникой расчета простейших квантовомеханических задач, математическими приемами при решении уравнения Шрёдингера.</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине

Курс читается в 5-ом семестре. Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, контрольные работы, семестровые домашние задания и индивидуальный прием этих заданий, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из семестрового задания, контрольная работа.

Промежуточная аттестация: экзамен (в зимнюю сессию) в форме письменной работы и устного собеседования.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачетные единицы.

**1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.**

Целью курса «Квантовая теория 1» является обучение студентов-физиков основам квантовомеханического подхода к решению задач, применяемым в квантовой физике и в физике элементарных частиц. В курсе излагается материал, знание которого необходимо как для выполнения теоретических работ, так и прикладных вычислений в фундаментальной физике. В процессе освоения дисциплины студенты знакомятся с операторным представлением физических величин, уравнением Шрёдингера, волновыми функциями состояний частицы, понятием спина и т.д.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей общепрофессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ОПК-1.</b> Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p><b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p><b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p><b>Знать:</b> основные положения и понятия квантовой механики, свойства коммутирующих операторов, решения уравнения Шрёдингера квантового гармонического осциллятора, атома водорода и других простейших квантовых систем; сферические функции, спиновый формализм для спина 1/2. Иметь понятие о гайзенберговском представлении, когерентных состояниях.</p> <p><b>Уметь:</b> составлять и решать уравнение Шрёдингера для простых квантовых систем; решать нестационарное уравнение Шрёдингера, пользуясь разложением по стационарным состояниям; решать простейшие одномерные задачи рассеяния; применять формализм сложения моментов.</p> <p><b>Владеть:</b> операторным формализмом, техникой расчета простейших квантовомеханических задач, математическими приемами при решении уравнения Шрёдингера.</p>

## 2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс квантовой теории занимает центральное место в процессе обучения студентов на третьем курсе физического факультета Новосибирского государственного университета по направлению «03.03.02 Физика».

Дисциплина «Квантовая теория 1» изучается в осеннем семестре студентами третьего курса бакалавриата физического факультета, обучающимися по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Курс реализуется кафедрой теоретической физики, входит в набор вариативных дисциплин и является дисциплиной по выбору.

Для восприятия дисциплины «Квантовая теория 1» требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, аналитическая механика, функциональный анализ, линейная алгебра и математический анализ.

## 3. Трудоемкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	144	48	48	16	8	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 118 часов										
Компетенции: ОПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, практические занятия, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью семестровых заданий, экзамен, проходящий в форме письменной контрольной и собеседования.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: домашние задания, контрольные работы, семестровые задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен.

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет **144** академических часа / **4** зачетные единицы:

- занятия лекционного типа – 48 часов;
- практические занятия – 48 часов;
- прием заданий – 16 часов;
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 8 часов (включает подготовку к практическим занятиям, выполнение текущих и семестровых домашних заданий);
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, экзаменационная консультация и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 118 часов.

#### 4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Квантовая теория 1» представляет собой полугодовой курс, читаемый на 3-м курсе физического факультета НГУ в 5 семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачётные единицы, 144 академических часа.

№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
1	Квантовая природа света, волновые свойства материи, опыт Резерфорда, дифракция электронов, вероятностная интерпретация, фазовая и групповая скорость. Соотношение неопределенности. Оценки.	1	10	4	4	1	1			
2	Уравнение Шрёдингера. Уравнение непрерывности, плотность вероятности и ток, нормировка волновой функции. Квантование энергии. Дискретный и непрерывный спектр.	1-2	10	4	4	1	1			
3	Свойства волновой функции финитного движения. Чётные и нечётные решения. Осцилляторная теорема. Прямоугольная яма, гармонический осциллятор.	3-4	10	4	4	2				
4	Одномерное рассеяние. Подбарьерное прохождение и надбарьерное отражение. Квазистационарные состояния. Периодический потенциал. Оператор сдвига. Теорема Блоха.	5-6	10	4	4	1	1			
5	Координатное и импульсное представления. Операторы физических величин, собственные функции и собственные значения. Эрмитовы операторы, вещественность собственных значений. Дираковские обозначения. Коммутаторы. Измеримость величин. Теорема вириала.	7-8	10	4	4	2				
6	Гайзенберговское представление. Линейный осциллятор в операторном формализме, когерентные состояния.	9-10	10	4	4	2				
7	Уравнение Шрёдингера в электромагнитном поле. Калибровочная инвариантность. Плотность тока. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле, уровни Ландау.	11-12	10	4	4	1	1			
8	Орбитальный момент. Собственные значения и собственные функции. Повышающие и понижающие операторы. Четность.	13-14	10	4	4	2				
9	Спин. Волновые функции частиц спина 1/2. Матрицы Паули, уравнение Паули в электромагнитном поле. Ток для уравнения Паули. Движение спина 1/2 в магнитном поле.	14-15	10	4	4	1	1			



№ п/п	Раздел дисциплины, основное содержание лекций	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)						Консультации (в часах)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы			Сам. работа во время занятий	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Прием заданий				
10	Сложение моментов. Коэффициенты Клебша - Гордана. Общий вид преобразований волновых функций и операторов при поворотах. Правила отбора для тензорных операторов. Векторная модель.	15-16	14	6	6	1	1			
11	Разделение переменных в центрально-симметричном поле. Оператор радиального импульса. Радиальная волновая функция. Сгущение уровней. Падение на центр. Атом водорода. Собственные функции. Спектр. Кулоновское вырождение.	16-17	16	6	6	2	2			
12	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18				18			
13	Консультации		4					4		
14	Экзамен		2						2	
	<b>Всего</b>		<b>144</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>16</b>	<b>8</b>	<b>18</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

### Программа и основное содержание лекций (48 часов)

1. Квантовая природа света. Фотоэффект, эффект Комптона. Волновые свойства материи. Опыт Резерфорда, стабильность атомов. Дифракция электронов. Волна де Бройля. Вероятностная интерпретация. Фазовая и групповая скорость. Соотношение неопределённости. Оценки. **(4 часа)**

2. Уравнение Шрёдингера. Уравнение непрерывности, плотность вероятности и ток, нормировка волновой функции. Непрерывность и однозначность волновой функции. Стационарные решения. Квантование энергии. Дискретный и непрерывный спектр. Ортогональность и полнота собственных функций. Задача с начальными условиями. **(6 часов)**

3. Свойства волновой функции финитного движения. Чётные и нечётные решения. Осцилляторная теорема. Прямоугольная яма, гармонический осциллятор. **(4 часа)**

4. Одномерное рассеяние. Подбарьерное прохождение и надбарьерное отражение. Квазистационарные состояния. Периодический потенциал. Оператор сдвига. Теорема Блоха. **(4 часа)**

5. Координатное и импульсное представления. Операторы физических величин, собственные функции и собственные значения. Эрмитовы операторы, вещественность собственных значений. Дираковские обозначения. Коммутаторы. Измеримость величин. Вывод соотношения неопределённости. Теорема вириала. **(4 часа)**

6. Гайзенберговское представление. Линейный осциллятор в операторном формализме, когерентные состояния. **(4 часа)**

7. Уравнение Шрёдингера в электромагнитном поле. Калибровочная инвариантность. Плотность тока. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле, уровни Ландау. **(4 часа)**

8. Орбитальный момент. Собственные значения и собственные функции. Повышающие и понижающие операторы. Четность. **(4 часа)**

9. Спин. Волновые функции частиц спина  $1/2$ . Матрицы Паули, уравнение Паули в электромагнитном поле. Ток для уравнения Паули. Движение спина  $1/2$  в магнитном поле. (4 часа)

10. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша-Гордана. Общий вид преобразований волновых функций и операторов при поворотах. Правила отбора для тензорных операторов. Векторная модель. (4 часа)

11. Разделение переменных в центрально-симметричном поле. Оператор радиального импульса. Радиальная волновая функция. Сгущение уровней. Падение на центр. Атом водорода. Собственные функции. Спектр. Кулоновское вырождение. (6 часов)

### Программа практических занятий (48 часов)

Номера задач и параграфов соответствуют обозначениям следующего списка литературы:

[1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М., *Квантовая механика*, М.: Наука, 1989.

[2] Флюгге З., *Задачи по квантовой механике т.1,2*, Москва: Мир, 1974.

[3] Сербо В.Г., Хриплович И.Б., *Квантовая механика*, Новосибирск.: Редакционно-издательский центр НГУ, 2005.

[4] Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. *Задачи по квантовой механике*, М.: Наука, 1992.

[5] Гольдман И.И., Кривченков В.Д., *Сборник задач по квантовой механике*, М.: ГИТТЛ, 1957.

#### **Занятие 1: Математические основы квантовой механики (2 часа)**

[3]: 3.2, 3.4, 6.1, 6.3; [4]: 1.2-1.5, 1.9, 1.10, 1.52;

#### **Занятие 2: (2 часа)**

[2]: 1, 6, 8, 9; [4]: 1.7, 1.18, 1.30, 1.32, 1.40, 1.57; [5]: 3.1;

#### **Занятие 3: Одномерное движение (2 часа)**

[1]: 22.1; [2] 16, 17; [3] 3.6, 5.1; [4]: 2.1, 2.3, 2.5, 2.7;

#### **Занятие 4: Мелкая яма. Точные решения в одномерных потенциалах (2 часа)**

[3]: 4.1; [4]: 2.7, 2.9, 2.13, 2.14; [5]: 2.2, 2.3;

#### **Занятие 5: Свойства уравнения Шрёдингера (2 часа)**

[2]: 3, 38; [4]: 2.16, 2.17; [5]: 1.2, 1.5;

#### **Занятие 6: (2 часа)**

[1]: 23.4, 23.5; [2]: 26, 40; [4]: 2.22, 2.23, 2.29;

#### **Занятие 7: Прохождение через потенциальный барьер в одномерном случае (2 часа)**

[1]: 25.1, 25.2, 25.3; [2]: 19, 20, 22; [3] 9.2, 9.3; [4]: 2.32, 2.35, 2.38;

#### **Занятие 8: (2 часа)**

[2]: 2, 14, 23, 37; [3] 9.4, 9.5; [5]: 1.2, 1.5, 3.12;

#### **Занятие 9: Осциллятор (2 часа)**

[1]: 23.1, 23.2, 23.3; [2]: 30, 31, 32, 33;

#### **Занятие 10: Системы с несколькими степенями свободы (2 часа)**

[2]: 35, 42; [3] 7.1; [4]: 2.48, 2.50; [5]: 1.2, 1.5;

#### **Занятие 11: Периодический потенциал (2 часа)**

[2]: 28, 29; [3]: 7.2, 7.3, 11.2; [4]: 2.53, 2.54; [5]: 1.16;

#### **Занятие 12: (2 часа)**

[3]: 7.4; [5]: 1.6, 1.10, 1.11, 1.14, 2.8, 3.12, 3.14;

#### **Занятие 13: Гайзенберговское представление (2 часа)**

[2]: 10, 12; [4]: 6.1, 6.2, 6.19, 6.21, 6.22;

#### **Занятие 14: Унитарные преобразования. Представление взаимодействия (2 часа)**

[4]: 6.20, 6.25, 6.27, 6.30;

#### **Занятие 15: Движение в магнитном поле (2 часа)**

[2]: 125, 126, 127; [4]: 7.1, 7.3, 7.5, 7.7, 7.10;

**Занятие 16: (2 часа)**

[4]: 6.13, 6.6, 7.15, 7.22; [5] 3.6, 6.2.6.6, 6.9;

**Занятие 17: Момент импульса (2 часа)**

[1] 30.1; [2]: 4, 48, 49; [3] 14.2, 14.3;

**Занятие 18: (2 часа)**

[4]: 3.1, 3.2, 3.5, 3.8; [5] 4.2, 4.3, 4.7;

**Занятие 19: Спин (2 часа)**

[2]: 52, 129, 131; [4]: 5.2, 5.4, 5.9, 5.12; [5] 6.15;

**Занятие 20: (2 часа)**

[2]: 54, 56, 58; [4]: 5.16; [5] 4.10, 4.15, 4.18;

**Занятие 21: Сложение моментов (2 часа)**

[2]: 133; [4]: 3.27, 3.29, 3.32;

**Занятие 22: (2 часа)**

[4]: 3.36, 3.40, 3.42, 5.17; [5] 4.20, 4.25, 4.28, 4.29, 4.35;

**Занятие 23: Движение в центральном поле (2 часа)**

[1] 33.1, 33.2; [2]: 64; [4]: 4.6, 4.10, 4.15, 4.19, 4.21; [5]: 5.5;

**Занятие 24: (2 часа)**

[2]: 62, 63; [4]: 4.23; [5]: 5.6, 5.8, 5.10, 5.12, 5.14;

[2]: 44, 68, 75; [3]: 16.2, 16.4, 16.7, 16.8; [4]: 4.25; [5]: 7.3, 7.8, 7.34.

**Самостоятельная работа студентов (26 часов)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям, выполнение текущих и семестровых домашних заданий	8
Подготовка к экзамену	18

**5. Перечень учебной литературы.**

Вся перечисленная ниже литература доступна либо в бумажном виде в библиотеке НГУ, либо в электронном виде в сети Интернет (см., например, ресурс bookZZ), либо на сайте кафедры теоретической физики ФФ НГУ (<http://wwwold.inp.nsk.su/students/theor/index.ru.html>).

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. — Изд. 4-е, испр. — Москва: Наука, 1989. — 767 с.: ил. — (Теоретическая физика, т. III).
2. Зелевинский В.Г. Лекции по квантовой механике. — 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. — 498 с.: ил.
3. Сербо В.Г., Хриплович И.Б. Квантовая механика: учебное пособие. — 2-е изд., испр. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2010. — 273 с.: ил.
4. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука 1992. — 879 с.: ил.
5. Борн М. Атомная физика. — 3-е изд. — М.: Мир, 1970. — 484 с.
6. Бете Г.А. Квантовая механика. — М.: Мир, 1965. — 333 с.
7. Гольдман И.И., Кривченков В.Д. Сборник задач по квантовой механике. — М.: УНЦ ДО, 2001. — 275 с.: ил. — Репринт. воспроизведение изд. 1957 г.
8. Фейнман Р.Ф., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. — М.: Мир, 1968. — 382 с.

9. Флюгге З. Задачи по квантовой механике [в 2 томах]. — М.: Мир, 1974.
10. Мессиа А. Квантовая механика, том 1. — Москва: Наука, 1978. — 478 с.: ил.
11. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М. Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике. — Изд. 2-е, испр. и доп. — Москва: Наука, 1971. — 544 с.

## **6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.**

### **6.1. Видеолекции по курсу квантовой теории:**

1. Лекции проф. В.Ф. Дмитриева, НГУ, 2012 г.:  
<https://www.youtube.com/playlist?list=PLE61A955CA34AD967>
2. Лекции ак. Герштейна С.С., лекторий МФТИ, 2013 г.:  
<https://lectoriy.mipt.ru/course/TheoreticalPhysics-QuantumMechanics-13L>
3. Lectures by Dr. Barton Zwiebach, Quantum Physics 1, MIT, 2016:  
<https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-04-quantum-physics-i-spring-2016/>

### **6.2. Дополнительное информационное обеспечение:**

1. Доступ к информационным ресурсам, выложенным на сайте  
<http://www.inp.nsk.su/students/theor/>  
(в частности, пример программы в системе Mathematica для численного решения уравнения Шрёдингера:  
[http://wwold.inp.nsk.su/students/theor/postgraduate\\_courses-3/Lee-0.nb](http://wwold.inp.nsk.su/students/theor/postgraduate_courses-3/Lee-0.nb))
2. Программа bound-states\_en визуализации решений уравнения Шрёдингера:  
<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/bound-states>
3. Программа quantx численного решения уравнения Шрёдингера:  
<http://sourceforge.net/projects/quantx>  
Описание работы программы quantx дано в пособии:  
Коткин Г.Л., Ткаченко В.А., Ткаченко О.А. Компьютерный практикум по квантовой механике. Новосибирск, НГУ, 1996.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- сайт кафедры теоретической физики (<http://wwold.inp.nsk.su/students/theor/index.ru.html>);
- система Mathematica (в бесплатном online-варианте <https://www.wolframalpha.com/>).

### **7.1. Современные профессиональные базы данных**

Не используются.

## **7.2. Информационные справочные системы**

Не используются.

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows и MS Office.

В качестве рекомендуемой среды для самостоятельной работы (в т.ч. проверки семестровых домашних заданий) студентом предлагается освоить на базовом уровне систему Mathematica (в бесплатном online-варианте <https://www.wolframalpha.com/>).

## **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины «Квантовая теория 1» используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Реализация дисциплины (или ее части) в случае необходимости может осуществляться с применением электронного обучения (на платформе Google Meet, Zoom или аналогах), где обучение проводится на виртуальных аналогах, позволяющим достигать запланированных результатов по дисциплине.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1. Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем проверки домашних заданий, семестровых заданий, а также регулярных опросов в ходе практических занятий.

**Текущий контроль успеваемости** студента предусматривает несколько видов контроля, результаты которых в дальнейшем учитываются также при промежуточной аттестации:

- сдача домашних заданий по материалам практических занятий.

- сдача 12 задач семестрового домашнего задания, оформленных в соответствии с требованиями и в установленные преподавателем сроки (со 2 по 17 недели семестра); качество решения и выполнение требований по срокам сдачи задач учитываются при промежуточной аттестации. Срок сдачи заданий для студента может быть скорректирован по согласованию с преподавателем при наличии уважительной причины (болезнь и т.п.).

### ***Промежуточная аттестация.***

Для контроля усвоения дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен в конце семестра. Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

Освоение компетенции оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ОПК-1 сформирована не ниже порогового уровня.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию в форме контрольной работы и собеседования по результатам контрольной работы. Вывод об уровне сформированности компетенции ОПК-1 принимается лектором курса при учете мнения преподавателя практических занятий.

Положительная оценка ставится, когда по результатам итоговой контрольной и собеседования студент продемонстрировал, что компетенция ОПК-3 освоена не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации. Оценка «отлично» может быть поставлена только при выполнении студентом семестрового домашнего задания в полном объеме.

Пересдача экзамена осуществляется по билетам в устной форме. Вторая пересдача принимается комиссией из трех человек. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда компетенция ОПК-1 освоена не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

## **Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

Таблица 10.1

<b>Индикатор</b>	<b>Результат обучения по дисциплине</b>	<b>Оценочные средства</b>
<b>ОПК-1.1.</b> Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.	<b>Знать:</b> основные положения и понятия квантовой механики, свойства коммутирующих операторов, решения уравнения Шрёдингера квантового гармонического осциллятора, атома водорода и других простейших квантовых систем; сферические функции, спиновый формализм для спина 1/2. Иметь понятие о гайзенберговском представлении, когерентных состояниях.	Выполнение семестровых задач. Экзамен.
<b>ОПК -1.2.</b> Использует теоретические основы базовых разделов матема-	<b>Уметь:</b> составлять и решать уравнение Шрёдингера для простых квантовых систем; решать нестационарное уравнение Шрёдингера, пользуясь разложением по	Выполнение семестровых задач. Экзамен.

<p>тических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>стационарным состояниям; решать простейшие одномерные задачи рассеяния; применять формализм сложения моментов. <b>Владеть:</b> операторным формализмом, техникой расчета простейших квантовомеханических задач, математическими приемами при решении уравнения Шрёдингера.</p>	
--	---	--

## 10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Квантовая теория 1».

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (2 балла)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ОПК-1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Минимально допустимый уровень знаний. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.
Наличие умений	ОПК-1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ОПК-1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

### 10.3. Семестровое домашнее задание

#### Задание 1

1. Маятник, состоящий из частицы с массой  $m$ , прикрепленной к концу упругого невесомого стержня с длиной  $l$ , находится в основном состоянии в гравитационном поле. Оценить с помощью соотношения неопределенности неопределенность угла отклонения маятника от вертикали.
2. Доказать, что для потенциала, удовлетворяющего условиям  $U(-x)=U(x)$  и  $U(x) \rightarrow 0$  при  $x \rightarrow \pm \infty$ , выполняется соотношение  $A^*B+AB^* = 0$  между амплитудой прошедшей волны  $B$  и амплитудой отраженной волны  $A$ . Доказать, что для несимметричного потенциала,  $U(-x) \neq U(x)$ , коэффициент прохождения не зависит от направления падающей волны.
3. В узком цилиндре длины  $l$ , закрытом с обоих концов, находятся две частицы с массами  $m_1$  и  $m_2$ . Частицы разделены поршнем массы  $M \gg m_1, m_2$ . Поршень может двигаться без трения. Используя адиабатическое приближение (вспомните аналитическую механику), найти энергию основного и первого возбужденного состояния системы.
4. Найти энергии и ширины квазистационарных состояний частицы массы  $m$  в потенциале  $U(x)=g_1\delta(x-a)+g_2\delta(x+a)$  при условии  $mg_{1,2}a/\hbar^2 \gg 1$ . Найти отношение вероятностей вылететь частице налево и направо.
5. При  $t=0$  состояние линейного осциллятора с частотой  $\omega$  задано волновой функцией  $\psi(x, 0) = A e^{i q x} / (x^2 + a^2)$ . Определить средние значения координаты и импульса при  $t > 0$ . Воспользоваться гайзенберговским представлением.
6. Заряженная частица находится в постоянном однородном магнитном поле  $\mathcal{H}$ , направленном по оси  $z$ . Найти коммутационные соотношения для компонент скорости. Показать, что операторы  $x_0=x+v_y/\omega$  и  $y_0=y-v_x/\omega$  коммутируют с гамильтонианом,  $\omega = e \mathcal{H}/(mc)$ . Найти коммутатор  $x_0$  и  $y_0$ .

#### Задание 2

7. Частица имеет угловой момент  $L=1$  и проекцию  $m$  на ось  $z$ . Найти вероятности иметь проекции момента  $\pm 1$  и  $0$  на ось  $\vec{\lambda}$ , направленную под углом  $\theta$  к оси  $z$ . Указание: рассмотреть средние значения операторов  $\vec{\lambda}$  и  $(\vec{\lambda}\vec{l})^2$ .
8. Для двух частиц со спином  $1/2$  найти среднее значение оператора  $(\mathbf{s}_1\mathbf{a})(\mathbf{s}_2\mathbf{b})$  по состоянию  $\chi_{00}$  с полным спином  $S=0$  (здесь  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  – постоянные векторы).
9. Гамильтониан взаимодействия двух частиц со спином  $1/2$  имеет вид  $H=g\mathbf{S}_1\mathbf{S}_2$ , где  $g$  – константа. В момент времени  $t=0$  первая частица поляризована вдоль оси  $z$ , а вторая – вдоль оси  $x$ . Найти среднее значение спина  $\mathbf{S}_1$  первой частицы в ненулевой момент времени.
10. Волновая функция трехмерного ротатора ( $H=\vec{l}^2/(2I)$ ) в момент времени  $t=0$  равна  $\psi(\theta, \phi, t=0) = A (\sin \theta \cos \phi)^2$ . Найти  $\psi(\theta, \phi, t > 0)$ .
11. Взаимодействие протона и нейтрона, приводящее к образованию дейтона с энергией связи  $2.2$  МэВ, моделируется прямоугольной ямой с шириной  $1.2$  ферми. Определить глубину ямы.
12. Найти распределение плотности электрического заряда относительно центра инерции в атоме, состоящем из частицы  $\pi^+$  с массой  $140$  МэВ/ $c^2$  и частицы  $\mu^-$  с массой  $106$  МэВ/ $c^2$ . Частицы взаимодействуют по закону Кулона,  $U(r)=-e^2/r$ . Атом находится в основном состоянии.

#### Примеры экзаменационных билетов

1. Оператор импульса, собственные функции. Волновая функция в импульсном и координатном представлении.
2. Электрон находится в атоме водорода в состоянии  $2p$  с магнитным квантовым числом  $m=1$ . Вычислить магнитное поле, создаваемое электроном в начале координат.



1. Волна де Бройля. Фазовая и групповая скорость. Расплывание пакета.
  2. С помощью соотношения неопределенности оценить энергию основного состояния частицы в потенциале  $U(x)=a x^4$ .
1. Вывод соотношения неопределенности для операторов  $x$  и  $p$ .
  2. Определить зависимость энергии конечного фотона от угла рассеяния на покоящемся электроне.
1. Спектр и волновые функции гармонического осциллятора.
  2. Для каких значений  $g$  существует состояние дискретного спектра в потенциале  $U(r)=-g \delta(r-a)$ ?
1. Стационарное уравнение Шрёдингера. Свойства волновой функции финитного движения.
  2. Определить среднее значение оператора  $x$   $p$  для линейного осциллятора в  $n$ -м состоянии.
1. Одномерное движение. Общие свойства стационарных решений уравнения Шрёдингера.
  2. Найти энергию основного состояния и среднее значение радиуса в потенциале  $U(r)=-\alpha/r+\beta/r^2$ ,  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$ .
1. Эрмитовы операторы. Вещественность собственных значений, ортогональность и полнота собственных функций.
  2. Оценить время расплывания волнового пакета с характерным размером  $a$ , движущегося со скоростью  $v$ . Масса частицы  $m$ , потенциал равен нулю.
1. Квазистационарные состояния. Время жизни.
  2. Гамильтониан плоского ротатора  $H = \hbar^2 l_z^2 / (2I)$ . Найти  $\psi(\varphi, t)$ , если  $\psi(\varphi, 0) = \sin\varphi \cos^2\varphi$ .
1. Временное уравнение Шрёдингера. Задача с начальными условиями.
  2. Найти матричный элемент операторов  $l_z$  и  $l^2$  для линейного изотропного трехмерного осциллятора, находящегося в состоянии  $n_x=1, n_y=n_z=0$ .
1. Уравнение Шрёдингера в электромагнитном поле. Калибровочная инвариантность.
  2. Найти энергии и ширины квазистационарных состояний с  $l=0$  в потенциале  $U(r)=U_0 \theta(a-r)$ , где  $U_0 \gg \hbar^2 / (m a^2)$ .
1. Спин. Волновые функции частиц спина  $1/2$ . Матрицы Паули.
  2. Найти соотношение неопределенности для  $\Delta x$  и  $\Delta K$ , где  $K=p^2/(2m)$ .
1. Движение в периодическом потенциале. Теорема Блоха.
  2. При каких  $m$  и  $m'$  отличен от нуля матричный элемент  $\langle m | x y z | m' \rangle$ ?
1. Уравнение Паули в электромагнитном поле. Ток для уравнения Паули.
  2. Пусть  $A$  – эрмитов оператор. Показать, что  $\langle \psi | A^2 | \psi \rangle$  больше или равно нулю.
1. Движение спина  $1/2$  в магнитном поле.
  2. Найти среднее значение оператора квадрупольного момента  $Q_{ij}=3r_i r_j - r^2 \delta_{ij}$  в основном состоянии трехмерного гармонического осциллятора, помещенного в однородное поле  $U(\mathbf{r})=-\mathbf{F} \cdot \mathbf{r}$ .
1. Коммутативность операторов и одновременная измеримость.
  2. Частица находится в поле  $U(x)=-G \delta(x)$ . При  $t=0$   $\psi(x,0)=e^{-|x|/b}/\sqrt{b}$ . Найти вероятность того, что при  $t \rightarrow \infty$  частица окажется в основном состоянии.
1. Орбитальный момент. Собственные функции и собственные значения.

2. Найти, при каком значении параметра  $a$  исчезает нечетное связанное состояние в потенциале  $U(x) = -G \delta(x+a) - G \delta(x-a)$ .

1. Матричные элементы повышающего и понижающего операторов углового момента.

2. Две частицы со спинами  $s_{1,2} = 1/2$  находятся в состоянии с суммарным спином  $S=1$  и суммарной проекцией  $S_z=0$ . Найти среднее значение оператора  $(s_1 a) (s_2 b)$ , где  $a$  и  $b$  – постоянные векторы.

1. Задача двух тел в квантовой механике. Отделение движения центра инерции.

2. Оценить, используя соотношение неопределенности, отношение энергии связанного состояния к глубине ямы в одномерной мелкой яме с характерной шириной  $a$  и характерной глубиной  $U_0$ .

1. Общие свойства решений стационарного уравнения Шрёдингера при движении в центральном поле.

2. Показать, используя соотношение неопределенности, что в мелкой трехмерной яме нет связанных состояний.

1. Гайзенберговское представление.

2. Электрон в атоме водорода находится в состоянии  $2p_{3/2}$  с  $J_z=1/2$ . Найти среднее значение  $l_z$ .

1. Правила отбора для тензорных операторов. Векторная модель.

2. Вычислить вероятность найти частицу в состоянии с орбитальным моментом  $l=0$ , если волновая функция равна  $\psi = A \sin^2 \theta \cos^2 \varphi$ .

1. Стационарные состояния заряженной бесспиновой частицы в однородном магнитном поле. Уровни Ландау. Вырождение.

2. Вычислить вероятность найти частицу в состоянии с орбитальным моментом  $l=0$ , если волновая функция равна  $\psi = A \sin \theta$ .

1. Орбитальный момент. Собственные значения и собственные функции.

2. Доказать, что в стационарных состояниях дискретного спектра равны нулю среднее значение импульса частицы и действующей на нее силы.

1. Разделение переменных в центрально-симметричном поле. Оператор радиального импульса.

2. Оценить время распыливания волнового пакета с характерным размером  $a$ , движущегося со скоростью  $v$ .

1. Атом водорода и его спектр.

2. Частица находится в кулоновском поле в состоянии с квантовыми числами  $l = n-1$ . Найти среднее значение радиуса.

1. Правила отбора для тензорных операторов. Векторная модель.

2. Используя соотношение неопределенности, оценить энергию основного состояния в потенциале  $U(x) = a x^6$ .

1. Временное уравнение Шрёдингера. Задача с начальными условиями.

2. В состоянии частицы, заданном волновой функцией  $\psi = A \cos^3 \varphi$ , найти вероятность различных значений  $m$  проекции углового момента на ось  $z$  и  $\langle l_z \rangle$ .

1. Атом водорода и его спектр.

2. Электрон находится в атоме водорода в состоянии  $2p$  с проекцией углового момента на ось  $x$  равной  $m=1$ . Найти среднее значение оператора квадрупольного момента  $Q_{ij}=3x_i x_j - \delta_{ij} r^2$ .

1. Разделение переменных в центрально-симметричном поле. Оператор радиального импульса.

2. Найти энергию основного состояния для двумерного атома водорода  $H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m} - \frac{e^2}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ .

1. Плотность тока и уравнение непрерывности для уравнения Шрёдингера.

2. Частица находится под действием постоянной силы,  $H = p^2/(2m) - Fx$ . При  $t=0$ ,  $\psi(x,0) = A \exp(-x^2/a^2 + iqx)$ . Используя уравнение Гайзенберга, найти среднее значение  $x$  в момент времени  $t \neq 0$ .

1. Операторы физических величин, собственные функции и собственные значения.

2. Найти энергию основного состояния и среднее значение радиуса в потенциале  $U(r) = -\alpha/r + \beta/r^2$ ,  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$ .

1. Периодический потенциал. Оператор сдвига. Теорема Блоха.

2. Определить зависимость энергии конечного фотона от угла рассеяния на покоящемся электроном.

1. Уравнение Шрёдингера в электромагнитном поле. Калибровочная инвариантность.

2. Как преобразуется волновая функция при переходе в движущуюся систему отсчета?

1. Соотношение неопределенности между операторами  $x$  и  $p$ .

2. Найти среднее значение  $r$  для электрона в атоме водорода с квантовыми числами  $l = n-1$ .

1. Линейный осциллятор, уровни энергии и волновые функции.

2. Найти энергию основного состояния для двумерного атома водорода,  $H = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2m} - \frac{e^2}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ .

1. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша-Гордана.

2. Найти, при каком значении параметра  $a$  исчезает нечетное связанное состояние в потенциале  $U(x) = -G \delta(x+a) - G \delta(x-a)$ .

1. Орбитальный момент, собственные значения и собственные функции.

2. Найти энергию основного состояния и среднее значение радиуса в потенциале  $U(r) = -\alpha/r + \beta/r^2$ ,  $\alpha > 0$  и  $\beta > 0$ .

1. Разделение переменных в центрально-симметричном поле. Свойства радиальной волновой функции.

2. При каких  $m$  и  $m'$  отличен от нуля матричный элемент  $\langle m | xyz | m' \rangle$ ?

1. Атом водорода, собственные функции и спектр.

2. Частица находится в поле  $U(x) = -G \delta(x)$ . При  $t=0$   $\psi(x,0) = e^{-|x|/b} / \sqrt{b}$ . Найти вероятность того, что при  $t \rightarrow \infty$  частица окажется в основном состоянии.

**Форма экзаменационного билета представлена на рисунке**

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

**Лист актуализации рабочей программы  
по дисциплине «Квантовая теория 1»  
по направлению подготовки 03.03.02 Физика  
Профиль «Общая и фундаментальная физика»**

№	Характеристика внесенных изменений (с указанием пунктов документа)	Дата и № протокола Учёного совета ФФ НГУ	Подпись ответственного