

**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 МЕХАНИКА 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	Лабораторные занятия	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	144	32	48	10	16	14	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 112 часов											
Компетенции: ОПК-1											

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

С.В. Цыбуля

Новосибирск, 2022

Содержание

Аннотация3

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.5
2. Место дисциплины в структуре образовательной программы5
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 дисциплины7
5. Перечень учебной литературы.9
6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся.10
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.10
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.10
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.10
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.11

Аннотация

к рабочей программе дисциплины курса «Квантовая механика 1»

Направление: **03.03.02 Физика**

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

Программа курса «Квантовая механика 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. Дисциплина изучается студентами третьего курса физического факультета.

Целью курса является обучение студентов-физиков основам квантово-механического подхода в решении задач, применяемым в квантовой физике. 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 и т.д.

Дисциплина нацелена на формирование у выпускника следующей общепрофессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p>ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности</p>	<p>ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p>ОПК-1.2. Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Знать: основные понятия квантовой механики, свойства коммутирующих операторов, решение уравнения Шрёдингера квантового гармонического осциллятора, правило квантования Бора-Зоммерфельда, сферические функции.</p> <p>Уметь: делать оценки на основе размерных величин, составлять и разрешать уравнение Шрёдингера для простых квантовых систем, решать нестационарное уравнение Шрёдингера, пользуясь разложением по стационарным состояниям, рассчитывать вероятности перехода из начального состояния в конечное в системах со слабым возмущением.</p> <p>Владеть: математическими приемами при решении уравнения Шрёдингера,</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		операторным формализмом.

Курс рассчитан на один семестр (5-й). Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, лабораторные работы, индивидуальная работа с преподавателем, задачи для самостоятельного решения, консультации, самостоятельная работа студента, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения

Промежуточная аттестация: экзамен

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.

Дисциплина «Квантовая механика 1» представляет собой начальный курс квантовой физики, предназначенный для обучения студентов-физиков всех специальностей.

Целью курса является обучение студентов-физиков основам квантово-механического подхода в решении задач, применяемым в квантовой физике. 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 и т.д.

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
ОПК-1. Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности	<p>ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p> <p>ОПК-1.2. Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Знать: основные понятия квантовой механики, свойства коммутирующих операторов, решение уравнения Шрёдингера квантового гармонического осциллятора, правило квантования Бора-Зоммерфельда, сферические функции.</p> <p>Уметь: делать оценки на основе размерных величин, составлять и разрешать уравнение Шрёдингера для простых квантовых систем, решать нестационарное уравнение Шрёдингера, пользуясь разложением по стационарным состояниям, рассчитывать вероятности перехода из начального состояния в конечное в системах со слабым возмущением.</p> <p>Владеть: математическими приемами при решении уравнения Шрёдингера, операторным формализмом.</p>

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Дисциплина «Квантовая механика 1» изучается в осеннем семестре студентами третьего курса бакалавриата физического факультета, обучающимися по направлению подготовки 03.03.02 Физика. Курс является обязательной дисциплиной, реализуемой кафедрой теоретической физики. Для его восприятия требуется предварительная подготовка студентов по таким физическим дисциплинам как электродинамика, аналитическая механика, а также по математике (линейная алгебра, дифференциальное и интегральное исчисления, ряды Фурье, численные методы решения систем линейных уравнений и др.).

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.

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	Лабораторные занятия	Прием заданий			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	144	32	48	10	16	14	18	4			2
Всего 144 часа / 4 зачётные единицы, из них: - контактная работа 112 часов											
Компетенции: ОПК-1											

Преподавание дисциплины предусматривает следующие формы организации учебного процесса: лекции, практические занятия, лабораторные работы, индивидуальная работа с преподавателем, консультации, самостоятельная работа студента и её контроль преподавателями с помощью заданий, экзаменов.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

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

Промежуточная аттестация: экзамен.

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

- занятия лекционного типа – 32 часа;
- практические занятия – 48 часов;
- лабораторные занятия – 10 часов;
- прием заданий – 16 часов
- самостоятельная работа обучающегося в течение семестра, не включая период сессии – 14 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультация и экзамен) – 24 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, практические занятия, лабораторные занятия, групповые консультации, экзамен) составляет 112 часов.

4. Структура и содержание дисциплины

Дисциплина «Квантовая механика 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 перед экзаменом (часов)	Промежуточная аттестация (в часах)
			Всего	Аудиторные часы				Сам. работа во время занятий (не включая период сессии)	Сам. работа во время промежуточной аттестации		
				Лекции (кол-во часов)	Практические занятия (кол-во часов)	Лабораторные работы	Прием заданий				
1	Введение в квантовую теорию. Соотношение неопределённостей.	1	6	2	2		1	1			
2	Оператор Гамильтона, уравнение Шрёдингера. Операторы физических величин.	2	8	2	4		1	1			
3	Плотность потока. Одномерное уравнение Шрёдингера.	3	8	2	2	2	1	1			
4	Прямоугольные ямы и δ -ямы. Одномерное рассеяние.	4	10	2	4	2	1	1			
5	Эрмитовы операторы. Коммутаторы. Измеримость величин.	5	5	2	2		1				
6	Временное уравнение Шрёдингера. Задача с начальными условиями.	6	10	2	4	2	1	1			
7	Гейзенберговское представление. Теорема о вирiale.	7	6	2	2		1	1			
8	Гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения.	8	10	2	4	2	1	1			
9	Вариационный принцип.	9	6	2	2		1	1			
10	Периодический потенциал. Теорема Блоха.	10	10	2	4	2	1	1			
11	Трёхмерное уравнение Шрёдингера.	11	6	2	2		1	1			
12	Орбитальный момент. Повышающие и понижающие операторы.	12	8	2	4		1	1			
13	Собственные функции и спектр атома водорода.	13	6	2	2		1	1			
14	Стационарная теория возмущений.	14	8	2	4		1	1			
15	Квазиклассическое приближение. Правило квантования Бора-Зоммерфельда.	15	6	2	2		1	1			
16	Квазистационарные состояния. α -распад.	16	5	2	4		1				
17	Самостоятельная работа в период подготовки к промежуточной аттестации		18					18			
18	Индивидуальная работа преподавателей										
19	Консультации		4						4		
20	Экзамен		2							2	
	Всего		144	32	48	10	16	14	18	4	2

Программа и основное содержание лекций (32 часа)

1. Квантовая природа света. Излучение абсолютно чёрного тела. Фотозффект. Эффект Комптона. Волновые свойства частиц. Опыт Резерфорда, стабильность атомов. Модель Бора. Волна де Бройля. Дифракция электронов. Корпускулярно-волновой дуализм. (2 часа)
2. Уравнение Шрёдингера. Вероятностная интерпретация волновой функции. Оператор Гамильтона. Зависимость волновых функций от времени. Фазовая и групповая скорости. Координатное и импульсное представления. Соотношение неопределённостей, оценки. Операторы физических величин. Измерения в квантовой механике. (2 часа)
3. Плотность тока, уравнение непрерывности. Одномерное уравнение Шрёдингера. Стационарные решения. Квантование энергии. Невырожденность уровней энергии. Чётные и нечётные решения. (2 часа)
4. Яма с бесконечными стенками и прямоугольная потенциальная яма. Мелкая яма. Осцилляционная теорема. Одномерное рассеяние. Рассеяние на ступеньке. Подбарьерное прохождение и надбарьерное отражение. (2 часа)
5. Эрмитовы операторы. Ортогональность и полнота системы собственных функций. Дираковские обозначения. Коммутаторы. Измеримость величин. Вывод соотношения неопределённостей. (2 часа)
6. Временное уравнение Шрёдингера. Задача с начальными условиями. Пример эволюции в двойной дельта-яме. (2 часа)
7. Оператор эволюции. Гейзенберговское представление. Теорема Эренфеста. Теорема о вириале. (2 часа)
8. Гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения. Когерентные состояния. Нулевые колебания и эффект Казимира. (2 часа)
9. Вариационный принцип. Прямой вариационный метод. (2 часа)
10. Периодический потенциал. Оператор сдвига. Теорема Блоха. Периодическое поле дельта-ям. (2 часа)
11. Трёхмерное уравнение Шрёдингера. Задача двух тел. Разделение переменных в центрально-симметричном поле. (2 часа)
12. Орбитальный момент. Собственные значения и собственные функции. Повышающие и понижающие операторы. Чётность. Оператор поворота. (2 часа)
13. Радиальная волновая функция, граничные условия в нуле. Атом водорода. Собственные функции. Спектр. Кулоновское вырождение. Основное и первое возбуждённое состояния. (2 часа)
14. Стационарная теория возмущений. Производная энергии по параметру. Вырожденный случай. Непересечение уровней. Поляризуемость атома водорода. Силы Ван-дер-Ваальса. (2 часа)
15. Квазиклассическое приближение. Критерий применимости. Правила шивки. Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Плотность состояний в фазовом пространстве. Нормировка квазиклассической волновой функции. Применение правила квантования Бора-Зоммерфельда для трёхмерного случая. (2 часа)
16. Квазистационарные состояния. α -распад. (2 часа)

Программа практических занятий (48 часов)

1. Волны де Бройля, потенциальный ящик, оценки энергии связи из соотношения неопределённостей. (2 часа)
2. Волновой пакет. Фазовая и групповая скорости. (2 часа)
3. Прямоугольные и дельта ямы. (6 часов)
4. Волновые функции непрерывного спектра, одномерное рассеяние, коэффициенты прохождения и отражения. (3 часа)

5. Эрмитовы операторы, коммутаторы. (1 час)
6. Эволюция волновой функции со временем. Задачи с начальными условиями. Гейзенберговское представление. (4 часа)
7. Линейный осциллятор. Осциллятор в операторном формализме; операторы \hat{a} , \hat{a}^+ . (6 часов)
8. Прямой вариационный метод. (2 часа)
9. Оператор сдвига, движение в периодическом поле. (2 часа)
10. Момент импульса. Собственные значения и собственные функции. (6 часа)
11. Движение в центральном поле. Атом водорода. (6 часа)
12. Стационарная теория возмущений. Случай невырожденного и вырожденного спектров. (4 часа)
13. Квазиклассическое приближение. Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Оценка времени жизни квазистационарного состояния. (4 часа)

Лабораторные работы (10 часов)

1. Прямоугольные ямы и δ -ямы. (2 часа)
2. Одномерное рассеяние. Коэффициенты отражения и прохождения. (2 часа)
3. Спектр гармонического осциллятора. (2 часа)
4. Временное уравнение Шрёдингера. Задача с начальными условиями. (2 часа)
5. Потенциалы с несколькими ямами. Периодический потенциал. (2 часа)

Прием заданий

Индивидуальная работа с преподавателем проводится в компьютерном классе. Проводится прием и разбор заданий. Его трудоемкость составляет – 16 часов.

Самостоятельная работа студентов (32 часа)

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям.	4
Решение заданий	4
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	6
Подготовка к экзамену	18

5. Перечень учебной литературы.

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). (1 экз.)
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Краткий курс теоретической физики. Кн. 2: Квантовая механика. — Москва: Наука, 1972. — 368 с.: ил. (160 экз.)
3. Зелевинский В.Г. Лекции по квантовой механике. — 2-е изд., испр. и доп. — Новосибирск: Сиб. унив. изд-во, 2002. — 498 с.: ил. (Ч1- 2 экз., Ч2- 2 экз.)
4. Сербо В.Г., Хриплович И.Б. Квантовая механика: учебное пособие. — Новосибирск: Редакционно-издательский центр НГУ, 2008. — 273 с.: граф. .
URL: <http://e-lib.nsu.ru/dsweb/Get/Resource-2565/page00000.pdf>.
5. Гинзбург И.Ф. Основы квантовой механики (нерелятивистская теория). — Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018. — 493 с.: ил. (40 экз.)
6. Борн М. Атомная физика. — 3-е изд. — М.: Мир, 1970. — 484 с. (24 экз.)

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

1. 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.

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;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

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.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

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

Для реализации дисциплины «Квантовая механика 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.

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

В течение семестра проводится прием заданий, а в середине семестра контрольная работа по группам. Результаты текущего контроля служат основанием для выставления оценок в ведомость контрольной недели на факультете, а решение, и сдача всех задач из задания является необходимым условием получения положительной оценки на экзамене.

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 в части, относящейся к формированию способности использовать специализированные знания в области физики сплошных сред в профессиональной деятельности.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ОПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенции принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда компетенция освоена не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины

Таблица 10.1

Индикатор	Результат обучения по дисциплине	Оценочные средства
<p>ОПК-1.1. Применяет математический аппарат, теоретические и методологические основы математических дисциплин для решения профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Знать: основные понятия квантовой механики, свойства коммутирующих операторов, решение уравнения Шрёдингера квантового гармонического осциллятора, правило квантования Бора-Зоммерфельда, сферические функции.</p>	<p>Опрос Контрольная работа Экзамен.</p>
<p>ОПК -1.2. Использует теоретические основы базовых разделов математических и естественнонаучных дисциплин при решении профессиональных задач в области физики и смежных с ней областях.</p>	<p>Уметь: делать оценки на основе размерных величин, составлять и разрешать уравнение Шрёдингера для простых квантовых систем, решать нестационарное уравнение Шрёдингера, пользуясь разложением по стационарным состояниям, рассчитывать вероятности перехода из начального состояния в конечное в системах со слабым возмущением. Владеть: математическими приемами при решении уравнения Шрёдингера, операторным формализмом.</p>	<p>Опрос Контрольная работа Экзамен.</p>

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

Таблица 10.2

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	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.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно

			количество негрубых ошибок.	ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	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 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

Задание №1

1. Абсолютно твёрдый шарик с массой $m = 1\text{г}$ подпрыгивает над идеально отражающей горизонтальной плитой в однородном поле тяжести g . Оценить с помощью соотношения неопределённостей минимальную энергию шарика и неопределённость в его положении по вертикали в этом состоянии. Провести такую же оценку для нейтрона. Ответы довести до чисел.

2. В момент времени $t = 0$ свободная частица массы m находится в состоянии, описываемом волновой функцией

$$\psi(x, 0) = A \exp\left(\frac{ip_0x}{\hbar} - \frac{x^2}{2a^2}\right).$$

При $t > 0$ найти средние значения координаты $\overline{x(t)}$ и импульса $\overline{p(t)}$, их неопределённостей $\overline{(\Delta x(t))^2}$ и $\overline{(\Delta p(t))^2}$, а также распределения по координате $dW(x, t) / dx$, импульсу $dW(p, t) / dp$ и энергии $dW(E, t) / dE$. С чем связано расплывание пакета?

3. Частица движется в поле трёх дельта-ям $U(x) = -G[\delta(x + a) + \delta(x) + \delta(x - a)]$. При каком значении параметра a в этом поле появляется второе (третье) связанное состояние? Найти уровни энергии и волновые функции стационарных состояний при условии $mGa / \hbar^2 \gg 1$.

4. При $t = 0$ состояние линейного осциллятора с частотой ω задано волновой функцией $\psi(x, 0) = A(1 + x/a)e^{-x^2/2a^2}$, где $a = \sqrt{\hbar/m\omega}$. Определить средние значения координаты и импульса, а также распределения по координате, импульсу и энергии при $t > 0$. К чему сводится действие оператора $\exp(i\pi\hat{a}^\dagger\hat{a})$ на $\psi(x, t)$?

Задание №2

5. Найти вариационным методом энергию основного состояния частицы в однородном поле тяжести g , когда её движение ограничено снизу идеально отражающей плоскостью. Использовать пробную функцию вида $\psi(x, \lambda) = Axe^{-\lambda x^2}$ при $x \geq 0$. Сравнить ответ с точным значением $E_0 = 1,856(mg^2\hbar^2)^{1/3}$ и результатом задачи 1.

6. Найти уровни энергии и волновые функции стационарных состояний частицы массы m , движущейся по окружности радиуса R в поле $U(\varphi) = G\delta(\varphi)$, $G > 0$. Соответствующее уравнение Шрёдингера имеет вид

$$\left(\frac{-\hbar^2}{2mR^2} \frac{d^2}{d\varphi^2} + G\delta(\varphi) \right) \psi(\varphi) = E\psi(\varphi).$$

Какова энергия основного состояния для случая, когда $mGR^2/\hbar^2 \ll 1$?

7. Найти закон преобразования собственных функций оператора момента Y_{11} , Y_{10} , Y_{1-1} при повороте системы координат на угол α вокруг оси y . Указание: представить сферические функции в виде

$$Y_{11}(\theta, \varphi) = -\sqrt{\frac{3}{8\pi}} \frac{x+iy}{r}, \quad Y_{10}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{4\pi}} \frac{z}{r}, \quad Y_{1-1}(\theta, \varphi) = \sqrt{\frac{3}{8\pi}} \frac{x-iy}{r}.$$

Определить вероятности возможных значений проекции момента на повернутую ось z' и среднее значение l'_z для каждого из указанных состояний.

8. Трёхмерный ротатор описывается гамильтонианом $\hat{H} = \hbar^2 \hat{l}^2 / 2I$, где I — момент инерции тела. Его волновая функция в момент времени $t = 0$ имеет вид $\psi(\theta, \varphi, 0) = A \sin^2 \theta \cos^2 \varphi$. Найти реализующиеся в этом состоянии значения l , l_z , их вероятности и среднее значение \hat{l}^2 . Найти также $|\psi(\theta, \varphi, t)|^2$ при $t > 0$.

9. Определить среднее магнитное поле в центре атома водорода, создаваемое орбитальным движением электрона, находящегося в $2p$ -состоянии с определённым значением m проекции момента на ось z .

Задание №3

10. Для описания относительного движения ядер в двухатомной молекуле можно использовать модельный гамильтониан вида

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m_\alpha} - Ze^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{a}{2r^2} \right),$$

где $m_{\text{я}}$ — приведённая масса ядер, a — равновесное межатомное расстояние порядка $\hbar^2 / m_e e^2$, а $Z e^2 / 2a$ — энергия диссоциации молекулы. Найти энергии связанных состояний $E_{n,l}$ и при не слишком больших квантовых числах, т.е. при $n, l \ll m_{\text{я}} / m_e$, получить колебательный и вращательный спектр двухатомной молекулы.

11. Найти по теории возмущений главные поправки к трём нижним уровням энергии двумерного осциллятора, обусловленные наличием в его потенциальной энергии слабой нелинейности и слабого отклонения частот колебаний по x и y от соотношения 2: 1:

$$U(x, y) = \frac{m\omega^2}{2} [(4 + \varepsilon)x^2 + y^2] + \alpha xy^2.$$

Проанализировать результаты в двух предельных случаях: а) $\varepsilon \rightarrow 0$ и б) $\alpha(\hbar / m\omega)^{3/2} \ll \varepsilon\hbar\omega$.

12. Найти по теории возмущений поправки к двум нижним уровням энергии атома водорода, помещённого в поле $V(r) = \frac{e^2}{R^3}(x^2 + y^2 - z^2)$, считая $R \gg a_{\text{Б}}$.

13. Найти в квазиклассическом приближении уровни энергии и волновые функции стационарных состояний для частицы, двигающейся в однородном поле тяжести g над идеально отражающей плоскостью. Нарисовать качественно $|\psi_n(x)|^2$ при $n \gg 1$ и сопоставить с классической плотностью вероятности $dW_{\text{кл}} / dx$. Сравнить результат расчёта энергии для $n = 0$ с оценками, полученными в задачах 1 и 5, и сделать вывод о справедливости квазиклассики для низших уровней.

Примерные вопросы на экзамен

1. Волновая функция, вероятностная интерпретация, среднее значение физической величины. Операторы координаты и импульса.
2. Свойства решений одномерного уравнения Шрёдингера, дискретный спектр, отсутствие вырождения, осцилляционная теорема, чётные и нечётные решения.
3. Одномерная прямоугольная потенциальная яма и δ -яма, условия сшивки. Мелкая яма, существование связанного состояния.
4. Решение уравнения Шрёдингера для линейного осциллятора, уровни энергии и волновые функции.
5. Эрмитовы операторы, вещественность собственных значений, ортогональность и полнота собственных функций (случай чисто дискретного спектра).
6. Свойства коммутирующих операторов, одновременная измеримость физических величин, признак вырожденности спектра.
7. Вывод соотношения неопределённостей для координаты и импульса. Его использование для оценки энергии основного состояния дискретного спектра.
8. Нестационарное уравнение Шрёдингера, стационарные решения, задача с начальными условиями, вероятности различных значений энергии и среднее значение энергии.
9. Дифференцирование операторов по времени, интегралы движения, теорема о вириале.
10. Оператор эволюции, гейзенберговское представление операторов и волновых функций, уравнения движения для операторов в гейзенберговском представлении.
11. Определение уровней энергии и волновых функций линейного осциллятора в операторном формализме.
12. Одномерное рассеяние, плотность потока вероятности, коэффициенты отражения и прохождения.

13. Движение электрона в периодическом поле, оператор сдвига, зонная структура спектра энергии.
14. Квазиклассическое приближение, критерий применимости, вид волновых функций, правило квантования Бора-Зоммерфельда.
15. Квазистационарные состояния, пример α -распада, оценка времени жизни (или ширины квазиуровня), квазиклассическое выражение для коэффициента прохождения.
16. Орбитальный момент, свойства операторов \hat{l}_i , определение собственных значений операторов \hat{l}^2 и \hat{l}_z из коммутационных соотношений и явного вида оператора \hat{l}_z .
17. Построение общих собственных функций $Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ операторов \hat{l}^2 и \hat{l}_z с помощью операторов \hat{l}_+ и \hat{l}_- , чётность волновых функций с определённым моментом l .
18. Движение в центрально-симметричном поле, радиальное уравнение Шрёдингера, поведение при $r \rightarrow 0$, кратность вырождения дискретных уровней $E_{n,l}$.
19. Решение уравнения Шрёдингера для атома водорода, уровни энергии и волновые функции.
20. Спектр энергии атома водорода, кратность вырождения уровней, волновые функции основного и первого возбуждённого уровней.

Пример экзаменационного билета

1. Дифференцирование операторов по времени, интегралы движения, теорема о вириале.
2. Оценить на каком по счёту квантовом уровне находится абсолютно упругий шарик с массой 1 г, подпрыгивающий на высоту 10 см над идеально отражающей плоскостью в однородном поле тяжести g .

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 механика 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